

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO**

**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DIOGO MALUF GOMES**

**CONCRETO AUTOADENSÁVEL OBTIDO COM MATERIAIS  
DISPONÍVEIS NA REGIÃO DE SÃO LUÍS – MA**

**SÃO LUÍS – MA**

**2013**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO**

**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DIOGO MALUF GOMES**

**CONCRETO AUTOADENSÁVEL OBTIDO COM MATERIAIS DISPONÍVEIS NA  
REGIÃO DE SÃO LUÍS – MA**

**SÃO LUÍS – MA**

**2013**

**DIOGO MALUF GOMES**

**CONCRETO AUTOADENSÁVEL OBTIDO COM MATERIAIS DISPONÍVEIS NA  
REGIÃO DE SÃO LUÍS – MA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

*Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar*

**SÃO LUÍS – MA**

**2013**

Gomes, Diogo Maluf.

Concreto autoadensável obtido com materiais disponíveis na Região de São Luís - MA / Diogo Maluf Gomes.– São Luís, 2013.

189 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2013.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar

1.Concreto autoadensável. 2.Concreto especial. 3.Dosagem de concreto autoadensável. 4.Aditivo superplastificante. 5.Agregados de São Luís - MA.  
I.Título

CDU: 693.542.4(812.1)

**DIOGO MALUF GOMES**

**CONCRETO AUTOADENSÁVEL OBTIDO COM MATERIAIS DISPONÍVEIS NA  
REGIÃO DE SÃO LUÍS – MA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 13 / 08 / 13



---

*Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar (Orientador)*

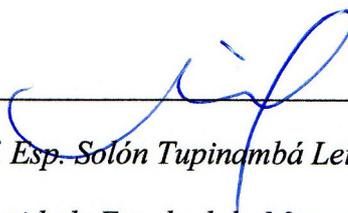
*Universidade Estadual do Maranhão*



---

*Prof.ª MSc. Adriana Oliveira Carvalho*

*Universidade Estadual do Maranhão*



---

*Prof. Esp. Solón Tupinambá Leite*

*Universidade Estadual do Maranhão*

É com prazer que dedico esse trabalho ao meu maravilhoso Deus, **Jeová**  
À minha noiva e companheira para todas as horas, **Yasmine**  
À minha família, **Celso, Elizabeth e Mayara**  
À minha segunda família, **Alan, Ismênia, Yusane e Ylane.**

## AGRADECIMENTOS

A Jeová, meu maravilhoso Deus, por ter me dado a oportunidade de conhecê-lo, também pela vida, felicidade, cuidado e pela família espiritual maravilhosa que me deu.

A Yasmine de Queiroz Bastos, minha noiva e companheira, pelo amor, carinho, cuidado e principalmente por compreender a minha ausência nesses últimos meses.

Minha eterna gratidão aos pais, Sebastião Celso Oliveira Gomes e Elizabeth Jamil Maluf Gomes, pelo amor e educação que me deram durante toda a minha vida.

Aos meus sogros, Francisco Alan Sousa Bastos e Ismênia Maria Teixeira de Queiroz Bastos, pelos sinceros incentivos, conselhos, apoio e confiança em mim depositada.

A minha irmã Mayara Maluf Gomes e as minhas cunhadas Yusane de Queiroz Bastos e Ylane de Queiroz Bastos, pela amizade demonstrada por mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar, pelo cuidadoso trabalho de orientação, valiosos ensinamentos, pela amizade, paciência e por aguçar o meu interesse na área de concreto.

Aos diretores da PhD Engenharia, Prof. Dr. Paulo Helene e ao Eng. Dr. Carlos Britez, pela forma como me acolheram, inúmeras conversas e valiosas dicas.

Ao Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian, que gentilmente me esclareceu alguns pontos para a dosagem do concreto dessa pesquisa.

Aos engenheiros, Mauricio Kaizer (Vale) e Cícero Geraldo de Sá (Odebrecht), pelas conversas e informações fornecidas.

A equipe da empresa Kalfix, especialmente ao Eng. Tarcisio, que acreditou nessa pesquisa, foi um dos primeiros a apoiar esse projeto e contribuiu muito durante toda a sua realização. Aos funcionários do laboratório, Paulo e Luciano, que muito ajudaram na produção do concreto e execução dos ensaios.

A equipe da empresa São Luís Premoldados, especialmente ao Eng. Marcos Vinícios, que possibilitou testar na prática o que foi desenvolvido nessa pesquisa.

A equipe do Laboratório de Solos e Pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), especialmente ao Zé Pequeno, que muito ajudou na caracterização dos materiais utilizados nessa pesquisa.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização dessa pesquisa.

“Queremos mais uma vez prevenir que é uma ilusão pensar ser possível um engenheiro, em seu gabinete de trabalho, munido de régua de cálculo e de ábacos mais ou menos complicados, projetar um traço de concreto como se projeta uma estrutura. É indispensável realizar experiências para cada novo material que aparecer.”

***Prof. Fernando Luiz Lobo Carneiro, Rio de Janeiro, 1953.***

## RESUMO

Neste trabalho foi proposto definir, através de dosagem experimental, um traço de um CAA com a melhor proporção dos materiais encontrados na região de São Luís – MA, de forma a alcançar as suas principais propriedades (fluidez, coesão e resistência à segregação) de maneira econômica. Todos os materiais da região de São Luís – MA, que foram utilizados para a produção do CAA, foram caracterizados rigorosamente e observou-se que os mesmos estavam de acordo com o estabelecido pelas normas técnicas, podendo assim ser usados para a dosagem do CAA. Para avaliar o CAA no estado fresco foram realizados os ensaios de espalhamento e tempo de escoamento, anel J, caixa L, funil V e coluna de segregação e para avaliar o CAA no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água e índice de vazios por imersão e absorção de água por capilaridade. Para todos os ensaios no estado fresco e endurecido, o CAA mostrou-se adequado, além disso, quando comparado com o CCV no estado endurecido, mostrou desempenho superior. Por fim, sem utilizar nenhum tipo de vibração, concretou-se uma peça utilizando o CAA e a mesma apresentou um excelente resultado, quando comparado com o CCV. Portanto, após todo o estudo realizado nessa pesquisa, constatou-se que é possível dosar um CAA, utilizando os materiais da região de São Luís – MA, de forma a se ter um concreto com qualidade e economia.

**Palavras-Chave:** Concreto autoadensável. Concreto especial. Dosagem de concreto autoadensável. Aditivo superplastificante. Agregados de São Luís – MA.

## ABSTRACT

In this work, the aim is to define, by experimental dosage, a recipe of a self-compacting concrete (SCC) with the best ratio made with material found in the region of São Luís – MA, in order to economically achieve its main properties (fluidity, cohesion and resistance to segregation). All materials in the region of São Luís – MA, which were used for the production of conventional concrete (CCV), were thoroughly characterized and it was checked that their properties matched the advice of the technical standards, so they were able to be used for the SCC's recipe. To evaluate SCC in fresh state, spreading and flow time, J ring, L box, V funnel and segregation column tests were carried and to evaluate SCC in the hardened state, compressive strength, resistance to traction by diametrical compression, water absorption and void index by immersion and capillary water absorption tests were performed. For the tests on fresh and hardened state, the SCC was suitable, furthermore, when compared to CCV in hardened state, it showed higher performance. Finally, without the use of any kind of vibration, a structure was built using SCC which showed excellent results, when compared with CCV. So, after all this study, it was found that it is possible to create SCC, using materials from the region of São Luís - MA, in order to obtain a concrete full of quality and economy.

**Keywords:** Self-compacting concrete. Special concrete. Dosage of self-compacting concrete. Superplasticizer. Aggregates of São Luís - MA.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte Akashi-Kaikyo .....	28
Figura 2 – Bloco de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo.....	29
Figura 3 – Detalhe do bloco de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo .....	29
Figura 4 – Burj Khalifa.....	30
Figura 5 – Comparação da altura do Burj Khalifa com os prédios da região.....	30
Figura 6 – Parede de simulação de terremotos .....	31
Figura 7 – Estrutura em forma de iglu concretada com CAA .....	32
Figura 8 – Arcos compostos por cinco peças executadas em CAA .....	32
Figura 9 – Fachada em CAA com detalhes arquitetônicos .....	33
Figura 10 – Paredes do tanque para depósito de metano liquefeito sendo concretadas (“Osaka Gas Company”) .....	34
Figura 11 – Edifício Brookfield Malzoni e a Casa bandeirista dentro do terreno da construção .....	34
Figura 12 – Vigas “T” do edifício Brookfield Malzoni.....	35
Figura 13 – Detalhes da Viga “T” do edifício Brookfield Malzoni .....	35
Figura 14 – Armação da Viga “T” do edifício Brookfield Malzoni.....	36
Figura 15 – Edifício Infinity Tower .....	37
Figura 16 – Vista da sapata central do edifício Infinity Tower .....	38
Figura 17 – Detalhe da armação da sapata central do edifício Infinity Tower.....	38
Figura 18 – Dificuldade de concretagem de um bloco de fundação feito em CCV .....	39
Figura 19 – Museu Iberê Camargo .....	40
Figura 20 – Aspecto do CAA utilizado no museu Iberê Camargo .....	40
Figura 21 – Armação das paredes do Museu Iberê Camargo.....	41
Figura 22 – Detalhe da armação das paredes do Museu Iberê Camargo.....	41
Figura 23 – Concretagem da laje do residencial Pateo São Paulo com utilização do CAA.....	42
Figura 24 – Concretagem de uma laje com o CCV .....	43
Figura 25 – Utilização do CAA em laje do metrô de São Paulo .....	43
Figura 26 – Edifício Parthenon Residence .....	44
Figura 27 – Bloco e Estacas dos Dolphins de atracação do Píer IV .....	46
Figura 28 – Comparação da proporção dos componentes do CAA e CCV .....	47

Figura 29 – Relação entre a forma do agregado miúdo e a resistência ao cisalhamento, onde $\tau$ é a tensão de cisalhamento e $\sigma$ a tensão normal .....	49
Figura 30 – Representação dos mecanismos de bloqueio entre armaduras de elevada densidade .....	50
Figura 31 – Floculação e desfloculação das partículas de cimento, em virtude da ação do superplastificante .....	55
Figura 32 – Dispersão das partículas de cimento por repulsão eletrostática.....	55
Figura 33 – Dispersão das partículas de cimento por repulsão estérica .....	56
Figura 34 – Ação dos aditivos modificadores de viscosidade.....	58
Figura 35 – Comparação do comportamento reológico de alguns tipos de concreto.....	60
Figura 36 – Consequências da variação da viscosidade plástica ( $\eta$ ) no CAA.....	61
Figura 37 – Molde - Cone de Abrams .....	63
Figura 38 – Base do ensaio de espalhamento .....	64
Figura 39 – Vista em perspectiva e em planta do posicionamento do molde .....	65
Figura 40 – Execução do ensaio de espalhamento e do tempo de escoamento.....	66
Figura 41 – Medindo o diâmetro de espalhamento .....	66
Figura 42 – Concreto pouco fluido e apresentando sinais de segregação .....	67
Figura 43 – Concreto muito fluido e com segregação visível .....	67
Figura 44 – Análise do aspecto visual do espalhamento do CAA.....	68
Figura 45 – Anel J .....	71
Figura 46 – Vista em perspectiva do posicionamento do molde e do anel J.....	72
Figura 47 – Vista em planta do posicionamento do molde e do anel J .....	72
Figura 48 – Detalhamento da caixa L.....	75
Figura 49 – Indicação das alturas H1 e H2.....	77
Figura 50 – Concreto com auto grau de segregação.....	78
Figura 51 – Detalhamento do funil V.....	79
Figura 52 – Detalhe da comporta do funil V .....	80
Figura 53 – Execução do ensaio do funil V.....	81
Figura 54 – Coluna de segregação.....	83
Figura 55 – Desenho esquemático da retirada das porções de concreto da coluna de segregação .....	84
Figura 56 – Fill-box.....	87
Figura 57 – U-box.....	87
Figura 58 – Oriment test.....	87

Figura 59 – U-shaped pipe.....	87
Figura 60 – Coluna de Rooney .....	88
Figura 61 – Modelo de um elemento de fundação .....	88
Figura 62 – Mini-slump para o ensaio de espalhamento .....	88
Figura 63 – Modelo reduzido de funil-V para o.....	92
Figura 64 – Resumo das etapas do método de dosagem de Okamura et al. ....	93
Figura 65 – Cone Marsh .....	94
Figura 66 – Resumo das etapas do método de dosagem de Gomes et al .....	95
Figura 67 – Passo-a-passo das etapas do método de dosagem proposto por Tutikian .....	97
Figura 68 – Resumo das etapas do método de dosagem de Repette e Melo .....	98
Figura 69 – Sequência geral de tomada de decisão para o proporcionamento dos materiais e verificação da trabalhabilidade .....	101
Figura 70 – Resumo das etapas do método de dosagem de Tutikian e Dal Molin.....	102
Figura 71 – Cimento Nassau CP IV-32 RS .....	121
Figura 72 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento portland.....	123
Figura 73 – Areia encontrada na região de São Luís – MA .....	123
Figura 74 – Aspecto visual da distribuição granulométrica da areia.....	125
Figura 75 – Determinação da massa unitária da areia .....	126
Figura 76 – Determinação da massa específica da areia .....	127
Figura 77 – Determinação da absorção da areia.....	128
Figura 78 – Determinação do teor de material pulverulento da areia .....	130
Figura 79 – Determinação da qualidade da areia em relação à contaminação com impurezas orgânicas.....	131
Figura 80 – Brita 1 e Brita 0 encontradas na região de São Luís – MA.....	132
Figura 81 – Aspecto visual da distribuição granulométrica da brita 1 .....	134
Figura 82 – Aspecto visual da distribuição granulométrica da brita 0 .....	135
Figura 83 – Determinação do índice de forma da brita 1 e brita 0 .....	136
Figura 84 – Aspecto visual da forma dos grãos da brita 1 e brita 0 .....	137
Figura 85 – Determinação da massa unitária da brita 1 e brita 0 .....	137
Figura 86 – Determinação da massa específica e absorção da brita 1 e brita 0.....	138
Figura 87 – Determinação do teor de material pulverulento da brita 1 e brita 0.....	139
Figura 88 – Determinação da resistência à abrasão da brita 1 e brita 0 .....	140
Figura 89 – Aditivo superplastificante “KALLIT SP” .....	142

Figura 90 – Empacotamento entre a brita 1 e brita 0.....	144
Figura 91 – Empacotamento entre a mistura de brita 1 com brita 0 e a areia fina .....	146
Figura 92 – Determinação do teor de umidade dos materiais .....	149
Figura 93 – Pesagem dos materiais para produção do concreto.....	149
Figura 94 – Mistura dos materiais na betoneira basculante.....	150
Figura 95 – Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone .....	151
Figura 96 – Ensaio de espalhamento e do tempo de escoamento.....	151
Figura 97 – Ensaio do Anel J.....	152
Figura 98 – Ensaio da Caixa L .....	153
Figura 99 – Ensaio do Funil V.....	154
Figura 100 – Ensaio da Coluna de Segregação .....	155
Figura 101 – Moldagem e Cura dos corpos-de-prova .....	155
Figura 102 – Ensaio de resistência à compressão axial.....	156
Figura 103 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	157
Figura 104 – Ensaio da absorção de água e índice de vazios por imersão .....	159
Figura 105 – Ensaio da absorção de água por capilaridade.....	160
Figura 106 – Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone .....	163
Figura 107 – Aspecto do CAA no ensaio de espalhamento e tempo de escoamento.....	164
Figura 108 – Aspecto do CAA no ensaio do Anel J.....	165
Figura 109 – Aspecto do CAA no ensaio da Caixa L .....	166
Figura 110 – Aspecto do CAA no ensaio do Funil V.....	167
Figura 111 – Distribuição da água no interior do CAA e CCV .....	172
Figura 112– Detalhe da seção do poste a ser concretado com o CAA .....	175
Figura 113 – Detalhe da armação do poste a ser concretado com o CAA .....	176
Figura 114 – Misturador de concreto .....	177
Figura 115 – Cabine do misturador para controle da pesagem dos materiais .....	177
Figura 116 – Aspecto do CAA no ensaio de espalhamento .....	178
Figura 117 – Aplicação do CAA no poste.....	179
Figura 118 – Aspecto visual e tipo de adensamento usado para o CCV .....	179
Figura 119 – Poste coberto após concretagem .....	180
Figura 120 – Comparativo do poste feito com CAA e CCV .....	181

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo entre o CCV E CAA na concretagem da laje do residencial Pateo São Paulo .....	42
Quadro 2 – Valores obtidos na concretagem do edifício Parthenon Residence com o CCV ...	45
Quadro 3 – Valores obtidos na concretagem do edifício Parthenon Residence com o CCA ...	45
Quadro 4 – Características e consequências do emprego de adições minerais quimicamente ativas nas propriedades do CA .....	53
Quadro 5 – Ensaio para a avaliação da trabalhabilidade do CAA .....	62
Quadro 6 – Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação (Ensaio de espalhamento).....	69
Quadro 7 – Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação (t500) .....	70
Quadro 8 – Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação (Anel J).....	73
Quadro 9 – Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação (Caixa L) ..	78
Quadro 10 – Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação (Funil V) .....	82
Quadro 11 – Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação (Coluna de Segregação).....	86
Quadro 12 – Possíveis ações corretivas a partir do observado nos ensaios .....	89
Quadro 13 – Determinação da massa unitária compactada da mistura de dois materiais hipotéticos A e B .....	104
Quadro 14 – Determinação da massa específica da mistura dos dois materiais hipotéticos A e B.....	106
Quadro 15 – Determinação do índice de vazios da mistura dos dois materiais hipotéticos A e B.....	107
Quadro 16 – Exemplo de traços unitários do CAA empacotado com diversos materiais.....	110
Quadro 17 – Exemplo do consumo dos materiais através da massa específica do concreto no estado fresco .....	111
Quadro 18 – Exemplo de ensaios necessários para verificação das propriedades do CAA no estado fresco .....	111
Quadro 19 – Exemplo de resultados de algumas propriedades do CAA no estado fresco endurecido .....	113

Quadro 20 – Exemplo de equações de comportamento e coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para os CAA .....	116
Quadro 21 – Comparação entre os métodos nacionais de dosagem do CAA .....	120
Quadro 22 – Caracterização do cimento CP IV-32 RS .....	122
Quadro 23 – Composição granulométrica da areia .....	124
Quadro 24 – Massa unitária solta e compactada da areia.....	126
Quadro 25 – Massa específica da areia .....	128
Quadro 26 – Absorção da areia .....	129
Quadro 27 – Teor de material pulverulento da areia .....	130
Quadro 28 – Composição granulométrica da brita 1 .....	133
Quadro 29 – Composição granulométrica da brita 0.....	134
Quadro 30 – Índice de forma da brita 1 e brita 0.....	136
Quadro 31 – Massa unitária solta e compactada da brita 1 e brita 0 .....	137
Quadro 32 – Massa específica e absorção da brita 1 e brita 0.....	139
Quadro 33 – Teor de material pulverulento da brita 1 e brita 0 .....	140
Quadro 34 – Perda por abrasão da brita 1 e brita 0 .....	141
Quadro 35 – Caracterização do aditivo superplastificante “KALLIT SP” .....	142
Quadro 36 – Caracterização da água de amassamento.....	143
Quadro 37 – Empacotamento entre a brita 1 e brita 0.....	145
Quadro 38 – Empacotamento entre a brita 1, brita 0 e a areia fina .....	146
Quadro 39 – Traço unitário do CAA e CCV .....	148
Quadro 40 – Consumo de materiais para o CAA e CCV .....	148
Quadro 41 – Resultado do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone .....	162
Quadro 42 – Resultados do ensaio de espalhamento e tempo de escoamento .....	163
Quadro 43 – Resultados do ensaio do anel.....	164
Quadro 44 – Resultados do ensaio da Caixa L .....	165
Quadro 45 – Resultados do ensaio do Funil V .....	166
Quadro 46 – Resultado do ensaio da Coluna de Segregação .....	167
Quadro 47 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial do CAA e CCV .....	168
Quadro 48 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral do CAA e CCV .....	169
Quadro 49 – Resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios por imersão do CAA e CCV.....	170
Quadro 50 – Resultados do ensaio da absorção de água por capilaridade do CAA e CCV ...	171

Quadro 51 – Custo unitário do CAA e CCV .....	173
---	-----

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Exemplo de diagrama de dosagem com $\alpha$ variando .....	117
Gráfico 2 – Exemplo de diagrama de desempenho .....	119
Gráfico 3 – Curva granulométrica da areia .....	124
Gráfico 4 – Curva granulométrica da brita 1 .....	133
Gráfico 5 – Curva granulométrica da brita 0 .....	135
Gráfico 6 – Comportamento dos vazios do pacote granular da brita 1 com a brita 0 .....	145
Gráfico 7 – Comportamento dos vazios do pacote granular da brita 1 e brita 0 com a areia fina .....	147
Gráfico 8 – Comparativo dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial do CAA E CCV .....	168
Gráfico 9 – Comparativo dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral do CAA E CCV .....	169
Gráfico 10– Comparativo dos resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios por imersão do CAA e CCV .....	170
Gráfico 11 – Comparativo dos resultados do ensaio da absorção de água por capilaridade do CAA e CCV .....	171
Gráfico 12 – Comparativo do custo unitário do CAA e CCV .....	173

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	22
1.1	IMPORTÂNCIA DA PESQUISA .....	22
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	23
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	23
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	23
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA .....	23
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA (CAA)</b> .....	25
2.1	HISTÓRICO .....	25
2.2	DEFINIÇÃO .....	26
2.3	VANTAGENS .....	26
2.4	UTILIZAÇÃO .....	28
<b>2.4.1</b>	<b>Mundo</b> .....	28
2.4.1.1	<i>Ponte Akashi-Kaikyo (Japão)</i> .....	28
2.4.1.2	<i>Burj Khalifa (Dubai)</i> .....	30
2.4.1.3	<i>Paredes resistentes a terremotos (Estados Unidos)</i> .....	31
2.4.1.4	<i>Estrutura em forma de 'Iglu'</i> .....	31
2.4.1.5	<i>Arcos</i> .....	32
2.4.1.6	<i>Fachada do Teatro Nacional (Holanda)</i> .....	33
2.4.1.7	<i>Paredes do tanque para depósito de metano liquefeito "Osaka Gas Company"</i> .....	33
<b>2.4.2</b>	<b>Brasil</b> .....	34
2.4.2.1	<i>Vigas "T" do edifício Brookfield Malzoni (São Paulo)</i> .....	34
2.4.2.2	<i>Sapata central do edifício Infinity Tower (São Paulo)</i> .....	37
2.4.2.3	<i>Museu Iberê Camargo (Porto Alegre – Rio Grande do Sul)</i> .....	40
2.4.2.4	<i>Edifício Pateo São Paulo</i> .....	42
2.4.2.5	<i>Metrô (São Paulo)</i> .....	43

2.4.2.6	<i>Edifício Parthenon Residence (Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul)</i> .....	44
<b>2.4.3</b>	<b>São Luís – MA</b> .....	45
2.5	MATERIAIS CONSTITUINTES .....	47
<b>2.5.1</b>	<b>Cimento</b> .....	47
<b>2.5.2</b>	<b>Agregados</b> .....	48
2.5.2.1	<i>Agregados miúdos</i> .....	48
2.5.2.2	<i>Agregados graúdos</i> .....	49
<b>2.5.3</b>	<b>Adições minerais</b> .....	51
2.5.3.1	<i>Sem atividade química</i> .....	51
2.5.3.2	<i>Quimicamente ativas</i> .....	52
<b>2.5.4</b>	<b>Aditivos</b> .....	54
2.5.4.1	<i>Plastificantes e superplastificantes</i> .....	54
2.5.4.2	<i>Modificadores de viscosidade</i> .....	58
<b>2.5.5</b>	<b>Água de amassamento</b> .....	59
2.6	CAA NO ESTADO FRESCO .....	60
<b>2.6.1</b>	<b>Reologia</b> .....	60
<b>2.6.2</b>	<b>Ensaio para controle da trabalhabilidade</b> .....	61
2.6.2.1	<i>Ensaio de espalhamento e tempo de escoamento (slump flow test e slump flow t500)</i> .....	62
<u>2.6.2.1.1</u>	<u>PRINCÍPIO DO ENSAIO</u> .....	62
<u>2.6.2.1.2</u>	<u>Equipamentos</u> .....	62
<u>2.6.2.1.3</u>	<u>Execução do ensaio</u> .....	64
<u>2.6.2.1.4</u>	<u>Resultados e Conclusões</u> .....	66
2.6.2.2	<i>Anel J</i> .....	70
<u>2.6.2.2.1</u>	<u>Princípio do ensaio</u> .....	70
<u>2.6.2.2.2</u>	<u>Equipamentos</u> .....	71
<u>2.6.2.2.3</u>	<u>Execução do ensaio</u> .....	72

2.6.2.2.4 <u>Resultados e Conclusões</u> .....	73
2.6.2.3 <i>Caixa L</i> .....	74
2.6.2.3.1 <u>Princípio do ensaio</u> .....	74
2.6.2.3.2 <u>Equipamentos</u> .....	74
2.6.2.3.3 <u>Execução do ensaio</u> .....	76
2.6.2.3.4 <u>Resultados e Conclusões</u> .....	76
2.6.2.4 <i>Funil V</i> .....	79
2.6.2.4.1 <u>Princípio do ensaio</u> .....	79
2.6.2.4.2 <u>Equipamentos</u> .....	79
2.6.2.4.3 <u>Execução do ensaio</u> .....	80
2.6.2.4.4 <u>Resultados e Conclusões</u> .....	81
2.6.2.5 <i>Coluna de Segregação</i> .....	83
2.6.2.5.1 <u>Princípio do ensaio</u> .....	83
2.6.2.5.2 <u>Equipamentos</u> .....	83
2.6.2.5.3 <u>Execução do ensaio</u> .....	84
2.6.2.5.4 <u>RESULTADOS E CONCLUSÕES</u> .....	85
2.6.2.5 Outros equipamentos.....	86
<b>2.6.3 Procedimentos para ajustar os resultados dos ensaios no estado fresco</b> .....	<b>89</b>
2.7 CAA NO ESTADO ENDURECIDO.....	90
2.8 MÉTODOS DE DOSAGEM.....	91
<b>2.8.1 Método de Okamura et al. (1995)</b> .....	<b>92</b>
<b>2.8.2 Método de Gomes et al. (2002)</b> .....	<b>94</b>
<b>2.8.3 Método de Tutikian (2004)</b> .....	<b>96</b>
<b>2.8.4 Método de Repette e Melo (2005)</b> .....	<b>98</b>
<b>2.8.5 Método de Alencar e Helene (2008)</b> .....	<b>99</b>
<b>2.8.6 Método de Tutikian e Dal Molin (2007)</b> .....	<b>102</b>
2.8.6.1 <i>Passo 1 – Escolha dos materiais</i> .....	103

2.8.6.2	<i>Passo 2 – Determinação do esqueleto granular</i> .....	103
2.8.6.3	<i>Passo 3 – Determinação da relação água/cimento ou teor do aditivo superplastificante</i> .....	108
2.8.6.4	<i>Passo 4 – Mistura dos traços rico, intermediário e pobre</i> .....	109
2.8.6.5	<i>Passo 5 – Ensaio das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades determinadas</i> .....	112
2.8.6.6	<i>Passo 6 – Desempenho dos diagramas de dosagem e desempenho</i> .....	113
<b>2.8.7</b>	<b>Cmparação entre os métodos nacionais de dosagem do CAA</b> .....	119
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DISPONÍVEIS EM SÃO LUÍS - MA</b> .....	121
3.1	<b>CIMENTO</b> .....	121
3.2	<b>AGREGADOS</b> .....	123
<b>3.2.1</b>	<b>Agregado miúdo</b> .....	123
3.2.1.1	<i>Origem</i> .....	123
3.2.1.2	<i>Composição Granulométrica</i> .....	124
3.2.1.3	<i>Massa unitária solta e compactada</i> .....	125
3.2.1.4	<i>Massa específica</i> .....	127
3.2.1.5	<i>Absorção</i> .....	128
3.2.1.6	<i>Teor de material pulverulento</i> .....	129
3.2.1.7	<i>Impurezas orgânicas</i> .....	131
3.2.1.8	<i>Teor de argila em torrões e materiais friáveis</i> .....	132
<b>3.2.2</b>	<b>Agregado graúdo</b> .....	132
3.2.2.1	<i>Origem</i> .....	132
3.2.2.2	<i>Composição Granulométrica</i> .....	132
3.2.2.3	<i>Índice de forma</i> .....	135
3.2.2.4	<i>Massa unitária solta e compactada</i> .....	137
3.2.2.5	<i>Massa específica e Absorção</i> .....	138
3.2.2.6	<i>Teor de material pulverulento</i> .....	139

3.2.2.7	<i>Resistência à abrasão</i> .....	140
3.2.2.8	<i>Teor de argila em torrões e materiais friáveis</i> .....	141
3.4	ÁGUA DE AMASSAMENTO .....	143
<b>4</b>	<b>DOSAGEM EXPERIMENTAL (CAA)</b> .....	<b>144</b>
4.1	DEFINIÇÃO DO TRAÇO .....	144
<b>4.1.1</b>	<b>Esqueleto granular</b> .....	<b>144</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Parâmetros fixados</b> .....	<b>147</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Traço unitário e Consumo de materiais</b> .....	<b>148</b>
4.2	PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	148
4.3	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	150
<b>4.3.1</b>	<b>CCV</b> .....	<b>150</b>
4.3.1.1	<i>Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone</i> .....	150
<b>4.3.2</b>	<b>CAA</b> .....	<b>151</b>
4.3.2.1	<i>Ensaio de espalhamento e tempo de escoamento (slump flow test e slump flow t500)</i> .....	151
4.3.2.2	<i>Ensaio do Anel J</i> .....	152
4.3.2.3	<i>Ensaio da Caixa L</i> .....	152
4.3.2.4	<i>Ensaio do Funil V</i> .....	153
4.3.2.5	<i>Ensaio da Coluna de Segregação</i> .....	154
4.4	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	155
<b>4.4.1</b>	<b>Ensaio de resistência à compressão axial</b> .....	<b>156</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral</b> .....	<b>157</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Ensaio da absorção de água e índice de vazios por imersão</b> .....	<b>158</b>
<b>4.4.4</b>	<b>Ensaio da absorção de água por capilaridade</b> .....	<b>159</b>
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>162</b>
5.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	162

<b>5.1.1</b>	<b>CCV</b> .....	162
5.1.1.1	<i>Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone</i> .....	162
<b>5.1.2</b>	<b>CAA</b> .....	163
5.1.2.1	<i>Ensaio de espalhamento e tempo de escoamento (slump flow test e slump flow t500)</i> .....	163
5.1.2.2	<i>Ensaio do Anel J</i> .....	164
5.1.2.3	<i>Ensaio da Caixa L</i> .....	165
5.1.2.4	<i>Ensaio do Funil V</i> .....	166
5.1.2.5	<i>Ensaio da Coluna de Segregação</i> .....	167
5.2	<b>RESULTADOS DOS ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO</b> .....	168
<b>5.2.1</b>	<b>Ensaio de resistência à compressão axial</b> .....	168
<b>5.2.2</b>	<b>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral</b> .....	169
<b>5.2.3</b>	<b>Ensaio da absorção de água e índice de vazios por imersão</b> .....	170
<b>5.2.4</b>	<b>Ensaio da absorção de água por capilaridade</b> .....	171
5.3	<b>CUSTO UNITÁRIO DO CONCRETO</b> .....	173
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	175
6.1	<b>ESCOLHA DA PEÇA A SER CONCRETADA COM O CAA</b> .....	175
6.2	<b>PRODUÇÃO DO CAA</b> .....	176
6.3	<b>ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO CAA</b> .....	178
6.4	<b>APLICAÇÃO DO CAA</b> .....	178
6.5	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	180
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	182
7.1	<b>CONCLUSÕES</b> .....	182
7.2	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b> .....	183
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	185

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

O concreto é o material construtivo mais utilizado no mundo. Podemos encontrá-lo em casas de alvenaria, em rodovias, em pontes, em edifícios, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento, etc.

O mercado e as técnicas construtivas exigem concretos que apresentem características especiais e dentro desse contexto, foi desenvolvido no Japão, em 1988, o concreto autoadensável (CAA), que é capaz de se moldar nas fôrmas por conta própria e preencher, sem necessidade nenhuma de vibração ou compactação externa de qualquer natureza, os espaços destinados a ele.

Sendo considerado por muitos autores a mais revolucionária técnica da construção de estruturas em concreto das últimas décadas e considerado em São Luís (MA) como uma nova tecnologia em concreto, o concreto autoadensável proporciona inúmeras vantagens quando comparado ao concreto convencional. Devido à alta trabalhabilidade que possui, o concreto autoadensável não necessita de qualquer tipo de vibração, oferece excelente acabamento, bombeamento a grandes distâncias com maior velocidade, otimização e redução de mão-de-obra, mais rapidez na execução da obra, melhores condições de segurança, eliminação de ruídos causados pelo vibrador, redução nas atividades de espalhamento, concretagens possíveis mesmo em estruturas densamente armadas, maior durabilidade (redução das falhas de concretagem), etc.

Diante do exposto acima, as muitas vantagens obtidas com a utilização do CAA e a inexistência de estudos sobre esse tipo de concreto em São Luís, mostra a importância desta pesquisa.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.2.1 Objetivo geral

Definir, através de dosagem experimental, um traço de concreto autoadensável com a melhor proporção dos materiais encontrados na região de São Luís, de forma a alcançar as suas principais propriedades (fluidez, coesão e resistência à segregação) de maneira econômica.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Apontar os cuidados necessários para a obtenção do CAA com segurança, desempenho e economia;
- Determinar os melhores agregados graúdos e miúdos, analisar se estão adequados e definir a melhor proporção entre eles, de modo que resulte em melhorias na trabalhabilidade do CAA;
- Determinar os aditivos e/ou adições necessárias para se obter o CAA;
- Avaliar os ensaios necessários para à análise da trabalhabilidade, coesão e resistência à segregação do CAA;
- Concretar uma peça para analisar o desempenho do CAA.

## 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O capítulo 1, Introdução, apresenta a introdução à pesquisa, destacando a importância do tema e, conseqüentemente, a justificativa para o seu desenvolvimento. O objetivo geral e os objetivos específicos também são descritos neste capítulo.

O capítulo 2, Fundamentação Teórica (CAA), apresentada a definição, o histórico, vantagem e a utilização do CAA. Também é apresentado um estudo de todos os materiais

constituintes e os ensaios recomendado para o CAA no estado fresco e endurecido. Por último, são apresentados os vários métodos de dosagem para o CAA.

O capítulo 3, Caracterização dos Materiais Disponíveis em São Luís – MA, apresentada toda a caracterização dos materiais utilizados para a realização dessa pesquisa, os quais foram provenientes de São Luís - MA.

O capítulo 4, Dosagem Experimental (CAA), apresentada todo o processo da dosagem, produção e avaliação do concreto no estado fresco e endurecido.

O capítulo 5, Apresentação e Análise dos Resultados, apresentam todos os resultados obtidos nos ensaios do concreto no ensaio fresco e endurecido, comparação dos resultados entre o CAA e o concreto convencional (CCV) e superficialmente é feita também uma análise de custo entre eles.

O capítulo 6, Estudo de Caso, apresenta uma concretagem de uma peça utilizando o CAA dosado no capítulo 4 e os resultados obtidos.

O capítulo 7, Considerações Finais, apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados gerados nessa pesquisa, bem como sugestões para futuros trabalhos.

# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA (CAA)

---

### 2.1 HISTÓRICO

Por vários anos, desde 1983, o problema de durabilidade de estruturas de concreto foi o principal tópico de interesse no Japão. Uma estrutura durável exige uma compactação adequada por operários especializados. Contudo, equipamentos e profissionais especializados estavam em falta na indústria da construção japonesa, o que acarretou na diminuição da qualidade dos serviços (OKAMURA E OUCHI, 2003).

O CAA, inicialmente desenvolvido no Japão pelo professor Hajime Okamura na década de 1980, surgiu da necessidade de obter estruturas mais duráveis, com economia e menor tempo de execução, tendo em vista a ausência da necessidade do adensamento mecânico do concreto. O CAA foi desenvolvido na Universidade de Tóquio, no Japão, em 1986, com o seu primeiro protótipo obtido em 1988 (GOMES E BARROS, 2009).

Os elementos estruturais no Japão são projetados com formas muito complexas e com altas taxas de armadura, pois precisam resistir ao máximo os abalos sísmicos do país. A necessidade de um adensamento adequado para garantir a qualidade e resistência do elemento projetado fez do CAA uma necessidade.

Em meados da década de 1990, o CAA surge também na Europa, mais precisamente na Suécia, não demorando muito para uma aceitação rápida do mercado europeu e internacional. Atualmente, o interesse dos profissionais pelo CAA tem crescido em todo o mundo. Na América do Sul, especificamente no Brasil, as pesquisas vêm crescendo a cada dia e a quantidade de obras que utilizam o CAA aumentam a cada ano.

## 2.2 DEFINIÇÃO

Um concreto só pode ser definido como autoadensável se três propriedades forem alcançadas simultaneamente: fluidez, habilidade passante e resistência à segregação (EFNARC, 2002).

Fluidez é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços. Habilidade passante é a propriedade que caracteriza a capacidade da mistura de escoar pela fôrma, passando por entre as armaduras de aço sem obstrução do fluxo ou segregação. A resistência à segregação é a propriedade que define a capacidade do CAA de se manter coeso ao fluir dentro das fôrmas, passando ou não por obstáculos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), a habilidade do concreto fresco, seja um CAA ou não, de preencher as fôrmas sem o surgimento de bolhas de ar ou falhas de concretagem, é um dos principais fatores que influenciam na qualidade final do concreto endurecido. O CAA não pode depender de vibração externa para cumprir seu papel. O uso de vibradores de imersão, régua vibratórias ou qualquer outra forma de compactação é estritamente proibido em um CAA. O único meio que esse tipo de concreto usa para se adensar é o seu próprio peso, ou seja, a ação da força da gravidade em sua massa.

Um cuidado especial deve ser tomado em relação à propriedade de resistência à segregação. O CAA, ao ‘caminhar’ sobre as fôrmas envolvendo obstáculos (eletrodutos, barras de aço, e outros), não deve segregar, ou seja, ter o agregado graúdo separado da argamassa. Pode acontecer de uma mistura estar aparentemente coesa, mas ao ser lançada nas fôrmas apresentar segregação. Por isso, os CAA devem ser testados previamente por meio de equipamentos que simulem as condições reais.

## 2.3 VANTAGENS

O CAA é descrito como uma das grandes revoluções ocorridas na tecnologia do concreto para a construção nas últimas décadas, a sua utilização torna possível obter vários ganhos diretos e indiretos.

Tutikian e Dal Molin (2008), além de muitos outros autores, citam algumas vantagens do CAA:

- Acelera a construção, pois há uma redução no tempo de concretagem devido ao seu rápido lançamento e ausência de adensamento;
- Reduz a mão-de-obra no canteiro, pois o uso de vibradores é eliminado e as propriedades do CAA facilitam o seu espalhamento e nivelamento;
- Melhora o acabamento final da peça concretada;
- Pode aumentar a durabilidade da estrutura por ser mais fácil de adensar e evita, assim, que ocorram falhas de concretagem e grandes vazios resultantes da má vibração;
- Permite grande liberdade de formas e dimensões; o CAA pode ser aplicado em fôrmas curvas, esbeltas, com altas taxas de armaduras e de difícil acesso;
- Permite concretagens em peças de seções reduzidas;
- Elimina o barulho de vibração, o que é ideal em grandes centros urbanos, concretagens noturnas ou obras pertos de escolas e hospitais;
- Torna o local de trabalho mais seguro, pois há uma diminuição do número de trabalhadores envolvidos com a concretagem;
- Pode reduzir o custo final do concreto e/ou da estrutura caso sejam computados economicamente todos os ganhos citados acima.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), o CAA por possuir uma grande deformabilidade no estado fresco, pode ser moldado facilmente nas mais diversas formas sob a ação da gravidade. Tal propriedade permite que o CAA percorra até dez metros de distância horizontal, mesmo com obstáculos no caminho.

A união da resistência à segregação e fluidez, duas propriedades características do CAA, permite a eliminação de macro defeitos, bolhas de ar e falhas de concretagem, que por sua vez são responsáveis diretos por perdas de desempenho mecânico do concreto e durabilidade da estrutura.

A possibilidade da eliminação da vibração, além de gerar uma economia de energia elétrica e mão-de-obra, a vibração produz ruído e pode causar doenças nos operários. Através de um estudo experimental, foi concluído que o ruído captado por trabalhadores e pelo entorno da edificação quando utilizado o CAA, é de aproximadamente um décimo do ruído – em decibéis – comparado ao recebido quando o concreto convencional (CCV) é utilizado (BARTOS; SÖDERLIND, 2000 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). A vibração também causa um forte desgaste e pressão nas fôrmas, que se não tiverem bem presas podem ceder, algo que o CAA elimina completamente.

## 2.4 UTILIZAÇÃO

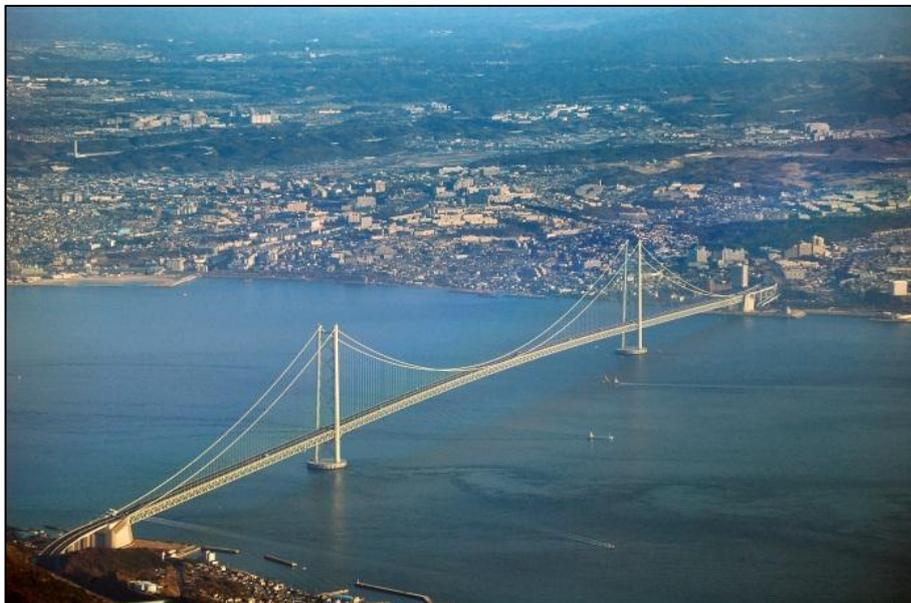
O CAA pode ser utilizado de várias formas, tanto moldado “in loco” como na indústria de pré-moldados, pode ser dosado no canteiro-de-obras ou em centrais de concreto e depois transportado por meio de caminhão-betoneira para as construções. Também pode ser lançado com bombas de concreto, guias ou simplesmente espalhado. Portanto, o CAA é tão versátil quanto o CCV (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). A seguir serão apresentadas algumas obras em que o CAA foi utilizado.

### 2.4.1 Mundo

#### 2.4.1.1 Ponte Akashi-Kaikyo (Japão)

A ponte suspensa Akashi-Kaikyo (Figura 1), inaugurada em abril de 1998, teve suas duas ancoragens concretadas com o CAA (Figuras 2 e 3). Essa ponte tinha, na época, o maior vão do mundo (1991 m), e foram lançados 290.000 m<sup>3</sup> de CAA. O concreto foi misturado em um local perto da construção e bombeado em tubos com 200 m de comprimento até o local da aplicação. A utilização do CAA proporcionou uma economia de tempo da ordem de 20%, e a obra foi executada em 2 anos em vez dos 2,5 anos previstos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 1 – Ponte Akashi-Kaikyo



Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Akashi\\_Bridge.JPG](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Akashi_Bridge.JPG)

Figura 2 – Bloco de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo



Fonte: Nunes (2001)

Figura 3 – Detalhe do bloco de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo



Fonte: Okamura; Ouchi (2003)

#### 2.4.1.2 Burj Khalifa (Dubai)

O Burj Khalifa é atualmente a estrutura mais alta feita pelo homem, com 829,84 metros, ele foi inaugurado em 04 de janeiro de 2010. Um dos motivos para se utilizar o CAA nessa obra foi à distância de bombeamento, o CAA utilizado chegou a ser bombeado a aproximadamente 600 m de altura sem estações intermediárias, coisa que com o concreto convencional seria difícil. As Figuras 4 e 5 ilustram o que foi comentado acima.

Figura 4 – Burj Khalifa



Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Burj\\_Khalifa\\_building.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Burj_Khalifa_building.jpg)

Figura 5 – Comparação da altura do Burj Khalifa com os prédios da região



Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Burj\\_dubai\\_3.11.08.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Burj_dubai_3.11.08.jpg)

#### 2.4.1.3 Paredes resistentes a terremotos (Estados Unidos)

A Universidade local, na cidade de Illinois nos Estados Unidos, desenvolveu um projeto que consiste em uma parede densamente armada em forma de “L”, que seria indestrutível para simulação de diversos terremotos com diferentes amplitudes (Figura 6). A estrutura possuía vários tubos horizontais para futuras medições e os mesmos não poderiam se mover, portanto, o uso da vibração foi descartado. Utilizou-se o CAA e depois da desfôrma, observou-se que a parede não necessitava de reparos e que os tubos não haviam sido danificados (GRACE, 2005 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 6 – Parede de simulação de terremotos

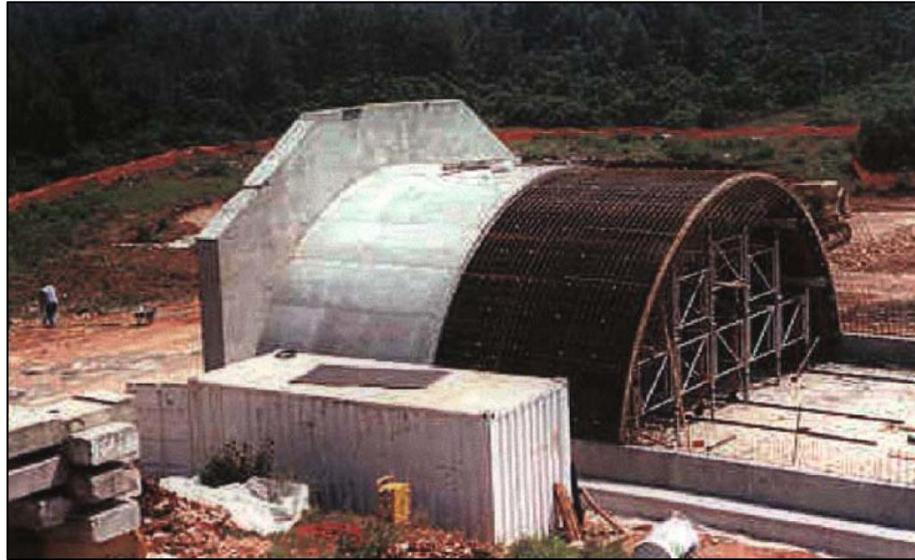


Fonte: Grace (2005) apud Tutikian; Dal Molin (2008)

#### 2.4.1.4 Estrutura em forma de ‘Iglu’

A figura 7 mostra a construção de uma estrutura em forma de ‘iglu’ que possui 5 m de altura, 11,70 m de largura e 22 m de comprimento. Por conta da dificuldade de vibração imposta pelas suas formas, decidiu-se pela utilização do CAA (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 7 – Estrutura em forma de iglu concretada com CAA



Fonte: Bernabeu; Laborde (2000) apud Tutikian; Dal Molin (2008)

#### 2.4.1.5 Arcos

A Figura 8 mostra uma série de arcos que foram executados com o CAA. Esses arcos são compostos por cinco peças de 13 metros, totalizando 65 metros de comprimento. A sua seção transversal é em forma de caixa vazada, que era movida com a vibração quando se utilizava o CCV. Por isso, o sistema de concretagem foi alterado para o CAA, que ainda proporcionou outras vantagens como redução do barulho de vibração e do número de trabalhadores em 50% (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 8 – Arcos compostos por cinco peças executadas em CAA



Fonte: Walraven (2005) apud Tutikian; Dal Molin (2008)

#### 2.4.1.6 Fachada do Teatro Nacional (Holanda)

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), a fachada do Teatro Nacional no Hague foi o primeiro exemplo de aplicação em obras convencionais do CAA na Holanda. Por razões estéticas, essa fachada possuía uma série de estreitas janelas, com lados de 8 cm (Figura 9). O CAA utilizado para preencher todos os espaços – sem segregação dos agregados graúdos – foi com elevada fluidez (diâmetro de espalhamento do slump flow test de 730 mm) e baixa viscosidade (baixo tempo de escoamento do Funil V).

Figura 9 – Fachada em CAA com detalhes arquitetônicos



Fonte: Walraven (2005) apud Tutikian (2007)

#### 2.4.1.7 Paredes do tanque para depósito de metano liquefeito “Osaka Gas Company”

Nas paredes do tanque de metano liquefeito (Figura 10), pertencente à Osaka Gas Company, foram utilizados 12.000 m<sup>3</sup> de CAA de 60 MPa. A utilização do CAA permitiu: diminuir o número de etapas de 14 para 10, porque permitiu aumentar a altura das paredes; reduzir o número de trabalhadores de 150 para 50; diminuir o tempo de construção da estrutura de 22 para 18 meses (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 10 – Paredes do tanque para depósito de metano liquefeito sendo concretadas (“Osaka Gas Company”)



Fonte: Nunes (2001)

## 2.4.2 Brasil

### 2.4.2.1 Vigas “T” do edifício Brookfield Malzoni (São Paulo)

O edifício Brookfield Malzoni está localizado em uma das principais avenidas de São Paulo, a Brigadeiro Faria Lima, um grande desafio para a execução dessa obra foi: preservar uma casa bandeirista autêntica (tombada em 1982 e que preserva o estilo de vida dos primeiros paulistas), sem interferir em sua estrutura ou em sua vista da avenida. A Figura 11 ilustra muito bem o que foi citado acima.

Figura 11 – Edifício Brookfield Malzoni e a Casa bandeirista dentro do terreno da construção



Fonte: Técnica (2012)

A solução desenvolvida para o Brookfield Malzoni foi construir um dos blocos a 30 m de altura, com 4 vigas protendidas de 44,4 m de comprimento cada uma e que tinha como objetivo vencer o vão e sustentar 12 andares (Figura 12). As vigas têm 700 m<sup>3</sup> de concreto cada, sustentadas por oito pilares com 30 m de altura acima do nível do solo. As vigas são em formato "T", e possuem 6 m de altura. As duas vigas mais extremas têm 6 m de largura no banzo superior e 2 m na parte inferior e as duas vigas centrais, que recebem mais carga, têm 5,5 m de largura no banzo superior e 2,5 m na parte inferior. (Figura 13).

Figura 12 – Vigas “T” do edifício Brookfield Malzoni



Fonte: [http://www.revistatechne.com.br/engenharia\\_civil/179/extras/Protegendo\\_patrimonios\\_culturais.ppt](http://www.revistatechne.com.br/engenharia_civil/179/extras/Protegendo_patrimonios_culturais.ppt)

Figura 13 – Detalhes da Viga “T” do edifício Brookfield Malzoni



Fone: <http://www.concretophd.com.br/projetos.asp?codigo=28>

O CAA foi utilizado em cada uma dessas vigas, pois elas são densamente armadas e seria muito difícil vibrar esse concreto (Figuras 14). A resistência especificada para o CAA

foi de 50 MPa e no traço foi especificado a substituição de toda a água por gelo, para diminuir o calor de hidratação e evitar assim patologias indesejáveis. Foi exigido também um rigoroso controle sobre a resistência, trabalhabilidade e temperatura desse concreto desde a usina até a sua aplicação. Cada viga recebeu todo o concreto de uma só vez, em um processo que durava cerca de 36 horas para cada uma, contando com duas bombas que tinham suas tubulações derivadas em quatro pontos, de forma simétrica, bombeando por igual (Téchne, 2012).

Figura 14 – Armação da Viga “T” do edifício Brookfield Malzoni



#### 2.4.2.2 Sapata central do edifício Infinity Tower (São Paulo)

O edifício Infinity Tower está situado no Itaim Bibi, São Paulo capital (Figura 15). O Infinity Tower tem 28 lajes e é composto por cinco subsolos, térreo, dois mezaninos técnicos e 18 pavimentos com pé-direito de 4,68 m e área média de 2.200 m<sup>2</sup>.

Figura 15 – Edifício Infinity Tower



Fonte: <http://www.metodo.com.br/empreendimentos/218/Infinity-Tower.aspx>

Os doze pilares que compõe o núcleo central de rigidez do edifício estão apoiados em uma única sapata com forma diferenciada, não retangular. A sapata central é uma composição de dois trapézios, de dimensões médias de 17 m x 40 m. A área total da sapata é de 750 m<sup>2</sup>, com 120 cm de altura numa faixa próxima as extremidades e de 240 cm na área restante. O volume total de CAA foi de 1500 m<sup>3</sup> e consumiu um total de 135 toneladas de aço, dando um consumo de 90 kg/m<sup>3</sup> de concreto. As Figuras 16 e 17 ilustram muito bem o citado acima.

Figura 16 – Vista da sapata central do edifício Infinity Tower



Fonte: <http://www.concretophd.com.br/projetos.asp?codigo=27>

Figura 17 – Detalhe da armação da sapata central do edifício Infinity Tower



Fonte: <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/179/extras/extra.pdf>

Observa-se que a alta taxa de armadura foi o fator principal que motivou a utilização do CAA. Como exemplo, a Figura 18 mostra um caso de um bloco de fundação que tinha uma alta taxa de armadura e que foi utilizado o CCV. Observa-se uma extrema dificuldade de concretagem.

Figura 18 – Dificuldade de concretagem de um bloco de fundação feito em CCV



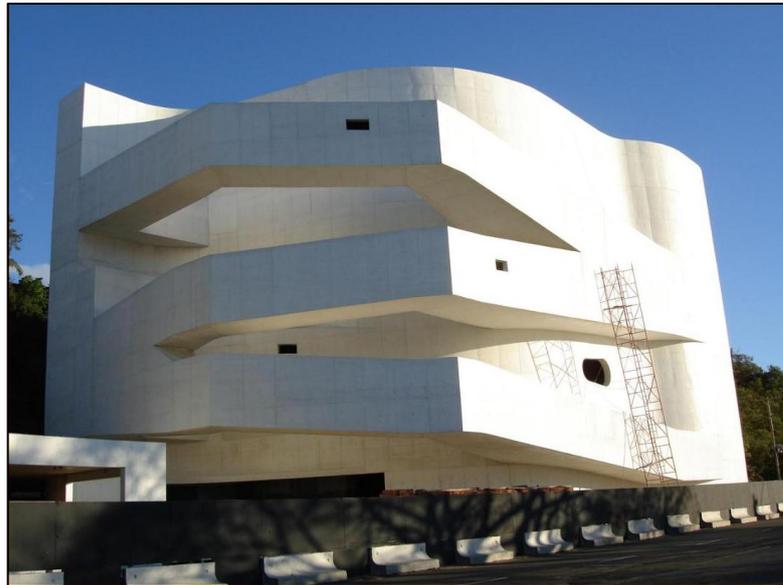
Fonte: Kuperman (2013)

O CAA utilizado na execução da sapata central edifício Infinity Tower foi de 35 MPa e com adição de gelo para controlar o calor de hidratação durante a cura. O acompanhamento do CAA foi feito pela PhD Consultoria, desde a definição do traço até o acompanhamento da produção na usina e o recebimento do concreto na obra. A execução da sapata dividiu-se em 4 etapas por questões de logística, com espessuras de 60 cm, com concretagens feitas em 4 sábados consecutivos. Foram utilizadas quatro bombas, duas no nível da rua, lançando o concreto em outras duas bombas que se encontravam no nível da fundação que por sua vez lançavam o concreto diretamente na sapata. A razão de serem executados aos sábados deveu-se a ter que se manter uma média de um caminhão de 8 m<sup>3</sup> descarregando a cada 12 minutos numa jornada contínua de 10 horas de concretagem, para cada camada (Téchné, 2012).

#### 2.4.2.3 Museu Iberê Camargo (Porto Alegre – Rio Grande do Sul)

O museu Iberê Camargo fica localizado em Porto Alegre (Rio Grande do Sul). Como toda a estrutura seria em concreto branco aparente, optou-se pelo CAA para se obter o melhor acabamento possível (Figura 19).

Figura 19 – Museu Iberê Camargo



Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

A Figura 20 mostra o aspecto do CAA utilizado na obra e as Figura 21 e 22, mostram a alta taxa de armadura das paredes em que o CAA teve de penetrar. É evidente que um CCV apresentaria enormes dificuldades para preencher todos os espaços, e certamente ocorreriam falhas de concretagem ou vibração excessiva (que é prejudicial ao material).

Figura 20 – Aspecto do CAA utilizado no museu Iberê Camargo



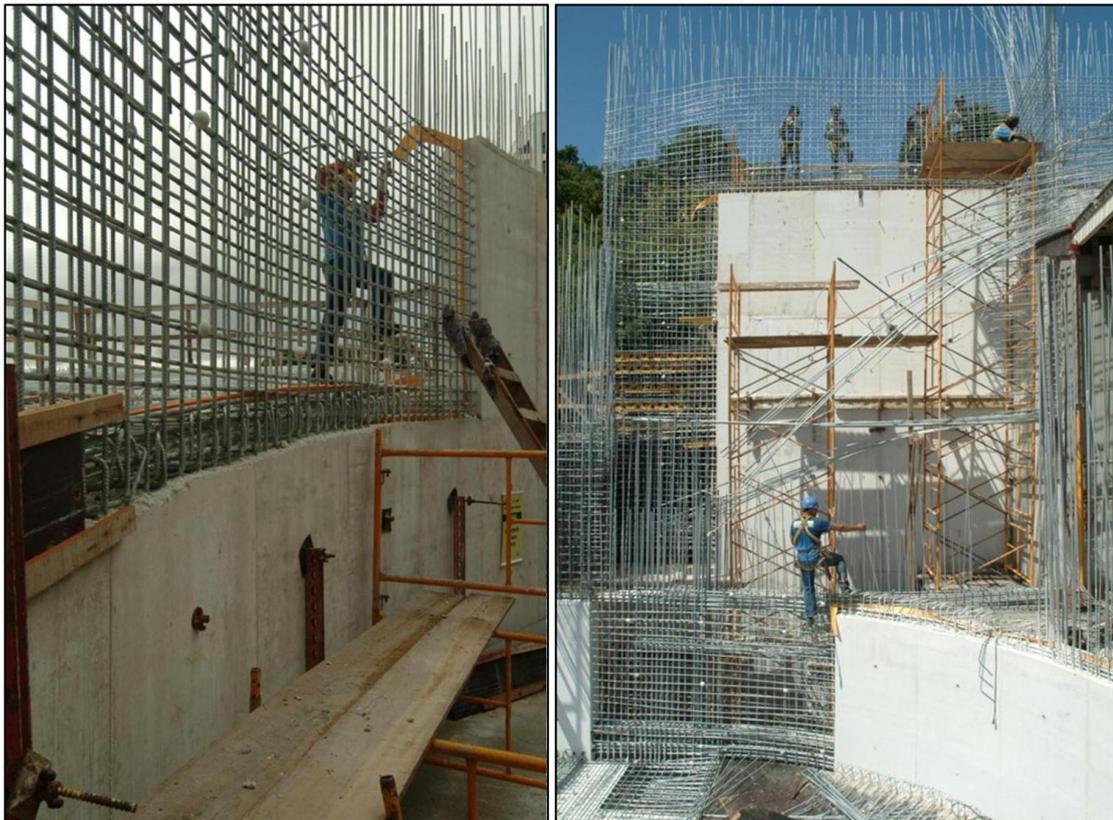
Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

Figura 21 – Armação das paredes do Museu Iberê Camargo



Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

Figura 22 – Detalhe da armação das paredes do Museu Iberê Camargo



Fonte: Dal Molin (2013)

#### 2.4.2.4 Edifício Pateo São Paulo

Na obra do residencial Pateo São Paulo (figura 23), da construtora BKO em parceria com a concreteira Engemix, na capital paulista, foi feito um estudo comparativo entre o CAA e o concreto convencional para a concretagem de duas lajes com a mesma área de 250 m<sup>2</sup> e 50 m<sup>3</sup> de concreto, especificadas para atingir a resistência de 50 MPa aos 28 dias, sendo utilizados os mesmos equipamentos: mangueira de 4", bombas e caminhões betoneira com as mesmas características técnicas. O tempo da concretagem com o CAA foi de duas horas e vinte minutos, contra um tempo duas vezes maior com o CCV e o custo de mão-de-obra para a aplicação dos concretos foi de R\$ 7,18/m<sup>3</sup> para o CCV e R\$ 0,70/m<sup>3</sup> para o CAA. O Quadro 1 mostra a quantidade necessária de funcionários e dos vibradores utilizados na execução da obra (Téchne, 2008).

Figura 23 – Concretagem da laje do residencial Pateo São Paulo com utilização do CAA



Fonte: Téchne (2008)

Quadro 1 – Comparativo entre o CCV E CAA na concretagem da laje do residencial Pateo São Paulo

Concreto	Convencional							Auto-adensável						
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª
Caminhão betoneira														
Nº de lançadores	3	3	3	3	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1
Nº de espalhadores	5	4	5	5	5	5	4	3	3	2	2	2	2	2
Nº de vibradores	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0
Nº de acabadores	0	2	3	3	3	3	4	0	0	1	2	2	2	2
Nº de funcionários parados	3	2	0	0	1	1	1	8	9	8	8	8	8	8
Outros funcionários	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Total de funcionários	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

Fonte: Téchne (2008)

A Figura 24 mostra uma obra feita pela mesma construtora, só que agora com o CCV. Fica evidente que a quantidade de pessoas utilizadas na concretagem aumenta significativamente.

Figura 24 – Concretagem de uma laje com o CCV

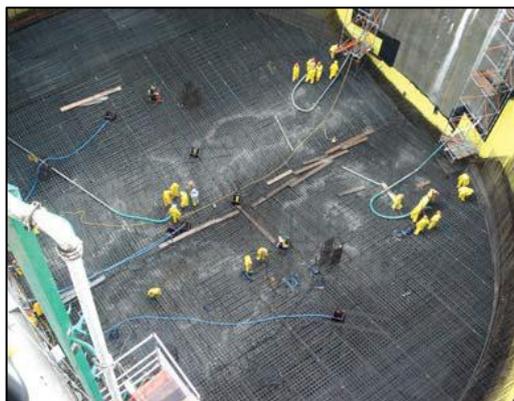


Fonte: Cainelli (2009)

#### 2.4.2.5 Metrô (São Paulo)

No metrô de São Paulo, tendo como responsável pela construção da estação o Consórcio Via Amarela, utilizou cerca de 600m<sup>3</sup> de CAA (fck > 35 MPa) num total de 8 mil m<sup>3</sup> de concreto. A laje concretada foi a laje de fundo dos poços Norte e Sul da estação Luz da linha 4 – amarela do metrô de São Paulo, com área superior a 2 mil m<sup>2</sup> e cerca de 3,5 m de altura. A região de utilização do CAA foi no engaste da laje com as paredes dos poços, por possuir uma elevada taxa de armadura (figura 25), pois se o mal adensamento resultasse em falhas, seria muito difícil o acesso para recuperá-las (Téchne, 2008).

Figura 25 – Utilização do CAA em laje do metrô de São Paulo



Fonte: Téchne (2008)

#### 2.4.2.6 Edifício Parthenon Residence (Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul)

Em Novo Hamburgo (RS), a empresa Mosmann Incorporações utilizou o CAA a partir do quinto pavimento do edifício Parthenon Residence (figura 26), sua área total construída é de 11.529,41 m<sup>2</sup>. Os estudos comparativos foram feitos tanto para a produção do concreto quanto para a sua aplicação e estão descritos nos Quadros 2 e 3. Os resultados finais mostraram que os custos do CAA ficaram 1,09% maiores do que o CCV, porém, sendo vantajosa a sua utilização quando considerada a produtividade de execução, visto que, para uma mesma área, 156 horas de trabalho foram gastas para a concretagem com CCV contra 75 horas com CAA (Téchne, 2008).

Figura 26 – Edifício Parthenon Residence



Fonte: Téchne (2008)

Quadro 2 – Valores obtidos na concretagem do edifício Parthenon Residence com o CCV

CONCRETO CONVENCIONAL							
Descrição	Unidade	Qtde.	Custo Unitário (R\$)		Custo Total (R\$)		Total (R\$)
			Material	Mão-de-obra	Material	Mão-de-obra	
<b>Laje</b>							
Mão-de-obra para lançamento de concreto convencional	h	117,00	-	14,90	-	1.743,30	
Mão-de-obra para execução de mestras	h	8,80	-	14,90	-	131,12	
Concreto convencional dosado em central, abatimento de $9 \pm 1$ cm, brita 0 e 1 e $f_{ck}$ de 30 MPa	m <sup>2</sup>	62,00	221,64	-	13.741,68	-	
Vibrador para concreto	un/dia	2,00	25,00	-	50,00	-	
Régua vibratória para concreto	un/dia	1,00	35,00	-	35,00	-	
Energia elétrica comercial	kW	29,25	0,28	-	8,19	-	
<b>Pilares</b>							
Mão-de-obra para lançamento de concreto convencional	h	30,00	-	14,90	-	447,00	
Concreto convencional dosado em central, abatimento de $9 \pm 1$ cm, brita 0 e 1 e $f_{ck}$ de 30 MPa	m <sup>2</sup>	15,00	221,64	-	3.324,60	-	
Vibrador para concreto	un/dia	2,00	25,00	-	50,00	-	
Energia elétrica comercial	kW	15,00	0,28	-	4,20	-	
<b>Custo Total (R\$)</b>					<b>17.213,67</b>	<b>2.321,42</b>	<b>19.535,09</b>

Fonte: Téchne (2008)

Quadro 3 – Valores obtidos na concretagem do edifício Parthenon Residence com o CCA

CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL							
Descrição	Unidade	Qtde.	Custo Unitário (R\$)		Custo Total (R\$)		Total (R\$)
			Material	Mão-de-obra	Material	Mão-de-obra	
<b>Laje</b>							
Mão-de-obra para lançamento de concreto auto-adensável	h	60,19	-	14,90	-	896,83	
Concreto auto-adensável, espalhamento de 60 cm, brita 0 e 1 e $f_{ck}$ de 30 MPa	m <sup>2</sup>	62,00	242,00	-	15.004,00	-	
<b>Pilares</b>							
Mão-de-obra para lançamento de concreto auto-adensável	h	14,56	-	14,90	-	216,94	
Concreto auto-adensável, espalhamento de 60 cm, brita 0 e 1 e $f_{ck}$ de 30 MPa	m <sup>2</sup>	15,00	242,00	-	3.630,00	-	
<b>Custo Total (R\$)</b>					<b>18.634,00</b>	<b>1.113,78</b>	<b>19.747,78</b>

Fonte: Téchne (2008)

### 2.4.3 São Luís – MA

Durante a realização dessa pesquisa, só se teve conhecimento de duas obras que já utilizaram o CAA na cidade de São Luís. A primeira obra foi um virador de vagões e a segunda foram alguns Dolfins de atracação. Em relação à primeira obra, não se conseguiu nenhum registro, já em relação à segunda obra, foi possível ter acesso a algumas informações.

Os Dolphins de atracação foram executados pela empresa Odebrecht, no Píer IV, no Terminal Portuário da Ponta da Madeira, com o objetivo de atracar embarcações. Utilizou-se para toda a obra aproximadamente 50.000 m<sup>3</sup> de CAA, as dimensões dos blocos dos Dolphins são de 17,5 m de comprimento x 17,5 m de largura x 3,00 m de altura e cada bloco possuem 8 estacas de 36 m de profundidade x 3,00 m de diâmetro. Assim, para cada bloco e suas estacas utilizou-se cerca de 3000 m<sup>3</sup> de CAA (Figura 27).

Figura 27 – Bloco e Estacas dos Dolphins de atracação do Píer IV

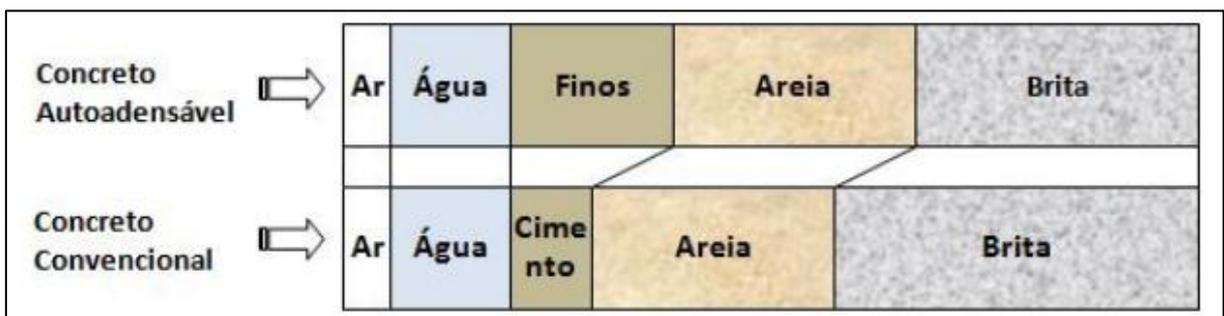


Fonte: Acervo do Eng. Cícero Geraldo de Sá (2012)

## 2.5 MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais utilizados na produção do concreto autoadensável são quase os mesmos utilizados na produção do concreto convencional, diferenciando-se principalmente pela proporção de seus componentes como mostrado na Figura 28. Em sua composição o CAA possui uma quantidade maior de finos (cimento e adições quimicamente ativas ou fílers) e aditivos plastificantes, superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade.

Figura 28 – Comparação da proporção dos componentes do CAA e CCV



Fonte: Okamura; Ouchi (2003 adaptado)

A seguir serão apresentadas as principais recomendações dos materiais mais comumente utilizados na produção do CAA.

### 2.5.1 Cimento

Os tipos de cimento utilizados para a confecção do CAA são os mesmos usados no CCV, sendo idênticos os cuidados referentes à durabilidade e aos usos adequados. Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), como não existem critérios científicos que especifiquem o cimento mais adequado para o CAA, o melhor cimento é aquele que apresenta a menor variabilidade em termos de resistência à compressão.

A EFNARC (2002) recomenda um consumo de cimento entre 350 a 450 kg/m<sup>3</sup>, podendo ainda chegar a um limite máximo de 500 kg/m<sup>3</sup>. Mais de 500 kg/m<sup>3</sup> pode ser perigoso e aumentar a retração e o uso de menos de 350 kg/m<sup>3</sup> pode fazer com que a mistura tenha poucos finos e acabe tendo uma baixa resistência à segregação. Um consumo de cimento inferior a 350 kg/m<sup>3</sup> poderia ser adequado, caso se utilize um outro material cimentício, que passa a compor a mistura, em substituição parcial do cimento.

Segundo Gjorv (1992 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), dentre as principais características do cimento, que devem ser avaliadas na produção do CAA, destacam-se a sua granulometria e o teor de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A).

Na prática, cimentos com teores de C<sub>3</sub>A maiores do que 10% podem resultar em rápida perda da fluidez, dificultando a aplicação do CAA em obras. Assim, quanto menor for o teor de C<sub>3</sub>A, maior será o tempo para a aplicação do CAA (há um retardamento do início da pega). Fusco (2012) ainda traz como benefício de utilizar cimentos com baixo C<sub>3</sub>A à diminuição do calor de hidratação.

Em se tratando da granulometria do cimento, quanto maior a sua superfície específica (cimentos mais finos), maior a quantidade dessas 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, proporcionando assim a alta fluidez do CAA sem segregação. Embora os cimentos que possuem uma maior superfície específica sejam mais apropriados, aumentam-se os cuidados necessários com relação ao calor de hidratação e retração do concreto.

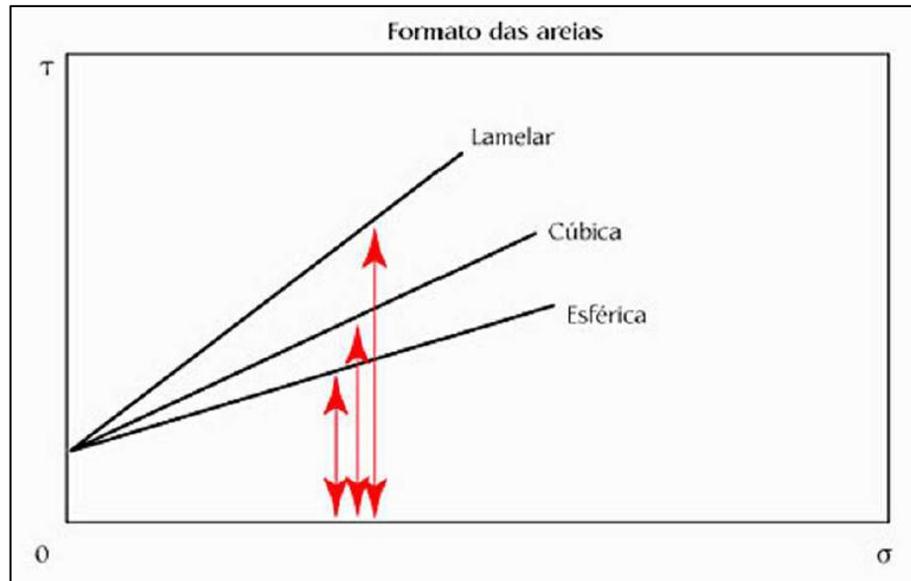
## **2.5.2 Agregados**

### *2.5.2.1 Agregados miúdos*

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), todas as areias são adequadas para a produção do CAA, tanto as de depósitos naturais (depósitos eólicos e beira de rio) quanto areias obtidas de processos industriais. É recomendado um cuidado especial ao se usar areias industriais, pois normalmente apresentam composição granulométrica com descontinuidades, ou seja, lacunas nas frações intermediárias, mas que pode ser corrigida por meio de uma composição com outra areia, por exemplo, areia média de rio. Portanto, as areias encontradas em depósitos naturais são mais recomendadas e ainda possuem uma forma mais arredondada e textura mais lisa, aumentando assim a fluidez da mistura para uma mesma quantidade de água.

Segundo Okamura e Ouchi (2003), quanto maior o ângulo da partícula, maior será a resistência ao cisalhamento da argamassa, reduzindo a possibilidade de deformação do concreto. A figura 29 mostra a relação entre a forma do agregado miúdo e a resistência ao cisalhamento do CAA.

Figura 29 – Relação entre a forma do agregado miúdo e a resistência ao cisalhamento, onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento e  $\sigma$  a tensão normal



Fonte: Okamura; Ouchi (2003)

Uma das principais características do CAA é a presença de finos, portanto quanto menor o módulo de finura do agregado miúdo, mas adequado ele será. Areias muito grossas (módulo de finura superior a 3) podem levar o CAA a segregação, e por isso devem ser evitadas.

Segundo Otaviano (2007 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008) existe uma necessidade de se realizar de maneira rigorosa um controle na umidade do agregado miúdo, que consiste em uma das principais causas de variação da fluidez da mistura. Domone (2003 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008) declara que erros de 0,5% na estimativa da umidade dos agregados podem alterar o consumo de água em até 8 kg/m<sup>3</sup> de concreto e, isso por sua vez, pode modificar o resultado do ensaio de espalhamento em até 45 mm, além de afetar negativamente as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto.

#### 2.5.2.2 Agregados graúdos

Para garantir a passagem do concreto por todos os obstáculos durante o lançamento e reduzir a tendência à segregação, as exigências quanto à dimensão máxima característica do agregado graúdo são mais restritivas (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

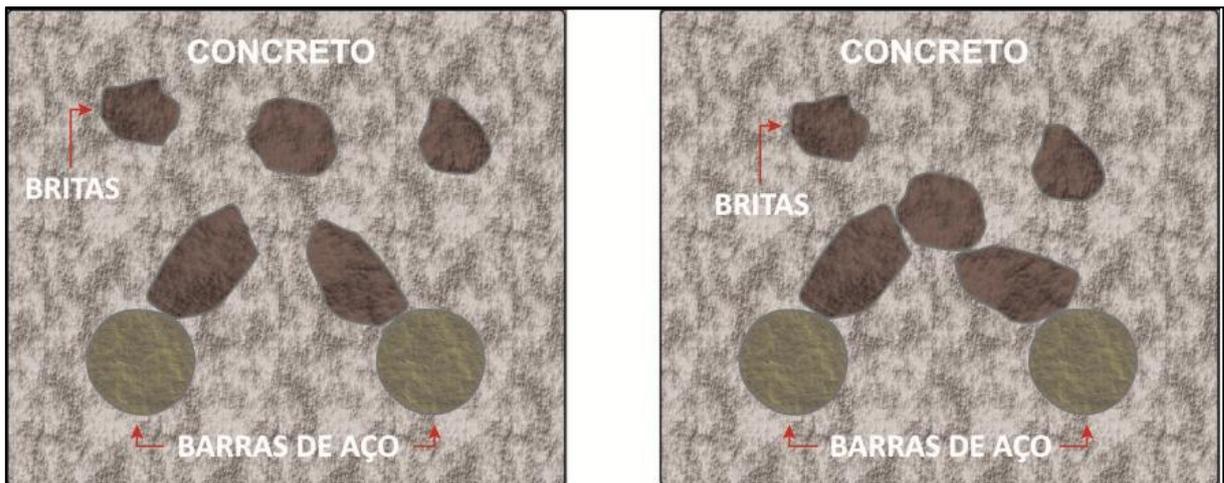
Segundo Gómes e Maestro (2005, apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), a dimensão máxima característica do agregado graúdo deve ser inferior a 2/3 do espaçamento

entre barras ou grupos de barras e a 3/4 do cobrimento mínimo de concreto às armaduras. Na prática, isso implica em não utilizar tamanhos máximos superiores a 19 mm, sendo habituais os tamanhos compreendidos entre 12,5 e 19,0 mm.

Na composição do concreto, a aderência agregado-pasta de cimento exerce um papel fundamental para a interação entre os dois componentes. Para se conseguir um bom comportamento mecânico do concreto, a forma e textura superficial do agregado são fatores que não podem ser despercebidos. Embora agregados angulares com superfícies ásperas apresentem melhor aderência com a pasta de cimento que agregados lisos e arredondados, podem surgir efeitos opostos no aumento do consumo de água e redução da trabalhabilidade se a angulosidade for muito acentuada, algo que não pode acontecer de forma alguma no CAA. Por isso, indica-se para o CAA agregados que possuam coeficiente de forma o mais próximo de 1 (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

A Figura 30 descreve o bloqueio que pode acontecer caso o tamanho dos agregados seja relativamente grande em relação às dimensões de espaçamento entre às armaduras e a forma das partículas se afastando da esférica.

Figura 30 – Representação dos mecanismos de bloqueio entre armaduras de elevada densidade



Fonte: Wolenski (2010)

Mehta e Monteiro (2006, apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), destacam a distribuição granulométrica como um fator que deve ser levado em consideração, pois influenciará no empacotamento dos grãos e, como resultado, pode alterar a fração volumétrica das britas que serão incorporadas na mistura de concreto. Sendo menos deformáveis e com menores possibilidades de fissurarem por retração na secagem os concretos com mais agregados e, conseqüentemente, com menor teor de argamassa.

### 2.5.3 Adições minerais

Devido às exigências do CAA no estado fresco (elevada resistência à segregação e alta fluidez), normalmente são utilizados aditivos modificadores de viscosidade e/ou adições minerais, cujo objetivo é fazer com que a mistura fique mais coesa e não deixar que haja a segregação do agregado graúdo.

As adições minerais devem ser escolhidas após uma análise técnica e econômica, considerando-se as características desejáveis para o CAA, e podem ser diversas, desde que tenham áreas superficiais maiores que as do componente que estão substituindo (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Os benefícios alcançados pela utilização de adições minerais são vários: ambiental, quando a adição é um resíduo industrial, pois evita que o material seja lançado ao ambiente sem nenhuma finalidade benéfica; econômico, devido à substituição parcial do cimento ou agregado miúdo, o que reduz o custo do m<sup>3</sup> do concreto; e tecnológico, pela melhora das propriedades do concreto nos estado fresco e endurecido. Nas propriedades frescas, com relação à fluidez, quantidade de água e ausência de segregação e/ou exsudação. E nas propriedades do concreto no estado endurecido, pela melhora nas propriedades mecânicas, tais como: resistência, permeabilidade e durabilidade, provocada pelo aumento da quantidade de finos e do refinamento dos poros (METHA; MALHOTRA, 1996 apud GOMES; BARROS, 2009).

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), as adições minerais são classificadas de acordo com sua ação físico-química e estão divididas em dois grandes grupos: adições minerais sem atividade química e adições minerais quimicamente ativas.

#### 2.5.3.1 Sem atividade química

O fíler é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento. Esses fílers são adicionados no CAA em substituição do agregado miúdo, já que apresenta maior finura do que esse, o que melhora as condições de compacidade do esqueleto granular e coesão da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Segundo ainda Tutikian e Dal Molin (2008), os fílers podem ser materiais naturais ou materiais inorgânicos processados. É de suma importância que possuam uniformidade e,

principalmente, sejam finos. Os mais tradicionais fillers usados na produção do CAA têm sido o calcário e a areia fina. Além desses, outras adições minerais têm sido consideradas, como, por exemplo, o pó granítico.

### 2.5.3.2 *Quimicamente ativas*

As adições minerais quimicamente ativas podem ser tanto material pozolânico como material cimentante. A NBR 12653:2012 define **material pozolânico** como um material que reage quimicamente com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , produto de hidratação do cimento Portland à temperatura ambiente para formar compostos resistentes. Ou seja, depende da presença do cimento Portland para atuar. Temos como exemplo a cinza volante com baixo teor de cálcio, a pozolana natural, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim. Por outro lado, o **material cimentante** possui, na sua composição, hidróxido de cálcio e não necessita do  $\text{Ca(OH)}_2$  formado durante a hidratação do cimento Portland para gerar o C-S-H (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), os CAA podem ser obtidos tanto pela utilização das adições pozolânicas como com as cimentantes normalmente utilizadas nos CCV (como cinza volante ou escória de alto-forno). Entretanto, as adições pozolânicas ultra-finas, como sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, mostram-se mais efetivas no aumento da coesão do CAA, bem como no aumento da resistência e da durabilidade. Estudos comprovam que misturas que fazem uso de combinações de duas adições minerais também têm sido utilizadas com sucesso.

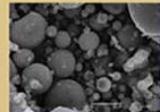
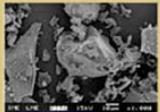
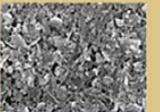
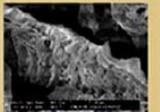
Alencar e Helene (2006 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008) comentam que quanto mais finas forem às adições, menores serão os teores de substituição, devido ao aumento da frequência de contato entre elas e em determinado volume, o que influencia no aumento da viscosidade e coesão da mistura. Além disso, quanto maior a quantidade de cimento na mistura, menores serão os teores necessários de substituição por adições, pois essas misturas já vão possuir uma grande quantidade de finos e, conseqüentemente, são mais coesas.

Collepari (2003, apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), mostra que um recente avanço na tecnologia do CAA é a nanossílica ou sílica coloidal amorfa ultra fina, composta de partículas de 5-50nm de sílica ativa, disponíveis em solução (10-50% de sólidos). São extremamente eficientes para reduzir a exsudação e aumentar a resistência à segregação, pois

possuem elevada área superficial. Sua dosagem mais usual é de 3 a 5% da massa dos aglomerantes.

O Quadro 4 apresenta as adições minerais quimicamente ativas mais utilizadas em concretos, bem como suas principais características e consequências do seu emprego nas propriedades do CAA.

Quadro 4 – Características e consequências do emprego de adições minerais quimicamente ativas nas propriedades do CA

Adição mineral	Cinza volante	Escória de alto forno	Sílica ativa	Metacaulim	Cinza de casca de arroz
Origem	Calcinação de carvão pulverizado em usinas termoe-létricas (com o objetivo de gerar energia)	Subproduto não- metálico resultante do processo de obtenção do ferro gusa	Subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício e do silício metálico	Calcinação de alguns tipos especiais de argila ou obtido através do tratamento do resíduo da indústria de papel	Calcinação da casca de arroz
Aspecto visual	 MEV 5.000 X	 MEV 1.000 X	 MEV 20.000 X	 MEV 7.500 X	 MEV 800 X
Forma e textura	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Alveolar e áspera
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,35	xxxx	2,20	2,40	2,20 a 2,60
Superfície específica (m <sup>2</sup> /kg)	300 a 700	300 a 700	13.000 a 30.000	Variável em função da moagem	50.000 a 100.000
Tamanho médio das partículas	Variável em função da moagem	Variável em função da moagem	0,1 a 0,2µm	Variável em função da moagem	Variável em função da moagem
Efeito no CAA fresco quando utilizado como substituição ao cimento	Aumento da coesão Redução da exsudação e segregação Melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas Normalmente reduz o consumo de superplastificante	Aumento da coesão Redução da exsudação e segregação Não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas Pouco altera o consumo de superplastificante	Elevadíssimo aumento da coesão Redução acentuada da exsudação e segregação Melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas Aumento no consumo de superplastificante, teores acima de 5% da massa do cimento	Grande aumento da coesão Redução acentuada da exsudação e segregação Não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas Aumento no consumo de superplastificante	Elevadíssimo aumento da coesão Redução acentuada da exsudação e segregação Piores condições de fluidez em função da forma e textura das partículas Elevado aumento no consumo de superplastificante
Efeito no CAA endurecido quando utilizado como substituição ao cimento	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade

Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

## 2.5.4 Aditivos

Outro diferencial do concreto autoadensável (CAA) para o concreto convencional (CCV) são os aditivos. São dois os principais tipos de aditivos usados no CAA: os superplastificantes e os modificadores de viscosidade. Os superplastificantes permitem que se alcance alta fluidez nas misturas, enquanto os aditivos modificadores de viscosidade oferecem um aumento da coesão, prevenindo assim a exsudação e segregação (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

### 2.5.4.1 *Plastificantes e superplastificantes*

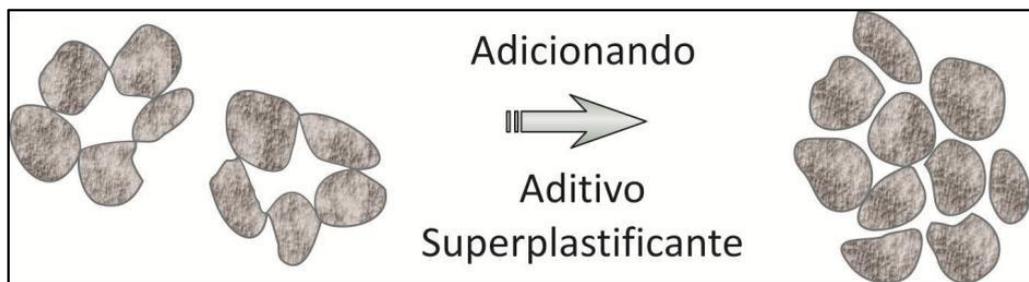
Segundo Hartmann (2002 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), os superplastificantes podem ser agrupados em quatro categorias, de acordo com sua composição química:

- Lignossulfonatos ou lignossulfonatos modificados (LS). Geralmente, incorporam ar e retardam, com diversas intensidades, a pega do cimento;
- Sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído, usualmente denominados de naftaleno sulfonato ou apenas de naftaleno (NS). Não incorporam ar e praticamente não interferem no tempo de pega do cimento;
- Sais sulfonatos de policondensado de melamina e formaldeído, usualmente denominados de melamina sulfonato ou apenas de melamina (MS). Apresenta uma tendência a retardar a pega do cimento e, eventualmente, incorporar pequena quantidade de ar;
- Policarboxilatos (PC).

Os lignossulfonatos (LS) são conhecidos como aditivos plastificantes de primeira geração, utilizados como redutores de água normais e, em alguns casos, como superplastificante. O Naftaleno (NS) e a melamina (MS) são conhecidos comercialmente como aditivos superplastificantes de segunda geração, e permitem a redução em até 25% da quantidade de água na mistura quando usados como redutores de água. Os policarboxilatos (PC) são os aditivos mais aconselhados para a utilização no CAA, pois são aditivos superplastificantes de alta eficiência que dispersam e desfloculam as partículas de cimento. Assim, permitem uma redução de água das misturas em até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade. Também são poliméricos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Na ausência de aditivos as forças que se estabelecem entre as partículas de cimento são, em geral, de atração e tendem a produzir floculação dessas partículas em aglomerados de tamanho significativo que retêm a água (Figura 31). A absorção das moléculas de superplastificante pelas partículas de cimento impede a sua floculação devido à geração de forças repulsivas, cuja origem pode ser eletrostática e/ou através de repulsão estérica. Consequentemente, as partículas são distribuídas na solução aquosa, minimizando a quantidade de água necessária para que estas fiquem dispersas, o que conduz a uma maior fluidez do concreto (RONCERO, 2000 apud WOLENSKI, 2010).

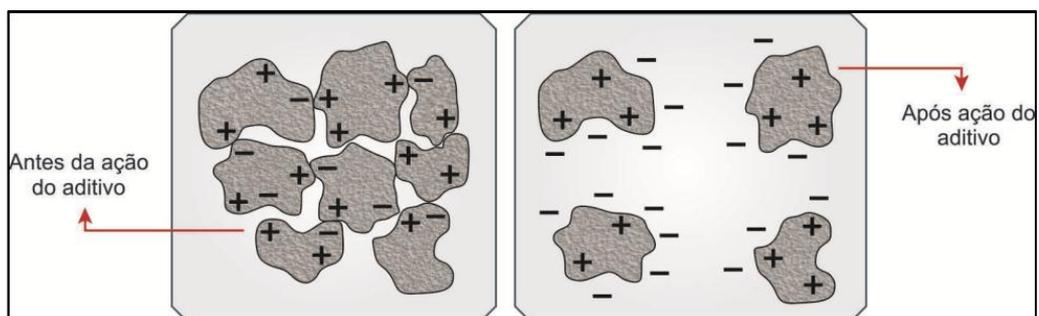
Figura 31 – Floculação e desfloculação das partículas de cimento, em virtude da ação do superplastificante



Fonte: Wolenski (2010)

Os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos melhoram sensivelmente a dispersão das partículas de cimento quando comparados aos aditivos de primeira e segunda geração (superplastificantes tradicionais). Isso acontece porque esses tipos de superplastificantes tradicionais são baseados em polímeros que as partículas de cimento absorvem e que acumulam-se em sua superfície (Figura 32). Como esses polímeros aumentam a carga negativa (desbalanceamento) do cimento, fazem com que suas partículas se dispersem por repulsão eletrostática, exigindo menos água para fluidificar a pasta (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

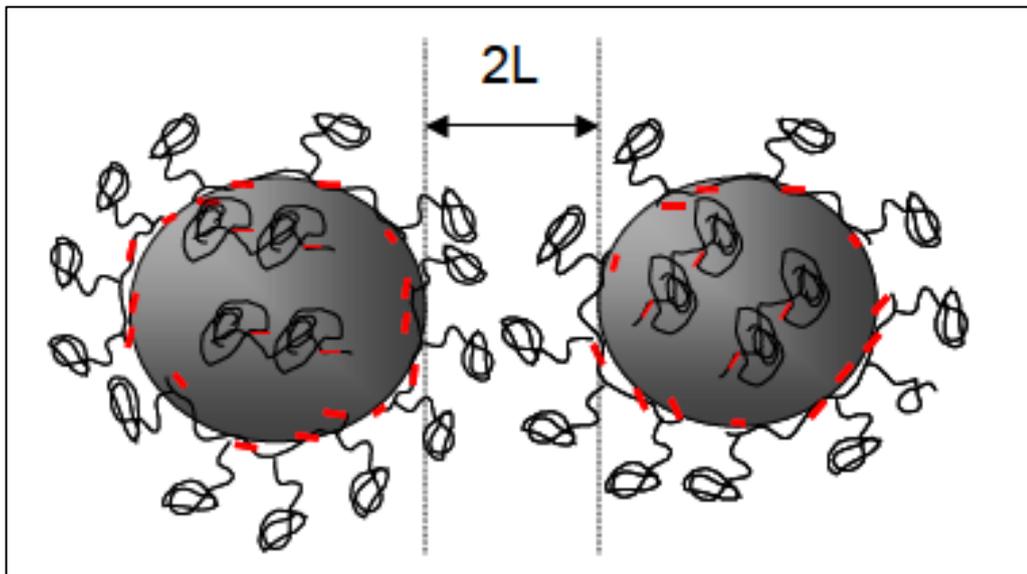
Figura 32 – Dispersão das partículas de cimento por repulsão eletrostática



Fonte: Wolenski (2010)

Segundo ainda Tutikian e Dal Molin (2008), as cadeias dos superplastificantes de terceira geração, constituídas de polímeros de éter carboxílico com largas cadeias laterais, realizam a dispersão das partículas de cimento da mesma forma, porém com maior eficiência. Isso ocorre porque suas cadeias são ramificadas e isso causa um aumentando na área superficial, esse efeito é chamado de dispersão estérica (Figura 33). Além disso, ainda geram uma energia que estabiliza a capacidade de refração e dispersão das partículas de cimento.

Figura 33 – Dispersão das partículas de cimento por repulsão estérica



Fonte: Wolenski (2010)

Segundo Mailvaganan (1979, apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), a maior dificuldade à propagação do uso desses aditivos tem sido a taxa relativamente alta de perda de consistência com o tempo em comparação aos CCV, tornando-se um problema sério na utilização dos concretos em obra. A consistência obtida pelo superplastificante, dependendo das condições, se mantém apenas por um período de 30 a 60 minutos. A máxima trabalhabilidade alcançada normalmente permanece por 10 a 15 minutos, e é seguida por uma perda relativamente rápida do espalhamento. Sendo indicado assim, a incorporação do superplastificante na mistura somente momentos antes do seu lançamento na obra.

Tutikian e Dal Molin (2008) prescrevem alguns dos fatores que afetam a consistência inicial e a taxa de perda de consistência em concretos com aditivos superplastificantes, esses fatores incluem o tipo de aditivo, dosagem e momento de colocação na mistura, temperatura, umidade, procedimento de mistura (tempo total de mistura, tipo de

betoneira e velocidade de mistura), tipo de cimento, consistência inicial do concreto e presença de outro aditivo além do superplastificante.

Os tipos de cimento Portland apresentam um aumento de trabalhabilidade com a adição do superplastificante embora a eficiência, para cada um deles, não seja a mesma. Segundo Bucher (1989, apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), quanto maior a finura do cimento, menor a eficiência do aditivo devido à diminuição da concentração específica das moléculas absorvidas na superfícies dos grãos de cimento. A composição química do cimento também possui papel relevante no comportamento da mistura quanto à consistência inicial e perda com o tempo. Collepari (1984, apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008) atribui as diferenças de comportamento ao conteúdo de C<sub>3</sub>A, gesso e álcalis, bem como à forma do sulfato de cálcio utilizado como regulador de pega do cimento. Assim, quanto maior o conteúdo de álcalis, maior será a velocidade das reações e, conseqüentemente, maior a perda de consistência. Da mesma forma, a presença do superplastificante acelera as reações entre o C<sub>3</sub>A e o gesso. Na prática, cimentos contendo maior quantidade de C<sub>3</sub>A perdem mais rapidamente a consistência inicial na presença de superplastificantes. A perda de consistência com o tempo é influenciada também pelo consumo de cimento, pois quanto maior o consumo de cimento, menor a perda de consistência com o tempo.

Vários estudos sobre aditivos superplastificantes mostram que, quanto menor a trabalhabilidade inicial representada por ensaios de consistência, mais rápida é sua perda com o tempo. Tutikian et al. (2007, apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008) sugerem que, quando se deseja obter tempos de lançamento compatíveis com a prática de obra, é recomendável utilizar abatimentos iniciais mais altos, que podem ser obtidos com o uso de aditivos plastificante.

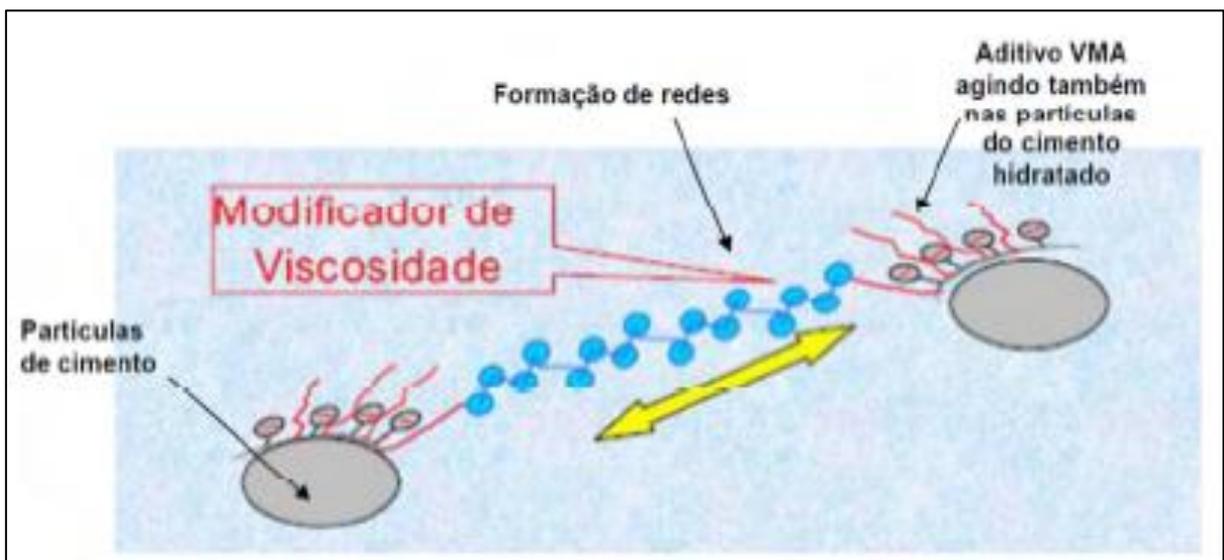
Mailvaganam (1979, apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008) alerta em relação à variação da temperatura de mistura, pois essa variação pode produzir um efeito marcante na taxa de perda da consistência com o tempo nos concretos com superplastificantes, sendo que o autor destaca que ocorre uma perda drástica do abatimento em temperaturas acima de 32°C. Recomenda-se, nessa situação, utilizar água gelada ou lascas de gelo para manter a temperatura do concreto mais baixa, ou acrescentar um aditivo retardador ou estabilizador de pega cuja dosagem e compatibilidade devem ser determinadas previamente.

#### 2.5.4.2 Modificadores de viscosidade

Os aditivos modificadores de viscosidade (VMA) são produtos à base de polissacarídeos com cadeias poliméricas de alto peso molecular ou de base inorgânica, podendo substituir os componentes finos do concreto. Quando adicionados ao concreto, oferecem um aumento da coesão da massa no estado fresco, impedindo a segregação e limitando a perda de água por exsudação, o que permite diminuir os efeitos negativos da falta de uniformidade na dosagem da quantidade de água e da granulometria dos agregados (reduz a sensibilidade do CAA às variações nas proporções da mistura). Dessa forma, a mistura com poucas partículas pequenas, faz com que diminua a área superficial do material e o consumo de água, ou seja, concretos similares podem ter relações a/agl menores ou a mesma relação, mas com maior fluidez sem que ocorra a segregação (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Os benefícios citados acima são proporcionados pelo fato de o VMA atuar na água da mistura promovendo uma viscosidade moderada por meio de uma formação de rede, que detém a água e que mantém as partículas finas da mistura suspensas, fornecendo maior coesão, conseqüentemente evitando a ocorrência de segregação e exsudação, conforme demonstrado na Figura 34.

Figura 34 – Ação dos aditivos modificadores de viscosidade



Fonte: Meireles (2010)

Segundo a EFNARC (2006), o VMA aumenta a viscosidade plástica (medida da taxa de fluxo do material), mas geralmente provoca um pequeno aumento da tensão de

cisalhamento (força necessária para o movimento do concreto) e que é compensado pelo aditivo superplastificante quando necessário.

Poon e Ho (2004, apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), relatam em algumas regiões, fora do Brasil, que os VMA são frequentemente usados, uma vez que podem dispensar ou reduzir o uso de adições minerais, que em alguns casos representam alto custo ou indisponibilidade no local de produção do CAA.

Ainda que seu emprego no CAA não seja imprescindível, quando utilizados de forma conjunta com os superplastificantes de última geração, os VMA permitem obter misturas estáveis e de grande fluidez. Otaviano (2007 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008) alerta que é necessário maior controle quanto ao teor do VMA no CAA, bem como a sua compatibilização com o superplastificante, para evitar problemas, como retardamento da pega, alteração no desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, coesão excessiva e aumento da retração por secagem. Além da compatibilização com o superplastificante, deve-se observar especialmente a compatibilização com o cimento.

### **2.5.5 Água de amassamento**

Os requisitos de qualidade da água para o concreto autoadensável são os mesmos que são considerados para o concreto convencional na NBR 15900-1:2009. A água utilizada no concreto não deve conter impurezas que possam vir a prejudicar as reações com os compostos do cimento. As impurezas podem causar eflorescências na superfície do concreto e corrosão das armaduras do concreto armado.

Segundo Gomes e Barros (2009), a água é o parâmetro mais importante no controle das propriedades do concreto fresco e endurecido. A quantidade de água em uma mistura depende de vários fatores, tais como: propriedades dos agregados, tipo de cimento, quantidade total de partículas finas na mistura, uso de adições ou aditivos e outros. Em uma mistura, a quantidade de água é dividida basicamente em quatro partes: uma para hidratação do cimento, uma para absorção e adsorção dos agregados e materiais finos, uma para preencher a porosidade do esqueleto granular e uma para garantir a fluidez do concreto.

As propriedades reológicas do concreto fresco são altamente influenciadas pela relação água/cimento ( $a/c$ ). Um aumento na relação  $a/c$  produz uma redução na viscosidade plástica e na resistência de fluxo. Uma baixa relação  $a/c$  e o uso de superplastificantes produzem concretos com alta viscosidade (BEAUPRÉ; MINDESS, 1998 apud GOMES; BARROS, 2009).

## 2.6 CAA NO ESTADO FRESCO

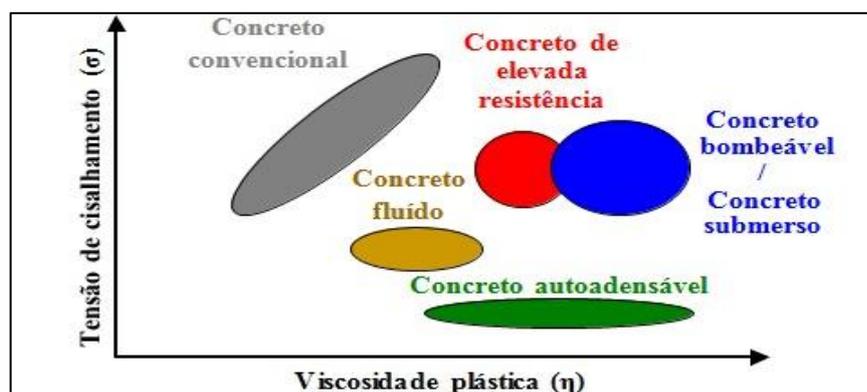
O CAA no estado fresco possui algumas peculiaridades que o tornam diferentes dos CCV. A grande característica do CAA é que ele é extremamente fluido, ao mesmo tempo em que deve ser capaz de carregar grandes partículas de agregado graúdo em todo o trajeto. Ou seja, é um concreto que deve ser fluido e viscoso simultaneamente, unindo duas propriedades completamente distintas. Para melhor compreensão dessa característica, serão apresentados alguns conceitos de reologia. Após descrever os conceitos sobre reologia, será descrito os ensaios, juntamente com os equipamentos especiais desenvolvidos exclusivamente para os CAA.

### 2.6.1 Reologia

A reologia é uma parte da ciência que estuda a deformação e o fluxo dos materiais. Do ponto de vista reológico, o comportamento do CAA pode ser entendido pelo modelo de Bingham (ROUSSEL et al., 2000 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), que é a classificação aceita pela maioria dos autores.

O CAA é caracterizado por dois parâmetros: a viscosidade plástica ( $\eta$ ) e a tensão de cisalhamento ( $\sigma$ ). O primeiro é a medida da taxa de fluxo do material, enquanto a tensão de cisalhamento é uma medida de força necessária para o movimento do concreto. O fato de o CAA apresentar alta fluidez sem segregação é graças à baixa tensão de cisalhamento (próxima de zero) e a alta viscosidade – quando comparado ao CCV (OH et al., s/d apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). A figura 35 compara a tensão de cisalhamento e a viscosidade plástica para vários tipos de concreto.

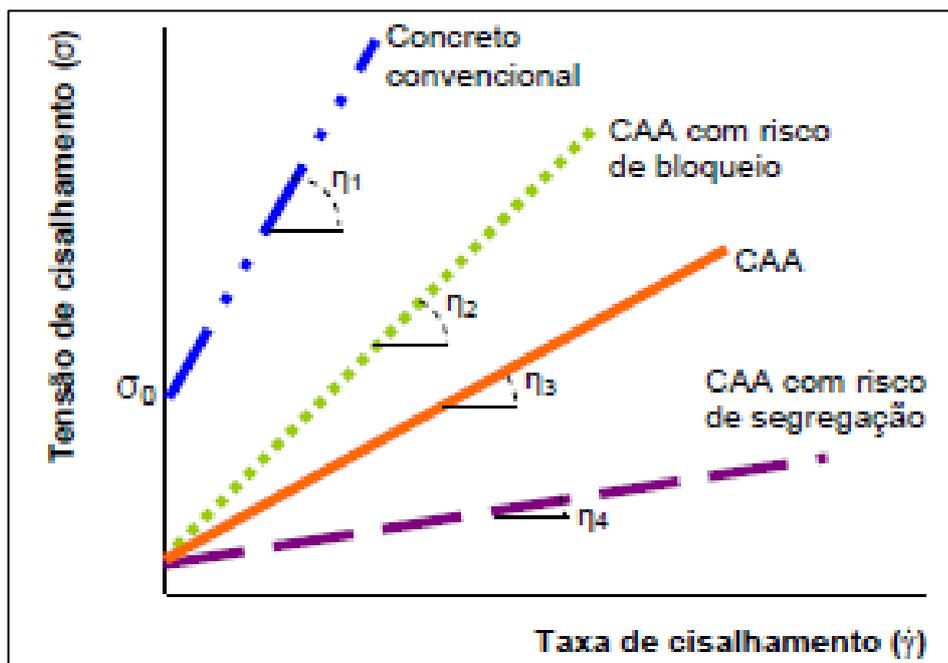
Figura 35 – Comparação do comportamento reológico de alguns tipos de concreto



Fonte: Nunes (2001 adaptado)

A baixa tensão de cisalhamento do CAA é conferida através do aditivo superplastificante e a alta viscosidade plástica é obtida pelo resultado da ação dos materiais finos (incluindo o cimento) e/ou com a adição do aditivo modificador de viscosidade. Um cuidado especial deve ser tomado em relação à viscosidade plástica, pois uma viscosidade muito baixa pode prejudicar a estabilidade da mistura, enquanto uma elevada viscosidade pode levar a bloqueios dos agregados em contato com as armaduras e deficiência no acabamento superficial do concreto. A figura 36 ilustra muito bem o exposto acima.

Figura 36 – Consequências da variação da viscosidade plástica ( $\eta$ ) no CAA



Fonte: Fava e Fornasier (2004) apud Alencar (2008)

### 2.6.2 Ensaios para controle da trabalhabilidade

O conjunto de equipamentos para a avaliação da trabalhabilidade do CAA foi totalmente desenvolvido para esse novo tipo de concreto. Os primeiros ensaios foram realizados no Japão por Okamura na Universidade de Tóquio. Ao longo dos anos, diferentes métodos de ensaios foram desenvolvidos para caracterizar as propriedades do CAA no estado fresco.

As três principais propriedades cuja medição se faz necessária para o CAA são a fluidez, a capacidade de fluir coeso e íntegro entre obstáculos e a resistência à segregação. Para cada uma dessas propriedades há um grupo de equipamentos, uns mais aptos e uns mais práticos que outros, conforme pode ser observado na Quadro 5.

Quadro 5 – Ensaio para a avaliação da trabalhabilidade do CAA

Ensaio	Utilização		Propriedades Avaliadas		
	Laboratório	Canteiro	Fluidez	Habilidade Passante	Coesão
Slump flow	XXX	XXX	XXX	N	X
Slump flow t500	XXX	XX	XXX	N	X
Funil V	XX	X	XX	N	X
Funil V 5 min	XX	X	X	N	XXX
Caixa L	XX	X	N	XXX	XX
Anel J	XXX	XXX	X	XXX	XX
Coluna de segregação	X	N	X	N	XXX

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

(Fonte: Tutikian; Dal Molin, 2008).

Conforme observamos na tabela acima, nenhum desses ensaios é capaz de medir isoladamente as três propriedades principais do CAA. Mas, como as dimensões dos equipamentos não são grandes, pode-se perfeitamente realizar mais de um ensaio, tanto em laboratório quanto no canteiro-de-obras.

#### 2.6.2.1 Ensaio de espalhamento e tempo de escoamento (*slump flow test e slump flow t500*)

##### 2.6.2.1.1 Princípio do ensaio

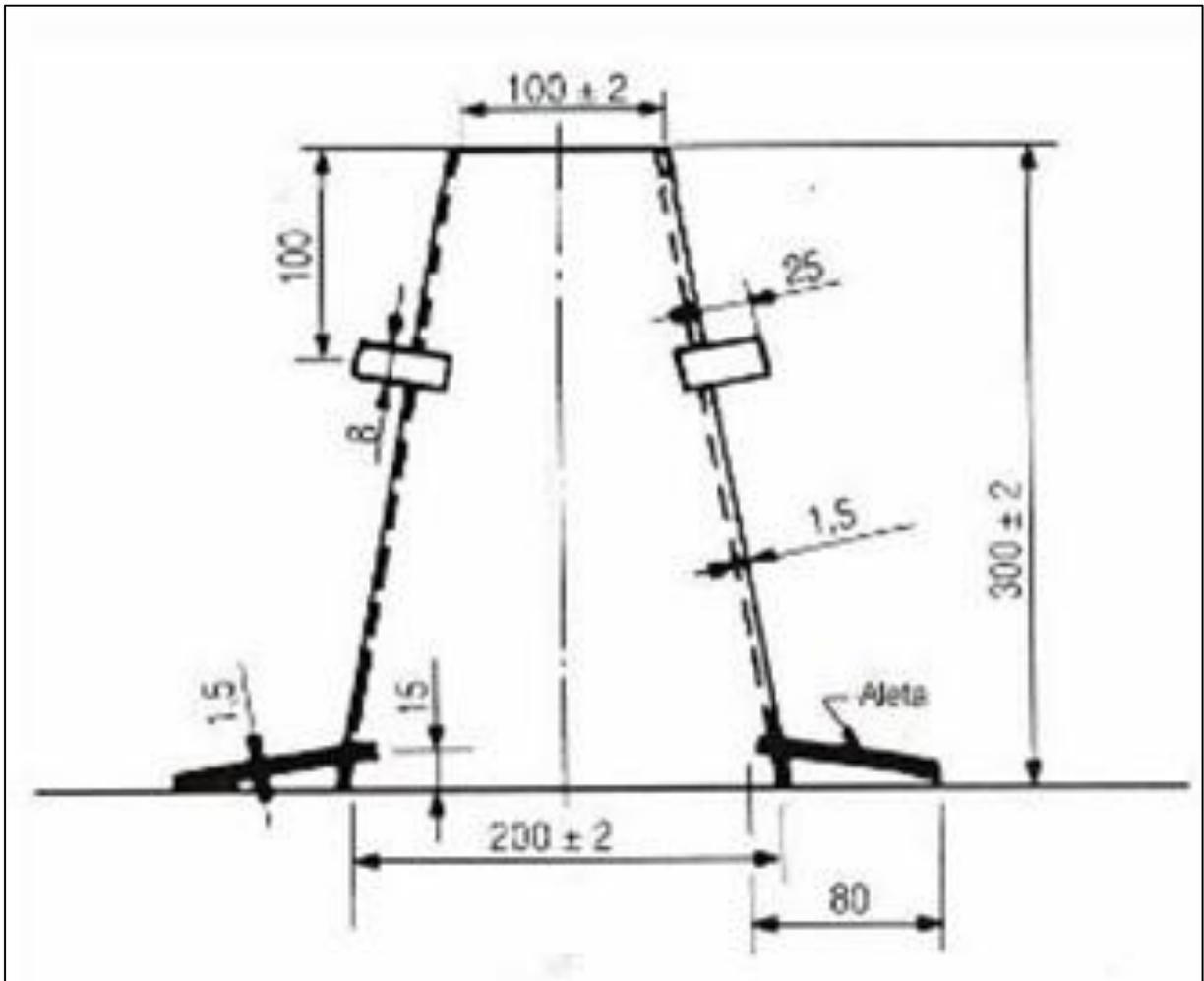
O ensaio de espalhamento foi desenvolvido no Japão em 1990 para avaliar o uso de concretos submersos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Ele consiste em verificar se o concreto sob determinada força, provocada pelo seu peso próprio, é capaz de se espalhar até atingir uma determinada dimensão em determinado tempo. Sua principal função é medir a capacidade de fluidez do CAA sem segregar (GOMES; BARROS, 2009). Sem dúvidas, esse é o ensaio mais utilizado nos laboratórios e nas obras.

##### 2.6.2.1.2 Equipamentos

Segundo a NBR 15823-2:2010, para a execução do ensaio de espalhamento, são necessários os seguintes equipamentos:

▪ **Molde (Cone de Abrams):** confeccionado em chapa metálica de 1,5 mm de espessura, com forma de tronco de cone com 300 mm de altura e bases abertas, sendo a inferior com 200 mm e a superior com 100 mm de diâmetro interno. Deve ser provido ainda de aletas e alças, conforme mostra a Figura 37. O material usado na sua confecção deve ser um material que não absorva água e nem provoque atrito com o concreto;

Figura 37 – Molde - Cone de Abrams



Fonte: NBR 15823-2:2010

▪ **Base:** para apoio do molde, deve ser confeccionada em chapa metálica quadrada de no mínimo 900 mm de lado, com espessura de pelo menos 1,5 mm. Esta chapa deve ser provida de três marcações circulares centradas com diâmetros de 100 mm, 200 mm e 500 mm, respectivamente, conforme mostra Figura 38. O material usado na sua confecção deve ser um material que não absorva água e nem provoque atrito com o concreto;

Figura 38 – Base do ensaio de espalhamento



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

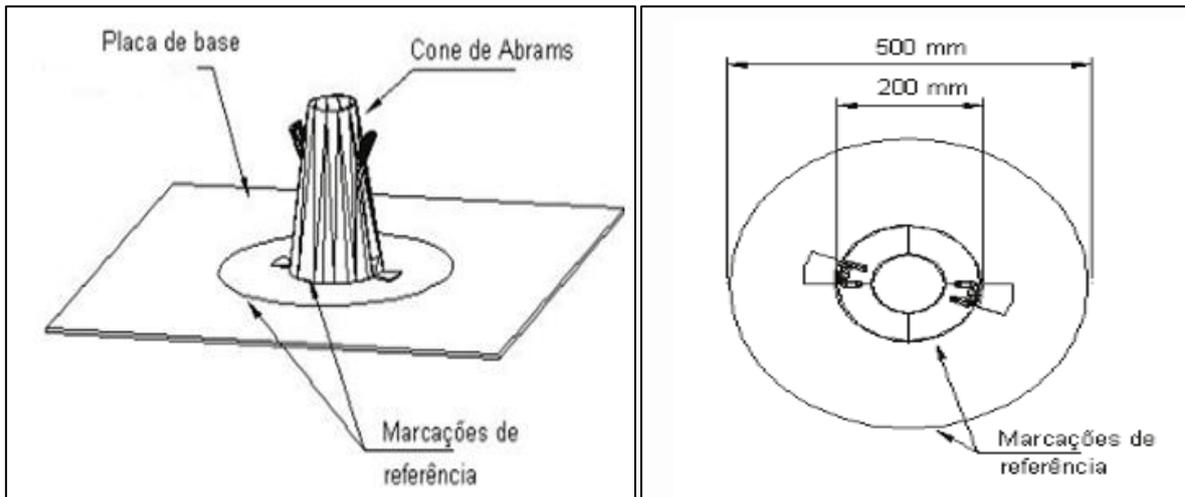
- **Régua metálica:** de no mínimo 1000 mm de comprimento e graduada;
- **Recipiente:** capacidade de pelo menos 10 L e feito de material que não absorva água e nem provoque atrito com o concreto. Deve permitir verter o concreto no molde de uma só vez;
- **Complemento tronco-cônico:** metálico e adaptável à base superior do molde;
- **Colher de pedreiro:** para retirada do excesso de concreto da superfície do molde;
- **Cronômetro:** Com resolução mínima de 0,1 s.

#### 2.6.2.1.3 Execução do ensaio

Segundo a NBR 15823-2:2010, primeiramente deve-se umedecer a base e internamente o molde para que não absorvam água do concreto durante o ensaio. Depois,

colocar a base sobre uma superfície nivelada e posicionar o molde sobre a base, centrando-o na marcação circular de diâmetro 200 mm, conforme Figura 39.

Figura 39 – Vista em perspectiva e em planta do posicionamento do molde



Fonte: NBR 15823-2:2010

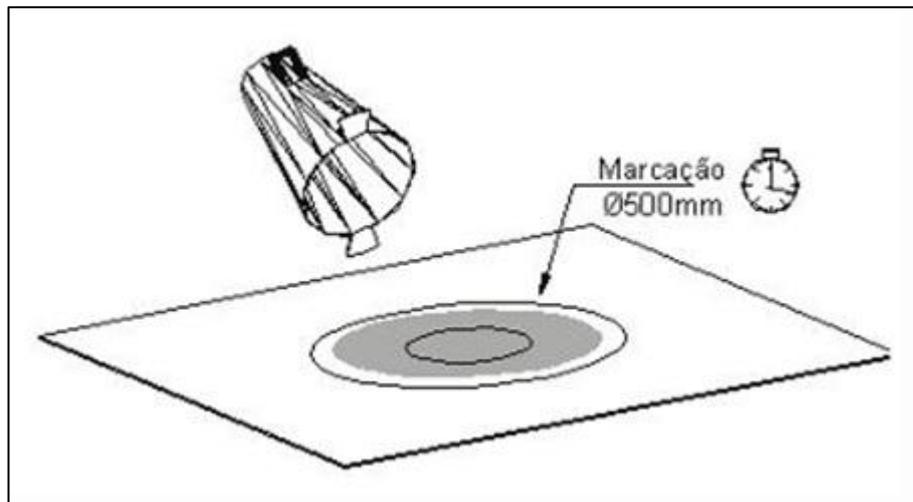
Com uma amostra representativa de concreto, entre 6 e 7 litros, e em tempo não superior a 2 min após sua coleta, preencher o molde (cone de Abrams), que deve ser fixado através de suas aletas, pelos pés do operador, afim de evitar qualquer vazamento de concreto. O preenchimento do molde deve ser realizado sem adensamento e de forma contínua e uniforme, com o auxílio do complemento cônico.

Ao fim da operação de preenchimento, retirar o complemento tronco-cônico e remover o excesso de concreto da superfície com o auxílio da colher de pedreiro, que deve regularizar a superfície do concreto. Imediatamente após, fazer a limpeza da placa de base, retirando todos os resíduos de concreto de sua superfície.

A desmoldagem é efetuada levantando-se cuidadosamente o molde pelas alças, na direção vertical, com velocidade constante e uniforme, em tempo não superior a 5 s, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral. Todo o processo de preenchimento até a desmoldagem deve ser efetuada em tempo não superior a 1 min.

No momento da desmoldagem, imediatamente após o molde perder o contato com a base, o cronômetro deve ser acionado no momento em que o operador inicia o levantamento do molde e parado quando a massa de concreto cobrir totalmente a marca circular de diâmetro 500 mm da base (Figura 40), registrando-se este intervalo de tempo ( $t_{500}$ ), em segundos.

Figura 40 – Execução do ensaio de espalhamento e do tempo de escoamento



Fonte: NBR 15823-2:2010

#### 2.6.2.1.4 Resultados e Conclusões

O resultado desse ensaio consiste nas seguintes determinações:

- O espalhamento (SF) da massa de concreto: média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro realizadas em milímetros (Figura 41);

Figura 41 – Medindo o diâmetro de espalhamento



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

- O tempo de escoamento ( $t_{500}$ ): intervalo de tempo, em segundos, entre o início e o final do escoamento do concreto, a partir do diâmetro do molde (200 mm) até a marca circular de diâmetro 500 mm da base.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), espalhamento muito baixos indicam que o concreto está pouco fluido (Figura 42). Assim é necessário fluidificar o material com água ou aditivos superplastificantes.

Figura 42 – Concreto pouco fluido e apresentando sinais de segregação



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Se esse concreto fosse aplicado em estruturas reais e sem adensamento, com certeza ele não conseguiria ultrapassar a armação e resultaria em uma estrutura com grandes falhas de concretagem.

Se a medida do espalhamento estiver elevada, deve-se tornar o concreto mais coeso, porque estará muito fluido e, provavelmente, segregando (Figura 43).

Figura 43 – Concreto muito fluido e com segregação visível

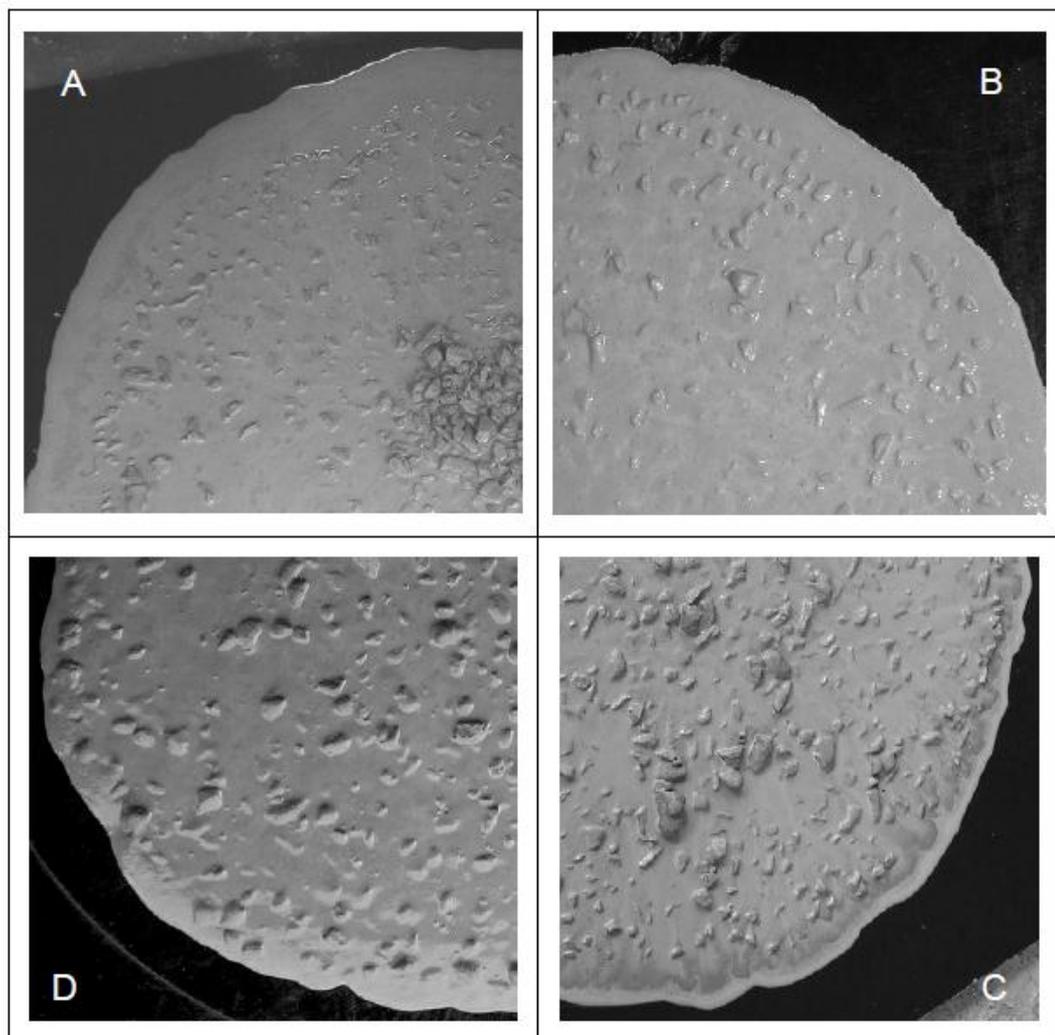


Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Se esse concreto fosse aplicado em estruturas reais, certamente o agregado graúdo iria para o fundo das fôrmas, assim a argamassa e a água subiriam para a superfície, o que provocaria grandes falhas de concretagem e diminuiriam a durabilidade e a resistência mecânica das peças.

Visualmente, para o CAA ser considerado sem segregação no ensaio de espalhamento, o agregado graúdo deve estar homogeneamente distribuído na mistura e acompanhar a movimentação da argamassa até a extremidade do círculo formado pelo CAA. Na Figura 44 são apresentados vários resultados para o espalhamento do CAA e com o seu respectivo grau de segregação.

Figura 44 – Análise do aspecto visual do espalhamento do CAA. A – Alto nível de segregação, com concentração de agregados graúdos no centro do círculo formado pelo espalhamento do concreto e presença apenas de argamassa na extremidade. B – Moderado nível de segregação, pode-se observar que a brita não conseguiu acompanhar a argamassa até a extremidade do espalhamento. C – Leve exsudação de água, observada na beirada do concreto. D – Concreto com adequado nível de fluidez e coesão



Em relação ao tempo de escoamento, se ele foi muito baixo, indica que o concreto está muito fluido; se o tempo for alto, indica que o concreto está muito coeso e deve, em ambos os casos, ser corrigido.

O Quadro 6 resume os valores do espalhamento (SF) em função da aplicação do CAA:

Quadro 6 – Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação (Ensaio de espalhamento)

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplos
SF 1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre; Concreto autoadensável bombeado; Estruturas que exigem uma curta distância de espalhamento horizontal do CAA.	Lajes; Revestimento de túneis; Estacas e certas fundações profundas.
SF 2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes.	Paredes, vigas, pilares e outras.
SF 3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).	Pilares-parede; Paredes-diafragma; Pilares.

Fonte: NBR 15823-1:2010

Normalmente se obtém melhor qualidade de acabamento da superfície com concreto da classe SF3 para aplicações em geral, porém é mais difícil controlar a resistência à segregação do que se verifica no concreto de classe SF2.

Em casos especiais pode ser especificado um limite maior que 850 mm para o espalhamento, porém é importante avaliar a necessidade de utilização de agregado graúdo com dimensão máxima característica menor que 12,5 mm e os cuidados necessários para evitar a segregação.

O Quadro 7 resume os valores do tempo de escoamento ( $t_{500}$ ) em função da aplicação do CAA:

Quadro 7 – Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação (t500)

Classe de viscosidade plástica aparente	T500 (s)	Aplicação	Exemplos
VS 1	$\leq 2$	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação;  Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes;  Paredes-diafragma;  Pilares-parede;  Indústria de pré-moldados;  Concreto aparente.
VS 2	$> 2$	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência a segregação;  Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	Vigas, pilares e outras.

Fonte: NBR 15823-1:2010

Como referência adicional, a maior parte dos pesquisadores recomendam valores entre 3 s a 7 s para o valor do tempo de escoamento (t500).

#### 2.6.2.2 Anel J

##### 2.6.2.2.1 Princípio do ensaio

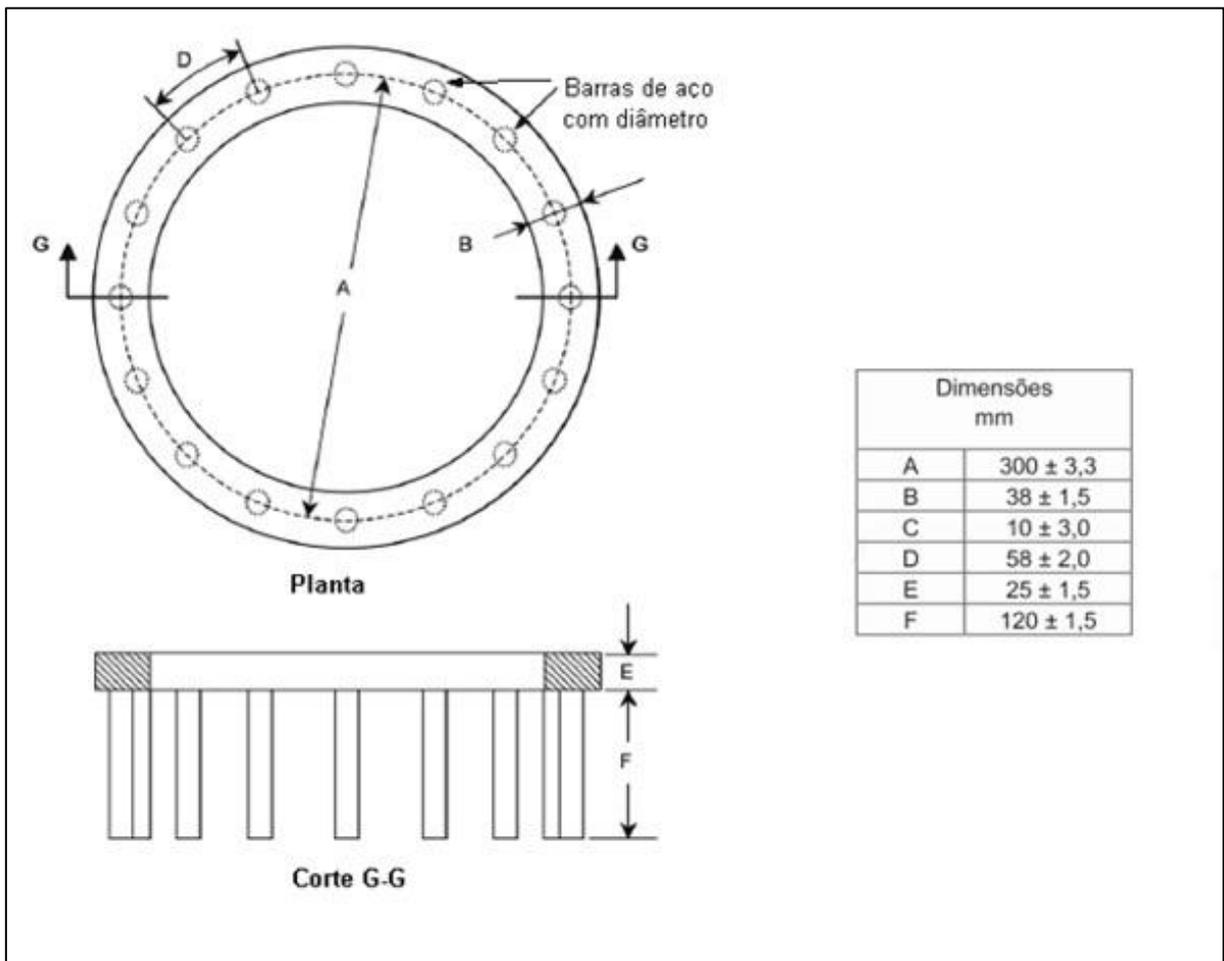
Os resultados obtidos no ensaio de espalhamento não proporcionam uma medida direta para avaliar a habilidade de o CAA passar entre as armaduras, por isso foi desenvolvido o ensaio do Anel J, que nada mais é do que um complemento do ensaio de espalhamento. Ele consiste em verificar se o concreto sob determinada força, provocada pelo seu peso próprio, é capaz de passar por obstáculos até atingir uma determinada dimensão. Sua principal função é medir a capacidade de fluidez do CAA e sua habilidade de passar por obstáculos. Pode-se ainda verificar visualmente a segregação da mistura, uma vez que, ao passar pelo anel, a argamassa não deve se separar do agregado graúdo (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

### 2.6.2.2.2 Equipamentos

Para a execução do ensaio do Anel J, além daqueles equipamentos já descritos no ensaio de espalhamento, a NBR 15823-3:2010 recomenda a utilização de um Anel J com as seguintes especificações:

- **Anel J:** metálico, com 300 mm de diâmetro e 120 mm de altura, constituído verticalmente por barras de aço de 100 mm de diâmetro a cada  $(58 \pm 2)$  mm, conforme Figura 45. Em casos particulares podem ser adotadas barras verticais com diâmetro e espaçamento definidos de acordo com a situação real da armação em que o CAA vai ser empregado, desde que o espaçamento não seja maior que três vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo.

Figura 45 – Anel J



Fonte: NBR 15823-3:2010

### 2.6.2.2.3 Execução do ensaio

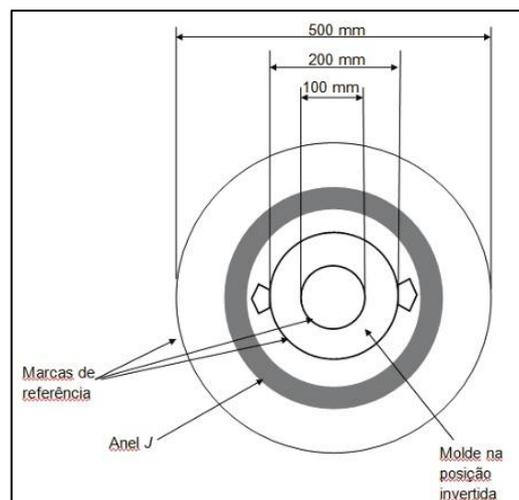
Segundo a NBR 15823-3:2010, o procedimento para a execução do ensaio do Anel J é praticamente o mesmo do ensaio de espalhamento. A diferença consiste em posicionar o anel J sobre a base, centrando-o com relação às marcas de referência e posicionar o molde na posição invertida sobre a base, centrando-o na marcação circular de diâmetro 100 mm, conforme Figuras 46 e 47.

Figura 46 – Vista em perspectiva do posicionamento do molde e do anel J



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Figura 47 – Vista em planta do posicionamento do molde e do anel J



Fonte: NBR 15823-3:2010

#### 2.6.2.2.4 Resultados e Conclusões

O resultado desse ensaio consiste nas seguintes determinações:

- O diâmetro final ( $d_f$ ), atingido pela massa de concreto, por meio da média aritmética de duas medidas (em milímetros) realizadas em direções perpendiculares;
- A diferença entre o diâmetro médio da massa de concreto obtido no ensaio de espalhamento (sem o anel J) e neste ensaio (com o anel J);
- Ocasionalmente pode ser informado o tempo de escoamento ( $t_{500J}$ ), determinado da mesma forma ao estabelecido no ensaio de espalhamento, considerando a interferência das barras de aço;
- Verificar visualmente se houve obstrução à passagem do concreto pelas barras do anel J, pois se o agregado graúdo se separar da argamassa do concreto quando fluir às extremidades ou quando passar pelo anel J, significa que a mistura não está coesa o suficiente, necessitando de ajustes.

O Quadro 8 resume os valores da diferença entre o diâmetro médio da massa de concreto obtido no ensaio de espalhamento (sem o anel J) e neste ensaio (com o anel J) em função da aplicação do CAA:

Quadro 8 – Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação (Anel J)

<b>Classe de habilidade passante</b>	<b>Anel J (mm)</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Exemplos</b>
PJ 1	25 mm a 50 mm com 16 barras de aço	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm.	Lajes; Painéis; Elementos de fundação.
PJ 2	0 a 25 mm com 16 barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm.	Vigas; Pilares; Tirantes; Indústria de pré-moldados.

Fonte: NBR 15823-1:2010

### 2.6.2.3 Caixa L

#### 2.6.2.3.1 Princípio do ensaio

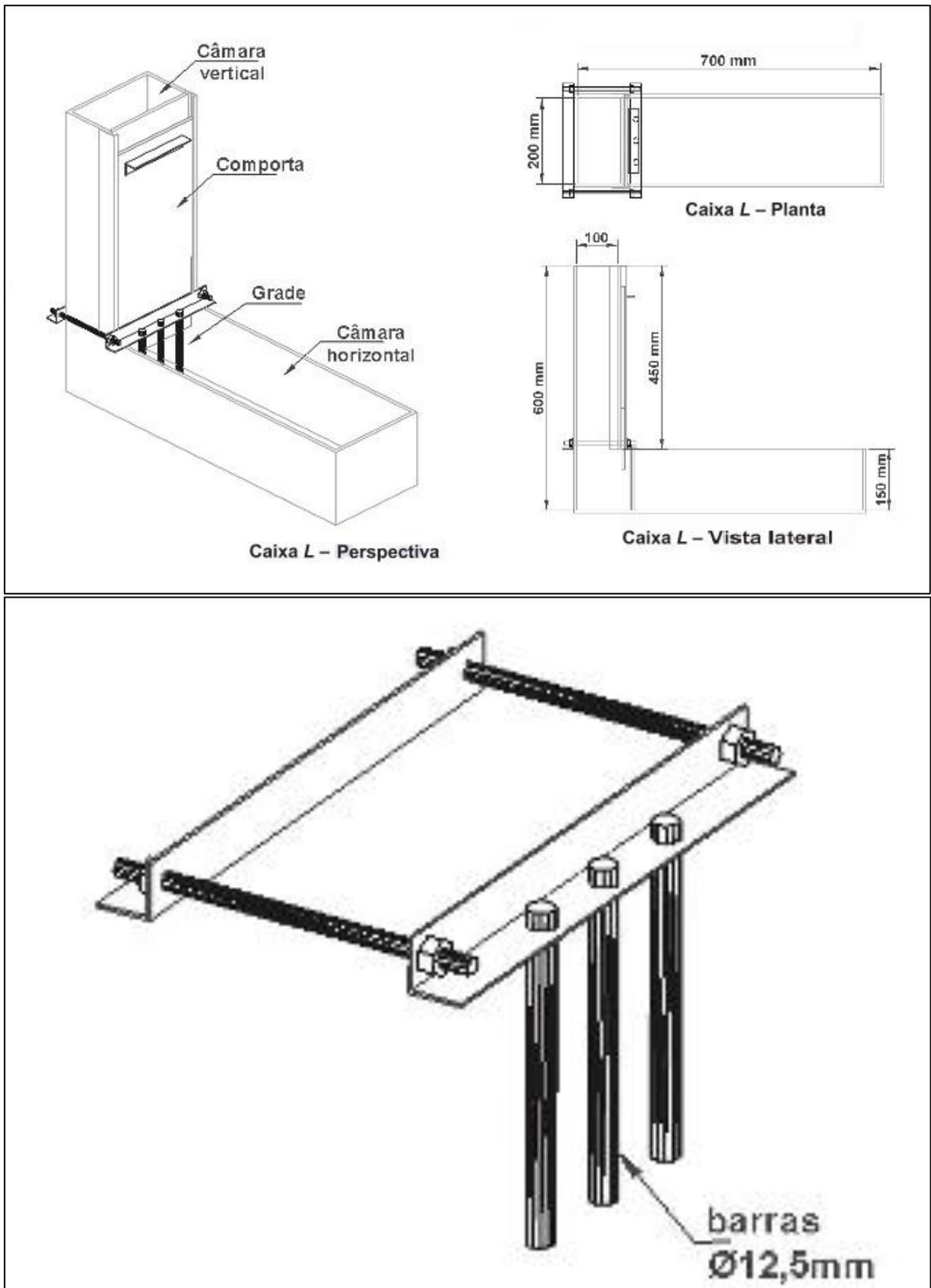
Segundo Fava e Fornasier (2004 apud ALENCAR, 2008), o ensaio da caixa-L foi desenvolvido na Suécia, diferentemente da maioria dos ensaios que foram no Japão. O ensaio da caixa L consiste em verificar se o concreto sob a força de seu próprio peso consegue passar por obstáculos, como armaduras, por exemplo, sem que ocorra bloqueio. Para Alencar e Helene (2006), a caixa L mostrou-se, em estudo experimental realizado, ser o mais exigente equipamento para a qualificação do CAA. Normalmente, se o concreto autoadensável é capaz de passar por esse ensaio, ele conseqüentemente irá atingir bons resultados nos demais testes de habilidade passante, tipo o anel J.

#### 2.6.2.3.2 Equipamentos

Segundo a NBR 15823-4:2010, para a execução do ensaio da caixa L, são necessários os seguintes equipamentos:

- **Caixa L:** caixa em seção retangular com perfil em forma de L, constituída por um compartimento vertical e outro horizontal, conforme detalhamento apresentado na Figura 48. A caixa deve ser confeccionada preferencialmente em chapa metálica com espessura mínima de 1,5 mm. Outros materiais podem ser utilizados na confecção da caixa, desde que não absorvam água e nem provoquem atrito com o concreto. A caixa deve apresentar superfícies planas e não deformar durante o ensaio. A caixa L deve ser provida de dispositivos em forma de grade, conforme Figura 48, que podem conter duas ou três barras metálicas lisas com diâmetro de  $(12,5 \pm 0,2)$  mm. As barras devem ser equidistantes entre si e também com relação às laterais da caixa L. Quando forem utilizadas duas barras o espaçamento deve ser de  $(58 \pm 1)$  mm e no caso de três barras  $(40 \pm 1)$  mm. O dispositivo deve ser posicionado verticalmente na caixa L, conforme Figura 48. Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), o espaçamento e a bitola das barras de aço dependem, basicamente, das condições reais da estrutura em que o concreto será aplicado. Para eles, embora muitos autores e a própria norma dite o espaçamento e a bitola das barras de aço, o mais correto seria padronizar apenas a parte fixa do equipamento, enquanto as armaduras seriam escolhidas de acordo com as condições reais da estrutura que o CAA será aplicado;

Figura 48 – Detalhamento da caixa L



Fonte: NBR 15823-4:2010

- **Recipiente:** capacidade de mais de 15 L e feito de material que não absorva água e nem provoque atrito com o concreto. Deve permitir verter o concreto na caixa L de uma só vez;
- **Colher de pedreiro:** para retirada do excesso de concreto da superfície do compartimento vertical da caixa L;
- **Régua metálica:** de no mínimo 1000 mm de comprimento, graduada com resolução de 1 mm;
- **Cronômetro:** com resolução mínima de 0,1 s.

#### 2.6.2.3.3 Execução do ensaio

Segundo a NBR 15823-4:2010, primeiramente deve-se realizar a limpeza da caixa L com água. A seguir umedecer as superfícies internas com água ou aplicar desmoldante em uma camada fina e homogênea. Fechar a comporta e nivelar a caixa L sobre uma superfície plana.

Com uma amostra representativa de concreto de aproximadamente 15 L e em tempo não superior a 2 min após sua coleta, a câmara vertical da caixa L deve ser preenchida totalmente de forma uniforme e sem adensamento.

O excesso de concreto da superfície deve ser retirado com o auxílio da colher de pedreiro, que deve regularizar a superfície do concreto. Após 30 s a 60 s do final do preenchimento da câmara vertical, deve ser efetuada a abertura da comporta de forma rápida, uniforme e sem interrupção, permitindo o escoamento do concreto para a câmara horizontal.

#### 2.6.2.3.4 Resultados e Conclusões

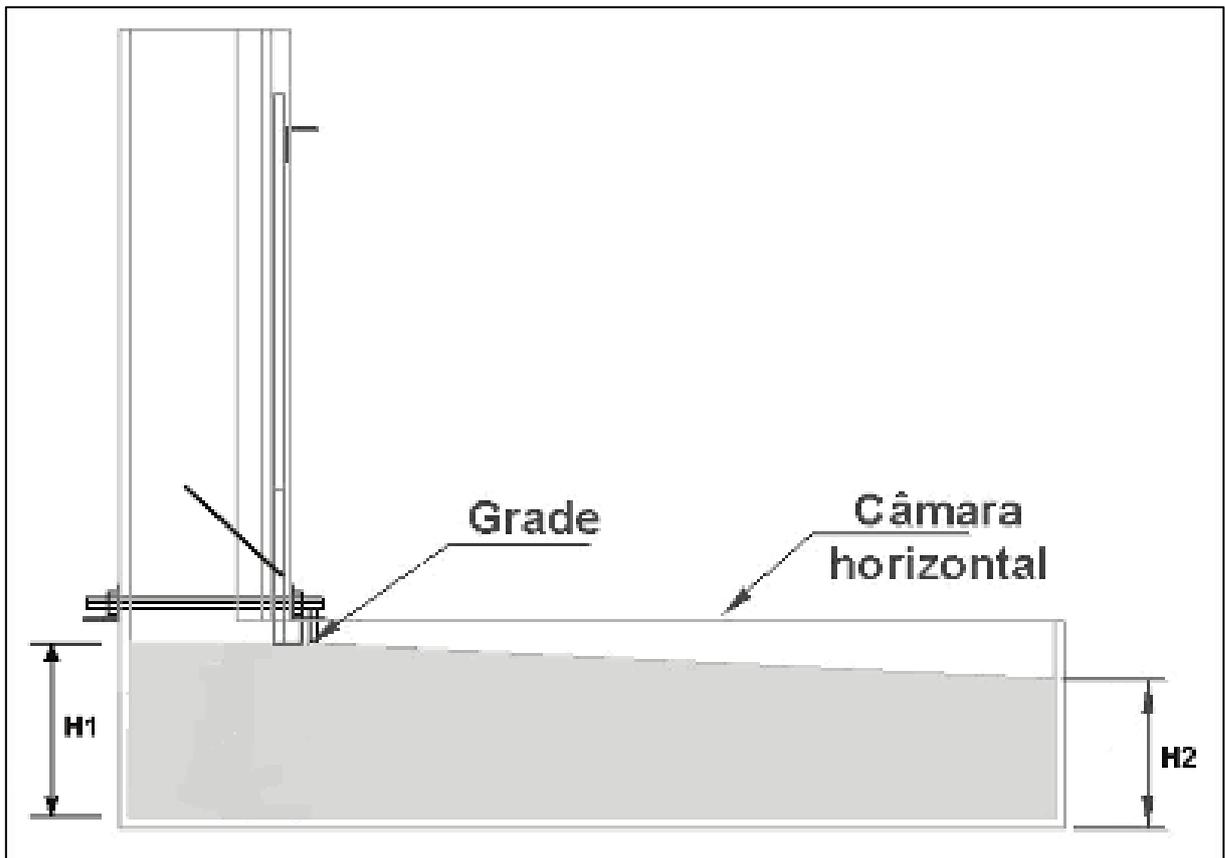
O resultado desse ensaio consiste nas seguintes determinações:

- Cessado o escoamento, medir as alturas H1 e H2, conforme Figura 49, e calcular a habilidade passante (HP), isso é, a razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades da câmara horizontal usando a Equação 1;

$$\text{HP} = \frac{H2}{H1}$$

(Equação 1)

Figura 49 – Indicação das alturas H1 e H2



Fonte: NBR 15823-4:2010

- Ocasionalmente, pode ser informado o tempo em que o concreto escoa a distância de 20 cm ( $T_{L20cm}$ ) e 40 cm ( $T_{L40cm}$ ) na câmara horizontal. Esse resultado não é obrigatório, pois pelos estudos realizados para o desenvolvimento da NBR 15823-4:2010, verificou-se que essa medida não é operacional, particularmente para concretos de baixa viscosidade, pois se necessita de duas marcações de tempo em um intervalo muito curto. Além disso, o foco do ensaio é a habilidade passante e não a viscosidade do concreto;

- Verificar visualmente se houve obstrução à passagem do concreto pelas barras da caixa L, pois havendo segregação: os agregados graúdos ficarão acumulados entre as barras de aço; mais tempo o concreto vai demorar para chegar nas distâncias de 20 cm e 40 cm, onde a pasta chegará primeiro que o agregado; e menos nivelado o concreto ficará. Na Figura 50, observa-se um concreto com alto grau de segregação:

Figura 50 – Concreto com auto grau de segregação



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

O Quadro 9 resume os valores da razão entre H2/H1 em função da aplicação do CAA:

Quadro 9 – Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação (Caixa L)

<b>Classe de habilidade passante</b>	<b>Caixa L (H2/H1)</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Exemplos</b>
PL 1	$\geq 0,80$ , com duas barras de aço	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm.	Lajes; Painéis; Elementos de fundação.
PL 2	$\geq 0,80$ , com três barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm.	Vigas; Pilares; Tirantes; Indústria de pré-moldados.

Fonte: NBR 15823-1:2010

Como referência adicional, alguns pesquisadores recomendam valores menores que 2 s para o valor do tempo de escoamento ( $T_{L20cm}$ ) e 4 s para o valor do tempo de escoamento ( $T_{L40cm}$ ).

### 2.6.2.4 Funil V

#### 2.6.2.4.1 Princípio do ensaio

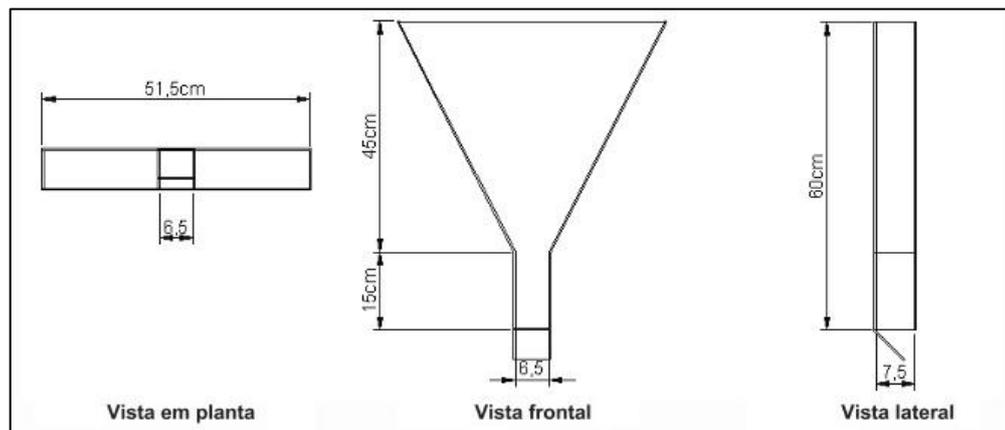
Segundo Gomes e Barros (2009), o ensaio do funil V foi desenvolvido na Universidade de Tóquio para simular a capacidade de passagem do CAA através do estreitamento de uma seção, apenas sob a ação de seu próprio peso. Esse ensaio determina qualitativamente a viscosidade do concreto autoadensável, a partir do registro do tempo em que concreto leva para escoar nesse aparelho. Esse ensaio só se aplica ao concreto autoadensável preparado com agregado graúdo de dimensão máxima característica menor ou igual a 20 mm. Depois do ensaio com o cone de Abrams para determinação do tempo de escoamento (slump flow  $t_{500}$ ), o Funil V é o mais utilizado nos laboratórios e no local da construção para verificar a fluidez do concreto.

#### 2.6.2.4.2 Equipamentos

Segundo a NBR 15823-5:2010, para a execução do ensaio da do Funil V, são necessários os seguintes equipamentos:

- **Funil V:** deve ser confeccionado em chapa acrílica com espessura de 5 mm ou em chapa metálica de pelo menos 1,5 mm de espessura, em forma de funil de bases retangulares, conforme detalhamento apresentado na Figura 51. O material usado na sua confecção deve ser um material que não absorva água e nem provoque atrito com o concreto;

Figura 51 – Detalhamento do funil V



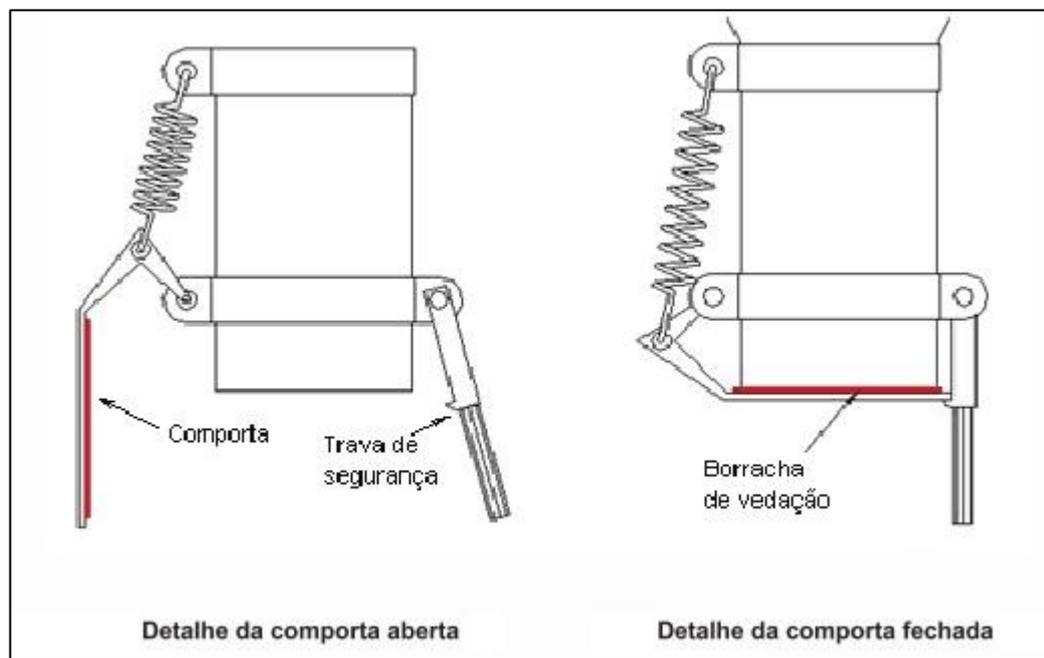
Fonte: NBR 15823-5:2010

- **Recipiente:** metálico e com capacidade de pelo menos 12 L para receber o concreto após sua passagem pelo funil V;
- **Concha metálica:** para preenchimento do funil V;
- **Colher de pedreiro:** para retirada do excesso de concreto da superfície do funil V;
- **Cronômetro:** com resolução mínima de 0,1 s.

#### 2.6.2.4.3 Execução do ensaio

Segundo a NBR 15823-5:2010, primeiramente deve-se realizar a limpeza e o umedecimento interno do funil com água. Fechar a comporta do funil e apoiá-lo em superfície rígida, plana e horizontal (Figura 52).

Figura 52 – Detalhe da comporta do funil V



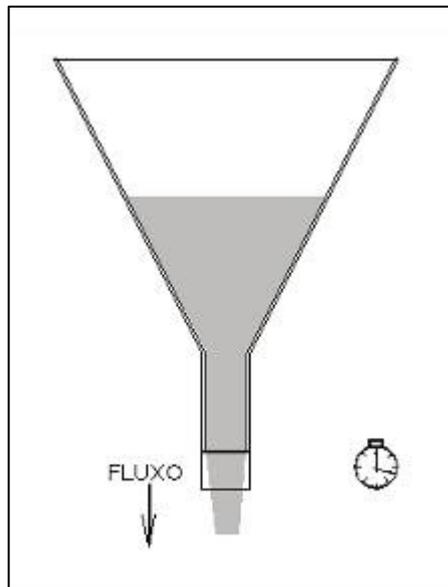
Fonte: NBR 15823-5:2010

Com uma amostra representativa de concreto de aproximadamente 12 L e em tempo não superior a 5 min após sua coleta, o funil V deve ser preenchido totalmente, de forma uniforme, sem adensamento e sem interrupção.

O recipiente deve ser posicionado sob o funil V para coleta do concreto. O excesso de concreto da superfície do funil V deve ser retirado com o auxílio da colher de pedreiro, que deve regularizar a superfície do concreto. A abertura da comporta deve ser

efetuada em um tempo não superior a 30 s após o final de seu preenchimento. O cronômetro deve ser acionado simultaneamente à abertura da comporta e parado quando todo o concreto houver escoado. O intervalo de tempo para escoamento completo da massa do concreto ( $T_{30\text{seg}}$ ) deve ser registrado (Figura 53).

Figura 53 – Execução do ensaio do funil V



Fonte: NBR 15823-5:2010

Em casos especiais, com solicitação expressa, pode ser efetuada a medida do tempo de escoamento do concreto após 5 min do preenchimento do funil V ( $T_{5\text{min}}$ ).

Imediatamente após a primeira medida do tempo de escoamento,  $T_{30\text{seg}}$ , a comporta deve ser fechada e o funil deve ser novamente preenchido com o concreto coletado, com auxílio do recipiente. Nesta etapa não há necessidade de limpeza ou umedecimento da superfície interna do funil.

O preenchimento deve ser efetuado sem adensamento, de forma uniforme e sem interrupção, e devem ser seguidos os passos descritos anteriormente.

A comporta deve ser aberta 5 min após o preenchimento, sendo registrado o intervalo de tempo para o escoamento total da massa de concreto ( $T_{5\text{min}}$ ).

#### 2.6.2.4.4 Resultados e Conclusões

O resultado desse ensaio consiste nas seguintes determinações:

- Tempo de escoamento  $T_{30\text{seg}}$ : primeira determinação do intervalo de tempo para escoamento completo da massa do concreto no funil V;
- Tempo de escoamento  $T_{5\text{min}}$ : segunda determinação do intervalo de tempo para escoamento completo da massa do concreto no funil V, realizada após 5 min que o concreto utilizado no primeiro escoamento preencheu novamente o funil V. Esse tempo de escoamento  $T_{5\text{min}}$  serve como parâmetro para que se teste a resistência à segregação, pois se o CAA estiver segregando, o tempo de escoamento aumentará significativamente.

O Quadro 10 resume o valor do tempo de escoamento em função da aplicação do CAA:

Quadro 10 – Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação (Funil V)

Classe de viscosidade plástica aparente	Funil V (s)	Aplicação	Exemplos
VF 1	$\leq 8$	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação;  Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes;  Paredes-diafragma;  Pilares-parede;  Indústria de pré-moldados;  Concreto aparente.
VF 2	9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência a segregação;  Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	Vigas, pilares e outras.

(Fonte: NBR 15823-1:2010).

Como referência adicional, a maior parte dos pesquisadores recomendam valores entre 6 s a 12 s para o valor do tempo de escoamento ( $T_{30\text{seg}}$ ) e um acréscimo de no máximo 3 segundos para o valor do tempo de escoamento ( $T_{5\text{min}}$ ).

### 2.6.2.5 Coluna de Segregação

#### 2.6.2.5.1 Princípio do ensaio

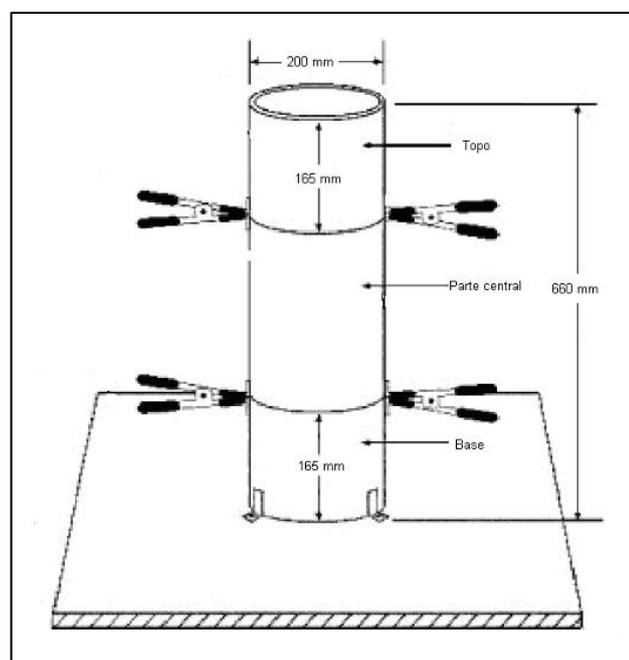
Esse ensaio consiste em determinar a resistência à segregação do concreto autoadensável, pela diferença das massas de agregado graúdo existentes no topo e na base da coluna de segregação. Esse método de ensaio não é aplicável ao concreto autoadensável contendo agregado leve ou fibras (NBR 15823-6:2010).

#### 2.6.2.5.2 Equipamentos

Segundo a NBR 15823-6:2010, para a execução do ensaio da coluna de segregação, são necessários os seguintes equipamentos:

- **Coluna de segregação:** constitui-se de um tubo de PVC, de diâmetro nominal de 200 mm de diâmetro e 660 mm de altura total, seccionado em três partes. O topo e a base devem ter altura de 165 mm e a parte central do tubo deve ter altura de 330 mm. Estas seções são unidas por grampos, presilhas de fixação ou fita adesiva, conforme Figura 54. O conjunto deve ser adequadamente apoiado em uma base que garante um perfeito nivelamento;

Figura 54 – Coluna de segregação



Fonte: NBR 15823-6:2010

- **Concha metálica:** para preenchimento da coluna de segregação;
- **Colher de pedreiro:** para retirada do excesso de concreto da superfície do aparato;
- **Cronômetro:** com resolução mínima de 0,1 s;
- **Peneira:** abertura da malha de 5 mm;
- **Chapa metálica;**
- **Pano ou papel absorvente.**

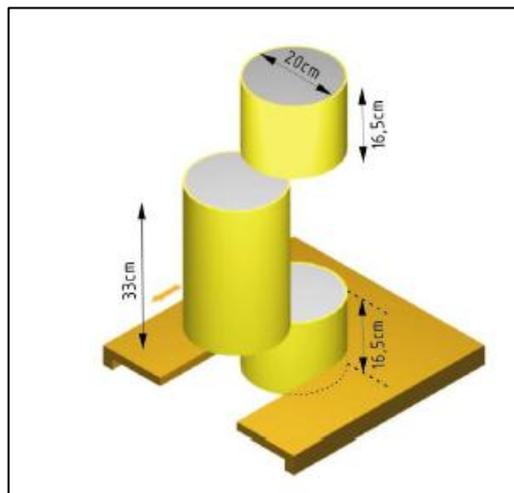
#### 2.6.2.5.3 Execução do ensaio

Segundo a NBR 15823-6:2010, primeiramente deve-se realizar uma adequada limpeza e o umedecimento interno da coluna de segregação com água, esta deve ser apoiada em superfície rígida e plana, de forma a permitir a colocação do concreto.

Com uma amostra representativa de concreto de aproximadamente 20 L e em tempo não superior a 5 min após sua coleta, a coluna de segregação deve ser preenchida totalmente, de forma uniforme, sem adensamento e sem interrupção. O excesso de concreto da superfície deve ser retirado com o auxílio da colher de pedreiro, que deve regularizar a superfície do concreto.

Aproximadamente 20 min após a moldagem devem ser retiradas porções de concreto do topo e da base da coluna (Figura 55). Esse procedimento deve ser realizado com o auxílio de uma chapa metálica que deve ser colocada entre a união das seções do tubo, para facilitar a extração.

Figura 55 – Desenho esquemático da retirada das porções de concreto da coluna de segregação



Fonte: Alencar (2008)

Cada amostra deve ser lavada individualmente sobre uma peneira com abertura de malha de 5 mm, de forma a remover totalmente a argamassa, limpando os agregados graúdos. Os agregados graúdos devem ser submetidos a uma secagem superficial, com utilização de pano ou papel absorvente (condição saturado superfície seca, SSS) e em seguida devem ser pesados, obtendo-se a massa da porção de concreto da base ( $m_b$ ) e da porção de concreto do topo ( $m_t$ ).

#### 2.6.2.5.4 Resultados e Conclusões

O resultado desse ensaio consiste na seguinte determinação:

- A resistência à segregação do concreto é determinada em função da diferença percentual entre a quantidade de agregado graúdo da porção de concreto retirada da base e do topo da coluna de segregação pela Equação 2:

$$\boxed{SR = \frac{2(m_b - m_t)}{m_b + m_t} 100} \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

**SR:** Porcentagem de segregação (%);

**$m_b$ :** é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada da base da coluna, expressa em gramas (g);

**$m_t$ :** é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada do topo da coluna, expressa em gramas (g);

Caso  $m_t$  seja maior ou igual a  $m_b$ , a segregação é nula.

Se o valor para SR for muito elevado, significa que o concreto está segregando e precisa ser corrigido para não acarretar problemas na estrutura.

O Quadro 11 resume o valor da porcentagem de segregação (SR) em função da aplicação do CAA:

Quadro 11 – Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação (Coluna de Segregação)

Classe de resistência à segregação	Porcentagem de segregação (%)	Distância a ser percorrida (m)	Espaçamento entre armaduras (mm)	Exemplos
SR 1	$\leq 20$	$< 5$	$> 80$	Lajes de pequena espessura; Estruturas convencionais de pouca complexidade.
SR 2	$\leq 15$	$> 5$	$> 80$	Elementos de fundações profundas;
		$< 5$	$< 80$	Pilares, paredes e elementos estruturais complexos; Elementos pré-moldados.

Fonte: NBR 15823-1:2010

A classe de resistência à segregação SR 2 ou um valor-limite mais rigoroso pode ser especificado se a resistência ou a qualidade da superfície for particularmente crítica.

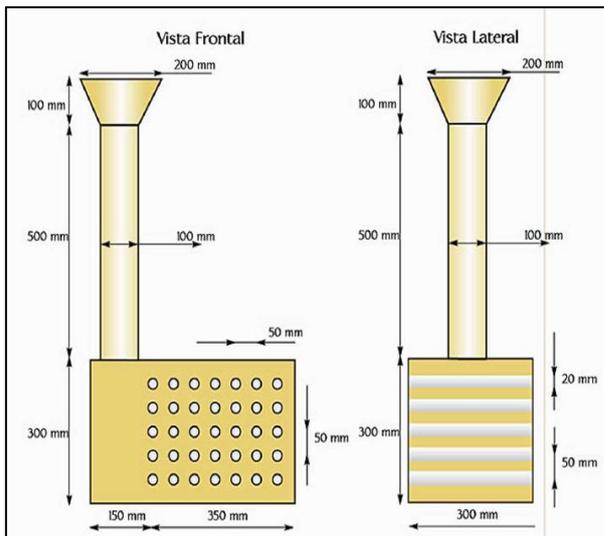
Quando a distância a ser percorrida pelo concreto for maior que 5 m e o espaçamento inferior a 80 mm, deve ser especificado um valor de SR menor que 10 %.

#### 2.6.2.5 Outros equipamentos

Além dos ensaios citados ainda existem outros tipos de equipamentos de análise da trabalhabilidade do CAA.

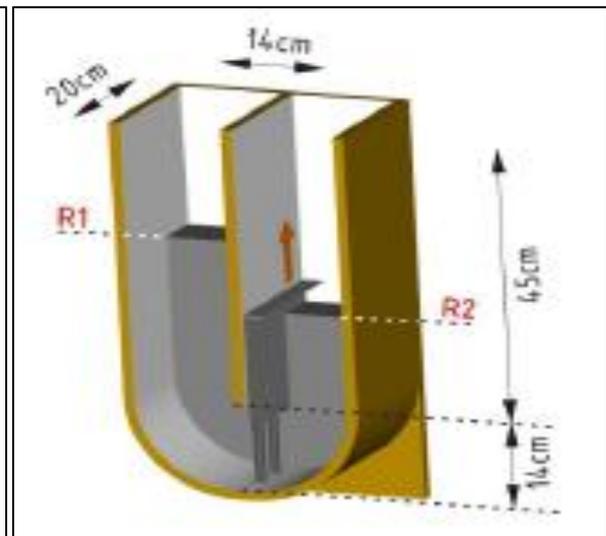
Para avaliação da habilidade passante destaca-se o ensaio da Fill-Box (Figura 56) e a U-box (Figura 57):

Figura 56 – Fill-box



Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

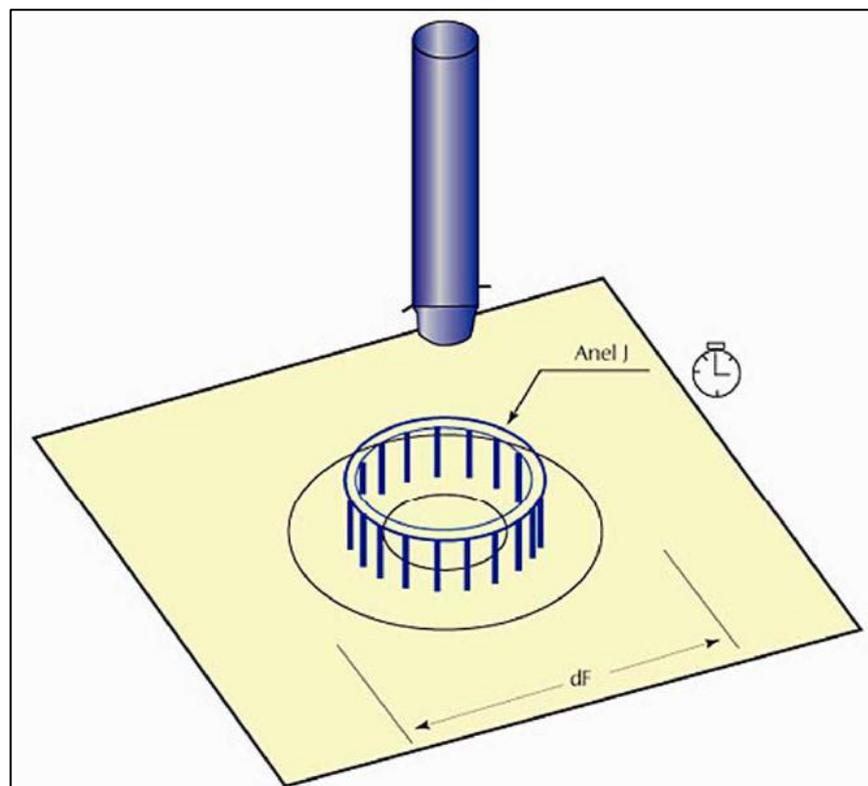
Figura 57 – U-box



Fonte: Alencar (2008)

Para avaliar a viscosidade, cita-se o Orimet test (Figura 58):

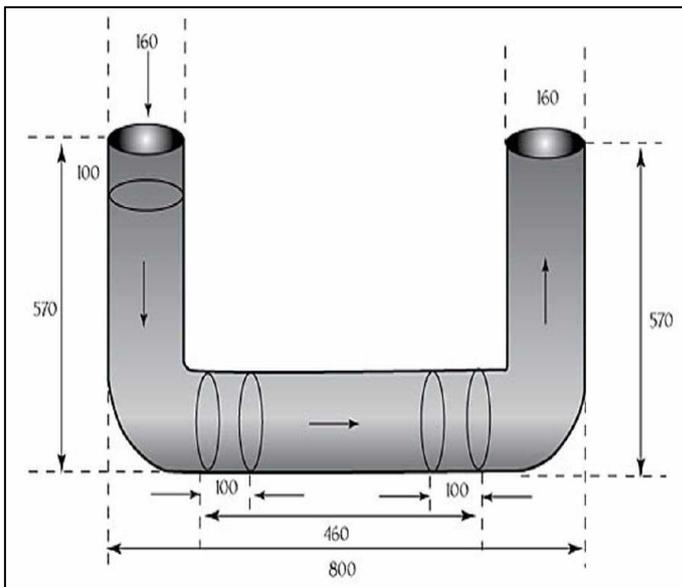
Figura 58 – Oriment test



Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

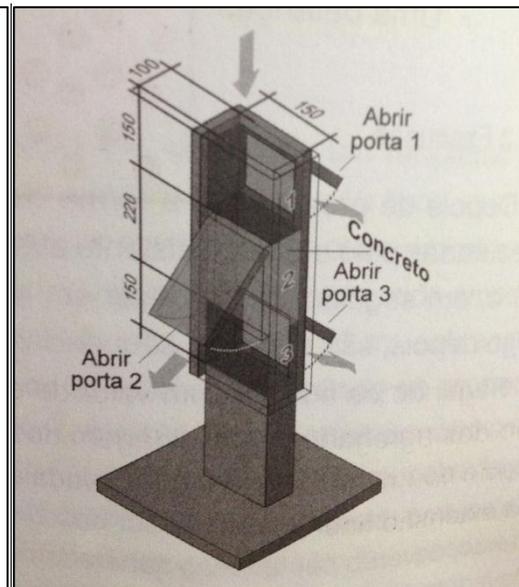
Para os ensaios de resistência à segregação, podem ser citados o U-shaped pipe (Figura 59) e a Coluna de Rooney (Figura 60):

Figura 59 – U-shaped pipe



Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

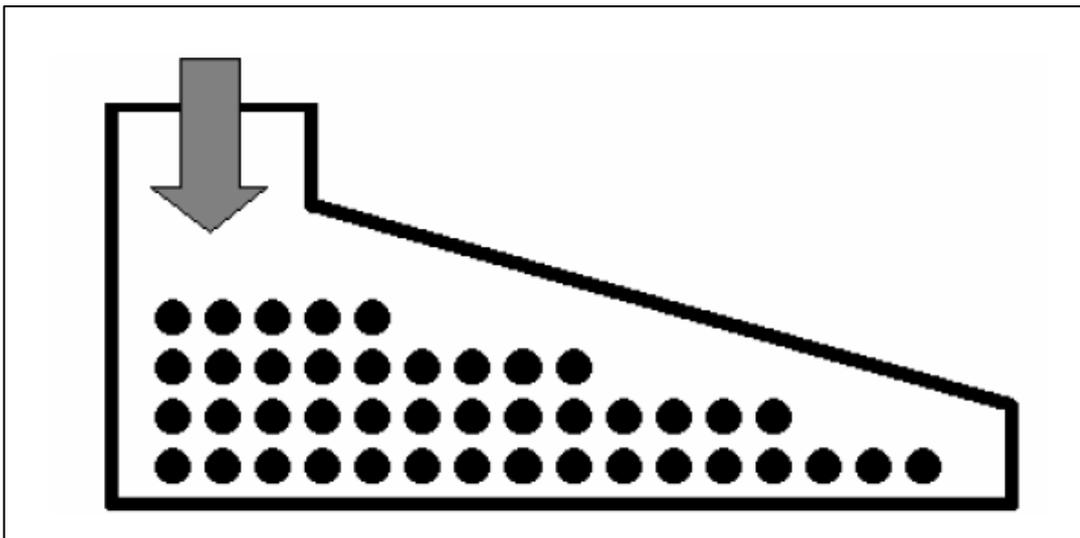
Figura 60 – Coluna de Rooney



Fonte: Gomes; Barros (2009)

A capacidade de enchimento é muitas vezes avaliada em modelos à escala real, ou pouco reduzida, de elementos ou partes de elementos das estruturas de concreto armado (Figura 61).

Figura 61 – Modelo de um elemento de fundação



Fonte: Nunes (2001)

Dependendo da complexidade da obra, fazer um modelo à escala real garantirá avaliações mais precisas que garantam a qualidade da peça concretada. A capacidade de enchimento é avaliada com base na observação e/ou medida do comportamento do

movimento do concreto, como exemplo de pontos a serem observados temos: a inclinação da superfície livre do escoamento, velocidade, deformação final, distribuição dos agregados, existência de defeitos, etc.

### 2.6.3 Procedimentos para ajustar os resultados dos ensaios no estado fresco

Os diferentes ensaios para caracterização de um CAA no estado fresco, poderão apresentar resultados não esperados por diversas causas. A causa poderá ser uma variação das características do cimento, características das adições, granulometria dos agregados, teor de umidade dos agregados, temperatura, procedimento de mistura dos materiais na betoneira, o tempo para realização de cada ensaio, etc. O Quadro 12 apresenta possíveis ações corretivas a partir das causas identificadas nos resultados não satisfatórios dos diferentes ensaios.

Quadro 12 – Possíveis ações corretivas a partir do observado nos ensaios

Possível ação em caso de:		Efeito sobre a:					
		habilidade preencher	habilidade passante	resistência à segregação	resistência compressão	retração	fluência
<b>a</b>	<b>alta viscosidade</b>						
a1	aumentar o teor de água	+	+	-	-	-	-
a2	aumentar o volume de pasta	+	+	+	+	-	-
a3	aumentar a dosagem de SP	+	+	-	+	0	0
<b>b</b>	<b>baixa viscosidade</b>						
b1	diminuir o teor de água	-	-	+	+	+	+
b2	reduzir o volume de pasta	-	-	-	-	+	+
b3	reduzir a dosagem de SP	-	-	+	-	0	0
b4	aumentar a dosagem de VMA	-	-	+	0	0	0
b5	usar adições mais finas	+	+	+	0	-	-
b6	usar areia mais fina	+	+	+	0	-	0
<b>c</b>	<b>alta tensão de cisalhamento</b>						
c1	aumentar a dosagem de SP	+	+	-	+	0	0
c2	aumentar o volume de pasta	+	+	+	+	-	-
c3	aumentar o volume de argamassa	+	+	+	+	-	-
<b>d</b>	<b>segregação</b>						
d1	aumentar o volume de pasta	+	+	+	+	-	-
d2	aumentar o volume de argamassa	+	+	+	+	-	-
d3	diminuir o teor de água	-	-	+	+	+	+
d4	usar adições mais finas	+	+	+	0	-	-
<b>e</b>	<b>perda rápida de trabalhabilidade</b>						
e1	usar cimento de reação mais lenta	0	0	-	-	0	0
e2	aumentar dosagem de retardador	0	0	-	-	0	0
e3	usar diferente SP	?	?	?	?	?	?
e4	substituir cimento por filer	?	?	?	?	?	?
<b>f</b>	<b>bloqueio</b>						
f1	reduzir a DMC do agregado	+	+	+	-	-	-
f2	aumentar o volume de pasta	+	+	+	+	-	-
f3	aumentar o volume de argamassa	+	+	+	+	-	-
<b>g</b>	<b>resultado falso</b>						
g1	verificar as condições do ensaio	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

+	geralmente propicia melhor resultado para o concreto
0	normalmente não tem resultado significativo
-	geralmente propicia pior resultado para o concreto
?	efeito não previsível
N/A	não aplicável

## 2.7 CAA NO ESTADO ENDURECIDO

Descrever as propriedades mecânicas e de durabilidade do CAA no estado endurecido nada mais é do que explicar o conhecimento já obtido em tecnologia de concretos. Essas propriedades são, basicamente, resultado das decisões tomadas na dosagem e mistura do material (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), o CAA apresentará fissuração de secagem e alto calor de hidratação se for dosado com alto consumo de cimento. Terá sua pega inicial retardada se o teor do aditivo superplastificante for excessivo. Resultará em um módulo de elasticidade baixo e uma alta probabilidade de retração plástica se for dosado com baixo consumo de agregado graúdo. Porém, esses e outros problemas podem acontecer com o CAA, o CCV e qualquer outra mistura que contenha cimento Portland em sua composição. Assim como em todos os tipos de concreto, também na dosagem dos CAA, alguns cuidados precisam ser tomados para que não ocorram futuras manifestações patológicas.

A grande vantagem do CAA é a garantia de um produto final endurecido com qualidade, desde que seja bem dosado e atenda às especificações de projeto. Deve apresentar boas características no estado fresco e ter lançamento e cura adequados. Já a qualidade do concreto convencional depende, largamente, do processo de adensamento ou compactação. (MANUEL, 2005).

Em relação às propriedades do CAA no estado endurecido, pode-se citar:

- **Microestrutura:** homogênea, devido ao uso de grande quantidade de finos, que vão proporcionar uma boa distribuição granulométrica dos sólidos, aumentando o empacotamento das partículas e promovendo o aumento da capacidade de retenção de água, favorecendo o processo de nucleação durante a hidratação do cimento;
  
- **Permeabilidade:** menos poroso em relação ao concreto convencional, pois os vazios no concreto são causados na maioria das vezes por falhas no adensamento e por exsudação, estes minimizados com o uso do CAA;
  
- **Resistência à compressão e tração:** melhor em relação ao concreto convencional, sendo favorecida pelas baixas relações a/c e pelo emprego de aditivos superplastificantes;

- **Módulo de elasticidade:** tende a sofrer uma redução, pois é bastante influenciado pelo módulo de elasticidade de cada material, especialmente dos agregados graúdos, que no CAA são empregados em menor quantidade. Segundo Manuel (2005), o módulo de elasticidade do CAA começa a diminuir com o aumento do teor de argamassa e se torna inferior que o do CCV a partir de teores de 65%;

- **Aderência:** pode ser melhor ou igual à do concreto convencional, sendo favorecida pela baixa tendência de segregação e pela melhor capacidade de retenção de água do CAA;

- **Durabilidade:** Devido à melhora promovida na microestrutura do concreto, espera-se que o CAA apresente boas características de durabilidade.

## 2.8 MÉTODOS DE DOSAGEM

Segundo Gomes e Barros (2009), os métodos de dosagem do CAA diferem dos utilizados para os concretos convencionais, porém, no geral, também são empíricos. São fundamentados em princípios que têm como meta o atendimento a propriedades que estabelecem uma relação entre a habilidade das misturas de fluir com facilidade nas fôrmas, independentemente de sua complexidade e dificuldade, e a estabilidade das misturas, que garante a ausência de segregação.

A dosagem do concreto deve estar relacionada com a proporção entre os materiais constituintes do concreto, a fim de se obter de maneira econômica, resistência e durabilidade. Algumas exigências devem ser atendidas ao se determinar uma dosagem para o concreto, tais como: especificações de projeto, condições de exposição das estruturas, materiais disponíveis na região, técnicas de execução e o custo (HELENE e TERZIAN, 1993).

Diferentes metodologias de dosagem para a obtenção do CAA são encontradas na literatura. Uma das primeiras e mais conhecida teoria foi desenvolvida no Japão. A partir do primeiro protótipo do CAA surgiram diversos métodos de dosagens.

A seguir será descrito o primeiro método de dosagem para o CAA e alguns métodos nacionais amplamente difundidos, com ênfase no método de dosagem proposto por Tutikian e Dal Molin (2007), metodologia esta adotada para a confecção do CAA deste trabalho.

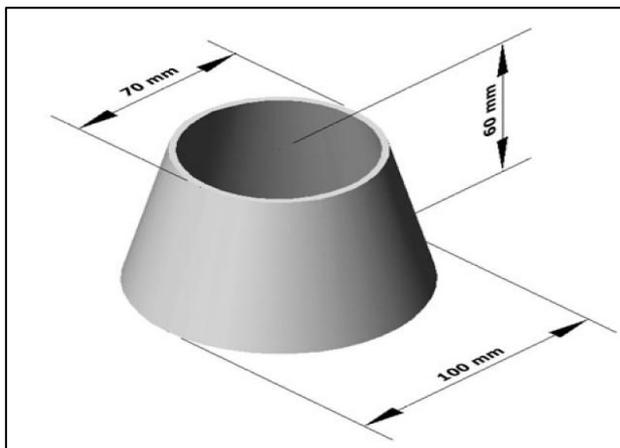
### 2.8.1 Método de Okamura et al. (1995)

Esse método de dosagem é baseado em pesquisas realizadas pelo Prof. Okamura, em 1986, na Universidade de Tóquio, e é reconhecido na literatura como o primeiro método de proporção de mistura proposto para o CAA. O protótipo deste método foi primeiramente completado em 1988 e depois aperfeiçoado em 1995 (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Segundo Gomes e Barros (2009), os procedimentos aplicados no método para determinação das dosagens dos componentes na mistura são:

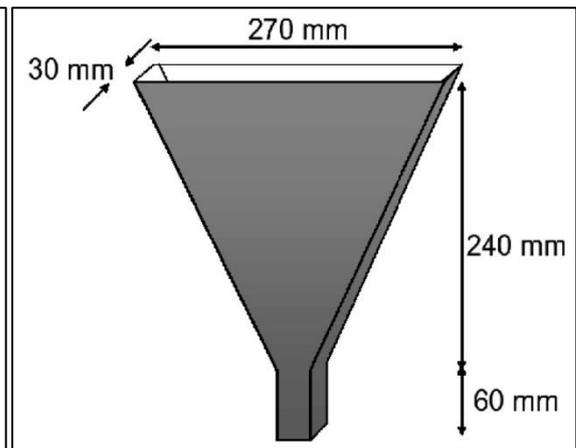
- 1º passo – Fixar os volumes de agregados graúdos (50% do volume total de concreto) e miúdos (40% do volume total de argamassa);
- 2º passo – Assumir a relação água/materiais finos (cimento, pozolanas, fíler), em volume, de 0,9 a 1,0, dependendo das propriedades dos materiais finos;
- 3º passo – Determinar experimentalmente a dosagem de superplastificante / materiais finos ( $S_p/m_f$ ) e a relação água / materiais finos ( $V_a/V_f$ ), em argamassa (teste de espalhamento e funil V em escala reduzida, conforme Figuras 62 e 63), que atendam as propriedades de fluidez e viscosidade. O resultado do ensaio de espalhamento é a média dos dois diâmetros de espalhamento da argamassa ( $G_m$ ) e o resultado do ensaio do funil V é o tempo de escoamento da argamassa ( $R_m$ );

Figura 62 – Mini-slump para o ensaio de espalhamento na argamassa



Fonte: Cavalcanti (2006)

Figura 63 – Modelo reduzido de funil-V para o ensaio na argamassa

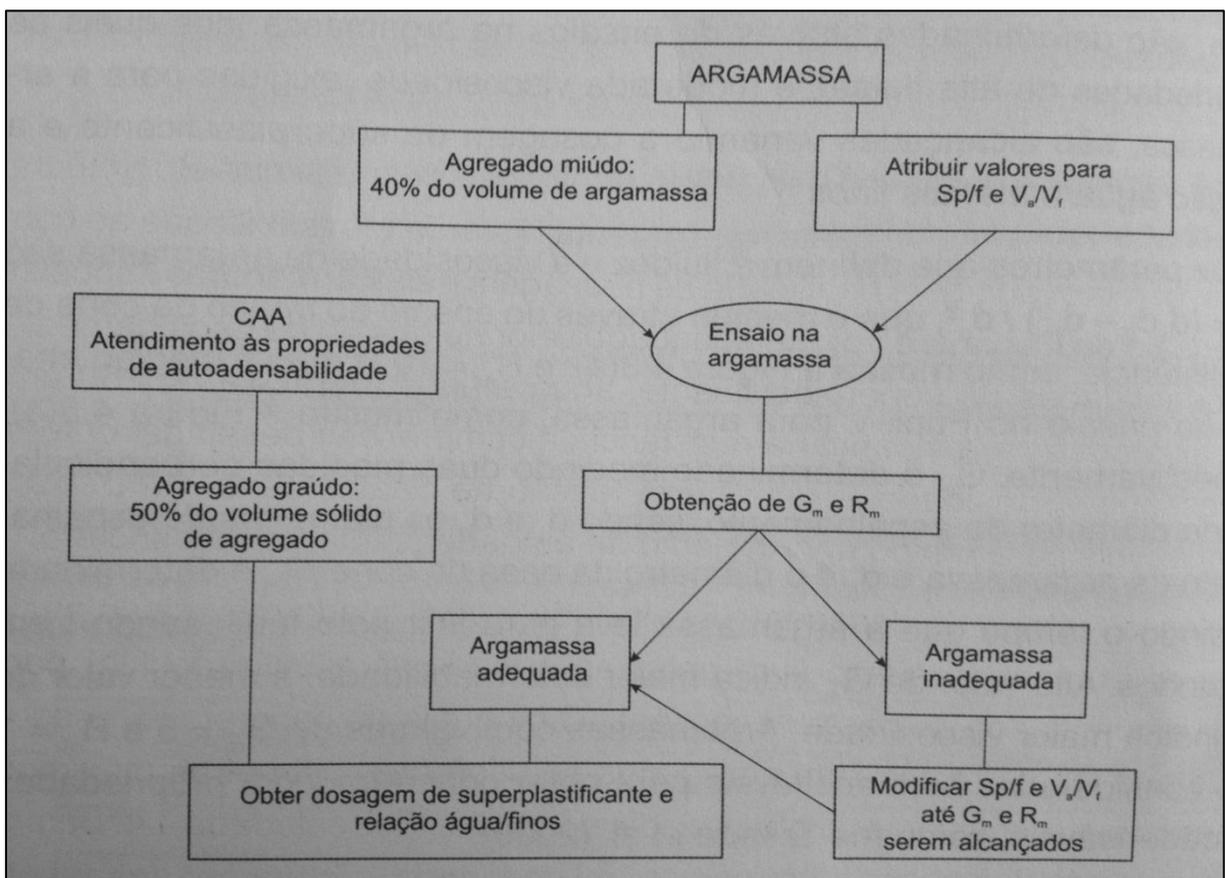


Fonte: Okamura; Ouchi (2003)

▪ 4º passo – Testar a autoadensabilidade do concreto, uma vez definida a proporção do superplastificante e a relação água/materiais finos, em ensaios do tipo U-box, espalhamento e funil V. Se necessário ainda são realizados ajustes no teor do aditivo superplastificante.

Na Figura 64, apresenta-se um resumo da metodologia aplicada no método de dosagem proposto por Okamura et al.

Figura 64 – Resumo das etapas do método de dosagem de Okamura et al.



Fonte: Gomes; Barros (2009)

Segundo Tutikian (2004), as considerações iniciais de Okamura em 1986, que posteriormente transformar-se-iam em um método de dosagem, em 1995, foram muito importantes para o desenvolvimento do moderno concreto autoadensável. Estas considerações foram a base do estudo e sem elas, provavelmente, não existiria atualmente este tipo de mistura. Mas são apenas os primeiros passos, não devendo ser mais utilizadas, pois não há como dosar um concreto apenas com limites superiores de quantidade e com termos altamente abrangentes, como alta dosagem de aditivo superplastificante e baixa relação a/c. Este método

também não considera a utilização de finos pozolânicos, como sílica ativa, metacaulim ou cinza volante e aditivos modificadores de viscosidade. Também não possui uma sequência clara de passos a serem seguidos, fazendo com que, se um responsável por dosagem utilizar este método, teria de realizar inúmeras tentativas para alcançar os requisitos esperados. Também se observa que, apesar de Okamura propor a execução de ensaios para medir a trabalhabilidade da argamassa em tamanho reduzido, não se conhece os limites esperados.

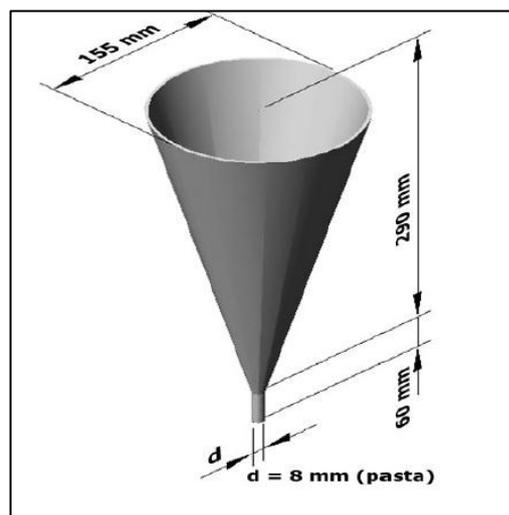
### 2.8.2 Método de Gomes et al. (2002)

Esse método de dosagem foi proposto nos estudos de doutoramento de Gomes (2002) e foi desenvolvido com o propósito de gerar um concreto autoadensável de alta resistência (CADAR).

Este método é executado em duas fases, sendo uma fase a pasta e a outra o esqueleto granular, e estas fases podem ser obtidas e otimizadas separadamente, buscando as propriedades desejadas do material. De acordo com Gomes (2002, apud TUTIKIAN, 2004), para ser considerado de alta resistência, o CAA deve alcançar os 50 MPa aos 7 dias, logo deve-se:

- Ter a relação água/cimento baixa ( $a/c \leq 0,40$ );
- Otimizar as relações aditivo superplastificante/cimento ( $sp/c$ ) e finos/cimento ( $f/c$ ) para o alcance de pastas com alta fluidez e boa coesão. A relação ótima de  $sp/c$  é determinada pelo teste do cone Marsh (Figura 65) e a relação ótima  $f/c$  pelo teste de espalhamento usando o mini-slump (Figura 62);

Figura 65 – Cone Marsh

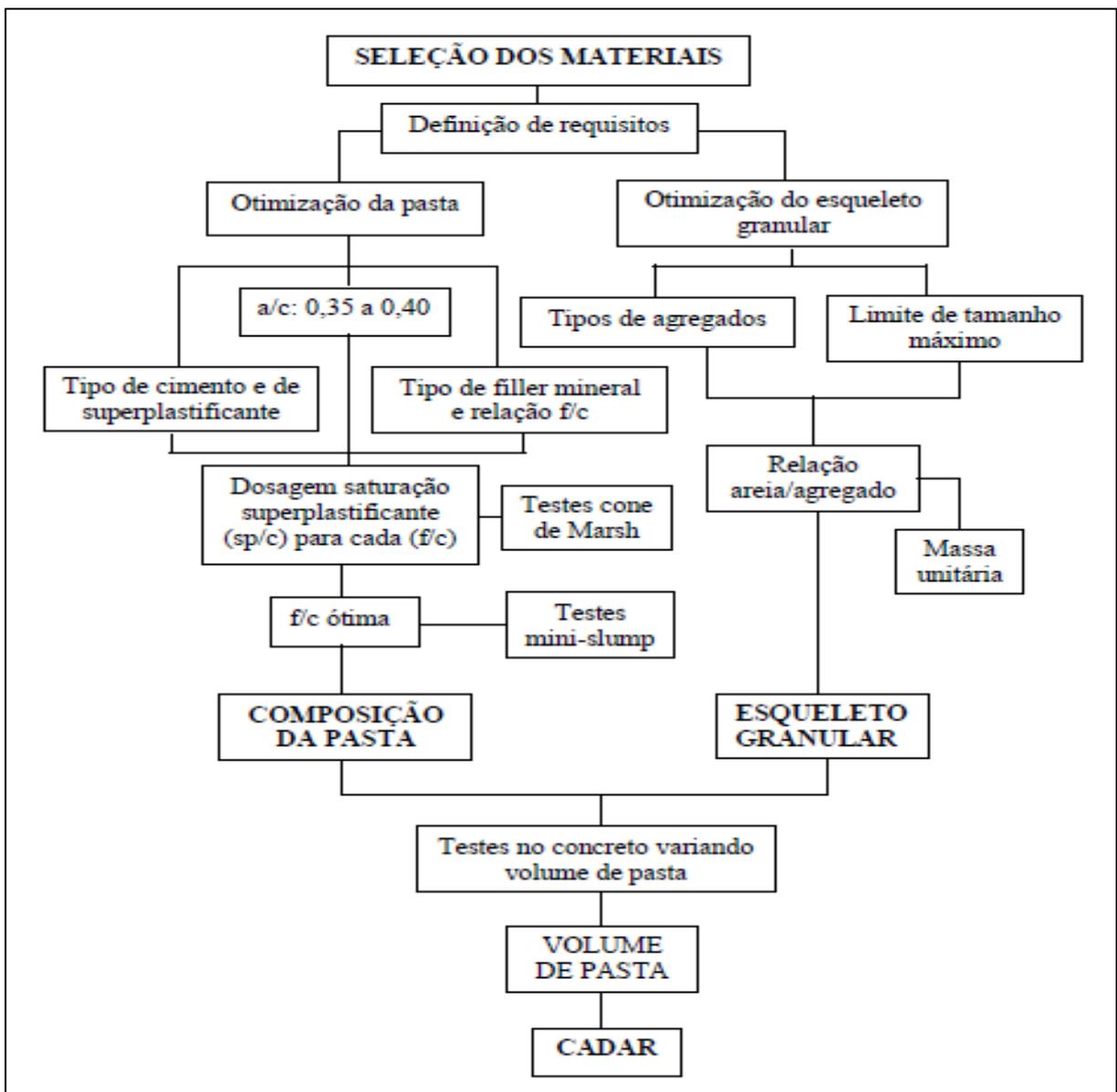


Fonte: Cavalcanti (2006)

- Determinar um esqueleto granular com mínimo de vazios possível;
- Determinação do conteúdo da pasta que provê os requisitos autoadensáveis avaliados no concreto fresco (fluidez, habilidade passante e resistência à segregação), como também a resistência à compressão.

Na Figura 66, apresenta-se um resumo da metodologia aplicada no método de dosagem proposto por Gomes (2002).

Figura 66 – Resumo das etapas do método de dosagem de Gomes et al



Fonte: Gomes (2002) apud Cavalcanti (2006)

Segundo Alencar (2008), esse procedimento proposto por esse método de dosagem pode algumas vezes tornar-se de difícil aplicabilidade, pois não demonstra qualquer

preocupação com a resistência à compressão, devido à fixação de valores muito baixos para a relação a/c, que resulta para todos os casos em concretos de altíssimo desempenho.

### 2.8.3 Método de Tutikian (2004)

Na sua dissertação de mestrado, apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Bernardo Fonseca Tutikian desenvolveu uma proposta de metodologia baseada em um roteiro técnico consagrado nacionalmente para concretos convencionais, o método IPT-EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Na sua proposta, entre outros fatores, ele busca gerar um concreto tecnicamente aceitável dentro das características de um CAA e que condicione o menor custo possível.

O princípio básico do método é a obtenção de um CAA a partir de um concreto convencional (CCV), onde o teor ideal de argamassa deverá ser previamente determinado. Os materiais devem ser escolhidos e devidamente caracterizados, a fim de que possam ser conhecidas as propriedades que influenciam na dosagem. Em seguida, começa-se a definir os parâmetros de dosagem, como relação água/cimento pretendida, de acordo com os requisitos de durabilidade indicados no projeto.

No próximo passo, devem ser definidos três traços que vão formar a família do concreto a ser dosado para se obter o diagrama de dosagem. Geralmente são usados os traços (1:3,5), (1:5) e (1:6,5), mas outros traços poderão ser usados.

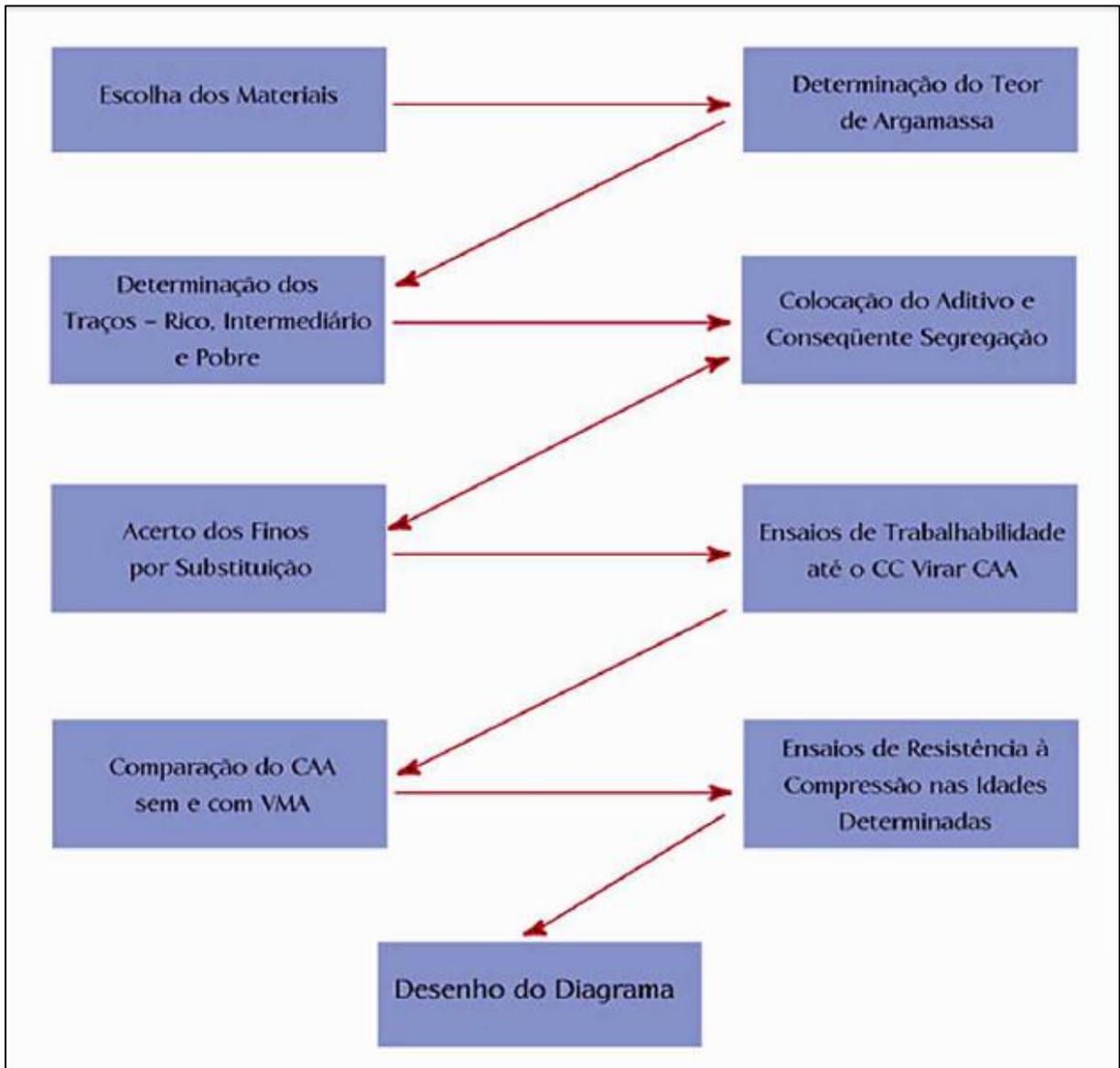
A partir do traço intermediário, determina-se, experimentalmente, o teor de argamassa, sendo que este deve ser mantido até o final da dosagem, quando se deseja montar uma curva de dosagem para o concreto de partida, que é ainda um concreto convencional.

Em seguida adiciona-se o aditivo superplastificante na mistura, o que causará uma segregação dos materiais. E então, inicia-se o processo de acerto da viscosidade da mistura, através da introdução de finos substituindo parcialmente à areia (finos não pozolânicos) e substituindo parcialmente o cimento (finos pozolânicos). Pode-se também adicionar aditivos modificadores de viscosidade para resolver o problema da segregação.

A adição de finos prossegue-se até que se julgue a mistura estar no ponto de começar a avaliar as suas características pelos ensaios preconizados para o CAA. Em função dos resultados, deve-se retornar a ajustar, até o acerto final ou, em caso de aprovado, inicia-se o processo de moldagem dos corpos de prova para posterior montagem do diagrama de dosagem.

Na Figura 67, está ilustrado o passo-a-passo da execução do método proposto por Tutikian (2004).

Figura 67 – Passo-a-passo das etapas do método de dosagem proposto por Tutikian



Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), esse método de dosagem contém pontos que podem ser melhorados. Por exemplo, observou-se, durante a dosagem do CAA, que o teor de argamassa ideal é baixo para que a mistura passe pelos obstáculos facilmente. Outro ponto também é que o método é muito dependente de uma certa experiência do responsável pela dosagem. Isto ocorre, pois o acerto da quantidade de água, do aditivo superplastificante e do percentual de finos é experimental. Por fim, ainda há uma crítica sobre o fato de o método não

contemplar o estudo prévio dos agregados, fazendo com que se determine aleatoriamente a proporção entre duas classes de agregados graúdos, se for de interesse do profissional da composição.

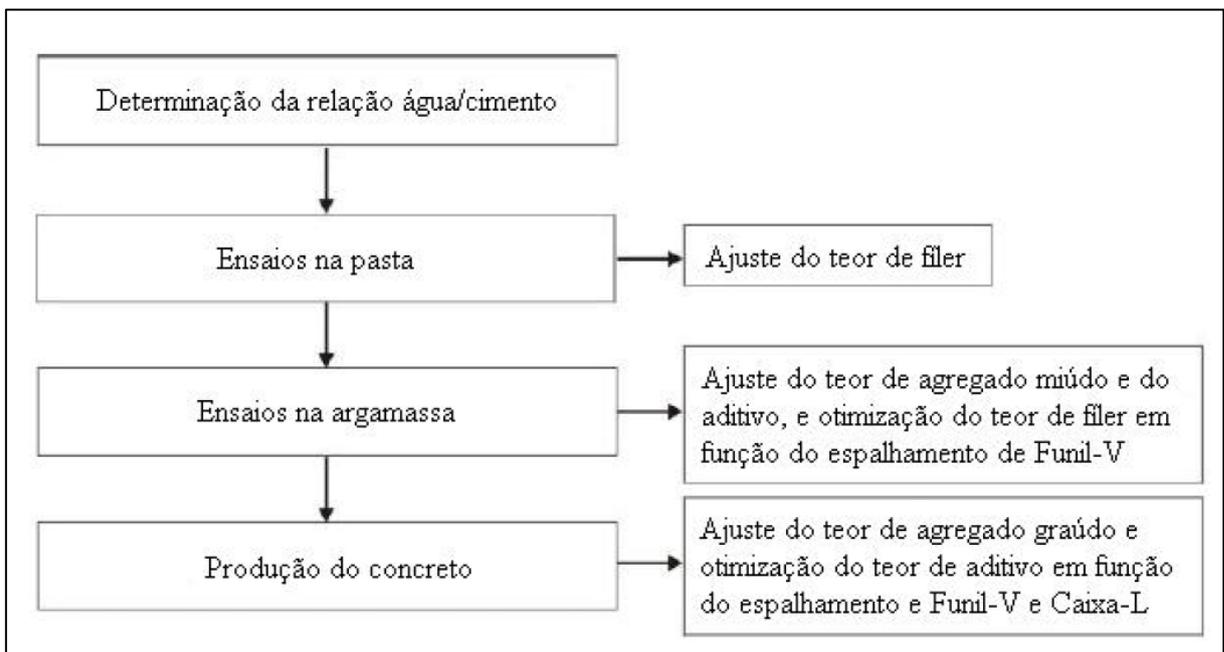
#### 2.8.4 Método de Repette e Melo (2005)

O método de Repette e Melo é o resultado de um trabalho de mestrado desenvolvido no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Ele baseia-se na racionalização da dosagem do CAA a partir do estabelecimento da proporção água / aglomerante (o método considera aglomerante qualquer material utilizado como adição mineral, mesmo que não possua propriedades pozolânicas ou cimentantes), segundo exigências de durabilidade ou de resistência a compressão requerida.

Após determinado o fator água / aglomerante, o método divide-se em ensaios na pasta, argamassa e concreto, de modo que os materiais constituintes são definidos em cada uma dessas etapas. Cabe salientar que o método prioriza o ajuste do teor de aditivo superplastificante presente em todas as etapas.

Na Figura 68, apresenta-se um resumo da metodologia aplicada no método de dosagem proposto por Repette e Melo (2005).

Figura 68 – Resumo das etapas do método de dosagem de Repette e Melo



Fonte: Melo (2005) apud Gomes; Barros (2009)

Segundo Gomes e Barros (2009), esse método de dosagem possibilita produzir um CAA com valores de resistência à compressão praticados usualmente, o que pode ajudar a difundir sua aplicação aproximando-o da realidade das construções correntes. Isso propicia ao usuário a possibilidade de explorar o excelente comportamento desse concreto no estado fresco, com a resistência especificada em projeto, e com menor custo decorrente da otimização na escolha e proporcionamento dos materiais.

O método se distingue da maioria dos métodos correntes por não exigir, em nenhuma de suas etapas, o julgamento subjetivo da qualidade da mistura por parte do usuário. Todos os componentes do concreto são ajustados com base em ensaios rápidos e de custo acessível e em resultados quantitativos e objetivos, eliminando do processo as decisões que dependem da “experiência” de quem utiliza o método. (REPETTE, 2005 apud GOMES; BARROS, 2009).

### **2.8.5 Método de Alencar e Helene (2008)**

A metodologia de Alencar e Helene (2008) introduz o conceito de correção da coesão do concreto fresco, para apoiar a grande fluidez, com incremento de adições minerais para a substituição parcial do cimento (fino pozolânico), ou do agregado miúdo (fino não-pozolânico). A área superficial das adições minerais deve ser maior do que a área superficial do material substituído. Misturas mais pobres em cimento exigem um maior teor de substituição de finos em comparação com composições mais ricas, para manter as mesmas características de trabalhabilidade. A adição de finos vai resolver o problema da falta de coesão da mistura, mas não da falta de habilidade passante, que deve ser solucionada através do aumento do teor de argamassa. (ALENCAR, 2008)

Segundo Alencar (2008), a dosagem inicia pelo ajuste do traço médio seguindo duas etapas principais, a saber:

Fase de proporcionamento – adota-se um valor para a relação agregados secos/cimento em massa ( $m$ ), com base na resistência média prevista. Então, o proporcionamento dos materiais segue os passos:

- 1º Passo: Teor de argamassa ( $\alpha$ );
- 2º Passo: Teor de substituição ( $T$ );
- 3º Passo: Aditivo;

- 4º Passo: Relação a/ag.

Fase de verificação – a cada ajuste de materiais realizados, verifica-se a possibilidade da realização de ensaios de trabalhabilidade para confirmação do atendimento ou não do concreto ao nível de autoadensabilidade objetivado. Para essa confirmação, é necessário realizar sequencialmente ao menos os ensaios de:

- 1º passo – espalhamento e espalhamento  $t_{500}$ ;
- 2º passo – caixa L;
- 3º passo – funil V e funil V  $T_{5min}$ ;
- 4º passo – Coluna de segregação.

Caso a mistura não atenda a um determinado ensaio, não se deve prosseguir com os demais. É necessário voltar à fase de proporcionamento dos materiais, fazer os ajustes necessários e só assim retornar para os ensaios de trabalhabilidade.

Segundo Alencar (2008), na primeira tentativa de obter o CAA, o teor de argamassa é utilizado apenas pouco acima do empregado para os materiais utilizados no concreto comum (da ordem de 53%), com um  $T$ , percentual de aditivos e relação a/ag baixos. Caso não seja possível obter um CAA com as características requeridas, deve-se ir para o 2º passo, testando porcentagens crescentes do teor de substituição ( $T$ ), até o momento que não se verifique melhoras significativas na mistura, dando continuidade aos passos 3º e 4º, onde assume a mesma posição. Se o CAA não foi alcançado, retorna-se novamente ao 1º passo que é o ajuste do teor de argamassa (crescendo 3 pontos percentuais – 56%), mantendo-se o  $T$ , a relação a/ag e a porcentagem de aditivos usados na tentativa anterior, e assim sucessivamente.

Destaca-se que, a dosagem inicia-se sempre com proporções baixas de  $\alpha$ ,  $T$  e aditivos que vão sendo incrementados pouco a pouco, buscando, assim uma maior otimização dos materiais. Contudo, observa-se que, na medida que aumenta-se o  $\alpha$  e o  $T$  normalmente, há a necessidade de aumentar também a quantidade de aditivo e, muitas vezes, a relação a/ag, devido ao aumento da superfície específica da mistura. (ALENCAR, 2008).

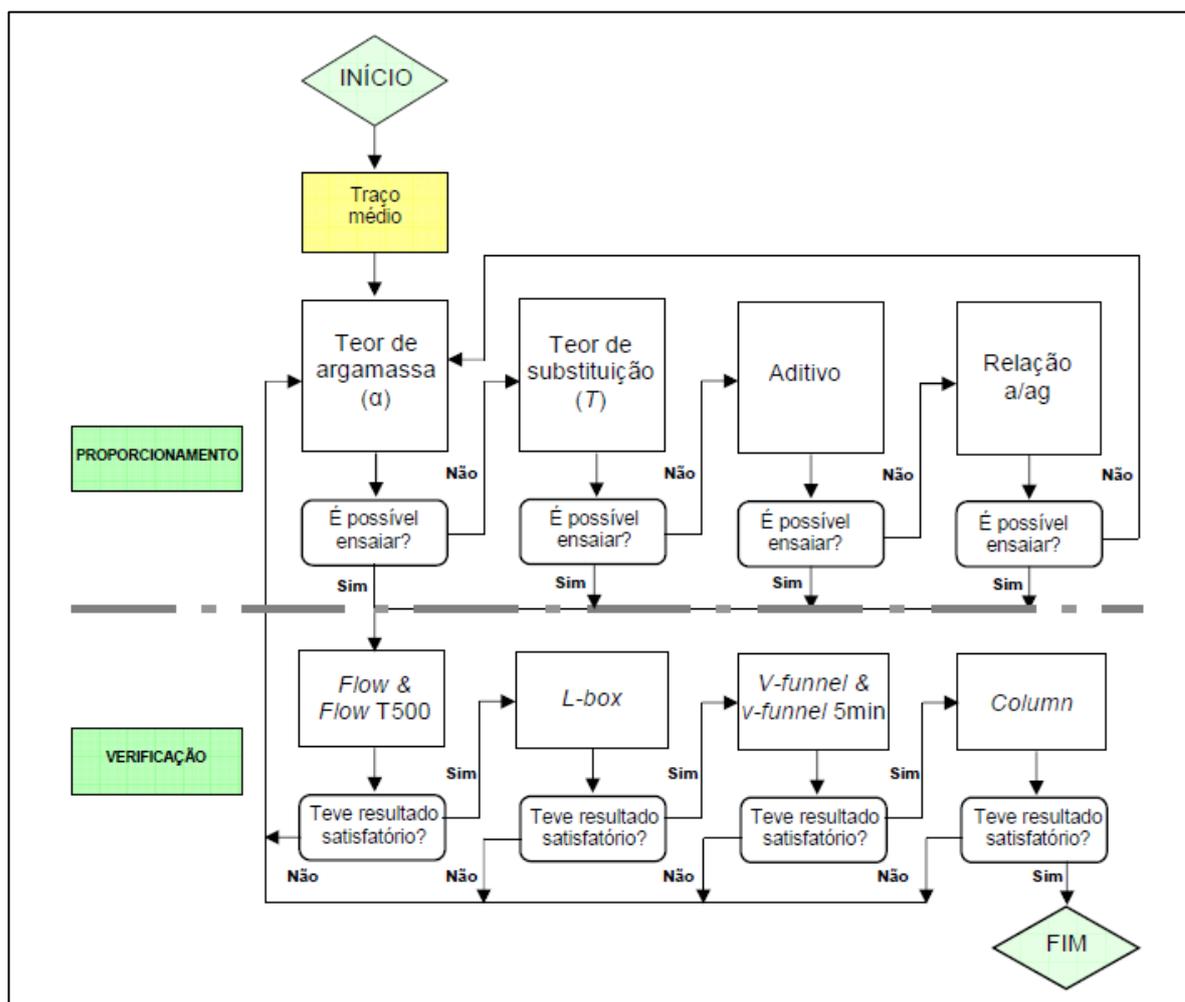
Depois de ajustado o traço médio, parte-se para a determinação dos traços auxiliares: muito rico, muito pobre e pobre, com o mesmo teor de argamassa determinado no traço médio, com um  $T$ , um teor ótimo de aditivo e relação a/ag, verificado experimentalmente em cada mistura, dadas as características requeridas. Para isso, os traços

devem ser testados nos equipamentos de trabalhabilidade. Então, montar o Diagrama de Dosagem.

Segundo Alencar (2008), esse método também prevê a dosagem do CAA sem adição mineral; nesse caso, em vez de aumentar o  $T$  para conseguir um traço com maior coesão, se aumenta o teor de argamassa, tanto para possibilitar maior habilidade passante, como para aumentar a quantidade de finos na mistura. O  $\alpha$  é ajustado no traço médio, que tem por base a resistência média em torno da qual se pretende atingir; mas, no caso do CAA sem adição, esse teor de argamassa deve ser adequado para obter as características necessárias dos traços pobres, desde que estejam dentro do intervalo de resistência pretendida.

A Figura 69 ilustra uma sequência geral de tomada de decisão para o proporcionamento dos materiais e verificação da trabalhabilidade, seguindo o modelo estabelecido no método Alencar e Helene (2008) para a dosagem do CAA.

Figura 69 – Sequência geral de tomada de decisão para o proporcionamento dos materiais e verificação da trabalhabilidade



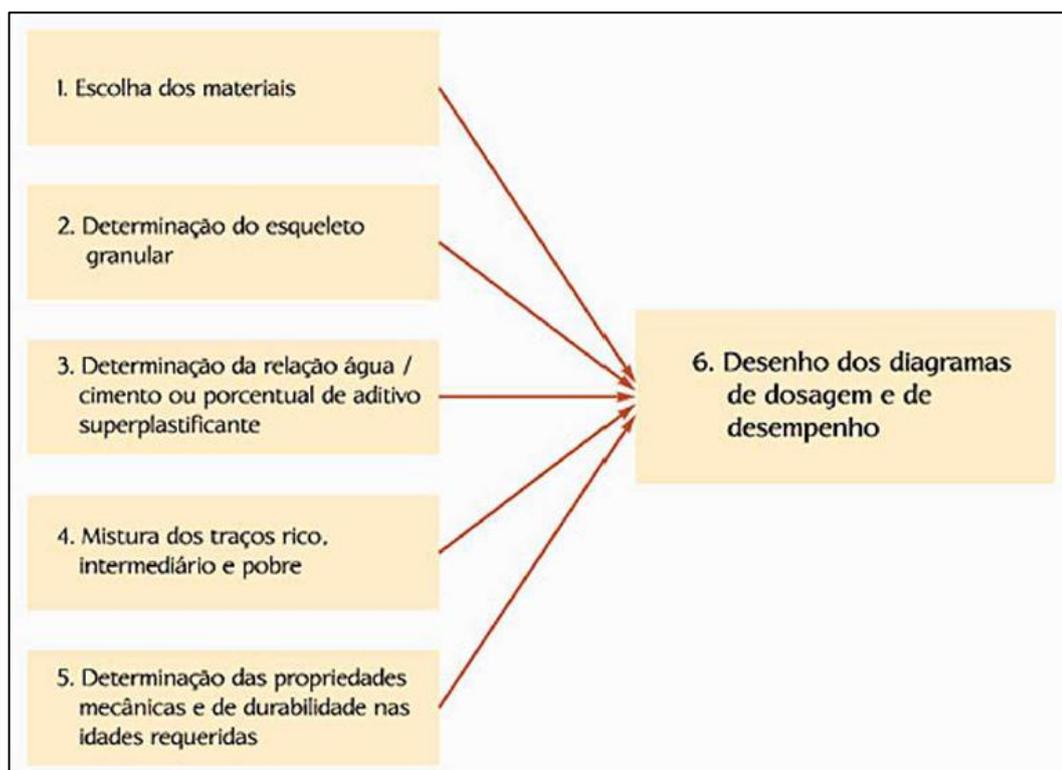
Fonte: Alencar; Helene (2008) apud Alencar (2008)

Uma única observação a se fazer referente a esse método é que assim como no método proposto por Tutikian (2004), o processo de definição do teor ideal de argamassa, teor ideal de substituição, teor do aditivo superplastificante e da relação a/ag, através dos diversos ensaios de trabalhabilidade, torna a dosagem dependente de uma certa habilidade do responsável pela dosagem.

### 2.8.6 Método de Tutikian e Dal Molin (2007)

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), esse método de dosagem é baseado nos conceitos de O'Reilly (1992) para determinar o empacotamento granular máximo, os conceitos de De Larrard (1999) para a escolha dos materiais, o diagrama de dosagem do IPT/EPUSP para permitir os cálculos de qualquer CAA dentro da faixa avaliada da mesma família estudada, o acerto do teor de aditivo, relação água/cimento e o procedimento básico de Tutikian (2004). Ainda acrescenta pontos novos, como a junção de todas essas teorias, o teor de argamassa variável, a inclusão da curva de custo no diagrama de dosagem e o diagrama de desempenho. Na Figura 70, apresenta-se um resumo da metodologia aplicada no método de dosagem proposto.

Figura 70 – Resumo das etapas do método de dosagem de Tutikian e Dal Molin



Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

### *2.8.6.1 Passo 1 – Escolha dos materiais*

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), o método pretende que a dosagem do CAA possa ser realizada com quaisquer materiais disponíveis, desde que seja tecnicamente possível a obtenção de um CAA com os materiais escolhidos. Os componentes são basicamente os mesmos utilizados para os CCV: cimento, agregado miúdo e graúdo, água e aditivo superplastificante. Geralmente, um material fino e de granulometria inferior à do agregado miúdo, tem sido acrescentado na mistura. Ocasionalmente, outras classes de agregado graúdo e o aditivo modificador de viscosidade (VMA) têm sido usados.

Deve-se priorizar a escolha de agregados arredondados e com menor  $D_{máx}$  possível para maximizar o empacotamento e, conseqüentemente, diminuir a possibilidade de segregação da mistura. Também é recomendável que se especifiquem todas as faixas granulométricas dos agregados, fazendo com que haja uma distribuição contínua dos componentes.

### *2.8.6.2 Passo 2 – Determinação do esqueleto granular*

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), o objetivo deste passo é determinar a proporção entre dois materiais que possuam a menor quantidade de vazios. Para isso, deve-se empacotar todos os componentes do CAA, dois a dois e em ordem decrescente de diâmetro das partículas. Assim que se determinar a primeira composição entre os dois materiais de maior diâmetro, o mesmo procedimento será realizado com a mistura e o próximo componente até chegar ao cimento – único elemento que não é empacotado. Por exemplo, empacota-se a brita 1 com a brita 0. Essa mistura é empacotada com a areia média, resultando em um esqueleto granular formado pela brita 1, brita 0 e areia média e com o mínimo de vazios. Caso sejam utilizados materiais finos, estes devem ser empacotados após a areia média e serão considerados, até o final do processo, como agregados.

Para os ensaios de compacidade, deve ser utilizado um recipiente de diâmetro pelo menos cinco vezes maior que o diâmetro médio das partículas para evitar o efeito container (LARRARD, 1999 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). O empacotamento é realizado decrescendo de 10 em 10% a quantidade do material de maior granulometria (A) e aumentando, na mesma proporção, a quantidade do material de menor granulometria (B). A taxa de alteração da mistura é variável. Dependendo da aplicação do concreto, pode ser de 5% (maior precisão) ou de 15 a 20% (menor precisão).

Para se calcular o índice de vazios, é necessário que se determine primeiro a massa unitária compactada da mistura através da Equação 3.

$$M_{\text{unitAB}} = \frac{\text{Massa da mistura compactada (kg)}}{\text{Volume do recipiente (m}^3\text{)}} \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

**MunitAB:** massa unitária compactada da mistura do material A com o material B (kg/m<sup>3</sup>).

O Quadro 13 ilustra muito bem o procedimento da determinação da massa unitária compactada da mistura de dois materiais hipotéticos A e B.

Quadro 13 – Determinação da massa unitária compactada da mistura de dois materiais hipotéticos A e B

Material A (%)	Material B (%)	Massa Mistura (kg)	Volume Recipiente (dm <sup>3</sup> )	Massa Unitária Compactada (kg/m <sup>3</sup> )
100	0	38,36	17,10	2243
90	10	39,45	17,10	2307
80	20	42,45	17,10	2482
70	30	43,12	17,10	2522
60	40	45,10	17,10	2637
50	50	44,70	17,10	2614
40	60	43,00	17,10	2515
30	70	41,89	17,10	2450
20	80	39,23	17,10	2294
10	90	38,11	17,10	2229
0	100	37,23	17,10	2177

Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

Para determinação da massa unitária compactada da mistura é importante que os materiais estejam secos, bem misturados e compactados.

Após a determinação da massa unitária compactada da mistura, determina-se a massa específica da mistura por meio da Equação 4.

$$\text{Mesp}_{AB} = \frac{(\text{Mesp}_A \times \%A) + (\text{Mesp}_B \times \%B)}{100} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

**Mesp<sub>AB</sub>**: massa específica da mistura do material A com o material B (kg/m<sup>3</sup>);

**Mesp<sub>A</sub>**: massa específica do material A (kg/m<sup>3</sup>);

**Mesp<sub>B</sub>**: massa específica do material B (kg/m<sup>3</sup>);

**%A**: percentagem do material A na mistura;

**%B**: percentagem do material B na mistura.

Como observado na equação acima, para se calcular a massa específica da mistura entre os dois materiais, é preciso primeiro determinar a massa específica de cada um dos materiais através das normas vigentes, processo esse que se dá na fase de caracterização dos materiais.

O Quadro 14 ilustra o procedimento da determinação da massa específica da mistura dos dois materiais hipotéticos A e B.

Quadro 14 – Determinação da massa específica da mistura dos dois materiais hipotéticos A e B

Material A (%)	Material B (%)	Massa Específica A (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica B (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica Mistura (kg/m <sup>3</sup> )
100	0	2880	2580	2880
90	10	2880	2580	2850
80	20	2880	2580	2820
70	30	2880	2580	2790
60	40	2880	2580	2760
50	50	2880	2580	2730
40	60	2880	2580	2700
30	70	2880	2580	2670
20	80	2880	2580	2640
10	90	2880	2580	2610
0	100	2880	2580	2580

Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

Depois, calcula-se o índice de vazios da mistura em porcentual pela equação 5 para determinar a mistura ideal com o menor índice de espaços entre o esqueleto granular.

$$V (\%) = \frac{M_{espAB} - M_{unitAB}}{M_{espAB}} \times 100 \quad \text{(Equação 5)}$$

Finalmente, o Quadro 15 ilustra o procedimento da determinação do índice de vazios da mistura dos dois materiais hipotéticos A e B.

Quadro 15 – Determinação do índice de vazios da mistura dos dois materiais hipotéticos A e B

Material A (%)	Material B (%)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Unitária Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)
100	0	2880	2243	28,4
90	10	2850	2307	23,5
80	20	2820	2482	13,6
70	30	2790	2522	10,6
60	40	2760	2637	4,6
50	50	2730	2614	4,4
40	60	2700	2515	7,4
30	70	2670	2450	9,0
20	80	2640	2294	15,1
10	90	2610	2229	17,1
0	100	2580	2177	18,5

Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

O índice de vazios deve ser sempre calculado para se ter certeza de qual proporção é a ideal, apenas o indicativo da massa unitária compactada não é suficiente para essa conclusão, embora a maioria das vezes uma massa unitária compactada maior possua um menor índice de vazios. No quadro acima vemos o exemplo de que nem sempre a mistura com a maior massa unitária compactada vai ter um menor índice de vazios.

Um ponto interessante que merece ser observado é que quanto maior a proporção do material de maior granulometria na mistura, melhor. Porque assim a mistura demanda menos água e apresenta um teor de argamassa menor, aumentando às resistências mecânicas e a durabilidade. Quando o índice de vazios for próximo entre a mistura que seria escolhida e a mistura com uma proporção maior do material de maior granulometria, compensa-se fazer ensaios comparativos para escolher a mistura que apresente o melhor desempenho.

Uma vez determinado o esqueleto granular da mistura, há uma grande probabilidade de que o CAA não segregue e nem ocorra excesso de material fino. A não confirmação dessa compacidade no traço experimental indica que os materiais escolhidos não são adequados para a confecção do CAA, independente do misturador ou do método de

dosagem utilizado. Então, devem-se substituir componentes ou apenas acrescentar outros para suprir as lacunas. A segregação do concreto é um indicativo de que falta material fino para dar coesão à mistura, então seria necessário substituir algum componente por outro de menor granulometria ou adicionar um aditivo modificador de viscosidade (VMA). Se, por outro lado, a mistura estiver muito coesa e impossibilitando, por motivos técnicos ou econômicos, a adição de maior quantidade de água ou aditivo superplastificante, é sinal de que há um excesso de materiais finos na composição do concreto, e devem ser substituídos por outros de granulometria maior (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Solucionados os problemas, caso existam, resta apenas determinar a quantidade de água, aditivo superplastificante e cimento. A experiência do responsável pela dosagem não é mais um requisito, mas apenas uma vantagem.

#### *2.8.6.3 Passo 3 – Determinação da relação água/cimento ou teor do aditivo superplastificante*

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), a determinação da relação a/c ou teor do aditivo superplastificante é realizada antes da mistura dos materiais, em função da escolha do traço intermediário. Ou se fixa o aditivo com base no histórico de outros concretos similares (1:m similar) e contando com a experiência do responsável, ou se determina a relação a/c com base nas Tabelas 6.1, 7.1 e 7.2 da NBR 6118:2007, de acordo com a classe de agressividade ambiental e o tipo de concreto (se é armado ou protendido). Como as tabelas só fornecem a relação a/c máxima, ela servirá como aproximação para o a/c final. Também é possível arbitrar um a/c próximo caso haja histórico de outros concretos com os mesmos materiais que estão sendo utilizados.

A partir desse ponto, deve-se escolher o traço intermediário para se realizar a mistura de ajuste, a fim de se confirmar a relação a/c e, principalmente, determinar experimentalmente o teor de aditivo superplastificante. O procedimento para ajustar a relação a/c e o teor do aditivo é simples, primeiro é estabelecido uma quantidade X de cimento, depois o consumo dos outros materiais constituintes da mistura é calculado com base nas proporções estabelecidas entre eles e após isso vai ajustando a relação a/c e o teor do aditivo até se determinar um fator a/c ideal e um teor de aditivo ótimo. Esse teor de aditivo ótimo vai ser definitivo para os outros passos desse método de dosagem.

Como o aditivo será colocado no concreto após a adição da água, os autores do método recomendam que sejam observados alguns pontos para que o desempenho seja

aproveitado ao máximo. Eles recomendam fixar um abatimento inicial para a mistura sem aditivo, parecido com o abatimento inicial de um concreto convencional (CCV) utilizado normalmente. Se não for possível alcançar o abatimento inicial sem o aditivo superplastificante, recomendam a adição de um aditivo plastificante – menos eficiente, porém mais econômico. Assim, obtém-se o máximo desempenho do aditivo superplastificante, o que não ocorre quando esse é colocado em misturas muito secas (teste de espalhamento menor que 60 mm). Os valores do teste de espalhamento mais comuns para aplicações convencionais são entre 60 e 90 mm. Porém, dependendo da aplicação, pode-se aumentar ou diminuir este valor.

Os autores não recomendam utilizar o concreto intermediário para a moldagem dos corpos-de-prova (CP's) e, conseqüentemente, para o desenho das curvas de dosagem e desempenho. Mesmo assim, recomendam que todos os ensaios de trabalhabilidade, previamente determinados, sejam realizados para se ter certeza de que o teor de aditivo está realmente correto.

O valor comercial dos materiais utilizados para a confecção do CAA varia de local para local e sabe-se, com raras exceções, que o custo do aditivo representa quase a totalidade do acréscimo de valor entre o CAA e o CCV. Então, deve-se sempre utilizar a menor dosagem possível de aditivo para facilitar a viabilidade econômica do CAA.

#### *2.8.6.4 Passo 4 – Mistura dos traços rico, intermediário e pobre*

Até aqui foram determinados o esqueleto granular e o teor de aditivo superplastificante, que serão mantidos porcentualmente constantes para todos os traços. Esse passo consiste na mistura de, no mínimo, três pontos para a determinação das equações de comportamento e coeficientes de correlação, para a posterior confecção da curva de dosagem e, se desejado, da curva de desempenho. Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), o ideal é a realização de quatro pontos para que as equações possuam um coeficiente de determinação maior, permitindo que as curvas fiquem melhor ajustadas.

Os autores do método frisam que o teor de argamassa seca de todos os pontos não será constante. O que permitirá que todos os pontos sejam considerados da mesma família e possam ser plotados nos mesmos gráficos será a constância do teor de aditivo superplastificante e as proporções entre todos os agregados, lembrando que os materiais pozolânicos são considerados agregados.

Com o aditivo superplastificante já determinado, a única variável desconhecida é a relação a/c, já que se possui apenas uma aproximação para o traço intermediário. De acordo com a aplicação do CAA, a água será dosada a fim de tornar a mistura mais ou menos fluida, porém a resistência à segregação e a habilidade de passar por obstáculos já estão garantidas com a compacidade dos agregados.

O Quadro 16 ilustra muito bem um exemplo do que foi exposto nos parágrafos acima.

Quadro 16 – Exemplo de traços unitários do CAA empacotado com diversos materiais

Família	Traço					a/c	H (%)	Adt (%)	$\alpha$
	c	af	ar	b9	b19				
3	1	0,60	0,96	0,79	0,65	0,36	9,10	0,47	64,00
4	1	0,80	1,28	1,06	0,86	0,42	8,44	0,47	61,60
5	1	1,00	1,60	1,32	1,08	0,53	8,92	0,47	60,00
6	1	1,20	1,92	1,58	1,30	0,71	10,19	0,47	58,86
7	1	1,40	2,24	1,85	1,51	0,77	9,61	0,47	58,00

Legenda: c – cimento; af – areia fina; ar – areia regular; b9 – brita 9,5 mm; b19 – brita 19 mm; H – teor de umidade; adt – aditivo;  $\alpha$  – teor de argamassa.

Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

Como exposto no quadro acima, o teor de argamassa seca varia entre as famílias (valores diferentes de m – relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg). O que permaneceu fixo para todas as famílias foi apenas o teor de aditivo superplastificante e as proporções entre todos os agregados componentes da mistura. Para o cálculo da relação a/c ideal para cada família, usa-se o mesmo procedimento do Passo 3, agora permanecendo constante o teor de aditivo. Conseguindo ajustar a relação a/c ideal (o único ensaio indispensável nessa etapa é o ensaio de espalhamento), usa-se essa mesma mistura para calcular a massa específica do concreto no estado fresco e assim através dela determinar o consumo de cimento por m<sup>3</sup> através das equações 12 ou 13 descritas no Passo 6 desse método. Através do consumo de cimento por m<sup>3</sup>, todos os consumos dos materiais constituintes da mistura do CAA são determinados. O Quadro 17 nos mostra um exemplo disso.

Quadro 17 – Exemplo do consumo dos materiais através da massa específica do concreto no estado fresco

Família	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia fina (kg/m <sup>3</sup> )	Areia regular (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 9,5 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 19 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
3	2381	546	327	524	431	355	199	2,57
4	2367	437	349	559	463	375	184	2,05
5	2354	360	360	576	475	389	193	1,69
6	2342	304	364	583	480	395	216	1,43
7	2338	267	373	597	493	403	205	1,25

Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

Durante a mistura dos traços, os ensaios para a verificação das propriedades do CAA no estado fresco devem ser realizados. Usando como exemplo as misturas do quadro acima, o Quadro 18 ilustra alguns ensaios necessários.

Quadro 18 – Exemplo de ensaios necessários para verificação das propriedades do CAA no estado fresco

Família	<i>slump flow test</i> (mm)	<i>v-funnel test</i> (s)	<i>l-box test</i> ( $l_2/l_1$ )
3	680	9	0,90
4	690	9	0,95
5	680	10	0,90
6	660	11	0,90
7	670	10	1,00

Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

Os autores recomendam que é importante que haja rapidez no processo, uma vez que o aditivo possui tempo de trabalho limitado e é extremamente dependente das condições ambientais. As medidas ideais de fluidez devem ser especificadas em projeto. Quando não há especificação devem ser determinadas de acordo com a aplicação, já que uma mistura pode ser considerada um CAA com pouca fluidez mesmo que o concreto esteja bastante fluido. O importante é que o CAA esteja fluido o suficiente para atender aos requisitos estabelecidos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Segundo Da Silva et al. (2008 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), se a manutenção da trabalhabilidade do CAA não for suficiente para a aplicação final e seja necessário mais tempo de fluidez da mistura, devem ser tomadas providências como

substituição de parte da água por gelo, esfriamento dos agregados, incorporação de aditivos estabilizadores ou outras que forem consideradas eficientes.

No final dessa etapa, moldam-se os corpos-de-prova (CP's) a fim de se determinar as propriedades requeridas, como a resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade, velocidade da onda ultrassônica, absorção de água, penetração de íons cloretos ou outras de acordo com os requisitos de projeto. Segundo os autores do método, a moldagem dos CP's deve ser realizada pelo CAA fluindo pela força da gravidade, sem a ajuda de vibração mecânica ou qualquer outro tipo de compactação. O acabamento superior é feito de forma idêntica ao concreto convencional (CCV) com, por exemplo, colher de pedreiro – bem como a cura, em que o concreto deve ser coberto com lona plástica comum no primeiro dia e submetido ao tipo de cura escolhido até a execução dos ensaios requeridos.

#### *2.8.6.5 Passo 5 – Ensaio das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades determinadas*

Com os CP's já moldados e curados, a etapa que segue é a realização dos ensaios pré-determinados. Podem ser apenas os mecânicos (mais comumente utilizados), de durabilidade ou ambos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), existem métodos de dosagem para o CAA que limitam a quantidade de agregado graúdo, prejudicando seriamente o módulo de elasticidade dos concretos. Apesar de o método Tutikian e Dal Molin (2007) não afetar essa propriedade por não limitar a quantidade de agregado graúdo, é recomendável a realização do ensaio de módulo de elasticidade para confirmação.

O Quadro 19 ilustra resultados de algumas propriedades do CAA no estado endurecido das misturas consideradas nos quadros acima.

Quadro 19 – Exemplo de resultados de algumas propriedades do CAA no estado fresco endurecido

Traço l:m	a/c	Resistência à compressão (MPa)				Ec (GPa)	US (m/s)	CI (C)
		1 dia	7 dias	28 dias	91 dias			
1:3	0.36	43.1	63.9	73.3	95.0	40.6	4910	2825
		42.8	64.5	70.5	93.2	40.6	4860	3066
		-	-	-	-	40.0	4900	-
1:4	0.42	31.9	52.8	60.2	89.9	37.4	4897	3321
		33.1	53.0	59.5	94.2	38.3	4872	3054
		-	-	-	-	36.8	4835	-
1:5	0.53	21.7	40.1	44.7	69.5	35.9	4762	4091
		20.7	39.8	46.9	76.8	32.6	4774	3825
		-	-	-	-	34.6	4774	-
1:6	0.71	14.0	29.7	35.8	61.6	30.3	4680	4590
		15.9	28.2	36.9	57.4	28.5	4657	4617
		-	-	-	-	30.0	4668	-
1:7	0.77	10.6	24.1	27.3	42.7	24.1	4429	5451
		10.4	23.8	28.4	40.0	22.7	4424	5751
		-	-	-	-	20.9	4429	-

Legenda: Ec – módulo de elasticidade; US – propagação das ondas ultra-sônicas; CI – penetração de ions cloretos.

Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

#### 2.8.6.6 Passo 6 – Desempenho dos diagramas de dosagem e desempenho

Este é o objetivo final do método, e, conseqüentemente, o último passo. Porém, antes de desenhar os diagramas de dosagem e desempenho, é necessário calcular as equações de comportamento de cada uma das propriedades estudadas. Os coeficientes de determinação, que expressam quão ajustadas estão às curvas e retas, também devem ser determinados. Ambos (equação de comportamento e o coeficiente de determinação) são determinados a partir dos dados obtidos nos diversos ensaios realizados.

A seguir, estão relacionadas às equações de comportamento, de número 6 à 15, utilizadas para determinar todas as variáveis.

$$fcj = \frac{k_1}{(k_2^{a/c})}$$

(Equação 6)

$$m = k_3 + k_4 \times a/c$$

(Equação 7)

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \times a/c}$$

(Equação 8)

$$\alpha = \frac{(1 + f + a)}{(1 + m)}$$

(Equação 9)

$$\alpha = k_7 \times C + k_8$$

(Equação 10)

$$m = a + p + f$$

(Equação 11)

$$C = \frac{\gamma}{(1 + f + a + p + a/c)}$$

(Equação 12)

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

(Equação 13)

$$A = C \times a/c$$

(Equação 14)

$$Cu = C \times \$c + C \times f \times \$f + C \times a \times \$a + C \times p \times \$p + C \times SP\% \times \$sp + C \times a/c \times \$ag$$

(Equação 15)

Onde:

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

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

**$c$**  = relação cimento/cimento em massa, em kg/kg;

**$f$**  = relação fino/cimento em massa, em kg/kg;

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

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

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

**$\alpha$**  = teor de argamassa seca, em kg/kg;

**$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8$**  = constantes que dependem exclusivamente dos materiais (cimentos, adições, agregados, aditivos);

**$C$**  = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m<sup>3</sup>;

**$SP\%$**  = dosagem de aditivo superplastificante por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m<sup>3</sup>;

**$\gamma$**  = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m<sup>3</sup>;

**$\gamma_c$**  = massa específica do cimento, em kg/dm<sup>3</sup>;

**$\gamma_f$**  = massa específica dos finos não pozolânicos, em kg/dm<sup>3</sup>;

**$\gamma_a$**  = massa específica do agregado miúdo, em kg/dm<sup>3</sup>;

**$\gamma_p$**  = massa específica do agregado graúdo, em kg/dm<sup>3</sup>;

**$ar$**  = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

**$A$**  = consumo de água potável por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m<sup>3</sup>;

**$Cu$**  = custo do concreto por metro cúbico;

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

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

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

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

**$\$sp$**  = custo do kg de aditivo superplastificante;

**$\$ag$**  = custo do kg de água potável.

O Quadro 20 ilustra as equações de comportamento e os coeficientes de determinação para as famílias do CAA estudadas nos quadros anteriores.

Quadro 20 – Exemplo de equações de comportamento e coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para os CAA

Propriedade		Equação de comportamento	$R^2$
Resistência à compressão (Lei de Abrams)	1 dia	$f_{cj1d} = \frac{126,71}{22,67^{a/c}}$	0,97
	7 dias	$f_{cj7d} = \frac{141,22}{9,64^{a/c}}$	0,99
	28 dias	$f_{cj28d} = \frac{151,22}{8,20^{a/c}}$	0,97
	91 dias	$f_{cj91d} = \frac{195,704}{6,10^{a/c}}$	0,91
Traço unitário 1:m (lei de Lyse)		$m = 8,7958 * a/c + 0,0691$	0,97
Consumo de cimento por $m^3$		$C = \frac{2066}{m + 0,7615}$	1,00
Custo		$C_u = C * (0,467 + 0,0164 * m)$	1,00
Teor de argamassa seca		$\alpha = 0,0214 * C + 53,324$	1,00
Módulo de elasticidade		$E_c = \frac{\log(f_{cj28d}) - 0,8463}{0,0243}$	0,96
Propagação da onda de ultrassom		$US = 29,245 * E_c + 3748,5$	0,97
Penetração de íons cloretos		$Cl = -\frac{(US - 5493,9)}{0,1813}$	0,99

Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

Todas as equações podem ser consideradas satisfatórias, já que o  $r^2$  foi sempre superior a 0,90, o que permite que se calcule traços intermediários com ótima precisão.

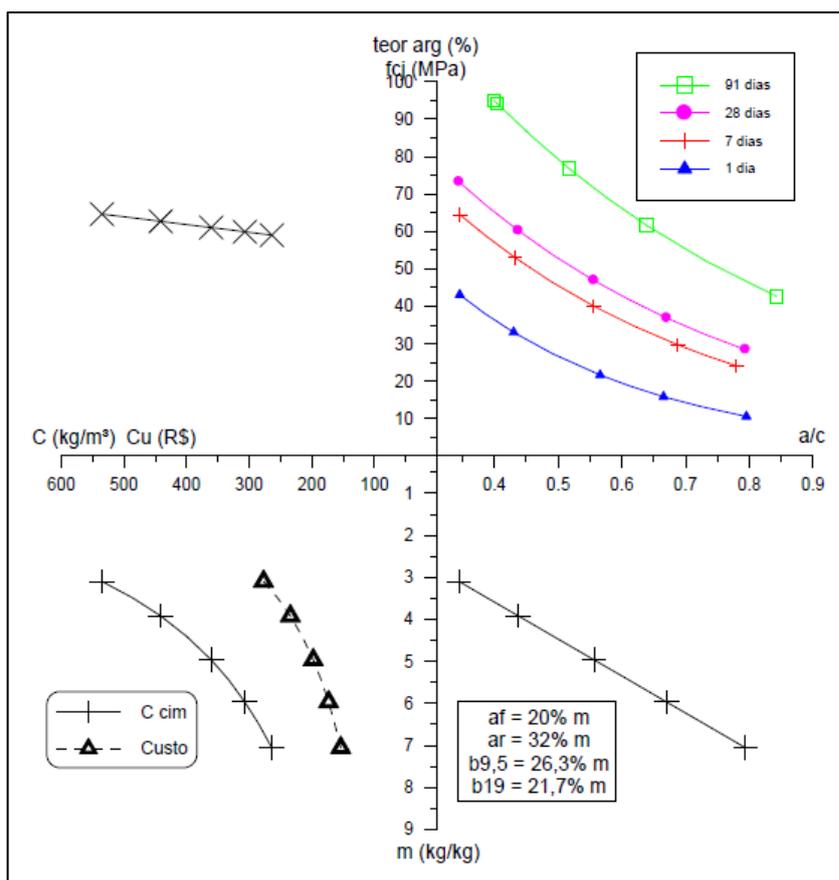
O diagrama de dosagem para o concreto convencional (CCV) é conhecido, já que é usualmente utilizado nos métodos de dosagem IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). O de Tutikian (2004) é utilizado para CAA. Logo, a forma das equações de comportamento é parecida com as já utilizadas, apesar de haver novas proposições no novo método.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), o diagrama de dosagem consiste em relacionar a resistência à compressão nas várias idades ensaiadas com a relação a/c no primeiro quadrante; a relação a/c com a proporção 1:m no segundo quadrante; no terceiro, a proporção 1:m com o custo e com o consumo de cimento por metro cúbico de concreto. Como

o teor de argamassa seca nesse método não é constante para toda a família, foi acrescentado um quarto quadrante no diagrama de dosagem, relacionando o teor de argamassa seca (que divide o eixo 'y' positivo com a resistência à compressão) com o consumo de cimento.

O Gráfico 1 ilustra um exemplo do diagrama de dosagem. Observa-se a introdução da curva de custo (que divide o eixo 'x' negativo com o consumo de cimento), que não é obrigatória. Porém, permite rápida determinação gráfica do custo de qualquer ponto dentro de uma família de concretos. Por fim, salienta-se que o diagrama de dosagem deve ser usado no sentido horário a partir da resistência à compressão até o teor de argamassa. Ou no sentido anti-horário do consumo de cimento até a resistência à compressão nas diversas idades. E a curva de custo não pode, em hipótese nenhuma, ser utilizada como passagem à outra propriedade (não deve ser utilizada, por exemplo, para determinar o teor de argamassa) servindo, apenas, para sua própria determinação. No gráfico também nota-se as proporções entre os agregados, item constante para todos os pontos da família. A partir da relação, pode-se calcular a quantidade unitária dos agregados e, seguindo o procedimento do método, determinar todos os outros componentes dos traços (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Gráfico 1 – Exemplo de diagrama de dosagem com  $\alpha$  variando



Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

Esse diagrama deve ser utilizado apenas para aproximações, pois para cálculos precisos usam-se as equações de comportamento. Nota-se também que a inclinação da curva do custo não acompanha a do consumo de cimento, ou seja, não há um aumento proporcional de valores na medida em que se aumenta o consumo de cimento, quando a mistura se torna mais rica.

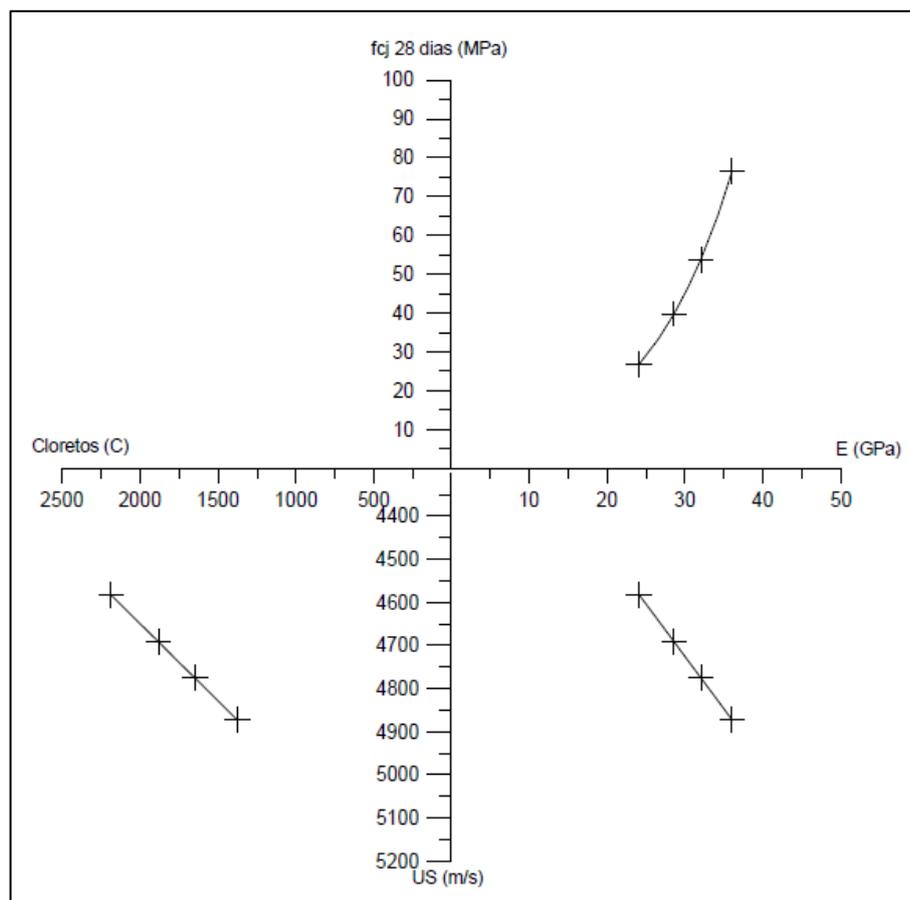
Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), o objetivo do diagrama de desempenho é similar ao de dosagem: com dois ou três resultados de um determinado ensaio, preferencialmente os de durabilidade, ter a possibilidade de determinar as equações de comportamento e a possibilidade de cálculo das propriedades para quaisquer valores de resistência à compressão, por exemplo.

O diagrama de desempenho consiste em relacionar a resistência à compressão com propriedades de durabilidade ou até mecânicas dos concretos. Pode ser absorção total de água ou capilaridade, penetração de íons cloretos, carbonatação, módulo de elasticidade, velocidade da onda ultrassônica, resistência à tração e outros. Deve-se escolher apenas ensaios que não estejam representados no diagrama de dosagem. Normalmente, os ensaios são relacionados com a resistência à compressão (o diagrama é utilizado no sentido horário), que é a propriedade do concreto mais utilizada. Porém, certamente ocorrerão quadrantes no diagrama de dosagem em que os ensaios se correlacionam apenas entre si, sendo necessário determinar as equações de comportamento de cada caso.

O desenho do diagrama de desempenho não é obrigatório para a dosagem dos concretos, sendo utilizado apenas quando requisitado e para aproximações.

O Gráfico 2 ilustra um exemplo de diagrama de desempenho relacionando a resistência à compressão com módulo de elasticidade, com velocidade de onda ultrassônica e penetração de íons cloretos.

Gráfico 2 – Exemplo de diagrama de desempenho



Fonte: Tutikian; Dal Molin (2008)

### 2.8.7 Comparação entre os métodos nacionais de dosagem do CAA

O Quadro 21 ilustra o estudo comparativo entre os cinco métodos nacionais de dosagem do CAA descritos nos itens anteriores. Através de dez critérios, aspectos qualitativos e das pesquisas apresentadas pelos autores destes métodos, objetiva-se resumir os conceitos utilizados para a elaboração dos métodos, verificar peculiaridades e semelhanças entre estes, e vantagens e/ou inconvenientes da utilização de cada método.

Quadro 21 – Comparação entre os métodos nacionais de dosagem do CAA

Item	Critério ou Aspecto Avaliado	Métodos nacionais de dosagem do CAA				
		Gomes et al. (2002)	Repette e Melo (2005)	Tutikian (2004)	Tutikian e Dal Molin (2007)	Alencar e Helene (2008)
1	Busca o melhor proporcionamento dos agregados através da redução do volume de espaços entre as partículas	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
2	Avalia e ajusta indiretamente a viscosidade e fluidez da pasta	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
3	Avalia e ajusta indiretamente a viscosidade e fluidez da argamassa	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
4	Determina o ponto de saturação de SP	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
5	A dosagem do SP em relação ao cimento é constante para todos os traços considerados de mesma "família"	*	NÃO	SIM	SIM	SIM
6	Utiliza plastificante para melhora da trabalhabilidade do concreto antes da adição do SP	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO
7	Corrige o teor de argamassa com objetivo de aumentar a trabalhabilidade do CAA	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	SIM
8	Considera as características de fluidez, viscosidade e coesão do concreto como um todo, sem avaliar pasta e argamassa em separado	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM
9	Utiliza algum tipo de diagrama para otimizar futuras dosagens de CAA	*	SIM	SIM	SIM	SIM
10	Utiliza finos pozolânicos ou não pozolânicos na mistura com intuito de aumentar a estabilidade e evitar a segregação	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

\* critério ou aspecto não identificado na literatura pesquisada.

Fonte: Fochs (2011 adaptado)

## CAPÍTULO 3

# CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DISPONÍVEIS EM SÃO LUÍS – MA

---

A caracterização dos materiais, exposta neste capítulo, foi realizada no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) – São Luís.

### 3.1 CIMENTO

O cimento escolhido para realização dessa pesquisa foi o Nassau CP IV-32 RS, produzido na fábrica da Nassau em Codó – MA (Figura 71).

Figura 71 – Cimento Nassau CP IV-32 RS



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

A escolha do cimento Nassau CP IV-32 RS foi baseada em três fatores:

1. Cimento mais encontrado na região;
2. Área específica grande (cimento bem fino);
3. Teor de C<sub>3</sub>A menor que 10%.

O Quadro 22 resume as principais características desse tipo de cimento:

Quadro 22 – Caracterização do cimento CP IV-32 RS

<b>COMPOSIÇÃO (% EM MASSA)</b>			
<b>Clínquer + Gesso</b>	<b>Escória granulada de alto-forno</b>	<b>Material Pozolânico</b>	<b>Material Carbonático</b>
85-45	-	15-50	0-5
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS</b>			
<b>Finura</b>	<b>Resíduo na peneira 75 mm (%)</b>		≤ 8,0
<b>Tempo de pega</b>	<b>Início (h)</b>		≥ 1
	<b>Fim (h)</b>		≤ 12
<b>Expansibilidade</b>	<b>A frio (mm)</b>		≤ 5
	<b>A quente (mm)</b>		≤ 5
<b>Resistência à compressão</b>	<b>3 dias (MPa)</b>		≥ 10
	<b>7 dias (MPa)</b>		≥ 20
	<b>28 dias (MPa)</b>		≥ 32
	<b>71 dias (MPa)</b>		≥ 40
<b>CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS</b>			
<b>Perda ao fogo (%)</b>	≤ 4,5		
<b>MgO (%)</b>	≤ 6,5		
<b>SO<sub>3</sub> (%)</b>	≤ 4,0		
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	≤ 3,0		
<b>C<sub>3</sub>A (%)</b>	≤ 8,0		

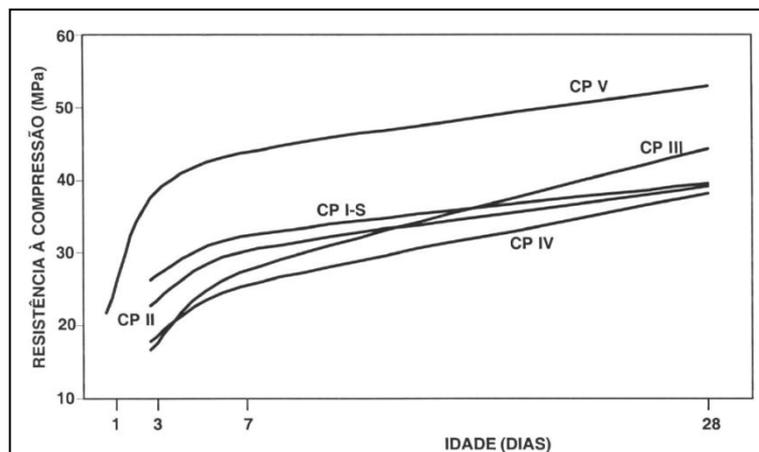
Fonte: ABCP (2002 adaptado)

Além das características citadas acima, o cimento Nassau CP-IV RS possui alguns benefícios:

- Baixo calor gerado na reação do cimento com a água;
- Boa impermeabilidade;
- Alta resistência aos agentes agressivos (água do mar e de esgotos);
- Grande durabilidade.

O único ponto que fica a desejar, quando comparado com os outros tipos de cimento, é a evolução de sua resistência à compressão. A evolução de sua resistência à compressão é lenta, sendo menor nos primeiros dias e maior no final da cura (Figura 72).

Figura 72 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento portland



Fonte: ABCP (2002)

## 3.2 AGREGADOS

### 3.2.1 Agregado miúdo

#### 3.2.1.1 Origem

O agregado miúdo escolhido para a realização dessa pesquisa foi a areia fina lavada, extraída de leito de rio, proveniente da região de Morros – MA, a qual é largamente encontrada e utilizada em nossa região (Figura 73).

Figura 73 – Areia encontrada na região de São Luís – MA



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

### 3.2.1.2 Composição Granulométrica

A composição granulométrica da areia foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 248:2003. Duas amostras de 500g de areia foram separadas, secas na estufa e submetidas ao peneiramento mecânico para se determinar a massa do material retido em cada peneira.

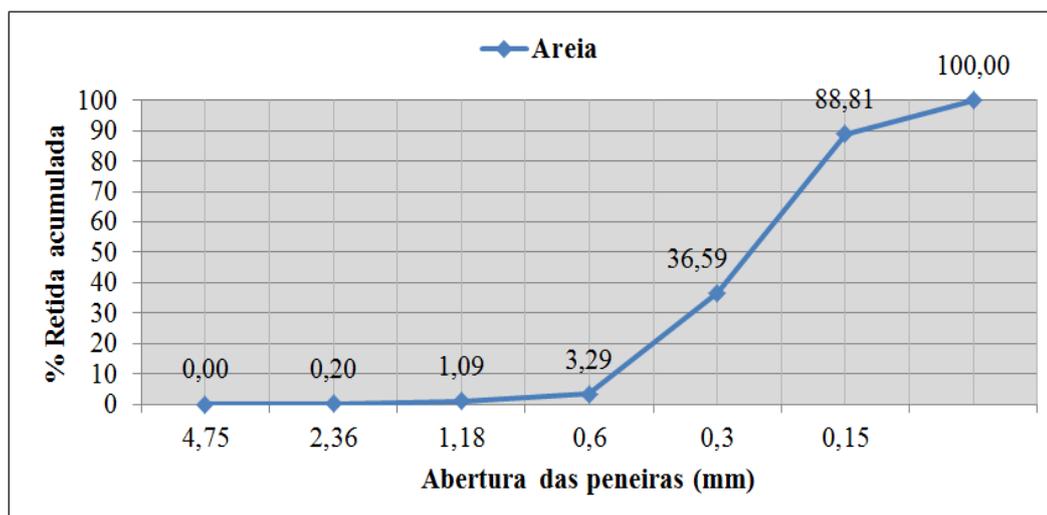
Os resultados obtidos no ensaio da composição granulométrica da areia são apresentados no Quadro 23, no Gráfico 3 e na Figura 74.

Quadro 23 – Composição granulométrica da areia

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada
4,75	0,00	0,00	0,00
2,36	1,00	0,20	0,20
1,18	4,45	0,89	1,09
0,6	11,00	2,20	3,29
0,3	166,50	33,30	36,59
0,15	261,10	52,22	88,81
Fundo	55,95	11,19	100,00
<b>TOTAL</b>	<b>500,00</b>	<b>100,00</b>	-
<b>Módulo de finura (MF) = 1,30</b>			
<b>Dimensão máxima característica (DMC) = 0,6 mm</b>			

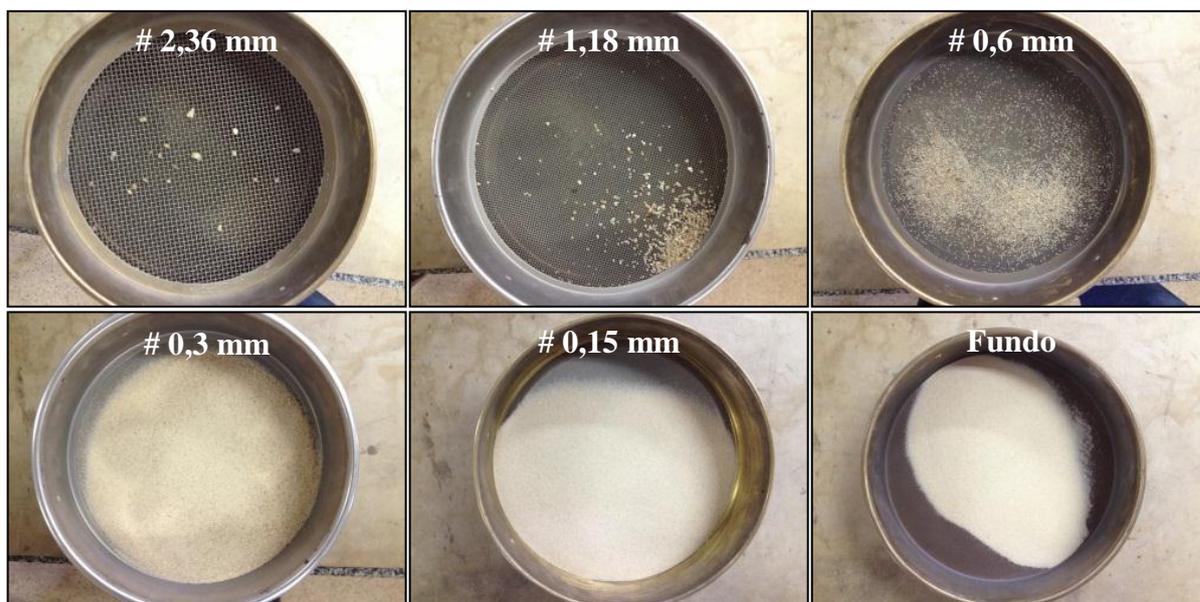
Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Gráfico 3 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Figura 74 – Aspecto visual da distribuição granulométrica da areia



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Com base nas informações acima, podemos concluir que a areia que vai ser utilizada na dosagem do CAA é uma areia bastante fina (pequeno módulo de finura), embora seja comercializada como média. Portanto, visto que uma das principais características do CAA é a presença de finos, essa areia é excelente para sua produção.

### 3.2.1.3 Massa unitária solta e compactada

A massa unitária solta e compactada da areia foram determinadas de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 45:2006. A areia utilizada no ensaio foi seca na estufa, depois foi preenchido com essa areia um recipiente com volume e peso determinados e após isso o recipiente com a areia foi pesado (Figura 75). Para determinação da massa unitária solta não houve compactação, mas para se determinar a massa unitária compactada precisou encher o recipiente em 3 camadas de 1/3 da sua altura e, em cada camada, aplicar 25 golpes distribuídos uniformemente.

Figura 75 – Determinação da massa unitária da areia



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Depois de realizado o procedimento acima, a massa unitária solta e compactada foi determinada pela Equação 16.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V}$$

(Equação 16)

Onde:

$\rho_{ap}$  = massa unitária da areia, em kg/m<sup>3</sup>;

$m_{ar}$  = massa do recipiente com a areia, em kg;

$m_r$  = massa do recipiente vazio, em kg;

$V$  = volume do recipiente, em m<sup>3</sup>.

Os resultados obtidos no ensaio da massa unitária solta e compactada da areia são apresentados no Quadro 24.

Quadro 24 – Massa unitária solta e compactada da areia

<b>Massa unitária solta</b>	1578 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa unitária compactada</b>	1925 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

### 3.2.1.4 Massa específica

A massa específica da areia foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 9776:1987. Duas amostras de 500g de areia foram separadas e secas na estufa. Após isso, colocou-se água no frasco de Chapman até a marca de 200 cm<sup>3</sup> e em seguida introduziu-se uma das amostras de areia, a qual foi devidamente agitada para a eliminação das bolhas de ar, e em seguida foi feita a leitura do nível atingido pela água no frasco (Figura 76).

Figura 76 – Determinação da massa específica da areia



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Depois de realizado o procedimento acima, a massa específica foi determinada pela Equação 17.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

**(Equação 17)**

Onde:

$\gamma$  = massa específica da areia, em g/cm<sup>3</sup>;

$L$  = leitura do nível atingido pela água no frasco após a adição da areia, em cm<sup>3</sup>.

O resultado obtido no ensaio da massa específica da areia é apresentado no Quadro 25.

Quadro 25 – Massa específica da areia

<b>Massa específica</b>	2,64 g/cm <sup>3</sup>
-------------------------	------------------------

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

### 3.2.1.5 Absorção

A absorção da areia foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 52:2009. Duas amostras de 1 kg de areia foram separadas, submersas em água por 24h e depois retiradas para secar naturalmente. Durante essa secagem, a areia foi colocada diversas vezes em um molde e sua superfície foi compactada suavemente com 25 golpes. Cada vez que o molde era retirado e o tronco de cone não desmoronava parcialmente, a areia era novamente posta para secar. Quando o tronco de cone desmoronou parcialmente ao retirar o molde, foi realizada a pesagem da amostra e determinada a massa ao ar da areia na condição saturada superfície seca (Figura 77).

Figura 77 – Determinação da absorção da areia



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Depois de realizado o procedimento acima, a absorção foi determinada pela Equação 18.

$$a = \frac{M_s - M}{M} \times 100 \text{ (\%)} \quad \text{(Equação 18)}$$

Onde:

**a** = absorção da areia (%);

**M<sub>s</sub>** = massa ao ar da areia na condição saturada superfície seca;

**M** = massa da amostra seca na estufa.

O resultado obtido no ensaio da absorção da areia é apresentado no Quadro 26.

Quadro 26 – Absorção da areia

<b>Absorção</b>	0,23%
-----------------	-------

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

### 3.2.1.6 Teor de material pulverulento

O teor de material pulverulento da areia foi determinado de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 46:2003. Duas amostras de 500g de areia foram separadas, secas na estufa e determinado a massa das amostras secas (A). Após isso, a areia foi colocada em um recipiente, adicionou-se água até cobri-lo e a amostra foi agitada vigorosamente até que o material pulverulento ficasse em suspensão. Imediatamente após esse processo, a água de lavagem foi escoada sobre as peneiras de diâmetro 1,2 mm e 0,075 mm. Em seguida, foi adicionada uma segunda quantidade de água ao recipiente, agitando-o e vertendo a água sobre as peneiras. A operação foi repetida até que a água de lavagem ficou bem clara, comparando-se visivelmente a sua limpidez com uma água limpa. Por último, todo o material retido nas peneiras foi devolvido às amostras, que em seguida foram lavadas, secas na estufa e determinado sua massa (B). A Figura 78 ilustra os pontos principais do que foi citado acima.

Figura 78 – Determinação do teor de material pulverulento da areia



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Depois de realizado o procedimento acima, o teor de material pulverulento foi determinado pela Equação 19.

$$m = \frac{A - B}{A} \times 100 (\%)$$

(Equação 19)

Onde:

**m** = teor de material pulverulento da areia (%);

**A** = massa da areia seca antes da lavagem;

**B** = massa da areia seca após a lavagem.

O resultado obtido no ensaio do teor de material pulverulento da areia é apresentado no Quadro 27.

Quadro 27 – Teor de material pulverulento da areia

Teor de material pulverulento	Teor máximo recomendado (NBR 7211:2009)	
	Concretos submetidos a desgaste superficial	Concretos protegidos do desgaste superficial
0,45%	3,00%	5,00%

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, podemos concluir que a areia que vai ser utilizada na dosagem do CAA é uma areia que contém um baixo teor de material pulverulento, podendo assim ser utilizada tanto em concretos submetidos a desgaste superficial, quanto em concretos protegidos do desgaste superficial. Uma vez que o excesso

de material pulverulento prejudica a aderência entre a pasta do cimento e a argamassa, aumenta o consumo de água devido à alta superfície específica, acarretando retração e diminuição da resistência do concreto.

### 3.2.1.7 Impurezas orgânicas

A qualidade da areia em relação à contaminação com impurezas orgânicas foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 49:2001. Uma amostra de 200 g de areia seca ao ar foi colocada em um frasco de Erlenmeyer, em seguida adicionou-se 100 ml de uma solução de hidróxido de sódio a 3% e agitou-se vigorosamente a mistura. Após isso, preparou-se uma solução padrão com 97 ml da solução de hidróxido de sódio a 3% e 3 ml de uma solução de ácido tânico a 2%. Ambas as soluções foram deixadas em repouso por 24h, em ambiente sem raios de luz e sol. No dia seguinte, a solução que esteve em contato com a areia foi filtrada com auxílio de papel filtro e transferida para um tubo de ensaio. Depois disso, a solução padrão foi transferida para outro tubo de ensaio e as cores das duas soluções foram comparadas (Figura 79).

Figura 79 – Determinação da qualidade da areia em relação à contaminação com impurezas orgânicas



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Com base nas informações acima, podemos observar que a solução que esteve em contato com a areia é mais clara que a solução padrão. Portanto, essa areia segue as recomendações da NBR 7211:2009 e está aprovada para o uso no CAA. Caso a areia apresente-se contaminação com impurezas orgânicas (coloração mais escura que a solução padrão), elas poderiam inibir a hidratação do cimento, prejudicar a resistência do concreto, principalmente nas primeiras idades e causar o aparecimento de fissuras e pontos escuros no concreto depois de endurecido.

### 3.2.1.8 Teor de argila em torrões e materiais friáveis

Nas amostras ensaiadas, de acordo com a NBR 7218:2010, não foi constatada visualmente a presença de torrões de argila ou materiais friáveis. De acordo com a NBR 7211:2009, o teor máximo de argila em torrões e materiais friáveis para agregados miúdos é de 3,0%. Portanto, a areia segue as recomendações da NBR 7211:2009 e está aprovada para uso no CAA. Caso a areia apresentasse um teor de argila em torrões e materiais friáveis maior que 3,0%, esses materiais poderiam prejudicar à resistência do concreto e também à sua aparência, uma vez que eles, no caso de concreto aparente, poderiam produzir manchas na superfície.

## 3.2.2 Agregado graúdo

### 3.2.2.1 Origem

Os agregados graúdos escolhidos para a realização dessa pesquisa foram a brita 1 e brita 0, ambas de origem granítica, provenientes de uma pedreira localizada em Rosário – MA e largamente encontradas e utilizadas em nossa região (Figura 80).

Figura 80 – Brita 1 e Brita 0 encontradas na região de São Luís – MA



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

### 3.2.2.2 Composição Granulométrica

A composição granulométrica das britas foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 248:2003, já comentados neste capítulo.

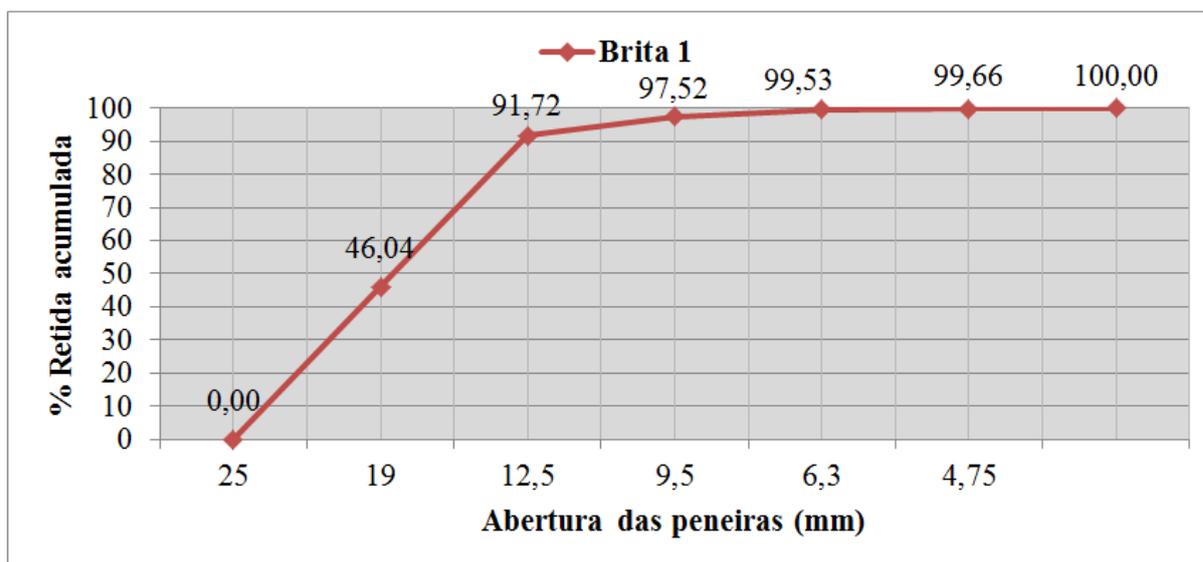
Os resultados obtidos no ensaio da composição granulométrica da brita 1 são apresentados no Quadro 28, no Gráfico 4 e na Figura 81.

Quadro 28 – Composição granulométrica da brita 1

<b>Abertura das peneiras (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida acumulada</b>
<b>25</b>	0,00	0,00	0,00
<b>19</b>	2302,05	46,04	46,04
<b>12,5</b>	2283,80	45,68	91,72
<b>9,5</b>	290,00	5,80	97,52
<b>6,3</b>	100,55	2,01	99,53
<b>4,75</b>	6,65	0,13	99,66
<b>Fundo</b>	16,95	0,34	100,00
<b>TOTAL</b>	<b>5000,00</b>	<b>100,00</b>	-
<b>Módulo de finura (MF) = 7,43</b>			
<b>Dimensão máxima característica (DMC) = 25 mm</b>			

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Gráfico 4 – Curva granulométrica da brita 1



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Figura 81 – Aspecto visual da distribuição granulométrica da brita 1



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Com base nas informações acima, podemos observar que a Brita 1 utilizada não tem uma distribuição granulométrica uniforme e possui diâmetro máximo característico elevado, o que pode fazer com que o CAA tenha dificuldade para passar pelas armaduras e o torna mais sensível à segregação.

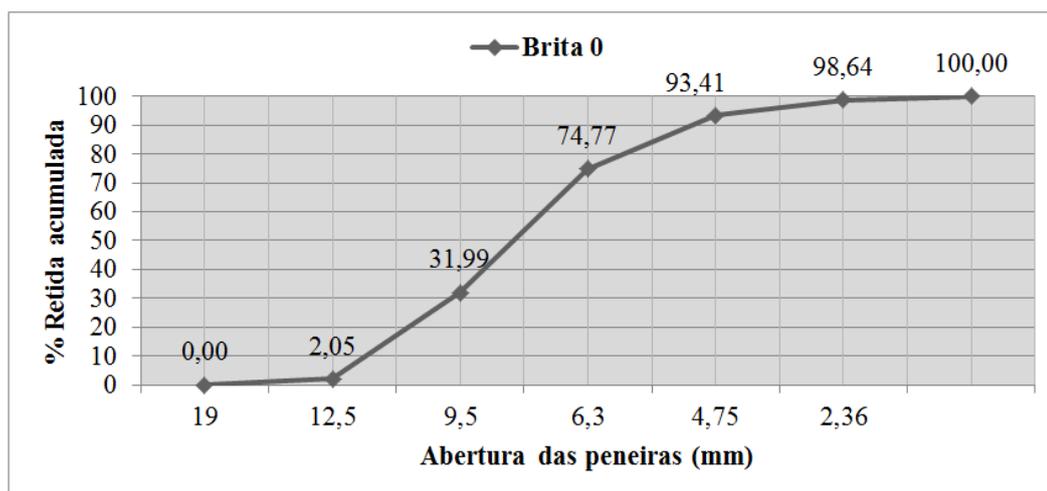
Os resultados obtidos no ensaio da composição granulométrica da brita 0 são apresentados no Quadro 29, no Gráfico 5 e na Figura 82.

Quadro 29 – Composição granulométrica da brita 0

<b>Abertura das peneiras (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida acumulada</b>
<b>19</b>	0,00	0,00	0,00
<b>12,5</b>	102,40	2,05	2,05
<b>9,5</b>	1497,00	29,94	31,99
<b>6,3</b>	2138,90	42,78	74,77
<b>4,75</b>	932,00	18,64	93,41
<b>2,36</b>	261,80	5,24	98,64
<b>Fundo</b>	67,90	1,36	100,00
<b>TOTAL</b>	<b>5000,00</b>	<b>100,00</b>	-
<b>Módulo de finura (MF) = 6,24</b>			
<b>Dimensão máxima característica (DMC) = 12,5 mm</b>			

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Gráfico 5 – Curva granulométrica da brita 0



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Figura 82 – Aspecto visual da distribuição granulométrica da brita 0



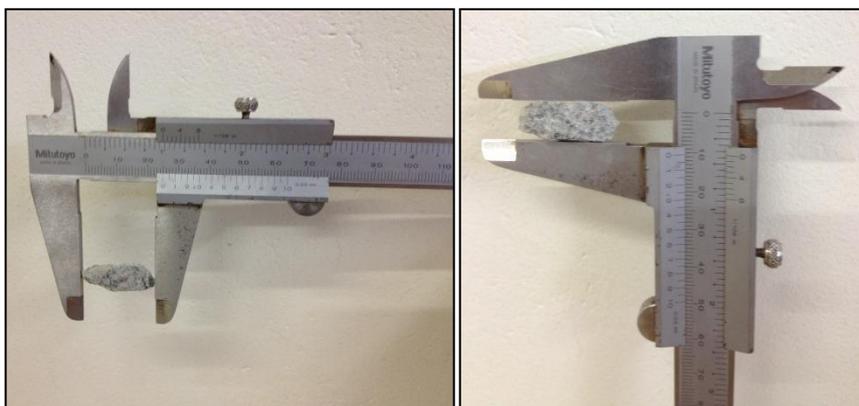
Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Com base nas informações acima, podemos observar que a Brita 0 utilizada tem uma distribuição granulométrica mais uniforme que a brita 1 e possui um bom diâmetro máximo característico.

### 3.2.2.3 Índice de forma

O índice de forma da brita 1 e brita 0 foi determinado de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 7809:2006. As britas utilizadas no ensaio foram secas na estufa, separadas em frações (totalizando 200 grãos) e em seguida com o auxílio do paquímetro foi medido o comprimento (c) e a espessura (e) de cada grão (Figura 83).

Figura 83 – Determinação do índice de forma da brita 1 e brita 0



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Depois de realizado o procedimento acima, calculou-se a relação entre o comprimento e a espessura (c/e) de cada grão medido. Em seguida, determina-se para cada fração a média aritmética dos valores obtidos da relação c/e de cada grão. Por fim, o índice de forma é determinado pela média ponderada dos valores obtidos da relação c/e de cada fração.

O resultado obtido no ensaio do índice de forma da brita 1 e brita 0 é apresentado no Quadro 30.

Quadro 30 – Índice de forma da brita 1 e brita 0

Índice de forma		Valor máximo recomendado (NBR 7211:2009)
Brita 1	Brita 0	
2,223	2,373	3,000

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, embora o índice de forma esteja dentro do valor recomendado pela NBR 7211:2009, as britas com índice de forma mais próximo de 1 (forma cúbica) são mais indicadas para o CAA. As britas estudadas apresentam, na maioria dos seus grãos, forma lamelar (resultado do índice de forma mais próximo de 3), contendo apenas uma minoria com forma cúbica. A Figura 84 ilustra o contraste dos grãos com forma cúbica e lamelar das britas estudadas.

Figura 84 – Aspecto visual da forma dos grãos da brita 1 e brita 0



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

#### 3.2.2.4 Massa unitária solta e compactada

A massa unitária solta e compactada da brita 1 e brita 0 foram determinadas de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 45:2006, já comentados neste capítulo (Figura 85).

Figura 85 – Determinação da massa unitária da brita 1 e brita 0



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Os resultados obtidos no ensaio da massa unitária solta e compactada da brita 1 e brita 0 são apresentados no Quadro 31.

Quadro 31 – Massa unitária solta e compactada da brita 1 e brita 0

Massa unitária solta		Massa unitária compactada	
Brita 1	Brita 0	Brita 1	Brita 0
1470 kg/m <sup>3</sup>	1434 kg/m <sup>3</sup>	1760 kg/m <sup>3</sup>	1669 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

### 3.2.2.5 Massa específica e Absorção

A massa específica e a absorção da brita 1 e brita 0 foram determinadas de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 53:2009. As amostras foram lavadas na peneira 4,75 mm, rejeitou-se o que passou e ambas as amostras foram secas na estufa. Em seguida as amostras foram submersas em água por um período de 24 horas. No dia seguinte, as amostras foram retiradas da água e secas superficialmente com um pano. Imediatamente depois a amostra foi pesada e determinou-se a massa da amostra saturada superfície seca. Depois disso, a amostra foi colocada em um cesto de arame, submersa em água e foi pesada em água utilizando a balança hidrostática (Figura 86).

Figura 86 – Determinação da massa específica e absorção da brita 1 e brita 0



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Depois de realizado o procedimento acima, a massa específica e absorção foram determinadas pelas Equações 20 e 21.

$$\gamma = \frac{A}{C - B}$$

(Equação 20)

$$a = \frac{C - A}{A} \times 100 (\%)$$

(Equação 21)

Onde:

$\gamma$  = massa específica do agregado graúdo, em g/cm<sup>3</sup>;

**a** = absorção do agregado graúdo (%);

**A** = massa do agregado graúdo seco, em g;

**B** = massa do agregado graúdo submerso, em g;

**C** = massa do agregado graúdo saturado com superfície seca, em g.

Os resultados obtidos no ensaio da massa específica e absorção da brita 1 e brita 0 são apresentados no Quadro 32.

Quadro 32 – Massa específica e absorção da brita 1 e brita 0

Massa específica		Absorção	
Brita 1	Brita 0	Brita 1	Brita 0
2,85 g/cm <sup>3</sup>	2,70 g/cm <sup>3</sup>	0,24%	0,85%

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

### 3.2.2.6 Teor de material pulverulento

O teor de material pulverulento da brita 1 e brita 0 foi determinado de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 46:2003, já comentados neste capítulo (Figura 87).

Figura 87 – Determinação do teor de material pulverulento da brita 1 e brita 0



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

O resultado obtido no ensaio do teor de material pulverulento da brita 1 e brita 0 é apresentado no Quadro 33.

Quadro 33 – Teor de material pulverulento da brita 1 e brita 0

Teor de material pulverulento		Teor máximo recomendado (NBR 7211:2009)
Brita 1	Brita 0	
0,34%	0,83%	1,00%

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, podemos concluir que a brita 1 e brita 0 que vão ser utilizadas na dosagem do CAA, estão adequadas de acordo com a NBR 7211:2009. Como já comentado nesse capítulo, se o teor de material pulverulento estivesse acima do recomendado pela NBR 7211:2009, o concreto poderia apresentar uma série de problemas.

### 3.2.2.7 Resistência à abrasão

A resistência à abrasão da brita 1 e brita 0 foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 51:2001. As amostras foram selecionadas, secas na estufa, depois colocadas dentro da máquina “Los Angeles”, juntamente com as cargas abrasivas, e foram submetidas a 500 rotações. Após esse procedimento, as amostras foram retiradas da máquina e peneiradas na peneira de abertura de malha de 1,7 mm. Após isso, as amostras que ficaram retidas na peneira de malha 1,7 mm foram lavadas e secas na estufa. No dia seguinte, as amostras foram retiradas da estufa e pesadas (Figura 88).

Figura 88 – Determinação da resistência à abrasão da brita 1 e brita 0



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

Depois de realizado o procedimento acima, a resistência à abrasão foi determinada pela Equação 22.

$$P = \frac{M - M_1}{M} \times 100 (\%)$$

**(Equação 22)**

Onde:

**P** = perda por abrasão (%);

**M** = massa inicial do agregado graúdo seco;

**M<sub>1</sub>** = massa do agregado graúdo seco depois da abrasão, peneiramento e lavagem.

O resultado obtido no ensaio de resistência à abrasão da brita 1 e brita 0 é apresentado no Quadro 34.

Quadro 34 – Perda por abrasão da brita 1 e brita 0

Perda por abrasão		Perda máxima recomendada (NBR 7211:2009)
Brita 1	Brita 0	
22,39%	11,30%	50,00%

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, podemos concluir que a brita 1 e brita 0 que vão ser utilizadas na dosagem do CAA, estão adequadas de acordo com a NBR 7211:2009, possuindo assim uma boa resistência à abrasão.

### 3.2.2.8 Teor de argila em torrões e materiais friáveis

Nas amostras ensaiadas, de acordo com a NBR 7218:2010, não foi constatada visualmente a presença de torrões de argila ou materiais friáveis. De acordo com a NBR 7211:2009, o teor máximo de argila em torrões e materiais friáveis para agregados graúdos é de 1,0% para concreto aparente, 2,0% para concreto sujeito a desgaste superficial e 3,0% para outros concretos. Portanto, a brita 1 e brita 0 seguem as recomendações da NBR 7211:2009 e

estão aprovadas para uso no CAA. Como já comentado nesse capítulo, se o teor de argila em torrões e materiais friáveis estivesse acima do recomendado pela NBR 7211:2009, o concreto poderia apresentar uma série de problemas.

### 3.3 ADITIVO

O aditivo escolhido para a realização dessa pesquisa foi o superplastificante “KALLIT SP” produzido na Fábrica da Empresa Kalfix em Teresina – PI (Figura 89).

Figura 89 – Aditivo superplastificante “KALLIT SP”



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

O Quadro 35 resume as principais características desse aditivo superplastificante, conforme ficha técnica do fabricante.

Quadro 35 – Caracterização do aditivo superplastificante “KALLIT SP”

<b>Função principal</b>	Superplastificante
<b>Base química</b>	Éter policarboxílico
<b>Densidade</b>	1,04 a 1,08 g/cm <sup>3</sup>
<b>Teor de sólidos</b>	± 30%
<b>pH</b>	6,0 - 8,0
<b>Aspecto</b>	Líquido
<b>Cor</b>	Castanho
<b>Teor de cloretos</b>	Isento

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

### 3.4 ÁGUA DE AMASSAMENTO

A água utilizada nessa pesquisa foi proveniente da rede de abastecimento da Empresa Kalfix, localizada no bairro Turu – São Luís. Duas características de principal importância dessa água foram avaliadas e são apresentadas no quadro 36.

Quadro 36 – Caracterização da água de amassamento

<b>Parâmetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Recomendação (NBR 15900-1:2009)</b>
pH	5,1	$\geq 5$
Teor de cloreto	13 mg/L	Concreto protendido ou graute = 500 mg/L
		Concreto armado = 1000 mg/L
		Concreto simples (sem armadura) = 4500 mg/L

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, podemos concluir que a água que vai ser utilizada na dosagem do CAA, está adequada de acordo com a NBR 15900-1:2009. Se o pH e/ou teor de cloreto não estivessem de acordo com o recomendado pela NBR 15900-1:2009, algumas patologias poderiam aparecer no concreto, como a corrosão de armaduras e o aparecimento de eflorescência.

# CAPÍTULO 4

## DOSAGEM EXPERIMENTAL (CAA)

---

A dosagem experimental do CAA, exposta neste capítulo, foi baseada no método de Tutikian e Dal Molin (2007) e foi desenvolvida no Laboratório de Concreto da Empresa Kalfix (São Luís – MA), utilizando os materiais caracterizados no Capítulo 3.

### 4.1 DEFINIÇÃO DO TRAÇO

#### 4.1.1 Esqueleto granular

O objetivo deste passo é determinar a proporção entre dois materiais que possuam a menor quantidade de vazios. Para isso, todos os componentes do CAA foram empacotados, dois a dois e em ordem decrescente de diâmetro das partículas.

O primeiro empacotamento foi entre a brita 1 e brita 0 (Figura 90).

Figura 90 – Empacotamento entre a brita 1 e brita 0



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

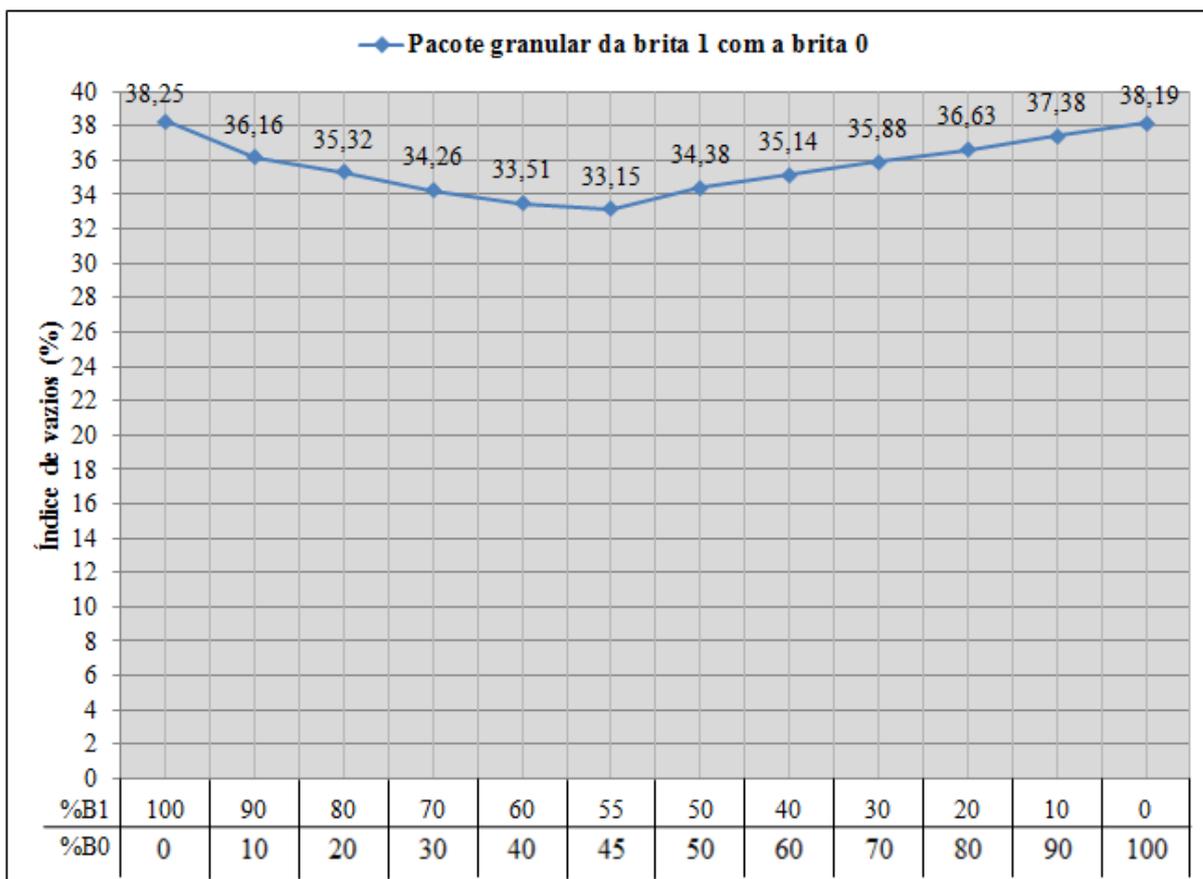
O resultado obtido no empacotamento entre a brita 1 e brita 0 é apresentado no Quadro 37 e no Gráfico 6

Quadro 37 – Empacotamento entre a brita 1 e brita 0

Brita 1 (%)	Brita 0 (%)	Massa Mistura (kg)	Volume Recipiente (dm <sup>3</sup> )	Massa Unitária Compactada Mistura (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica Mistura (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)
100	0	8,800	5	1760	2850	2700	2850	38,25
90	10	9,050	5	1810	2850	2700	2835	36,16
80	20	9,120	5	1824	2850	2700	2820	35,32
70	30	9,220	5	1844	2850	2700	2805	34,26
60	40	9,275	5	1855	2850	2700	2790	33,51
55	45	9,300	5	1860	2850	2700	2783	33,15
50	50	9,105	5	1821	2850	2700	2775	34,38
40	60	8,950	5	1790	2850	2700	2760	35,14
30	70	8,800	5	1760	2850	2700	2745	35,88
20	80	8,650	5	1730	2850	2700	2730	36,63
10	90	8,500	5	1700	2850	2700	2715	37,38
0	100	8,345	5	1669	2850	2700	2700	38,19

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Gráfico 6 – Comportamento dos vazios do pacote granular da brita 1 com a brita 0



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, observa-se que a mistura de 55% de brita 1 com 45% de brita 0 é a que apresenta o menor percentual de vazios – 33,15%. Portanto, essa é a mistura que será utilizada para o próximo empacotamento.

O segundo empacotamento foi entre a mistura de 55% de brita 1 com 45% de brita 0 e a areia fina (Figura 91).

Figura 91 – Empacotamento entre a mistura de brita 1 com brita 0 e a areia fina



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

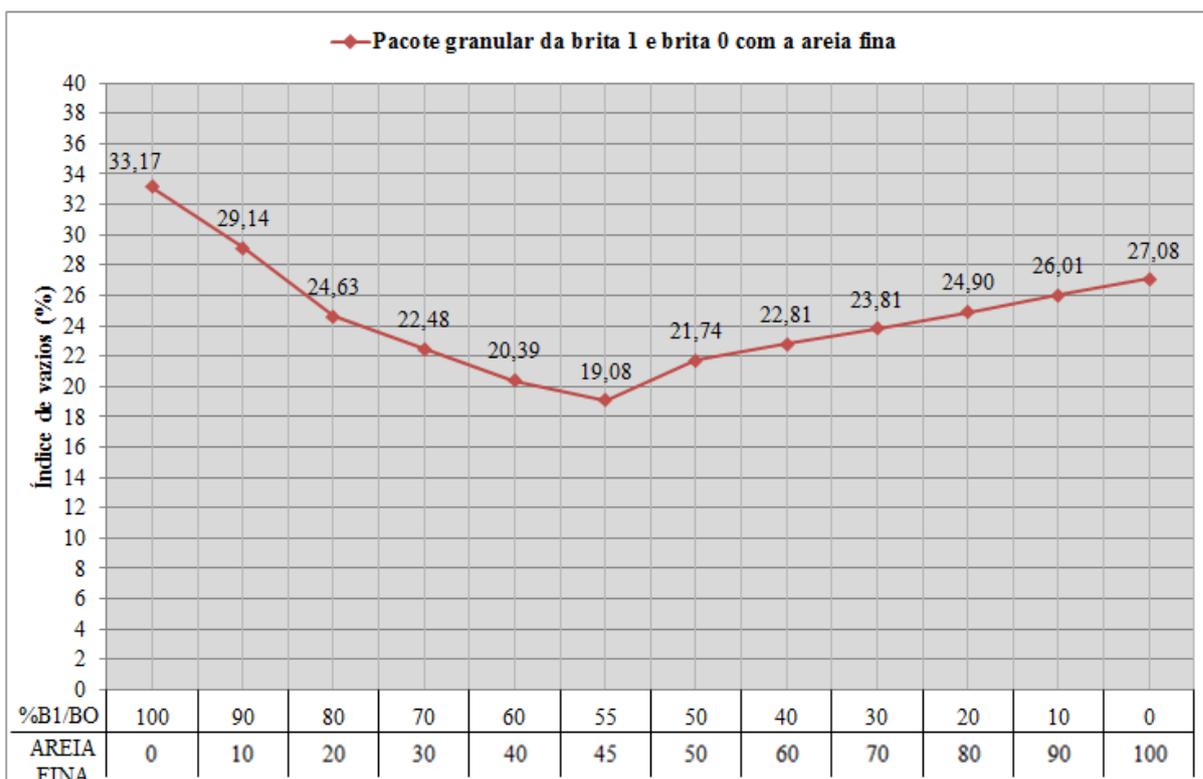
O resultado obtido no empacotamento entre a mistura de 55% de brita 1 com 45% de brita 0 e a areia fina é apresentado no Quadro 38 e na Gráfico 7.

Quadro 38 – Empacotamento entre a brita 1, brita 0 e a areia fina

55% B1 com 45% B0	Areia Fina (%)	Massa Mistura (kg)	Volume Recipiente (dm <sup>3</sup> )	Massa Unitária Compactada Mistura (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica 55% B1 com 45% B0 (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica Areia Fina (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica Mistura (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)
100	0	9,300	5	1860	2783	2640	2783	33,17
90	10	9,810	5	1962	2783	2640	2769	29,14
80	20	10,380	5	2076	2783	2640	2754	24,63
70	30	10,620	5	2124	2783	2640	2740	22,48
60	40	10,850	5	2170	2783	2640	2726	20,39
55	45	11,000	5	2200	2783	2640	2719	19,08
50	50	10,610	5	2122	2783	2640	2712	21,74
40	60	10,410	5	2082	2783	2640	2697	22,81
30	70	10,220	5	2044	2783	2640	2683	23,81
20	80	10,020	5	2004	2783	2640	2669	24,90
10	90	9,820	5	1964	2783	2640	2654	26,01
0	100	9,625	5	1925	2783	2640	2640	27,08

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Gráfico 7 – Comportamento dos vazios do pacote granular da brita 1 e brita 0 com a areia fina



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, observa-se que a composição ótima foi de 55% da mistura entre a brita 1 e brita 0 e 45% de areia fina, resultando em um índice de vazios de 19,08%.

Portanto, o esqueleto granular é composto de 45% de areia fina, 30,25% de brita 1 e 24,75% de brita 0.

#### 4.1.2 Parâmetros fixados

Com base em alguns traços pesquisados e de acordo com o exposto no Capítulo 2, alguns parâmetros foram fixados para a realização da dosagem experimental do CAA:

- Relação agregados secos/cimento em massa (m) = 4,5;
- Relação água/cimento = 0,50;
- Percentual de aditivo superplastificante = 0,57% sobre o peso do cimento;
- Consumo de cimento = 400 kg/m<sup>3</sup>.

### 4.1.3 Traço unitário e Consumo de materiais

Com base nas informações determinadas no item 4.1.1 e 4.1.2, o traço unitário e o consumo de materiais são apresentados nos Quadros 39 e 40.

Quadro 39 – Traço unitário do CAA e CCV

Tipo de Concreto	Família (m)	Traço Unitário				a/c	Aditivo (%)	$\alpha$
		Cimento	Areia média	Brita 1	Brita 0			
CAA	4,5	1	2,03	1,36	1,11	0,38	0,57	0,55
CCV	4,5	1	2,03	1,36	1,11	0,50	0,00	0,55

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Quadro 40 – Consumo de materiais para o CAA e CCV

Tipo de Concreto	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia média (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
CAA	400,00	812,00	544,00	444,00	152,00	2,28
CCV	400,00	812,00	544,00	444,00	200,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Como observado nos quadros acima, além do traço para o CAA, foi acrescentado um traço para um CCV, com o objetivo de se comparar as propriedades entre os dois tipos de concreto. Importante destacar que o fator a/c do CAA pôde ser reduzido em 25%, em relação ao CCV, com a utilização do aditivo superplastificante.

## 4.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO

A produção dos traços, estabelecidos neste capítulo, seguiu os seguintes passos:

- **1º Passo** – Determinação do teor de umidade de todos os materiais (Figura 92);

Figura 92 – Determinação do teor de umidade dos materiais

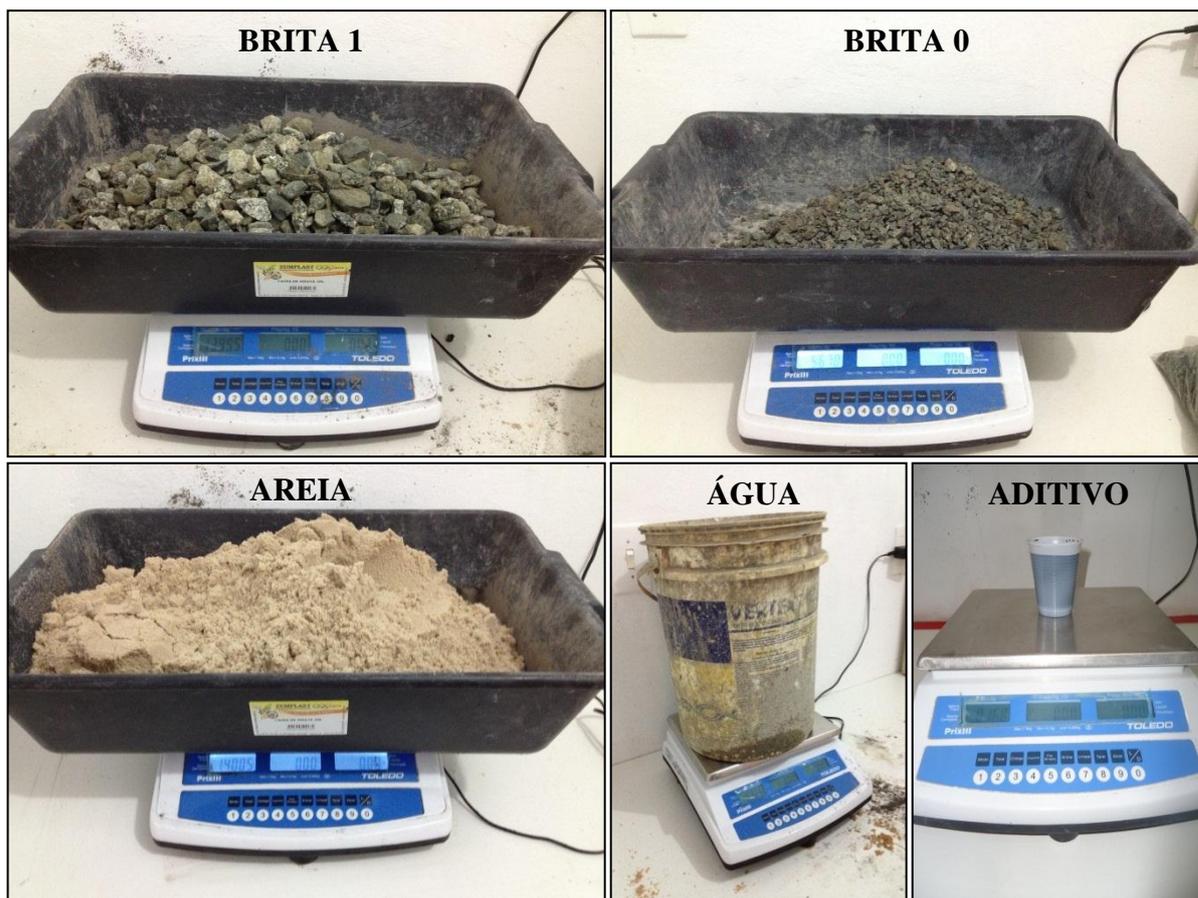


Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Esse passo tem como objetivo corrigir a quantidade total de água a ser colocada no traço.

- **2º Passo** – Pesagem dos materiais (Figura 93);

Figura 93 – Pesagem dos materiais para produção do concreto



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Esse passo tem como objetivo pesar, de maneira precisa, todos os materiais do traço já determinado.

- **3º Passo** – Mistura de todos os materiais do traço (Figura 94).

Figura 94 – Mistura dos materiais na betoneira basculante



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

A mistura do traço foi realizada em uma betoneira basculante com capacidade de 120 litros. O primeiro passo da mistura era a colocação da brita 1, brita 0 e metade da água utilizada para o traço. Após isso, deixava-se o material misturando na betoneira por aproximadamente 3 minutos e em seguida era colocado a areia, o cimento e o resto da água com o aditivo. Depois disso, todo o material ficava misturando na betoneira por 5 minutos e a mistura estava pronta.

### 4.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

#### 4.3.1 CCV

##### *4.3.1.1 Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone*

Esse ensaio foi realizado de acordo com a NBR NM 67:1998, bem conhecida no meio técnico, com o objetivo de avaliar a trabalhabilidade do CCV (Figura 95).

Figura 95 – Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

### 4.3.2 CAA

#### 4.3.2.1 Ensaio de espalhamento e tempo de escoamento (*slump flow test e slump flow t500*)

Esse ensaio foi realizado de acordo com a NBR 15823-2:2010, já comentada no Capítulo 2, com o objetivo de verificar se o traço proposto possui fluidez e tempo de escoamento compatíveis com as recomendações da NBR 15823-1:2010 (Figura 96).

Figura 96 – Ensaio de espalhamento e do tempo de escoamento



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

#### 4.3.2.2 Ensaio do Anel J

O Ensaio do Anel J foi realizado de acordo com a NBR 15823-3:2010, já comentada no Capítulo 2, com o objetivo de verificar se o traço proposto possui habilidade passante compatível com as recomendações da NBR 15823-1:2010 (Figura 97).

Figura 97 – Ensaio do Anel J



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

#### 4.3.2.3 Ensaio da Caixa L

O Ensaio da Caixa L foi realizado de acordo com a NBR 15823-4:2010, já comentada no Capítulo 2, com o objetivo de verificar se o traço proposto possui habilidade passante compatível com as recomendações da NBR 15823-1:2010 (Figura 98).

Figura 98 – Ensaio da Caixa L



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

#### *4.3.2.4 Ensaio do Funil V*

O Ensaio do Funil V foi realizado de acordo com a NBR 15823-5:2010, já comentada no Capítulo 2, com o objetivo de verificar se o traço proposto possui um tempo de escoamento compatível com as recomendações da NBR 15823-1:2010 (Figura 99).

Figura 99 – Ensaio do Funil V



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

#### *4.3.2.5 Ensaio da Coluna de Segregação*

O Ensaio da Coluna de Segregação foi realizado de acordo com a NBR 15823-6:2010, já comentada no Capítulo 2, com o objetivo de verificar se o traço proposto possui resistência à segregação compatível com as recomendações da NBR 15823-1:2010 (Figura 100).

Figura 100 – Ensaio da Coluna de Segregação



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

#### 4.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Para a avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido, todos os corpos-de-prova (CP's) foram moldados e submetidos à cura de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 5738:2003. A única diferença entre o CAA e o CCV se deu na moldagem dos CP's, pois para o CAA a moldagem foi realizada sem qualquer tipo de compactação. A cura de todos os CP's foi realizada em um tanque com água saturada de cal (Figura 101).

Figura 101 – Moldagem e Cura dos corpos-de-prova



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

#### 4.4.1 Ensaio de resistência à compressão axial

O Ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com a NBR 5739:2007. Para este ensaio foram moldados 12 CP's cilíndricos para cada concreto, totalizando 24 CP's, de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os CP's foram rompidos em uma prensa hidráulica elétrica, nas idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias, sendo que para cada idade rompeu-se 2 CP's de cada concreto. Em relação ao capeamento dos CP's, para o rompimento de 1 dia utilizou-se almofadas de neopreme e para as demais idades a retífica. A Figura 102 ilustra o ensaio de resistência à compressão axial.

Figura 102 – Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Depois de realizado o procedimento acima, a resistência à compressão axial foi determinada pela Equação 23.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \text{ (MPa)} \quad \text{(Equação 23)}$$

Onde:

$f_c$  = resistência à compressão axial, em megapascals (MPa);

$F$  = carga de ruptura, em newton (N);

$D$  = diâmetro do corpo-de-prova, em mm.

#### 4.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O Ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a NBR 7222:2011. Para este ensaio foram moldados 2 CP's cilíndricos para cada concreto, totalizando 4 CP's, de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. O capeamento dos CP's foi feito com a retífica e eles foram rompidos em uma prensa hidráulica elétrica, na idade de 28 dias. A Figura 103 ilustra o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 103 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Depois de realizado o procedimento acima, a resistência à tração por compressão diametral foi determinada pela Equação 24.

$$\text{Resistência (MPa)} = \frac{2 \times \text{carga de ruptura}}{3,1416 \times \text{comprimento médio} \times \text{diâmetro médio}}$$

(Equação 24)

#### 4.4.3 Ensaio da absorção de água e índice de vazios por imersão

O Ensaio da absorção de água e índice de vazios por imersão foi realizado de acordo com a NBR 9778:2005, com o objetivo de avaliar a porosidade do concreto. Para este ensaio foram moldados 2 CP's cilíndricos para cada concreto, totalizando 4 CP's, de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, sendo ensaiados aos 28 dias. Inicialmente, os CP's foram secos em estufa durante um período de 72 horas e que em seguida foram pesados para determinar a sua massa seca ( $m_s$ ). Após isso, os CP's foram imersos em água por 72 horas, depois foram levados à ebulição por 5 horas (fervura), pesados em uma balança hidrostática para determinar a sua massa imersa ( $m_i$ ) e em seguida os CP's foram secos com um pano e pesados para determinar a sua massa saturada seca ( $m_{sat}$ ).

Depois de realizado o procedimento acima, a absorção de água e o índice de vazios por imersão foram determinados pelas Equações 25 e 26.

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 (\%)$$

(Equação 25)

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 (\%)$$

(Equação 26)

Onde:

$A$  = absorção (%);

$I_v$  = índice de vazios (%);

$M_{sat}$  = massa do corpo-de-prova seco com pano após imersão;

$M_s$  = massa do corpo-de-prova seco em estufa;

$M_i$  = massa do corpo-de-prova imerso na balança hidrostática.

A Figura 104 ilustra o ensaio da absorção de água e índice de vazios por imersão.

Figura 104 – Ensaio da absorção de água e índice de vazios por imersão



Fonte: Autor, LSP – UEMA (2013)

#### 4.4.4 Ensaio da absorção de água por capilaridade

O Ensaio da absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a NBR 9779:2012, com o objetivo de avaliar a porosidade do concreto. Para este ensaio foram moldados 2 CP's cilíndricos para cada concreto, totalizando 4 CP's, de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, sendo ensaiados aos 28 dias. Inicialmente, os CP's foram secos em estufa durante um período de 24 horas e que em seguida foram pesados para determinar a sua massa seca ( $m_s$ ). Após isso, os CP's foram colocados em um recipiente com o nível da água a 5 mm

acima da sua face inferior. Durante o ensaio, a sua massa saturada ( $m_{sat}$ ) foi determinada com 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h, contadas a partir da colocação do CP em contato com o recipiente com água. Para cada pesagem, o CP era previamente enxugado com um pano úmido, pesado e após isso retornava ao recipiente. Depois da última pesagem, os CP's foram rompidos por compressão diametral, de modo a observar a distribuição da água no seu interior. A Figura 105 ilustra o ensaio da absorção de água por capilaridade.

Figura 105 – Ensaio da absorção de água por capilaridade



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Depois de realizado o procedimento acima, a absorção de água por capilaridade foi determinada pela Equação 27.

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{S}$$

(Equação 27)

Onde:

**C** = absorção de água por capilaridade, em g/cm<sup>2</sup>;

**m<sub>sat</sub>** = massa saturada do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

**m<sub>s</sub>** = massa do corpo-de-prova seco, em g;

**S** = área da seção transversal, em cm<sup>2</sup>.

# CAPÍTULO 5

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

---

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados no concreto dosado no capítulo 4 e por fim, é feito um estudo do custo unitário por tipo de concreto.

### 5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

#### 5.1.1 CCV

##### 5.1.1.1 Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone

O resultado obtido no ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone é apresentado no Quadro 41 e ilustrado na Figura 106.

Quadro 41 – Resultado do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone

<b>Slump</b>	17 cm
--------------	-------

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Figura 106 – Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Com base nas informações acima, podemos observar que o concreto convencional (CCV) possui uma boa trabalhabilidade e isso maximiza a utilização do superplastificante.

## 5.1.2 CAA

### 5.1.2.1 Ensaio de espalhamento e tempo de escoamento (*slump flow test e slump flow t500*)

Os resultados obtidos no ensaio de espalhamento e tempo de escoamento são apresentados no Quadro 42 e ilustrados na Figura 107.

Quadro 42 – Resultados do ensaio de espalhamento e tempo de escoamento

<b>Espalhamento</b>	700 mm
<b>Tempo de escoamento (t<sub>500</sub>)</b>	3,9 s

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Figura 107 – Aspecto do CAA no ensaio de espalhamento e tempo de escoamento



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Com base nas informações acima e de acordo com a NBR 15823-1:2010, já exposta no capítulo 2, o CAA possui classe de espalhamento SF 2 e classe de viscosidade plástica aparente VS 2, estando assim dentro do recomendado pela norma e pode ser utilizado para a maioria das aplicações correntes. Observou-se também que o CAA não apresentou nenhum sinal de segregação.

#### 5.1.2.2 Ensaio do Anel J

Os resultados obtidos no ensaio do Anel J são apresentados no Quadro 43 e ilustrados na Figura 108.

Quadro 43 – Resultados do ensaio do anel

<b>Diferença do espalhamento obtido sem o anel J e com o anel J</b>	10 mm
<b>Tempo de escoamento (t500j)</b>	3,9 s

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Figura 108 – Aspecto do CAA no ensaio do Anel J



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Com base nas informações acima e de acordo com a NBR 15823-1:2010, já exposta no capítulo 2, o CAA possui classe de habilidade passante PJ 2, estando assim dentro do recomendado pela norma e pode ser utilizado para a maioria das aplicações correntes. Observou-se também que o CAA não apresentou nenhum sinal de segregação.

#### 5.1.2.3 Ensaio da Caixa L

Os resultados obtidos no ensaio da Caixa L são apresentados no Quadro 44 e ilustrados na Figura 109.

Quadro 44 – Resultados do ensaio da Caixa L

<b>HP</b>	0,82
<b>T<sub>L20cm</sub></b>	0,8 s
<b>T<sub>L40cm</sub></b>	2,2 s

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Figura 109 – Aspecto do CAA no ensaio da Caixa L



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Com base nas informações acima e de acordo com a NBR 15823-1:2010, já exposta no capítulo 2, o CAA possui classe de habilidade passante PL 2, estando assim dentro do recomendado pela norma e pode ser utilizado para a maioria das aplicações correntes. Observou-se também que o CAA não apresentou sinal de segregação e obstrução.

#### 5.1.2.4 Ensaio do Funil V

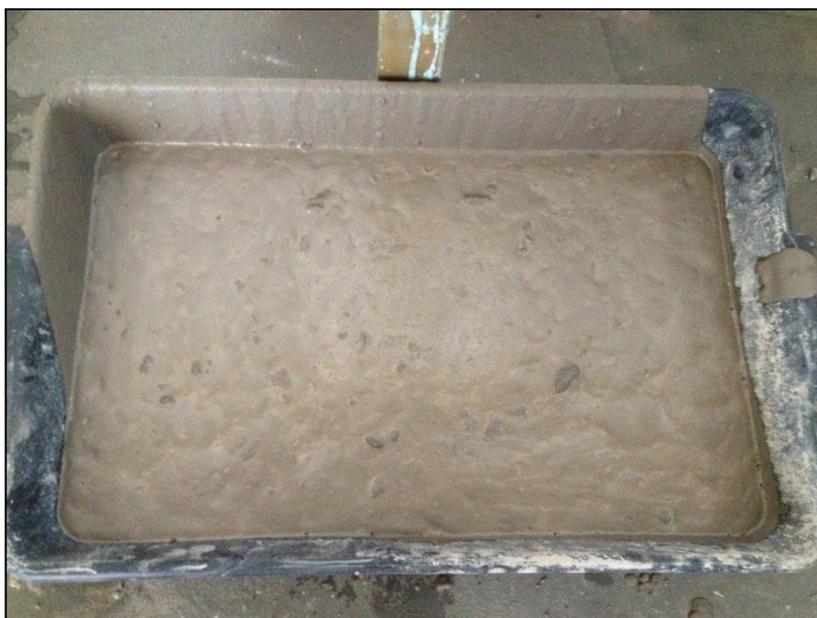
Os resultados obtidos no ensaio do Funil V são apresentados no Quadro 45 e ilustrados na Figura 110.

Quadro 45 – Resultados do ensaio do Funil V

<b>T<sub>30seg</sub></b>	4,5 s
<b>T<sub>5min</sub> (acrécimo de tempo em relação a T<sub>30seg</sub>)</b>	1,7 s

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Figura 110 – Aspecto do CAA no ensaio do Funil V



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Com base nas informações acima e de acordo com a NBR 15823-1:2010, já exposta no capítulo 2, o CAA possui classe de viscosidade plástica aparente VF 1, estando assim dentro do recomendado pela norma e pode ser utilizado para elementos estruturais com alta densidade de armadura. Observou-se também que o CAA não apresentou sinal de segregação.

#### 5.1.2.5 Ensaio da Coluna de Segregação

O resultado obtido no ensaio da Coluna de Segregação é apresentado no Quadro 46.

Quadro 46 – Resultado do ensaio da Coluna de Segregação

<b>SR</b>	7%
-----------	----

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima e de acordo com a NBR 15823-1:2010, já exposta no capítulo 2, o CAA possui classe de resistência à segregação SR 2, estando assim dentro do recomendado pela norma e pode ser utilizado para elementos estruturais com alta densidade de armadura.

## 5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

### 5.2.1 Ensaio de resistência à compressão axial

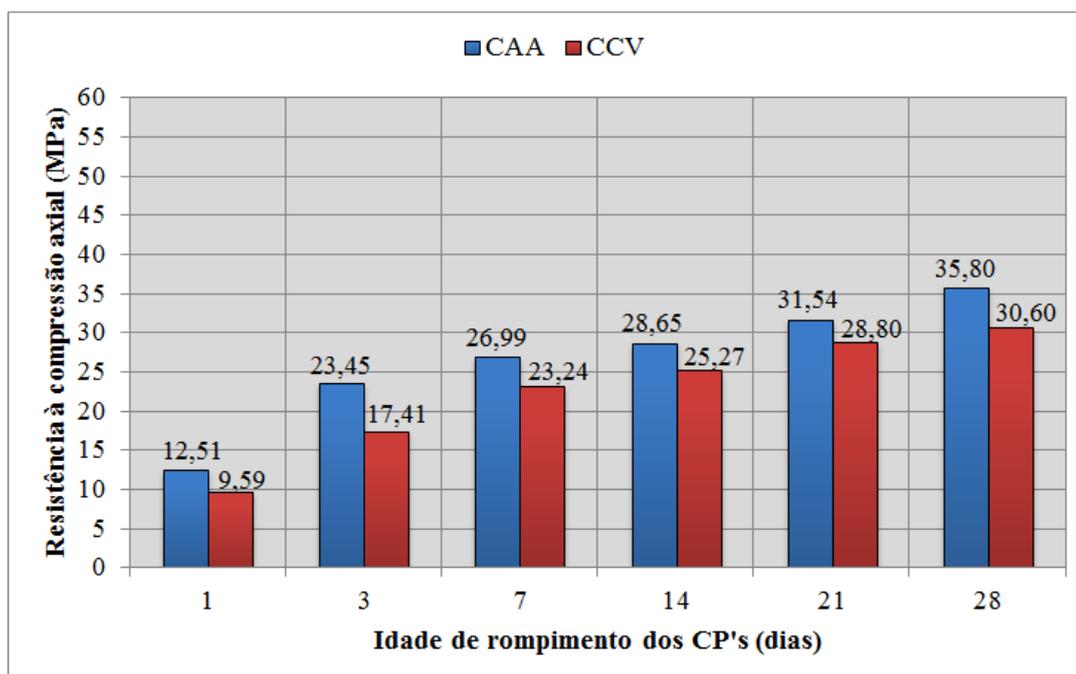
Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial são apresentados no Quadro 47 e ilustrado no Gráfico 8.

Quadro 47 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial do CAA e CCV

Idades de rompimento dos CP's	Resistência à compressão axial (MPa)	
	CAA	CCV
1 dia	<b>12,51</b>	<b>9,59</b>
	10,90	8,27
3 dias	<b>23,45</b>	<b>17,41</b>
	21,17	16,43
7 dias	<b>26,99</b>	<b>23,24</b>
	25,10	22,57
14 dias	<b>28,65</b>	<b>25,27</b>
	27,15	24,33
21 dias	<b>31,54</b>	<b>28,80</b>
	29,49	28,14
28 dias	<b>35,80</b>	<b>30,60</b>
	35,13	30,12

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Gráfico 8 – Comparativo dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial do CAA E CCV



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, podemos observar que ambos os concretos apresentaram resistências à compressão axial compatíveis com a realidade da maioria das obras. Podemos destacar que o CAA, por apresentar uma redução no fator a/c pela adição do superplastificante, teve um ganho de 5 MPa em relação ao CCV.

### 5.2.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

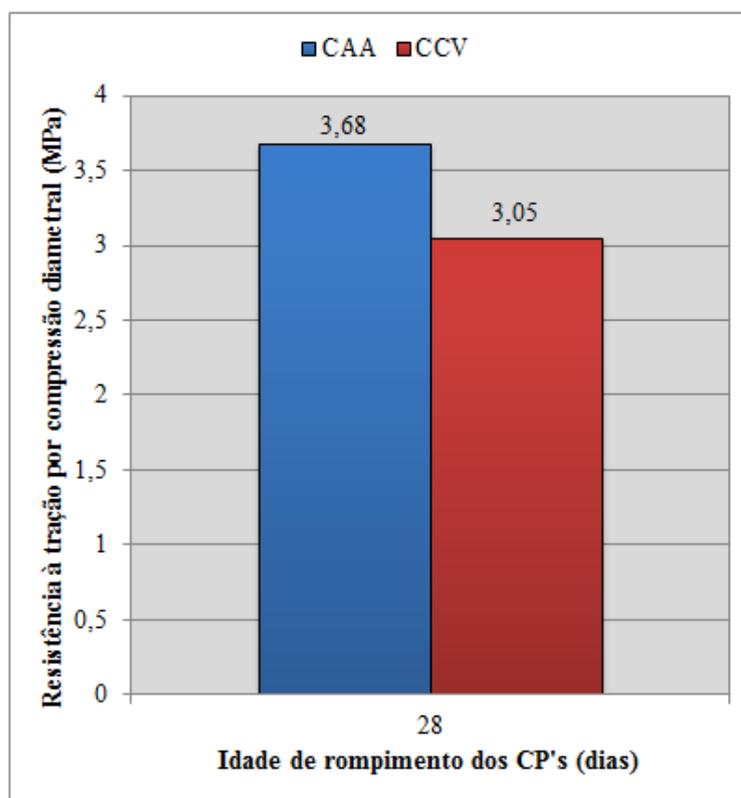
Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral são apresentados no Quadro 48 e ilustrados no Gráfico 9.

Quadro 48 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral do CAA e CCV

Idades de rompimento dos CP's	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	
	CAA	CCV
28 dias	3,68	3,05
	3,29	2,63

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Gráfico 9 – Comparativo dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral do CAA E CCV



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, podemos observar que ambos os concretos apresentaram resistências à tração por compressão diametral compatíveis com a realidade da maioria das obras. Podemos destacar que o CAA, por apresentar uma redução no fator a/c pela adição do superplastificante, teve um ganho de 0,63 MPa em relação ao CCV.

### 5.2.3 Ensaio da absorção de água e índice de vazios por imersão

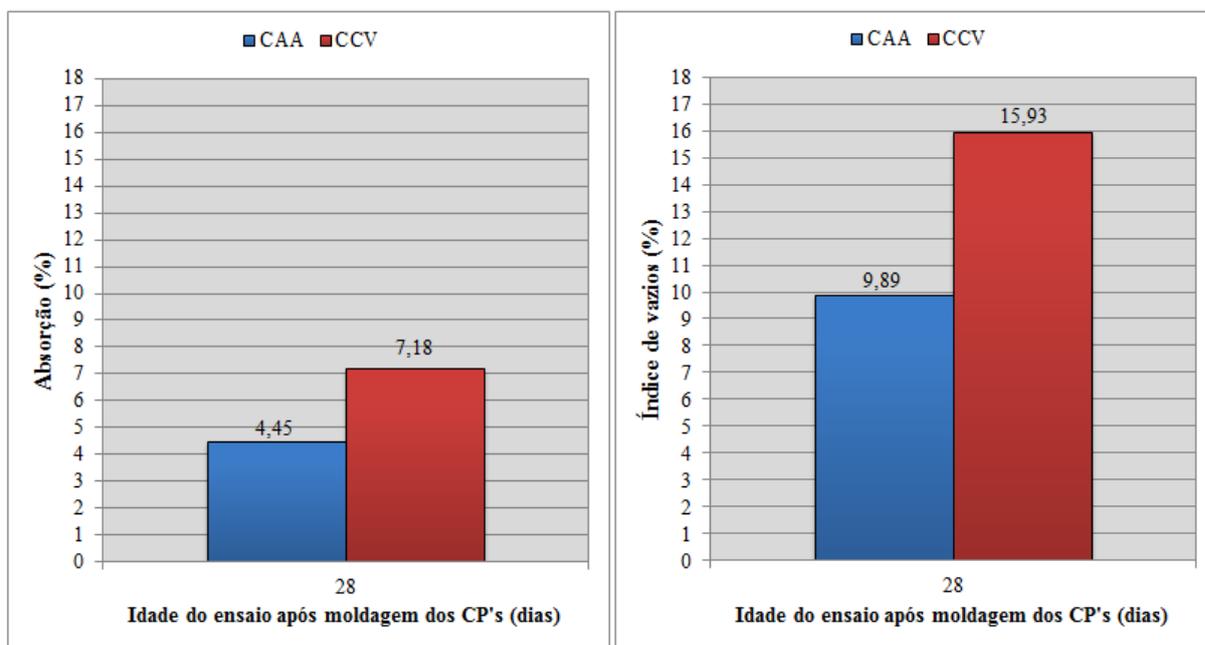
Os resultados obtidos no ensaio da absorção de água e índice de vazios por imersão são apresentados no Quadro 49 e ilustrados no Gráfico 10.

Quadro 49 – Resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios por imersão do CAA e CCV

Idade do ensaio após moldagem dos CP's	Absorção (%)		Índice de vazios (%)	
	CAA	CCV	CAA	CCV
28 dias	4,45	7,18	9,89	15,93

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Gráfico 10– Comparativo dos resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios por imersão do CAA e CCV



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, podemos destacar que o CAA, por apresentar uma redução no fator a/c pela adição do superplastificante, possui um menor índice de vazios e menor absorção de água por imersão. Assim, o CAA é menos poroso do que o CCV e

consequentemente apresentará maior durabilidade, pois será muito mais resistente contra agentes agressivos.

### 5.2.4 Ensaio da absorção de água por capilaridade

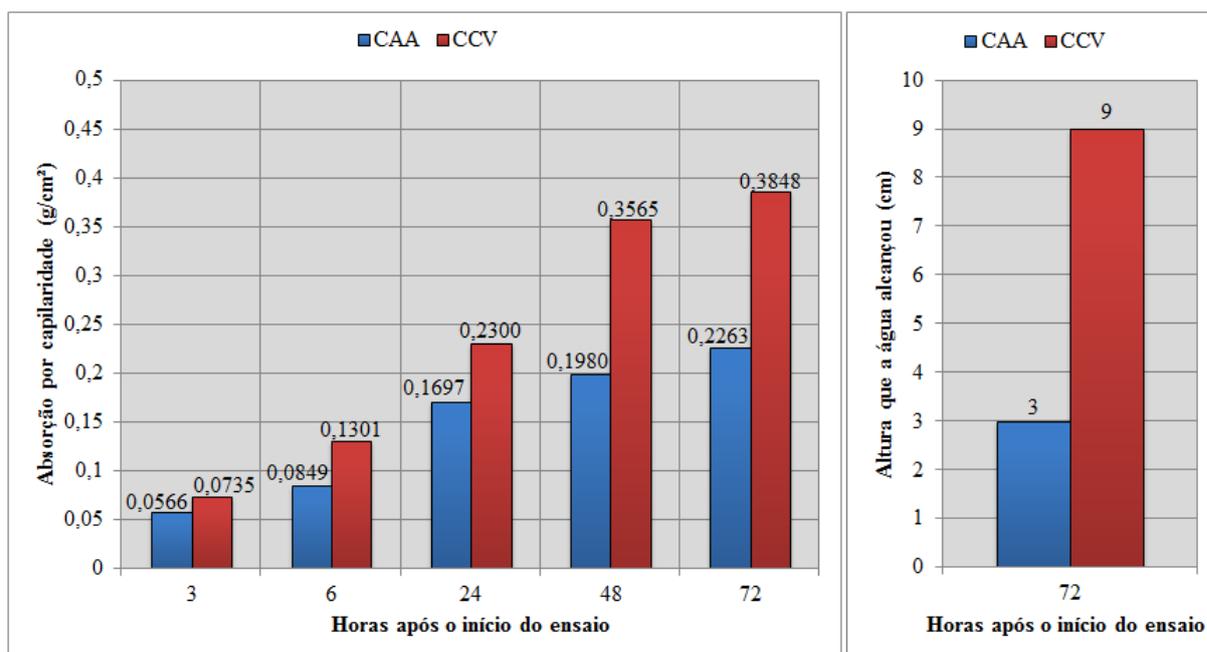
Os resultados obtidos no ensaio da absorção de água por capilaridade são apresentados no Quadro 50 e ilustrados no Gráfico 11 e na Figura 111.

Quadro 50 – Resultados do ensaio da absorção de água por capilaridade do CAA e CCV

Idade do ensaio após moldagem dos CP's	Horas após o início do ensaio	Absorção por capilaridade (%)		Altura que a água alcançou (cm)	
		CAA	CCV	CAA	CCV
28 dias	3	0,0566	0,0735	-	-
	6	0,0849	0,1301	-	-
	24	0,1697	0,2300	-	-
	48	0,1980	0,3565	-	-
	72	0,2263	0,3848	3,00	9,00

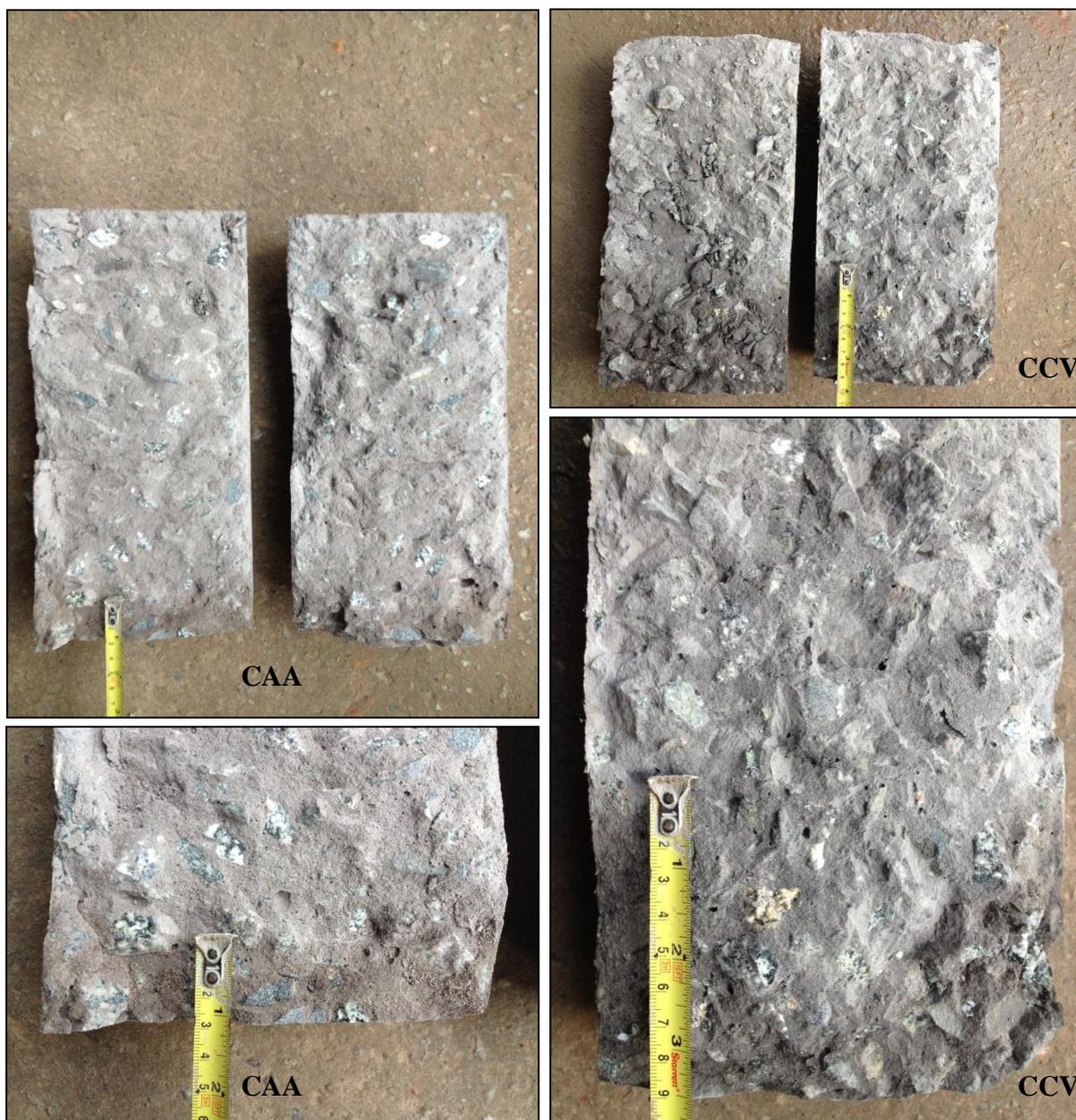
Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Gráfico 11 – Comparativo dos resultados do ensaio da absorção de água por capilaridade do CAA e CCV



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Figura 111 – Distribuição da água no interior do CAA e CCV



Fonte: Autor, Kalfix (2013)

Com base nas informações acima, podemos destacar que o CAA, por apresentar uma redução no fator  $a/c$  pela adição do superplastificante, possui menor absorção de água por capilaridade e conseqüentemente a altura que a água alcança internamente é bem menor do que no CCV. Assim, o CAA é menos poroso do que o CCV e conseqüentemente apresentará maior durabilidade, pois será muito mais resistente contra agentes agressivos.

### 5.3 CUSTO UNITÁRIO DO CONCRETO

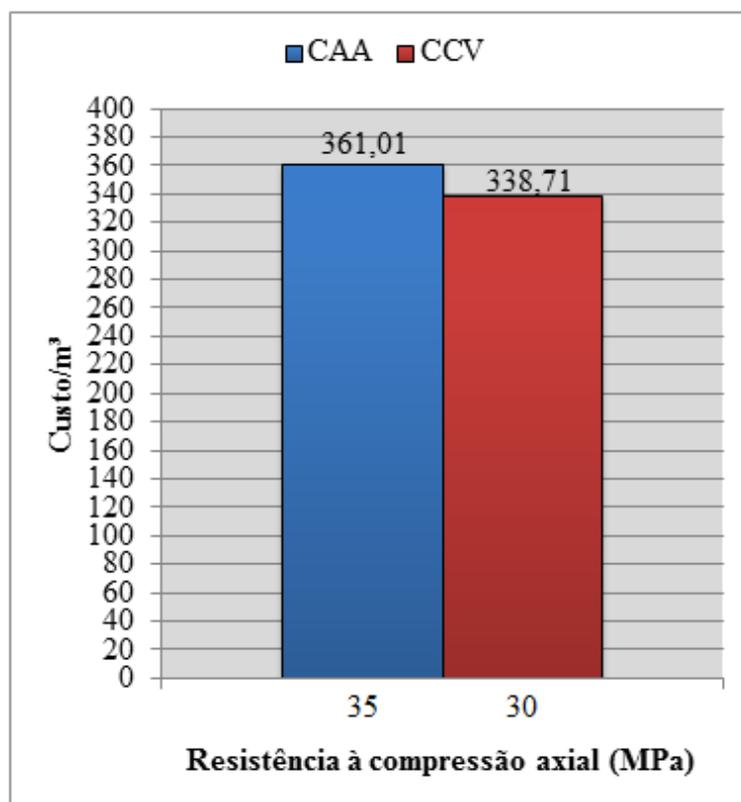
Para uma análise comparativa do custo unitário entre o CAA e CCV, usou-se como base os consumos dos materiais dos traços dosados no capítulo 4 e valores pesquisados com os fornecedores locais. Assim, o custo unitário do concreto é apresentado no Quadro 51 e ilustrado no Gráfico 12.

Quadro 51 – Custo unitário do CAA e CCV

Tipo de Concreto	Resistência à compressão axial (MPa)	Cimento (RS/m <sup>3</sup> )	Areia (RS/m <sup>3</sup> )	Brita 1 (RS/m <sup>3</sup> )	Brita 0 (RS/m <sup>3</sup> )	Água (RS/m <sup>3</sup> )	Aditivo (RS/m <sup>3</sup> )	TOTAL (RS/m <sup>3</sup> )
CAA	35,00	191,20	38,59	55,14	49,23	3,45	23,39	361,01
CCV	30,00	191,20	38,59	55,14	49,23	4,54	0,00	338,71

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Gráfico 12 – Comparativo do custo unitário do CAA e CCV



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2013)

Com base nas informações acima, podemos observar que o CAA está 22,30 reais / 6,18% mais caro que o CCV. Mas, como vimos nesse capítulo, o CAA possui uma resistência à compressão axial maior que o CCV, podendo assim gerar uma diminuição do consumo de cimento no CAA para alcançar a mesma resistência do CCV e diminuir o custo total, ou aumentar a resistência do CCV, aumentando assim o consumo de cimento e o custo.

Outro fator que não está incluso neste quadro é que o CAA gera uma redução de mão-de-obra, equipamentos, ganho nos prazos, etc. Fatores esses, que diminuiriam o custo global da estrutura.

Para avaliar realmente a viabilidade de se empregar o CAA, é necessário estudar cada caso e seria também assunto de trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 6

## ESTUDO DE CASO

---

Este capítulo apresenta uma concretagem de uma peça, utilizando o CAA dosado no capítulo 4, bem como os resultados obtidos. Todo esse estudo de caso foi feito na empresa São Luís Premoldados.

### 6.1 ESCOLHA DA PEÇA A SER CONCRETADA COM O CAA

A São Luís Premoldados produz várias peças em concreto e dentre elas, escolheu-se um poste para testar o CAA, pois ele possui uma seção pequena e difícil do concreto passar (Figura 112).

Figura 112– Detalhe da seção do poste a ser concretado com o CAA



Fonte: Autor, São Luís Premoldados (2013)

Além de possuir uma seção bem reduzida, o poste ainda tem na sua ‘cabeça’ uma armação bem densa (Figura 113).

Figura 113 – Detalhe da armação do poste a ser concretado com o CAA



Fonte: Autor, São Luís Premoldados (2013)

Portanto, juntando uma peça em que possui uma seção reduzida e uma armação razoavelmente densa na sua ‘cabeça’, espera-se simular o mais próximo possível a situação real que o CAA será solicitado nas obras.

## 6.2 PRODUÇÃO DO CAA

O CAA foi produzido em um misturador próprio da empresa (Figura 114), onde através dele, foram pesados todos os materiais da mistura (Figura 115), com exceção do aditivo superplastificante que foi pesado em uma balança e adicionado posteriormente à mistura.

Figura 114 – Misturador de concreto



Fonte: Autor, São Luís Premoldados (2013)

Figura 115 – Cabine do misturador para controle da pesagem dos materiais



Fonte: Autor, São Luís Premoldados (2013)

### 6.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO CAA

O único ensaio realizado para aprovação do CAA foi o ensaio de espalhamento, ilustrado na Figura 116.

Figura 116 – Aspecto do CAA no ensaio de espalhamento



Fonte: Autor, São Luís Premoldados (2013)

O diâmetro de espalhamento do CAA foi de 70 cm e não apresentou segregação, estando assim aprovado para aplicação no poste.

### 6.4 APLICAÇÃO DO CAA

O CAA foi transportado manualmente, despejado no poste por meio de baldes e sem haver qualquer tipo de vibração (Figura 117).

Figura 117 – Aplicação do CAA no poste



Fonte: Autor, São Luís Premoldados (2013)

A Figura 118 ilustra visualmente a diferença do CAA e CCV, as maiores diferenças são o aspecto visual e o adensamento. Para o CAA não foi utilizado nenhum tipo de adensamento, já para o adensamento do CCV usou-se um motor acoplado no poste.

Figura 118 – Aspecto visual e tipo de adensamento usado para o CCV



Fonte: Autor, São Luís Premoldados (2013)

## 6.5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Depois de concretado o poste, ele foi coberto com uma lona plástica até a sua desfôrma no dia seguinte (Figura 119).

Figura 119 – Poste coberto após concretagem



Fonte: Autor, São Luís Premoldados (2013)

No dia seguinte o poste feito com o CAA foi desformado e comparou-se a diferença dele com um poste feito com o CCV (Figura 120).

Figura 120 – Comparativo do poste feito com CAA e CCV



Fonte: Autor, São Luís Premoldados (2013)

Observou-se claramente que além de se dispensar a vibração, o acabamento do poste feito com o CAA ficou bem superior do que o poste feito com o CCV, mostrando assim que o CAA dosado no Capítulo 4 está adequado e sua aplicação produz uma série de benefícios.

# CAPÍTULO 7

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

### 7.1 CONCLUSÕES

Após a apresentação dos resultados e da análise dos mesmos, as conclusões observadas foram:

- O CAA produzido com os materiais encontrados na região de São Luís (MA) atendeu aos requisitos estabelecidos na literatura e nas normas técnicas, assim, alcançou simultaneamente as suas principais propriedades básicas: fluidez, coesão e resistência à segregação;
- A caracterização dos materiais encontrados na região de São Luís (MA) mostrou que eles estão adequados para serem utilizados na dosagem de um CAA. A brita encontrada em nossa região, não é uma brita muito uniforme e nem possui um índice de forma muito bom, mas a areia já é bem fina, o que é excelente para a produção do CAA;
- Os ensaios para avaliar o CAA no estado fresco mostraram-se indispensáveis, mas também de fácil execução e bem práticos para realizar em um canteiro de obras;
- O aditivo superplastificante proporcionou, para o CAA, alcançar uma alta fluidez e também uma diminuição do fator a/c e conseqüentemente um aumento da resistência, diminuição da porosidade e maior durabilidade, quando comparado ao CCV;

- O método de dosagem de Tutikian e Dal Molin (2007) mostrou-se eficaz para a dosagem do CAA dessa pesquisa e observou-se que o melhor proporcionamento dos agregados trouxe benefícios em relação à resistência à segregação do CAA;
- O estudo de caso mostrou que o CAA está adequado para ser utilizado na prática e a peça concretada apresentou um acabamento bem superior, quando comparada com uma concretada com o CCV;
- Observou-se que o CAA é mais sensível, quando comparado ao CCV, necessitando de um bom acompanhamento na sua fase de produção e aplicação, algo que também é indispensável para o CCV, embora os prejuízos para o CAA sejam bem maiores.

## 7.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Alguns pontos do CAA ainda estão em aberto, ou podem ser melhor esclarecidos em trabalhos futuros. Dentre sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

- Um estudo comparativo entre o custo de estruturas de pequeno, médio e grande porte, executadas em CAA e CCV, levantando-se todos os custos envolvidos, desde a produção do concreto até a peça pronta, mostrando os benefícios e desvantagens que cada um implica na estrutura e no seu custo final;
- Elaboração dos diagramas de dosagem e desempenho, através da dosagem de vários traços diferentes de CAA, comparando-se as suas propriedades. Dosar um concreto pelo diagrama de dosagem e verificar a eficácia do mesmo;
- Estudar a durabilidade do CAA, realizando ensaios de penetração de íons cloretos, carbonatação, módulo de elasticidade, velocidade da onda ultrassônica, teor de ar incorporado e outros;
- Dosar um CAA utilizando o aditivo modificador de viscosidade e analisar os benefícios gerados por ele;

- Utilizar adições minerais e/ou resíduos da construção civil ou outras indústrias na dosagem do CAA e apontar os ganhos obtidos com a sua utilização;
  
- Fazer um comparativo, das propriedades no estado fresco e endurecido, do CAA dosado com vários tipos de cimentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**. Agregados Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46**. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 49**. Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 51**. Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Ángeles". Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211.** Agregados para concreto - Especificação. Rio de janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7218.** Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222.** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809.** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776.** Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio. Rio de janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778.** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779.** Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653.** Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1.** Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-2.** Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento Método do cone de Abrams. Rio de janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-3.** Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J. Rio de janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-4.** Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L. Rio de janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-5.** Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-6**. Parte 6: Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900-1**. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ALENCAR, R. dos S. A. de. **Dosagem do concreto auto-adensável: produção de pré fabricados**, 2008. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ALENCAR, R.; HELENE, P. **Concreto auto-adensável de elevada resistência – inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados**. In: Concreto e Construções. Revista de Materiais do Ibracon, São Paulo, 2006.

CAINELLI, L.R. **Levantamento do estado da arte de concreto autoadensável**. 2008. Trabalho de conclusão de curso - Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**, 2006. 141p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas.

DAL MOLIN, D.C.C. **Concreto autoadensável e concretos para demandas especiais de resistência, slump, desempenho e lançamento**. In: Seminário sobre Concreto - Estruturas e Fechamentos para Edificações, 2013, São Paulo.

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

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). *Guidelines for viscosity modifying admixtures for concrete*. In: **EFNARC**. September, 2006.

FOCHS, Rafael Gómez. **Estudo comparativo entre métodos de dosagem de concretos autoadensáveis**. Porto Alegre. 2011. Dissertação. Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica Do Rio Grande Do Sul.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. São Paulo: PINI, 2012.

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

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. PINI, São Paulo, 1993.

KUPERMAN, Selmo Chapira. **Cuidados na execução de blocos de fundações de concreto e controle de qualidade de peças estruturais moldadas in loco**. In: Seminário sobre Concreto - Estruturas e Fechamentos para Edificações, 2013, São Paulo.

MANUEL, P.J. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis**. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

MEIRELES, Dinah David. **Contribuição aos estudos de uso de aditivos modificadores de viscosidade em concreto auto-adensável**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010.

NUNES, S. C. B. “*Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades*”. Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 198 p., 2001.

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

TECHNÉ REVISTA. **Solução fluída**. In: Revista Técnica, edição 132, ano 16, março de 2008.

TECHNÉ REVISTA. **Abraço histórico**. In: Revista Técnica, edição 179, ano 20, fevereiro de 2012.

TECHNÉ REVISTA. **Estrutura premiada**. In: Revista Técnica, edição 179, ano 20, fevereiro de 2012.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concreto auto-adensável**, 2004. 149p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

TUTIKIAN, B. F. DAL MOLIN, D.C. **Concreto auto-adensável**, São Paulo, PINI, 2008.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**, 2007. 162p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

WOLENSKI, A. R. V. “**Estudos teórico e experimental do Concreto Auto-Adensável frente ao emprego do cimento CP IV e da adição de *Metacaulim***”. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil, UNEMAT. 150 p. Sinop, Mato Grosso, 2010.



