



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MARCELO OTAVIANO BARBOSA E SILVA

**PRODUÇÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL
(CAA) COM A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS DA
REGIÃO DE BELÉM-PA.**

Belém/Pa
2008



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MARCELO OTAVIANO BARBOSA E SILVA

**PRODUÇÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL
(CAA) COM A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS DA
REGIÃO DE BELÉM-PA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Materiais e Construção Civil.

Orientador: Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

Belém/Pa
2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central da UFPA

Silva, Marcelo Otaviano Barbosa e.

Produção do concreto auto-adensável (CAA) com a utilização de materiais da região de Belém-PA. / Marcelo Otaviano Barbosa e Silva; orientador, Paulo Sérgio Lima Souza. - Belém, 2008.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2008.

1. Concreto. 2. Concreto - Mistura. 3. Materiais de construção – I. Título.

CDD: 22. ed.: 624.1834

**Dedico este trabalho a meu pai, minha
mãe e ao meu tio João, por terem sempre
apoiado e incentivado os meus estudos.**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua luz e a minha família pelo incentivo, apoio e compreensão, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho;

À Universidade Federal do Pará, pela oportunidade de melhoria da minha formação acadêmica e profissional;

Ao curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, pela experiência acadêmica e profissional proporcionada;

Ao professor Paulo Sérgio Lima Souza, pela orientação durante a elaboração deste trabalho;

Ao laboratório de materiais de construção, pelo fornecimento dos materiais e equipamentos necessários à realização deste trabalho;

Aos alunos Marcos Guedes, Peterson Oliveira e Alison Moreira, pela valorosa ajuda durante a fase experimental deste trabalho;

À Paulo Barroso Engenharia por ter cedido o seu espaço físico e o equipamento de emissão de ondas ultra-sônicas para os ensaios de módulo de elasticidade deste trabalho;

À pré-moldados Belém pela doação do seixo rolado usado na produção dos concretos desta dissertação;

A todos que, mesmo não sendo citados, ofereceram-me apoio para a realização deste trabalho, deixo meu agradecimento e, desculpas pelos eventuais transtornos decorrentes da utilização das instalações e equipamentos.

SUMÁRIO

RESUMO	p.8
ABSTRACT	p.9
LISTA DE FIGURAS	p.10
LISTA DE TABELAS	p.14
LISTA DE EQUAÇÕES	p.16
LISTA DE SÍMBOLOS	p.18
1. INTRODUÇÃO	p.20
1.1. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	p.20
1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	p.23
1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA.....	p.25
1.4. LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	p.25
1.5. ESTRUTURA DA PESQUISA.....	p.26
2. CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL	p.27
2.1. DEFINIÇÕES.....	p.27
2.2. HISTÓRICO.....	p.28
2.3. VANTAGENS E APLICAÇÕES DO CAA EM OBRAS DE ENGENHARIA.....	p.31
2.4. PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO.....	p.34
2.4.1. Aspectos reológicos.....	p.34
2.4.2. Capacidade de espalhamento.....	p.40
2.4.3. Resistência à segregação.....	p.44
2.4.4. Habilidade passante.....	p.46
2.5. PRINCIPAIS ENSAIOS DO CAA NO ESTADO FRESCO.....	p.49
2.5.1. Considerações iniciais.....	p.49
2.5.2. Ensaio de espalhamento (Slump flow test).....	p.51
2.5.3. Ensaio de espalhamento T_{50} (Slump flow T_{50} test).....	p.53
2.5.4. Ensaio de escoamento (V-funnel test).....	p.55
2.5.5. Orimet test.....	p.56
2.5.6. Ensaio da caixa L (L-box test).....	p.57
2.5.7. Ensaio da caixa U (U-box test).....	p.60
2.5.8. Fill box test.....	p.62
2.5.9. Ensaio do anel de barras ou anel Japonês (J-ring test).....	p.64

2.5.10. Ensaio do tubo U (U-shaped pipe test).....	p.65
2.5.11. Análise crítica dos ensaios de trabalhabilidade.....	p.68
2.6. REQUISITOS PARA A DOSAGEM DO CAA	p.68
2.6.1. Materiais.....	p.68
2.6.1.1. Cimento	p.69
2.6.1.2. Adições minerais	p.70
2.6.1.3. Agregado miúdo	p.72
2.6.1.4. Agregado graúdo.....	p.74
2.6.1.5. Superplastificantes	p.75
2.6.1.6. Aditivo modificador de viscosidade.....	p.76
2.6.2. Requisitos para a mistura.....	p.77
2.6.2.1. Volume de pasta.....	p.77
2.6.2.2. Teor de argamassa	p.78
2.6.2.3. Teor de agregado graúdo.....	p.80
2.7. MÉTODOS DE DOSAGEM PROPOSTOS PARA O CAA.....	p.80
2.7.1. Método proposto por Okamura (1995)	p.80
2.7.1.1. Análise crítica do método	p.85
2.7.2. Método proposto por Gomes (2002).....	p.85
2.7.2.1. Análise crítica do método	p.90
2.7.3. Método proposto por Tutikian (2004).....	p.91
2.7.3.1. Análise crítica do método	p.97
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	p.98
3.1. INTRODUÇÃO	p.98
3.2. ESTUDO PILOTO	p.98
3.3. ALTERAÇÃO NO PROCESSO DE DOSAGEM DOS CAA's	p.102
3.4. MATERIAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	p.109
3.4.1. Cimento Portland.....	p.109
3.4.2. Metacaulim	p.109
3.4.3. Agregados	p.110
3.4.4. Aditivos.....	p.112
3.5. ENSAIOS REALIZADOS E DEFINIÇÃO DOS C.P's.....	p.113
3.6. PRODUÇÃO DOS C.P's	p.113
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	p.116

4.1. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	p.116
4.1.1. Relação entre o volume de pasta e o espalhamento.....	p.119
4.1.2. Relação entre o funil – V e o espalhamento T_{50cm}	p.122
4.1.3. Ensaios da caixa L e caixa U	p.125
4.1.4. Ensaios do tubo U	p.126
4.1.5. Considerações sobre os ensaios do CAA no estado fresco.....	p.127
4.2. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	p.128
4.2.1. Resistência à compressão axial	p.128
4.2.1.1. Diagramas de dosagem	p.131
4.2.1.2. Custo dos concretos em função da resistência à compressão.....	p.136
4.2.1.3. Custo em R\$/MPa em função da resistência à compressão	p.142
4.2.2. Resistência à tração.....	p.143
4.2.2.1. Relação entre resistência à tração e compressão axial	p.147
4.2.2.2. Previsões da resistência à tração.....	p.149
4.2.3. Módulo de elasticidade.....	p.150
4.2.3.1. Relação entre o módulo e resistência à compressão.....	p.153
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	p.156
5.1. CONCLUSÕES	p.156
5.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	p.159
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	p.160

RESUMO

O concreto auto-adensável (CAA), apesar de já ser usado de forma efetiva em várias partes do mundo, ainda é produzido de forma excepcional no Brasil, e em termos regionais praticamente inexistente. A falta de informações, quanto à utilização dos materiais locais e como estes irão interferir nas propriedades do CAA, são os principais motivos do não uso deste tipo de mistura pela engenharia local.

Neste trabalho foi proposta a produção do CAA com a utilização dos materiais (agregados miúdos e graúdos) usados correntemente nas obras de engenharia da região de Belém-Pa, com o auxílio do método proposto por Tutikian (2004). Para comprovar a eficiência destes materiais, foram dosadas 04 famílias de CAA, sendo 02 com a utilização de metacaulim e 02 sem a utilização de finos pozolânicos, ambas sem e com a utilização do aditivo modificador de viscosidade VMA. Em todos os casos o teor de argamassa dos CAA's foi aumentado em relação a um concreto convencional de referência produzido para posteriores comparações.

Observou-se que os CAA's produzidos apresentaram resultados dos ensaios no estado fresco compatíveis com os limites estabelecidos para os mesmos. E quanto ao estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão e módulo de elasticidade. Com base nos resultados foram feitas análises de custo entre os CAA's e o concreto referencial para 03 (três) faixas de resistência. O CAA produzido sem adições pozolânicas e sem VMA se mostrou o mais viável economicamente e comprovou a eficiência dos materiais locais para a produção deste tipo de mistura. Os resultados de resistência à tração se mantiveram compatíveis com a resistência à compressão apresentando praticamente o mesmo comportamento do concreto referencial. Por fim observou-se uma redução dos valores de módulo de elasticidade dos CAA's em relação ao concreto convencional.

Palavras-chave: Concreto auto-adensável (CAA), aditivo modificador de viscosidade (VMA), metacaulim, areia fina, seixo rolado.

ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC), in spite of already to be used in an effective way in several parts of the world, it is still produced in an exceptional way in Brazil and in regional terms practically to inexist. The lack of information, as for the use of the local materials and as they will interfere in the properties of CAA, are the main reasons of the non use of this mixture type on the local engineering.

In this work the production of CAA was proposed with the use of the materials (fine and coarse aggregates) used frequently in the works of engineering in Belém-Pa city, with the aid of the method proposed by Tutikian (2004). To prove the efficiency of these materials 04 families of CAA were dosed, being 02 with the metakaolin use and 02 without the use of the pozzolanic fines, both without and with the use of the viscosity modifying admixture VMA. In all of the cases the mortar composition of CAA's was increased in relation to a conventional concrete of reference produced for subsequent comparisons.

It was observed that produced CAA's presented results of the rehearsals in the compatible fresh properties with the established limits for the same ones. And as for the hardened mechanical properties, were accomplished to the compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity. In accordance with the results were made cost analyses between CAA's and the reference concrete for 03 (three) resistance strips. CAA produced without pozzolanic additions and without VMA was the most viable economically and it proved the efficiency of the local materials for the production of this mixture type. The results to the tensile strength stayed compatible with the resistance to the compressive strength presenting the same behavior of the reference concrete. Finally a reduction of the values of modulus of elasticity of CAA's was observed in relation to the conventional concrete.

Key-words: Self-compacting Concrete (SCC), viscosity modifying admixture (VMA), metakaolin, fine sand, gravel aggregate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Bloco de ancoragem da ponte Akashi Kaikyo no Japão (1988)	p.30
Figura 2.2. Detalhe da estrutura e da concretagem do Edifício Camila	p.30
Figura 2.3. Ponte Shin-Kiba no Japão (1990) construída com o CAA.....	p.32
Figura 2.4. Concretagem de seguimentos pré-moldados.....	p.33
Figura 2.5. Uso do CAA em elementos pré-moldados	p.33
Figura 2.6. Utilização do CAA em passarela na Flórida EUA (2004)	p.34
Figura 2.7. Fachada do Museu Iberê Camargo construído com CAA branco	p.34
Figura 2.8. Curvas de fluxo características de diferentes tipos de materiais.....	p.35
Figura 2.9. Modelo reológico de Bingham para concretos plásticos	p.36
Figura 2.10. Comportamento reológico para alguns tipos de concreto	p.37
Figura 2.11. Detalhe do reômetro BTRHEOM.....	p.38
Figura 2.12. Efeito de alguns materiais sobre os parâmetros reológicos do CAA..	p.39
Figura 2.13. Influência do seixo rolado no volume de vazios do concreto	p.41
Figura 2.14. Proporção dos materiais usados em concretos diferentes.....	p.42
Figura 2.15. Efeito da viscosidade em dois concretos distintos	p.45
Figura 2.16. Evolução do bloqueio provocado pelo agregado graúdo	p.47
Figura 2.17. Simulação do movimento do agregado graúdo.....	p.48
Figura 2.18. Tronco de cone de Abrams e medidas do Slump flow test	p.51
Figura 2.19. Característica do espalhamento de uma CAA sem segregação	p.51
Figura 2.20. Concreto em duas situações distintas.....	p.52
Figura 2.21. Procedimentos de execução do slump flow T_{50} test.....	p.53
Figura 2.22. Espalhamento de um CAA fluído em todas as direções.....	p.54
Figura 2.23. Formato e dimensões do equipamento Funil – V	p.55

Figura 2.24. Dimensões do Orimet test em conjunto com o anel Japonês	p.57
Figura 2.25. Medidas da caixa L (L-box)	p.58
Figura 2.26. Alguns problemas com o ensaio da caixa – L	p.60
Figura 2.27. Medidas da caixa U (U-box).....	p.60
Figura 2.28. Vistas e dimensões da caixa de preenchimento (fill box).....	p.62
Figura 2.29. Detalhe do ensaio do anel metálico Japonês	p.64
Figura 2.30. Detalhe do tubo – U pronto para receber o CAA.....	p.66
Figura 2.31. Medidas recomendadas do tubo em U.....	p.67
Figura 2.32. Influencia da areia sobre a tensão de cisalhamento do CAA	p.73
Figura 2.33. Forma e granulometria do seixo rolado da região de Belém-Pa	p.75
Figura 2.34. Influencia da quantidade de areia sobre o volume de argamassa	p.79
Figura 2.35. Comparação entre a proporção dos materiais de um CC e um CAA. p.82	
Figura 2.36. Procedimento de dosagem do CAA segundo Okamura.....	p.83
Figura 2.37. U-flow test e seus obstáculos R2 e R1, respectivamente	p.83
Figura 2.38. Influência do agregado graúdo no espalhamento do CAA	p.84
Figura 2.39. Slump flow para argamassas	p.84
Figura 2.40. Metodologia de dosagem segundo Gomes.....	p.87
Figura 2.41. Ensaio do cone de Marsh e curva log T x SP/c (%)	p.88
Figura 2.42. Equipamento para o ensaio do mini-slump	p.89
Figura 2.43. Ensaio do mini-slump sendo realizado.....	p.89
Figura 2.44. Diagrama de dosagem segundo o método do IPT/EPUSP	p.93
Figura 2.45. Passo-a-passo para a dosagem do CAA segundo Tutikian (2004)....	p.95
Figura 3.1. Custo dos CAA's do estudo piloto aos 7 dias.....	p.101
Figura 3.2. Custo dos CAA's do estudo piloto aos 28 dias.....	p.101
Figura 3.3. Curva granulométrica do agregado miúdo usado na pesquisa	p.111

Figura 3.4. Curva granulométrica do agregado graúdo usado na pesquisa.....	p.112
Figura 4.1. Relação entre o espalhamento e o traço do CAA 01	p.119
Figura 4.2. Relação entre o espalhamento e o traço do CAA 02	p.119
Figura 4.3. Relação entre o espalhamento e o traço do CAA 03	p.120
Figura 4.4. Relação entre o espalhamento e o traço do CAA 04	p.120
Figura 4.5. Relação entre o espalhamento e a tensão de escoamento	p.121
Figura 4.6. Relação entre o espalhamento T_{50cm} e o funil –V do CAA 01.....	p.122
Figura 4.7. Relação entre o espalhamento T_{50cm} e o funil –V do CAA 02.....	p.122
Figura 4.8. Relação entre o espalhamento T_{50cm} e o funil –V do CAA 03.....	p.123
Figura 4.9. Relação entre o espalhamento T_{50cm} e o funil –V do CAA 04.....	p.123
Figura 4.10. Relação entre ensaios empíricos e a viscosidade plástica	p.124
Figura 4.11. Uniformidade dos CAA's produzidos neste trabalho	p.124
Figura 4.12. Ensaio da caixa L.....	p.125
Figura 4.13. Ensaio da caixa U	p.126
Figura 4.14. Distribuição dos agregados graúdos no CAA 01.....	p.126
Figura 4.15. Distribuição dos agregados graúdos no CAA 03.....	p.127
Figura 4.16. Resultados dos ensaios de resistência à compressão.....	p.131
Figura 4.17. Diagrama de dosagem do concreto referencial.....	p.132
Figura 4.18. Diagrama de dosagem do CAA 01	p.132
Figura 4.19. Diagrama de dosagem do CAA 02.....	p.133
Figura 4.20. Diagrama de dosagem do CAA 03.....	p.133
Figura 4.21. Diagrama de dosagem do CAA 04.....	p.134
Figura 4.22. Consumo de cimento e redução percentual para os concretos de f_{c28} de 25MPa	p.137
Figura 4.23. Custo dos concretos produzidos e aumento percentual para os concretos de 25MPa	p.138

Figura 4.24. Consumo de cimento e redução percentual para os concretos de f_{c28} de 35MPa	p.139
Figura 4.25. Custo dos concretos produzidos e aumento percentual para os concretos de 35MPa	p.139
Figura 4.26. Consumo de cimento e redução percentual para os concretos de f_{c28} de 45MPa	p.140
Figura 4.27. Custo dos concretos produzidos e aumento percentual para os concretos de 45MPa	p.141
Figura 4.28. Custo (R\$/MPa) dos concretos aos 28 dias	p.142
Figura 4.29. Comparação da resistência à tração por flexão entre o concreto referencial e os CAA's	p.145
Figura 4.30. Comparação da resistência à tração por compressão diametral entre o concreto referencial e os CAA's	p.145
Figura 4.31. Aumento da resistência à tração na flexão dos CAA's produzidos ..	p.146
Figura 4.32. Aumento da resistência à tração por compressão diametral dos CAA's produzidos.....	p.146
Figura 4.33. Aumento médio da resistência à tração na flexão (f_{tF}) e por compressão diametral (f_{tD}) do concreto referencial e a média dos CAA's produzidos.....	p.147
Figura 4.34. Comparação entre um modelo de previsão de resistência à tração por flexão, a partir da resistência à compressão	p.149
Figura 4.35. Comparação entre modelos de previsão de resistência à tração por compressão diametral, a partir da resistência à compressão.....	p.150
Figura 4.36. Comparação entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade das famílias de concreto produzidas	p.152
Figura 4.37. Comparação entre os modelos de previsão de módulo de elasticidade, a partir da resistência média à compressão	p.154
Figura 4.38. Redução do módulo de elasticidade dos CAA's produzidos	p.154

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Faixa de valores para a os ensaios de caracterização do CAA.....	p.50
Tabela 2.2. Limite de resultados de espalhamento	p.53
Tabela 2.3. Limite de resultados para o espalhamento T_{50cm}	p.54
Tabela 2.4. Limite de resultados para o V-funnel	p.56
Tabela 2.5. Limite de resultados para o orimet test.....	p.57
Tabela 2.6. Limite de resultados para a caixa L (L-box test)	p.59
Tabela 2.7. Limite de resultados para a caixa U (U-box test).....	p.61
Tabela 2.8. Limite de resultados para a fill box	p.63
Tabela 2.9. Limites de resultados para o anel japonês (J-ring)	p.65
Tabela 2.10. Influencia das adições nas propriedades do CAA no estado fresco..	p.72
Tabela 2.11. Intervalo para o volume de pasta adotado para o CAA	p.78
Tabela 2.12. Intervalo para o volume de areia adotado para o CAA.....	p.79
Tabela 2.13. Intervalo para o volume de agregado graúdo adotado para o CAA...	p.80
Tabela 2.14. Proporção entre o fino pozolânico e o cimento.....	p.94
Tabela 2.15. Proporção entre finos não-pozolânicos e o agregado miúdo.....	p.94
Tabela 3.1. Teor de argamassa do estudo piloto	p.99
Tabela 3.2. Família de CAA sem VMA do estudo piloto.....	p.100
Tabela 3.3. Família de CAA com VMA do estudo piloto.....	p.100
Tabela 3.4. Intervalo para o teor de argamassa do CAA sem adições	p.103
Tabela 3.5. Teor ideal de argamassa para o CAA sem adições	p.104
Tabela 3.6. Teor ideal de argamassa para o CAA sem adições e com o VMA	p.105
Tabela 3.7. Teor ideal de argamassa para o CAA com adição e sem o VMA.....	p.105
Tabela 3.8. Teor ideal de argamassa para o CAA com adição e com o VMA.....	p.105

Tabela 3.9. Traços unitários secos em massa dos concretos produzidos.....	p.107
Tabela 3.10. Consumos dos materiais (kg/m^3) dos concretos produzidos.....	p.108
Tabela 3.11. Análise química e física do cimento usado na pesquisa	p.109
Tabela 3.12. Análise química e física do metacaulim utilizado.....	p.110
Tabela 3.13. Caracterização do agregado miúdo usado na pesquisa.....	p.111
Tabela 3.14. Caracterização do agregado graúdo usado na pesquisa	p.112
Tabela 3.15. Resumo dos ensaios mecânicos realizados experimentalmente	p.115
Tabela 4.1. Resultado dos ensaios de trabalhabilidade dos CAA's produzidos ...	p.118
Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de resistência à compressão	p.129
Tabela 4.3. Equações e coeficientes de correlação das curvas de dosagem	p.135
Tabela 4.4. Custo unitário dos insumos usados na produção dos concretos.....	p.136
Tabela 4.5. Custo dos concretos em função do consumo dos materiais	p.136
Tabela 4.6. Resultado dos ensaios de resistência à tração por flexão e compressão diametral para o concreto de referencia e os CAA's	p.144
Tabela 4.7. Relações entre a resistência à tração por flexão e compressão axial, e tração por compressão diametral e compressão axial	p.148
Tabela 4.8. Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.....	p.151

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1. Equação de Bingham para os parâmetros reológicos.....	p.36
Equação 2.2. Capacidade de preenchimento do CAA para o fill box test	p.63
Equação 2.3. Resistência à segregação do ensaio do tubo U	p.67
Equação 2.4. Deformabilidade do concreto segundo Okamura	p.84
Equação 2.5. Viscosidade do concreto segundo Okamura	p.84
Equação 2.6. Deformabilidade da argamassa segundo Okamura	p.84
Equação 2.7. Viscosidade da argamassa segundo Okamura	p.84
Equação 2.8. Lei de Abrams para o CAA com fino não pozolânico	p.96
Equação 2.9. Lei de Lyse para o CAA com fino não pozolânico.....	p.96
Equação 2.10. Lei de Molinary para o CAA com fino não pozolânico	p.96
Equação 2.11. Teor de argamassa seca para o CAA com fino não pozolânico.....	p.96
Equação 2.12. Materiais secos em massa para o CAA com fino não pozolânico ..	p.96
Equação 2.13. Consumo de cimento do CAA com fino não pozolânico em função da massa específica do concreto	p.96
Equação 2.14. Consumo de cimento do CAA com fino não pozolânico em função da massa específica dos materiais	p.96
Equação 2.15. Consumo total de água para o CAA com fino não pozolânico	p.96
Equação 2.16. Custo do m ³ do o CAA com fino não pozolânico.....	p.96
Equação 2.17. Lei de Abrams para o CAA com fino pozolânico	p.96
Equação 2.18. Lei de Lyse para o CAA com fino pozolânico.....	p.96
Equação 2.19. Lei de Molinary para o CAA com fino pozolânico	p.96
Equação 2.20. Teor de argamassa seca para o CAA com fino pozolânico.....	p.96
Equação 2.21. materiais secos em massa para o CAA com fino pozolânico	p.96
Equação 2.22. Consumo de aglomerantes do CAA com fino pozolânico em função da massa específica do concreto	p.96

Equação 2.23. Consumo de aglomerantes do CAA com fino pozolânico em função da massa específica dos materiais	p.97
Equação 2.24. Consumo de cimento para o CAA com fino pozolânico.....	p.97
Equação 2.25. Consumo de adição utilizada para o CAA com fino pozolânico	p.97
Equação 2.26. Consumo total de água para o CAA com fino pozolânico	p.97
Equação 2.27. Custo do m ³ do CAA com fino pozolânico.....	p.97
Equação 4.1. Velocidade de propagação da onda ultra-sônica	p.150
Equação 4.2. Módulo de elasticidade dinâmico	p.151
Equação 4.3. Relação entre módulo dinâmico e módulo estático.....	p.153

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{cj} = resistência de dosagem à compressão axial, à J dias de idade, em MPa;

a/c = relação água/cimento em massa (kg/kg);

a/agl = relação água/aglomerante em massa (kg/kg);

c = relação cimento/aglomerantes em massa (kg/kg);

f_p = relação finos pozolânicos/aglomerantes em massa (kg/kg);

f = relação finos não-pozolânicos/aglomerante em massa (kg/kg);

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

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

m = relação agregados secos/aglomerantes em massa (kg/kg);

α = teor de argamassa seca (kg/kg);

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

C_{agl} = consumo de material aglomerante por metro cúbico de concreto adensado (kg/m^3);

C_{fp} = consumo de fino pozolânico por metro cúbico de concreto adensado (Kg/m^3);

$SP\%$ = dosagem de aditivo superplastificante (l/m^3);

$VMA\%$ = dosagem de aditivo modificador de viscosidade (l/m^3);

γ = massa específica do concreto, medida "in loco" (Kg/m^3);

γ_c = massa específica do cimento (Kg/m^3);

γ_{fp} = massa específica dos finos pozolânicos (Kg/m^3);

γ_f = massa específica dos finos não-pozolânicos (Kg/m^3);

γ_a = massa específica do agregado miúdo (Kg/m^3);

γ_p = massa específica do agregado graúdo (Kg/m^3);

Ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico (%);

A = consumo de água potável por metro cúbico de concreto adensado (Kg/m^3);

$\$Con$ = custo do concreto por metro cúbico;

$\$c$ = custo do Kg do cimento;

$\$fp$ = custo do Kg de material fino pozolânico;

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

$\$a$ = custo do Kg do agregado miúdo;

$\$p$ = custo do Kg do agregado graúdo;

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

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

1. INTRODUÇÃO

1.1. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

O avanço tecnológico tem imposto aos materiais de construção, a necessidade por um desempenho estrutural cada vez maior. Com o concreto não poderia ser diferente, visto que este é o material de construção mais largamente usado em todo o mundo. Desta forma, o progresso das técnicas de cálculo estrutural, aliados ao maior conhecimento do comportamento mecânico deste material, tem feito surgir estruturas cada vez mais arrojadas em concreto armado e protendido.

Esta nova concepção das estruturas tem imposto ao concreto a necessidade de características especiais, tais como; a capacidade de fluir por entre espaços restritos apenas sob a ação de seu peso próprio, de forma coesa e sem apresentar segregação dos seus constituintes. Estas características fazem com que o concreto seja aplicado sem o uso de vibração mecânica, tanto interna quanto externa, o que pode reduzir o tempo do seu lançamento. Peças pré-fabricadas e com altas taxas de armadura por metro cúbico são alguns exemplos de componentes que necessitam de concretos com estas características especiais.

Por isso, ao final da década de 80 do século passado, alguns pesquisadores japoneses desenvolveram, na Universidade de Tóquio, um concreto com uma excelente deformabilidade no estado fresco, e alta resistência à segregação que ficou conhecido como *self-compacting concrete* (SCC) ou simplesmente *concreto auto-adensável* (CAA). Este concreto tem a capacidade de se moldar nas fôrmas sem vibração ou compactação e fluir por entre a armação sem que haja segregação dos materiais constituintes. Deste modo, assim como no advento do concreto de alto desempenho (CAD), a formulação do concreto auto-adensável está sendo considerada como uma evolução na tecnologia do concreto, onde se passou de um concreto convencional com quatro componentes básicos; cimento, agregados miúdo e graúdos e água, para um auto-adensável com, pelo menos, seis componentes. Neste contexto, tem-se a presença de outros materiais, tais como: os aditivos superplastificantes de última geração (hiperplastificantes),

adições minerais constituídas de finos, pozolânicos ou não, e eventualmente aditivos modificadores de viscosidade (VMA).

A capacidade de auto-adensamento do CAA é obtida com o equilíbrio entre a alta fluidez e com grande mobilidade e a capacidade de os seus componentes se manterem coesos no estado fresco. A alta fluidez é alcançada com o uso de aditivos superplastificantes de última geração e a coesão entre as suas partículas é conseguida com a substituição de parte do cimento ou agregado miúdo por materiais finos ou adições minerais, pozolânicos ou não (LISBÔA, 2004). Além disto, um alto volume de pasta, maior teor de argamassa e menor diâmetro máximo do agregado graúdo são características importantes para a obtenção do CAA (OKAMURA e OUCHI, 2003). Tudo isto sem deixar de atender os mesmos requisitos de resistência e durabilidade dos concretos convencionais.

A evolução deste tipo de concreto foi lenta ao longo dos anos, principalmente até o final do século passado. Porém já há uma quantidade de pesquisas recentes a respeito do assunto, por diversos países e para as mais diversas aplicações, que justificam o uso do CAA principalmente na indústria de pré-fabricados e em estruturas especiais densamente armadas (BARTOS, 2000; DOMONE, 2005; DE LARRARD, 2006).

Sua utilização, apesar de está aumentando, ainda é pequena, se forem analisadas todas as vantagens que este material permite obter (TUTIKIAN et al., 2006). Segundo Szecsy (2005), nos Estados Unidos os motivos para a não utilização do CAA são, principalmente: o desconhecimento dos empresários sobre esta nova tecnologia, a escassez de pessoal qualificado para a sua produção e controle em obra e o alto custo de produção. Porém ainda não faz parte desta equação os possíveis ganhos econômicos devido a uma melhor logística de lançamento, o que poderia reduzir o custo total de concretagem.

No Brasil, ainda há poucos estudos sobre o uso do concreto auto-adensável, fazendo com que haja pouco conhecimento dos métodos de dosagem e de todas as características reológicas deste tipo de concreto no estado fresco (TUTIKIAN, 2004; REPETTE, 2005). Outro ponto que contribui para o pouco uso do CAA é o seu maior custo unitário de produção em relação a um concreto convencional que ainda impedem as empresas de investir nesta nova tecnologia.

Porém, algumas pesquisas já mostram a viabilidade técnico-econômica do uso deste material (LISBÔA, 2004; TUTIKIAN et al., 2006; ALENCAR e HELENE, 2006). Segundo Tutikian et al. (2006), o custo total de um concreto auto-adensável (produção + lançamento) com f_{ck} de 80MPa se mostrou aproximadamente 3% mais baixo em relação a outro convencional na produção de peças pré-moldadas.

Deve-se ressaltar que, como este novo tipo de concreto é uma evolução do concreto convencional, são necessários maiores cuidados de produção, lançamento e controle da trabalhabilidade. Porém é interessante lembrar que tais cuidados não são excessivos, não havendo, de modo algum, motivo para o não uso desta tecnologia.

Com relação aos materiais, a possibilidade de se utilizar adições minerais, pozolânicas ou não, abre espaço para o aproveitamento de resíduos e subprodutos de outras indústrias, contribuindo positivamente para o desenvolvimento sustentável do concreto. Segundo Lisbôa (2004), é possível aproveitar subprodutos de mineração, como o resíduo de mármore e granitos gerados nas marmorarias, para a utilização em concretos auto-adensáveis como material fino não pozolânico. Com a incorporação de adições com ação pozolânica, como sílica ativa, cinza volante e cinza da casca de arroz em substituição ao cimento, também se obtém um ganho ecológico significativo (GOMES et al., 2003).

Além do ganho ecológico, outro fator importante é o possível aumento da durabilidade das estruturas feitas com o CAA. Pois com adição de materiais finos, a microestrutura do concreto ficará mais compacta, tanto por ação pozolânica quanto por efeito fíler, e menos sujeita a ataque de agentes deletérios como cloretos e sulfatos (MELO, 2005). Tem-se também a possibilidade de redução da quantidade de cimento que pode reduzir o calor de hidratação do concreto evitando, desta forma, o aparecimento de fissuras por retração térmica.

Outros fatores como a racionalização da mão-de-obra durante a concretagem, a economia de energia, melhor acabamento das peças concretadas e a eliminação de ruídos podem tornar o concreto auto-adensável perfeitamente viável nos próximos anos. Para Bernabeu (2000); Gomes et al. (2003) e EFNARC (2002), o CAA é a maior evolução em tecnologia do concreto nos últimos tempos e, portanto, com um potencial de uso muito grande ainda a ser explorado. Mas já adiantam que

este será o material de construção do futuro e que a maioria dos concretos produzidos será de natureza auto-adensável.

1.2.JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Face à crescente evolução de sistemas industrializados na construção civil nos últimos anos, com o desenvolvimento de novos materiais e técnicas de execução, é de fundamental importância o complemento e desenvolvimento desses sistemas para que ocorra a sua perfeita aplicação na prática. Esta perfeita aplicação pode ser entendida como menor interferência humana e maior produtividade com ganho de qualidade, que normalmente são requisitos dos novos sistemas de produção. Neste contexto o concreto auto-adensável se apresenta como um destes materiais que aproxima a construção civil de um sistema industrializado, capaz de alterar toda a sua cadeia produtiva que vai desde a produção até o seu lançamento e acabamento. Desta forma, é de fundamental importância a ampliação dos estudos referentes ao CAA, de modo que este possa vir a ser, em um futuro próximo, um material tão amplamente usado em estruturas reais quanto é hoje o concreto convencional.

Devido à existência de poucas referências a respeito da utilização do CAA em obras de engenharia, no Brasil e principalmente na região norte, faz-se necessário um estudo que possa avaliar a viabilidade técnica e econômica de suas propriedades quando comparadas com concretos convencionais. Por isso, um CAA produzido com os materiais da região de Belém-Pa, e que seja aplicável em estruturas reais, somente será possível com o desenvolvimento de pesquisas nesta área, tendo em vista as particularidades dos agregados encontrados na região.

Na cidade de Belém/Pa, os agregados miúdo e graúdo, utilizados na produção de concretos, apresentam características peculiares no que diz respeito as suas propriedades físicas e mecânicas. As areias utilizadas possuem granulometria mais fina do que a média nacional, situando-se o seu módulo de finura, segundo Júnior e Chagas (2007), no intervalo de 1,70 a 1,90, sendo necessário, portanto, mais água e mais pasta de cimento para uma mesma relação *a/c* e mesmo abatimento, em relação a misturas com areias mais grossas. Porém, no caso do

CAA, isto pode se tornar uma vantagem, a partir do momento em que será necessária uma menor quantidade ou mesmo a completa eliminação das adições minerais da mistura, necessárias para mantê-la coesa, o que é interessante devido ao alto preço destes materiais nesta região do país.

Com relação ao agregado graúdo, tem-se o uso de cascalho de beira de rio, denominado de seixo rolado, que apresenta, segundo Júnior e Chagas (2007), uma granulometria contínua, forma arredondada e textura lisa. Esta característica possibilita misturas mais compactas e que requerem menos água e menos pasta de cimento para manter uma mesma trabalhabilidade quando comparadas a misturas com agregado britado. Estudo realizado por Alencar e Helene (2006) mostra que existe a necessidade de se produzir o CAA com altos teores de argamassa ($\alpha > 60\%$), o que representa um aumento na dosagem de superplastificante e conseqüentemente no custo final de produção. Em concretos produzidos com seixo, este teor de argamassa pode ser reduzido, em função do maior empacotamento dos seus grãos, significando um ganho econômico devido à menor necessidade por finos e conseqüentemente uma menor dosagem de aditivos superplastificantes.

Portanto, existe a necessidade de iniciar um estudo com o objetivo de avaliar o uso do CAA com os materiais disponíveis nesta região, visando a possibilidade de redução de custo, quando comparados a concretos auto-adensáveis produzidos em outras regiões do país.

Um outro aspecto é qual o melhor método de dosagem a utilizar na produção destes concretos, quando do uso destes agregados, visto que ainda não existem trabalhos suficientes que possam indicar, com segurança, qual método é mais ou menos indicado para este tipo de mistura. Segundo Tutikian (2004), é possível produzir concretos auto-adensáveis através do aperfeiçoamento do método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1992), com a utilização de materiais de qualquer região. Porém, apenas após os ensaios de trabalhabilidade e de resistência mecânica, bem como a avaliação dos custos de produção, é que estas expectativas poderão ser confirmadas ou não. Em função deste contexto tem-se a necessidade de avaliar as propriedades de concreto auto-adensável, produzidos a partir da adaptação do método de dosagem citado anteriormente e com materiais de uso corrente e já consagrados em obras de engenharia da região norte.

1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta pesquisa tem por objetivo principal produzir um concreto auto-adensável com a utilização de materiais usados nas obras de engenharia da região metropolitana de Belém/Pa, avaliando o seu desempenho através de ensaios realizados no estado fresco (espalhamento, espalhamento T_{50cm} , funil - V, Caixa L, Caixa U e Tubo U) e no estado endurecido (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração por flexão e módulo de elasticidade).

Como objetivos secundários pretende-se:

- ✓ Definir parâmetros, em função dos materiais da região, que adequem os procedimentos de dosagem a estes materiais.
- ✓ Determinar a curva de comportamento do método IPT/EPUSP para todas as famílias de concreto produzidas.
- ✓ Determinar o consumo de cimento por metro cúbico de todos os concretos produzidos e compara-los entre si;
- ✓ Comparar o custo de produção, por metro cúbico, entre um concreto convencional e os auto-adensáveis, em função de 03 (três) resistências à compressão pré-determinadas.
- ✓ Comparar o custo de produção, por metro cúbico, entre as famílias de concretos auto-adensáveis, também em função das resistências à compressão citadas anteriormente.
- ✓ Determinar o custo em R\$/MPa de cada família de concreto produzido, em função da resistência à compressão, e compará-los entre si.

1.4. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Nesta pesquisa foram avaliadas algumas propriedades gerais do concreto auto-adensável, bem como determinados materiais para a sua produção, tais como: apenas um tipo de cimento (CP II Z 32), agregado miúdo e agregado graúdo da região, bem como uma única adição pozolânica (metacaulim), limitando, desta

forma, a comparação das propriedades deste concreto com outros produzidos a partir de aglomerantes e adições minerais diferentes. Outro fator considerado limitante é a confecção destes CAA's usando apenas um método de dosagem, o que impede a avaliação do desempenho deste tipo de mistura, produzidas com os materiais da região, perante o uso de outros métodos de dosagem.

1.5. ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho está dividido em 5 (cinco) capítulos conforme citado abaixo.

No primeiro é feita uma pequena introdução a respeito do concreto auto-adensável (CAA), dando ênfase à importância do tema bem como à justificativa para o seu desenvolvimento, seus objetivos; principal e secundários, além das limitações e estrutura da pesquisa.

No segundo, são apresentadas a definição, o histórico, as vantagens, aplicações, uma análise dos diversos equipamentos utilizados para medir a trabalhabilidade do CAA, requisitos e materiais usados na produção do CAA, bem como alguns métodos de dosagem propostos.

No terceiro capítulo, é apresentada a metodologia de pesquisa usada na dissertação, bem como a análise dos materiais usados na produção dos concretos.

No quarto, são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de trabalhabilidade, resistência mecânica e módulo de elasticidade para os traços produzidos com materiais usados na região de Belém-Pa.

E finalmente, no quinto capítulo, constam as considerações finais a respeito dos resultados obtidos, bem como sugestões para futuras pesquisas.

2. CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)

2.1. DEFINIÇÕES

Entende-se por concreto auto-adensável (CAA), uma categoria de material cimentício que pode fluir através das fôrmas e armações (passivas ou ativas), de forma coesa e sem apresentar segregação dos seus constituintes, somente com a ajuda da força da gravidade e sem qualquer tipo de vibração interna ou externa. Sendo que estas características estão diretamente ligadas aos seus componentes e às suas proporções na mistura.

Segundo a *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems* (EFNARC, 2002), para que uma mistura de concreto seja considerada como auto-adensável, esta deverá apresentar três propriedades: fluidez para preencher todos os espaços no interior de uma fôrma, coesão para que a mistura se mantenha homogênea durante o fluxo através de barras de aço e de outras pequenas aberturas (habilidade passante), e resistência à segregação, de modo que a mistura se mantenha uniforme durante o processo de transporte e lançamento. Esta definição ganha importância a partir do momento em que fluidez, coesão e resistência à segregação são características que influenciam as propriedades do concreto no estado endurecido. Segundo Mehta e Monteiro (1994), as deficiências adquiridas devido à perda de trabalhabilidade, segregação e exsudação durante o lançamento e adensamento, podem prejudicar um concreto permanentemente e reduzir a sua vida útil.

Outro fator importante a considerar é a capacidade de o CAA dispensar o uso de vibração para o seu adensamento. O controle do índice de vazios da mistura é de fundamental importância para a resistência do concreto endurecido. Segundo Neville (1997), a resistência de um concreto a uma certa idade, curado adequadamente e a uma temperatura estabelecida, depende basicamente de dois fatores: a relação água/cimento e o grau de adensamento.

Deste modo, uma escolha criteriosa dos materiais que irão compor a mistura do CAA é fundamental para a sua obtenção, de modo que se possa atender,

não só as suas propriedades no estado fresco como também no estado endurecido, mantendo, desta forma, o seu desempenho durante a sua vida útil.

2.2.HISTÓRICO

Existem registros da utilização de um concreto que não exigia compactação ou adensamento externo para estruturas com características especiais, desde a década de 70 do século passado. Estruturas submersas ou com altas taxas de armação eram complicadas de serem concretadas a partir de um concreto com abatimento abaixo de 175 mm, que era o limite de abatimento recomendado pelo ACI (*American Concrete Institute*) até meados dos anos 70 (TUTIKIAN, 2004). O aumento da exsudação bem como a falta de coesão das misturas mais fluidas eram obstáculos para a produção de concretos com alta trabalhabilidade e resistências mecânicas adequadas. Porém, com o advento dos aditivos superplastificantes, puderam-se dosar concretos fluidos com valores de abatimento acima de 250 mm com redução significativa da relação água/cimento e conseqüentemente da exsudação e segregação dos seus componentes. Surgiu dessa forma a denominação, concreto auto-nivelante, para misturas com alta fluidez, porém altamente coesivas e com baixa tendência à segregação e exsudação.

Em 1973, nos setores britânico e noroeguês do mar do norte, foram construídas plataformas de perfuração e estocagem de petróleo com um concreto que apresentava alta trabalhabilidade e resistência à compressão variando de 43 à 70MPa. Estas estruturas eram compostas por elementos de concreto protendido e densamente armados. Além de serem instaladas em locais de difícil acesso, ainda deveriam ser resistentes à corrosão provocada pela água do mar, bem como às cargas extraordinárias devido à ação das ondas (BITTENCOURT et al., 2007). O uso de superplastificantes e de agregados de menores dimensões e com um grau de compactação maior foram decisivos para a obtenção de misturas com abatimentos da ordem de 220 mm.

Em 1981, foi erguida a estrutura em concreto armado mais alta da cidade de Nova York, com um concreto de alta trabalhabilidade. Os elementos de concreto densamente armados desse edifício de 68 andares foram construídos com um

concreto, cuja resistência à compressão ficou em torno de 56MPa e com abatimento de 230 mm. A necessidade de se descarregar e lançar este concreto em apenas ½ hora, devido às baixas temperaturas (-8°C á -18°C), obrigaram os construtores a produzirem uma mistura que pudesse ser lançada e adensada o mais rápido possível sem perda de qualidade (MEHTA E MONTEIRO, 1994). Foi usado um aditivo superplastificante e um acelerador de pega, isento de cloretos, para contrabalançar os efeitos do frio.

Em 1983, na cidade de Singapura, uma fundação monolítica em radier com alta densidade de armadura, com 11.000m³ de concreto de 35MPa e abatimento em torno de 250 mm, foi concretada em apenas 43 horas, apesar das temperaturas ambientes ficarem na faixa de 29 à 32°C. As velocidades de descarga, lançamento e adensamento foram fundamentais para evitar formação de “juntas frias” devido ao endurecimento precoce do concreto já lançado, em função das altas temperaturas (MEHTA E MONTEIRO, 1994). Para contrabalançar este problema, se utilizou um superplastificante retardador.

Estes são alguns exemplos de concretos com alta trabalhabilidade e que tiveram que ser lançados e adensados sem a necessidade de vibração e no menor espaço de tempo possível sem perder características como: consistência, coesão e resistência à segregação.

O moderno concreto auto-adensável foi desenvolvido no Japão para resolver o problema de baixa durabilidade das construções em concreto armado. Estruturas feitas em concreto convencional necessitam de compactação mecânica para serem adensadas e conseqüentemente apresentarem melhores resistências mecânicas e maior durabilidade. Devido à alta industrialização do Japão, ocorreu uma redução de pessoal qualificado que pudesse dar conta dos serviços de compactação dos concretos lançados, comprometendo, desta forma, a qualidade final das estruturas concretadas (OKAMURA, 1997). No ano de 1983 houve o início dos primeiros estudos, coordenados pelo professor Hajime Okamura, da universidade de Tóquio, que culminaram na primeira aplicação prática do CAA durante a concretagem dos blocos de ancoragem da ponte Akashi Kaikyo, em 1988 (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Bloco de ancoragem da ponte Akashi Kaikyo no Japão (1988).
Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

O Japão foi o primeiro país a utilizar o CAA em larga escala, sendo que até 2003 já apresentava 15% das obras moldadas in loco e 55% das obras em pré-moldados com a utilização deste concreto (OKAMURA e OUCHI, 2003). Na Europa e nos Estados Unidos o uso do CAA se deu de maneira mais efetiva no final dos anos 90 e ganhou grande aceitação, principalmente na indústria de pré-moldados, além de obras com altas taxas de armação dos seus elementos estruturais (BILBERG, 2000; PARIS et al., 2003; EFNARC, 2005; ABESC, 2006).

No Brasil, a primeira experiência prática com o concreto auto-adensável foi realizada em Goiânia, no final do ano de 2004, no Edifício Camila (Figura 2.2), com a consultoria do Professor André Geyer, da Universidade Federal de Goiás, onde foi dosado um CAA para fck de 20 MPa. Nesta obra o ganho econômico se deu devido principalmente à redução da mão-de-obra, bem como a eliminação do uso de vibradores durante o lançamento deste concreto.



Figura 2.2 – Detalhe geral da estrutura e da concretagem do Edifício Camila em Goiânia.
Fonte: Geyer (2005).

2.3. VANTAGENS E APLICAÇÕES DO CAA EM OBRAS DE ENGENHARIA

Se corretamente especificado, projetado e aplicado, o CAA pode propiciar uma série de ganhos diretos, tanto na qualidade final da estrutura quanto no orçamento da obra (REPETTE, 2005; GEYER, 2005; TUTIKIAN, 2007). Inúmeras são as vantagens que um concreto auto-adensável pode proporcionar a uma obra em comparação com o concreto convencional, dependendo da sua finalidade e da necessidade de utilização. Dentre elas pode-se destacar:

- ✓ Redução do custo de aplicação por m³ de concreto, em função da facilidade de aplicação, redução do consumo de energia devido à eliminação de equipamentos necessários para a concretagem, redução da mão-de-obra e aumento na velocidade de execução;
- ✓ Redução dos custos com possíveis acidentes de trabalho, devido ao número reduzido de operários envolvidos na concretagem, eliminação das possíveis doenças de trabalho que poderiam ser provocadas pelo uso de vibradores, bem como um ambiente de trabalho mais silencioso;
- ✓ Maior economia na execução de lajes em obras verticais, devido obter-se com o CAA uma laje praticamente auto-nivelada, reduzindo, assim, a quantidade de argamassa para contra-piso em uma posterior regularização da superfície e, conseqüentemente, reduzindo a sobrecarga na estrutura;
- ✓ Permitir maior liberdade arquitetônica na concepção de peças estruturais, sendo possível concretagens em fôrmas de seção reduzida e formatos arquitetônicos difíceis de serem obtidos com concreto convencional;
- ✓ Redução da permeabilidade, melhor acabamento superficial devido à eliminação de falhas de concretagem que ocorrem por deficiência de vibração e, conseqüentemente, maior durabilidade da estrutura;

- ✓ Proporcionar ao meio ambiente benefícios ecológicos, devido ao aproveitamento de resíduos industriais na forma de adições (pozolânicas ou não) na produção deste tipo de mistura.

O CAA pode ser usado tanto na indústria de pré-moldados, quanto dosado no canteiro de obras ou em centrais de concreto. Também pode ser lançado por bombeamento, guias ou simplesmente espalhado, comprovando, desta forma, a sua versatilidade se comparado ao concreto convencional (TUTIKIAN et al., 2006). Segundo Repette (2005), as restrições de uso do CAA são exatamente feitas à concretagem de peças em que a elevada fluidez não é desejada como, por exemplo, na concretagem de escadas moldadas in loco, rampas, desníveis e rebaixos não confinados por fôrmas nas lajes.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é quanto à estanqueidade das fôrmas, visto que o CAA, por ser uma mistura muito fluida, pode apresentar fuga de nata de cimento por entre pequenas aberturas ou falhas de fechamento dos painéis. Deste modo, o seu uso em obras verticais deve ser muito bem avaliado, principalmente quando da utilização de fôrmas de madeira que se deterioram com o tempo e podem provocar falhas de concretagem, comprometendo o acabamento e o desempenho das peças concretadas.

As Figuras 2.3 a 2.7 ilustram a utilização do CAA em obras no Japão, Europa, Estados Unidos e Brasil e mostram todo o potencial de uso deste material.



Figura 2.3 – Ponte Shin-Kiba no Japão (1990), ponte estaiada a ser construída com o CAA. Fonte: Okamura e Ouchi (2003).



Figura 2.4 – Concretagem dos segmentos pré-moldados do túnel de Yokohama no Japão (1994).
Fonte: Takeshi et al. (1994).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.5 – (a) Aspecto do CAA no estado fresco na produção de peças pré-moldadas em fábrica na Alemanha; (b) e (c) detalhe do acabamento superficial de peças concretadas com o CAA.
Fonte: EFNARC (2005).



Figura 2.6 – Utilização do CAA em passarela na Flórida EUA (2004), detalhe da armação.
Fonte: ABESC (2006).



Figura 2.7 – Detalhe da fachada do Museu Iberê Camargo e do CAA branco usado na sua construção.
Fonte: Silva Filho et al. (2004).

2.4. PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO

2.4.1. Aspectos reológicos

Como dito anteriormente, a capacidade de fluir por entre barras de aço de uma armadura e preencher todos os espaços vazios das fôrmas, apenas sob a ação do seu peso próprio, sem que haja perda de coesão e sem a segregação dos seus componentes, são as três propriedades fundamentais para que um concreto seja considerado como auto-adensável quando no estado fresco (EFNARC, 2002).

Segundo Zerbino e Barragán (2007), estas propriedades constituem uma das características principais do CAA, já que delas depende a qualidade final dos elementos estruturais concretados.

Desta forma, a obtenção do CAA está baseada principalmente no conhecimento das propriedades do concreto no estado fresco. Segundo Cincotto et al. (2007), o concreto fresco pode ser descrito como uma suspensão aquosa de partículas sólidas (agregados), que cobrem uma granulometria extensa, imersa em um fluxo viscoso e heterogêneo (pasta cimentícia), e que as suas propriedades variam ao longo do tempo devido a interações físicas e químicas.

Desta forma, é de fundamental importância o conhecimento das características reológicas¹ da mistura para que se possa entender o mecanismo que torna possível a produção do CAA. Segundo Zerbino e Barragán (2007), para definir o comportamento reológico de um fluido se recorre à denominada curva de fluxo, que representa a relação entre o esforço aplicado (τ , tensão de cisalhamento) e o gradiente de velocidade de deformação ($\dot{\gamma}$). A Figura 2.8 mostra as curvas de fluxo de diferentes tipos de materiais.

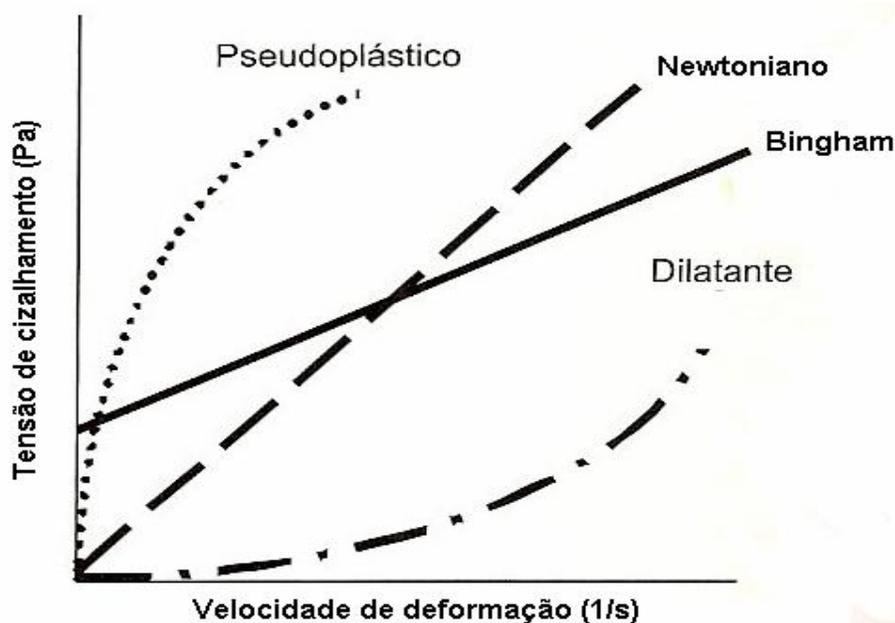


Figura 2.8 – Curvas de fluxo características de diferentes tipos de materiais.
Fonte: Zerbino e Barragán (2007)

¹ Reologia é a ciência que estuda a deformação e escoamento dos materiais (NAVARRO, 1997)

Segundo Dusseldorf et al. (2001), o comportamento reológico do concreto fresco é mais bem caracterizado por meio do modelo de *Bingham*, que é descrito pela Equação 2.1, e não inclui os concretos de consistência seca ou que sejam pobres em aglomerantes. Este modelo emprega dois parâmetros para caracterizar o movimento do CAA: a tensão de escoamento (τ_0), que representa a resistência à deformação em condições estáticas, e a viscosidade plástica (μ), que se pode associar a uma resistência crescente ao movimento. A Figura 2.9 representa a curva característica de fluxo segundo o modelo de Bingham.

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (\text{eq. 2.1})$$

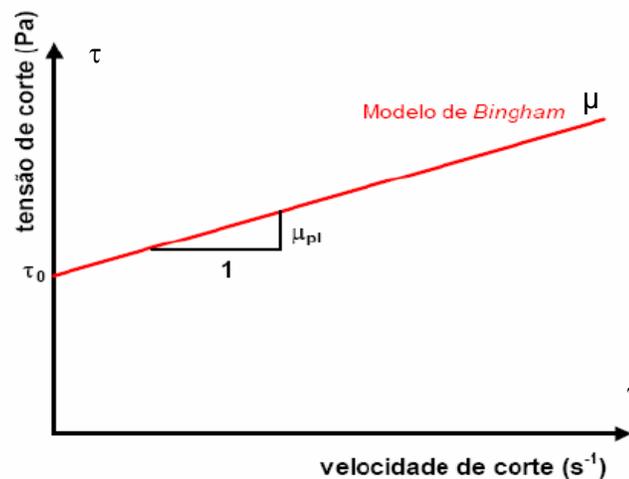


Figura 2.9 - Modelo reológico de Bingham para concretos plásticos
Fonte: Barros (2004).

Como se pode observar, a tensão de cisalhamento mínima necessária para que o escoamento se inicie é a tensão de escoamento a qual está relacionada ao estado de floculação e dispersão das partículas, assim como o declive da reta corresponde à viscosidade plástica, que é um indicativo da estabilidade da mistura (MELO, 2005). Essas partículas interagem quando em meio aquoso e essas interações exercem influência nas propriedades da mistura, tanto em repouso quanto sob fluxo, as quais podem apresentar diferentes comportamentos possíveis.

Além disso, Cincotto et al. (2007) comentam que em sistemas cimentícios a complexidade reológica é ainda maior, pois, além das forças de superfície que atuam sobre as partículas, há que se considerar a evolução da hidratação com o tempo. Com a evolução do enrijecimento da pasta, a tensão de escoamento e a

viscosidade aumentam gradativamente e toda essa alteração afeta a reologia dos concretos. Daí a necessidade de uma criteriosa avaliação dos parâmetros reológicos de um CAA, de modo que o mesmo esteja adequado às diferentes técnicas de aplicação, como por exemplo: bombeamento ou lançamento manual, tendo em vista o efeito de alguns fatores externos como a temperatura e o tempo de lançamento da mistura.

No CAA, a fluidez, a habilidade passante e a resistência à segregação são princípios fundamentais, porém em geral os dois primeiros se opõem ao último. Deste modo, para se conseguir tal mistura, a tensão de escoamento deve ser baixa, garantindo o aumento da fluidez, e a viscosidade deve ser moderada, para promover a estabilidade necessária (MELO 2006). É, então, preciso equilibrar estes dois parâmetros para se obter uma mistura, que seja fluida e com alta capacidade de escoamento, porém coesa o suficiente para manter unidos os seus constituintes. 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). Segundo Zerbino e Barragán (2007), uma combinação onde a viscosidade (μ) seja extremamente baixa pode implicar em riscos de segregação. Nielsson e Wallevic (2003) propõem uma zona de auto-compactabilidade baseada nos parâmetros reológicos do CAA, de modo a diferenciá-lo dos demais tipos de concreto. A Figura 2.10 ilustra as faixas para as propriedades reológicas de alguns tipos de concreto.

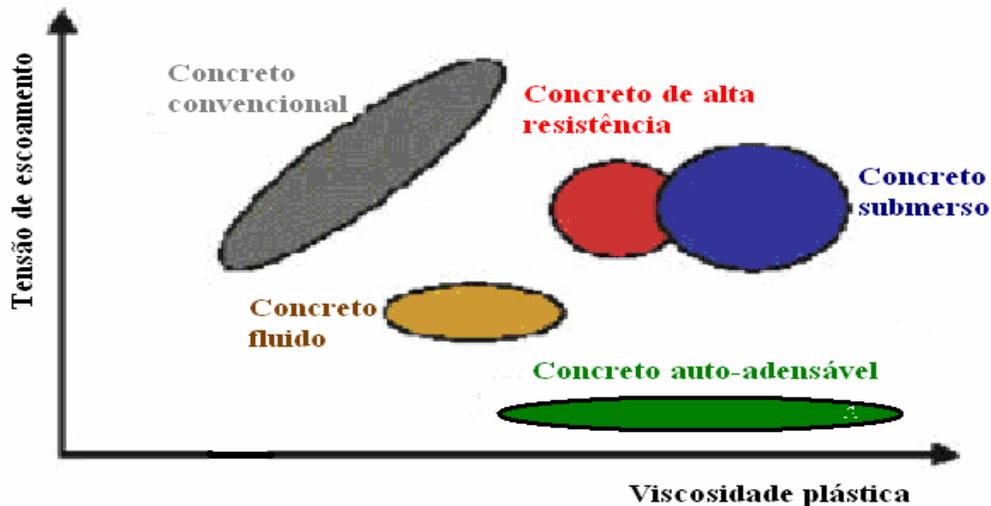


Figura 2.10: Comportamento reológico para alguns tipos de concreto
fonte: Nielsson e Wallevic (2003).

De acordo com este gráfico, pode-se observar que o CAA está situado na região de mais baixa tensão de escoamento e alta viscosidade plástica, enquanto que num concreto fluido “ τ_0 ” é um pouco maior e “ μ ” é menor, condição que se acentua no caso do concreto convencional. Muitas vezes, o conceito de concreto auto-adensável é confundido com concreto fluido. Porém o CAA se difere do concreto fluido por ser mais coeso e fluir mais lentamente.

De acordo com Velasco et al. (2005), os ensaios que determinam os parâmetros referentes ao modelo de Bingham são realizados em aparelhos denominados reômetros, sendo que dentre os mais utilizados para análise de pastas de cimento, argamassas ou concretos pode-se destacar os de pratos paralelos para concretos com abatimento superior a 100 mm e cujo diâmetro máximo dos agregados graúdos seja de 25 mm. O equipamento utiliza cerca de 7 litros de concreto fresco, onde é aplicado um torque ao cilindro externo a partir da rotação do cilindro interno, conforme a Figura 2.11a. Tal rotação se dá pela rotação de um sistema de pás que é ligado ao motor localizado sob o recipiente que acondiciona a amostra (Figura 2.11 b).

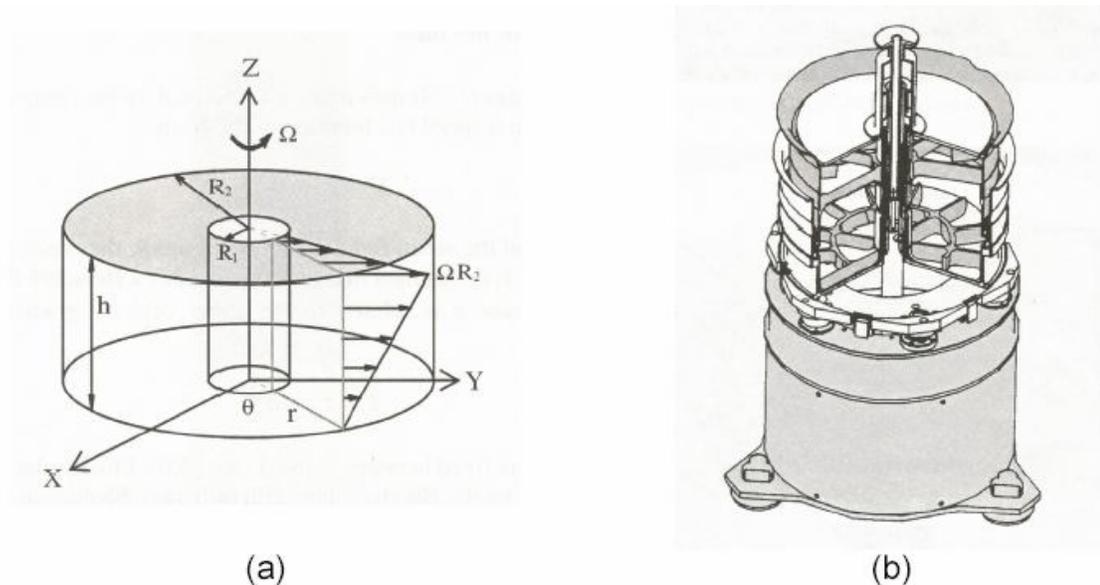


Figura 2.11 – a) Torque aplicado à mistura; b) reômetro BTRHEOM.
Fonte: Velasco et al. (2005)

O torque resultante da resistência do concreto ao cisalhamento é então correlacionado com a velocidade de rotação de modo a determinar os parâmetros tensão de escoamento (τ_0) e a viscosidade plástica (μ) que caracterizam a reologia

do material (VELASCO et al., 2005). Porém os reômetros são equipamentos relativamente complexos e de custo elevado, o que faz com que o seu uso seja restrito a alguns laboratórios. Por isso ensaios empíricos, mais práticos e baratos, são utilizados para determinar visualmente a capacidade de fluxo de uma determinada mistura de CAA, que está relacionada com a tensão de escoamento, e o tempo em que esta mistura flui por uma determinada superfície, que está relacionado com a viscosidade plástica da mesma.

Segundo Sugmata apud Melo (2005), a tensão de escoamento indica a distância entre as partículas da pasta, enquanto que a viscosidade representa a frequência de contato entre elas. Quanto maior for a distância entre estas partículas, menor será a frequência de contato entre a mesmas, e portanto, menores serão a tensão de escoamento e a viscosidade plásticas da mistura. Desta forma, para aumentar a fluidez da pasta, bastaria produzi-la com uma relação água/cimento alta ($a/c > 0,50$). Porém haveria um decréscimo na sua viscosidade, aumentando a possibilidade de segregação. Daí a necessidade do uso de aditivos superplastificantes de alta eficiência, pois é preciso dispersar as partículas dos aglomerantes sem o uso excessivo de água, e desta forma, baixar o valor da tensão de escoamento (τ_0) sem baixar em demasia a viscosidade (μ). Segundo Zerbino e Barragán (2007), a incorporação de ar reduz os dois parâmetros, porém à medida em que se aumenta o conteúdo de ar, os efeitos sobre a viscosidade são menores. A Figura 2.12 esquematiza o efeito da mudança nos conteúdos de água, superplastificante e ar incorporado nos parâmetros reológicos do CAA.

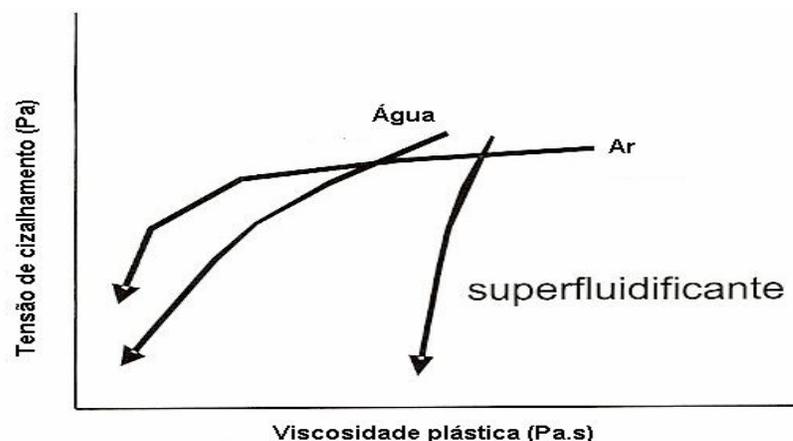


Figura 2.12 – Efeito do incremento no conteúdo de água, superplastificante e ar incorporado sobre os parâmetros reológicos do CAA.
Fonte: Zerbino e Barragán (2007).

2.4.2. Capacidade de Espalhamento

A primeira característica do CAA que deve ser levada em consideração durante um estudo de dosagem é que esta mistura deve-se apresentar fluida o suficiente, para caminhar e preencher os espaços internos das fôrmas, apenas sob a ação da força da gravidade e sem nenhum tipo de vibração externa. No que se refere à capacidade de escoamento ou espalhamento, existem duas características que devem ser levadas em conta: a capacidade de deformação, que está relacionada com a distância que o concreto pode fluir, e a velocidade desta deformação.

Segundo de la Peña (2001), o CAA possui uma grande deformabilidade no estado fresco, ou seja, pode ser moldado facilmente nas mais diversas formas e com o mínimo de energia possível. Esta característica permite que o mesmo percorra até dez metros de distancia horizontal, mesmo com obstáculos no caminho, tais como armaduras, eletrodutos e outros. Segundo Navarro (1997), de acordo com a visão reológica, um material só escoar se houver deformação do mesmo.

Daí a necessidade de um estudo detalhado da reologia da pasta de cimento e da argamassa empregada neste tipo de concreto, bem como a escolha adequada do agregado graúdo, de modo a se produzir uma mistura com o máximo de deformabilidade no estado fresco. Segundo Aïtcin (2000), a reologia do concreto é governada essencialmente por fatores físicos, que são aqueles relacionados com o esqueleto dos agregados, e por fatores químicos, que são aqueles relacionados com o comportamento reológico da própria pasta de cimento.

A quantidade total de agregado presente no traço, as proporções relativas de agregado graúdo e miúdo, a respectiva granulometria e a forma e textura das partículas são os principais fatores relacionados com o esqueleto granular da mistura, e que afetam o abatimento do concreto, seja do tipo convencional, de alto desempenho ou auto-adensável. Agregados que não tem grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho de partícula, isto é, agregados que possuem granulometria contínua, produzem misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas (NEVILLE, 1997) e por isso são altamente recomendáveis na composição do CAA. Mehta e Monteiro (1994) comentam que o atrito entre as

partículas de agregado graúdo é bastante reduzido quando da utilização de partículas esféricas destes agregados, facilitando, desta forma, a sua fluidez e o seu adensamento. Além disso, agregados de formas alongadas e lamelares e de textura áspera requerem mais pasta de cimento para produzirem misturas trabalháveis para uma dada relação a/c e, portanto, aumentam o custo do concreto (ALBUQUERQUE, 2003).

Segundo Tutikian (2004), é recomendável que o agregado graúdo tenha um coeficiente de forma o mais próximo de 1, o que diminui os vazios a serem preenchidos entre as partículas. No caso de concretos produzidos com seixo rolado, não só a forma arredondada dos grãos, mas também a sua granulometria, predominantemente contínua, podem resultar em misturas mais trabalháveis e econômicas. A Figura 2.13, apresentada por Mehta e Monteiro (1994), mostra a influência da granulometria e da forma dos agregados no volume de vazios e no teor de argamassa em uma mistura de concreto.

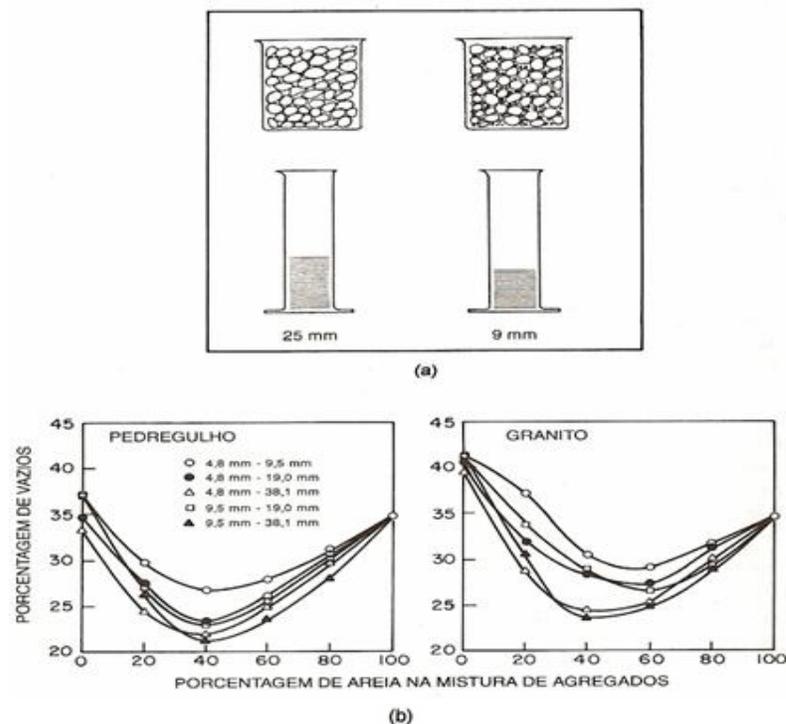


Figura 2.13 - a) Redução do volume de vazios pela mistura de agregado graúdo e miúdo, b) Influência do seixo rolado (pedregulho) na redução do volume de vazios. Fonte: MEHTA e MONTEIRO (1994).

Quanto ao diâmetro máximo do agregado graúdo, este deve ser mantido dentro de limites estabelecidos de acordo com o espaçamento entre as barras da

armadura, visto que, para que um concreto torne-se deformável, é necessário reduzir a fricção entre as partículas sólidas (agregados graúdo, miúdo e materiais finos). Para reduzir o atrito entre as partículas de agregado é necessário reduzir a possibilidade de contato entre elas (OKAMURA e OUCHI, 2003). Portanto, limitar a quantidade de agregado graúdo a um nível mais baixo do que o normal é eficiente em evitar o intertravamento da mistura de CAA, facilitando o fluxo do sistema. A Figura 2.14 mostra a diferença na proporção dos materiais do CAA comparada a outros dois tipos de concreto.

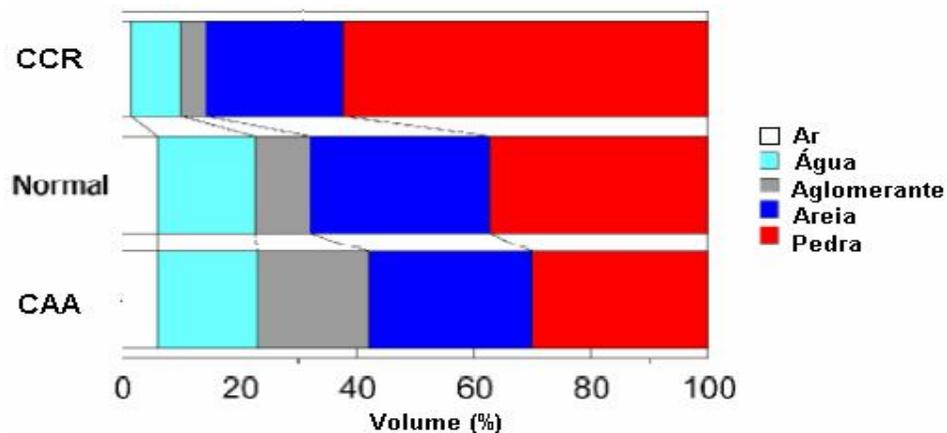


Figura 2.14 - Proporção entre os materiais usados na produção de três tipos de concreto. Onde: CCR – concreto compactado com rolo. Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

Outro grande detalhe que deve ser levado em consideração é o não uso de vibração do CAA para a retirada do ar aprisionado do sistema, visto que se for muito alto, a sua resistência mecânica tende a diminuir drasticamente. Segundo Neville (1997), a presença de vazios diminui muito a resistência onde: 5% de vazios podem reduzir a resistência em até 30%, e mesmo 2% de vazios podem resultar em uma perda de 10% de resistência. O mesmo autor mostra que vazios no interior de um material inicialmente solto são determinados pela granulometria das partículas mais finas da mistura e são mais facilmente expelidas de uma mistura mais molhada do que de uma mais seca. Porém a quantidade de finos na mistura será tanto menor quanto maior for a compacidade do seu esqueleto granular.

Já o comportamento reológico da pasta de cimento no concreto convencional é essencialmente relacionado com a relação a/c. Segundo Besson et al. (2005), a otimização da pasta implica na produção de um concreto com máxima

trabalhabilidade para um dado esqueleto granular. Quanto mais alta for a relação a/c, mais diluídas em água estarão as partículas finas, e assim, fisicamente, a água desempenha um papel-chave na reologia da pasta de cimento hidratado quando a relação a/c é alta, maior do que 0,50 (AİTCIN, 2000). Com uma relação a/c tão alta, as partículas de cimento e de adições minerais estão tão longe uma das outras dentro da pasta, que as suas interações durante a hidratação não afetam de modo particular o abatimento do concreto. Porém com a exigência cada vez maior por estruturas mais resistentes e duráveis ($f_{c28} > 35\text{MPa}$), é necessária a redução da relação a/c da mistura para que se possa alcançar tais resistências. No caso do CAA, esta redução deve vir acompanhada da adição de aditivos superplastificantes de alta eficiência (hiperplastificantes) e que devem manter o concreto fluido durante todo o processo de lançamento e adensamento.

Segundo Aİtcin (2000), à medida que a relação a/c diminui e a dosagem de superplastificante aumenta, a situação torna-se cada vez mais complexa do ponto de vista reológico, porque a própria água não desempenha mais o papel-chave na reologia da pasta de cimento. O cimento e as adições minerais interagem fisicamente, e isto é afetado pela sua forma, pela sua granulometria e pela sua reatividade química. A deformabilidade do CAA está bastante relacionada com a deformabilidade da pasta, a qual pode ser aumentada com o uso dos superplastificantes (GOMES, 2002). O uso adicional de água reduz a coesão e a viscosidade, enquanto que o uso dos superplastificantes reduz principalmente a coesão, causando um ligeiro decréscimo na viscosidade (BARROS, 2004). Deve-se, portanto, empregar o aditivo superplastificante para garantir a maior fluidez do sistema pela redução da tensão de escoamento da pasta, com o cuidado de compensar a redução da coesão e viscosidade, através da adição de materiais finos (pozolânicos ou não) e na falta destes, um aditivo modificador de viscosidade.

De modo resumido, para se atingir uma boa capacidade de escoamento pode-se considerar os seguintes procedimentos:

- a) Para reduzir o atrito entre as partículas:
 - ✓ Diminuir o volume do agregado graúdo (aumentando o volume da pasta);
 - ✓ Otimizar a granulometria da fase sólida.

b) para aumentar a deformabilidade da pasta:

- ✓ Adicionar o aditivo superplastificante;
- ✓ Controlar a relação água/finos.

2.4.3. Resistência à segregação

A segregação é definida como sendo a separação dos componentes do concreto fresco de tal forma que a sua distribuição não é mais uniforme. Segundo Mehta e Monteiro (1994), existem dois tipos de segregação: o primeiro, que é uma característica das misturas secas, consiste na separação dos agregados da argamassa do concreto (falta de coesão). O segundo tipo de segregação é a exsudação, que consiste na separação da água de amassamento dos demais constituintes do concreto fresco por diferença de massa específica entre estes e pela ação da força da gravidade, e é mais notada em misturas de concreto mais fluidas.

Neville (1997) comenta que é importante reduzir a tendência de segregação na mistura de concreto, para que se obtenha o máximo potencial de resistência. Portanto, é necessário que o CAA apresente boa estabilidade e mantenha uma distribuição uniforme entre os seus constituintes quando em movimento. Segundo Domone (2003), a estabilidade é um índice simultâneo de capacidade de retenção de água (o oposto da exsudação) e da capacidade de retenção do agregado graúdo na massa do concreto fresco (o oposto da segregação). Um concreto que apresente, simultaneamente, estas duas características, pode ser considerado um concreto com elevada coesão.

Uma causa primária da segregação no concreto é a diferença de tamanho das partículas e das massas específicas dos constituintes da mistura. Segundo Neville (1997), a maior viscosidade da pasta de cimento se opõe ao movimento descendente das partículas mais pesadas dos agregados, com conseqüente redução da segregação do concreto. Este problema pode ser resolvido através do controle água/finos, de modo a se obter uma adequada capacidade e velocidade de deformação. Segundo Khayat (2000), uma pasta com dosagem adequada de

superplastificante e um quociente água/finos muito baixo vai apresentar uma elevada deformabilidade, porém, com reduzida velocidade de deformação. Desse modo, os finos devem ser ajustados de maneira a equilibrar a relação água/finos, visando à obtenção de uma adequada deformabilidade e velocidade de deformação. Além disso, estes finos contribuem para a redução da água livre na mistura, pois a elevada superfície específica destas partículas é responsável por uma maior absorção desta água em suas paredes, reduzindo, deste modo, a possibilidade de exsudação. Tutikian (2004) comenta que, na falta de adições minerais, é possível controlar a viscosidade e coesão do CAA com o uso de aditivos modificadores de viscosidade (VMA). Segundo EFNARC (2006), os aditivos modificadores de viscosidade podem controlar de forma mais efetiva a reologia do CAA quando comparados às adições minerais, por apresentarem melhor controle de produção e serem de fácil utilização.

A coesão e viscosidade podem ser determinadas através do tempo em que uma mistura flui sobre uma dada superfície, conforme colocado na Figura 2.15. Nesta figura se pode notar que, um concreto fluido apresenta grande espalhamento em um intervalo de tempo relativamente pequeno, o que caracteriza baixa coesão e viscosidade da mistura. Já o CAA apresenta o mesmo valor de espalhamento, porém em um intervalo de tempo maior, o que caracteriza boa coesão e viscosidade entre os seus materiais constituintes. O segredo está em otimizar o teor de finos ou VMA da mistura para que esta seja considerada como auto-adensável. Segundo Zerbino e Barragán (2007), ensaios como o espalhamento T_{50cm} e funil -V podem dar a noção do grau de coesão e viscosidade da mistura ensaiada.

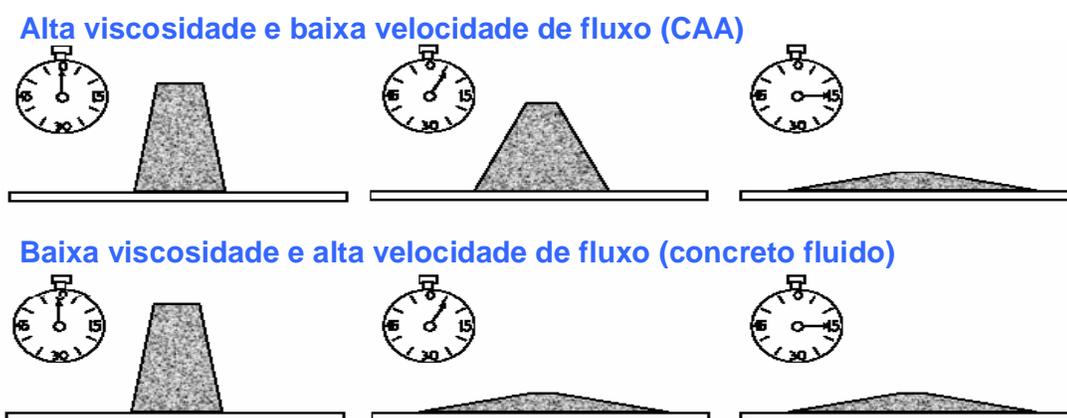


Figura 2.15: Efeito da viscosidade em dois concretos distintos.
Fonte: EFNARC (2006).

De modo resumido, para se conseguir uma mistura com boa resistência à segregação, podem ser considerados os seguintes procedimentos:

- a) No sentido de reduzir a separação dos sólidos;
 - ✓ Limitar o conteúdo de agregados;
 - ✓ Reduzir a dimensão máxima do agregado graúdo;
 - ✓ Diminuir a relação água/finos;
 - ✓ Utilizar um agente modificador de viscosidade.
- b) No sentido de reduzir a exsudação;
 - ✓ Diminuir o teor de água;
 - ✓ Reduzir a relação água/finos;
 - ✓ Utilizar materiais com maior superfície específica.

2.4.4. Habilidade Passante

Conforme descrito anteriormente, o concreto auto-adensável deve possuir elevada fluidez, e ao mesmo tempo, uma adequada resistência à segregação dos seus constituintes. Na maioria das aplicações ainda é necessário um requisito extra, que consiste na capacidade de passar por entre espaços reduzidos, resultantes da configuração de fôrmas e armaduras, sem a ocorrência de bloqueio por parte dos agregados graúdos. Assim, deve haver uma compatibilização entre a dimensão máxima característica do agregado graúdo e a sua quantidade na mistura, com o espaçamento entre as armaduras, a fim de se evitar o bloqueio deste agregado pelas barras de aço. A Figura 2.16 representa o mecanismo de bloqueio através do espaço entre duas barras de aço.

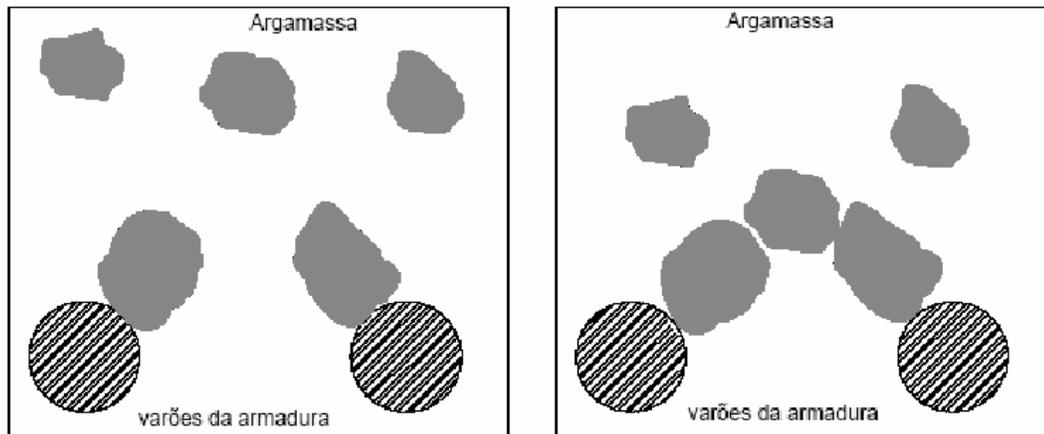


Figura 2.16 - Evolução do bloqueio do agregado graúdo com o escoamento da mistura.
Fonte: Barros (2004).

A existência de um obstáculo provoca uma alteração do percurso das partículas, criando o contato entre elas, crescendo a possibilidade de se formar um arco estável. A formação deste arco é facilitada com o uso de agregados graúdos de maior dimensão e em maiores quantidades. O risco de formação de um arco estável também aumenta se a mistura possuir uma tendência de segregação das partículas mais grossas (BARROS, 2004). Neste caso, o bloqueio pode ser verificado, mesmo se a dimensão máxima do agregado graúdo não for excessiva. Para um mesmo espaçamento, as armaduras de diâmetro maiores aumentam o risco de bloqueio, porque as barras de maior diâmetro conferem um suporte mais estável para a formação de um arco de agregados (KHAYAT, 2000). Esta afirmação ganha importância à medida que, estruturas com altas taxas de armadura, geralmente são compostas por barras de aço com diâmetros maiores do que 12,5mm e, portanto, mais estáveis ao acúmulo de agregados ao seu redor.

Um outro problema que deve ser levado em consideração é que o CAA também deve fluir por espaços reduzidos sem que haja o bloqueio do agregado graúdo, com o conseqüente desprendimento da argamassa. Este bloqueio pode ser observado através de um ensaio proposto por *Hashimoto* (OKAMURA, 1997), apresentada na Figura 2.17, onde o movimento dos agregados graúdos é simulado em uma mistura, cuja argamassa do concreto foi substituída por um material polimérico transparente. Deste modo pôde-se observar o que realmente acontece com as partículas mais grossas do concreto durante o seu movimento por entre espaços confinados.

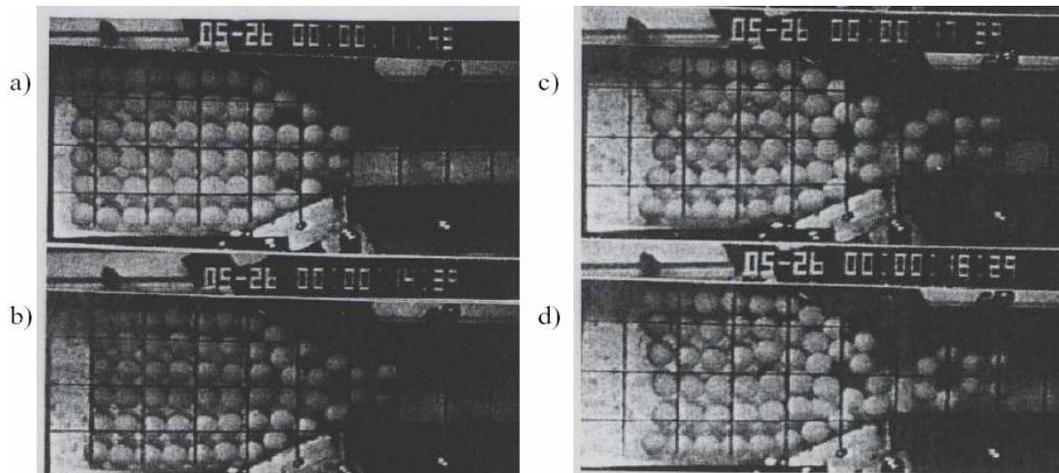


Figura 2.17 - Simulação do movimento do agregado graúdo.
Fonte: OKAMURA (1997).

De acordo com a Figura 2.17(a), os agregados graúdos estão fluindo e se aproximando da parte estreita deste canal. Na Figura 2.17(b) a mistura já está atravessando o canal com parte do agregado graúdo bloqueando o fluxo, pois o contato entre eles aumenta e o atrito interno do sistema torna-se maior, e dessa forma a mistura começa a ficar desuniforme, que é o primeiro indício de segregação. Nas Figuras 2.17(c) e 2.17(d), a mistura perde completamente a sua uniformidade, pois no local de estrangulamento do fluxo, ocorre o aumento de vazios por entre as partículas de agregado graúdo e no local mais largo ocorre um acúmulo destas partículas grossas. Para evitar este problema, deve-se limitar a quantidade de agregado graúdo e aumentar a viscosidade da pasta e da argamassa de modo que estas possam reter aquelas partículas maiores durante o fluxo do sistema (OKAMURA, 1997).

No caso deste ensaio, é possível observar que as partículas de agregado graúdo foram substituídas por esferas perfeitas de vidro, com forma e textura favoráveis ao movimento da mistura. Porém, a realidade é bem diferente, onde agregados das mais variadas formas são usados na produção do concreto, o que pode agravar tal situação. Desta forma, é de fundamental importância a escolha adequada destes agregados, sendo preferível aqueles que mais se aproximam da forma esférica e textura lisa, visto que reduzem o atrito interno durante o movimento da mistura. De modo resumido, para se conseguir uma boa capacidade de passagem, pode-se considerar os seguintes procedimentos:

a) No sentido de se melhorar a coesão da pasta de cimento e da argamassa do concreto, bem como diminuir o risco de segregação dos seus constituintes;

- ✓ Diminuir a relação água/finos;
- ✓ Aumentar o teor de finos (pozolânicos ou não) da mistura;
- ✓ Ou introduzir um agente modificador de viscosidade.

b) No sentido de compatibilizar as dimensões dos espaços abertos, com as características dos agregados graúdos:

- ✓ Reduzir a dimensão máxima dos agregados graúdos;
- ✓ Diminuir o volume de agregados graúdo na mistura de concreto;

2.5. PRINCIPAIS ENSAIOS DO CAA NO ESTADO FRESCO

2.5.1. Considerações iniciais

Para a avaliação de qualquer propriedade do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido, são necessários métodos normalizados de ensaio, que tenham a capacidade de quantificar tais propriedades. Os métodos de ensaio do CAA diferem dos empregados na avaliação do concreto convencional somente para as determinações das propriedades no estado fresco. Neste estado, tem-se um conjunto de equipamentos específicos para avaliar a trabalhabilidade de concretos auto-adensáveis, que serão apresentados neste capítulo e que foram totalmente desenvolvidos para este novo tipo de mistura. É importante salientar que estes ensaios ainda não foram normalizados e como qualquer procedimento sem normalização, ainda há muitas divergências no meio técnico quanto às especificações e medidas. A falta de normalização faz com que um mesmo aparelho possa apresentar pequenas diferenças entre uma publicação e outra (TUTIKIAN, 2004). Porém, há pouca variação entre os tipos de ensaios, ou seja, a grande maioria dos autores utiliza os mesmos equipamentos.

Para cada um destes ensaios, há um grupo de equipamentos, uns mais aptos que outros para uma determinada propriedade, como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Faixa de valores para os parâmetros de caracterização da trabalhabilidade do CAA.

Propriedades	Ensaio	Utilização		Unidade	Limites adotados	
		Laboratório	Canteiro		Mínimo	Máximo
Capacidade de Preenchimento e coesão	<i>Espalhamento</i>	SIM	OBRIGATÓRIO	mm	600	800
	<i>Espalhamento T50cm</i>	SIM	OBRIGATÓRIO	seg	2	5
	<i>Funil - V</i>	SIM	POSSÍVEL	seg	6	12
	<i>Orimet</i>	SIM	POSSÍVEL	seg	0	5
Habilidade de Passagem por obstáculos	<i>Caixa - L</i>	SIM	POSSÍVEL	%	0,8	1,0
	<i>Caixa -U</i>	SIM	POSSÍVEL	mm	0	30
	<i>Caixa de preenchimento</i>	SIM	NÃO	%	90	100
	<i>Anel Japonês</i>	SIM	POSSÍVEL	mm	0	10
Resistência à segregação	<i>Funil - V 5 min</i>	SIM	POSSÍVEL	seg	0	+3
	<i>Tube - U</i>	SIM	NÃO	%	0,9	1,0

Fonte: EFNARC (2002), modificado.

Segundo EFNARC (2002), alguns pontos que devem ser levados em consideração ao avaliar a trabalhabilidade do concreto auto-adensável são:

- ✓ Ainda não há uma relação clara entre os resultados experimentais e o canteiro de obras;
- ✓ Há pouca precisão de dados e ainda não há uma direção clara na obediência dos limites;
- ✓ Os testes e limites são previstos para concretos com agregado graúdo de diâmetro máximo de 20 mm, e caso seja necessário diâmetro maior, os equipamentos devem ser ajustados;
- ✓ Não se considera em que tipos de elementos o concreto será adensado, se em estruturas horizontais ou verticais;
- ✓ Deve-se fazer adaptações nos equipamentos quanto à densidade e o diâmetro das armaduras utilizadas em estruturas reais.

O grande problema destes ensaios é o fato de que nenhum deles consegue medir, sozinho, todas as propriedades necessárias à obtenção do CAA, porém é perfeitamente possível executar mais de dois ou três testes, em laboratório, devido às dimensões reduzidas dos equipamentos. Quanto aos limites dos resultados experimentais, somente com a utilização e a popularização deste tipo de concreto é que poderá haver parâmetros mais confiáveis entre os ensaios de laboratório e a aplicação em obra.

2.5.2. Ensaio de espalhamento (*Slump Flow test*)

Este é o método mais conhecido para avaliar as propriedades do CAA, devido ao fato de o equipamento necessário e do procedimento de ensaio serem muito simples. Como uma espécie de adaptação do ensaio de abatimento para concretos fluidos a descrição deste método é baseada nas recomendações de Peterssem (1998); EFNARC (2002); Gomes (2002). O ensaio de espalhamento é utilizado para medir a capacidade do concreto auto-adensável de fluir livremente por uma plataforma metálica, sem que haja pontos de segregação.

Este procedimento foi desenvolvido, inicialmente, no Japão, para ser usado em concretagens submersas e permite a avaliação da deformabilidade do CAA fresco a partir da observação da velocidade de deformação e do diâmetro de espalhamento de uma amostra pela ação do seu peso próprio. Composto pelo mesmo molde tronco-cônico de *Abrams*, posicionado sobre o centro de uma base plana (Figura 2.18), o ensaio de espalhamento é uma adaptação do método utilizado para a determinação do abatimento no concreto convencional (REPETTE, 2005). A medida da fluidez a ser obtida do CAA é a média de duas medidas perpendiculares do diâmetro do círculo formado pelo concreto sobre a plataforma metálica (Figura 2.19) e expressa a capacidade do CAA de escoar pela ação do seu peso próprio e relaciona-se à sua habilidade de preenchimento.

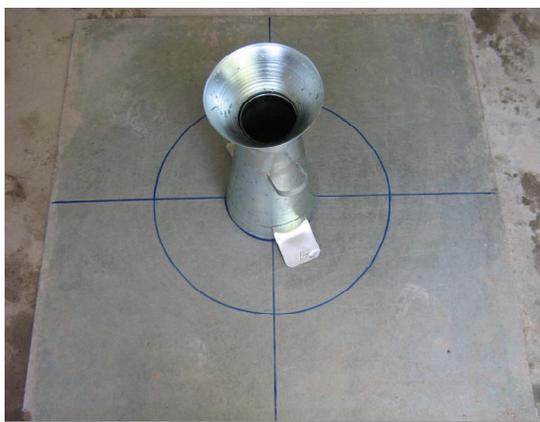


Figura 2.18 - Cone de Abrams e medidas do ensaio de espalhamento.

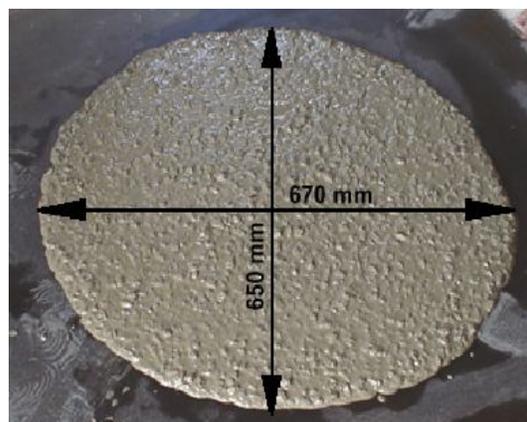


Figura 2.19 - Medidas do espalhamento de um CAA.

Segundo Tutikian (2004); Repette (2005) e Gomes et al. (2006) também é possível, por meio deste ensaio, observar, visualmente, se há ou não segregação do

concreto. A Figura 2.20 ilustra o resultado de ensaios realizados com o CAA em duas situações distintas. O primeiro não apresenta segregação, já o segundo tende a apresentar segregação e exsudação acentuada. Pode-se observar que à medida que o concreto vai segregando, o agregado graúdo se acumula no centro do círculo e apenas a argamassa flui para as extremidades, com forte tendência à exsudação. Segundo Repette (2005), concretos bem dosados não podem apresentar heterogeneidades na distribuição dos agregados e nem excesso de água nas bordas da porção espalhada, que deve ser preferencialmente arredondada, indicando boa retenção de água e coesão adequada da argamassa.

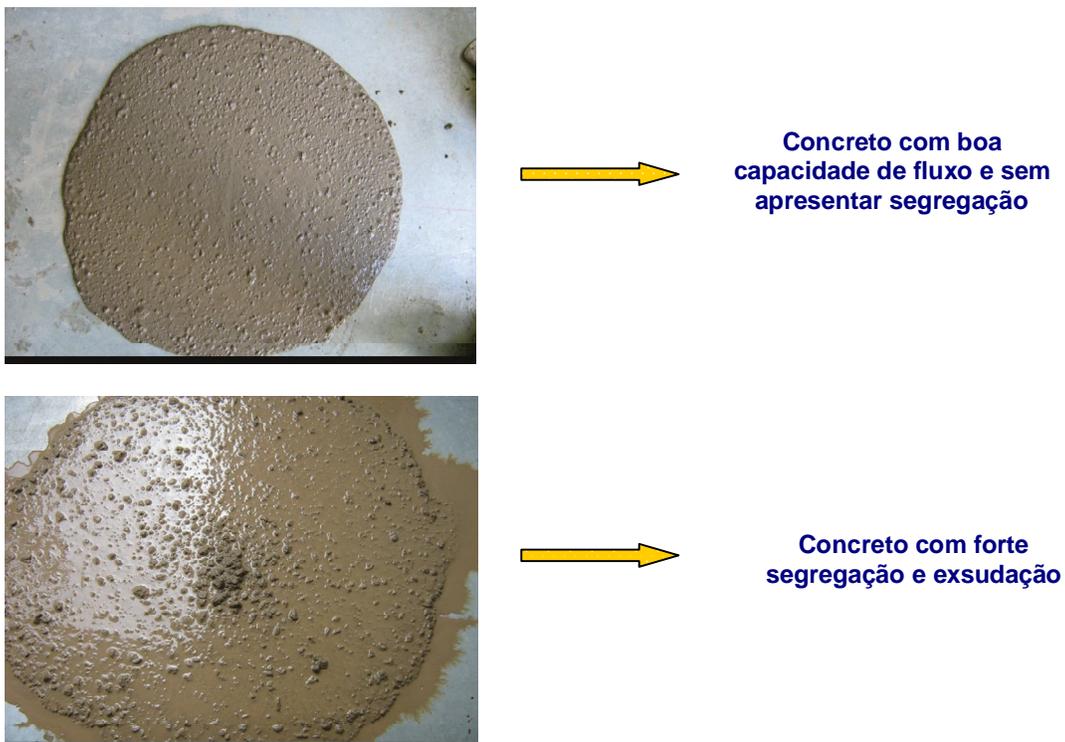


Figura 2.20 - Concreto em duas situações distintas: sem segregação e segregado.

A Tabela 2.2 mostra os limites mínimo e máximo para que um concreto seja considerado auto-adensável, de acordo com o ensaio de espalhamento, segundo alguns autores.

Tabela 2.2 - Limites dos resultados para o ensaio de espalhamento, segundo alguns pesquisadores.

REFERÊNCIAS	ESPALHAMENTO (mm)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
Ozawa et al. (1999)	600	720
EFNARC (2002)	650	800
Gomes (2002)	600	700
Araújo et al. (2003)	650	800
Repetto (2005)	600	800
Kim et al. (2006)	600	750

2.5.3. Ensaio de espalhamento T_{50cm} (*Slump flow T_{50cm} test*)

Este ensaio é uma variação do ensaio de espalhamento, e a sua descrição foi baseada nas recomendações de EFNARC (2002) e Gomes (2002). O procedimento é o mesmo, porém deve-se marcar um círculo de 500 mm de diâmetro no centro da base, como mostrado na Figura 2.21. Quanto aos equipamentos, são os mesmos com o acréscimo de um cronômetro para a realização do ensaio e a presença de pelo menos duas pessoas.

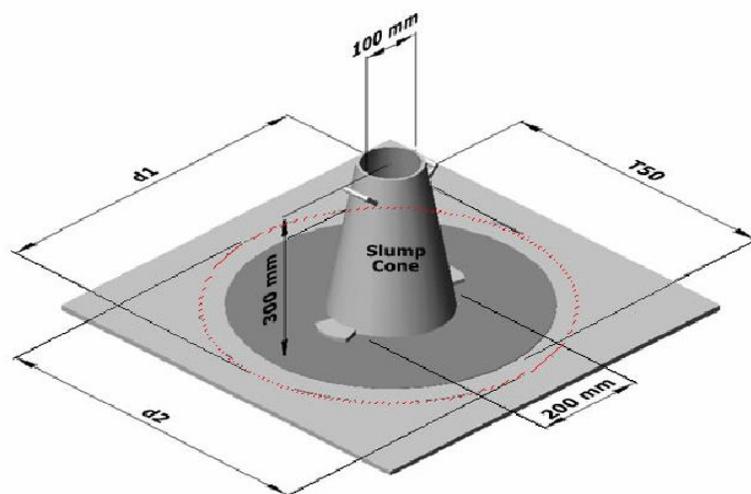


Figura 2.21 - Equipamento usado no ensaio de espalhamento T_{50cm} .
Fonte: Cavalcanti (2006).

O ensaio pode ser realizado simultaneamente com o ensaio de espalhamento. Assim que o cone for erguido verticalmente, o segundo operador deve acionar o cronômetro e marcar o tempo em que o concreto alcança a marca dos 500 mm. Diversos autores, como EFNARC (2002); Gomes (2002); Araújo et al.

(2003); Repette (2005) e Kim et al. (2006), consideram que o tempo de escoamento do concreto é um importante indicador das propriedades de fluxo da mistura e estabelecem limites para este tempo durante o ensaio, como mostra a Tabela 2.3. O tempo abaixo do limite inferior indica que o concreto está muito fluido, e o tempo acima do limite superior indica que o concreto está muito coeso, devendo, em ambos os casos, ser corrigido.

Tabela 2.3 - Limites dos resultados para o espalhamento T_{50cm} , segundo alguns pesquisadores.

REFERÊNCIAS	TEMPO (seg.)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
EFNARC (2002)	2	5
Gomes (2002)	4	10
Gomes et al. (2003a)	3	7
Araújo et al. (2003)	2	5
Coppola (2000)	5	12
Kim et al (2006)	3	8

Uma forma de visualizar se a mistura está com a suas propriedades mantidas, é observar se o agregado graúdo está acompanhando a argamassa durante o fluxo até as extremidades do círculo, sem aglomerações no centro (Figura 2.22a e 2.22b). Também deve-se observar se o fluxo está ocorrendo de maneira uniforme em todas as direções, formando, desta forma, um círculo e não uma figura irregular, de acordo com a Figura 2.22a.



Figura 2.22 - a) Mistura fluindo adequadamente em todas as direções; b) mistura sem segregação entre o agregado graúdo e a argamassa.

2.5.4. Ensaio do Funil - V (*V funnel test*)

Este ensaio foi inicialmente desenvolvido no Japão por Ozawa (1995) e permite avaliar a capacidade do CAA em passar por espaços restritos, a partir da observação do tempo de escoamento de uma amostra de concreto por um funil, apenas sob a ação do seu peso próprio. A Figura 2.23 ilustra como se dá o movimento do concreto, bem como os limites mínimos e máximos para as dimensões deste equipamento.

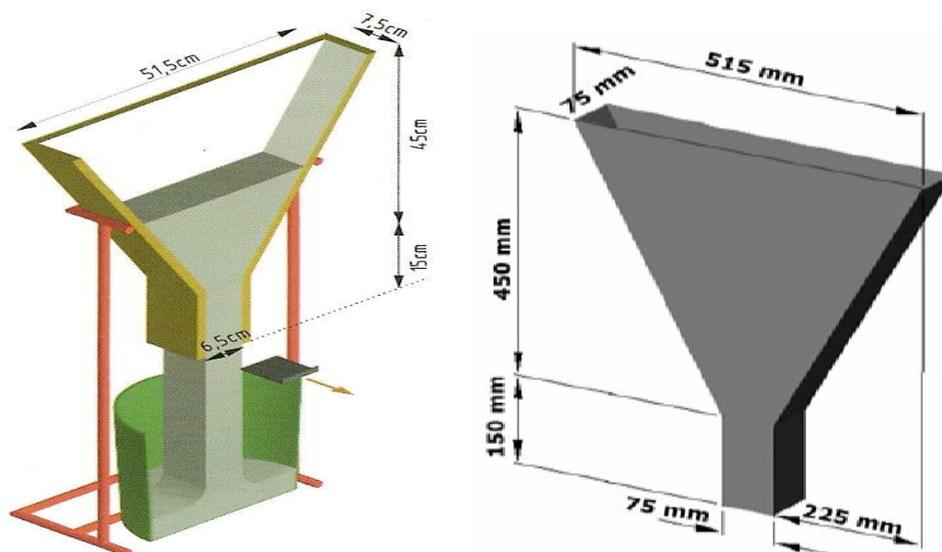


Figura 2.23 – Formato e dimensões do equipamento Funil – V.
Fonte: Alencar e Helene (2006), modificado.

Para a sua realização, são necessários um funil, um suporte rígido para o encaixe deste, uma concha côncava e um cronômetro, bem como dois operadores: um para abrir a porta do funil e o outro para cronometrar o tempo de escoamento da mistura. Todo o conjunto (suporte + funil) deve ser firmemente fixado e nivelado, de forma que não se movimente durante a execução do ensaio.

Na sua extremidade inferior, existe uma porta que pode ser deslizante ou com dobradiça, cujo objetivo é manter o concreto no interior do aparelho. Para a execução do ensaio, preenche-se o funil com concreto sem qualquer tipo de compactação ou vibração, nivela-se o topo do aparelho e retira-se o excesso de concreto. Após esse momento, abrir a sua porta inferior, momento em que é disparado o cronômetro, permitindo que o material escoe unicamente sob a ação da gravidade

O tempo t (em segundos) que a mistura leva para esvaziar completamente o funil é o resultado deste ensaio e indica a sua capacidade de escoamento (fluidez). Após este momento, pode-se preencher o funil novamente e esperar cinco minutos para a repetição do ensaio. Este procedimento pode dar informações importantes quanto à resistência à segregação, pois se o tempo de escoamento aumentar significativamente é sinal de que houve um acúmulo de agregados na base do funil. Já a velocidade com que flui esta mistura pode também indicar a sua viscosidade, pois quanto mais rápido for o escoamento menor será a sua viscosidade e vice-versa.

Para que esta mistura seja considerada como auto-adensável, o tempo de escoamento deve se situar em um intervalo determinado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Limites dos resultados do ensaio do funil -V, segundo alguns pesquisadores.

REFERÊNCIAS	TEMPO (seg.)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
EFNARC (2002)	6	12
Gomes (2002)	10	15
Araújo et al (2003)	6	12
Repetto (2005)	5	10
Cincotto (2007)		10

2.5.5. Orimet test

Este ensaio foi desenvolvido por Bartos (1998), para avaliar a capacidade de escoamento de misturas de concretos com alta trabalhabilidade, e atualmente, para concretos auto-adensáveis (TUTIKIAN, 2004). O orimet consiste de um tubo de 100 mm de diâmetro interno com uma redução de 75 mm em uma de suas extremidades e uma comporta na extremidade desta redução, como mostra a figura 2.24a. Além de verificar a capacidade de escoamento da mistura, pode também verificar a sua habilidade de passar por obstáculos sem segregar, caso sejam colocadas duas barras de aço perpendiculares entre si de 10 mm de diâmetro, dentro do tubo de 100 mm. Também é possível a realização deste ensaio em conjunto com o *j-ring* ou anel Japonês, caso não se coloque as duas barras perpendiculares de aço na extremidade do tubo, conforme ilustra a Figura 2.24b.

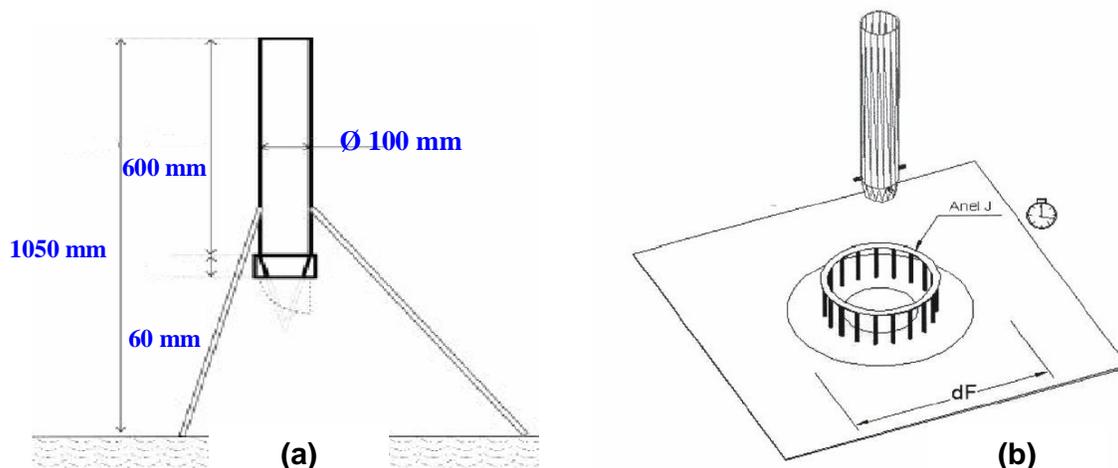


Figura 2.24 - a) Dimensões e características do *orimet test*; b) ensaio *orimet* em conjunto com o anel Japonês.

Fonte: EFNARC (2002), modificado.

São necessárias duas pessoas para conduzir este ensaio, uma para abrir a porta inferior e outra para cronometrar o tempo de fluxo da mistura através do orifício. Primeiramente deve-se fixar o equipamento em chão firme e nivelado e umedecer as paredes do tubo. Então, preenche-se o tubo em toda a sua totalidade e após isto, nivela-se a parte de cima e retira-se todo o excesso de material com o auxílio de uma espátula. Finalmente abre-se a porta inferior com o cronômetro sendo disparado simultaneamente. O tempo em que a mistura de concreto leva para esvaziar o tubo é a medida deste ensaio. A Tabela 2.5 mostra valores (mínimos e máximos) propostos por alguns pesquisadores.

Tabela 2.5 - Limites dos resultados do ensaio *orimet*, segundo alguns pesquisadores.

REFERÊNCIAS	TEMPO (seg.)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
EFNARC (2002)	0	5
Gomes (2002)	0	3
Araújo et al (2003)	0	5
Cincotto (2007)	1,5	6

2.5.6. Ensaio da caixa L (*L - box test*)

Este ensaio objetiva medir a fluidez da mistura simultaneamente com a sua capacidade de passar por obstáculos de forma coesa e sem apresentar segregação. O equipamento necessário consiste de uma caixa em forma de L,

munida de uma portinhola móvel para a separação entre o compartimento vertical, onde é armazenado o concreto a ser ensaiado, e o compartimento horizontal, por onde o mesmo escoar por entre três barras de aço de 12,5mm de diâmetro, espaçados 40,5mm entre si. Segundo Roussel et al. (2006), é importante salientar que o diâmetro das barras de aço e o espaçamento entre elas, no ensaio, dependem basicamente das condições reais da estrutura em que o concreto será aplicado. Para este autor, futuras normalizações deste ensaio deveriam prever a flexibilização da escolha das armaduras para a situação mais adequada e que apenas a parte fixa do equipamento deveria ser padronizada. A Figura 2.25 ilustra a caixa - L, bem como suas medidas.

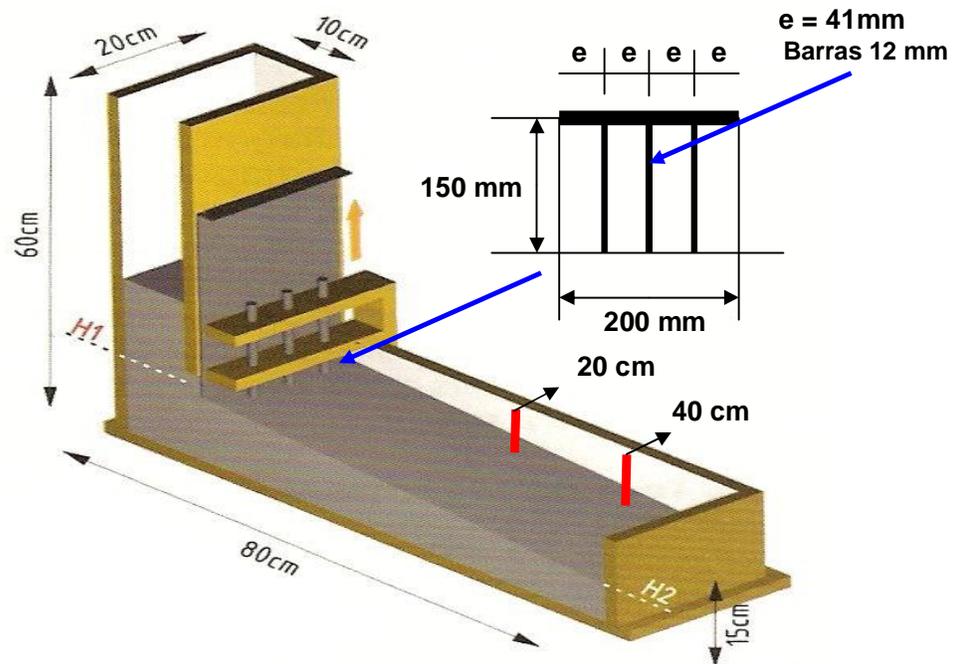


Figura 2.25 - Medidas da caixa L (L-box) e movimento do CAA no seu interior.
Fonte: Alencar e Helene (2006), modificado.

Para a execução deste ensaio é necessária a caixa em L com as barras de aço que simulam a armação de uma estrutura real. As paredes da caixa devem ser feitas de material não absorvente que precisam ser umedecidas internamente antes da realização do ensaio para reduzir o atrito entre elas e a mistura. Deve-se fixar a caixa L em chão firme e nivelado e antes de preenchê-la, o operador deve certificar-se de que a portinhola está se erguendo normalmente. Após isso, preenche-se a parte vertical da caixa com concreto sem qualquer compactação, e deixa-se repousar durante 60 segundos. Este tempo de espera permite avaliar a

estabilidade da amostra (presença ou não de segregação). Em seguida, abre-se a comporta e deixa-se o concreto fluir da parte vertical para a parte horizontal, atravessando as barras verticais.

Depois de cessar o fluxo, medem-se as alturas H1 e H2, em milímetros, e calcula-se a relação H2/H1. Esta relação é chamada de razão de bloqueio e indica a facilidade do concreto em escoar e passar por restrições impostas pelas barras de aço (REPETTE, 2005). Um dos critérios de aceitação recomendado pela maioria dos pesquisadores é adotar valores que fiquem entre 0,80 e 1,00, conforme ilustra a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Limites dos resultados do ensaio da caixa L, segundo alguns pesquisadores.

REFERÊNCIAS	RAZÃO DE BLOQUEIO (H2/H1)	
	Mínima	Máxima
EFNARC (2002)	0,80	1,0
<i>Gomes (2002)</i>	0,80	1,0
<i>Coppola (2002)</i>	0,90	1,0
<i>Araújo et al (2003)</i>	0,80	1,0
<i>Repetto (2005)</i>	0,80	1,0
<i>Roussel et al (2006)</i>	0,80	1,0

Segundo Repette (2005) e Cincotto et al. (2007), a avaliação visual do concreto também pode trazer informações importantes sobre o seu comportamento. O acúmulo de agregado graúdo junto às barras de restrição indica que o concreto tem baixa resistência ao bloqueio e coesão insuficiente para mover-se homoganeamente ao redor dos obstáculos (Figura 2.26a). E quando há marcas na superfície que indiquem o posicionamento das barras de restrição o concreto pode não ter capacidade de preenchimento suficiente (Figura 2.26b). Em ambos os casos, um aumento no teor de argamassa e ajuste no tamanho das partículas de agregado graúdo podem solucionar estes problemas.



Figura 2.26 - a) Obstrução do fluxo pelo acúmulo de agregados graúdos; b) traços na superfície do concreto.

Fonte: Roussel et al. (2006).

2.5.7. Ensaio na caixa U (*U-box test*)

De menor sensibilidade que a caixa “L”, a caixa “U” avalia a fluidez e a habilidade do concreto em resistir ao bloqueio por obstáculos sem segregar quando em movimentos verticais. O equipamento necessário consiste de um duto em forma de U, com dois compartimentos adjacentes separados por uma portinhola móvel, e barras de aço com as mesmas dimensões da caixa L (diâmetro de 12,5mm espaçadas 45mm entre si). Segundo EFNARC (2002), como na caixa - L, as armaduras devem ser projetadas caso a caso, a fim de se ter uma maior precisão nos resultados dos ensaios. A Figura 2.27 ilustra as dimensões da *caixa - U*.

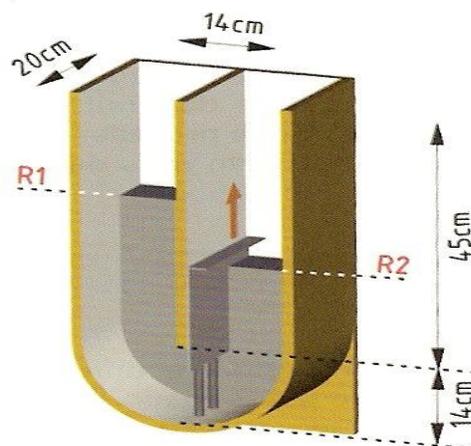


Figura 2.27 - Medidas da *caixa - U* e movimento do CAA no seu interior.
Fonte: Alencar e Helene (2006), modificado.

Na execução deste ensaio deve-se preencher de concreto a caixa U sem qualquer tipo de compactação externa, no compartimento da esquerda e com a portinhola fechada. A caixa “U” deve ser construída com material não absorvente e que ofereça pouca resistência ao movimento e, mesmo assim, deve-se umedecer as suas paredes internas e testar o funcionamento da comporta móvel, antes do preenchimento com concreto. Durante a execução do ensaio o aparelho deve estar em chão firme e nivelado, e após o seu preenchimento, a mistura deve descansar por aproximadamente 60 segundos, para se avaliar a presença ou não de segregação, e só então a comporta deve ser aberta, fazendo com que o concreto escoe através das armaduras para o outro compartimento. Após o término do movimento, deve-se medir as alturas R1 e R2 e determinar o valor de R1 - R2, o qual é chamado de altura de preenchimento. Uma característica interessante é o fato de a mistura também estar sob o efeito da pressão atmosférica, já que esta deve se comportar como um líquido. Portanto, quanto mais fluido estiver o CAA, mais próximo de zero será o resultado e maior a sua habilidade de preenchimento. Segundo Tutikian (2004), a observação do movimento da mistura é muito importante para identificar algum tipo de segregação, uma vez que o concreto coeso deve sempre fluir uniformemente, com todos os seus componentes unidos. A Tabela 2.7 mostra os limites de resultados do ensaio da caixa – U, usados por alguns pesquisadores.

Tabela 2.7 - Limites dos resultados para o ensaio da caixa U, segundo alguns pesquisadores.

REFERÊNCIAS	R2 - R1 (mm)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
EFNARC (2002)	0	30
Gomes (2002)	0	80
Araújo et al (2003)	0	30
Repetto (2005)	0	30
Kim et al (2006)	0	40

2.5.8. Caixa de preenchimento (Fill box test)

Este ensaio mede a capacidade de fluxo do concreto, sem que haja perda de coesão ou ocorrência de segregação, através de armaduras e eletrodutos e em todas as direções. Este equipamento pode ser considerado como um dos mais completos para a avaliação das propriedades do CAA no estado fresco, por simular o fluxo da mistura em todas as direções e com a presença de obstáculos, o que se aproxima da realidade de uma estrutura real. O aparelho consiste de uma caixa transparente de 50 cm de comprimento, por 30 cm de altura e 30 cm de largura, com 35 barras de PVC de 20 mm de diâmetro e espaçadas 5 cm de eixo a eixo, tanto na vertical como na horizontal. Em uma das extremidades da caixa deve ser colocado um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro com um funil de abertura de 200 mm de diâmetro na extremidade superior deste tubo, e por onde deve ser inserida a mistura de concreto. A Figura 2.28 ilustra a caixa de preenchimento com as suas respectivas dimensões.

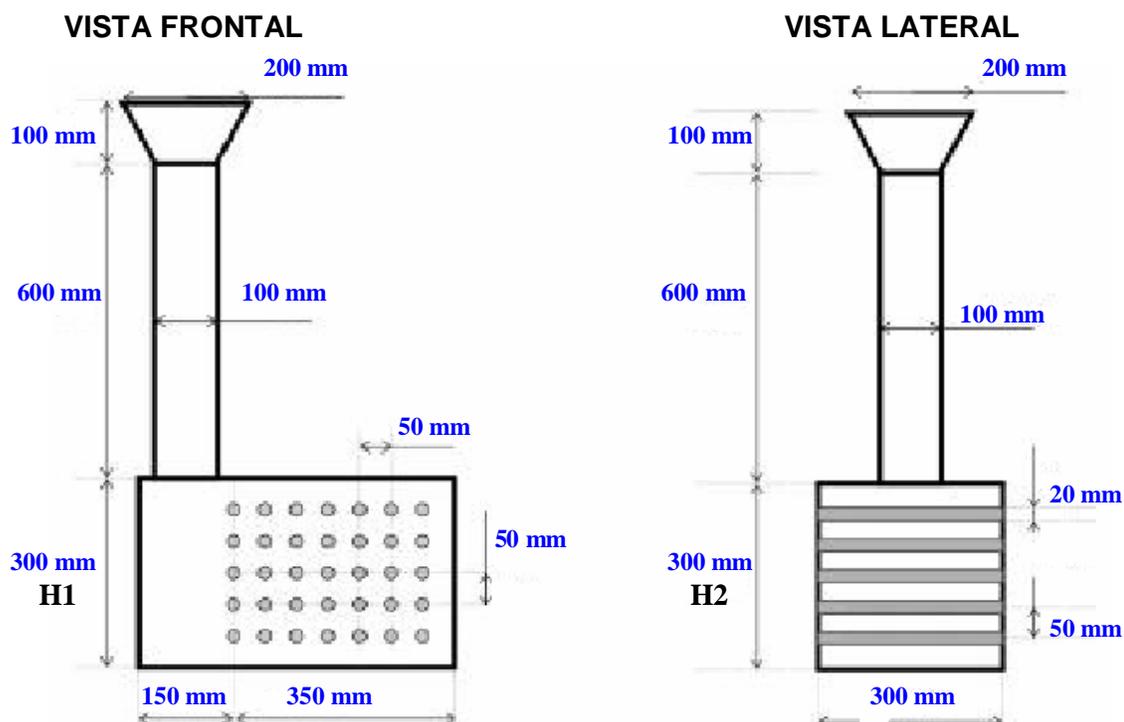


Figura 2.28 - Vistas e dimensões da caixa de preenchimento.
Fonte: EFNARC (2002), modificado.

A caixa de preenchimento deve ser construída com material não absorvente, que ofereça pouca resistência ao movimento e que seja transparente para permitir a visualização do fluxo, bem como a presença de segregação e a capacidade passante da mistura por entre os obstáculos. Deve-se colocar o equipamento em chão firme e nivelado e umedecer suas paredes internas com o cuidado para não deixar excessos de água no seu interior. Começar o preenchimento da caixa até que a mistura envolva a última barra de PVC.

Medir duas alturas, alcançadas pelo concreto, na face menor de cada extremidade e a média aritmética destas duas será **H1** e **H2**. A capacidade de preenchimento “**F**” do concreto é o resultado deste ensaio e é calculado de acordo com a Equação 2.2.

$$F = 100 * \frac{(H1 + H2)}{2 * H1} \quad (\text{eq.2.2})$$

Para a mistura ser considerada auto-adensável, “**F**” deve estar situada entre 90 e 100%, que é uma unanimidade entre os autores que propõem este método de ensaio. Caso a capacidade de preenchimento do concreto seja inferior a 90%, deve-se efetuar ajustes na mistura, como o aumento da fluidez sem alterar a coesão, até que se atinja tal exigência. A Tabela 2.8 mostra os limites adotados para “**F**”.

Tabela 2.8 - Limites dos resultados para a caixa de preenchimento, segundo alguns pesquisadores.

REFERÊNCIAS	PREENCHIMENTO (%)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
EFNARC (2002)	90	100
<i>Araújo et al (2003)</i>	90	100

2.5.9. Ensaio do anel de barras ou anel Japonês (*J-ring test*)

Este ensaio pode ser considerado como um complemento de outros dois ensaios, o espalhamento (slump flow test) e o ensaio orimet. A colocação deste anel nos ensaios de espalhamento ou orimet acrescenta a possibilidade de se avaliar a capacidade de uma determinada mistura em atravessar obstáculos sem apresentar segregação dos seus constituintes, pois tentam simular a armadura de uma estrutura real.

O equipamento necessário à realização deste ensaio é um anel metálico com 300 mm de diâmetro e altura de 100 mm, constituído por barras de aço verticais, cujo diâmetro e espaçamento entre elas são especificados de acordo com as condições reais da estrutura a concretar. Segundo EFNARC (2002); Araújo et al. (2003) e Cincotto et al. (2007) o espaçamento entre estas barras deve ser maior do que três vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo, para avaliar a capacidade do concreto em contorná-las sem segregar. A Figura 2.29 mostra o anel Japonês em conjunto com o espalhamento (*slump flow test*).

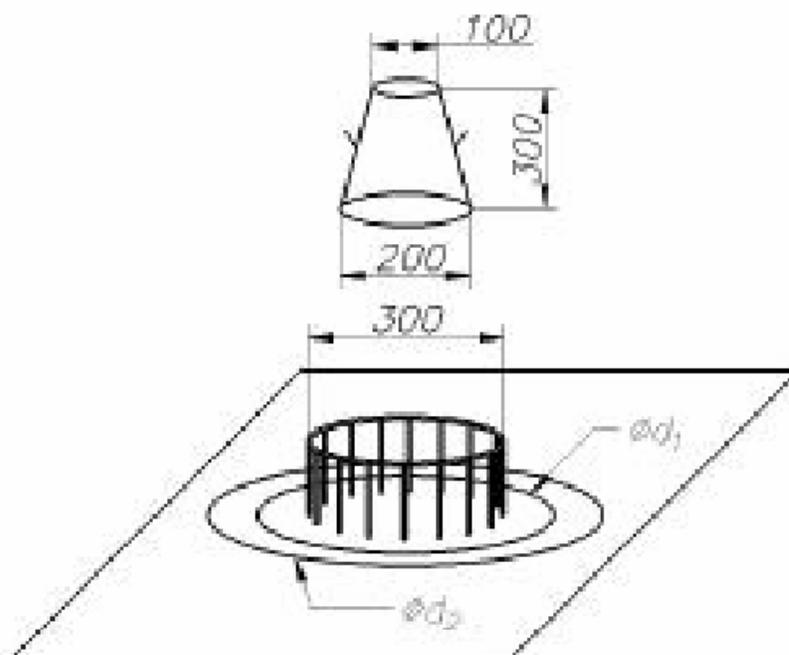


Figura 2.29 - Detalhe do ensaio de espalhamento complementado pelo anel metálico Japonês
Fonte: EFNARC (2002).

Para a execução deste ensaio são necessários, além do anel metálico, todos os outros componentes específicos à realização do espalhamento (*slump flow test*), ou *orimet test*. Os procedimentos de sua execução também são similares à execução dos ensaios citados anteriormente. Após o espalhamento total da mistura, tanto no caso do ensaio de espalhamento como do *orimet*, faz-se a medição das alturas de abatimento do concreto, interna e externamente ao anel, em quatro pontos diferentes e se calcula a média aritmética dessas medições. O resultado do ensaio é a diferença da altura média entre o concreto imediatamente interior e o imediatamente exterior ao anel. Quanto menor for esta diferença mais auto-

adensável será a mistura e a recomendação da maioria dos pesquisadores é que esta não pode exceder 10 mm. Durante a execução deste ensaio também é possível fazer uma avaliação visual da coesão da mistura, pois ao passar por entre as barras metálicas, a argamassa do concreto não deve se separar do agregado graúdo. A Tabela 2.9 mostra os limites adotados por alguns destes pesquisadores.

Tabela 2.9 - Limites dos resultados para o ensaio do anel Japonês, segundo alguns pesquisadores.

REFERÊNCIAS	DIFERENÇA DE ALTURA (mm)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
EFNARC (2002)	0	10
Gomes (2002)	0	10
Sonebi (2003)	0	10

2.5.10. Ensaio do tubo U (*U-shaped pipe test*)

Das três propriedades fundamentais para a obtenção do CAA, a resistência à segregação é talvez a mais difícil de ser mensurada matematicamente através de um método de ensaio. Dada a importância da coesão nas características do concreto auto-adensável, foi desenvolvido um grande esforço no sentido de aprimorar o ensaio do tubo em forma de “U”, primeiramente desenvolvido por Gomes (2002).

Este método baseia-se em determinar a razão entre a massa de agregado graúdo do CAA, pela lavagem e peneiramento de uma amostra de referencia P1 dada em relação às porções P2 e P3, coletadas após repouso, de aproximadamente 2,5 horas, do concreto moldado neste tubo. Porém apenas concretos fluidos podem ter a sua segregação testada e o tempo de repouso depende do clima e das características do aglomerante usado na mistura. O Tubo - U é constituído por três tubos de PVC de diâmetro interno de 156 mm, sendo que o primeiro e o terceiro tem 570 mm de comprimento, enquanto o segundo mede 800 mm, e todos são serrados ao meio, e presos com braçadeiras metálicas, para que possam ser abertos sem danificar o concreto que está no seu interior (Figura 2.30). Segundo Alencar e Helene (2006), os pedaços do tubo que são serrados, antes de serem presos com braçadeiras, devem ser unidos preferencialmente com fita adesiva, que garantem uma melhor contenção do material.



Figura 2.30 - Detalhe do tubo em U pronto para receber a mistura de concreto.

Deve-se colocar aproximadamente 32 litros de concreto no topo do primeiro tubo, que cairá verticalmente até chegar ao segundo, quando passa a caminhar horizontalmente e finalmente alcança o terceiro tubo que subirá até o seu topo, preenchendo, desta forma, todo o volume interno do conjunto. Após isto, espera-se o tempo para que o concreto possa obter certa resistência à deformação, porém sem ocorrer a pega total.

Na segunda etapa do ensaio coloca-se o conjunto deitado, abre-se o tubo com bastante cuidado e extrai-se as três amostras de 10 cm de comprimento cada. Na peneira de 5 mm de abertura, lavam-se as amostras para que ocorra a separação dos constituintes e se obtenha o agregado gráúdo limpo. Estes agregados devem ter a sua superfície seca com papel toalha, para posterior determinação das suas massas. Para a maior precisão na execução deste ensaio, a localização de coleta das amostras deve prever condições semelhantes às de confinamento entre elas, o que constitui fator fundamental para a maior precisão dos resultados (ALENCAR e HELENE, 2006). Por isso é indicado que a amostra de referência, **P1**, seja extraída a pelo menos 10 cm da posição onde o concreto foi despejado. A Figura 2.31 ilustra os locais de extração das amostras do tubo “U”.

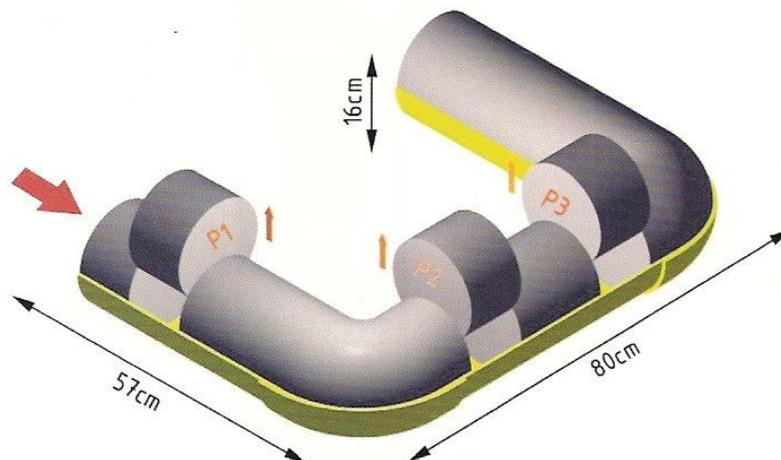


Figura 2.31 - Medidas recomendadas do tubo em “U”, bem como os locais de retirada das amostras **P1**, **P2** e **P3**.

Fonte: Alencar e Helene (2006).

Finalmente determina-se a massa **P1** dos agregados de referência, que será dividida pelas massas das amostras **P2** e **P3**, e a menor relação será a quantificação da segregação (**RS**), calculada conforme a Equação 2.3.

$$RS = \frac{P1}{P2} \text{ ou } \frac{P1}{P3} \quad (\text{eq.2.3})$$

Onde: **RS** significa resistência à segregação.

O ideal é que a relação estabelecida esteja entre 0,9 e 1,0, pois caso seja menor do que 90%, o concreto está segregando e é necessário um aumento no teor de matérias finos ou do aditivo modificador de viscosidade para dar maior coesão à mistura. Após a extração dos exemplares, pode-se deixar o restante do concreto endurecer, para que se possa dividir os pedaços ao meio e analisar visualmente a presença ou não de segregação, pois um bom CAA, quando partido ao meio, deve ter os agregados graúdos distribuídos uniformemente.

Segundo Repette (2005), outra forma de se verificar a resistência à segregação do CAA é avaliar a distribuição dos agregados ao longo da seção rompida de um corpo-de-prova. Sedran e de Larrard (1999) propõem um ensaio que consiste em colocar concreto fresco num cilindro e quando endurecido faz-se o seu rompimento por ensaio de compressão diametral. A avaliação visual consiste em verificar o acúmulo ou não de argamassa na parte superior do cilindro, que pode dar indícios de má distribuição do agregado graúdo.

2.5.11. Análise crítica dos ensaios de trabalhabilidade

Conforme citado anteriormente, o que define o concreto como auto-adensável são suas características no estado fresco. Tanto na produção quanto no recebimento deve-se verificar se o mesmo tem as habilidades de preenchimento e passagem por restrições, bem como resistência à segregação. Deste modo é preciso eleger um conjunto de equipamentos que verifiquem e quantifiquem de forma prática e simples as propriedades do CAA quando no estado fresco.

O ensaio de espalhamento e espalhamento T_{50cm} são os mais indicados na avaliação da fluidez e indiretamente da coesão, devido à sua simplicidade de execução. O ensaio da caixa L se apresenta como o mais exigente em avaliar a capacidade do CAA em passar por restrições, podendo inclusive ser usado em obra.

E quanto à determinação da resistência à segregação, o ensaio do tubo em U se mostra como o mais confiável, porém de uso restrito em laboratório devendo ser realizado previamente à produção do CAA em obra.

Existem outros ensaios que não foram citados neste item, como a análise dos parâmetros reológicos do CAA (tensão de escoamento e viscosidade plástica) por meio de reômetros, por serem complexos e de custo elevado. Somente com o aumento da demanda pelo CAA é que será possível realizar esses tipos de ensaio com mais frequência e compará-los com os resultados dos ensaios já tradicionalmente usados na determinação das propriedades deste tipo de mistura.

2.6. REQUISITOS PARA A DOSAGEM DO CAA

2.6.1. Materiais

O CAA é produzido com os mesmos materiais necessários para se produzir um concreto convencional com a incorporação de pelo menos mais dois elementos (adições minerais e superplastificantes) na sua composição. Eventualmente, na falta de adições minerais ou devido ao seu custo elevado em algumas regiões, faz-se necessário substituí-los por um aditivo modificador de viscosidade (VMA). Porém a produção deste tipo de concreto requer uma escolha

mais rigorosa dos seus materiais (cimento, areia, pedra, adições e aditivos) visto que variações nas propriedades deste tipo de mistura são mais sensíveis quanto à variações nas características dos seus constituintes, bem como na proporção entre eles, como por exemplo:

- ✓ Tipo de cimento;
- ✓ Tipo e dosagem de adições minerais (finos);
- ✓ Forma, textura e granulometria dos agregados;
- ✓ Dosagem de superplastificante;
- ✓ Dosagem do VMA;
- ✓ Teor de pasta;
- ✓ Volume de areia sobre o volume total de argamassa;
- ✓ Volume de agregado graúdo.

Desta forma vale destacar algumas características exigidas dos materiais constituintes do CAA de modo a se obter uma mistura que atenda as exigências propostas pela literatura nacional e internacional.

2.6.1.1. Cimento

A primeira escolha a ser feita quando se vai produzir um concreto auto-adensável é a do cimento, mesmo que algum tipo de adição mineral na forma de finos venha a ser usado. Devido à necessidade de se empregar uma grande quantidade de finos e manter um teor de pasta dentro de certos limites, a importância na escolha do tipo de cimento é fundamental para a obtenção e manutenção das propriedades do CAA durante o seu processo de produção, transporte e lançamento.

Segundo Melo (2005), dentre as principais características do cimento que devem ser avaliadas na produção do CAA, estão a finura e a capacidade de adsorver o aditivo superplastificante. Quando se trata de finura e de parâmetros reológicos, quanto maior a superfície específica do cimento, maior a quantidade destas partículas em contato com a água, diminuindo a distância e aumentando a

frequência de colisão entre elas, reduzindo a tensão de escoamento e aumentando a viscosidade da mistura. Aïtcin (2000) destaca ainda que cimentos mais finos apresentam elevada velocidade de hidratação, contribuindo para um rápido ganho de resistência em função da rápida formação de etringita e C-S-H. Na medida em que a reologia de um cimento em particular é determinada pelo controle do C_3A através da formação da etringita, quanto menor for a quantidade de C_3A , mais fácil o controle reológico do cimento, bem como um tempo mais longo para o enrijecimento da mistura. EFNARC (2002) recomenda o uso de cimentos com um teor de C_3A menor do que 10%. Repette (2005) também sugere cimentos com baixos teores de C_3A e álcalis, sendo que a quantidade destes últimos determina a morfologia do C_3A e que valores abaixo de 2,4% dão origem ao C_3A na forma cúbica. Segundo Aïtcin (2000), é mais fácil controlar a reação do C_3A cúbico com os íons sulfatos e controlar, desta forma, o tempo de formação da etringita, assim como as propriedades reológicas da mistura.

Quando a quantidade de cimento por metro cúbico for alta ($>500 \text{ kg/m}^3$) e a resistência à compressão nas primeiras idades não for um fator determinante, Aïtcin (2000) recomenda o uso de cimentos com teores de C_3S menores, com o objetivo de reduzir o calor de hidratação e conseqüentemente o aparecimento de fissuras por retração térmica. Porém, quando se exige altas resistências iniciais, o mais recomendado é a substituição de parte do cimento por adições minerais pozolânicas de alta reatividade. Melo (2005) afirma que, em virtude desse fato, é comum na produção do CAA utilizar cimento em conjunto com adições minerais em combinações binárias (cimento + um tipo de adição) ou ternárias (cimento + dois tipos de adição).

2.6.1.2. Adições minerais

Segundo EFNARC (2002), tanto as adições pozolânicas como as não pozolânicas podem ser usadas na produção do CAA. As adições são minerais finamente moídos adicionados ao concreto ou ao cimento durante a sua fabricação, em quantidades relativamente grandes, com o objetivo de se obter características específicas (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Podem ser de origem natural (pozolanas

naturais), origem natural com algum tratamento térmico e de moagem (metacaulim, cinza da casca de arroz) ou provenientes de sub-produtos da indústria metalúrgica e energética (sílica ativa, escória de alto forno e cinza volante).

Uma outra categoria de adições são os “fíleres” calcários ou não pozolânicos que substituem geralmente parte do agregado miúdo por apresentarem maior finura do que este, porém menor do que o cimento, o que melhora as condições de compacidade do esqueleto granular. Este tipo de adição vem principalmente da indústria da mineração que gera uma quantidade significativa de resíduos sob a forma de lama que, após alguns processos de secagem e peneiramento, estão prontos para uso (LISBÔA, 2004).

O uso de adições na produção do CAA está relacionado tanto a fatores técnicos (redução do calor de hidratação e controle reológico da mistura) quanto a fatores econômicos (redução do custo de produção devido, em alguns casos, ao seu menor preço em relação ao cimento). Tutikian (2004) comenta que as adições (pozolânicas ou não) devem apresentar área superficial maior do que a do componente que estão substituindo, pois só assim irão contribuir para o aumento da coesão do CAA. O uso de adições neste tipo de mistura é importante, principalmente devido a sua contribuição para a redução da fricção entre as partículas dos agregados e para o aumento da viscosidade e conseqüentemente da resistência à segregação (MELO, 2005).

Ainda não está claro qual a dosagem ideal das adições no CAA e nem qual a mais indicada. Fatores como: custo, granulometria, forma e textura podem influenciar significativamente a utilização de um ou de outro. Segundo Domone (2005), um estudo realizado durante 11 anos comparou 95 misturas de CAA em diversos países e constatou que o fíler calcário foi a adição mais usada. Provavelmente pelo fato de estar presente na mistura apenas para aumentar a viscosidade e coesão, não afetando diretamente o processo de hidratação por não ser reativo e por apresentar uma granulometria que não afeta significativamente a dosagem de superplastificante. Outras adições como sílica ativa, metacaulim e cinza volante foram menos usadas.

Com relação às quantidades, Alencar e Helene (2006) comentam que quanto mais finas forem as adições, menores serão os teores de substituição devido

ao aumento da frequência de contato entre elas em um dado volume, o que influencia no aumento da viscosidade e coesão da mistura. Outro ponto importante com relação à dosagem é que quanto mais rica for a mistura, menores as substituições por adições, pois essas misturas já possuem altos teores de finos e, conseqüentemente, são mais coesas. A Tabela 2.10 apresenta algumas opções de uso de adições minerais na confecção do CAA, bem como suas principais características e conseqüências do seu emprego nas propriedades do concreto no estado fresco.

Tabela 2.10 – Influência de algumas adições minerais nas propriedades do CAA no estado fresco.

Adição		massa específica (Kg/dm ³)	Finura média (m ² /Kg)	Forma e textura	Efeito do uso no estado fresco do CAA
Pozolânica	Não pozolânica				
Sílica ativa		2,20	20.000	esférica e lisa	Forte aumento da coesão Redução acentuada da exsudação Melhores condições de fluidez devido ao formato esférico das partículas Aumento no consumo de superplastificante
Metacaulim		2,40	18.000	sem forma definida e áspera	Forte aumento da coesão Redução acentuada da exsudação Aumento no consumo de superplastificante. Não contribui para a fluidez devido a sua forma e textura
Cinza volante		2,35	400	esférica e lisa	Aumento da coesão. Redução do atrito entre as partículas dos agregados melhorando a trabalhabilidade. Redução da exsudação e segregação. Redução no consumo de superplastificante.
	Filer calcário	variável	700	prismática e áspera	Aumento da coesão. Redução da exsudação e segregação. Permite maior controle reológico devido ser pouco reativo (menor perda de fluidez) Redução no consumo de superplastificante.

Fonte: Mehta e Monteiro (1994); Dal Molin (1995); Neville (1998); Aitcin (2000); Souza (2003); Melo (2005).

2.6.1.3. Agregado miúdo

Segundo EFNARC (2002); Repette (2005) e Domone (2005) todas as areias normais são adequadas para a produção do CAA, podendo-se utilizar tanto areias naturais (depósitos eólicos e beira de rio) quanto as obtidas de processos industriais (pedrisco), sendo as primeiras as mais recomendadas. Um ponto importante é a quantidade de grãos com diâmetro inferior à 0,125mm, por serem

considerados finos e que junto com as partículas de aglomerante podem aumentar a viscosidade e coesão da mistura (EFNARC, 2002, DOMONE, 2005).

Partículas com o formato esférico e textura lisa são altamente recomendáveis para a produção do CAA devido à redução da superfície específica e, conseqüentemente, a demanda de água e superplastificante, para a obtenção do espalhamento desejado, além de proporcionarem um efeito “rolamento” na argamassa, contribuindo positivamente para a reologia da mistura. Segundo Okamura e Ouchi (2003), quanto mais angulosas forem as partículas de agregado miúdo, maior será a resistência ao cisalhamento das argamassas, dificultando a deformabilidade do concreto. Durante o fluxo de um CAA, partículas de agregado graúdo se aproximam uma das outras em espaços restritos, gerando uma tensão na argamassa perpendicular à tensão de cisalhamento. Quando partículas angulosas de areia fazem parte desta argamassa, ocorre um intertravamento do sistema, tornando a mistura mais resistente ao fluxo. A Figura 2.31 mostra a influência da forma das areias sobre tensão de cisalhamento do CAA.

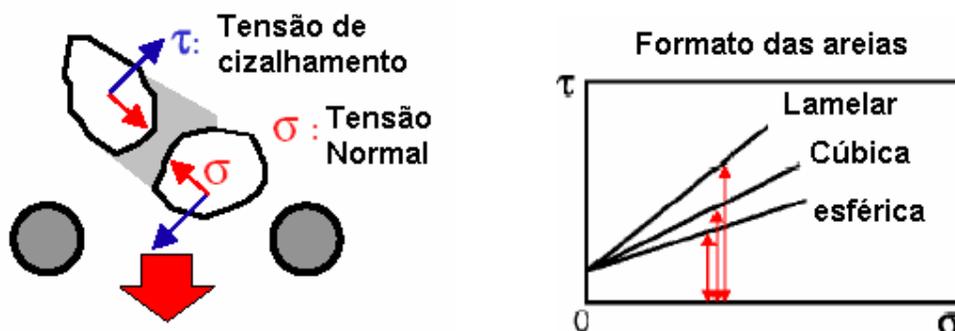


Figura 2.32 – Influência de três tipos de areia sobre a tensão de cisalhamento da mistura de CAA quando em movimento.

Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

Quanto à granulometria, Melo (2006) recomenda que esta seja contínua e que seja o mais fina possível (quantidade suficiente de partículas menores do que $300\mu\text{m}$), pois apesar de aumentarem a superfície específica, também podem contribuir para o aumento da coesão do CAA, sendo a maior demanda de água compensada com o uso do superplastificante. Bartos (1998) alerta que areias muito grossas podem levar à ocorrência de segregação, devendo ser evitadas para o uso no CAA. Do ponto de vista dessa dissertação, uma questão importante é o fato de se produzir o CAA com areias da região de Belém-Pa, que são muito finas (módulo

de finura < 1,90), com forma arredondada e textura lisa, de modo que se possa avaliar a sua eficácia quanto a não utilização, na mistura, de adições minerais, dado a seu efeito positivo nas propriedades reológicas do CAA.

Além das características físicas é necessário também um controle rigoroso na umidade do agregado miúdo, que consiste em uma das principais causas de variação da fluidez da mistura (SAKAY apud MELO, 2006). Segundo Domone (2003), erros de 0,5% na estimativa da umidade dos agregados pode alterar o consumo de água em até 8 kg/m³ de concreto e com isso modificar o resultado do ensaio de espalhamento em até 45 mm. Por isso EFNARC (2002) recomenda a dosagem e produção do CAA com agregados na condição saturada superfície seca (SSS). Porém, devido à dificuldade de se alcançar esta condição em obra ou em central dosadora, o ideal seria cobrir os silos de areia e pedra durante o período de chuva, reduzindo a possibilidade de aumento excessivo da umidade.

2.6.1.4. Agregado graúdo

Todos os tipos de agregado graúdo são adequados para a produção do CAA, com o tamanho máximo de suas partículas variando de 16 à 20 mm (EFNARC, 2002). Porém, Gomes (2002); Okamura e Ouchi (2003); Domone (2005); Repette (2005) e Tutikian (2007) defendem o uso de agregados cuja dimensão máxima de suas partículas exceda para menos ou para mais as do intervalo citado acima e que fatores como a densidade de armadura e a distância entre as faces das fôrmas é que serão determinantes para essa escolha.

Segundo Melo (2006), o agregado graúdo utilizado no CAA deve ser mais arredondado, possuir distribuição granulométrica bem graduada, sendo estes fatores responsáveis pelo aumento da fluidez, deformabilidade e resistência à segregação. Segundo Repette (2005), quanto mais arredondados forem os grãos, mais volume deste material será possível empregar, devido à redução da fricção interna entre as suas partículas.

Do ponto de vista dessa dissertação, o seixo rolado usado na região de Belém-Pa pode ser considerado ideal na composição deste tipo de concreto por apresentar todos os requisitos necessários para a produção de um CAA. Forma

predominantemente arredondada, textura lisa e granulometria contínua são algumas das características deste material regional, conforme mostra a Figura 2.32. Porém vale lembrar que, quando forem requeridas altas resistências à compressão ($f_{ck} > 50\text{MPa}$), este tipo de agregado pode não ser a melhor solução, devido à sua baixa resistência mecânica quando comparado com a pedra britada de origem basáltica e granulítica.



Figura 2.33 – Forma arredondada e granulometria contínua são características do seixo rolado da região de Belém-Pa.

2.6.1.5. Superplastificantes

Segundo Nunes (2001); EFNARC (2002); Repette (2005) e Domone (2006), os superplastificantes mais recomendados para a produção do CAA são os chamados de 3ª geração, baseados em polímeros carboxilatos, por permitirem maior redução de água, maiores resistências iniciais e manutenção da fluidez por um tempo relativamente prolongado, em relação aos aditivos de 2ª geração. A grande diferença entre os superplastificantes de 2ª geração (à base de naftalenos e melaninas) e os de base carboxílicas é que estes últimos promovem dispersão das partículas por meio do efeito estérico, sem causar diminuição excessiva da viscosidade da pasta de cimento, o que é desejável quanto à resistência à segregação da mistura (REPETTE, 2005). Segundo EFNARC (2002), o superplastificante tem um papel importante no equilíbrio reológico da mistura, mantendo a tensão de escoamento baixa o suficiente para os processos de transporte e lançamento do CAA.

Porém durante o processo de mistura, este aditivo pode apresentar um comportamento inadequado devido à incompatibilidade com os outros componentes

sólidos, principalmente o cimento Portland. Para Aïtcin (2002), os parâmetros mais importantes para um bom desempenho do sistema (superplastificante x cimento) são os seguintes:

- ✓ A finura do cimento;
- ✓ A composição das fases do cimento;
- ✓ A quantidade de sulfato de cálcio presente no cimento;
- ✓ A quantidade e reatividade do C₃A presente no cimento;
- ✓ A temperatura e umidade do local de produção e lançamento do concreto.

Quanto à colocação do superplastificante na mistura, a maioria dos pesquisadores, Aïtcin (2000); Roncero (2000); Nunes (2001); EFNARC (2002); Domone (2005); Repette (2005) e Tutikian (2007) recomendam a sua incorporação na mistura apenas momentos antes do seu lançamento, visto que o período em que este aditivo mantém as propriedades reológicas desejadas do CAA (tempo em aberto) é relativamente pequeno, variando de 30 à 50 minutos. Para evitar problemas de perda de fluidez em dias quentes, Aïtcin (2000) recomenda o uso de um aditivo retardador de pega cuja dosagem e compatibilidade deve ser determinada previamente.

2.6.1.6. Aditivo modificador de viscosidade (VMA)

Os aditivos modificadores ou promotores de viscosidade são empregados para melhorar a resistência à segregação do CAA. Geralmente são produtos à base de polissacarídeos com cadeias poliméricas de alto peso molecular ou de base inorgânica, cuja função é absorver a água, formando um grande reticulado flexível, com conseqüente diminuição da exsudação e o aumento da viscosidade da pasta, evitando a segregação dos agregados (REPETTE, 2005 e EFNARC, 2006). Segundo Tutikian (2004), o uso do VMA pode dispensar ou reduzir o uso de adições minerais, que em alguns casos, possuem alto custo ou indisponibilidade no local de produção do CAA.

De acordo com EFNARC (2006), os modificadores de viscosidade são usados para:

- ✓ Reduzir a segregação do concreto;
- ✓ Facilitar o bombeamento do CAA;
- ✓ Reduzir a exsudação da mistura;
- ✓ Compensar a falta de finos, aumentando a coesão entre os componentes do CAA;
- ✓ Promover uma mistura mais homogênea;
- ✓ Melhorar a aparência superficial das peças concretadas;
- ✓ Reduzir a pressão no interior das fôrmas devido ao efeito tixotrópico.

Por outro lado, é necessário um maior controle quanto ao seu teor no CAA, bem como a sua compatibilização com o superplastificante. Segundo Peterssen (1998); Repette (2005) e EFNARC (2006), os principais problemas relacionados à utilização inadequada do VMA no concreto são:

- ✓ Retardamento da pega com alteração no desenvolvimento de resistência nas primeiras idades;
- ✓ Mistura excessivamente coesiva;
- ✓ Aumento da retração de secagem.

Segundo Guedes e Oliveira (2007), a melhor forma de avaliar a eficácia do VMA é adicioná-lo em pequenas quantidades, inclusive em teores menores do que os recomendados pelos fabricantes, e ir aumentando conforme seja necessário.

2.6.2. Requisitos para a mistura

2.6.2.1. Volume de pasta

Segundo Aïtcin (2000), a pasta de cimento pode ser considerada como uma mistura do cimento Portland, água, ar incorporado e eventuais adições minerais que estejam substituindo parte do cimento no concreto. Segundo Okamura e Ouchi

(2003), o CAA necessita de uma quantidade de pasta maior do que um concreto convencional. A explicação para este fato é que a pasta do concreto deve lubrificar e espaçar adequadamente os agregados, de forma que o atrito interno entre os mesmos não comprometa a capacidade do concreto de escoar. Além disso, misturas com maior relação finos/agregados proporcionam um aumento da coesão e viscosidade plástica que para o CAA representa maior resistência à segregação por manter os agregados em suspensão (REPETTE, 2005). Misturas de concreto ricas em materiais finos também aumentam a capacidade de adsorção do aditivo superplastificante por estes, potencializando o seu efeito e reduzindo a sua dosagem para a obtenção do espalhamento desejado (MELO, 2006).

Segundo Alencar e Helene (2006), um volume de pasta maior é necessário também devido ao melhor refinamento dos poros, com ganhos de durabilidade e acabamento superficial das peças concretadas. Porém faz-se necessário uma avaliação criteriosa de até quanto deve-se usar na formulação da pasta, pois valores muito altos podem causar o aparecimento de fissuras devido ao alto calor de hidratação gerado. Sonebi et al. (1999); EFNARC (2002); Repette (2005); Domone (2005); e de Larrard et al. (2006) recomendam o uso de cimento entre 350 e 500 kg/m³ de concreto, sendo que valores maiores devem ser compensados com o uso de adições pozolânicas ou não.

A Tabela 2.11 apresenta os teores de pasta recomendados para o CAA, segundo alguns pesquisadores.

Tabela 2.11 – Volume de pasta adotado para o CAA, bem como um intervalo destes valores.

REFERÊNCIA	Volume de pasta (%)	
Kosaka et al. (1999)	34,0	
De Larrad et al. (1999)	33,5	
Billberg et al. (1999)	36,7	
Tanaka e Mori (2001)	33,6	
Khayat (2002)	33,4	
Ouchi et al. (2003)	40,0	
Domone (2005)	32,5	
Sonebi (2006)	35,0	
INTERVALO	32,0	40,0

2.6.2.2. Teor de argamassa

O teor de argamassa para o CAA deve ser superior ao de um concreto convencional para se obter maior habilidade passante devido à redução do volume de agregado graúdo (OKAMURA, 2003, ALENCAR e HELENE, 2006). Além disso, este aumento pode tornar mais coesa a mistura, principalmente se o agregado miúdo possuir partículas predominantemente finas, interagindo com a pasta como se fosse algum tipo de adição não pozolânica.

Outra questão importante é o volume de agregado miúdo sobre o volume de argamassa, onde o intervalo entre 40 e 50% é o mais aceito pela maioria dos pesquisadores (SONEBI et al., 1999; OKAMURA e OUCHI, 2003; KHAYAT, 2003; DOMONE, 2005; de LARRARD et al., 2006). Volumes baixos de areia na argamassa ajudam a evitar o contato direto entre as suas partículas, evitando o travamento do sistema, e conseqüentemente, contribuindo para o aumento da deformabilidade do CAA. Segundo Okamura e Ouchi (2003), quanto maior o teor de agregado miúdo, maior a resistência ao cisalhamento da argamassa e do concreto, conforme ilustra a Figura 2.34.

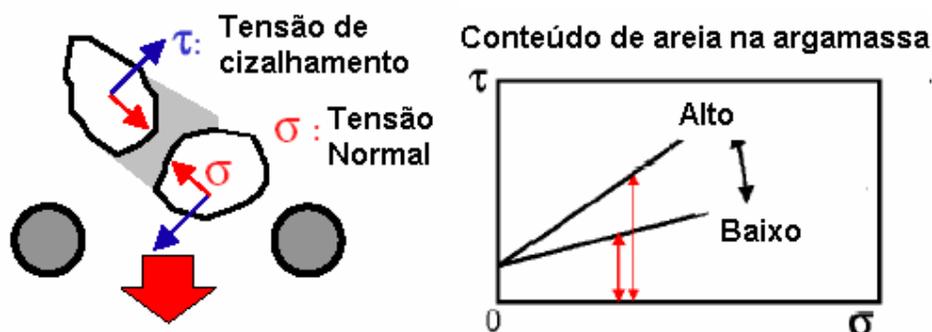


Figura 2.34 – Influência da quantidade de areia sobre o volume de argamassa.
Fonte: Okamura e Ouchi (2003)

A Tabela 2.12 apresenta os volumes de areia sobre o volume de argamassa recomendados para o CAA segundo alguns pesquisadores.

Tabela 2.12 – Volume de areia sobre o volume de argamassa adotado para o CAA, bem como um intervalo destes valores.

REFERÊNCIA	Volume de areia/argamassa (%)	
Kosaka et al. (1999)	48,4	
De Larrad et al. (1999)	50,0	
Billberg et al. (1999)	46,5	
Tanaka e Mori (2001)	44,5	
Khayat (2002)	41,0	
Ouchi et al. (2003)	47,5	
Domone (2005)	52,3	
Sonebi (2006)	45,3	
INTERVALO	41,0	52,0

2.6.2.3. Volume de agregado graúdo

Durante processo de dosagem, os dois requisitos mais importantes relacionados com o agregado graúdo são: o seu volume dentro da mistura e a forma dos seus grãos. Segundo Melo (2006), é necessário reduzir o teor de agregado graúdo para evitar o bloqueio das suas partículas na passagem do CAA por regiões estreitas e com altas taxas de armadura. Segundo Domone (2005), quanto mais angulosas forem as partículas de pedra menor será o seu teor sobre o volume de concreto e vice-versa. Alguns autores como Peterssen (1998); EFNARC (2002); Okamura e Ouchi (2003); Domone (2005); Kosaka et al., (2006) recomendam que o teor de agregado graúdo fique entre 28% e 35% do volume do concreto.

A Tabela 2.13 apresenta os volumes de agregado graúdo sobre o volume de concreto recomendados para o CAA segundo alguns pesquisadores.

Tabela 2.13 – Volume de agregado graúdo sobre o volume de concreto adotado para o CAA, bem como um intervalo destes valores.

REFERÊNCIA	Volume de agregado graúdo (%)	
Kosaka et al. (1999)	31,2	
De Larrad et al. (1999)	32,9	
Billberg et al. (1999)	28,3	
Tanaka e Mori (2001)	29,5	
Khayat (2002)	31,8	
Ouchi et al. (2003)	30,5	
Domone (2005)	35,0	
Sonebi (2006)	31,7	
INTERVALO	28,0	35,0

2.7. MÉTODOS DE DOSAGEM PROPOSTOS PARA O CAA

2.7.1. Método proposto por Okamura (1995)

Segundo Gomes (2002), os primeiros procedimentos para se chegar a um método racional de dosagem, que permitisse produzir concretos auto-adensáveis, foram propostos por *Hajime Okamura* e *Masahiro Ouchi*, em 1995. Este pesquisador afirma que um método para produzir um CAA envolve tanto a alta deformabilidade da pasta ou argamassa, quanto a resistência à segregação entre o agregado graúdo e a argamassa quando o concreto flui por zonas confinadas e com altas taxas de armadura. Ele estabeleceu que para que um concreto possa cumprir os requisitos de auto-adensibilidade, devem ser seguidos os seguintes passos (OKAMURA e OUCHI, 2003):

1. Limitar a quantidade de agregado graúdo,
2. Baixar a relação água/aglomerantes,
3. Usar aditivos superplastificantes em altas dosagens.

Ao limitar o conteúdo de agregados graúdos, *Okamura* afirma que há uma diminuição de contato entre estas partículas e, conseqüentemente, uma redução na pressão interna entre elas, principalmente quando o concreto é deformado próximo de obstáculos. Reduzindo a pressão interna, a quantidade de energia necessária para por em movimento o sistema é menor, e portanto o preenchimento de espaços restritos é conseguido mais facilmente. Da mesma forma, se a quantidade de agregado miúdo excede a um certo limite, o contato direto entre as partículas de areia provoca uma diminuição na deformabilidade da argamassa e do concreto, apesar da moderada viscosidade da pasta. Portanto, assim como o agregado graúdo, o volume de agregado miúdo sobre o volume total de argamassa também foi limitado.

Além disso, *Okamura* chegou à conclusão de que para fazer o concreto fluir mais facilmente, é necessário que a tensão de escoamento da pasta e da argamassa seja pequena o bastante para permitir tal deslocamento relativo entre as partículas dos agregados. Desta forma, fica evidente a necessidade da presença de

um aditivo superplastificante para que o auto-adensamento seja conseguido sem a ocorrência de segregação. Com a presença deste aditivo, a pasta apresenta um aumento na capacidade de fluxo com apenas uma pequena diminuição paralela da viscosidade. A Figura 2.35 dá uma idéia das diferenças entre as proporções dos materiais do CAA e do concreto convencional, segundo *Okamura e Ouchi* (2003).

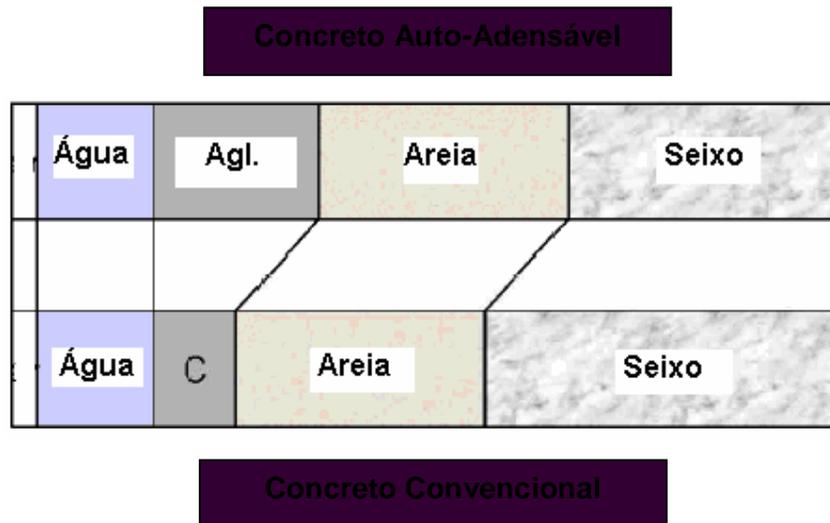


Figura 2.35 - Diferença na proporção dos materiais entre um concreto convencional e um CAA.
Fonte: OKAMURA E OUCHI (2003).

Este método de dosagem não especifica teores ótimos de aditivo superplastificante e relação água/aglomerante. Porém Okamura (1997) recomenda que a relação água/aglomerante deve se situar entre 0,90 e 1,00 em volume (aproximadamente de 0,32 a 0,40 em massa), dependendo das propriedades dos finos, enquanto que a dosagem do aditivo superplastificante deve ser determinada experimentalmente, até que a mistura possa fluir de maneira adequada. A forma para alcançar o auto-adensamento do concreto neste método, segundo o autor, obedece a um procedimento de dosagem, de acordo com o colocado na Figura 2.36.

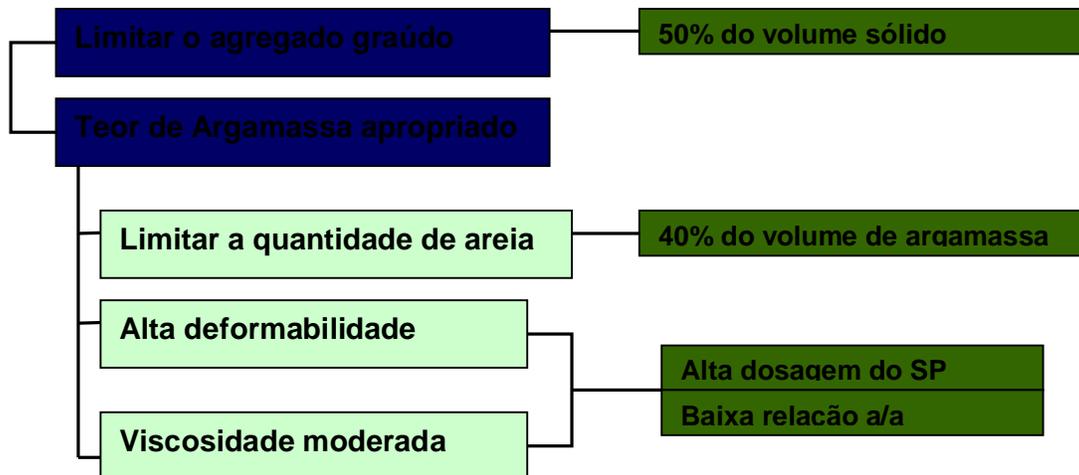


Figura 2.36 - Procedimento de dosagem do CAA proposto por Okamura.

Este método considera que o concreto auto-adensável consiste de duas fases: argamassa e agregado graúdo. Ensaios que verificam a influência da fluidez e viscosidade da argamassa, bem como a quantidade de agregado graúdo e sua dimensão máxima característica, são necessários para verificar se o concreto é auto-adensável para um determinado tipo de estrutura. Pois em caso contrário, devem ser realizados novos testes para se fazer possíveis correções na mistura.

Por meio do ensaio na caixa – U (U-flow test), Okamura e Ouchi (2003) demonstram que a influência do agregado graúdo na capacidade de fluxo do CAA no estado fresco depende da sua quantidade na mistura e do espaçamento entre os obstáculos existentes. A Figura 2.37 mostra o equipamento necessário à sua realização. E a Figura 2.38 mostra que, à medida em que se aumenta a quantidade de agregado graúdo neste ensaio, a altura de preenchimento do concreto diminui drasticamente com a diminuição do espaçamento entre os obstáculos. Para Hayakawa (apud OKAMURA, 2003), um concreto que atinja a altura de preenchimento maior do que 300 mm pode ser considerado como auto-adensável.

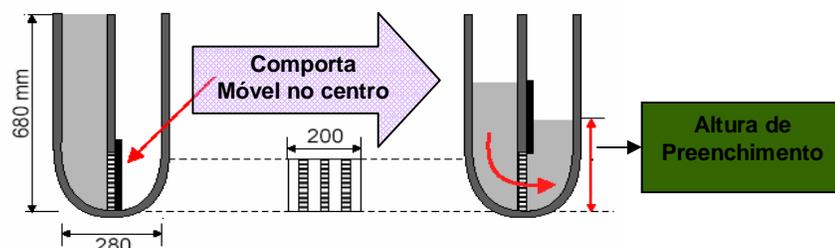


Figura 2.37 - Medidas do equipamento U-flow test, bem como seus obstáculos móveis R2 e R1, respectivamente.

Fonte: Okamura e Ouchi (2003)

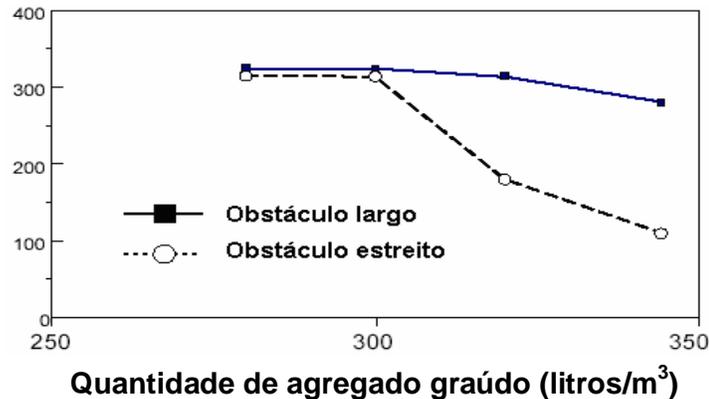


Figura 2.38: Influência da quantidade de agregado graúdo no auto-adensamento do CAA. Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

Para avaliar as propriedades das argamassas, podem ser realizados os seguintes ensaios: *Slump flow* (Figura 2.39a), que avalia a deformabilidade do concreto e da argamassa (Equações 2.4 e 2.6) e o *v-funnel* (Figura 2.39b), que avalia a viscosidade do concreto e da argamassa (Equações 2.5 e 2.7).

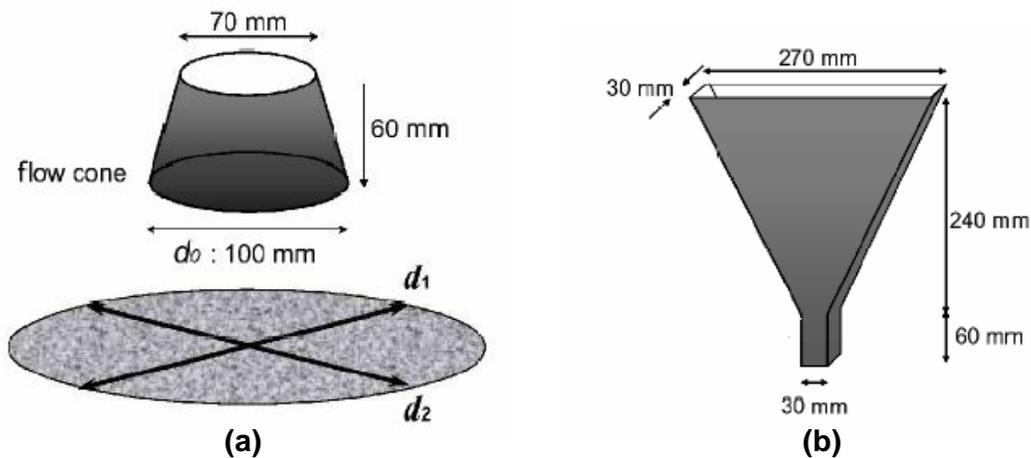


Figura 2.39 - a) *slump flow* para argamassas e concretos; **b)** *v-funnel* para argamassas e concretos. Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

$$\Gamma_c = \frac{(sf_1 * sf_2 - sf_0^2)}{sf_0^2} \quad (\text{eq. 2.4})$$

$$Rc = \frac{10}{tc} \quad (\text{eq. 2.5})$$

$$\Gamma_a = \frac{(d_1 * d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (\text{eq. 2.6})$$

$$Ra = \frac{10}{ta} \quad (\text{eq. 2.7})$$

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

2.7.1.1. Análise crítica do método

Devido ao estudo desenvolvido por *Okamura* desde meados da década de 80, foi possível a obtenção do concreto auto-adensável e seu aperfeiçoamento ao longo dos anos.

Porém o seu método de dosagem foi muito mais um conjunto de recomendações com informações insuficientes do que um método com diretrizes bem definidas. Limitar as quantidades de agregado graúdo e miúdo, a relação a/c , bem como aumentar o teor de finos não são informações suficientes quando as propriedades do CAA no estado endurecido são tão importantes quanto no estado fresco. Também não fica claro o que seriam altas dosagens de superplastificantes, pois dependendo do teor de pasta, estas dosagens podem variar. Por fim *Okamura* não apresenta os limites dos resultados dos ensaios de espalhamento e funil – V que o mesmo recomenda para a otimização das propriedades de fluxo e viscosidade da argamassa e do concreto.

Por outro lado, informações como: aumento do teor de argamassa e redução do teor de agregado graúdo foram de fundamental importância para a produção de uma mistura com alta fluidez, moderada viscosidade e habilidade de passagem por espaços restritos, servindo de base para o desenvolvimento de novos e mais completos procedimentos de dosagem para o CAA.

2.7.2. Método proposto por Gomes (2002)

Este método apresenta um procedimento de caráter experimental para a obtenção da dosagem do concreto auto-adensável de alta resistência (CAAAR). Este procedimento se apresenta como um aperfeiçoamento do método desenvolvido

por Toralles et al. (1998), que incorporou critérios de dosagem, relativo aos concretos auto-adensáveis, para concretos de alta resistência. O concreto de alta resistência (CAR), por ser um concreto já bastante utilizado em grande parte dos países do mundo, oferece a possibilidade de incorporar, em suas características, o auto-adensamento, que em conjunto com a alta resistência terá aplicação nas mais diversas áreas da engenharia (GOMES et al., 2003).

Este método considera o concreto como um material bifásico, sendo que uma fase é a pasta de cimento e a outra é o esqueleto granular, e está fundamentado na hipótese de que estas fases podem ser obtidas e otimizadas separadamente, de modo a se obter uma mistura que atenda as características desejadas. A pasta é constituída por cimento, sílica ativa (no caso de concreto de alta resistência), filer, superplastificante e água, enquanto que o esqueleto granular é formado por agregados graúdo e miúdo em uma relação ótima, de modo a proporcionar uma máxima densidade (massa unitária) em seco e sem compactação.

Os critérios de otimização adotados na aplicação dos procedimentos vem acompanhados por uma resistência mínima à compressão, com o cumprimento de requisitos de auto-adensamento no estado fresco e com uma quantidade mínima de cimento e superplastificante. Segundo Gomes (2002), o CAAAR deve alcançar os 50 MPa aos 7 dias, para ser considerado de alta resistência. Para isto, este pesquisador propõe algumas diretrizes que devem ser seguidas, tais como:

1. Fixar a relação água/aglomerante, a princípio, no limite superior de 0,40 para em seguida ir sendo diminuída, até se atingir a resistência requerida para o concreto;
2. Otimizar as relações sílica ativa/cimento (sa/c), superplastificante/cimento (sp/c) e filer/cimento (f/c);
3. Otimizar o esqueleto granular, de modo que este apresente o mínimo de vazios e que o tamanho máximo característico do agregado graúdo seja limitado em 20 mm;
4. Determinar uma pasta que seja auto-adensável quando no concreto e que alcance a resistência à compressão desejada.

Neste estudo, Gomes (2002) utilizou cimento de alta resistência inicial juntamente com a sílica ativa, um superplastificante copolímero de última geração e um fíler com tamanho máximo das partículas em torno de 80µm. Este autor recomenda uma dosagem de sílica ativa de 10% em substituição à massa do cimento, levando em consideração que este é um percentual ótimo para concretos de alta resistência em termos de benefício e custo. A Figura 2.40 mostra a seqüência de dosagem do CAAAR, segundo Gomes (2002).

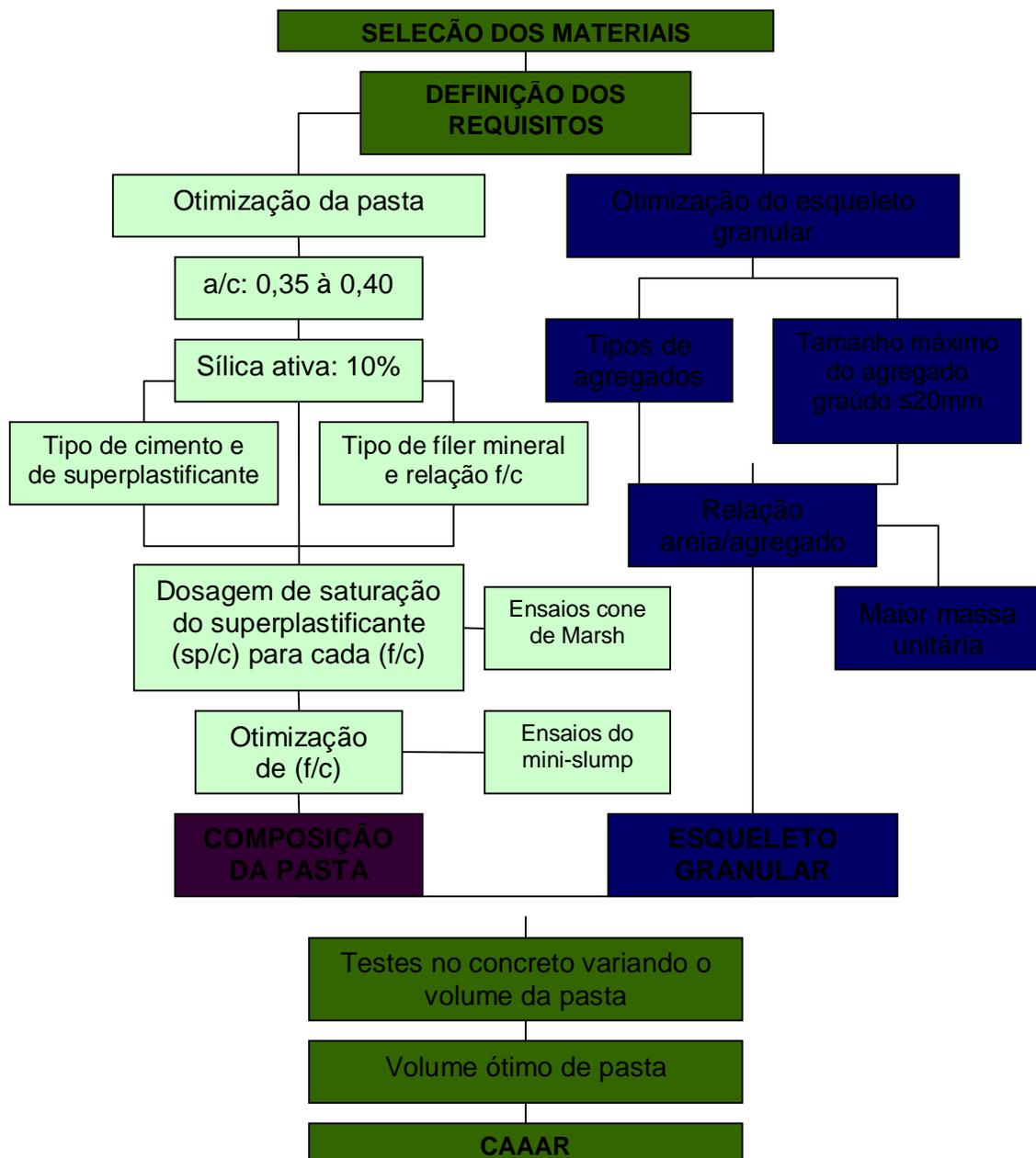


Figura 2.40 - Metodologia de dosagem segundo Gomes.

A composição da pasta é definida através da quantidade de cimento e das relações a/c, sp/c, sa/c e f/c. Conforme citado anteriormente, para um concreto de alta resistência, é fixado, a princípio, a relação água/aglomerantes em 0,40 (limite superior) e a relação sa/c em 0,10 (10% da massa de cimento). E, em função disto, os parâmetros a serem determinados neste caso são as relações sp/c e f/c.

A dosagem de superplastificantes é determinada através de ensaios no cone de *Marsh*. Tal procedimento consiste em medir o tempo (T) necessário para que 500ml de pasta possa fluir completamente pela abertura inferior do cone. Este tempo de fluxo se apresenta como um parâmetro inverso da fluidez da pasta (GOMES, 2002). Neste procedimento de ensaio deve-se fixar previamente a quantidade de cimento, água e filler da pasta e variar a relação sp/c, a fim de se obter uma curva logarítmica T versus sp/c necessário para se definir o ponto de saturação do aditivo, que é a sua percentagem ótima em relação à pasta utilizada. O ponto de saturação corresponde a uma relação sp/c para a qual um aumento na dosagem de superplastificante não provoca nenhuma melhora significativa na fluidez da pasta (AÏTCIN, 2000). A Figura 2.41 mostra as dimensões para o cone de Marsh, bem como diagrama T versus sp/c que determina o ponto de saturação do superplastificante.

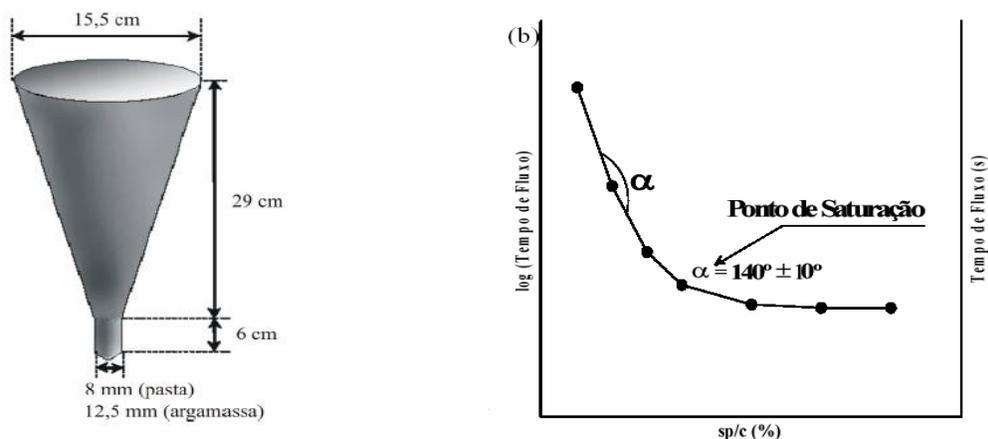


Figura 2.41 - Ensaio do cone de Marsh e curva log T x SP/c (%) para o ponto de saturação. Fonte: Gomes et al. (2006).

Porém a dosagem de superplastificante correspondente ao ponto de saturação depende da relação f/c da pasta, e que segundo Gomes (2002) deve ficar entre 0,10 e 0,50. Contudo, é desejável que seja encontrado um valor ótimo para

dosagem de filer, que pode ser obtido através do ensaio do *mini-slump*. O equipamento usado neste ensaio foi proposto por Kantro (1980), que consiste de um molde em forma de troco de cone, com a finalidade de fazer um ensaio de abatimento com uma pequena quantidade de pasta. O diâmetro final de espalhamento da pasta e o tempo gasto para se alcançar um diâmetro de 115 mm (T_{115}), são os resultados do ensaio (Figuras 2.42 e 2.43). Os testes são realizados com diferentes relações f/c, cada uma com a sua dosagem de superplastificante, correspondente ao ponto de saturação, já determinada anteriormente, através do cone de *Marsh*. A relação f/c, considerada ótima, da pasta, é aquela que apresenta um diâmetro de espalhamento de 180 ± 10 mm e um tempo T_{115} no intervalo de 2 a 3,5 segundos (GOMES, 2002).

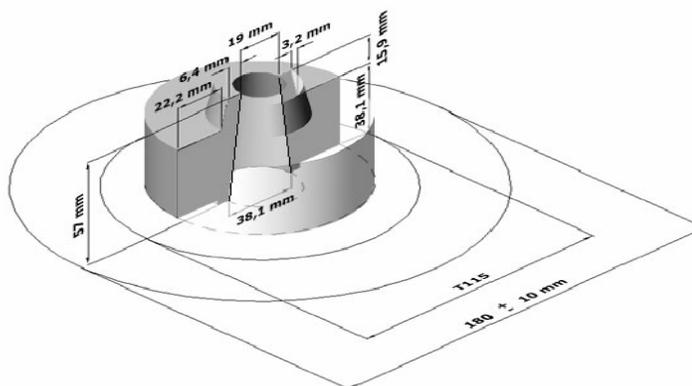


Figura 2.42 - Equipamento necessário para o ensaio do mini-slump.
Fonte: Gomes (2002).



Figura 2.43 - Ensaio do mini-slump sendo realizado em argamassa.
Fonte: Calmon (2006).

Com relação ao esqueleto granular, o volume e o tamanho máximo dos agregados graúdos são limitados pelas propriedades requeridas para um concreto de alta resistência e que seja auto-adensável. Um outro aspecto é o grau de compacidade entre agregados graúdos e miúdos, ou seja, a relação areia/agregado graúdo, que é determinada segundo um critério de máxima densidade em seco e sem compactação, no sentido de ser obtida a mínima quantidade de vazios entre os dois materiais.

Na determinação desta relação, Toralles et al. (1998) e Gomes (2002) propõem uma adaptação do ensaio da norma ASTM C29/C29M, que consiste em preencher um recipiente com 5 litros de uma mistura seca com certa relação areia/agregado graúdo. A partir dos dados dos dois materiais, densidade e massa de cada componente, obtêm-se a massa unitária e o volume de vazios de cada mistura. O ensaio é realizado para várias relações entre os componentes, até se chegar a uma relação ótima entre eles, que apresente a maior massa unitária e o menor volume de vazios (GOMES, 2002).

Após a determinação das relações ótimas de sp/c e f/c para a pasta, por meio dos ensaios demonstrados, e da relação areia/agregado graúdo, segundo o critério de maior densidade com menor volume de vazios, parte-se para a determinação do volume ótimo de pasta para o concreto que se deseja produzir, de modo que sejam produzidos concretos com uma quantidade mínima de pasta que deve preencher os espaços vazios do esqueleto granular e proporcionar as características de auto-adensamento esperadas para este tipo de mistura.

2.7.2.1. Análise crítica do método

O método proposto por Gomes, ao separar o concreto em duas fases distintas, não está levando em consideração que estas fases irão trabalhar em conjunto quando na mistura de concreto e que as características, tanto da pasta quanto do esqueleto granular, podem não serem as mesmas quando houver interação entre eles. A análise da pasta de forma isolada não leva em consideração a granulometria, forma e textura dos grãos dos agregados que em termos reológicos podem modificar as propriedades de deformação e escoamento desta pasta.

Do ponto de vista da otimização do esqueleto granular, esta é bastante recomendada quando se pensa em propriedades do concreto no estado endurecido e custo do mesmo. Porém de menor relevância com relação às propriedades do CAA no estado fresco. Conforme é colocado por diversos autores (Okamura, 1997; Kayhat, 2000; Kin et al., 2003; Domone, 2006), tem-se que, para o concreto auto-adensável, altos teores de pasta e argamassa, bem como redução do volume de

agregado graúdo são necessários para se obter uma mistura que tenha baixa tensão de escoamento e moderada viscosidade plástica.

Por fim, a fixação da relação a/c e do teor de sílica ativa podem não funcionar de forma adequada quando houver variação na granulometria, forma e textura dos agregados, sendo este um método pouco abrangente em termos de variação destes materiais.

2.7.3. Método proposto por Tutikian (2004)

Este método de dosagem se propõe a produzir o CAA a partir do aperfeiçoamento do método do IPT/EPUSP empregado para concretos convencionais. Neste processo a adaptação do método para a produção do CAA ocorre com verificações experimentais das suas propriedades fundamentais.

Segundo Tutikian (2004), a intenção deste método é dosar concretos auto-adensáveis com quaisquer materiais disponíveis regionalmente, apenas cumprindo requisitos básicos e seguindo um método detalhado que tem por objetivo final desenhar o diagrama de proporcionamento com o auxílio das leis de comportamento usadas no método IPT/EPUSP. Deste modo, o autor apresenta um roteiro geral que deve ser seguido e que relaciona as leis de Abrams, de Lyse e de Molinari com os materiais previamente selecionados por questões econômicas e de disponibilidade local.

Por ser uma adaptação do método do IPT/EPUSP para concretos convencionais, este método de dosagem está baseado em passos previamente determinados, com a adição dos quatro componentes básicos: cimento, agregados miúdo e graúdo e água. A diferença está em adicionar mais outros dois: as adições minerais e os aditivos. A fase experimental parte do princípio de que são necessários, pelos menos, três pontos para poder montar o diagrama de dosagem (Figura 2.44).

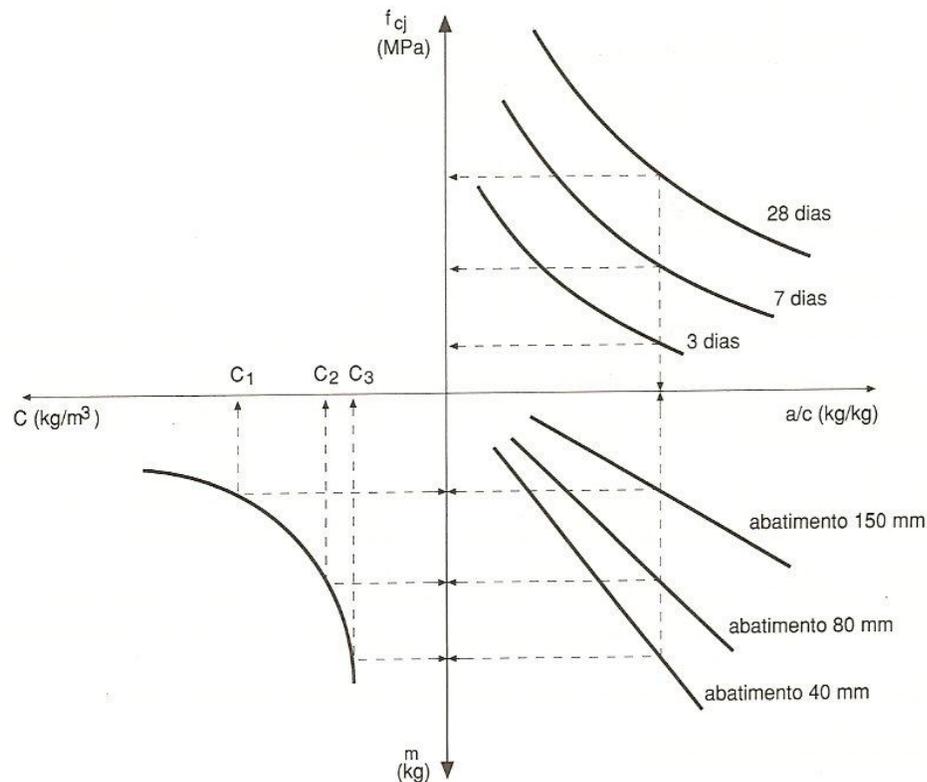


Figura 2.44 - Exemplo de diagrama de dosagem com pontos, que relacionam resistência de dosagem a compressão (f_{cj}), relação água/cimento (a/c), traço (m) e consumo de cimento por metro cúbico (C). Fonte: Helene e Terzian (1992).

Estes pontos são obtidos através da produção de um traço dito intermediário, cuja proporção sugerida é de 1:5,0 (cimento:agregados secos totais, em massa), onde se determina o teor ideal de argamassa para este concreto produzido com um determinado tipo de material. Baseada nas informações obtidas desta mistura são produzidas, pelo menos, mais duas, com traços chamados de rico e pobre (1:3,5 e 1:6,5, por exemplo). Tutikian (2004) destaca que estes três pontos devem abranger toda a faixa de valores requerida, de forma que se evite extrapolações. Então, com o diagrama desenhado, as equações e trabalhabilidade da mistura determinadas, pode-se obter um concreto com qualquer resistência dentro do intervalo estudado, desde que sejam utilizados os mesmos materiais do estudo prévio.

Segundo Tutikian (2004), para se obter um CAA a partir de um concreto convencional deve-se seguir os seguintes passos:

1. Escolha dos materiais que irão produzir a mistura com ênfase no tamanho máximo do agregado graúdo, que deve ser de no máximo 20 mm ou 1/3 do espaçamento entre as armaduras, na compatibilidade entre

os aditivos superplastificante e modificador de viscosidade (VMA), bem como no custo unitário das adições minerais.

2. Determinação do teor ideal de argamassa da mistura seca para o traço 1:5 e que deve ser o mesmo para os demais traços da família produzida. Deve-se atentar para o fato de que o teor de argamassa do CAA será igual ao de um concreto convencional.

3. Determinação de pelos mais dois traços básicos, um rico e um pobre, em relação ao traço intermediário, e que irão auxiliar no desenho do diagrama de dosagem. Vale lembrar que podem haver mais de três traços para este método, o que corresponde a um diagrama mais abrangente em termos de intervalo de valores.

4. Colocação do aditivo superplastificante na mistura previamente dosada com o objetivo de transformar um concreto convencional em CAA. A dosagem considerada ideal deve ser obtida por meio de observações visuais a partir de pequenas dosagens (0,30% em relação à massa de cimento) até que se consiga o espalhamento desejado, porém sem a preocupação com a ocorrência de segregação.

5. Ajuste na dosagem dos finos (pozolânicos ou não) pela substituição por parte do cimento ou agregado miúdo, respectivamente, com o objetivo de aumentar a coesão e viscosidade, bem como reduzir o risco de segregação da mistura. Os passos 4 e 5 são realizados simultaneamente até a obtenção de uma mistura que apresente as características de um CAA. Para esta etapa foram criadas as Tabelas 2.12 e 2.13 com o objetivo de auxiliar o responsável pela dosagem por meio do acerto na proporção de finos utilizados.

Tabela 2.12 - Determinação da proporção entre o fino pozolânico e o cimento.

SUBSTITUIÇÃO POR FINOS POZOLANICOS									
TRAÇO	1 : 6,5	TEOR DE ARGAMASSA (α)	46,0%		MASSA DE CIMENTO (Kg)	5,00			
TRAÇO UNITÁRIO (c:f:a:s)	SUBST. %	CIMENTO (Kg)		FINOS (Kg)		AREIA (Kg)		SEIXO (Kg)	
		M. Total	Acréscimo	M. Total	Acréscimo	M. Total	Acréscimo	M. Total	Acréscimo
1 : 0 : 2,45 : 4,05	0,0	5,00	0,00	0,26	12,25	0,64	20,25	1,07	
0,95 : 0,05 : 2,45 : 4,05	5,0	5,00	0,26	0,29	12,89	0,72	21,32	1,18	
0,9 : 0,1 : 2,45 : 4,05	10,0	5,00	0,56	0,33	13,61	0,80	22,50	1,32	
0,85 : 0,15 : 2,45 : 4,05	15,0	5,00	0,88	0,37	14,41	0,90	23,82	1,49	
0,8 : 0,2 : 2,45 : 4,05	20,0	5,00	1,25	0,42	15,31	1,02	25,31	1,69	
0,75 : 0,25 : 2,45 : 4,05	25,0	5,00	1,67	0,48	16,33	1,17	27,00	1,93	
0,7 : 0,3 : 2,45 : 4,05	30,0	5,00	2,14	0,55	17,50	1,35	28,93	2,23	
0,65 : 0,35 : 2,45 : 4,05	35,0	5,00	2,69	0,64	18,85	1,57	31,15	2,60	
0,6 : 0,4 : 2,45 : 4,05	40,0	5,00	3,33		20,42		33,75		

Tabela 2.13 - Determinação da proporção entre os finos não-pozolânicos e o agregado miúdo.

SUBSTITUIÇÃO POR FINOS NAO-POZOLANICOS									
TRAÇO	1 : 3,0	TEOR DE ARGAMASSA (α)	53,0%		MASSA DE AREIA (Kg)	10,00			
TRAÇO UNITÁRIO (c:f:a:s)	SUBST. %	CIMENTO (Kg)		FINOS (Kg)		AREIA (Kg)		SEIXO (Kg)	
		M. Total	Acréscimo	M. Total	Acréscimo	M. Total	M. Total	Acréscimo	
1 : 0 : 1,12 : 1,88	0,00	8,93	0,88	0,00	0,98	10,00	16,79	1,65	
1 : 0,1 : 1,02 : 1,88	8,93	9,80	1,07	0,98	2,17	10,00	18,43	2,00	
1 : 0,2 : 0,92 : 1,88	17,86	10,87	1,33	3,15	3,66	10,00	20,43	2,49	
1 : 0,3 : 0,82 : 1,88	26,79	12,20	1,69	6,81	5,56	10,00	22,93	3,18	
1 : 0,4 : 0,72 : 1,88	35,71	13,89	2,24	12,37	8,06	10,00	26,11	4,21	
1 : 0,5 : 0,62 : 1,88	44,64	16,13	3,10	20,43	11,54	10,00	30,32	5,83	
1 : 0,6 : 0,52 : 1,88	53,57	19,23	4,58	31,97	16,67	10,00	36,15	8,61	
1 : 0,7 : 0,42 : 1,88	62,50	23,81	7,44	48,64	25,00	10,00	44,76	13,99	
1 : 0,8 : 0,32 : 1,88	71,43	31,25	14,20	73,64	40,91	10,00	58,75	26,70	
1 : 0,9 : 0,22 : 1,88	80,36	45,45	37,88	114,55	83,33	10,00	85,45	71,21	
1 : 1,0 : 0,12 : 1,88	89,29	83,33		197,88		10,00	156,67		

6. Realização dos ensaios de trabalhabilidade para o CAA produzido (espalhamento, espalhamento T_{50cm} , funil – V, caixa – L, caixa – U e tubo U) de modo que os resultados sejam compatíveis com os intervalos propostos para estes ensaios.

7. Comparação entre as propriedades do CAA sem e com o aditivo modificador de viscosidade, visto que nem sempre será possível a utilização de adições, por motivos de custo ou disponibilidade local.

8. Moldagem dos corpos-de-prova para a ruptura à compressão nas idades requeridas com o objetivo de se obter os dados necessários para o desenho do diagrama de dosagem.

O método proposto por *Tutikian* está descrito de acordo com o passo-a-passo estabelecido no diagrama da figura 2.45:

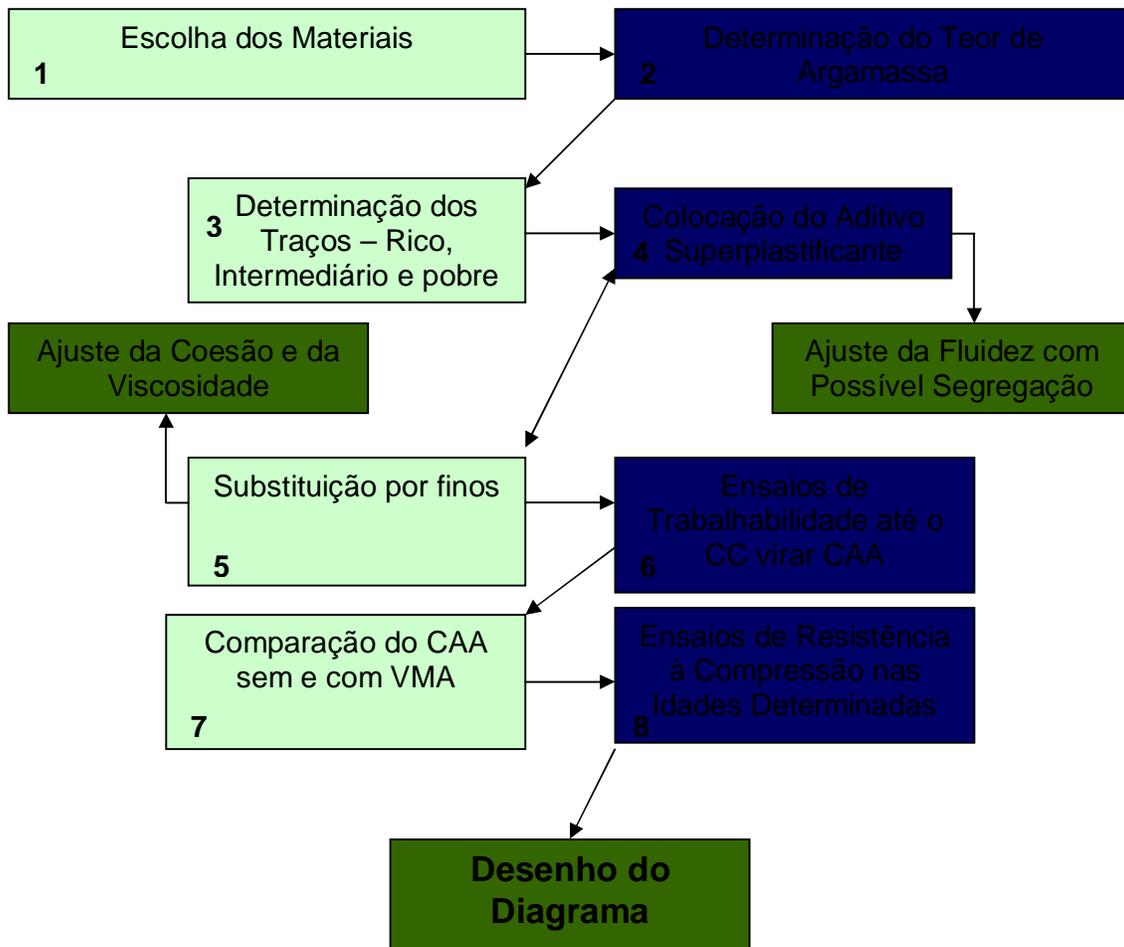


Figura 2.45 - Passo-a-passo para a dosagem do CAA segundo Tutikian (2004).

Por fim, deve-se seguir as equações fornecidas pelo método do IPT/EPUSP com o cuidado apenas de identificar se os finos usados são pozolânicos ou não. Estas equações estão descritas abaixo sendo que: (eq. 2.9 à 2.17) são usadas para CAA's com substituição por finos não-pozolânicos e (eq. 2.18 à 2.28) são usadas para CAA's com substituição por pozolânicos.

a) Adições não-pozolânicas:

$$fcj = \frac{k1}{k_2^{a/c}} \quad (\text{eq.2.8})$$

$$m = k3 + k4 * a / c \quad (\text{eq.2.9})$$

$$C = \frac{1000}{(k_5 + k_6 * a / c)} \quad (\text{eq.2.10})$$

$$\alpha = \frac{(1 + f + a)}{(1 + m)} \quad (\text{eq.2.11})$$

$$m = a + p + f \quad (\text{eq.2.12})$$

$$C = \frac{\gamma}{(1 + f + a + p + a / c)} \quad (\text{eq.2.13})$$

$$C = \frac{(1000 - ar)}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{1}{\gamma_f} + \frac{1}{\gamma_a} + \frac{1}{\gamma_p} + a / c \right)} \quad (\text{eq.2.14})$$

$$A = C * a / c \quad (\text{eq.2.15})$$

$$Cu = C * \$c + C * f * \$f + C * a * \$a + C * p * \$p + C * SP\% * \$sp + C * VMA\% * \$vma + C * a / c * \$\acute{a}gua \quad (\text{eq.2.16})$$

b) Adições pozolânicas:

$$fcj = \frac{k1}{k_2^{a/agl}} \quad (\text{eq.2.17})$$

$$m = k3 + k4 * a / agl \quad (\text{eq.2.18})$$

$$C = \frac{1000}{(k_5 + k_6 * a / agl)} \quad (\text{eq.2.19})$$

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} \quad (\text{eq.2.20})$$

$$m = a + p \quad (\text{eq.2.21})$$

$$MC = \frac{\gamma}{(1 + a + p + a / agl)} \quad (\text{eq.2.22})$$

$$MC = \frac{(1000 - ar)}{\left(\frac{c}{\gamma_c} + \frac{fp}{\gamma_{fp}} + \frac{1}{\gamma_a} + \frac{1}{\gamma_p} + a / agl \right)} \quad (\text{eq.2.23})$$

$$C = MC * C\% \quad (\text{eq.2.24})$$

$$FP = 1 - C \quad (\text{eq.2.25})$$

$$A = MC * a / agl \quad (\text{eq.2.26})$$

$$Cu = C * \$c + C * fp * \$fp + C * a * \$a + C * p * \$p + C * SP\% * \$sp + C * VMA\% * \$vma + C * a / agl * \$\acute{a}gua \quad (\text{eq.2.27})$$

2.7.3.1. Análise crítica do método

Com o objetivo de simplificar a dosagem e produção do CAA, *Tutikian* propôs um método experimental que avalia, por meio de observações visuais, as características da mistura no estado fresco com a variação na dosagem do superplastificante e de adições minerais. Desta forma o concreto é avaliado como um material multifásico por meio da interação entre todos os seus componentes e não como a soma de duas fases analisadas separadamente.

Porém, ao manter o teor de argamassa inalterado, *Tutikian* não leva em consideração o fato de que o CAA deve possuir um volume limitado de agregado graúdo, dando à mistura maior habilidade de passagem por espaços restritos. Além disso, altos teores de argamassa podem melhorar as condições de coesão e resistência à segregação dos componentes da mistura, principalmente se esta for produzida com areia de granulometria fina (módulo de finura < 2,0), reduzindo desta forma o teor de substituição por adições minerais. Qualquer redução de finos pode melhorar as condições de trabalhabilidade da mistura, o que irá demandar menores dosagens de superplastificante.

Desta forma, estudos de dosagem do CAA, com o uso deste método, devem ser realizados com uma gama mais abrangente de materiais que possam comprovar a eficácia do mesmo na produção deste tipo de concreto. Somente assim é que este poderá ser considerado um método universal de dosagem.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será descrito o programa experimental deste trabalho, bem como a metodologia adotada para a dosagem e produção dos CAA's. Devido à inexistência de pesquisas, em nível local, sobre este assunto, fez-se necessário um estudo piloto de produção do CAA com o auxílio do método proposto por Tutikian (2004) em função dos bons resultados obtidos com os materiais do Rio Grande do Sul e por ser recomendado para quaisquer materiais regionais. O referido estudo avaliou algumas propriedades tanto no estado fresco (capacidade de fluxo, coesão, habilidade passante e resistência à segregação), por meio de ensaios específicos (espalhamento, espalhamento T_{50cm} , funil – V e tubo – U). No estado endurecido, a avaliação foi realizada por meio de ensaios de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral.

Com os resultados deste estudo foi possível determinar algumas alterações no método de dosagem original proposto, que puderam trazer benefícios técnicos e econômicos, durante a produção do CAA, para o presente trabalho, otimizando, deste modo, todo o potencial de uso dos agregados regionais.

3.2. ESTUDO PILOTO

Neste estudo foram produzidas três famílias de concreto na seguinte ordem: uma família de um concreto convencional de referência nos traços 1:3,5; 1:5,0 e 1:6,5 em massa, uma família de um CAA com substituição de metacaulim em relação à massa de cimento sem a utilização do aditivo modificador de viscosidade (VMA) e uma última família de CAA com substituição de metacaulim e com a utilização do VMA, ambas com os traços de 1:3,5; 1:5,0 e 1:6,5.

Segundo Tutikian (2004), primeiramente deve-se determinar o teor de argamassa do concreto de referência com base no método tradicional IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992). Neste primeiro momento, partindo-se de um traço intermediário de 1:5,0 em massa, este teor de argamassa foi determinado somente

para o concreto de referência, sem adição de metacaulim e superplastificante. O estudo mostrou que o teor de argamassa ideal, para os materiais em questão, ficou em 46%, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Determinação do teor de argamassa seca para o concreto de referência.

Determinação do Teor de argamassa Seca (1:5)				
Teor	Traço em massa (1:m)	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Seixo (Kg)
43	1:1,58:3,42	7,31	11,55	25,0
44	1:1,64:3,36	7,44	12,20	25,0
45	1:1,70:3,30	7,58	12,89	25,
46	1:1,76:3,24	7,72	13,58	25,0
47	1:1,82:3,18	7,86	14,30	25,0
Água (kg): 4,39				
Abatimento (mm) = 80,0				
Relação a/c = 0,57				

Este valor difere dos teores de argamassa de concretos produzidos com agregado britado, pois como já foi dito, o seixo rolado necessita de menos material para preencher os seus espaços vazios, por se tratar de um agregado que possui a forma predominantemente arredondada e conseqüentemente com um menor valor da superfície específica. Segundo Tutikian (2004) o teor de argamassa escolhido para o concreto de referência deve se mantido constante para as demais famílias de CAA que se deseja produzir.

Passada esta etapa, partiu-se para a dosagem dos CAA's com a determinação do teor do aditivo superplastificante e do teor ideal de substituição de metacaulim por parte do cimento. Esta última determinação foi feita a partir de um determinado teor (10% de metacaulim sobre a massa de cimento) com o aumento de cinco em cinco por cento na sua dosagem até o momento em que a mistura se mostrou fluida e coesa o suficiente para ser considerada um CAA. Para isso foram realizados os ensaios de espalhamento, espalhamento T_{50cm} e de verificação do tempo de queda da mistura do funil V. As dosagens do superplastificante e a quantidade de água foram alteradas de acordo com o aumento de metacaulim, até se chegar a um valor considerado ideal. Os traços escolhidos para as duas famílias de CAA produzidas neste estudo estão nas Tabelas 3.2 e 3.3 respectivamente.

Tabela 3.2 - CAA produzido com metacaulim e sem VMA.

CAA - Metacaulim sem VMA (1:3,5) - $\alpha = 46\%$						
Traço	Cimento (kg)	M.C (kg)	Areia (kg)	Seixo (kg)	Espalhamento (mm)	
0,9:0,1:1,07:2,43	9,00	1,00	10,70	24,30	Esp. T50cm (seg)	620
0,85:0,15:1,07:2,43	9,00	1,59	11,33	25,73	a/agl	2,03
0,8:0,2:1,07:2,43	9,00	2,25	12,04	27,34	SP (%)	0,55
CAA - Metacaulim sem VMA (1:5) - $\alpha = 46\%$						
Traço	Cimento (kg)	M.C (kg)	Areia (kg)	Seixo (kg)	Espalhamento (mm)	
0,9:0,1:1,76:3,24	7,72	0,86	15,10	27,79	Esp. T50cm (seg)	670
0,85:0,15:1,76:3,24	7,72	1,36	15,98	29,43	a/agl	2,5
0,8:0,2:1,76:3,24	7,72	1,93	16,98	31,27	SP (%)	0,64
CAA - Metacaulim sem VMA (1:6,5) - $\alpha = 46\%$						
Traço	Cimento (kg)	M.C (kg)	Areia (kg)	Seixo (kg)	Espalhamento (mm)	
0,85:0,15:2,45:4,05	5,00	0,88	14,41	23,82	Esp. T50cm (seg)	670
0,8:0,2:2,45:4,05	5,00	1,25	15,31	25,31	a/agl	1,8
0,75:0,25:2,45:4,05	5,00	1,67	16,33	27,00	SP (%)	1,00

LEGENDA: M.C. – Metacaulim; S.P. – superplastificante.

Tabela 3.3 - CAA produzido com metacaulim e com VMA.

CAA - Metacaulim com VMA (1:3,5) - $\alpha = 46\%$					Espalhamento (mm)	
Traço	Cimento (kg)	M.C. (kg)	Areia (kg)	Seixo (kg)	Esp. T50cm (seg)	
0,95:0,05:1,12:1,88	9,00	0,47	10,14	23,02	a/agl	650
0,9:0,1:1,12:1,88	9,00	1,00	10,70	24,30	SP (%)	2,14
0,85:0,15:1,12:1,88	9,00	1,59	11,33	25,73	VMA (%)	0,54
CAA - Metacaulim com VMA (1:5) - $\alpha = 46\%$					Espalhamento (mm)	
Traço	Cimento (kg)	M.C. (kg)	Areia (kg)	Seixo (kg)	Esp. T50cm (seg)	
0,95:0,05:1,12:1,88	7,72	0,41	14,30	26,33	a/agl	620
0,9:0,1:1,12:1,88	7,72	0,86	15,10	27,79	SP (%)	2,3
0,85:0,15:1,12:1,88	7,72	1,36	15,98	29,43	VMA (%)	0,66
CAA - Metacaulim com VMA (1:6,5) - $\alpha = 46\%$					Espalhamento (mm)	
Traço	Cimento (kg)	M.C. (kg)	Areia (kg)	Seixo (kg)	Esp. T50cm (seg)	
0,95:0,05:1,12:1,88	5,00	0,26	12,89	21,32	a/agl	610
0,9:0,1:1,12:1,88	5,00	0,56	13,61	22,50	SP (%)	1,8
0,85:0,15:1,12:1,88	5,00	0,88	14,41	23,82	VMA (%)	0,94

LEGENDA: M.C. – Metacaulim; S.P. – superplastificante.

De acordo com as Tabelas 3.2 e 3.3, as linhas destacadas em cinza representam o traço escolhido com o teor de metacaulim considerado ideal e a última coluna mostra algumas características destes traços tais como: valor de espalhamento do troco de cone, tempo necessário para a mistura se espalhar por um diâmetro de 50 cm, relação água/aglomerante, teor de superplastificante e de VMA em relação à massa de aglomerantes.

Com o teor de argamassa igual ao do concreto de referência, houve a necessidade por mais substituição de metacaulim por parte do cimento, para

aumentar a coesão e viscosidade deste CAA. Desta forma, a superfície específica dos componentes da mistura aumentou, ocasionando uma maior necessidade por água e por superplastificante. E por se trabalhar com um agregado miúdo de granulometria muito fina (módulo de finura = 1,55), esta necessidade se acentuou, objetivando espalhamentos acima de 600 mm. Como o superplastificante é o componente mais caro por metro cúbico de CAA, houve um aumento considerável no custo final de produção, onde os CAA's apresentaram elevação de custo de até 37% aos 07 dias e de até 54% aos 28 dias em relação ao concreto convencional, respectivamente. Aliado a isso, o preço do quilo do metacaulim, na região, é bem mais elevado do que o preço do quilo do cimento, o que inviabiliza o seu uso em altas dosagens (porcentagens maiores do que 10% em substituição ao cimento). As Figuras 3.1 e 3.2 mostram o aumento de custo destes CAA's em relação ao concreto de referência para um f_{cj} de 30MPa aos 7 e 28 dias de idade.

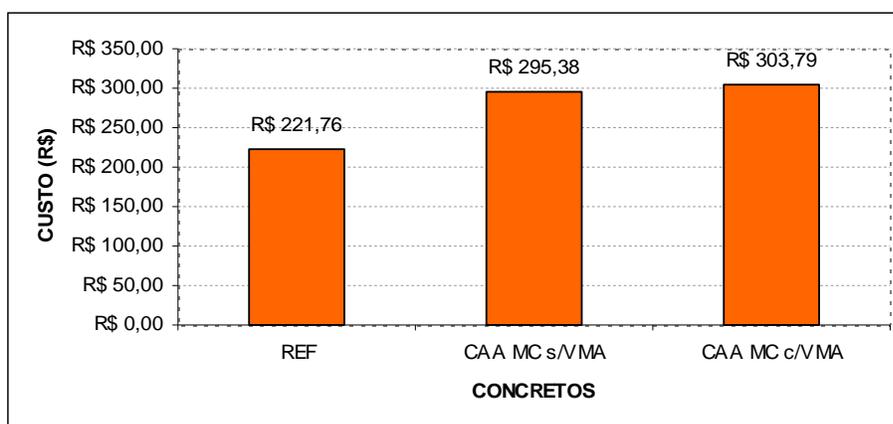


Figura 3.1 – Custo dos CAA's em relação ao concreto convencional para 30MPa aos 7 dias.

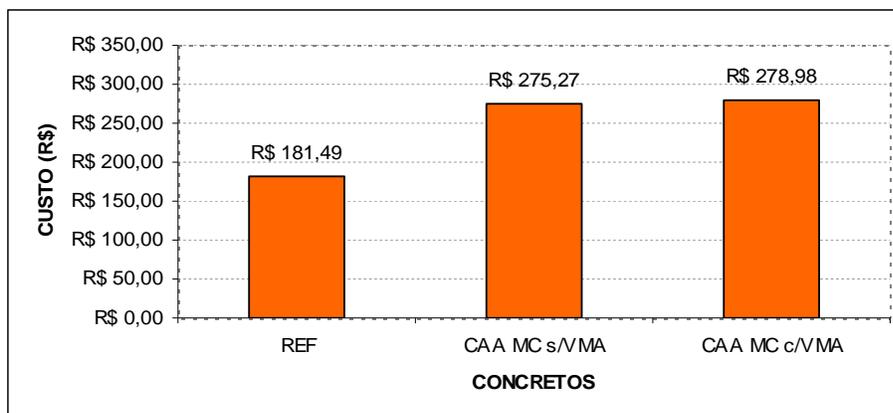


Figura 3.2 – Custo dos CAA's em relação ao concreto convencional para 30 MPa aos 28 dias.

De fato, este estudo mostrou a viabilidade técnica de se produzir CAA com os agregados disponíveis em Belém-Pa usando o método proposto por Tutikian (2004), visto que foram obtidas misturas que apresentaram um sistema com fluidez, coesão e viscosidades adequadas. Porém fatores como: a dosagem de superplastificante (maior que 0,9% sobre a massa de aglomerantes), a relação água/aglomerante (maior do que a do concreto convencional) e o teor de metacaulim (de 15% a 20% em substituição ao cimento) usados se mostraram bastante elevados. Além disso, os valores de espalhamento e espalhamento T_{50cm} ficaram muito próximos dos limites inferiores (600 mm e 2,0 segundos) propostos para estes ensaios, o que caracteriza um sistema, com fluidez e coesão, relativamente baixas e, portanto, com menor capacidade de escoamento e menor resistência à segregação.

Outro fator complicante foi o alto volume de agregado graúdo (aproximadamente 54% do volume total de sólidos) apresentado pelas misturas em função do teor de argamassa adotado no traço de referência, o que poderia ter acarretado menor habilidade de passagem por espaços restritos ou por entre barras de aço.

Por fim, os CAA's produzidos apresentaram uma elevação de custo de mais de 30% em relação a um concreto de referência previamente confeccionado, o que inviabilizaria economicamente a sua aplicação prática.

3.3. ALTERAÇÃO NO PROCESSO DE DOSAGEM DOS CAA's

Para a realização do presente trabalho e com base nos resultados do estudo piloto, fez-se a opção por uma alteração no método de dosagem proposto por Tutikian (2004), de modo que fosse possível produzir uma mistura com as características de um CAA, porém com custos mais reduzidos. Desta forma, foram produzidas famílias de CAA's com teores de argamassa maiores do que o do concreto de referência, garantindo, deste modo, um menor volume de agregado graúdo, bem como menores substituições de cimento por adições minerais. O menor teor de finos é compensado pela maior finura da areia e pela presença da mesma no seixo, fazendo com que haja um maior aproveitamento das potencialidades dos

agregados da região para este tipo de concreto. Esta decisão está de acordo com o que diz a maioria dos pesquisadores do assunto tais como: Okamura e Ouchi (2003); Ham et al. (2004); Kim et al. (2006); Alencar e Helene (2006); Domone (2006), quanto à alteração do teor de argamassa e o volume de agregado graúdo do CAA em relação ao concreto convencional. Segundo estes autores, teores de argamassa acima de 60% e um volume de agregados graúdos abaixo de 40% são requisitos básicos para a produção do CAA.

Neste novo procedimento estipula-se o teor de argamassa do CAA por meio de observações visuais e ensaios de espalhamento do tronco de cone. Com um maior volume de agregado miúdo, espera-se conseguir uma mistura coesa e com fluidez adequada, bem como uma redução no teor de aditivos superplastificantes, visto que a superfície específica deste agregado é menor do que a das adições minerais.

Para esta pesquisa foi determinado, primeiramente, um teor de argamassa considerado ideal para uma família de CAA sem adições minerais e sem o uso do VMA e cujos traços escolhidos foram: 1:2; 1:3; 1:4; 1:5 e 1:6 em massa. Esta decisão se deveu ao fato de que a maioria das empresas locais ainda não utiliza adições minerais na formulação dos seus concretos. Este teor de argamassa foi escolhido baseado no traço intermediário de 1:4 de cada família e repetido para os demais traços. Inicialmente foi produzido um CAA variando-se o teor de argamassa em 60%, 65% e 70% de acordo com os valores da Tabela 3.4. A escolha do valor mínimo de 60% foi motivada por observações visuais e de espalhamento, onde ficou evidente o ganho de coesão do sistema.

Tabela 3.4 – Determinação de um intervalo para o teor de argamassa do CAA sem adições.

CAA sem adições minerais e sem VMA (1:4)								
Volume de pasta (%)	Volume de agregado graúdo (%)	Teor de argamassa (%)	Traço unitário individual (1:a:p)	Massa de cimento (kg)	Massa de areia (kg)	Massa de seixo (kg)	Massa de água (kg)	Relação a/c
23,6	41,0	60,0	1:2,0:2,0	5,00	10,00	10,00	2,25	0,45
23,9	35,9	65,0	1:2,25:2,34	5,71	12,88	10,00	2,74	0,48
24,3	30,7	70,0	1:2,50:1,50	6,67	16,67	10,00	3,40	0,51

Após este momento chegou-se à conclusão de que um teor de argamassa entre 60% e 65% era suficiente para aumentar a coesão da mistura, assim como reduzir as dosagens de superplastificante em relação aos traços do

estudo piloto e reduzir a relação água/cimento quando comparado a um concreto convencional de mesmo traço. De acordo com a Tabela 3.4 o volume de agregado graúdo também reduziu consideravelmente, melhorando, desta forma, a capacidade de passagem deste CAA por obstáculos e espaços restritos.

Finalmente, partiu-se para a otimização do teor de argamassa com a produção de outro CAA cujos valores de “ α ” variaram de 1% em 1% dentro do intervalo citado anteriormente (Tabela 3.5). De acordo com os ensaios de espalhamento, espalhamento T_{50cm} e observações visuais se chegou à conclusão de que um concreto com um teor de argamassa de 64% era o ideal para os materiais utilizados.

Tabela 3.5 – Determinação do teor ideal de argamassa para o CAA sem adições.

CAA sem adições minerais e sem VMA (1:4) (CAA 01)								
Teor de argamassa (%)	Volume de agregado graúdo (%)	Volume de pasta (%)	Traço unitário individual (1:a:p)	Massa de cimento (kg)	Massa de areia (kg)	Massa de seixo (kg)	Massa de água (kg)	Relação a/c
60,0	41,0	23,6	1:2,0:2,0	5,00	10,00	10,00	2,25	0,45
61,0	40,0	23,6	1:2,05:1,95	5,13	10,51	10,00	2,31	0,45
62,0	38,9	23,7	1:2,10:1,90	5,26	11,05	10,00	2,42	0,46
63,0	37,9	23,8	1:2,15:1,85	5,41	11,62	10,00	2,54	0,47
64,0	36,9	23,8	1:2,20:1,80	5,56	12,22	10,00	2,61	0,47
65,0	35,9	23,9	1:2,25:1,75	5,71	12,86	10,00	2,74	0,48

Todas as outras famílias apresentaram teores de argamassa menores, pois com a incorporação do VMA e do metacaulim, o volume de areia necessário para manter a mesma coesão e viscosidade da primeira família de CAA foi reduzido. Além disso, a dosagem de metacaulim foi reduzida em relação ao estudo piloto devido a maior coesão que o concreto adquiriu após o aumento no teor de argamassa, necessitando o mesmo de uma quantidade menor de materiais finos. Com o auxílio da Tabela 2.12 e por meio de observações visuais se chegou à dosagem de substituição de 9% de metacaulim para o CAA sem VMA e 4% para o CAA com VMA, em relação à massa de cimento, respectivamente. As Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8 ilustram o teor de argamassa e as dosagens de metacaulim adotadas para as demais famílias de CAA produzidas no traço 1:4 em massa.

Tabela 3.6 – Determinação do teor ideal de argamassa para o CAA sem adições e com o VMA.

CAA sem adições minerais e com VMA (1:4) (CAA 02)								
Teor de argamassa (%)	Volume de agregado graúdo (%)	Volume de pasta (%)	Traço unitário individual (1:a:p)	Massa de cimento (kg)	Massa de areia (kg)	Massa de seixo (kg)	Massa de água (kg)	Relação a/c
60,0	41,0	24,3	1:2,00:2,00	5,00	10,00	10,00	2,55	0,51
61,0	40,0	24,3	1:2,05:1,95	5,13	10,51	10,00	2,62	0,51
62,0	38,9	24,4	1:2,10:1,90	5,26	11,05	10,00	2,73	0,52
63,0	37,9	24,6	1:2,15:1,85	5,41	11,62	10,00	2,87	0,53
64,0	36,9	24,6	1:2,20:1,80	5,56	12,22	10,00	2,95	0,53
65,0	35,9	24,7	1:2,25:1,75	5,71	12,86	10,00	3,08	0,54

Onde: a/c – Relação água/cimento.

Tabela 3.7 – Determinação do teor ideal de argamassa para o CAA com adição e sem o VMA.

CAA com metacaulim (9% de substituição) e sem VMA (1:4) (CAA 03)									
Teor de "α" (%)	Volume de agregado graúdo (%)	Volume de pasta (%)	Traço unitário individual (1:a:p)	Massa de cimento (kg)	Massa de M.C. (kg)	Massa de areia (kg)	Massa de seixo (kg)	Massa de água (kg)	Relação a/agl
58,0	41,0	24,4	0,91:0,09:2,0:2,0	4,33	0,43	9,05	10,00	2,48	0,52
59,0	40,0	24,5	0,91:0,09:2,05:1,95	4,44	0,44	9,51	10,00	2,58	0,53
60,0	38,9	24,5	0,91:0,09:2,10:1,90	4,55	0,45	10,00	10,00	2,65	0,53
61,0	37,9	24,6	0,91:0,09:2,15:1,85	4,67	0,46	10,51	10,00	2,77	0,54
62,0	36,9	24,7	0,91:0,09:2,20:1,80	4,78	0,47	11,05	10,00	2,84	0,54

Onde: α – Teor de argamassa; M.C. – metacaulim; a/agl – relação água/aglomerante.

Tabela 3.8 – Determinação do teor ideal de argamassa para o CAA com adição e com o VMA.

CAA com metacaulim (4% de substituição) e com VMA (1:4) (CAA 04)									
Teor de "α" (%)	Volume de agregado graúdo (%)	Volume de pasta (%)	Traço unitário individual (1:a:p)	Massa de cimento (kg)	Massa de M.C. (kg)	Massa de areia (kg)	Massa de seixo (kg)	Massa de água (kg)	Relação a/agl
58,0	43,1	24,3	0,96:0,04:2,0:2,0	4,57	0,19	9,05	10,00	2,38	0,50
59,0	42,0	24,3	0,96:0,04:2,05:1,95	4,68	0,19	9,51	10,00	2,48	0,51
60,0	41,0	24,4	0,96:0,04:2,10:1,90	4,80	0,20	10,00	10,00	2,55	0,51
61,0	40,0	24,6	0,96:0,04:2,15:1,85	4,92	0,21	10,51	10,00	2,67	0,52
62,0	38,9	24,7	0,96:0,04:2,20:1,80	5,05	0,21	11,05	10,00	2,73	0,52

Onde: α – Teor de argamassa; M.C. – metacaulim; a/agl – relação água/aglomerante.

Deve-se observar que para o CAA 03 houve uma redução no teor de argamassa para 58%. Este comportamento se deveu ao fato de que com a substituição de metacaulim a superfície específica da mistura aumentou

demandando maior quantidade de água, de modo que teores maiores de argamassa não foram necessários.

Após a determinação do teor ideal de argamassa para o traço 1:4 de todas as famílias de CAA's produzidas, partiu-se para a dosagem dos outros traços (1:2; 1:3; 1:5 e 1:6), respectivamente, destas famílias e cujos valores estão apresentados na Tabela 3.9. O consumo de materiais por metro cúbico está apresentado na Tabela 3.10 para todas as famílias de concreto produzidas.

Tabela 3.9 – Traços unitários secos em massa dos concretos produzidos.

CONCRETOS	TRAÇO (1:m)	Teor de α (%)	Cimento	M.C	Areia	Seixo	a/agl	S.P. *	VMA *
REFERENCIAL	1:2	48,0	1,00		0,44	1,56	0,37		
	1:3		1,00		0,92	2,08	0,45		
	1:4		1,00		1,40	2,60	0,51		
	1:5		1,00		1,88	3,12	0,57		
	1:6		1,00		2,36	3,64	0,63		
CAA 01	1:2	64,0	1,00		0,92	1,08	0,32	0,80	
	1:3		1,00		1,56	1,44	0,40		
	1:4		1,00		2,20	1,80	0,47		
	1:5		1,00		2,84	2,16	0,62		
	1:6		1,00		3,48	2,52	0,73	1,40	
CAA 02	1:2	60,0	1,00		0,80	1,20	0,33	0,80	0,10
	1:3		1,00		1,40	1,60	0,42		
	1:4		1,00		2,00	2,00	0,51		
	1:5		1,00		2,60	2,40	0,61		
	1:6		1,00		3,20	2,80	0,73	1,20	0,15
CAA 03	1:2	58,0	0,91	0,09	0,74	1,26	0,34	1,00	
	1:3		0,91	0,09	1,32	1,68	0,43		
	1:4		0,91	0,09	1,90	2,10	0,52		
	1:5		0,91	0,09	2,48	2,52	0,63		
	1:6		0,91	0,09	3,06	2,94	0,76	1,30	
CAA 04	1:2	60,0	0,96	0,04	0,80	1,20	0,34	1,00	0,10
	1:3		0,96	0,04	1,40	1,60	0,43		
	1:4		0,96	0,04	2,00	2,00	0,51		
	1:5		0,96	0,04	2,60	2,40	0,63		
	1:6		0,96	0,04	3,20	2,80	0,73	1,40	0,15

Legenda: α – Teor de argamassa; M.C. – metacaulim; a/agl – relação água/aglomerante; S.P. – superplastificante; VMA – modificador de viscosidade.

* Porcentagem sobre a massa de aglomerantes.

Tabela 3.10 – Consumos dos materiais (Kg/m³) dos concretos produzidos.

CONCRETOS	TRAÇO (1:m)	Aglomerante	Cimento	M.C.	Areia	Seixo	a/agl	S.P.	VMA
REFERENCIAL	1:2	690,0	690,0		304,0	1076,0	0,37		
	1:3	526,0	526,0		484,0	1093,0	0,44		
	1:4	421,0	421,0		590,0	1095,0	0,51		
	1:5	352,0	352,0		663,0	1100,0	0,57		
	1:6	303,0	303,0		715,0	1104,0	0,63		
CAA 01	1:2	694,0	694,0		639,0	750,0	0,32	5,55	
	1:3	524,0	524,0		817,0	754,0	0,40	4,19	
	1:4	421,0	421,0		926,0	758,0	0,47	3,37	
	1:5	347,0	347,0		985,0	749,0	0,62	2,77	
	1:6	296,0	296,0		1030,0	746,0	0,73	4,14	
CAA 02	1:2	694,0	694,0		555,0	833,0	0,33	5,55	0,69
	1:3	522,0	522,0		731,0	836,0	0,42	4,18	0,52
	1:4	419,0	419,0		837,0	837,0	0,51	3,35	0,41
	1:5	347,0	347,0		903,0	834,0	0,61	2,78	0,34
	1:6	296,0	296,0		948,0	830,0	0,73	3,56	0,43
CAA 03	1:2	688,0	626,0	62,0	509,0	867,0	0,34	6,88	
	1:3	518,0	472,0	46,0	684,0	871,0	0,43	5,18	
	1:4	409,0	372,0	37,0	776,0	858,0	0,52	4,09	
	1:5	340,0	309,0	31,0	842,0	856,0	0,63	3,39	
	1:6	288,0	262,0	26,0	882,0	848,0	0,76	3,75	
CAA 04	1:2	690,0	662,0	28,0	552,0	828,0	0,34	6,90	0,69
	1:3	521,0	500,0	21,0	729,0	833,0	0,42	5,21	0,52
	1:4	417,0	400,0	17,0	834,0	834,0	0,52	4,17	0,42
	1:5	347,0	333,0	14,0	901,0	832,0	0,60	3,47	0,35
	1:6	294,0	283,0	11,0	942,0	824,0	0,73	4,12	0,44

Legenda: M.C. – Metacaulim; a/agl – relação água/aglomerante; S.P. – aditivo superplastificante; VMA – aditivo modificador de viscosidade.

3.4. MATERIAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

3.4.1. Cimento Portland

O cimento usado foi o CP II-Z-32, cimento composto com adição de pozolana, devido ao fato de que este aglomerante é um dos mais usados na cidade de Belém/Pa. A Tabela 3.12 mostra a especificação técnica do cimento usado nesta pesquisa.

Tabela 3.12 – Análise química e física do cimento usado na pesquisa, segundo o fabricante.

Propriedades químicas do CP II Z 32			
Composição química do cimento	Resultados (%)	Limites da NBR 11578 (1991)	
CaO (%)	57,55	Não aplicável	
MgO (%)	1,23	≤ 6,5	
SO ₃ (%)	3,19	≤ 4,0	
SiO ₂ (%)	21,23	Não aplicável	
Al ₂ O ₃ (%)	5,64	Não aplicável	
Fe ₂ O ₃ (%)	3,54	Não aplicável	
Na ₂ O (%)	0,44	Não aplicável	
K ₂ O (%)	0,78	Não aplicável	
Perda ao fogo (%)	6,18	≤ 6,5	
CaO Livre (%)	1,46	Não aplicável	
Resíduos insolúveis (%)	9,85	≤ 16,0	
Propriedades físicas e mecânicas do CP II Z 32			
Área específica - Blaine (cm ² /g)	4595	≥ 2600	
Tempo de pega (h)	Início	02:30:00	≥ 1
	Término	03:30:00	≤ 10
Massa específica (kg/dm ³)	3,01	Não aplicável	
Resistencia à compressão aos 28 dias (MPa)	37,9	≥ 32	

3.4.2. Metacaulim

O metacaulim utilizado foi um produto procedente da argila caulinitica criteriosamente selecionada, que passaram por um rigoroso processo de fabricação. A Tabela 3.13 mostra a especificação técnica, fornecida pelo fabricante, do metacaulim usado nesta pesquisa.

Tabela 3.13 – Análise química e física do metacaulim utilizado, segundo o fabricante.

Composição química do metacaulim (porcentagem média em peso)	
SiO ₂	51%
Al ₂ O ₃	41%
Fe ₂ O ₃	3%
TiO ₂	1%
MgO	0,40%
Na ₂ O	0,10%
K ₂ O	0,50%
SO ₃	0,10%
CaO	0,50%
Finura # 325 (via úmida)	<1,0%
Massa Específica	2,60 kg/dm ³
Massa Unitária	0,55 kg/dm ³
Área Específica	18.000 cm ² /g

3.4.3. Agregados.

O agregado miúdo usado foi a areia de depósitos eólicos de origem quartzosa. O agregado graúdo foi o seixo rolado extraído de beira de rio com dimensão máxima característica de 12.5mm. As amostras para ensaio foram coletadas de acordo com a NBR NM 26 (ABNT, 2001b). A composição granulométrica foi determinada de acordo com o estabelecido na NBR NM 248 (ABNT, 2003c). Já a massa específica, tanto do agregado graúdo quanto do miúdo, foi determinada por meio da NBR NM 53 (ABNT, 2003b) e da NBR NM 52 (ABNT, 2003a), respectivamente. Por fim, as massas unitárias foram determinadas de acordo com o a NBR 7251 (ABNT, 1982). Todas estas informações são apresentadas nas Tabelas 3.14 e 3.15, as quais informam sobre o agregado miúdo e graúdo respectivamente. As Figuras 3.3 e 3.4 ilustram as curvas granulométricas do agregado miúdo e graúdo respectivamente.

Tabela 3.14 – Caracterização do agregado miúdo usado na pesquisa.

Granulometria da areia				Normas de referência (NBR/NM)
Peneiras # ABNT (mm)	massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	
4,8	1	0,10%	0%	NM 248/2001
2,4	3	0,30%	0%	
1,2	15	1,50%	2%	
0,6	95	9,50%	11%	
0,3	415	41,50%	53%	
0,15	350	35,00%	88%	
< 0,15	121	12,10%	100%	
Total	1000	100,00%		
D. máximo	1,2 mm			NM 248/2001
M. de finura	1,55			NM 248/2001
M. Unitária	1,58 kg/dm ³			NBR 7251/1982
M. Específica	2,63 kg/dm ³			NM 52/2003

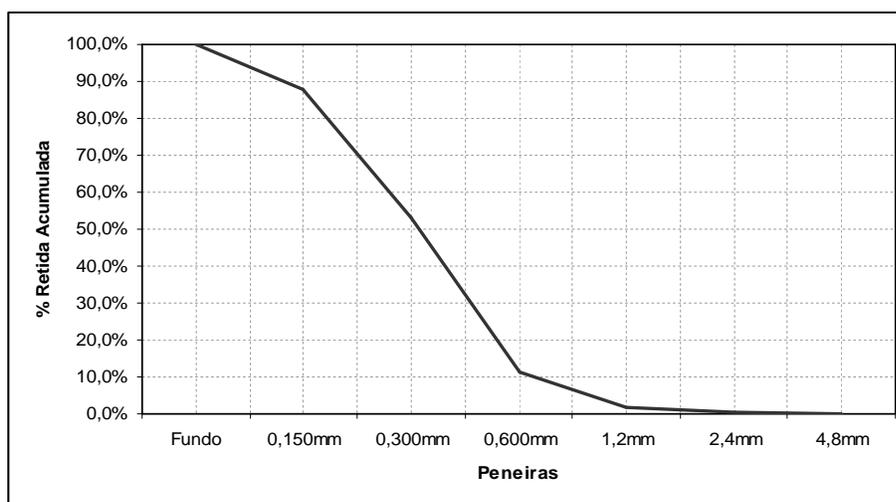


Figura 3.3 – Curva granulométrica do agregado miúdo usado na pesquisa.

Tabela 3.15 – Caracterização do agregado graúdo usado na pesquisa.

Granulometria do seixo				Normas de referência (NBR/NM)
Peneiras # ABNT (mm)	massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	
12,5	80	1,60%	2%	NM 248/2001
9,5	744	14,88%	16%	
4,8	2314	46,28%	63%	
2,4	1343	26,86%	90%	
1,2	294	5,88%	96%	
< 1,2	225	4,50%	100%	
Total	5000	100,00%		
D. máximo	12,50 mm		NM 248/2001	
M. Finura	5,67		NM 248/2001	
M. Unitária	1,53 kg/dm ³		NBR 7251/1982	
M. Específica	2,65 kg/dm ³		NM 53/2003	

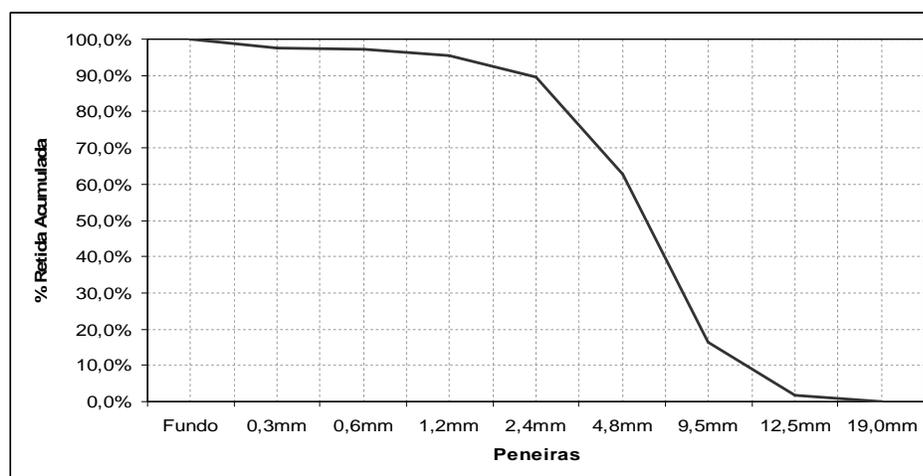


Figura 3.4 – Curva granulométrica do agregado graúdo usado na pesquisa.

3.4.4. Aditivos.

Foram utilizados aditivos superplastificantes de alta eficiência ou terceira geração (hiperplastificantes) à base de polímeros policarboxilatos, bem como os modificadores de viscosidade (VMA). O hiperplastificante possui PH variando entre 5 e 7, massa específica entre 1,067 e 1,107 kg/dm³ e um teor de sólidos entre 38 e 42% (BASF, 2007). Com relação ao aditivo modificador de viscosidade, este é uma

solução aquosa de polímeros de alto peso molecular, com massa específica variando entre 0,98 e 1,02 kg/dm³ e PH entre 9 a 10,5 (BASF, 2007).

3.5. ENSAIOS REALIZADOS E DEFINIÇÃO DOS C.P.'s

Os ensaios foram divididos em duas partes distintas: ensaios para a verificação das propriedades do CAA no estado fresco e ensaios para a verificação das propriedades do concreto no estado endurecido, tanto para o concreto de referência quanto para os auto-adensáveis. Para os ensaios do CAA no estado fresco, foram avaliadas as seguintes propriedades: capacidade de espalhamento, habilidade passante e resistência à segregação, através dos ensaios de espalhamento, espalhamento T_{50cm}, Funil V, Caixa L, Caixa U e tubo U. Para os ensaios de resistência mecânica foram avaliadas: resistência à compressão axial de acordo com a NBR 5739 (1994), resistência à tração por compressão diametral de acordo com a NBR 7222 (1994), resistência à tração por flexão de acordo com a NBR 12142 (1992) e módulo de elasticidade de acordo com a NBR 8522 (2003).

Para os ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade, optou-se como resultado final a média aritmética do rompimento de 02 (dois) corpos-de-prova aos 3, 7 e 28 dias e 04 (quatro) corpos-de-prova aos 28 dias somente para resistência à compressão. Foram utilizados corpos-de-prova de 10 x 20 cm para os três primeiros ensaios e 15 x 30 cm para os ensaios de módulo.

3.6. PRODUÇÃO DOS C.P.'s

Após a verificação das características das famílias dos CAA's no estado fresco, através dos ensaios citados anteriormente, foi iniciada a moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios mecânicos. Devido à duração dos ensaios no estado fresco ter sido prolongada, foi necessária a produção de 02 (duas) misturas para cada traço, sendo que a segunda foi usada exclusivamente para a moldagem dos corpos-de-prova, evitando, desta forma, a perda de trabalhabilidade que foi observada ao final dos ensaios no estado fresco.

Todos os concretos foram produzidos em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 150 litros, cuja colocação dos materiais obedeceu á seguinte ordem: 100% do seixo, 20% da água, 100% da areia, 100% do cimento e os 80% restantes da água. Nos CAA's com metacaulim, este último foi colocado junto com o cimento na betoneira. Após 5 minutos, para os CAA's, fez-se a colocação do superplastificante e quando necessário o VMA, com o ajuste em suas dosagens de acordo com os resultados de ensaios de espalhamento.

Primeiro foram realizados todos os ensaios no estado fresco e posteriormente, com a segunda mistura, foram moldados os corpos-de-prova. Após 24 horas todos os corpos-de-prova foram desformados e levados para curar em câmara úmida até a data de seu rompimento Todos os ensaios no estado endurecido, bem como o número de corpos-de-prova usados, estão discriminados na Tabela 3.16

Tabela 3.16 - Resumo dos ensaios mecânicos realizados experimentalmente.

Concretos	Traços (1:m)	Idades (dias)	ENSAIOS A SEREM REALIZADOS								Total de C.P's da Família
			Compressão axial		Tração por comp. diametral		Tração por flexão (prisma)		Módulo de deformação		
			C.P's por traço (10 x 20 cm)	Total de C.P's	C.P's por traço (10 x 20 cm)	Total de C.P's	C.P's por traço (10 x 10 x 35 cm)	Total de C.P's	C.P's por traço (15 x 30 cm)	Total de C.P's	
Referencial	1:2,0	3	2	10							70
	1:3,0	7	2	10							
	1:4,0										
	1:5,0 1:6,0	28	4	20	2	10	2	10	2	10	
CAA 01	1:2,0	3	2	8							70
	1:3,0	7	2	8							
	1:4,0										
	1:5,0 1:6,0	28	4	20	2	10	2	10	2	10	
CAA 02	1:2,0	3	2	8							70
	1:3,0	7	2	8							
	1:4,0										
	1:5,0 1:6,0	28	4	20	2	10	2	10	2	10	
CAA 03	1:2,0	3	2	8							70
	1:3,0	7	2	8							
	1:4,0										
	1:5,0 1:6,0	28	4	20	2	10	2	10	2	10	
CAA 04	1:2,0	3	2	8							70
	1:3,0	7	2	8							
	1:4,0										
	1:5,0 1:6,0	28	4	20	2	10	2	10	2	10	
									TOTAL GERAL	350	

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados de todos os ensaios realizados no programa experimental deste trabalho, tanto para os concretos no estado fresco quanto no estado endurecido. Com base nestes resultados foi possível avaliar as propriedades fundamentais dos CAA's produzidos, no estado fresco, bem como comparar as suas propriedades no estado endurecido com as do concreto convencional produzido.

4.1. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Para a verificação das três principais propriedades do CAA no estado fresco, foram realizados os seguintes ensaios:

- ✓ Espalhamento (Slump flow test);
- ✓ Espalhamento T_{50cm} (Slump flow T_{50cm});
- ✓ Funil – V (V – funnel);
- ✓ Funil – V 5 minutos;
- ✓ Caixa – L (L – box test);
- ✓ Caixa – U (U – box test);
- ✓ Tubo – U (U pipe shaped test).

Como mencionado no item 2.4 deste trabalho, estes ensaios ainda não são normalizados e por isso os limites mínimo e máximo especificados para analisar os resultados foram escolhidos com base no que a maioria dos pesquisadores (Coppola (2000); EFNARC (2002); Gomes (2002); Araújo et al. (2003); Kim et al. (2006); Roussel et al. (2006); Repette (2005); Alencar e Helene (2006)) recomendam como válido.

Segundo EFNARC (2002), estes métodos de ensaio são recomendações empíricas mais do que procedimentos completamente detalhados e recomenda que sejam executados mais de uma vez para uma melhor confirmação dos resultados. Na Tabela 4.1 estão resumidos os resultados destes ensaios para as famílias dos CAA's 01 à 04, bem como os valores de referência mínimos e máximos adotados.

A partir dos resultados obtidos foi possível avaliar o comportamento de cada família de CAA produzida em função da relação cimento/agregados (1:m) bem como determinar qual o melhor intervalo entre os traços capazes de gerar misturas de CAA's viáveis tecnicamente.

Tabela 4.1 - Resultado dos ensaios de trabalhabilidade dos concretos auto-adensáveis produzidos.

CAA	α (%)	Aditivo * (%)		m	espalhamento (mm)	espalhamento T_{50cm} (seg)		caixa-L H2/H1		caixa-U R1-R2 (mm)		funil-V (seg)		funil-V 5 minutos (seg)		tubo-U (%)		
		S.P**	VMA ***															
Sem adição e sem VMA (CAA 01)	64			2	720	3,27		0,94		20		8,76		-0,26		0,98		
				3	700	2,30		0,88		20		7,53		0,20				
				4	650	2,17		0,84		20		7,40		0,15		1,04		
				5	620	2,25		0,84		25		6,58		0,13				
				6	680	1,86		0,86		25		4,98		0,20		0,8		
Sem adição e com VMA (CAA 02)	60		0,1	2	750	3,92		0,82		0		10,48		0,32		1		
			0,1	3	690	3,28		0,94		0		8,00		-0,20				
			0,1	4	620	3,24		0,82		10		6,13		0,60		1		
			0,1	5	630	2,84		0,75		25		5,94		0,10				
			0,15	6	620	2,86		0,72		35		5,89		0,30		0,95		
Metacaulim e sem VMA (CAA 03)	58			2	680	4,68		0,98		10		9,03		0,50		1,08		
				3	650	4,14		0,94		10		6,76		0,14				
				4	670	3,97		0,98		15		5,97		0,05		1,02		
				5	620	3,24		0,86		30		5,55		0,05				
				6	660	2,6		0,8		40		5,42		0,26		0,9		
Metacaulim e com VMA (CAA 04)	60		0,1	2	760	3,58		1		0		9,45		-0,15		1,02		
			0,1	3	720	3,47		1		0		7,23		0,24				
			0,1	4	700	3,19		0,95		0		5,75		0,25		0,96		
			0,1	5	640	2,82		0,84		20		5,92		-0,26				
			0,15	6	630	2,69		0,78		25		5,03		1,56		0,84		
VALORES MÍNIMO E MÁXIMO DE REFERÊNCIA PARA OS ENSAIOS DE TRABALHABILIDADE					600	800	2	7	0,8	1	0	30	5	12	0	+3 ****	0,9	1

* % sobre a massa de cimento

** Aditivo superplastificante

*** Aditivo modificador de viscosidade

**** Este valor indica a subtração entre o segundo e o primeiro tempos aferidos.

4.1.1. Relação entre o volume de pasta e o espalhamento

Com pode ser observado na Tabela 4.1, quanto mais rico foi o CAA mais altos foram os resultados do ensaio de espalhamento (slump flow) para uma mesma dosagem de superplastificante. Este comportamento, provavelmente, se deveu ao fato de que misturas de concreto, ricas em cimento, possuem mais pasta, menos agregado, menos atrito interno e conseqüentemente maior fluidez. Além disso, a maior superfície de contato do aglomerante com as moléculas de superplastificante facilitaram a atuação, deste último, na pasta de cimento. A interação entre o teor de superplastificante e o espalhamento pode ser observado nas Figuras 4.1 à 4.4.

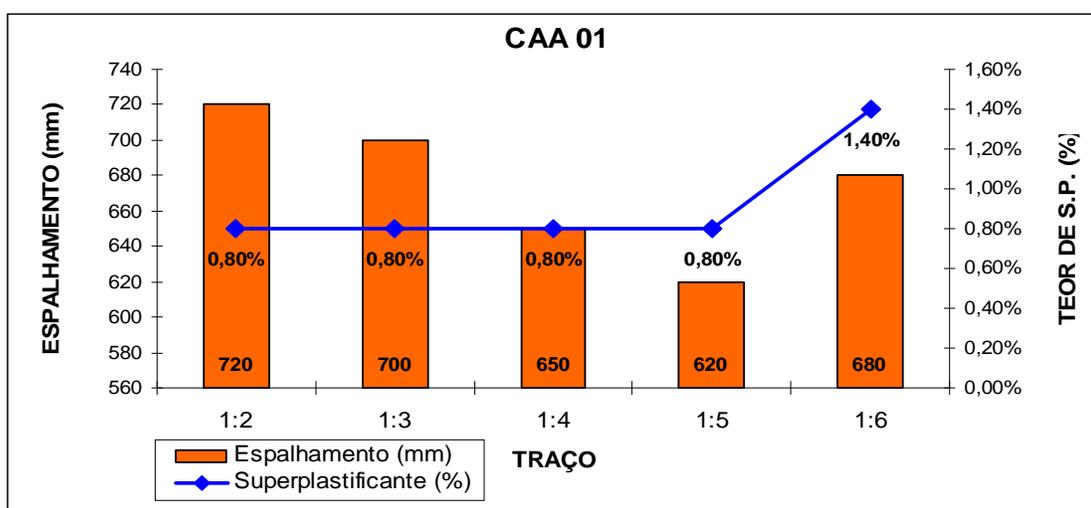


Figura 4.1 – Relação entre o espalhamento e o traço do CAA 01.

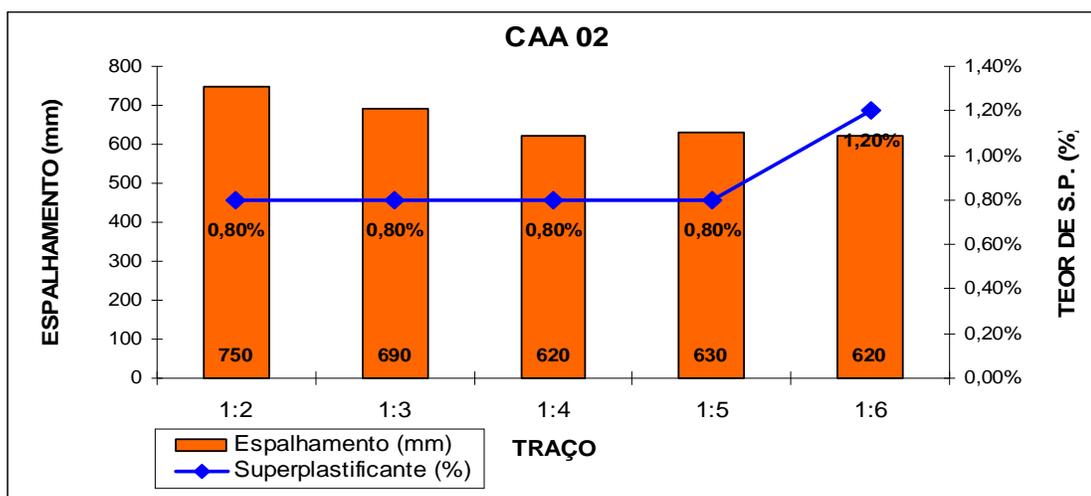


Figura 4.2 – Relação entre o espalhamento e o traço do CAA 02

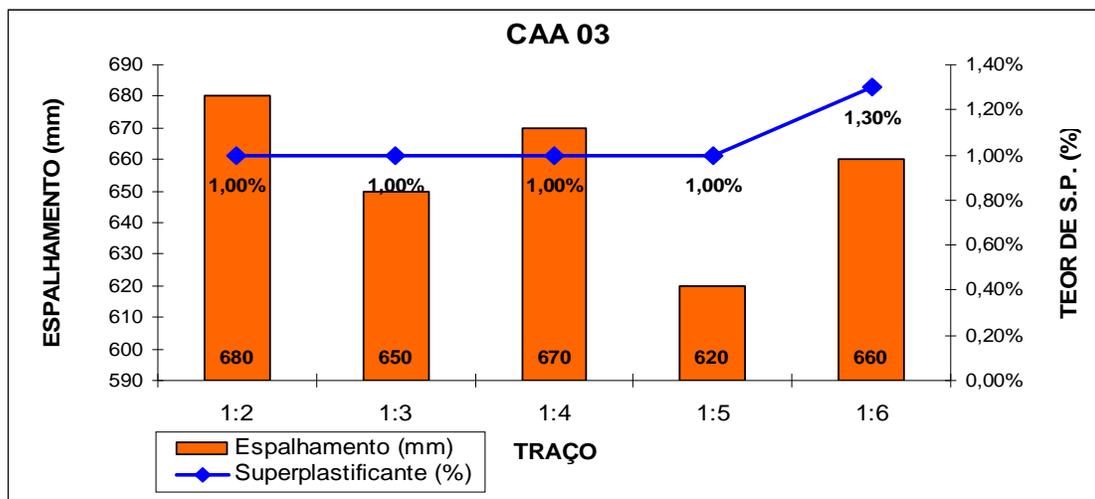


Figura 4.3 – Relação entre o espalhamento e o traço do CAA 03.

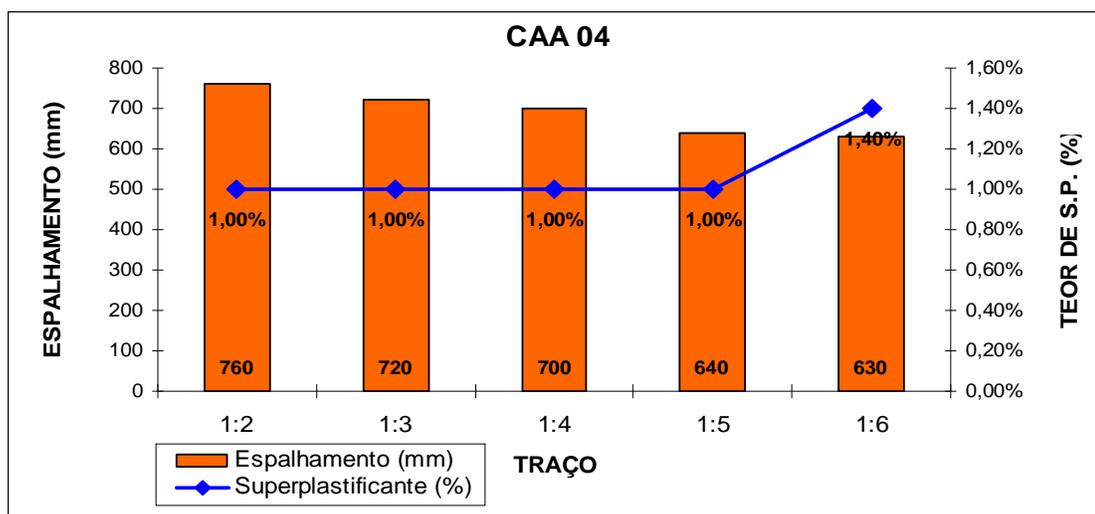
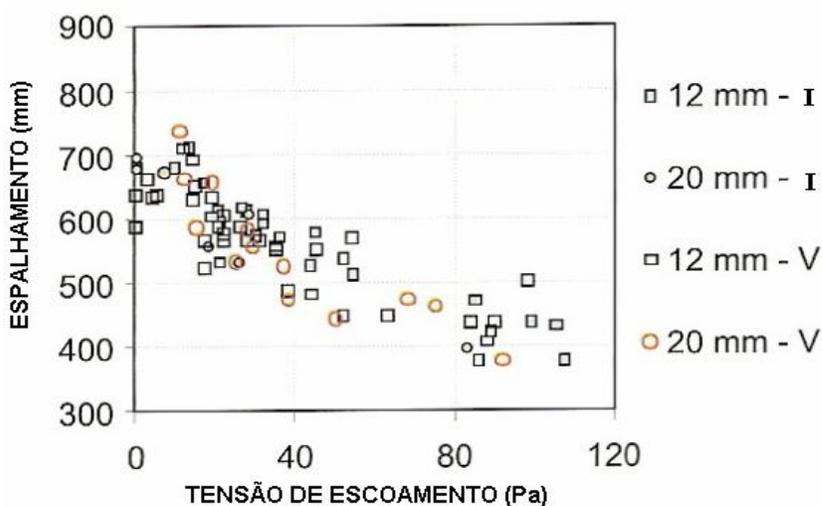


Figura 4.4 – Relação entre o espalhamento e o traço do CAA 04.

Segundo os gráficos acima, verifica-se que as famílias de CAA 01 e 02, com traços entre 1:2 e 1:5, apresentaram uma diminuição do espalhamento com teores constantes de superplastificante de 0,80% sobre a massa de cimento. As misturas com o traço 1:6 necessitaram de mais superplastificante para manter um espalhamento desejável e desta forma não acompanharam o mesmo comportamento dos demais traços. As famílias de CAA 03 e 04, com traços entre 1:2 e 1:5 também apresentaram uma tendência de redução do espalhamento com teores constantes de superplastificante. Porém a dosagem deste aditivo aumentou para 1,0% sobre a massa de aglomerantes, provavelmente devido à adição de metacaulim que fez aumentar a superfície específica da mistura. As misturas com

traço 1:6 destas famílias também se mostraram pouco operacionais devido ao baixo volume de pasta e conseqüente necessidade por mais água ou aditivo para manter um espalhamento desejável.

É interessante ressaltar que na falta de métodos mais precisos de aferição da tensão de escoamento, é possível estimá-lo em função dos resultados de espalhamento. Segundo Zerbino e Barragám (2007) em um estudo realizado com diferentes tipos de CAA's, produzidos com agregados graúdos de dimensões máximas de 12mm e 20mm e em épocas diferentes do ano (verão e inverno), verificou-se que existe uma relação entre os resultados de espalhamento e os resultados da tensão de escoamento obtidos por meio de ensaios reométricos. De acordo com a Figura 4.5 quanto maior for o espalhamento menor será a tensão de escoamento e conseqüentemente mais fluida estará a mistura. Desta forma, o ensaio de espalhamento, apesar de empírico, pode representar com certa aproximação a tensão de escoamento de um CAA.



4.1.2. Relação entre o funil – V e o espalhamento T_{50cm}

O ensaio do funil – V é realizado para determinar a capacidade de fluxo de uma mistura por espaços restritos, além de dar uma idéia de quanto coeso está o concreto, sendo comum o seu uso em laboratório. Porém, pode não estar disponível em um canteiro de obras ou em uma fábrica de pré-moldados, que queiram trabalhar com o CAA. Desta forma, faz-se necessário relacionar os seus resultados com os de outro ensaio, mais simples, usado neste trabalho. De acordo com os resultados da Tabela 4.1, foi possível observar, em todas as famílias de CAA, uma relação entre os valores do funil – V e o espalhamento T_{50cm} para os diversos traços analisados, conforme se pode observar nas Figuras 4.6 à 4.9.

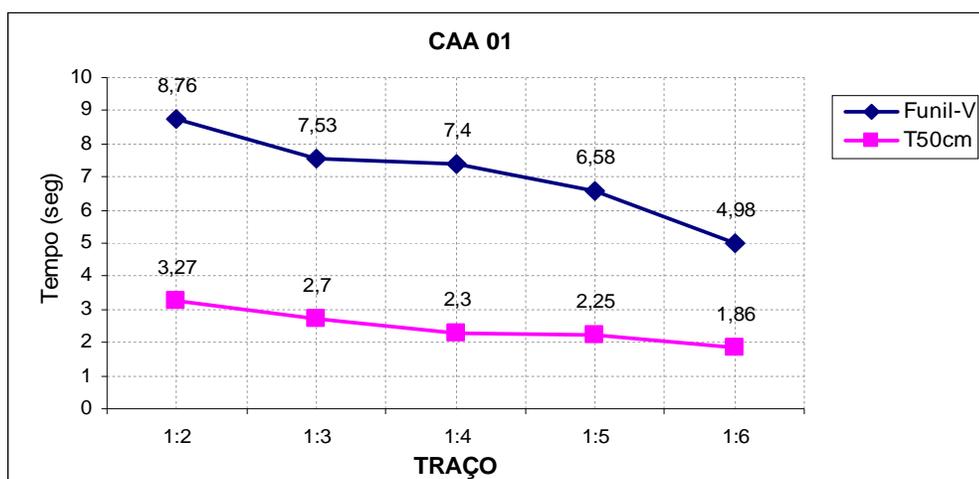


Figura 4.6 – Relação entre o espalhamento T_{50cm} e o funil –V do CAA 01.

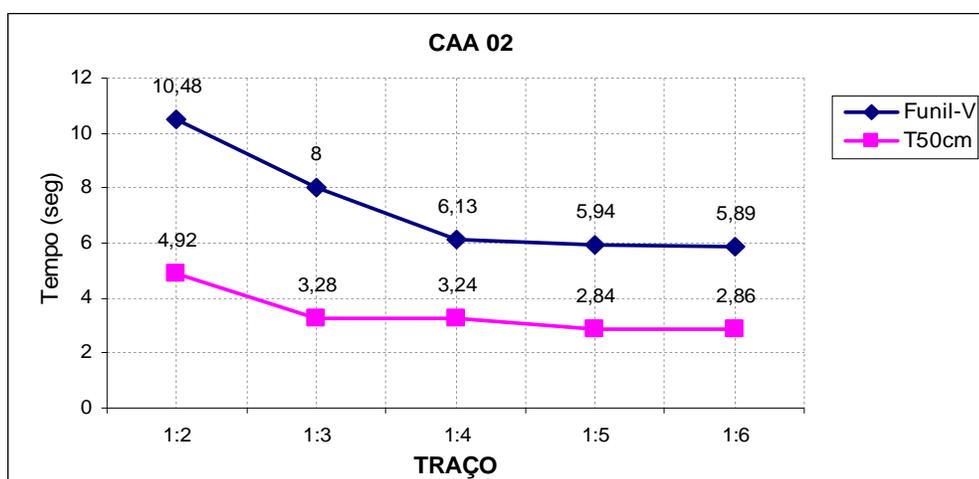


Figura 4.7 – Relação entre o espalhamento T_{50cm} e o funil –V do CAA 02.

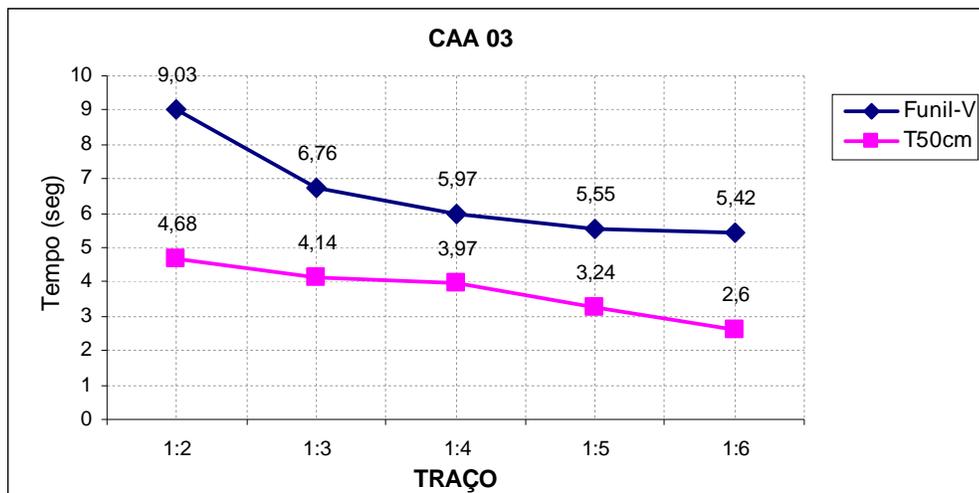


Figura 4.8 – Relação entre o espalhamento T_{50cm} e o funil –V do CAA 03.

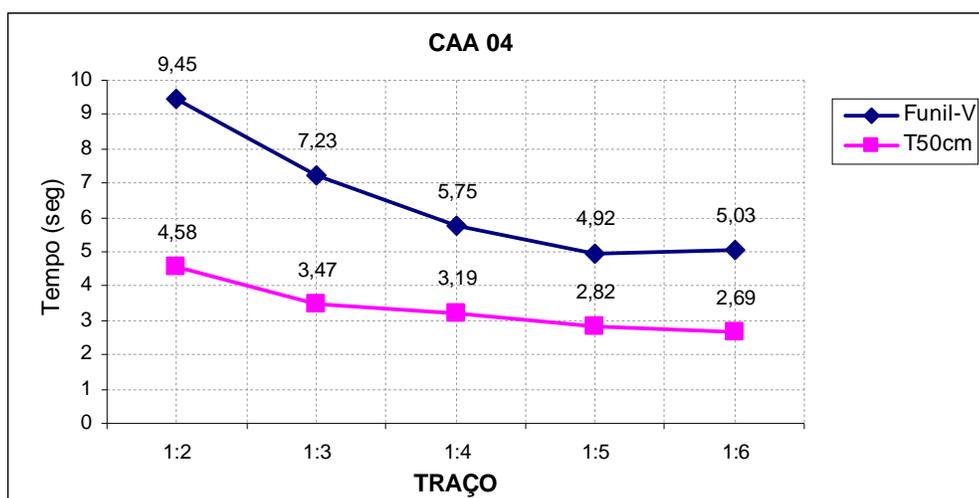


Figura 4.9 – Relação entre o espalhamento T_{50cm} e o funil –V do CAA 04.

De acordo com os gráficos das Figuras 4.6 à 4.9 tem-se que, para todas as famílias, quanto mais rico for o traço, maiores os tempos de espalhamento T_{50cm} e de escoamento do funil – V, o que pode dar uma noção de maior coesão e consequentemente maior viscosidade plástica destas misturas. O comportamento obtido nesta comparação foi semelhante ao observado por Zerbino e Barragám (2007) que mostraram ser possível relacionar, para CAA's produzidos com o mesmo conjunto de materiais, o parâmetro reológico da viscosidade plástica com os ensaios citados anteriormente. Neste estudo foram confeccionados CAA's com variação no

diâmetro máximo do agregado graúdo, bem como em condições diferentes de temperatura e os seus resultados estão apresentados na Figura 4.10.

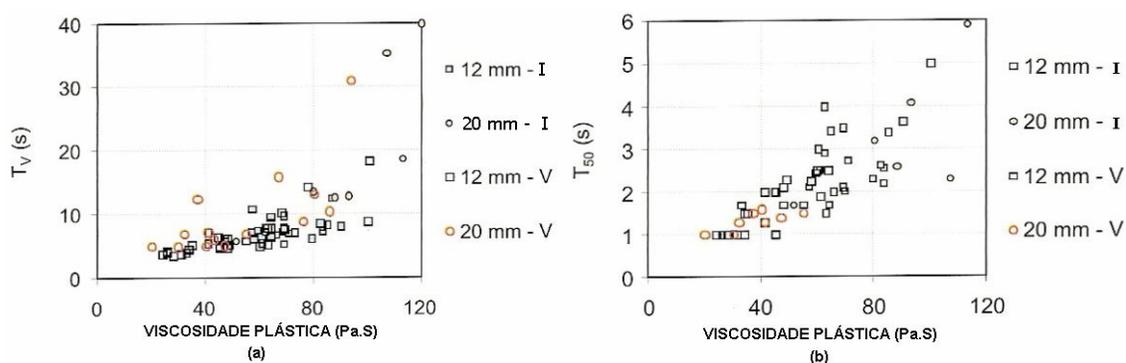


Figura 4.10 – a) Relação entre a viscosidade plástica e o tempo de escoamento do funil V; b) relação entre a viscosidade plástica e o tempo de espalhamento no diâmetro de 50cm. Fonte: Zerbino e Barragám (2007).

É possível notar que à medida que se aumenta a viscosidade também aumentam os valores de tempo do funil V e espalhamento T_{50cm} . A maioria dos resultados do funil V se encontra entre 4 e 10 segundos, assim como os do espalhamento T_{50cm} entre 1,5 e 4 segundos.

Observações visuais durante o ensaio de espalhamento também mostraram matrizes de CAA bastante homogêneas para todas as famílias nos traços de 1:2 à 1:5, conforme a Figura 4.11.

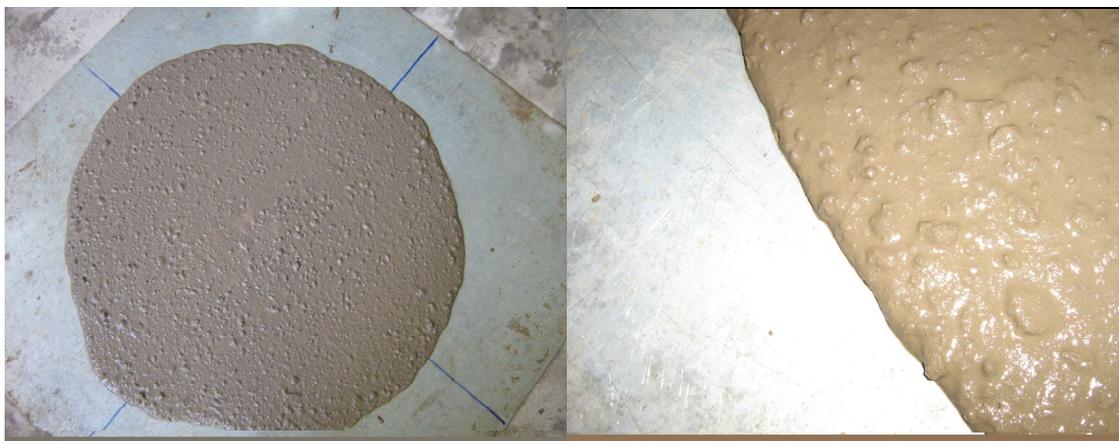


Figura 4.11 - Uniformidade dos CAA's produzidos neste trabalho.

As famílias de traço 1:6 se mostraram com acúmulo de agregado graúdo e exsudação em excesso, provavelmente devido à falta de materiais finos na sua composição.

Desta forma, na falta de um funil – V e em função comportamento obtido nos ensaios de espalhamento T_{50cm} , pode-se aferir, no local de produção do CAA, o quanto coesa está a mistura usando apenas os resultados deste ensaio. Segundo EFNARC (2002), o espalhamento T_{50cm} pode apresentar indícios de resistência à segregação do CAA pelo fato de relacionar o espalhamento da mistura com o tempo em que este ocorre.

4.1.3. Ensaio da caixa – L e caixa –U

Os resultados do ensaio da caixa – L confirmaram as expectativas, na medida em que quanto maior o volume de pasta mais próximo de 1,0 foi a relação $H2/H1$, para todos os CAA's. Não foi observado acúmulo de agregado graúdo nas proximidades das barras de aço, o que confirmou a escolha correta do seu diâmetro máximo. Somente os CAA's com traço 1:6 apresentaram marcas na superfície do concreto após o seu fluxo total, demonstrando a sua baixa capacidade de fluxo. A Figura 4.12 ilustra o ensaio da caixa L sendo realizado.



Figura 4.12 – Ensaio da caixa L.

No ensaio da caixa – U teve-se um comportamento semelhante ao constatado na caixa – L para todas as famílias de CAA's, visto que constatou-se que quanto mais rica foi a mistura, mais próximo de zero foram os resultados deste ensaio. Este comportamento ratifica a maior tendência de fluidez quando se aumenta o volume de pasta, mostrando a sua importância em relação à esta propriedade do CAA. A Figura 4.13 ilustra o ensaio da caixa U sendo realizado.



Figura 4.13 – Ensaio da caixa U.

4.1.4. Ensaio do tubo U

Devido a grande dificuldade de execução deste ensaio, optou-se por fazê-lo somente para os traços 1:2, 1:4 e 1:6. Todos os CAA's se mostraram bastante uniformes quanto à distribuição do agregado graúdo na matriz de cimento com uma leve tendência à segregação dos traços 1:6 de todas as famílias.

Para a avaliação visual da resistência à segregação dos CAA's produzidos no programa experimental desta dissertação, foram analisados os corpos-de-prova usados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Após a ruptura estes C.P's foram colocados um ao lado do outro em ordem decrescente em relação ao traço, conforme apresentado nas Figuras 4.14 e 4.15. De um modo geral todos os C.P's de todas as famílias apresentaram boa distribuição dos agregados, não mostrando acúmulo ou falta de argamassa ou agregado graúdo ao longo da seção rompida.



Figura 4.14 – Distribuição uniforme dos agregados graúdos no CAA 01 (traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6, da esquerda para a direita).



Figura 4.15 – Distribuição uniforme dos agregados graúdos no CAA 03 (traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6 da esquerda para a direita).

Com base nas imagens das figuras acima, pode-se perfeitamente atestar a presença ou não de segregação no CAA por meio de rompimento dos corpos-de-prova, o que pode substituir o tubo - U quando não houver disponibilidade do mesmo.

4.1.5. Considerações sobre os ensaios do CAA no estado fresco

Os ensaios de trabalhabilidade realizados não avaliam simultaneamente todas as propriedades do CAA no estado fresco, por isso, em função da simplicidade, o espalhamento e o espalhamento T_{50cm} se mostraram os mais indicados para a verificação da capacidade de espalhamento e coesão das misturas, respectivamente, quando na falta de outros equipamentos. Sendo estes, portanto, os mais indicados para o uso em canteiros de obras, o que não elimina a necessidade de verificações mais detalhadas, como no funil - V ou caixa - L, durante o processo de dosagem em laboratório.

Com relação à avaliação da habilidade passante, o ensaio da caixa - L se mostrou o mais capaz de simular uma situação real de um CAA fluindo por entre obstáculos (barras de aço) apenas com a ajuda da força da gravidade e de forma coesa, sendo indispensável durante o processo de dosagem.

E para a avaliação da resistência à segregação, o tubo - U se mostrou o mais confiável em determinar a uniformidade de uma mistura, devido à verificação da estrutura interna de parte de um CAA, quando este já está em processo de endurecimento. Outro fator positivo é a quantificação do agregado graúdo existente

nas três partes analisadas do tubo, bem como a comparação destas quantidades, o que dá um bom indicativo da presença ou não de segregação.

4.2. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Para a verificação das propriedades do CAA no estado endurecido, foram realizados os seguintes ensaios:

- ✓ compressão axial;
- ✓ tração por compressão diametral;
- ✓ tração na flexão;
- ✓ módulo de elasticidade dinâmico.

A partir dos resultados obtidos no ensaio de compressão axial, foi possível avaliar o comportamento de cada família de CAA, em relação ao concreto referencial, produzidas em função da relação cimento/agregados (1:m), bem como determinar as suas respectivas curvas de comportamento e desta forma comparar o custo de produção de cada família em função de resistências à compressão pré-definidas. Os resultados dos ensaios de tração e módulo serviram para comparar o desempenho dos CAA's em relação ao concreto convencional sob determinadas condições.

4.2.1. Resistência à compressão axial

A Tabela 4.2 resume os resultados obtidos para a resistência à compressão axial, onde cada valor apresentado representa a média de duas observações experimentais para 3 e 7 dias e quatro observações experimentais para 28 dias. O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739 (1994). Os resultados individuais estão apresentados no Anexo 01.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos.

CONCRETOS	TRAÇOS	a/agl	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
			3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
REFERENCIAL = 48% α	1:2	0,37	30,7	35,4	45,3
	1:3	0,44	26,7	31,6	40,3
	1:4	0,51	23,6	26,4	31,5
	1:5	0,57	18,9	20,8	23,2
	1:6	0,63	15,7	16,9	21,9
CAA 01 (sem adição mineral e sem VMA) $\alpha = 64%$	1:2	0,32	30,6	39,0	51,9
	1:3	0,40	27,4	32,6	46,2
	1:4	0,47	24,3	28,0	41,2
	1:5	0,62	18,2	22,2	25,3
	1:6	0,73	9,3	11,2	13,4
CAA 02 (sem adição mineral e com VMA) $\alpha = 60%$	1:2	0,33	29,2	39,5	49,8
	1:3	0,42	22,8	32,9	39,0
	1:4	0,51	17,1	27,0	36,0
	1:5	0,61	14,6	20,4	25,7
	1:6	0,73	10,0	14,0	19,9
CAA 03 (com adição de metacaulim e sem VMA) = 58% α	1:2	0,34	30,0	39,3	55,4
	1:3	0,43	28,4	33,8	45,3
	1:4	0,52	21,7	27,8	40,8
	1:5	0,63	16,7	20,9	28,0
	1:6	0,76	10,8	13,0	19,5
CAA 04 (com adição de metacaulim e com VMA) = 60% α	1:2	0,34	28,1	38,0	52,6
	1:3	0,42	24,6	32,6	42,9
	1:4	0,52	21,1	25,9	38,1
	1:5	0,60	15,1	22,5	25,8
	1:6	0,73	9,0	13,7	18,7

Percebe-se claramente, na maioria dos resultados dos traços 1:2 à 1:5 de todos os CAA's, um aumento na resistência à compressão em relação ao concreto convencional, principalmente a partir dos sete dias. Este comportamento pode ser justificado basicamente devido à redução da relação água/aglomerante destes CAA's quando comparados ao concreto referencial e mesmo os CAA's com o traço 1:5, cujas relações água/cimento foram maiores, apresentaram acréscimo de resistência. Para os CAA's 01 e 02 a explicação deste comportamento pode estar no fato de que para estas misturas houve uma melhor distribuição dos seus constituintes, devido ao aumento no teor de argamassa, e conseqüente redução do

volume de vazios, o que pode ser comprovado pelo aumento da sua massa específica em relação ao concreto convencional (ANEXO 02). Segundo Okamura (1997); Domone (2005); Kin et al. (2006), quanto mais finas forem as partículas de agregado miúdo, maior a sua capacidade de preenchimento de poros não preenchidos com as partículas de agregado graúdo, aumentando, desta forma, a densidade da mistura e conseqüentemente a sua resistência à compressão. Além disso, uma melhor hidratação das partículas de cimento, devido a maior retenção de água, é outro ponto que deve ser considerado. Esta afirmação está de acordo com as observações feitas por Repette (2005), as quais dizem que tanto a hidratação do cimento quanto a aderência do CAA nas armaduras são melhoradas em função da maior retenção de água que este tipo de mistura pode proporcionar.

No caso dos CAA's 03 e 04 a reação pozolânica contribuiu para o aumento de resistência à compressão. Esta situação vai ao encontro dos resultados obtidos por Dal Molim, 1995; Senzale, 2000; Souza, 2003 nos quais concretos confeccionados com adições pozolânicas apresentaram aumento de resistência à compressão em relação a concretos convencionais de referência.

Nos CAA's de traço 1:6 os valores de resistência à compressão se mostraram inferiores ao concreto referencial. Este resultado já era esperado visto o maior volume de água empregado, para a obtenção do espalhamento desejado, o que gerou um grande aumento da relação água/cimento.

A Figura 4.16 faz uma comparação da resistência à compressão entre o concreto convencional e os CAA's produzidos. O comportamento colocado no gráfico 4.16 ratifica as observações anteriormente colocadas e evidencia que o intervalo entre os traços 1:2 e 1:5 pode ser considerado o mais recomendado para a produção desse tipo de mistura.

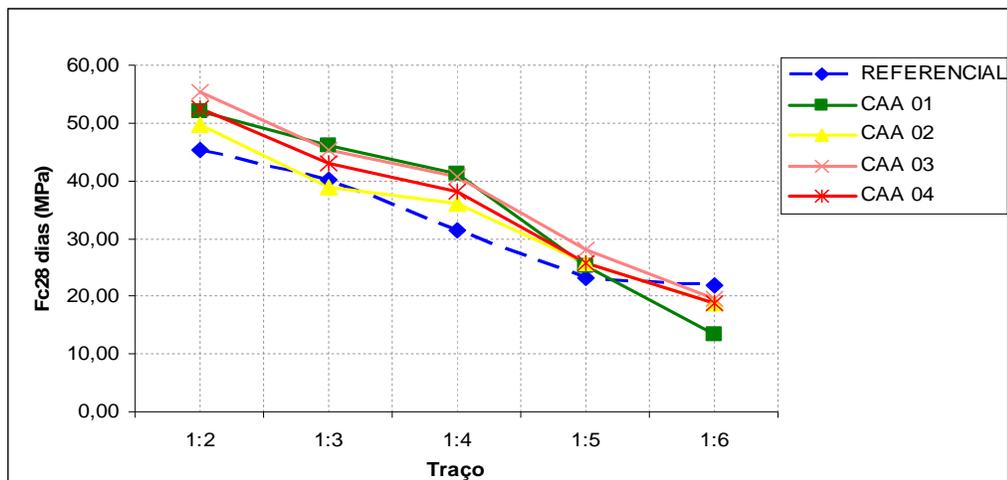


Figura 4.16 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão, aos 28 dias, de todas as famílias em função do traço em massa.

De acordo com a Figura 4.14 pode-se observar que o CAA 03 foi o que mais apresentou ganhos de resistência, entre os traços 1:2 e 1:5, em relação ao concreto referencial, com ganhos de 22% para o traço 1:2 e 20,5% para o traço 1:5, ficando a média em 21,1%. De acordo com o que foi explicado anteriormente, a reação pozolânica pode ter sido a principal responsável por este comportamento. Porém o fato interessante foi o aumento de resistência do CAA 01, também entre os traços 1:2 e 1:5, com ganhos de 14,5% para o traço 1:2 e 9% para o traço 1:5, ficando a média em 17,2%. O uso de areia fina e o aumento do teor de argamassa foram suficientes para a obtenção de uma mistura coesa, porém com menor necessidade de água, quando comparada aos demais CAA's, sendo fundamentais para este desempenho.

Os CAA's produzidos com VMA apresentaram resistências inferiores aos seus pares. Para o CAA 02 o aumento da relação a/c e para o CAA 04 a redução do teor de metacaulim, podem ter sido os responsáveis por este comportamento.

4.2.1.1. Diagramas de dosagem

De posse dos resultados mostrados na Tabela 4.2 foi possível montar os diagramas de comportamento, os quais relacionam resistência à compressão, relação água/aglomerantes, traço "m" e consumo de aglomerantes. Estes diagramas de dosagem estão mostrados nas Figuras 4.17 à 4.21.

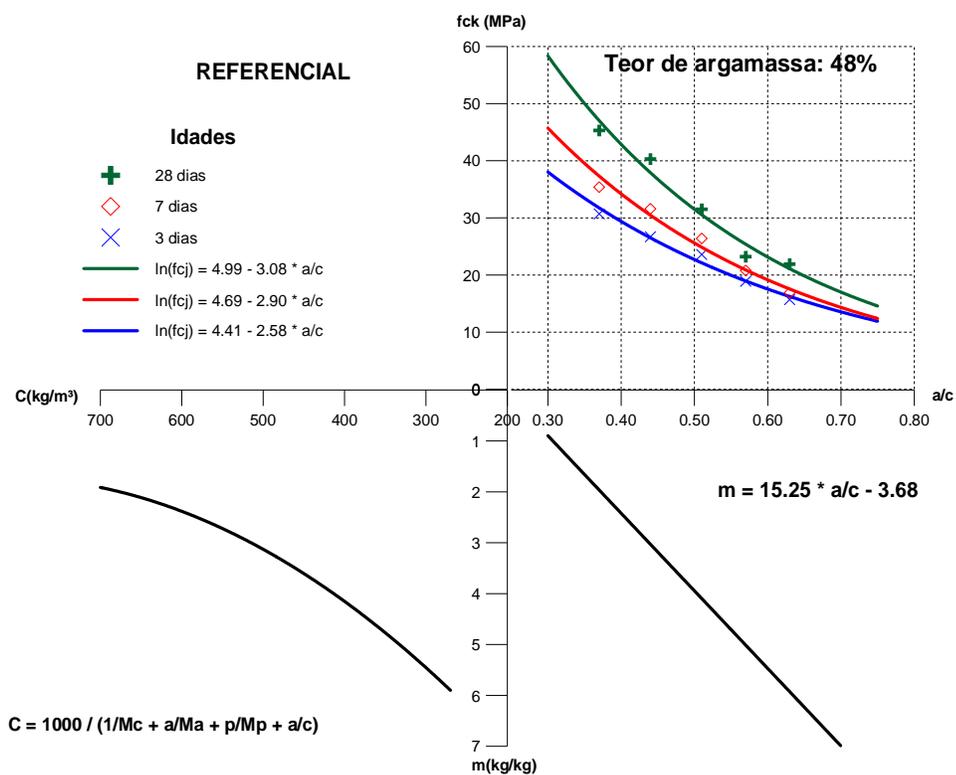


Figura 4.17 – Diagrama de dosagem do concreto referencial.

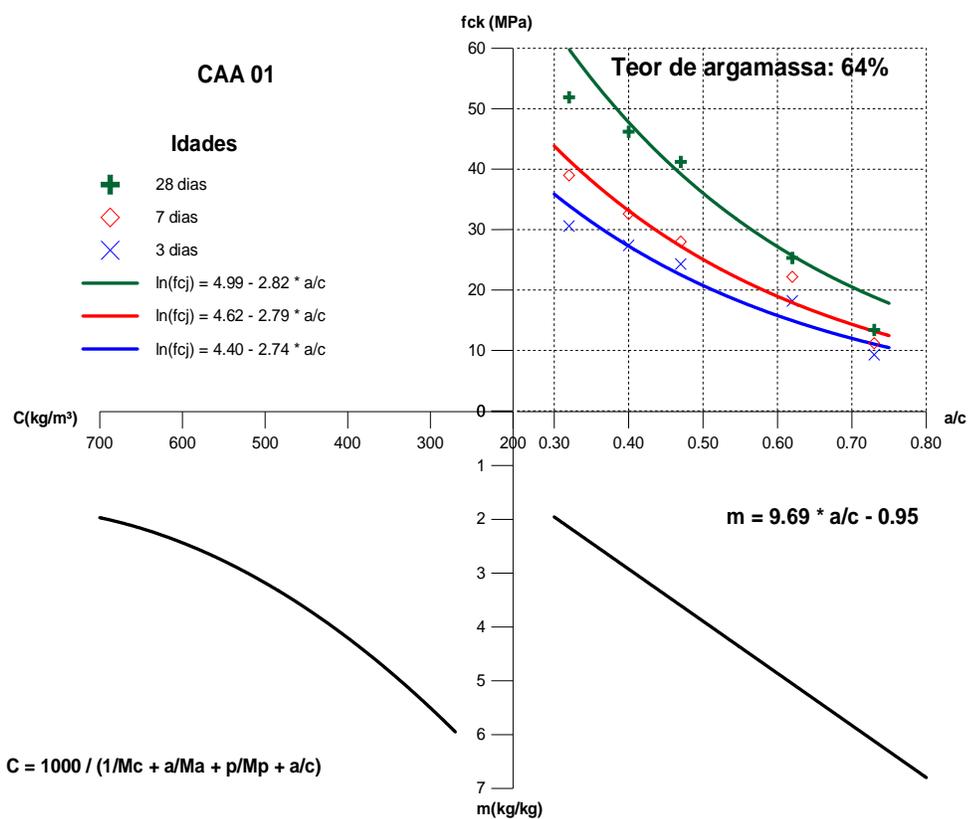


Figura 4.18 – Diagrama de dosagem do CAA 01 (sem adição e sem VMA).

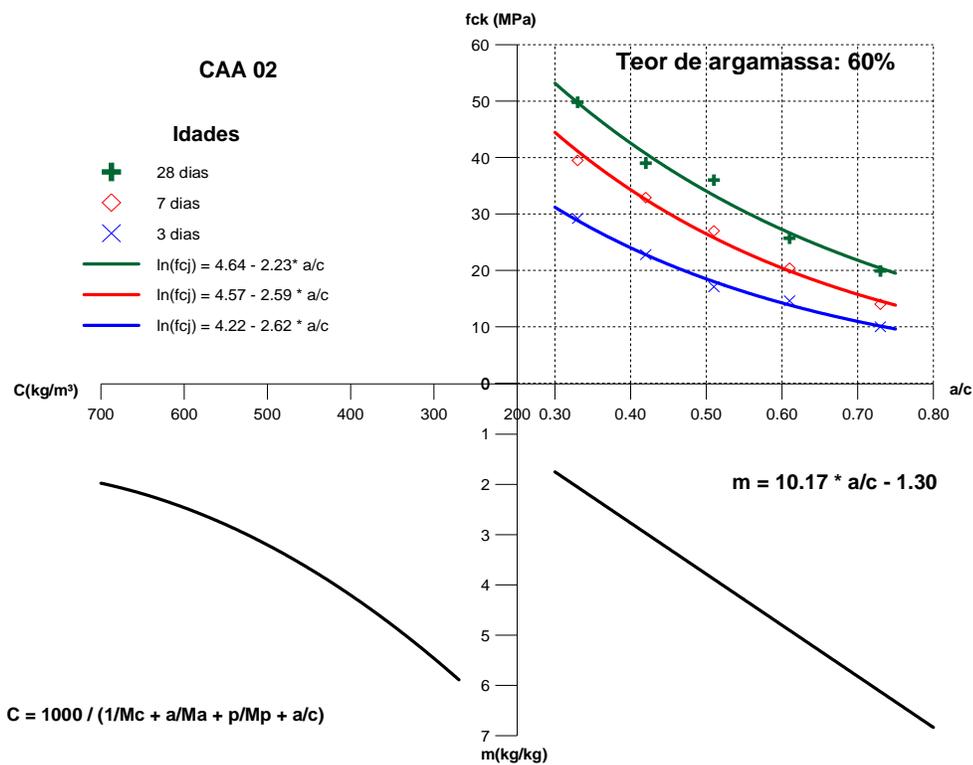


Figura 4.19 – Diagrama de dosagem para o CAA 02 (sem adição e com VMA).

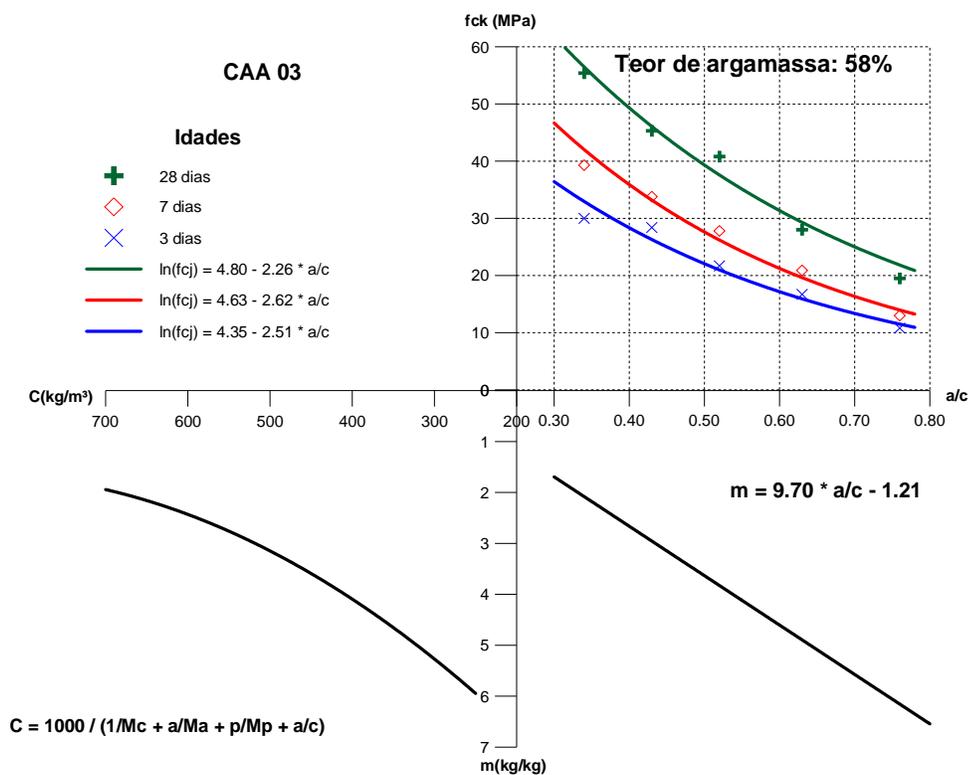


Figura 4.20 – Diagrama de dosagem para o CAA 03 (com metacaulim e sem VMA).

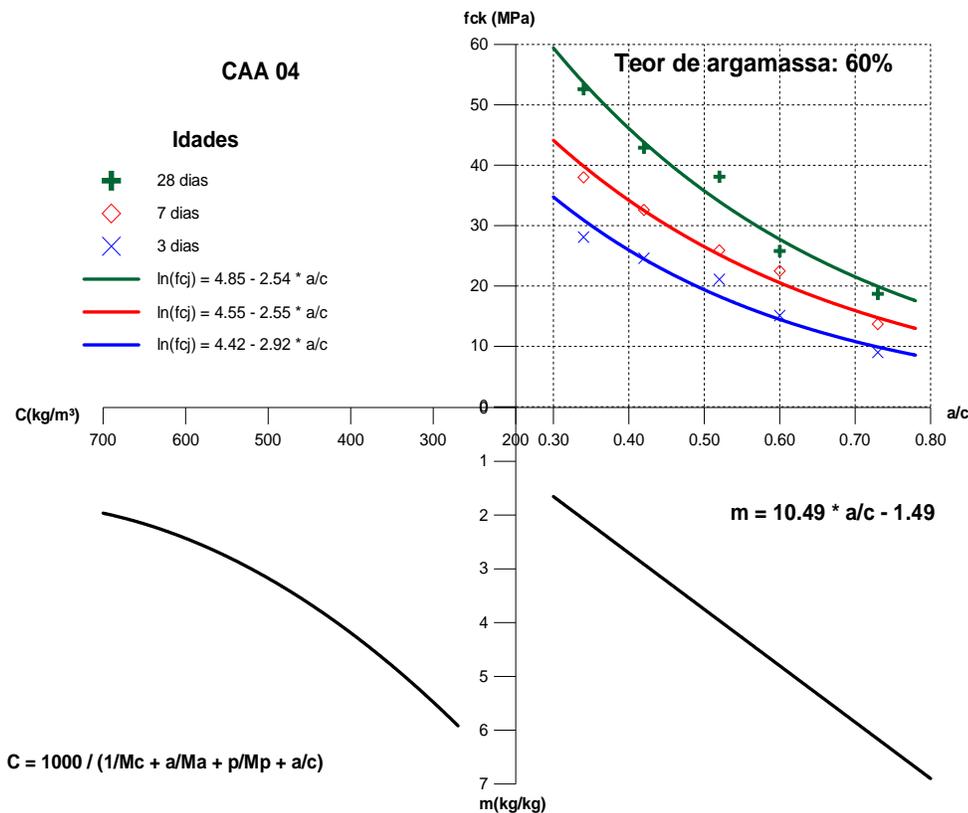


Figura 4.21 – Diagrama de dosagem para o CAA 04 (com metacaulim e com VMA).

De acordo com a visualização destes gráficos é possível observar um ganho de resistência mais acentuado nos CAA's com metacaulim, para os traços 1:2; 1:3; 1:4 e 1:5. As misturas com traço 1:6 não obtiveram ganhos expressivos. Não foi observado, para os CAA's com VMA, baixo desenvolvimento de resistência até os 07 dias de idade, contrariando o que foi constatado por Tutikian (2004). As baixas dosagens deste aditivo nas misturas 02 e 04 são, provavelmente, a explicação para tal desempenho. Porém, os traços sem VMA foram os que apresentaram maiores resultados e este aumento foi maior para resistências acima de 25 MPa. Sem o VMA as misturas ficaram menos coesas, necessitando de menos água para a obtenção do espalhamento desejado.

Outra constatação importante foi o alto consumo de cimento para o traço 1:2 de todos os concretos produzidos. Valores entre 688 e 690 kg/m³ inviabilizariam a produção de um concreto que não estivesse sujeito ao aparecimento de fissuras e, portanto, com a sua durabilidade comprometida. Segundo EFNARC, 2002; Tutikian, 2004; Domone, 2006, valores acima de 500 kg/m³ no consumo de cimento podem resultar no aumento da retração térmica, e conseqüentemente, levarem ao

aparecimento de fissuras. Todavia os mesmos autores admitem um consumo de cimento acima do citado anteriormente desde que o uso de adições pozolânicas seja obrigatório.

Após a montagem dos diagramas de comportamento foi possível, a partir das curvas de dosagem, determinar as equações e coeficientes de correlação nos quais se pode, para qualquer resistência à compressão, estabelecer a relação água/cimento, traço em massa e o consumo de cimento. A Tabela 4.3 apresenta estas equações e coeficientes para as cinco famílias de concreto produzidas.

Tabela 4.3 – Equações e coeficientes de correlação das curvas de dosagem.

CONCRETOS	EQUAÇÕES E COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO			
	Lei de Abrams			Lei de Lyse
	3 dias	7 dias	28 dias	
REFERÊNCIA	$f_{c_3} = 146,94/21,76^{a/c}$	$f_{c_7} = 108,85/18,17^{a/c}$	$f_{c_{28}} = 82,27/13,19^{a/c}$	$m = 15,25 * a/c - 3,68$
	$R^2 = 0,97$	$R^2 = 0,98$	$R^2 = 0,97$	$R^2 = 0,98$
CAA 01	$f_{c_3} = 146,94/16,78^{a/c}$	$f_{c_7} = 101,5/16,28^{a/c}$	$f_{c_{28}} = 81,45/15,49^{a/c}$	$m = 9,69 * a/c - 0,95$
	$R^2 = 0,98$	$R^2 = 0,92$	$R^2 = 0,91$	$R^2 = 0,98$
CAA 02	$f_{c_3} = 103,5/9,30^{a/c}$	$f_{c_7} = 96,54/13,33^{a/c}$	$f_{c_{28}} = 68,03/13,74^{a/c}$	$m = 10,17 * a/c - 1,30$
	$R^2 = 0,96$	$R^2 = 0,99$	$R^2 = 0,99$	$R^2 = 0,99$
CAA 03	$f_{c_3} = 121,51/9,58^{a/c}$	$f_{c_7} = 102,51/13,74^{a/c}$	$f_{c_{28}} = 77,48/12,30^{a/c}$	$m = 9,70 * a/c - 1,21$
	$R^2 = 0,96$	$R^2 = 0,98$	$R^2 = 0,97$	$R^2 = 0,99$
CAA 04	$f_{c_3} = 127,74/12,68^{a/c}$	$f_{c_7} = 94,63/12,81^{a/c}$	$f_{c_{28}} = 83,10/18,54^{a/c}$	$m = 10,49 * a/c - 1,49$
	$R^2 = 0,93$	$R^2 = 0,97$	$R^2 = 0,95$	$R^2 = 0,99$

O consumo de cimento foi determinado com o uso da Equação 2.14 para o concreto referencial, CAA 01 e 02 e da Equação 2.23 para o CAA 03 e 04, respectivamente (ANEXO 02).

Com o traço determinado, pôde-se calcular o custo dos concretos, utilizando as equações da Tabela 4.5. Nesta tabela, \$ corresponde ao custo unitário em reais e C, Agl, a, p, MC, SP, VMA são, respectivamente, o consumo de cimento, aglomerante, agregado miúdo, agregado graúdo, metacaulim, superplastificante e modificador de viscosidade. Os valores dos insumos usados foram pesquisados no mês de novembro de 2007, quando o dólar paralelo estava em R\$1,80. Estes valores estão ilustrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Custo unitário dos insumos usados na produção dos concretos.

INSUMO	UNID.	PREÇO UNITÁRIO (R\$)
Cimento	kg	R\$ 0,44
Areia	kg	R\$ 0,009
Seixo	kg	R\$ 0,018
Metacaulim	kg	R\$ 0,69
Superplastificante	Lt	R\$ 12,00
VMA	Lt	R\$ 4,00

Tabela 4.5 – Custo dos concretos em função do consumo dos materiais.

CONCRETOS	EQUAÇÕES DE CUSTO DOS CONCRETOS
REF	$\$ = C * 0,44 + C * a * 0,009 + C * p * 0,018$
CAA 01	$\$ = C * 0,44 + C * a * 0,009 + C * p * 0,018 + C * SP * 12,00$
CAA 02	$\$ = C * 0,44 + C * a * 0,009 + C * p * 0,018 + C * SP * 12,00 + C * VMA * 4,00$
CAA 03	$\$ = C * 0,44 + MC * 0,69 + Agl * a * 0,009 + Agl * p * 0,018 + Agl * SP * 12,00$
CAA 04	$\$ = C * 0,44 + MC * 0,69 + Agl * a * 0,009 + Agl * p * 0,018 + Agl * SP * 12,00 + Agl * VMA * 4,00$

4.2.1.2. Custo dos concretos em função da resistência à compressão

Geralmente a resistência à compressão é considerada como a propriedade mais importante do concreto, sendo quase que invariavelmente um elemento essencial do projeto estrutural. Mesmo no CAA, onde as propriedades no estado fresco são tão importantes, o conhecimento da resistência à compressão se faz necessária para a comparação do seu custo de produção em relação a um concreto convencional. Deste modo, com as equações de comportamento determinadas, foram feitas comparações fixando a resistência à compressão e calculando-se o consumo de materiais e custo de produção. Foram utilizadas três faixas de resistência à compressão; 25, 35 e 45 MPa à idade de 28 dias.

De acordo com a Tabela 4.3 foi possível calcular o traço e o consumo de materiais, para os f_{c28} de 25, 35 e 45 MPa, e posteriormente com o auxílio da Tabela 4.5, o custo de produção destes traços.

- Resistência de 25MPa

A Figura 4.22 apresenta a comparação do consumo de cimento entre todos os concretos dosados, bem como a redução percentual deste consumo por parte dos CAA's, referentes à resistência à compressão de 25MPa aos 28 dias. Observa-se que todos os CAA's apresentaram redução no consumo de cimento em relação ao concreto referencial. Este comportamento se deve ao fato de que todos os CAA's, com traços entre 1:2 e 1:5, apresentaram aumento de resistência à compressão em relação ao concreto convencional e, desta forma, necessitam de menos cimento ou aglomerante total para atingirem um f_{cj} pré-determinado.

Os CAA's com adição de metacaulim foram os que apresentaram maiores reduções, onde se pode destacar o CAA 03, cujo percentual de redução foi de 22%.

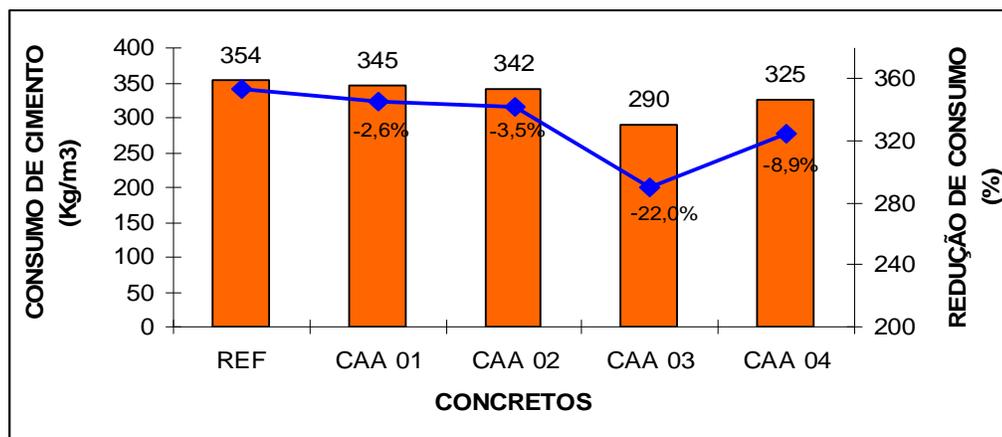


Figura 4.22 – Consumo de cimento entre os concretos produzidos e a redução percentual deste consumo dos CAA's, para um f_{c28} de 25MPa.

Com relação ao custo de produção, a Figura 4.23 ilustra a comparação entre todos os concretos dosados, bem como o aumento percentual deste custo dos CAA's, para um f_{c28} de 25MPa. Constata-se que em todas as misturas houve aumento do custo de produção, contudo, tais aumentos foram inferiores aos obtidos no estudo piloto.

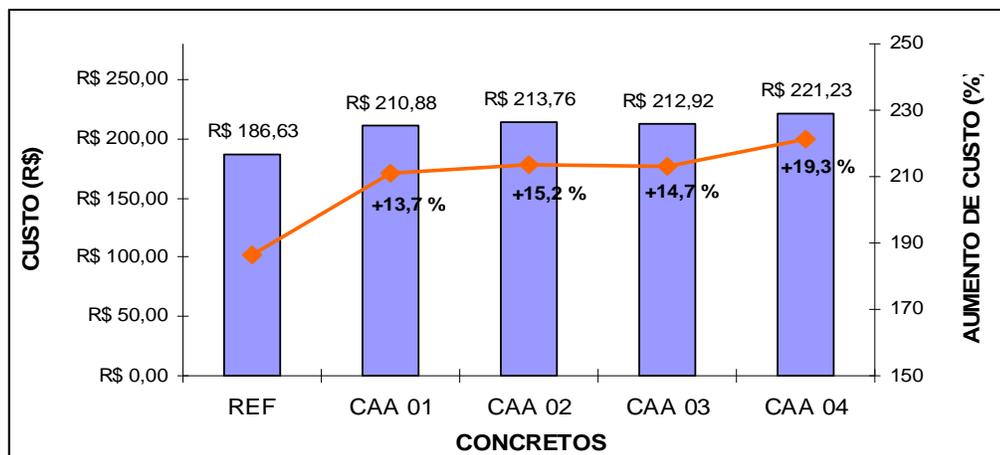


Figura 4.23 – Custo dos concretos produzidos e o aumento percentual deste custo dos CAA's para um f_{c28} de 25MPa.

O CAA 04 foi o que apresentou a maior elevação de custo, cujo percentual de aumento foi de 19,3%. É interessante ressaltar o desempenho do CAA 01 (sem adição e sem VMA), onde fica evidente ser possível produzir este tipo de mistura somente com o uso da areia fina como promotor de coesão. Além disso, o uso do seixo rolado foi fundamental para um maior espalhamento e, conseqüentemente, para a redução nas dosagens do superplastificante.

Outro comportamento interessante ocorreu com o CAA 02, cujo custo de produção ficou muito próximo do CAA 03 e abaixo do CAA 04. Estes resultados confirmam a hipótese de que na falta de adições minerais ou devido a fatores econômicos, é possivelmente viável o uso do VMA, para esta faixa de resistência, como agente promotor de coesão entre as partículas da mistura. Apenas deve-se ter atenção especial quanto à sua dosagem, pois altos teores podem deixar a mistura excessivamente coesa e com maior necessidade por água e aditivo superplastificante.

- Resistência de 35MPa

A Figura 4.24 apresenta a comparação do consumo de cimento entre todos os concretos dosados, bem como a redução percentual, deste consumo por parte dos CAA's, referentes à resistência à compressão de 35MPa aos 28 dias. Novamente tem-se que todos os CAA's apresentaram redução no consumo de cimento em relação ao concreto referencial, sendo que o CAA 03 foi, novamente, o

que apresentou maior redução percentual ficando em 29%. A substituição de cimento por metacaulim foi a principal causa deste comportamento. Concretos com esta característica podem ser usados, preferencialmente, em peças que apresentam grandes volumes, pois reduzem o risco de aparecimento de fissuras por retração térmica.

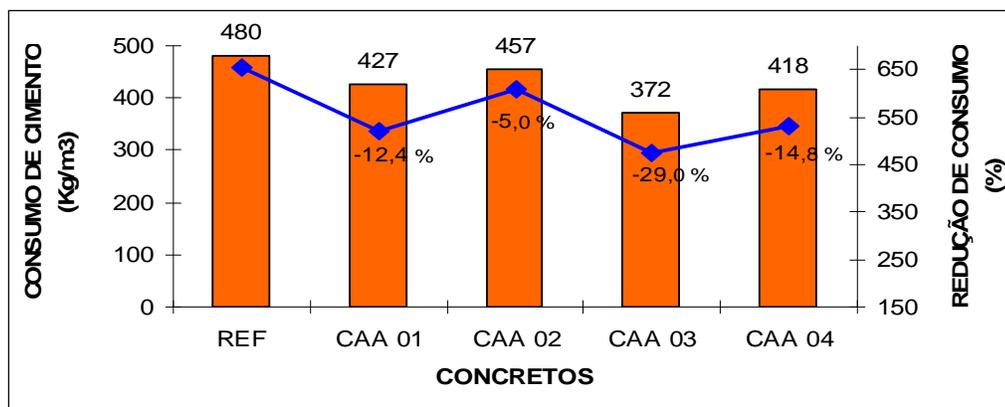


Figura 4.24 - Comparação do consumo de cimento entre os concretos produzidos e a redução percentual deste consumo dos CAA's para um f_{c28} de 35MPa.

Com relação ao custo de produção, a Figura 4.25 ilustra a comparação entre todos os concretos dosados, bem como o aumento percentual deste custo dos CAA's para um f_{c28} de 35MPa.

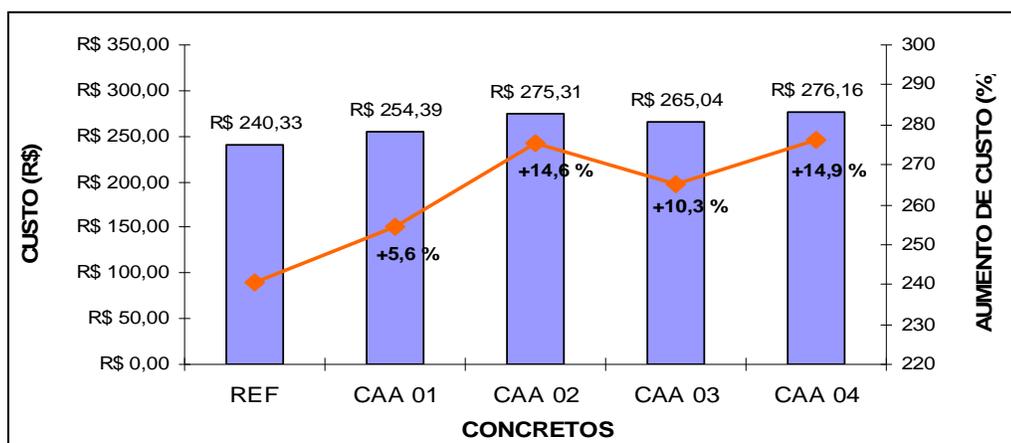


Figura 4.25 - Custo dos concretos produzidos e o aumento percentual deste custo dos CAA's para um f_{c28} de 35MPa.

O CAA 04 foi o que apresentou a maior elevação de custo, cujo percentual de aumento foi de 14,9%. Vale novamente ressaltar o bom desempenho do CAA 01 em relação ao concreto de referência, onde o percentual de aumento foi

de apenas 5,6%. E novamente o CAA 02 apresentou custo de produção próximo do CAA 03 e abaixo do CAA 04.

- Resistência de 45MPa

A Figura 4.26 apresenta a comparação do consumo de cimento entre todos os concretos dosados, bem como a redução percentual deste consumo por parte dos CAA's, referentes à resistência à compressão de 45MPa aos 28 dias. Mais uma vez se observa que todos os CAA's apresentaram redução no consumo de cimento em relação ao concreto referencial e que à medida que se aumenta a resistência à compressão, maiores são estas reduções.

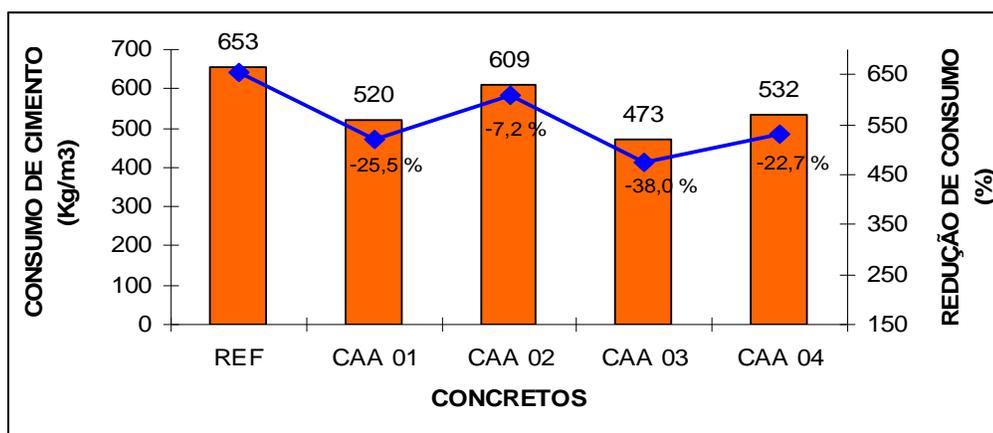


Figura 4.26 - Comparação do consumo de cimento entre os concretos produzidos e a redução percentual deste consumo dos CAA's para um f_{c28} de 45MPa.

Durante a produção dos concretos, observou-se que os CAA's com traços mais ricos (1:2; 1:3 e 1:4) necessitaram de menos água, em comparação ao concreto referencial, para alcançarem o espalhamento desejado e com isso obtiveram um ganho de resistência à compressão em todas as idades. Desta forma o concreto de referência necessita baixar a relação água/cimento para alcançar uma determinada resistência, quando comparado com os CAA's. Por isso tem-se uma quantidade menor de agregados e conseqüentemente um consumo de cimento maior, o que o tornaria mais caro, caso os CAA's não necessitassem de adições minerais e de aditivos na sua composição.

Novamente os CAA's com adição de metacaulim foram os que apresentaram maiores reduções, onde se pode destacar o CAA 03, cujo percentual

de redução foi de 38%. E com relação aos CAA's produzidos com o modificador de viscosidade, pôde-se observar uma menor redução no consumo de cimento em relação aos demais CAA's, para todas as resistências avaliadas. Este comportamento acabou contribuindo para o aumento de custo dos CAA 02 e 04 em relação aos CAA 01 e 03.

Com relação ao custo de produção a Figura 4.27 ilustra a comparação entre todos os concretos dosados, bem como o aumento percentual deste custo dos CAA's para um f_{c28} de 45MPa.

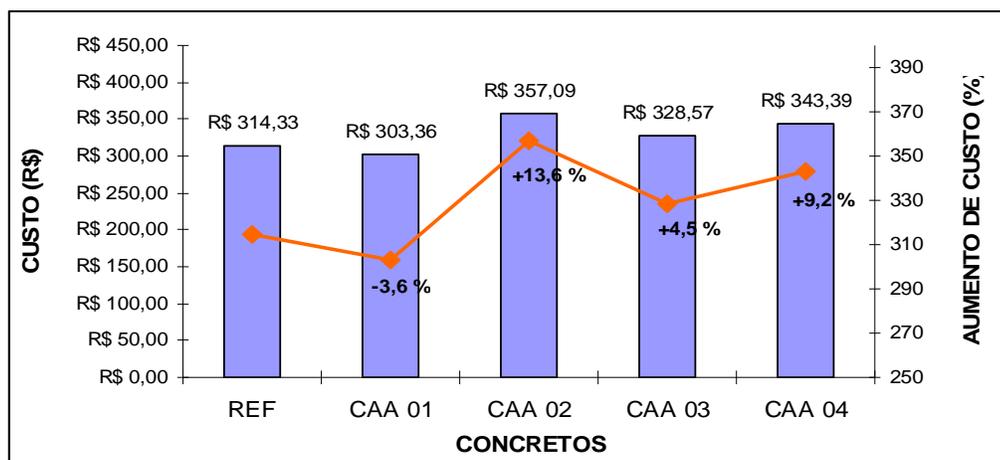


Figura 4.27 - Custo dos concretos produzidos e o aumento percentual deste custo dos CAA's para um f_{c28} de 45MPa.

Desta vez o CAA 02 foi o que apresentou a maior elevação de custo, cujo percentual de aumento foi de 13,6%. De acordo com o gráfico da Figura 4.27, o ganho de resistência à compressão deste CAA, a partir de 25 MPa, foi inferior em relação aos demais. Por isso a redução no consumo de cimento, em relação ao concreto referencial, não foi muito acentuada, o que resultou no aumento do seu custo de produção.

Porém o resultado mais expressivo, com certeza, foi a redução de 3,6% no custo do CAA 01 em relação ao concreto referencial. A redução no consumo de cimento e a menor dosagem de superplastificante em relação aos CAA 03 e 04 foram fundamentais para obtenção deste resultado. Com isso a hipótese de utilização da areia, como substituto de adições minerais, fica plenamente confirmada, o que pode criar condições muito favoráveis ao uso do CAA na região de Belém-Pa. Outro fato importante foi a utilização do seixo rolado, que devido a sua forma arredondada, facilitou o espalhamento das misturas. Além disso, é

interessante ressaltar que o custo de produção de todos os CAA's desenvolvidos neste trabalho ficou muito abaixo dos resultados obtidos no estudo piloto, o que justificou a alteração no método de dosagem escolhido.

4.2.1.3 – Custo em R\$/MPa dos concretos em função da resistência à compressão

Para completar a análise econômica dos concretos produzidos neste trabalho fez-se a avaliação do custo, em reais por MPa, obtido para cada família de concreto e com resistências de 25, 35 e 45MPa. Segundo Tutikian (2004), este parâmetro é muito útil para analisar a relação custo/benefício, pois determina quanto é necessário gastar para se obter cada MPa. Em resumo, um concreto pode ser considerado caro apenas em função do seu custo de produção, porém relativamente barato se for levada em consideração a resistência à compressão que se deseja alcançar. A Figura 4.28 mostra o custo, em R\$/MPa, dos concretos em função das três resistências à compressão analisadas.

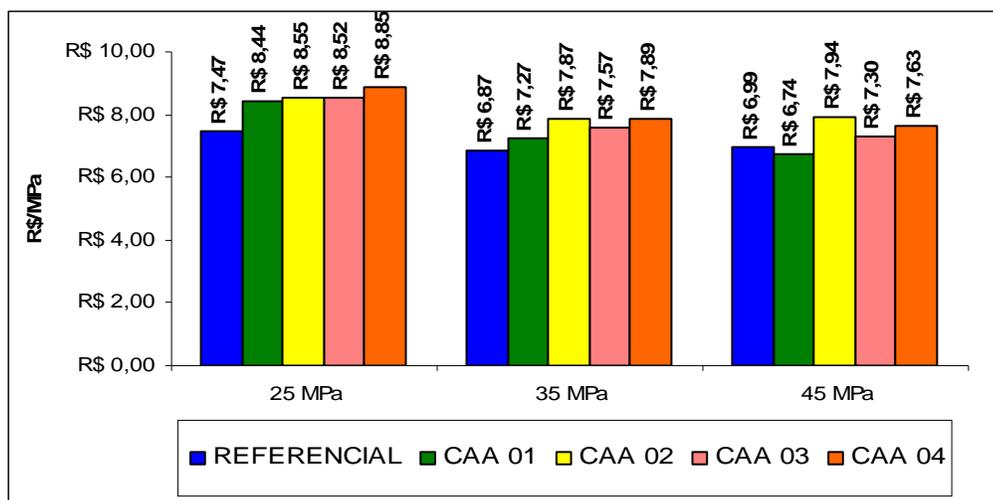


Figura 4.28 – Custo (R\$/MPa) dos concretos em função da resistência à compressão aos 28 dias.

Observa-se na Figura 4.28 que à medida que a resistência aumenta a relação R\$/MPa diminui, com exceção do concreto referencial de 45MPa. Ou seja, a relação R\$/MPa não apresenta um comportamento linear, pois o custo em reais não sobe na mesma proporção da resistência à compressão. Também é possível observar que à medida que a resistência aumenta, menor fica a diferença de custo unitário entre o concreto convencional e os auto-adensáveis, sendo preferível o uso destes últimos em concretos cujas resistências à compressão sejam superiores a

30MPa. Porém nada impede o seu uso em concretos com resistências inferiores, desde que seja feita uma análise da logística de transporte, lançamento e acabamento dos elementos concretados, de modo que os custos totais sejam inferiores se comparados a um concreto convencional.

Além disso, fica mais uma vez evidente a vantagem econômica de se produzir o CAA somente com o uso de areia fina da região em substituição às adições minerais e do seixo rolado em substituição à brita, pois o CAA 01 foi aquele que mais apresentou redução de custo em relação aos outros CAA's. Este é um resultado bastante positivo do ponto de vista econômico, visto que estes materiais estão disponíveis em abundância na região e que, como foi dito no capítulo 03, as adições minerais, principalmente as superpozolanas, são comercializadas a preços bem mais elevados do que o do cimento.

Contudo, caso seja necessária a produção de um concreto com característica especiais tais como: menor calor de hidratação, maior resistência à penetração de íons cloretos ou sulfatos ou maiores resistências mecânicas, a utilização do CAA com adição de metacaulim pode ser uma alternativa, visto que o CAA 03 apresentou aumento de custo de produção de somente 10,5%, em média, em relação ao concreto referencial. As melhorias obtidas com o metacaulim, para essas propriedades, são colocadas por Barata (1998) e Souza (2003).

E novamente os CAA's produzidos com o uso do VMA se mostraram mais caros do que o seu correspondente sem VMA. Mas de um modo geral todos estes CAA's poderiam ser usados em estruturas reais e somente com um estudo prévio das suas características se poderia indicar qual o melhor.

4.2.2. Resistência à tração

Para a verificação do comportamento das famílias de concreto produzidas, quanto a resistência à tração, foram utilizados dois diferentes ensaios:

- a) Ensaio de resistência à tração por flexão (f_{tF}) em corpos-de-prova prismáticos de 10 x 10 x 35cm;
- b) Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (f_{tD}) em corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20cm.

Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.6, onde cada valor representa a média de duas observações experimentais aos 28 dias de idade (ANEXO 01).

Tabela 4.6 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por flexão e compressão diametral para o concreto de referencia e os CAA's.

CONCRETOS	RESISTÊNCIA aos 28 dias (MPa)	TRAÇO (1:m)				
		1:2	1:3	1:4	1:5	1:6
REFERENCIAL	f_{tF}	5,3	4,6	3,8	3,2	3,0
	f_{tD}	4,5	3,4	2,8	2,3	2,2
CAA 01	f_{tF}	6,7	5,6	5,1	3,2	2,3
	f_{tD}	5,0	4,4	3,6	2,4	1,7
CAA 02	f_{tF}	6,3	5,1	4,9	3,3	2,8
	f_{tD}	4,7	3,9	3,4	2,4	2,1
CAA 03	f_{tF}	6,9	5,9	4,9	3,6	2,6
	f_{tD}	5,2	4,6	3,6	2,7	2,0
CAA 04	f_{tF}	6,6	5,3	4,5	3,3	2,3
	f_{tD}	4,9	3,9	3,2	2,4	1,7

De acordo com os resultados da Tabela 4.6 se constata um comportamento diretamente proporcional ao traço (1:m) em massa, ou seja, quanto mais rica a mistura, maiores foram os resultados de resistência à tração, tanto por flexão quanto por compressão diametral. Também foi possível observar maiores valores de resistência à tração por flexão em relação à tração por compressão diametral, para todas as famílias produzidas. Segundo Dal Molin (1995) e Souza (2003) este comportamento se deve ao fato de que o prisma ensaiado à tração por flexão também está sujeito a uma parcela de compressão na sua parte superior, fazendo com que esta se some à parcela de tração durante o rompimento, aumentando, desta forma, a sua resistência.

As Figuras 4.29 e 4.30 fazem uma comparação dos resultados entre o concreto convencional e os CAA's 01 à 04, para os ensaios de resistência à tração por flexão e tração por compressão diametral, respectivamente.

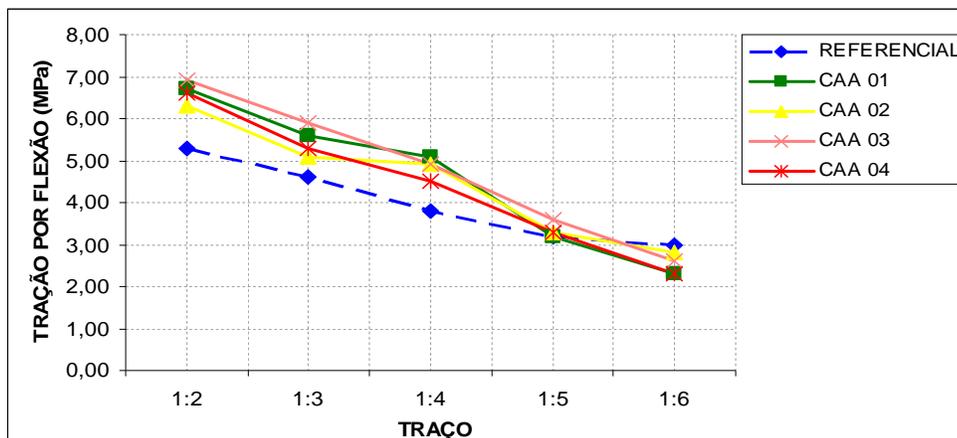


Figura 4.29 – Comparação dos resultados de resistência à tração por flexão entre o concreto de referência e os CAA's.

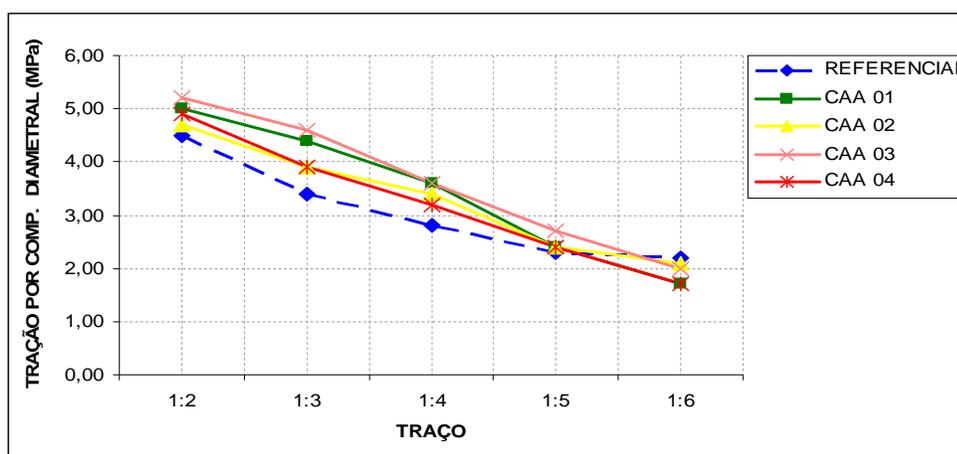


Figura 4.30 – Comparação dos resultados de resistência à tração por compressão diametral entre o concreto de referência e os CAA's.

De acordo com a Tabela 4.6 e as figuras 4.29 e 4.30, quase todos os resultados dos dois ensaios de tração de todas as famílias de CAA's se mostraram melhores do que os do concreto referencial. Devido se ter conseguido reduzir a relação água/cimento dos CAA's em relação ao concreto convencional, para os traços de 1:2 à 1:4, foi possível obter este aumento. E mesmo para o traço 1:5 de todos os CAA's, onde a relação a/c aumentou, ainda se conseguiu um pequeno acréscimo de resistência em relação ao concreto referencial.

O CAA 03 apresentou os melhores resultados, tanto para a tração por flexão quanto por compressão diametral. Houve um aumento de 30% para o traço 1:2 e 12,5% para o traço 1:5, ficando a média em 24,85% do ensaio de tração por flexão e com um aumento de 15,5% para o traço 1:2 e 17,4% para o traço 1:5, ficando a média em 24,2% do ensaio de compressão diametral. A inclusão de uma

pozolana de alta reatividade pode ter sido a principal responsável para este ganho de resistência. De acordo com Souza (2003), a introdução de metacaulim de alta reatividade no concreto proporciona um aumento na resistência à tração tanto por flexão quanto por compressão diametral e é proporcional à dosagem. Quanto aos traços 1:6 de todas as famílias de CAA's, estes não fazem parte das médias citadas anteriormente por terem apresentado redução acentuada de resistência à tração nos dois ensaios.

As Figuras 4.31 e 4.32 mostram o comportamento percentual entre os valores médios dos CAA's 01 à 04 e o concreto referencial para os ensaios de tração na flexão e compressão diametral, respectivamente.

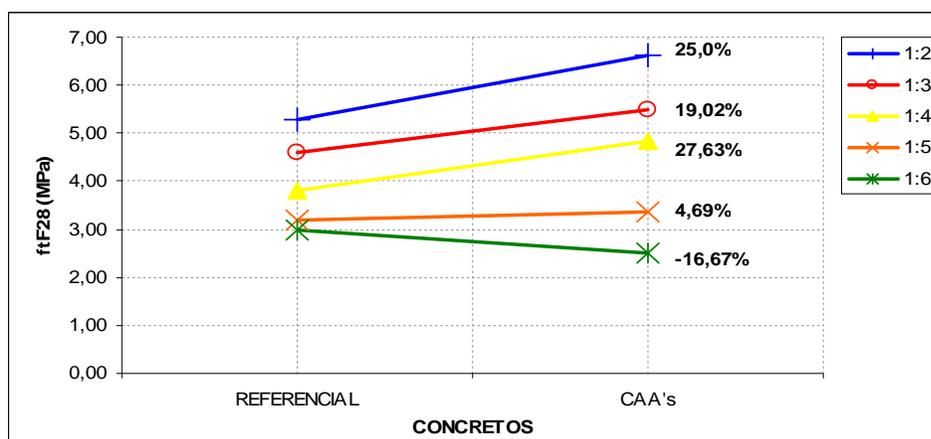


Figura 4.31 – Comportamento percentual da resistência à tração na flexão entre o concreto referencial e a média dos CAA's produzidos.

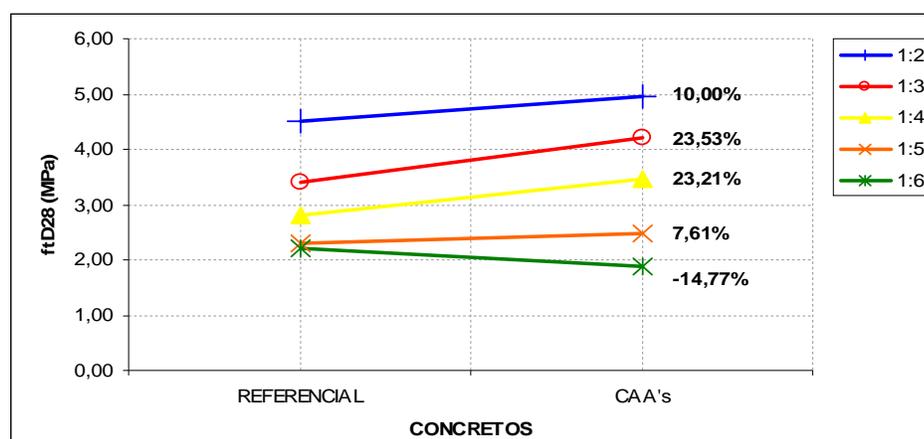


Figura 4.32 - Comportamento percentual da resistência à tração por compressão diametral entre o concreto referencial e a média dos CAA's produzidos.

O aumento médio de resistência à tração na flexão, de 19,0%, foi ligeiramente maior do que à tração por compressão diametral, que ficou em 16,0%.

Mesmo os CAA's 03 e 04 apresentaram este comportamento, contrariando os resultados obtidos por Souza (2003), onde concretos produzidos com adição de metacaulim obtiveram ganhos de resistência à tração maiores para o ensaio de compressão diametral, do que na flexão. Esta situação pode ser justificada pelo fato de que, nos CAA's produzidos, o teor de argamassa apresentou um aumento médio de 26% em relação ao teor de argamassa do concreto convencional, reduzindo a quantidade total de agregado graúdo. Segundo Neville (1997), a resistência à tração na flexão do concreto é, em geral, menor do que a mesma resistência à tração na flexão da argamassa correspondente. Portanto a argamassa estabeleceria, aparentemente, o limite superior da resistência do concreto à tração na flexão. A Figura 4.33 mostra os aumentos percentuais médios das resistências à tração dos CAA's em relação ao concreto referencial.

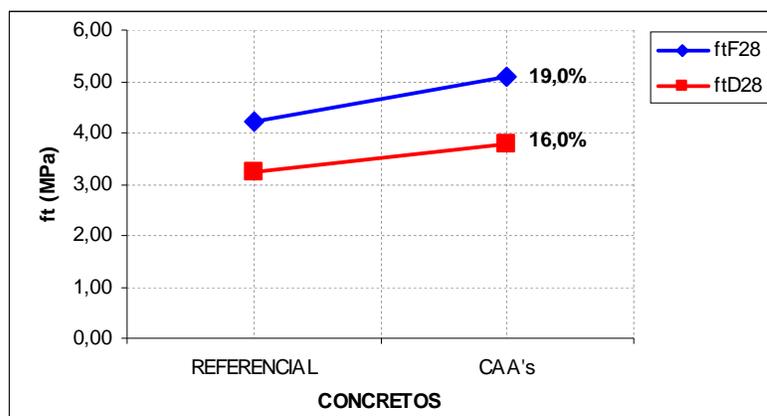


Figura 4.33 – Aumento médio da resistência à tração na flexão (f_{tF}) e por compressão diametral (f_{tD}) do concreto referencial e a média dos CAA's produzidos.

4.2.2.1 Relação entre a resistência à tração e resistência à compressão axial

É possível relacionar a resistência à compressão axial com a resistência à tração sem que haja, porém, uma proporcionalidade direta, pois esta relação depende do nível de resistência à compressão do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (1994); Dal Molin (1995) e Neville (1997), à medida em que a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a uma velocidade decrescente. Desta forma o quociente da relação entre a resistência à tração e resistência à compressão normalmente diminui com o acréscimo de resistência à compressão ou redução da relação a/c do concreto.

A Tabela 4.7 apresenta as relações obtidas, a partir dos dados experimentais, entre a resistência à tração por flexão e resistência à compressão, e entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 4.7 – Relações entre a resistência à tração por flexão e compressão axial, e tração por compressão diametral e compressão axial.

CONCRETOS	TRAÇO	a/agl	f_{c28} (MPa)	f_{tF28} (Mpa)	f_{tD28} (Mpa)	f_{tF}/f_c (%)	f_{tD}/f_c (%)
REFERENCIAL	1:2	0,37	45,30	5,30	4,50	11,70	9,93
	1:3	0,44	40,30	4,60	3,40	11,41	8,44
	1:4	0,51	31,50	3,80	2,80	12,06	8,89
	1:5	0,57	23,20	3,20	2,30	13,79	9,91
	1:6	0,63	21,90	3,00	2,20	13,70	10,05
CAA 01	1:2	0,32	51,90	6,70	5,00	12,91	9,63
	1:3	0,40	46,20	5,60	4,40	12,12	9,52
	1:4	0,47	41,20	5,10	3,60	12,38	8,74
	1:5	0,62	25,30	3,20	2,40	12,65	9,49
	1:6	0,73	13,40	2,30	1,70	17,16	12,69
CAA 02	1:2	0,33	49,80	6,30	4,70	12,65	9,44
	1:3	0,42	39,00	5,10	3,90	13,08	10,00
	1:4	0,51	36,00	4,90	3,40	13,61	9,44
	1:5	0,61	25,70	3,30	2,40	12,84	9,34
	1:6	0,73	19,90	3,00	2,10	15,08	10,55
CAA 03	1:2	0,34	55,40	6,90	5,20	12,45	9,39
	1:3	0,43	45,30	5,90	4,60	13,02	10,15
	1:4	0,52	40,80	4,90	3,60	12,01	8,82
	1:5	0,63	28,00	3,60	2,70	12,86	9,64
	1:6	0,76	19,50	2,60	2,00	13,33	10,26
CAA 04	1:2	0,34	52,60	6,60	4,50	12,55	8,56
	1:3	0,42	42,90	5,30	3,40	12,35	7,93
	1:4	0,52	38,10	4,50	2,80	11,81	7,35
	1:5	0,60	25,80	3,30	2,30	12,79	8,91
	1:6	0,73	18,70	2,30	2,20	12,30	11,76

De acordo com os valores da Tabela 4.7 é possível observar uma tendência de redução dos quocientes f_{tF}/f_c e f_{tD}/f_c à medida em que se reduziu a relação a/c, principalmente para os concretos referencial, CAA 01 e CAA 02. Para os CAA 03 e 04 este comportamento não aconteceu.

4.2.2.2. Previsões da resistência à tração

Segundo Neville (1997), na falta de informações referentes à resistência à tração do concreto, existe a possibilidade de previsão desta resistência a partir da sua resistência à compressão axial de acordo com alguns modelos propostos na literatura técnica, CEB-FIP (1990); ACI (1984). Porém Aïtcin (2000) alerta que para concretos de alta resistência ($f_{ck} > 50\text{MPa}$) estes modelos perdem um pouco do seu valor de previsão, devendo ser evitados. Como neste trabalho a resistência à compressão variou de 13,4 à 55,4 MPa, fez-se uma comparação entres os resultados de resistência à tração na flexão e por compressão diametral e alguns modelos propostos para a previsão destas resistências em função da resistência à compressão do concreto. A Figura 4.34 compara a média dos resultados de resistência à tração por flexão dos CAA's 01 à 04, obtidos nesta pesquisa, e a previsão da mesma resistência, a partir da resistência média à compressão dos mesmos CAA's, pelo modelo proposto por Dal Molin (1995). Já a Figura 4.35 faz a mesma comparação, porém entre a média dos resultados de resistência à tração por compressão diametral e os modelos de previsão desta resistência, a partir da resistência média à compressão dos CAA's, propostos por CEB-FIP (1990), Dal Molin (1995) e NBR 6118 (2003).

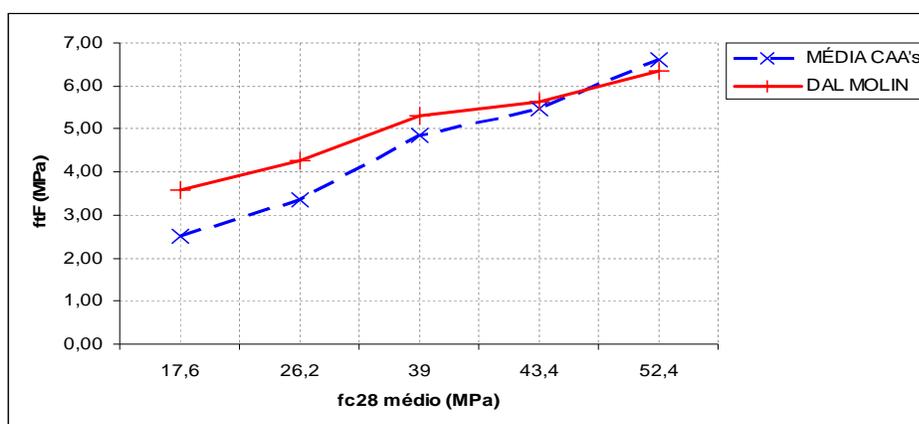


Figura 4.34 – Comparação entre um modelo de previsão de resistência à tração na flexão, a partir da resistência média à compressão e os valores médios dos CAA's produzidos.

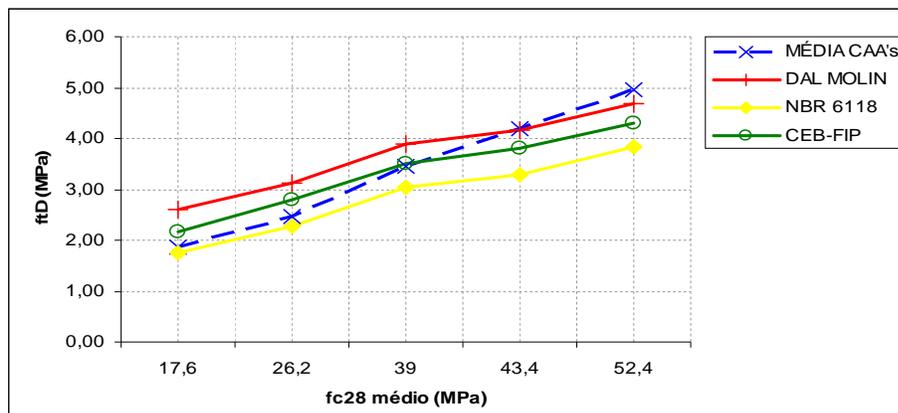


Figura 4.35 – Comparação entre os modelos de previsão de resistência à tração por compressão diametral, a partir da resistência média à compressão e os valores médios dos CAA's produzidos.

Nota-se que os resultados gerados nesta pesquisa estão dentro do intervalo de valores obtidos dos modelos propostos para a resistência à tração por compressão diametral e se aproximam dos valores obtidos dos modelos propostos para a resistência à tração na flexão. Portanto, na falta de resultados referentes à resistência à tração, pode-se, perfeitamente, para o CAA e para resistências à compressão acima de 40 MPa, prevê-la a partir dos modelos citados anteriormente. Vale lembrar que esta afirmação somente é válida para CAA's produzidos com materiais e teores de argamassa semelhantes aos apresentados neste trabalho.

4.2.3. Módulo de elasticidade

Neste trabalho foram determinados os módulos de elasticidade dinâmicos para todas as famílias de concreto produzidas, por meio do ensaio de transmissão de ondas ultra-sônicas de forma direta em corpos-de-prova cilíndricos de 15 x 30cm. Este ensaio consiste na medição, por meio de dispositivos eletrônicos, do tempo (t) que um pulso leva para percorrer, através do concreto, a distância (L) entre os transdutores emissor e receptor. De posse deste tempo de percurso, calcula-se a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, por meio da Equação 4.1.

$$V = \frac{L}{t} \times 10^6 \quad \text{eq. 4.1}$$

Onde:

V – Velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas (m/s);

L – Distância entre os transdutores (m)

t – Tempo de propagação da onda entre os transdutores (μs)

Segundo Castro (2007), a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas (V), percorrendo um material sólido, depende da massa específica e das propriedades elásticas deste material. O módulo de elasticidade dinâmico do concreto ensaiado tem relação direta com a velocidade (V) e cujo valor aproximado é obtido a partir da Equação 4.2.

$$E_D = \frac{V^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{eq. 4.2}$$

Onde:

E_D – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto (MPa)

V – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (km/s)

ρ – Massa específica do concreto (kg/m^3)

ν – Coeficiente de Poisson dinâmico (adotado)

A Tabela 4.8 resume os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico de cada família produzida, onde cada valor representa a média de duas observações experimentais (ANEXO 01).

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.

CONCRETOS	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO aos 28 dias (GPa)				
	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6
REFERENCIAL	37,7	35,2	33,2	31,6	31,2
CAA 01	36,0	33,6	32,1	27,9	25,0
CAA 02	34,5	31,9	29,9	27,7	24,3
CAA 03	37,8	34,9	32,4	29,1	26,9
CAA 04	35,1	32,7	30,6	29,1	26,8

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.8, pode-se observar uma nítida redução dos módulos de elasticidade de todos os CAA's em relação ao concreto referencial. Segundo Mehta e Monteiro (1994); Neville (1997) e

Aïtcin (2000), o módulo de elasticidade do concreto depende, de um modo geral, do módulo de elasticidade do agregado graúdo, bem como da sua proporção, em volume, no concreto. Portanto para os CAA's produzidos nesta pesquisa, onde o volume médio de agregado graúdo foi 26% menor do que o volume para o concreto de referência, a redução do módulo de elasticidade já era esperada.

Também é possível notar que houve um incremento desta redução à medida em que se empobreceu o traço e se aumentou a relação a/c, onde a redução média dos resultados dos CAA's em relação ao concreto convencional ficou em 5% para os traços 1:2 até alcançar 17,5% para os traços 1:6. Este comportamento também foi constatado por Domone (2006), que obteve uma variação na redução do módulo de elasticidade dos CAA's, de 5% à 40%, à medida em que diminuiu a resistência à compressão dos mesmos em relação a um concreto convencional.

A Figura 4.36 faz uma comparação dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico entre o concreto referencial e os CAA's produzidos neste trabalho.

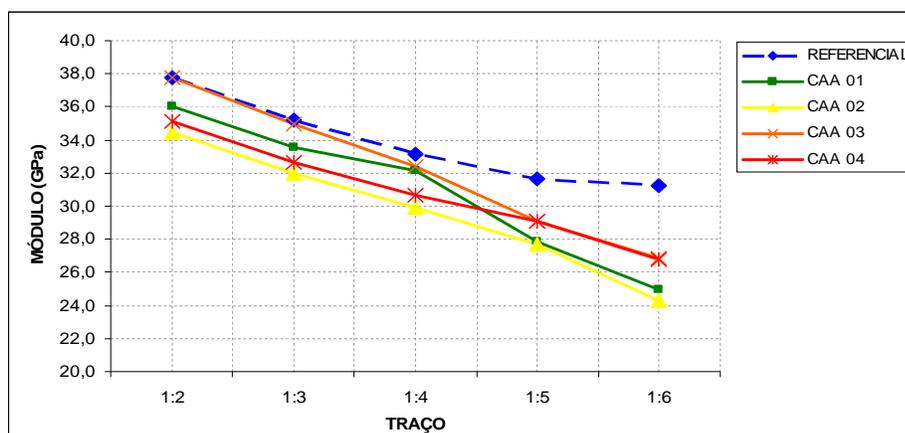


Figura 4.36 – Comparação entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade das famílias de concreto produzidas.

De acordo com a Figura 4.36 pode-se notar que os resultados do CAA 03 foram os que mais se aproximaram do concreto convencional, com nenhuma redução para o traço 1:2 e 13,8% para o traço 1:6, ficando com uma média de 5%. Este comportamento deve-se, provavelmente, à incorporação do metacaulim na mistura aumentando, desta forma, o módulo da pasta de cimento principalmente devido à reação pozolânica. Segundo Souza (2003), concretos produzidos com metacaulim apresentam uma melhoria média de 5% no módulo de elasticidade em

relação a um concreto sem esta adição. Esta melhoria pode ter compensado a perda de módulo dos CAA's devido ao menor consumo de agregado graúdo.

Já os resultados do CAA 02 foram os que mais se distanciaram do concreto convencional com uma redução de 8,5% para o traço 1:2 e 22% para o traço 1:6, ficando com uma média de 12,5%. Em função do CAA 02 ter apresentado as menores resistências à compressão axial, já era de se esperar um comportamento semelhante para os ensaios de módulo, não tendo, desta forma, relação direta com o uso do aditivo modificador de viscosidade VMA.

4.2.3.1 Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão axial

Segundo Neville (1997), o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da resistência à compressão do concreto, porém a uma taxa menor do que esta última. Para uma melhor avaliação dos resultados obtidos no programa experimental fez-se uma previsão do módulo de elasticidade do concreto referencial a partir das mesmas resistências médias dos CAA's para os traços 1:2; 1:3; 1:4; 1:5 e 1:6, respectivamente. Desta forma avaliou-se de quanto seria a redução efetiva do módulo de elasticidade do CAA em relação a um concreto convencional, quando as suas resistências à compressão fossem semelhantes. Para isso foram usados três modelos de previsão propostos pelo CEB (1990); Dal Molin (1995) e NBR 6118 (2003) e que relaciona a resistência à compressão do concreto com o seu módulo de elasticidade estático. Porém, o ensaio de determinação do módulo por ultra-som, usado neste trabalho, avaliou o módulo de elasticidade dinâmico que, segundo Neville (1997), fornece resultados maiores do que os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático e por isso se fez uma correção para os módulos médios dos CAA's com base na Equação 4.3 proposta por Lyndon e Balandran (1986).

$$E_c = 0,83 \cdot E_d \quad \text{eq. 4.3}$$

Onde:

E_c = módulo de elasticidade estático;

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico.

A Figura 4.37 mostra os resultados da previsão do módulo de elasticidade pelos modelos propostos, para o concreto convencional, e os compara com os resultados médios obtidos dos CAA's analisados.

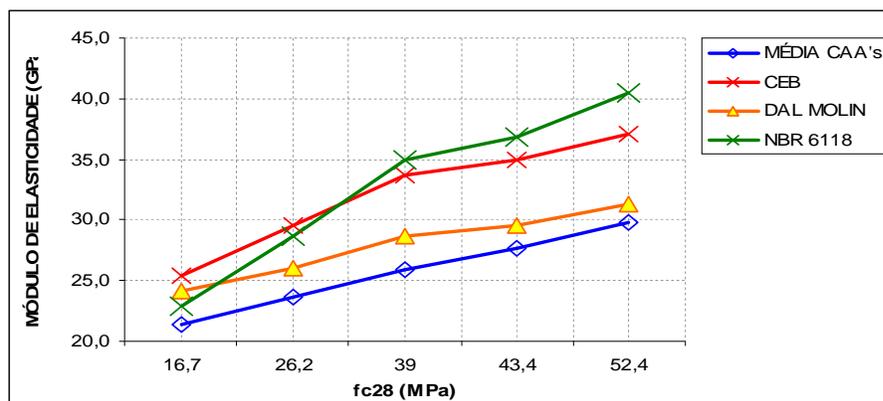


Figura 4.37 - Comparação entre os modelos de previsão de módulo de elasticidade, a partir da resistência média à compressão e os valores médios dos CAA's produzidos.

De acordo com a Figura 4.37 os resultados do modelo proposto por Dal Molin (1995) foram os que mais se aproximaram dos resultados médios obtidos para os CAA's produzidos. O seu comportamento está de acordo com o descrito por Domone (2006), que mostra uma aproximação dos módulos de elasticidade entre concretos convencionais e auto-adensáveis à medida que se aumenta a resistência à compressão de ambos. Os outros modelos apresentaram resultados contrários aos resultados do modelo proposto por Dal Molin (1995), devendo, portanto, serem evitados para este tipo de comparação quando o material em questão for o CAA. A Figura 4.38 mostra o percentual de redução dos módulos de elasticidade entre a média dos CAA's produzidos e um concreto convencional de resistência semelhante.

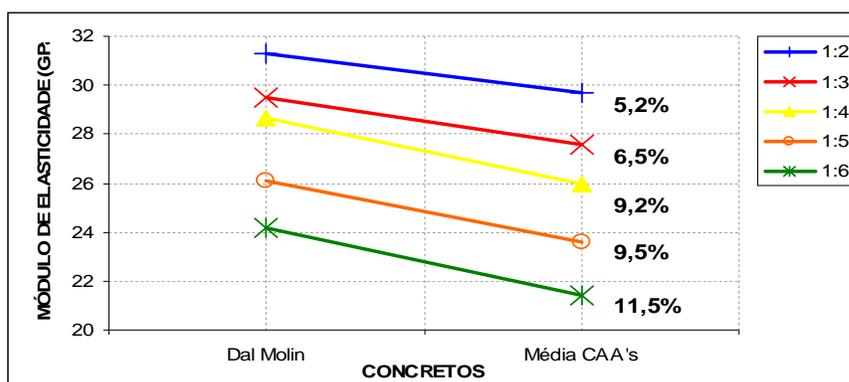


Figura 4.38 – Redução percentual do módulo de elasticidade dos CAA's produzidos.

Portanto, com base na Figura 4.38, houve uma redução média de 8,4% entre os módulos dos CAA's e o concreto referencial usado no modelo de previsão. Porém, segundo Repette (2005), devido ao baixo número de pesquisas sobre este assunto, ainda não é possível fazer uma comparação generalizada a respeito dessa propriedade. Com base nesses resultados faz-se necessário o uso de aferições locais quando do uso deste tipo de concreto em peças sujeitas a deformações, como vigas e lajes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Com a finalização da análise dos resultados experimentais, pode-se concluir que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado com a confecção do concreto auto-adensável (CAA) a partir da utilização dos agregados regionais e com a comprovação da sua eficácia técnica e econômica. Além disso, os objetivos secundários também foram alcançados com a adequação do método de dosagem usado, para as características dos materiais locais, a comparação de custo de produção entre os CAA's e o concreto referencial e a comparação de custo em R\$/MPa entre os CAA's e o mesmo concreto referencial, ambos para 03 três resistências pré-definidas. Também foi possível concluir que:

a) No estado fresco:

- ✓ O CAA 01 (sem adição mineral e sem VMA) foi o que apresentou a melhor relação propriedades no estado fresco/custo por m³, visto que atendeu a todos os ensaios propostos com as menores dosagens de superplastificante e de água e sem a necessidade de adições minerais;
- ✓ O CAA 03 (com adição de metacaulim e sem VMA) necessitou de uma dosagem mais alta de superplastificante, devido à elevada superfície específica do metacaulim, o que influenciou no aumento do custo por m³. Em função da superfície irregular de suas partículas, é mais recomendável, para a produção do CAA, o uso de adições como a cinza volante e a sílica ativa, que possuem superfície esférica, desde que disponíveis e a preços acessíveis;
- ✓ Os CAA's que usaram o VMA apresentaram um ganho de coesão para teores de argamassa menores, o que pode contribuir para a substituição, total ou parcial das adições minerais;

- ✓ Os ensaios que se mostraram mais versáteis, do ponto de vista prático foram: o espalhamento, o espalhamento T_{50cm} e a caixa L, sendo recomendados principalmente para a aceitação do CAA em obra. Entretanto os demais ensaios deverão se realizados em laboratório para o completo entendimento das propriedades deste tipo de concreto;
- ✓ O aumento no teor de argamassa dos CAA's em relação ao concreto referencial confirmou a hipótese de que a areia muito fina pode contribuir para o aumento de coesão neste tipo de mistura. Além disso, o uso do seixo rolado, como agregado graúdo, contribuiu para melhorar as propriedades de fluxo dos concretos dosados devido a sua superfície lisa e esférica.

b) No estado endurecido:

- ✓ A alteração no método de dosagem usado fez reduzir o custo médio dos CAA's em relação ao concreto referencial de 53% para o CAA do estudo piloto, para, aproximadamente, 13% para o CAA avaliado neste trabalho, para uma mesma faixa de resistência;
- ✓ O CAA 01 foi o que obteve, do ponto de vista econômico, os melhores resultados com o menor aumento de custo para 25 e 35 MPa e redução de custo para 45 MPa, em relação ao concreto referencial;
- ✓ O CAA 03 apresentou um custo de produção por m^3 muito próximo do CAA 01, sendo perfeitamente viável, do ponto de vista técnico e econômico, o seu uso em obras que necessitem concretos com características especiais como: baixo calor de hidratação, resistência à penetração de íons cloretos e sulfatos e elevadas resistências mecânicas;
- ✓ Os CAA's 02 e 04 foram os que apresentaram maiores elevações do custo por m^3 em relação ao concreto referencial. Porém, estas elevações não ultrapassaram 20% e, dependendo das necessidades da obra e disponibilidade dos materiais, o seu uso é perfeitamente viável;

- ✓ A medida que a faixa de resistência à compressão aumentou o custo dos CAA's ficou mais próximo do concreto referencial, sendo que no CAA 01 se tornou inferior;
- ✓ Todos os CAA's apresentaram redução do consumo de cimento em relação ao concreto convencional, para as três faixas de resistência usadas;
- ✓ A avaliação do custo em R\$/MPa mostrou que quanto maior for a resistência, mais barato fica para se produzir cada MPa de concreto;
- ✓ A resistência à tração, por compressão diametral e por flexão, de todos os CAA's, foi influenciada da mesma maneira que a resistência à compressão;
- ✓ O comportamento dos modelos de previsão de resistência à tração a partir da resistência à compressão se mostrou semelhante aos resultados de resistência à tração obtidos no programa experimental, principalmente entre os traços 1:3 e 1:5;
- ✓ Conforme já era esperado os valores do módulo de elasticidade de todos os CAA's se mostraram inferiores aos do concreto de referencia. A redução no volume de agregado graúdo foi a principal causa deste comportamento;
- ✓ O comportamento do modelo de previsão do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão, proposto por Dal Molin (1995), mostrou-se semelhante aos resultados de módulo obtidos no programa experimental, para todos os traços avaliados.

De acordo com as observações citadas acima, pode-se concluir que é perfeitamente possível e viável, do ponto de vista técnico e econômico, a produção do CAA com o uso dos agregados encontrados e usados na região de Belém-Pa. Porém faz-se necessário um estudo comparativo dos custos totais envolvidos nos processos de produção, transporte, lançamento e adensamento, entre o CAA e um concreto convencional de mesma faixa de resistência, principalmente na concretagem de peças pré-moldadas ou de estruturas densamente armadas.

5.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Devido ao fato de o estudo do CAA ser relativamente novo e de grande abrangência, alguns pontos que não foram avaliados neste trabalho podem e devem ser estudados em trabalhos futuros, tais como:

- ✓ Avaliação dos custos totais envolvidos em todos os processos construtivos que abrangem uma concretagem, tanto numa fábrica quanto em um ambiente real de obra na cidade de Belém-Pa. Pois somente desta forma é que serão quantificados todos os benefícios que esta “nova” tecnologia pode fornecer ao meio técnico;
- ✓ Avaliação de quanto durável pode ser uma estrutura produzida com o CAA, por meio de ensaios de absorção, penetração de íons cloretos e sulfatos, carbonatação, dentre outros;
- ✓ Uma avaliação mais abrangente de todo o potencial que o aditivo modificador de viscosidade VMA pode alcançar em situações distintas de obra;
- ✓ Avaliação das propriedades do CAA quando estes forem produzidos por meio de outros métodos de dosagem, fazendo uma comparação técnico-econômica com métodos já testados;
- ✓ Quantificação, em situações reais, de quanto o módulo de elasticidade do CAA é inferior ao de um concreto convencional e se esta diferença não interfere negativamente no desempenho da estrutura concretada.

É interessante que todas estas observações experimentais sejam realizadas com os agregados da região para que se tenha uma perfeita compreensão do desempenho do CAA produzidos com os mesmos. Também faz-se necessária a produção do CAA com o uso da brita para comparações de desempenho com o CAA produzido com seixo rolado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 2000.
- ALBUQUERQUE, A.S. Agregados. In: BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção 1**. São Paulo: LCT, 6ª Edição, V.1, p.63-120, 2003.
- ALENCAR, R; HELENE, P. **Concreto auto-adensável de elevada resistência: inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados**. Revista concreto, São Paulo, n. 43, p. 46-52, jun./ago. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. São Paulo, 3ª Edição, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732 - Cimento Portland Comum**, Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 11578 - Cimento Portland Composto**, Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 5733 - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial**, Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 5738 - Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**, Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 5739 - Concreto – Ensaios de Compressão de corpos-de-prova Cilíndricos**, Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **NBR 7222 - Argamassa e Concreto – Determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **NBR 12654 - Controle tecnológico de materiais componentes do concreto**, Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 12655 - Concreto – Preparo, controle e recebimento**, Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR 8953 - Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência**, Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação**, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 7251 - Massa unitária de agregados em estado solto**, Rio de Janeiro, 1982.
- _____. **NBR 7810 - Massa unitária de agregados em estado compactado seco**, Rio de Janeiro, 1983.
- _____. **NBR NM 26 - Agregados - Amostragem**, Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 248 - Agregados – Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52 - Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**, Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 53 - Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**, Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7809 - Índice de forma do agregado graúdo pelo método do paquímetro**, Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR NM 67 - Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio**, Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 6118 – Projeto e execução de obras em concreto armado**, Rio de Janeiro, 2003.

AZEVEDO, M.A. Uso de aditivos no concreto. In: BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção 1**. LCT, 6ª Edição, V.1, p.135-185, 2003.

BARROS, J.A. **Avaliação do efeito de um adjuvante redutor de retracção no betão auto-compactável** - Dissertação de mestrado - Escola Superior de Tecnologia da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2004.

BARTOS, P.J.M. Environmente and ergonomics. In: **Rational production and improved working environment through using self-compacting concrete**. p.1-31, 2000.

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

BERNABEU. Productivity and economy. In: Brite Euran Program: **Rational production and improved working environment through using self-compacting concrete**. p. 1-30, 2000.

CALMON, J.L. et al. **Estudo de finos para a produção de concreto auto-adensável de alta resistência**. 48º Congresso brasileiro do concreto IBRACON, Rio de Janeiro, 2006.

CAVALCANTI, D.J.H. **Contribuição aos estudos das propriedades do concreto auto-adensável visando a sua aplicação em elementos estruturais** - Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CINCOTTO, A. M.; FILHO, J. H.; PILEGGI, R. G. **Técnicas de caracterização reológica de concretos**. Revista concreto, São Paulo, n. 47, p. 108-123, jul./set. 2007.

DAFICO, D.A. **Contribuição ao estudo da dosagem do concreto de cimento Portland** - Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas de concretos de alta resistência com e sem adições de microsilica** – Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

DE LARRARD, F et al. Preliminary HPC mix design study for the Grand Viaduc de Millau. **In: Proc of 4th Int Symp on utilization of high strength/high performance concrete.** Paris, p. 1323-1331, 2006.

DOMONE, P.L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. **In: Sciencedirect, 2006.** Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>.

DOMONE, P.L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **In: Sciencedirect, 2005.** Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>.

DUSSELDORF, W.B. Assessment of the fresh concrete properties of Self-compacting concrete. **In: Sciencedirect, 2004.** Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specifications e guidelines of self-compacting concrete.** In: EFNARC, 2002.

EFNARC. **Guidelines for viscosity modifying admixtures for concrete,** In: EFNARC, 2006.

FURNAS. Concreto – **Determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável utilizando-se o cone de Abrams (Slump flow test) – método de ensaio.** Manual da qualidade, P1-6, 2004.

FURNAS. Concreto – **Determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método Kajima – método de ensaio.** Manual da qualidade, P1-7, 2004.

FURNAS. Concreto – **Determinação das habilidades passantes e de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método da caixa L (L-box test) – método de ensaio.** Manual da qualidade, P1-7, 2004.

FURNAS. Concreto – **Determinação das habilidades passantes e de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método da caixa U (U-box test) – método de ensaio.** Manual da qualidade, P1-7, 2004.

GEYER, A. **Utilização do concreto auto-adensável em estruturas de edifícios com custos inferiores ao concreto convencional.** In: 12^o concurso Falcão Bauer, 2005.

GOMES, P.C.C. et al. **Concreto auto-adensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto.** 45^o Congresso brasileiro do concreto IBRACON, CD-ROM, Vitória, 2003.

GOMES, P.C.C. et al. **Propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável.** 48^o Congresso brasileiro do concreto IBRACON, CD-ROM, Rio de Janeiro, 2006.

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

HELENE, P.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** Brasília: PINI, 1992.

JÚNIOR, G.S.N. e CHAGAS, S.V.M. **Mapeamento dos agregados usados na região metropolitana de Belém na produção do concreto** - Trabalho de conclusão de curso, Universidade federal do Pará, Belém, 2007.

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

KIM, Y.N. et al. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength self-compacting concrete. **In: Sciencedirect, 2003**. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>.

KOSAKA, H. et al. "Flowable" concrete in bridge pier caps. **In: Sciencedirect, 2006**. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>.

LISBÔA, E.M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento de mármore e granito e estudo das propriedades mecânicas** - Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

LOWKE, D. Segregation resistance of self-compacting concrete. **Technical University of Munich, 2004**.

MBT. Master Builders Technology. **Manual Técnico, 2003**.

MEHTA, P.K. Advancements in concrete technology **In: Journal of advanced concrete technology**, p.70-76, 2005.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MELO, K.A. **Contribuição à dosagem do concreto auto-adensável com adição de Fíler calcário**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

NAVARRO, R.F. **Fundamentos da reologia de polímeros**. Caxias do Sul: EDUCS, 1997.

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

NIELSSON, I.; WALLEVIC, O. H. Rheological evaluation of some empirical test methods. **In: International RILEM Symposium on self-compacting concrete**. Paris, p. 59-68, 2003.

OKAMURA, H. **Self-compacting high-performance concrete**. In: Concrete international, Vol. 19, p.50-54, 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. In: Journal of advanced concrete technology, Vol. 1, p.5-15, 2003.

REPETTE, W.L. **Concreto auto-adensável: Mistura plástica**. Revista técnica, São Paulo, n. 125, p. 46-49, ago. 2007.

REPETTE, W.L. Concretos de última geração: presente e futuro. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ed. G.C. Isaia, IBRACON, p.1510-1529, 2005.

RONCERO, J. **Effects of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened: Implications for high performance concrete** – Tese de doutorado, Catalunya, 2002.

ROUSSEL, N. et al. Correlation between L-box test and rheological parameters of homogeneous yield stress fluid. In: **Sciencedirect**, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>.

SESALE, G.R.B. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com cinza de casca de arroz** – Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

SONEBI, M.; BARTOS, P. J. M. Hardened SCC and its bond with concrete. In: **Proc of 1st RILEM Int Symp on self-compacting concrete**. Sweden, p. 275-289, 1999.

SOUZA, P.S.L. **Verificação da influencia da utilização do metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência** – Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SZECSY, R. **Integration and application of self compacting concrete as a technology into other types of performance concrete**. In: Second North America Conference of the design and use of SCC, Chicago, Illinois, 2005.

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

TUTIKIAN, B.F. et al. **Viabilidade técnica e econômica do concreto auto-adensável em empresas de pré-moldados**. Revista concreto, São Paulo, n. 43, p. 30-34, jun./ago. 2006.

TUTIKIAN, B.F. **Proposição de um método de dosagem experimental para o concreto auto-adensável (CAA)** – Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

VELASCO, R. V. et al. **Comportamento reológico e mecânico de concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações de fibras de aço**. 47º Congresso brasileiro do concreto IBRACON, CD-ROM, Recife, 2005.

ZERBINO, R.; BARRAGÁN, B. **Propiedades reológicas del hormigón autocompactable**. Revista concreto, São Paulo, n. 47, p. 61-66, jul./set. 2007.