

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE ARGAMASSA NO  
DESEMPENHO DE CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS**

**Paulo Jorge Miguel Manuel**

Porto Alegre  
dezembro 2005

**PAULO JORGE MIGUEL MANUEL**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE ARGAMASSA NO  
DESEMPENHO DE CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS**

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

Porto Alegre  
dezembro 2005

M294e Manuel, Paulo Jorge Miguel

Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis / Paulo Jorge Miguel Manuel. – 2005.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS-BR, 2005.

Orientação: Prof<sup>ª</sup>.Dr.<sup>a</sup> Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Prof<sup>ª</sup>.Dr.<sup>a</sup> Angela Borges Masuero.

1. Concreto auto-adensável. 2. Argamassa – Ensaios. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Masuero, Angela Borges, orient. III. Título.

CDU-691.32(043)

**PAULO JORGE MIGUEL MANUEL**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE ARGAMASSA NO  
DESEMPENHO DE CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS**

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

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2005.

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

Prof.a. Angela Borges Masuero  
Doutora pela UFRGS  
Co-Orientadora

Prof. Dr. Fernando Schnaid  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof.a. Fernanda Macedo Pereira (CIENTEC)**  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

**Prof. Vladimir Antônio Paulon (UNICAMP)**  
Doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP

**Prof. Ruy Alberto Cremonini (UFRGS)**  
Doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP

Dedico este trabalho aos povos do Brasil e de Angola, por serem a grande fonte de inspiração para persistir na minha luta pela vida e porque me sinto um digno representante da maioria de ambos os povos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em nome do povo angolano, o governo brasileiro através da CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação aos estudos para chegar até aqui.

Agradeço a Prof.a. Denise Dal Molin, orientadora deste trabalho, por quem tenho profunda admiração e respeito, pelo seu interminável otimismo e pela visão ao conceber este trabalho.

Agradeço também a Prof.a. Ângela Masuero pela orientação, atenção e dedicação prestadas ao longo do curso.

Agradeço a DEUS por ter colocado as seguintes pessoas certas durante a minha permanência na UFRGS: Primeiro não posso deixar de agradecer aos professores pelas excelentes aulas ministradas das quais tirei o melhor proveito possível. Bernardo Tutikian (sem você, o meu primeiro CAA estaria certamente segregando. Valeu, guri!). Fontes do LEME, você deveria ser japonês, meu grande companheiro; para você não encontro palavras, apenas Obrigado. Airton e Éderson (aquele concreto tipo cola jamais! Muito obrigado, rapazes). Rafael Kuhn, você pode não saber disso, mas sua participação foi excelente; Daniel Pagnussat, você é a sala de visitas do NORIE (que companheiro você é. Valeu tchê!). Rodrigo Lameiras, meu salva-vidas no oceano dos primeiros dias de NORIE (só você falava comigo); você será sempre um irmão, guri. Ao Fábio Viecili, eng. da MBT Degussa, Marcelle, Sr. Silvério da FIDA, Cristiano Richter, Francieli, Sheila, Marcus Sterzi, Ana Paula, Geilma, Fernanda, Elenise, Cris, Edna (ói especial) Cristóvão, Sandro e Fábio Pelotense (meio suspeito, hein!), o meu eterno muito obrigado.

Minha mãe, Dona Conceição, meus irmãos Sady, Tay, Michel e Bebé, minhas duas irmãs Many e Caty, minha tia Manuela, meus adorados sobrinhos Bruno, Samara, Loid, Gérson, Sadyana e Weza. Vocês são o combustível da minha luta e vontade de vencer. Sem vocês de nada adiantaria tudo isso. Sintam-se também autores deste trabalho.

Ao pessoal do LEME: Alexandre, Camila, Daniela, Eléa, Leila, Liliani, Luciane, Prof. Luiz Carlos, Ribeirinho e Teixeira. A todos os colegas do NORIE, à nossa querida Simone e ao Luiz Carlos. O meu eterno muito obrigado!

Agradeço a toda comunidade africana de Poa, a angolana em particular, especialmente Tita Chicomo (minha comadre), Guiduinha Steed Zau (minha afilhada), Alzira Mosso (Ihá'visa!), Flávio Nvunda, Zé Marcolino, Jaime Fortunato, Pacavira, kota Samba, Tia Dulce, Bia Fortes e Vita Mateso pelo convívio e amizades. Can't forget you people! Não podemos esquecer de que, mesmo com as dificuldades, a nossa grande e bela Angola vai ter que saltar. Pra frente é o caminho!

A experiência sem a teoria é cega e a teoria sem a  
experiência é um puro jogo intelectual.

*Emmanuel Kant*

## RESUMO

MANUEL, P.J.M. **Estudo da Influência do Teor de Argamassa no Desempenho de Concretos Auto-Adensáveis**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O concreto auto-adensável (CAA), que representa um dos mais significativos avanços na tecnologia de concreto, foi desenvolvido no Japão em 1988 com o intuito de se obter estruturas de concreto duráveis. É um concreto que dispensa o processo convencional de vibração ou adensamento por ter a capacidade de fluir e preencher os espaços da fôrma apenas através de seu peso próprio. Desde então, várias pesquisas têm sido realizadas e esse tipo de concreto já vem sendo aplicado na prática há algum tempo em alguns países, principalmente por grandes empresas de construção no Japão e na Suécia. Pesquisas para se estabelecerem métodos racionais de dosagem para CAA bem como métodos de ensaios no estado fresco têm sido desenvolvidas, visando fazer do CAA um concreto de aplicação comum. Contudo, ainda não se conhece bem este material e o que se nota é que a maioria dos CAA apresentados em trabalhos científicos é obtida com altos teores de argamassa, além da grande dispersão desses teores. Neste trabalho foi estudada a influência do teor de argamassa sobre as características de concretos auto-adensáveis, tanto no estado fresco como no estado endurecido, produzidos a partir de diferentes teores de argamassa (55, 60, 65, 70 e 75%). Para a produção dos mesmos foi aplicado um novo método de dosagem para CAA desenvolvido por Tutikian (2004), o qual se mostrou satisfatório no que diz respeito às propriedades de fluxo dos CAA. Em termos de resistências mecânicas os CAA's obtidos apresentaram comportamentos bem similares uns aos outros para relações a/c aproximadas e mesmo teor de filler calcário (que substitui parte do teor de agregado miúdo total). Porém, o consumo de aditivo superplastificante tende a aumentar, para uma mesma fluidez, com o aumento do teor de argamassa, o que se caracteriza pelo aumento da superfície específica da mistura para altos teores de argamassa. Quando comparado com um concreto convencional com mesmo teor de argamassa o CAA apresentou qualidades similares ou ligeiramente superiores, com exceção de seu custo que é superior ao de um concreto convencional. Deste modo, o presente trabalho pretende contribuir para um melhor conhecimento e entendimento do CAA para que o mesmo possa ser aplicado com segurança em edificações e obras corrente de engenharia civil.

Palavras-chave: concreto auto-adensável; teor de argamassa, estado fresco, estado endurecido.

## **ABSTRACT**

MANUEL, P.J.M. **Estudo da Influência do Teor de Argamassa no desempenho de Concretos Auto-Adensáveis**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

### **Influence of Mortar Content on the Performance of Self-Compacting Concrete**

Self-compacting concrete (SCC), first developed in Japan in 1988 to achieve durable concrete structures, and adopted in Europe and the rest of the world more recently, represents one of the most significant advances in concrete technology. SCC is a type of concrete that can flow and compact in a mould or formwork under its own weight without the need for vibration. Since then, several research activities have been carried out and this type of concrete has been used in practical structures in Japan and Sweden, mainly by large construction companies. Investigations for establishing rational mix design methods for SCC and self-compactability testing methods have been developed from the point of view of making this new concrete a standard concrete. However, SCC is not well known so far and it can be observed worldwide that most of the SCC has been proportioned with high mortar/paste contents. This work aims to assess the influence of the mortar content in the composition of SCC on its properties, both in fresh and hardened states, produced with five different mortar contents (55, 60, 65, 70, and 75%). The newly-developed mix design method (TUTIKIAN, 2004) was applied to produce all SCC, and it seemed to be a very good method in terms of the SCC flow properties. Concerning the mechanical properties (compressive/tensile strength) all SCC produced in this study have presented similar results related to others with approximate water-to-cement ratio and the same limestone filler content (used to replace part of the total fine aggregate content). It was verified that the superplasticizer dosage increases as the mortar content increases for the same values of flow properties, which can be explained by the greater specific surface of the mixtures as the mortar content increases. Compared to a normal vibrated concrete with the same mortar content in its composition, SCC presented equal or slightly better qualities, excepting the issue of costs which is more expensive than those of the normal vibrated concrete. This dissertation aims to contribute for a better knowledge and understanding of SCC so it can be safely applied in buildings and in civil engineering projects.

Key-words: self-compacting concrete; mortar content, fresh state, hardened state.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	13
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	17
<b>SIGLAS</b> .....	19
<b>SÍMBOLOS</b> .....	20
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	23
1.2 CONTEXTO E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA .....	25
1.3 QUESTÃO DA PESQUISA .....	26
1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	28
1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	29
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	30
<b>2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL ..</b>	<b>32</b>
2.1 HISTÓRICO .....	32
2.2 DEFINIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.	34
2.3 VANTAGENS DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL .....	35
2.4 APLICAÇÕES PRÁTICAS DO CAA .....	37
2.5 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL x CONCRETO CONVENCIONAL (CCV) ...	43
2.6 MATERIAIS CONSTITUINTES .....	45
2.7 TIPOS DE CAA .....	48
2.8 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO CAA .....	50
2.9 MECANISMOS PARA SE ATINGIR A CAPACIDADE DE AUTO – ADENSAMENTO SEGUNDO OKAMURA E OUCHI .....	52
<b>3 ENSAIOS PARA AVALIAR AS PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO</b> .....	<b>57</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	57
3.2 ENSAIO DE ESPALHAMENTO ( <i>SLUMP FLOW TEST</i> ) .....	58
3.3 ENSAIO DO FUNIL V ( <i>V-FUNNEL</i> ) .....	61

3.4 ENSAIO DA CAIXA EM U ( <i>U-BOX E BOX-SHAPE</i> ) .....	62
3.5 ENSAIO DA CAIXA EM L ( <i>L-BOX</i> ) .....	65
3.6 PROCEDIMENTOS PARA AJUSTAR OS RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....	67
<b>4 MÉTODO DE DOSAGEM PARA CAA PROPOSTO POR TUTIKIAN .....</b>	<b>70</b>
<b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>74</b>
5.1 PLANEJAMENTO GERAL .....	74
5.2 ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	78
5.2.1 Cimento .....	79
5.2.2 Fíler Calcário .....	80
5.2.3 Agregado Miúdo .....	83
5.2.4 Agregado Graúdo .....	84
5.2.5 Aditivo Superplastificante e Água .....	85
5.3 OBTENÇÃO DO TEOR IDEAL DE ARMAGASSA PARA O CCV .....	86
5.3.1 Determinação do Teor Ideal de Argamassa para o Traço 1:5,25 .....	87
5.4 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS .....	88
5.4.1 Procedimento e Tempo de Mistura dos Materiais .....	89
5.4.2 Cálculo das Proporções dos Materiais .....	90
5.4.3 Ensaios Realizados no Estado Fresco .....	97
5.4.4 Moldagem do concreto e Cura dos Corpos-de-prova .....	98
5.4.5 Ensaios Realizados no Estado Endurecido .....	99
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>100</b>
6.1 COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO .....	100
6.1.1 Ensaio de Espalhamento do Concreto .....	100
6.1.2 Tempo para alcançar a marca de 500 mm – $T_{500\text{mm}}$ .....	103
6.1.3 Ensaio do Funil V .....	107
6.1.4 Ensaio da Caixa U e Ensaio da Caixa L .....	111

<b>6.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>115</b>
<b>6.2.1 Curvas de Dosagem dos Concretos Produzidos .....</b>	<b>115</b>
<b>6.2.2 Consumo de Cimento .....</b>	<b>121</b>
<b>6.2.3 Resistências à Compressão e à Tração .....</b>	<b>124</b>
<b>6.2.4 Análise da Evolução da Resistência à Compressão .....</b>	<b>131</b>
<b>6.2.5 Módulo de Elasticidade dos Concretos com o Traço 1:4,5 da Etapa II .....</b>	<b>135</b>
<b>6.2.6 Análise Comparativa da Qualidade dos Concretos através do Ensaio de Ultra-som .....</b>	<b>137</b>
<b>6.2.7 Custos dos Concretos Produzidos .....</b>	<b>141</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>153</b>
<b>7.1 CONCLUSÕES .....</b>	<b>153</b>
<b>7.2 COMENTÁRIOS FINAIS .....</b>	<b>158</b>
<b>7.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>	<b>158</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>160</b>
<b>ANEXO 1-RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....</b>	<b>165</b>
<b>ANEXO 2-RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO E CORRELAÇÕES DE ALGUMAS VARIÁVEIS DE DOSAGEM .....</b>	<b>167</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: abordagem holística da durabilidade das estruturas de concreto armado .....	33
Figura 2: atividades de lançamento e de vibração do concreto (fonte: Kosmatka et al,2002) .....	34
Figura 3: exemplo do aspecto de uma falha de concretagem em uma viga de concreto armado (fonte: Kosmatka et al,2002) .....	36
Figura 4: volume anual de CAA lançado no Japão até 2000 (fonte: Ouchi et al, 2003) .	37
Figura 5: ponte Shin-Kiba Ohashi executada no Japão em CAA (fonte: Okamura e Ouchi,2003) .....	38
Figura 6: blocos de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo (fonte: Okamura 2003 ) .....	38
Figura 7: execução de um reservatório de metano liquefeito com CAA (fonte: Nunes, 2001) .....	39
Figura 8: CAA aplicado em revestimento de túnel (fonte: Ouchi et al 2003 ) .....	40
Figura 9: utilização de CAA em indústria de pré-moldados nos EUA (fonte: MAINE DOT, 2003 ) .....	40
Figura 10: vista de uma parede em CAA branco-Pescara/Itália (fonte: Collepari, 2001) .....	41
Figura 11: ponte executada em CAA na Suécia (fonte: Goodier, 2003 ) .....	41
Figura 12: museu Iberê Camargo em CAA branco-Porto Alegre.....	42
Figura 13: vista geral de edifício executado em CAA-Goiânia (fonte: REALMIX, 2005) .....	42
Figura 14: comparação da composição de um CAA e de um CCV (fonte: Okamura, 2003 ) .....	44
Figura 15: diferenças na composição de CAA e de CCV (fonte: Holschemacher e Klug, 2003 ) .....	44
Figura 16: aglomeração de partículas de cimento e sua dispersão após o efeito de superplastificantes (fonte: Collepari, 2001 ) .....	47
Figura 17: modelo reológico de Bingham e comportamento de fluido Newtoniano (fonte: Nunes, 2001) .....	51
Figura 18: comportamento reológico do concreto (fonte: Nunes, 2001) .....	52
Figura 19: mecanismos para atingir auto-adensabilidade (fonte: Okamura, 2003) .....	53
Figura 20: tensão normal gerada na argamassa devido à aproximação das partículas de brita (fonte: Okamura, 2003).....	54
Figura 21: mecanismo de bloqueio no CAA (fonte: Nunes, 2001).....	54
Figura 22: visão interna de um concreto segregado e resistente à segregação .....	55
Figura 23: forma para alcançar a auto-adensabilidade (fonte: Okamura, 2003) .....	56
Figura 24: método de dosagem para CAA proposto por Okamura .....	56

Figura 25: ensaio de espalhamento do concreto ( <i>slump flow test</i> ) .....	58
Figura 26: combinação do espalhamento do concreto + anel japonês (fonte: Grunewald, 2004) .....	60
Figura 27: execução de ensaio de espalhamento com J-ring (fonte: Sonebi, 2004).....	61
Figura 28: molde do ensaio do funil em V ( <i>V-funnel test</i> ) .....	61
Figura 29: <i>box-shape</i> e detalhe dos obstáculos que simulam a armadura .....	63
Figura 30: <i>u-box</i> -situações que podem ocorrer durante o ensaio (fonte: Nunes, 2001) ...	63
Figura 31: <i>box-shape</i> -situações que podem ocorrer durante o ensaio (fonte: Nunes, 2001) .....	65
Figura 32: ensaio da caixa em L ( <i>L-box test</i> ) .....	66
Figura 33: princípio básico do método proposto por Tutikian (2004) .....	70
Figura 34: procedimentos do método para dosagem de CAA proposto por Tutikian .....	71
Figura 35: fluxograma da parte experimental da etapa I .....	75
Figura 36: fluxograma da parte experimental da etapa II.....	76
Figura 37: curva granulométrica do cimento pozolânico utilizado .....	80
Figura 38: curva granulométrica do fíler calcário utilizado.....	82
Figura 39: imagem de microscopia eletrônica do fíler.....	82
Figura 40: curva granulométrica da areia utilizada .....	83
Figura 41: curva granulométrica da brita utilizada .....	85
Figura 42: betoneira utilizada e procedimento de mistura adotado para o CVV-REF .....	87
Figura 43: procedimento de mistura adotado para o CAA .....	90
Figura 44: exemplo de planilha para cálculo de dosagem de CAA .....	90
Figura 45: aspecto do concreto durante o ajuste da viscosidade do CAA .....	91
Figura 46: aspecto do CAA em movimento vertical e horizontal .....	92
Figura 47: aspecto do CAA após o ensaio de espalhamento .....	92
Figura 48: moldagem de corpos-de-prova de CAA sem compactação .....	98
Figura 49: resultados do ensaio de espalhamento dos CAA´s etapa I .....	100
Figura 50: gráfico de barras do ensaio de espalhamento dos CAA´s etapa I.....	101
Figura 51: comportamento do CAA durante o ajuste de superplastificante .....	102
Figura 52: detalhes das bordas do CAA no ensaio de espalhamento.....	102
Figura 53: resultados do ensaio de espalhamento dos CAA´s etapa II .....	103
Figura 54: resultados de espalhamento dos CAA-54 e CAA-60 etapa II .....	103
Figura 55: tempo para CAA alcançar a marca de 500mm etapa I .....	104
Figura 56: tempo para CAA alcançar a marca de 500mm etapa II.....	104
Figura 57: comportamento do $T_{500mm}$ em função do traço etapa I .....	105

Figura 58: comportamento do $T_{500\text{mm}}$ em função do traço etapa II .....	106
Figura 59: relação SP/a e do $T_{500\text{mm}}$ etapa II .....	106
Figura 60: tempos de escoamento no funil V para os CAA's da etapa I .....	107
Figura 61: tempos de escoamento no funil V para os CAA's da etapa II .....	107
Figura 62: tempos de escoamento no funil V para todos os traços da etapa I.....	108
Figura 63: tempos de escoamento no funil V para CAA- 55 e CAA-60 (etapa I) .....	108
Figura 64: tempos de escoamento no funil V para CAA- 54 e CAA-60 (etapa II) .....	109
Figura 65: ensaio de escoamento no funil V com a L-box e com a Box-shape .....	109
Figura 66: tempos de escoamento no funil V x relação SP/a para os CAA's da etapa I ..	110
Figura 67: tempos de escoamento no funil V x relação SP/a para os CAA's da etapa II	111
Figura 68: altura do CAA na box-shape etapa I .....	111
Figura 69: resultados do CAA na L-box etapa II .....	112
Figura 70: comportamento do CAA no ensaio da Box-shape .....	113
Figura 71: comportamento do CAA no ensaio da L-box .....	113
Figura 72: dosagem de aditivo em função do teor argamassa .....	114
Figura 73: curva de dosagem do CAA-55 etapa I aos 28 dias .....	116
Figura 74: curva de dosagem do CAA-60 etapa I aos 28 dias .....	116
Figura 75: curva de dosagem do CAA-65 etapa I aos 28 dias .....	117
Figura 76: curva de dosagem do CAA-70 etapa I aos 28 dias .....	117
Figura 77: curva de dosagem do CAA-75 etapa I aos 28 dias .....	118
Figura 78: curva de dosagem do CCV-54 etapa II aos 28 dias .....	118
Figura 79: curva de dosagem do CAA-54 etapa II aos 28 dias .....	119
Figura 80: curva de dosagem do CAA-60 etapa II aos 28 dias .....	110
Figura 81: consumo de cimento por $\text{m}^3$ dos concretos da etapa I .....	121
Figura 82: consumo de cimento por $\text{m}^3$ dos concretos da etapa II .....	121
Figura 83: exemplo de cálculo de consumo de cimento para o traço 1:3 para diferentes teores de argamassa .....	122
Figura 84: custo total dos materiais por teor de argamassa para traço 1:3 .....	123
Figura 85: agregados e cimento utilizados no estudo de dosagem .....	123
Figura 86: resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da etapa I .....	125
Figura 87: resistência à tração aos 28 dias dos concretos da etapa I .....	126
Figura 88: resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da etapa II .....	128
Figura 89: resistência à tração aos 28 dias dos concretos da etapa II .....	128
Figura 90: corpos-de-prova dos 4 traços rompidos por tração etapa II.....	129
Figura 91: corpos-de-prova do traço 1:4,5 rompidos à tração etapa II .....	130

Figura 92: evolução da resistência à compressão dos concretos da etapa I .....	131
Figura 93: evolução da resistência à compressão do CCV-REF e do CAA-54 .....	133
Figura 94: evolução da resistência à compressão dos concretos CCV-REF, CAA-54 e CAA-60 da etapa II .....	134
Figura 95: módulo de elasticidade e relação a/c dos concretos com m=4,5 etapa II .....	137
Figura 96: comparação da velocidade u-som entre o CCV-54 e o CAA-54 .....	139
Figura 97: velocidade de u-som para os concretos da etapa I .....	139
Figura 98: velocidade de u-som para os concretos da etapa II .....	140
Figura 99: correlação entre velocidade de u-som e a $f_{c,28}$ da etapa I .....	140
Figura 100: correlação entre relação a/c e velocidade de u-som para a etapa I .....	141
Figura 101: custos por traço dos concretos produzidos na etapa I .....	143
Figura 102: custos por traço dos concretos produzidos na etapa II .....	145
Figura 103: consumo de cimento/ $m^3$ por classe de concretos etapa I .....	146
Figura 104: custos por $m^3$ de $f_{c,28}$ dos concretos produzidos na etapa I .....	147
Figura 105: custos por MPa dos concretos produzidos na etapa I .....	148
Figura 106: consumo de cimento/ $m^3$ por classe de concretos etapa II .....	148
Figura 107: custos por $m^3$ de $f_{c,28}$ dos concretos produzidos na etapa II .....	149
Figura 108: custos por MPa dos concretos produzidos na etapa II .....	150
Figura 109: comparação de consumo de cimento/ $m^3$ dos CAA-60i x CAA-60ii .....	151
Figura 110: comparação de custos/ $m^3$ dos concretos CAA-60i x CAA-60ii.....	151
Figura 111: comparação de custos/MPa dos concretos CAA-60i x CAA-60ii .....	152

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: alguns dos traços de CAA pesquisados na literatura nacional e internacional	27
Tabela 2: exemplos de traços de CAA produzidos no Japão (Ouchi et al, 2003) .....	49
Tabela 3: exemplos de traços de CAA produzidos na Europa (Ouchi et al,2003).....	49
Tabela 4: exemplos de traços de CAA produzidos nos Estados Unidos (Ouchi et al, 2003) .....	49
Tabela 5: valores de espalhamento recomendados por diversos pesquisadores (fonte: Tutikian, 2004) .....	59
Tabela 6: valores de $T_{500\text{mm}}$ recomendados por alguns pesquisadores (fonte: Tutikian, 2004) .....	59
Tabela 7: valores de tempo de escoamento pelo funil V recomendados por diversos autores (fonte: Tutikian, 2004) .....	62
Tabela 8: valores mínimos recomendados por vários autores para o ensaio da <i>L-box</i> (fonte: Tutikian, 2004) .....	67
Tabela 9: possíveis causas para resultados inferiores aos esperados (fonte: EFNARC, 2002) .....	68
Tabela 10: possíveis causas para resultados superiores aos esperados (fonte: EFNARC, 2002) .....	68
Tabela 11: ações corretivas possíveis a partir do observado nos ensaios (fonte: EFNARC, 2002) .....	69
Tabela 12: características químicas do cimento <i>Portland</i> pozolânico CP IV-32 empregado .....	79
Tabela 13: características físicas e mecânicas para o cimento <i>Portland</i> pozolânico CP IV-32 .....	79
Tabela 14: características do fíler calcário faixa C .....	81
Tabela 15: composição granulométrica do agregado miúdo .....	83
Tabela 16: características físicas do agregado miúdo .....	84
Tabela 17: composição granulométrica do agregado graúdo .....	84
Tabela 18: características físicas do agregado graúdo .....	85
Tabela 19: planilha auxiliar para determinação experimental do teor de argamassa mínimo para o traço-piloto 1:5,25 do CCV-REF .....	88
Tabela 20: resumo dos resultados obtidos para o traço-piloto .....	88
Tabela 21: resumo dos resultados para os traços da família do concreto convencional (CCV-REF) para $\alpha = 54\%$ .....	88
Tabela 22: resultados dos traços unitários secos obtidos por traço para cada concreto produzido, com 40% de FC em relação ao teor de areia inicial .....	93
Tabela 23: quantidades de materiais calculadas e obtidas para confecção em laboratório de cada mistura da etapa I, mais o CCV-REF .....	94

Tabela 24: quantidades de materiais calculadas e obtidas para confecção em laboratório de cada mistura da etapa II .....	95
Tabela 25: resultados dos consumos dos materiais para cada concreto produzido na etapa I, em kg/m <sup>3</sup> .....	96
Tabela 26: resultados dos consumos dos materiais para cada concreto produzido na etapa II, em kg/m <sup>3</sup> .....	97
Tabela 27: equações e respectivos coeficientes de correlação das curvas de dosagem....	120
Tabela 28: resistências à compressão e à tração dos concretos CCV- REF e CAA´s da etapa I, e relação entre resistências .....	124
Tabela 29: resistências à compressão e à tração dos concretos CCV- REF e CAA´s da etapa II, e relação entre resistências.....	127
Tabela 30: crescimento da resistência, em %, dos concretos da etapa I .....	132
Tabela 31: crescimento da resistência, em %, dos concretos da etapa II .....	135
Tabela 32: resultados do módulo de elasticidade dos concretos da etapa II.....	136
Tabela 33: valores de u-som em m/s propostos por Whithurst (Neville, 1982).....	138
Tabela 34: custos dos materiais por m <sup>3</sup> dos concretos produzidos na etapa I, em R\$, e custo total dos concretos, em R\$/m <sup>3</sup> .....	142
Tabela 35: comparação entre custos por traço dos concretos da etapa I e do custo do CCV-REF .....	143
Tabela 36: custos dos materiais por m <sup>3</sup> dos concretos produzidos na etapa II, em R\$, e custo total dos concretos, em R\$/m <sup>3</sup> .....	144
Tabela 37: comparação entre custos por traço dos concretos da etapa II e do custo do CCV-REF .....	145

## SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CAA: Concreto Auto-Adensável.

CCV: Concreto Convencional.

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul

EPUSP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LACER: Laboratório de Materiais Cerâmicos.

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais.

LTM: Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental.

NORIE: Núcleo Orientado para Inovação da Edificação.

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

SCC: *Self-Compacting Concrete*

UNICAMP: Universidade de Campinas.

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## SÍMBOLOS

$\alpha$ : teor de argamassa seca ( $T_{arg}$ )

a/c: relação água-cimento, em kg/kg

*BOX-SHAPE*: aparato para o ensaio de auto-adensabilidade do CAA

C: compressão

CP's: corpos-de-prova

CAA: concreto auto-adensável (em inglês "*Self-Compacting Concrete-SCC*")

CAA-54: concreto auto-adensável obtido com  $\alpha=54\%$

CCV: concreto convencional

CCV-REF: concreto convencional referência (ou CCV-54)

CP IV-32: cimento *Portland* pozolânico cuja resistência à compressão aos 28 dias é de 32 MPa

cps: centipoise (1 Poise [P]= $10^{-1}$  Pa.s= $10^{-1}$ N.s/m<sup>2</sup>) – unidade da viscosidade plástica

DMC: dimensão máxima característica dos agregados para concreto

$E_c$ : módulo de elasticidade do concreto

FC: fíler calcário

$f_c$ : resistência à compressão do concreto

$f_{cm, 28d}$ : resistência média à compressão aos 28 dias de idade

$f_t$ : resistência à tração do concreto

$f_{tm, 28d}$ : resistência média à tração aos 28 dias de idade

g/cm<sup>3</sup>: grama por centímetro cúbico

g/g: grama por grama

$H_{CAA}$  ou  $H_{SCC}$ : altura máxima que o CAA alcança no ensaio com a *Box-Shape*

$H_2/H_1$ : relação entre alturas do CAA no ensaio da Caixa em L

*L-BOX*: caixa em L

$\text{kg/dm}^3$ : quilograma por decímetro cúbico

$\text{kg/m}^3$ : quilograma por metro cúbico

kN: kiloNewton

m: teor de agregados secos no traço do concreto em relação à massa do cimento ou aglomerante, em kg/kg

mm: milímetro

m/s: metro por segundo

MPa: mega Pascal

Pa: Pascal

pH: potencial hidrogeniônico

$\text{R\$/m}^3$ : reais por metro cúbico

s ou seg.: segundos

*Slump*: valor de abatimento do concreto pelo ensaio do cone de Abrams

SFT: *slump flow test* (resultado do ensaio de espalhamento do concreto auto-adensável)

SP: aditivo superplastificante

SP/a: relação aditivo superplastificante-água, em g/g

SP/cim.: relação aditivo superplastificante-cimento

T: tração

$T_{arg}$ : teor de argamassa

$T_{500\text{mm}}$ : tempo para o concreto alcançar a marca dos 50 centímetros no ensaio de espalhamento do concreto

$\tau_0$ : tensão limite de cisalhamento

*U-BOX*: caixa em U

U-Som: ultra-som

$\mu\text{m}$ : micrômetro (microns)

$\mu_{\text{pl}}$ : viscosidade plástica

*V-FUNNEL*: funil em V

VMA ou AMV: *viscosity-modifying agent* (aditivo modificador de viscosidade)

$\pm$ : mais ou menos

☺: resultado positivo

☹: resultado negativo

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A questão da durabilidade constitui-se mundialmente sempre num tema bastante importante quando se trata de estruturas de concreto armado. Muitos são os fatores que afetam a durabilidade e, portanto, a vida útil de qualquer estrutura de concreto. Para Neville (1982), um concreto é considerado durável quando resiste às condições para as quais foi projetado, sem deterioração, por muitos anos.

Em países industrialmente desenvolvidos estima-se que mais do que 40% dos recursos destinados à indústria da construção sejam aplicados no reparo e manutenção de estruturas existentes, sendo que o restante (menos de 60%, portanto) em novas instalações (MEHTA, 1994). O mesmo autor afirma ainda que, os altos custos de manutenção de estruturas e a crescente ênfase no custo do ciclo de vida em vez do custo inicial têm forçado os engenheiros a tomarem consciência sobre os aspectos de durabilidade.

A durabilidade pode ser afetada pelo meio ambiente (causas externas) em que o concreto está exposto ou por causas internas do próprio concreto. As causas externas podem ser físicas, químicas ou mecânicas, e são basicamente devidas às intempéries, ocorrência de temperaturas extremas, abrasão, ação eletrolítica e ação de líquidos ou gases (NEVILLE, 1982).

Neville (1982) aponta como algumas causas internas que afetam a durabilidade do concreto, a reação álcali-agregado, variações volumétricas e, principalmente, a permeabilidade do concreto. Esta última causa interna é a principal determinante de vulnerabilidade do concreto aos agentes externos de forma que, para ser durável, o concreto deve ter baixa permeabilidade, realça o mesmo autor.

Takada (2004) descreve que, a partir de 1983 e por vários anos seguidos, o Japão apresentou preocupações relativas aos problemas sérios de durabilidade em suas estruturas de concreto armado, e esta passou a ser um tema de interesse nacional. Notou-se que houve uma redução gradual de operários especializados na indústria de construção japonesa, o que levou a uma correspondente redução na qualidade das obras, o que certamente trouxe problemas de manifestações patológicas que requeriam manutenção prematura com custos envolvidos.

Sabe-se que um adensamento adequado do concreto fresco é necessário para que se produzam estruturas duráveis. Neste sentido, Grunewald (2004) cita que Okamura, antigo professor da Universidade de Tóquio, no Japão, enfatizou a necessidade de se produzir um concreto que não necessitasse de nenhum processo de consolidação ou adensamento, de modo a contribuir para garantir no futuro estruturas duráveis.

Em 1986 o professor Okamura apresenta sua idéia pela primeira vez em público durante uma reunião da Associação Japonesa de Cimento (*Japan Cement Association*). Ele já tinha a idéia de desenvolver um concreto que não precisasse de nenhuma vibração, ou seja, um **concreto auto-adensável** (CAA), a partir da tecnologia do concreto submerso que já existia na época (NUNES, 2001 e TAKADA, 2004).

O primeiro CAA foi então obtido com sucesso no verão (do hemisfério norte) de 1988 na Universidade de Tóquio pelo professor Hajime Okamura e seus colegas. O CAA foi colocado à disposição da indústria em 1989 e tem sido aplicado em muitos projetos desde o início da década de 90 do século passado, mas a sua tecnologia não tinha ainda se difundido a uma escala mundial até 1996 (TAKADA, 2004).

O CAA pode ser definido como um concreto que tem a capacidade de se espalhar de forma homogênea através somente de seu peso próprio, sem que haja qualquer energia de vibração adicional, e consegue-se fazer isso sem se incorporar ar (GRUNEWALD, 2004). As características – chave do CAA incluem a sua habilidade de preencher/ocupar espaços, a sua resistência à segregação e sua habilidade de passar por entre espaços estreitos (elementos densamente armados).

Hoje ainda se pode constatar que o domínio da tecnologia em volta do CAA é bastante restrito sendo que, apenas alguns poucos países têm algum domínio sobre o assunto, como o Japão, a Suécia, o Reino Unido, a Holanda, a França, a Dinamarca, o Canadá, a Tailândia e a Austrália (TAKADA, 2004).

O desenvolvimento do concreto auto-adensável marca um grande passo em direção à eficiência e às condições de trabalho nos canteiros de obras e na indústria de pré-moldados (GRUNEWALD, 2004).

O CAA permite concretagens em tempos mais curtos, uma melhor aparência estética da superfície do concreto, além de apresentar melhores características no estado endurecido (NUNES, 2001 e GRUNEWALD, 2004), conferindo estruturas com maior durabilidade.

Isso só é possível porque com o CAA, passa a não existir mais o risco de adensamento inadequado, ou de zonas menos adensadas do que outras, ou ainda zonas com segregação dos materiais causada por vibração excessiva.

Quanto à dosagem de CAA, Gomes (2002) afirma que a otimização do CAA é complexa, considerando as diferentes propriedades exigidas do material e as características dos seus componentes, as quais são significativamente distintas se comparadas com as do concreto convencional. Porém, prossegue o mesmo autor, as propriedades no estado endurecido não se diferenciam daquelas de um concreto convencional (CCV) com similar composição básica, desde que seja adensado de forma adequada.

Khayat e Daczko (2002) afirmam que o CAA deve ser encarado como uma tecnologia e não como uma série de valores para certos ensaios ou traços de dosagem. Os autores salientam ainda que, a redução de custos do sistema e/ou a melhoria de desempenho podem ser a força motora para a percepção do valor agregado que o CAA possui.

## 1.2 CONTEXTO E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

A pesquisa em questão insere-se em um contexto bastante atual, em que vários países e instituições têm buscado um conhecimento científico mais aprofundado sobre o concreto auto-adensável, através de investimentos de vulto para a realização de estudos e pesquisas sobre esse material.

Muitas mudanças na indústria da construção civil vêm ocorrendo, provocadas principalmente com o aumento do nível de exigência dos seus principais clientes, o aumento da competição no setor e também pelas reivindicações por melhorias das condições de trabalho por parte da mão-de-obra (ISATTO et al., 2000). Nesse particular, o CAA parece ser um material com potencial suficiente para ocupar um lugar de destaque nas obras de engenharia, além de suas vantagens técnicas.

Nunes (2001) salienta que o processo de vibração do concreto convencional provoca atrasos e custos adicionais, além de ser uma fonte de sérios problemas de saúde para os operários das obras e para os habitantes de zonas adjacentes aos canteiros de obras.

Neste contexto, o CAA envolve um novo processo de produção e lançamento de concreto, cuja principal característica está na eliminação da vibração (ou na sua forma de lançamento e acabamento), de forma a reduzir o custo global do processo de concretagem e aumentar a qualidade do produto final (NUNES, 2001).

Em resumo, o CAA possui vantagens que podem ser aproveitadas para a industrialização da construção, como um ambiente de trabalho mais sadio, a eliminação do processo de vibração, além da qualidade que o produto final adquire pela estrutura interna mais homogênea.

É essa homogeneidade do CAA que garante uma maior resistência à penetração de agentes agressivos, oferecendo, portanto, maior durabilidade. É imperativo que pesquisas sobre esse material emergente sejam realizadas a fim de que se conheçam melhor as formas de concebê-lo com certa margem de segurança, permitindo assim que sua aplicação comece a ser um fato no Brasil e no mundo.

Neste contexto, o domínio da técnica para produzir os CAA's é um fator determinante para a aceitação e disseminação desse novo (ou relativamente novo) material. É desta forma que se julga necessário estudar sobre a dosagem desse tipo de concreto, uma vez que só assim ele poderá ser aplicado com confiança e segurança.

### 1.3 QUESTÃO DA PESQUISA

Partindo do trabalho de Tutikian (2004), foram feitas algumas pesquisas de autores internacionais que trabalham com o CAA e notou-se que o teor de argamassa obtido por eles é bem superior ao determinado por Tutikian (2004), que foi de 53% (esse foi o teor ideal para um concreto convencional com os mesmos materiais, determinado através do método de dosagem do IPT/EPUSP).

Para Tutikian (2004) foi possível obter-se um CAA com o mesmo teor de argamassa determinado para um concreto convencional dosado com os mesmos materiais e pelo mesmo método de dosagem adaptado para CAA.

Na tabela 1 podem ser vistos alguns traços de CAA encontrados na literatura internacional, cujos teores de argamassa variam de 55,9% até 79,8%, este último um CAA dosado com 50 kg de fibra de aço por metro cúbico de concreto.

Tabela 1: Alguns dos traços de CAA pesquisados na literatura nacional e internacional

Materiais (kg/m <sup>3</sup> )									Características do CAA				Autor, ano
CIM.	CV	FC	EAF	AREIA	BRITA	ÁGUA	SP	VMA	Slump flow (mm)	$\alpha$ (%)	a/agl.	f <sub>c28</sub> (MPa)	
350	134	0	0	852	934	175	0,54%	0	700	58,8	0,36	40,0	Ravindrarajah et al, 2003
350	168	0	0	835	917	192,5	2,79	0	740	59,6	0,37	55,6	Ravindrarajah et al, 2003
285	0	265	0	915	770	180	5,0	0	650	64,9	0,63	50,9	Zhu e Bartos, 2002
330	0	178	0	825	830	180	7,2	0	695	61,6	0,55	42,0	Ho et al, 2001
515	0	196	0	688	818	160	12,04	0	615	63,0	0,31	59,6	Nunes, 2001
498	0	190	0	703	779	177	8,84	0	600	64,0	0,36	46,6	Nunes, 2001
506	0	193	0	719	742	180	9,09	0	622	66,0	0,36	51,0	Nunes, 2001
421	0	211*	0	727	799	211	4,9	0	770	63,0	0,50	37,3	Lisbôa, 2004
378	200	0	0	714	818	181	0,95%	0	680	61,2	0,31	-	Takada, 2004
285	122	0	0	772	905	187	5,76	0	679	56,6	0,46	39,1	Ferreira, 2001
518	0	284	0	295	974	254	3,37	0	590	53,5	0,49	43,0	Tutikian, 2004
501	200	0	0	771	721	190	8,8	0	660	67,1	0,27	77,5	Gomes, 2002
350	0	100	0	788	815	200	4,05	1,28	700	60,3	0,57	-	Djelal et al, 2004
500	0	80	0	1080	420	200	9,4	0	650	79,8	0,40	40,0	Corinadelsi e Moriconi, 2004
350	115	0	0	785	735	175	7,8	0,56	755	63,0	0,38	48,5	Poon e Ho, 2004
375	275	0	0	690	660	190	9,7	-	760	67,0	0,29	63,5	Poon e Ho, 2004
250	160	0	0	742	837	225	0,5%	-	600	57,9	0,55	25,3	Sonebi, 2004
362	191	0	0	641	942	164	2,93	0	708	55,9	0,30	-	Grünewald e Walraven, 2001
400	0	0	170	815	815	181	5,2	0	800	63,0	0,32	-	Han e Yao, 2004
391	0	168	0	689	809	223	5,9	0	-	60,7	0,57	-	Chopin et al, 2004
485	208	0	0	620	945	200	1,6%	0	-	58,1	0,29	79,6	Xie et al, 2002
408	45	0	0	1052	616	174	1602	0	710	70,9	0,38	-	Ouchi et al, 2003

CIM.=cimento, CV=cinza volante, FC=filer calcário, EAF=escória de alto-forno, SP=aditivo superplastificante, VMA=aditivo modificador de viscosidade; *Slump flow*=ensaio de espalhamento do concreto,  $\alpha$ =teor de argamassa, a/agl.=relação água /aglomerante, f<sub>c28</sub>=resistência à compressão aos 28 dias.

Observando essas diferenças entre os teores de argamassa decidiu-se fazer uma pesquisa, através de um estudo experimental, que será detalhado mais adiante neste trabalho, a fim de se avaliar concretos auto-adensáveis produzidos com diferentes teores de argamassa.

Portanto, a questão central desse estudo é: será que o teor de argamassa determinado para um concreto convencional pelo método do IPT/EPUSP é também o ideal, do ponto de vista técnico e econômico, para um CAA, já que os teores de argamassa de CAAs que a bibliografia apresenta são muito altos?

Como já se fez referência, Tutikian (2004) mostrou em seu estudo ser possível obter um CAA com um teor de argamassa igual ao teor ideal obtido através do método do IPT/EPUSP para um concreto convencional. Mas será esta a melhor solução, em termos de CAA?

Para responder essa questão central, este trabalho vai comparar um CAA obtido pelo método proposto por Tutikian (2004), com teor ideal de argamassa igual ao de um CCV obtido com os mesmos materiais, com outros CAAs obtidos com teores de argamassa maiores, através do mesmo método de dosagem, e que abrangem a faixa de valores de teores de argamassa encontrados na literatura.

## 1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

Com o objetivo de contribuir para um melhor e mais profundo conhecimento sobre a dosagem e as propriedades de concretos auto-adensáveis, no estado fresco e no estado endurecido, essa pesquisa apresenta como objetivos principais:

- Estudar composições de CAA obtidos com diferentes teores de argamassa, que englobem a faixa de valores de teor de argamassa encontrados na literatura, através do método de dosagem proposto por Tutikian (2004), a fim de se avaliar a influência do teor de argamassa nas propriedades de concretos auto-adensáveis no estado fresco e no estado endurecido, e identificar um eventual teor ideal de argamassa;
- fazer contribuições ao método de Tutikian, através dos experimentos para obtenção de CAAs economicamente viáveis para dar crédito ao método.

Dessa forma, a pesquisa a ser levada a cabo pretende que no seu final possam ser dadas contribuições sobre a dosagem desse novo tipo de concreto, a fim de que sua aplicação possa vir a ser uma realidade no mercado brasileiro de obras de engenharia, a exemplo de alguns países como o Japão, a Suécia e a Holanda.

Por outro lado, é também interesse da pesquisa em questão incentivar o surgimento de novos estudos sobre o assunto, de maneira que se possam usufruir seus avanços para melhor abordar-se o tema com outros pesquisadores brasileiros e até estrangeiros.

Para tornar mais amplo o alvo esta pesquisa apresenta ainda em sua proposta como objetivos secundários os seguintes:

- Determinação experimental do teor ideal de substituição de fíler na proporção do agregado miúdo;
- avaliação do comportamento no estado fresco dos CAA's em função do teor de argamassa e do traço utilizado (consumo de cimento);
- avaliação da resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade dos concretos auto-adensáveis e do concreto convencional;
- análise do grau de segregação do concreto já endurecido, pela observação dos corpos-de-prova rompidos nos ensaios de tração por compressão diametral;
- avaliação da qualidade dos concretos auto-adensáveis produzidos durante o estudo, através do ensaio de Ultra-Som;
- avaliação do consumo de cimento e dos custos dos CAA's produzidos com os diferentes teores de argamassa.

## 1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O trabalho de pesquisa a ser realizado tem como limitações alguns fatores que podem ser resumidos nos indicados a seguir:

- os materiais a serem aplicados durante a realização do estudo possuem características próprias (tipo de cimento, areia, brita, fíler calcário e o tipo de

aditivo superplastificante), portanto, qualquer tipo de comparação deverá atentar para esse fato;

- a pesquisa será limitada ao estudo de dosagem de concretos auto-adensáveis do tipo finos, motivo pelo qual, para o caso de CAA tipo agente de viscosidade e do CAA tipo combinado ajustes deverão ser feitos.

Salienta-se que não faz parte dessa pesquisa a realização de ensaios experimentais e laboratoriais de durabilidade dos CAA, pois o foco desta pesquisa restringe-se somente ao estudo de dosagem de concretos auto-adensáveis com a aplicação de fíler calcário e aditivo superplastificante. Por outro lado, deve-se reforçar que qualquer comparação dos futuros resultados dessa pesquisa com outros trabalhos deverá ter em conta todos os fatores de limitação descritos acima.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho de pesquisa apresenta-se organizado nos seguintes capítulos:

O Capítulo 1, que apresenta a introdução da pesquisa, debruça-se sobre considerações iniciais, relevância do tema, questão e objetivos da pesquisa, e apresentação do trabalho.

O Capítulo 2 inclui considerações gerais sobre o concreto auto-adensável, tratando de um breve histórico, definição do CAA, suas vantagens e aplicações práticas, breve comparação com concreto convencional, materiais constituintes, classificação do CAA e seu comportamento reológico. No fim faz-se uma abordagem sobre os mecanismos de como atingir a auto-compactabilidade focando a importância do teor de argamassa do concreto.

O Capítulo 3 trata dos principais ensaios para avaliar as propriedades do CAA no estado fresco.

O Capítulo 4 faz uma descrição sobre o método de dosagem para CAA proposto por Tutikian (2004), que foi o método aplicado para a obtenção do CAA desta pesquisa.

O Capítulo 5 apresenta o programa experimental adotado para a realização da pesquisa, caracterização dos materiais utilizados e os ensaios realizados ao longo do trabalho.

O Capítulo 6 apresenta os resultados do trabalho e as discussões a respeito, enquanto que no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e considerações finais sobre os resultados obtidos nesta pesquisa, bem como algumas sugestões para futuras pesquisas.

Finalmente apresentam-se as referências, que auxiliaram na compreensão do CAA e na elaboração do trabalho, e os anexos contendo os resultados gerais dos ensaios realizados no estado fresco e no estado endurecido, bem como são apresentadas correlações entre algumas variáveis encontradas durante o estudo de dosagem de concretos auto-adensáveis deste trabalho.

## 2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

### 2.1 HISTÓRICO

Apesar da maioria dos trabalhos sobre CAA mencionarem que esse tipo de concreto foi criado e desenvolvido no Japão, Mario Collepardi (2001), professor do Instituto Politécnico de Milão, afirma ter usado esse material, ou no mínimo um material quase igual ao atual CAA, nas décadas de 70 e 80 do século passado. Collepardi, que já foi várias vezes premiado por suas contribuições ao estudo de superplastificantes e suas aplicações no concreto, define aqueles concretos como fluidos, superplastificados e resistentes à segregação.

Para Goodier (2003), a história e desenvolvimento do CAA podem ser divididos em dois estágios-chave: o seu desenvolvimento inicial no final dos anos 80 do século passado no Japão e a sua subsequente introdução na Europa através da Suécia, nos meados para o final dos anos 90 do século passado.

Nunes (2001) e Takada (2004) destacam que o primeiro CAA foi obtido com sucesso em 1988 na Universidade de Tóquio pelo professor Hajime Okamura e seus colegas.

Porém, casos sobre lançamento de concretos auto-nivelantes sem nenhuma vibração externa, publicados nos anos 80 do século XX em Hong Kong, Nova York e Trieste, na Itália, estão sendo estudados de novo a fim de compará-los com os atuais CAA's. Tais concretos eram compostos por aditivos, cimento, cinza volante, fíler calcário e sílica ativa, entre outros materiais (COLLEPARDI, 2001).

Collepardi (2001) ressalta que o termo Concreto Auto-Adensável (CAA) refere-se a um “novo” tipo especial de concreto, caracterizado por uma alta resistência à segregação e que pode ser moldado sem compactação ou vibração, e que já eram obtidos mesmo sem os modernos superplastificantes a base de acrílico e sem os novos aditivos modificadores de viscosidade, VMA's (Aditivo Modificador de Viscosidade).

Para entender a concepção e o surgimento do CAA é necessário saber que tudo começou quando o Japão enfrentou problemas sérios de durabilidade em suas estruturas de concreto

armado que, geralmente, apresentam alta taxa de armadura em virtude das ações sísmicas bastante freqüentes na região.

Grunewald (2004) cita que, devido ao baixo nível de automação na indústria da construção, à falta de qualificação dos operários e aos problemas de durabilidade induziram pesquisadores japoneses a pensar sobre o futuro e, como conseqüência, foi desenvolvido o CAA.

Na figura 1 estão representados, através de uma visão holística, os fatores que sustentam a durabilidade das estruturas de concreto, onde cada um dos quatro pilares de sustentação tem igual importância para a estabilidade do tampo da mesa, que representa a vida da estrutura.

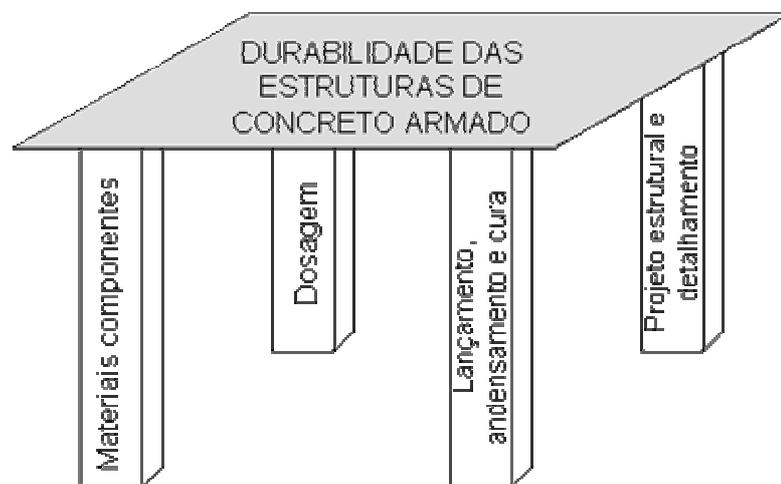


Figura 1: abordagem holística da durabilidade de estruturas de concreto armado (fonte: *International course on durability of concrete structures*. Florianópolis, 1996, Brasil)

É claro que, quando se executam os referidos “pilares”, já se levam em consideração o tipo de uso da estrutura e o ambiente no qual a mesma será erguida, para que os materiais e a dosagem sejam os mais indicados para a situação em causa.

Portanto, o fato de serem usados os melhores materiais disponíveis, executada uma dosagem perfeita e realizado um excelente projeto estrutural não é suficiente para garantir um produto final (concreto endurecido) com a qualidade esperada.

Os processos de lançamento, vibração (ilustrados na figura 2) e cura do concreto são fundamentais e os mais difíceis de serem controlados. Por exemplo, nem toda a zona do concreto é vibrada com a mesma energia, nem todo operário sabe vibrar de forma correta e o supervisor não consegue, ao mesmo tempo, verificar a área em concretagem.

No caso de CAA, lançamento e adensamento deixam de ser pontos fracos, porém outros fatores mencionados na figura 1 continuam sendo do mesmo jeito importante para a questão da durabilidade das estruturas.



Figura 2: atividades de lançamento e de vibração do concreto (fonte: Kosmatka et al, 2002)

Por isso, o advento do CAA e a sua introdução no mercado representam um grande avanço tecnológico, que pode levar a uma melhor qualidade do concreto produzido e a um processo de construção mais rápido e mais econômico (SONEBI, 2004).

## 2.2 DEFINIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO CAA

Goodier (2003) cita que o CAA também foi visto como sendo capaz de oferecer benefícios econômicos, sociais e ambientais quando comparado à construção com concreto convencional vibrado, e define o CAA como um concreto que, no estado fresco, possui alta fluidez mantendo sua estabilidade, ou seja, não segrega o que permite o seu auto-adensamento sem o uso de energia externa.

Para isso, um concreto deve apresentar as seguintes três propriedades para que seja caracterizado como auto-adensável:

- **Habilidade de fluir** - a habilidade de preencher completamente todas as áreas e cantos da fôrma em que for lançado apenas sob a ação do seu peso próprio, sem que nenhuma vibração intencional externa seja exercida, mesmo em

situações em que o espaçamento entre as barras de aço das armaduras seja muito estreito;

- **habilidade passante** – refere-se à habilidade do concreto em passar através de áreas congestionadas com armaduras, sem separação dos seus constituintes e sem bloqueio (passar livremente pelas barras de aço);
- **resistência à segregação** – habilidade de reter o agregado graúdo da mistura em suspensão, mantendo a mistura sempre como um material homogêneo.

Sonebi (2004) define o CAA como uma nova categoria de concreto de alto desempenho caracterizado pela habilidade de se espalhar dentro dos moldes em que é lançado sob ação da gravidade, sem a necessidade de vibração, e se auto-adensar sem segregar e sem causar bloqueio.

Estas propriedades devem ser todas observadas para que se possa dosar um CAA adequado, sem descuidar de outros requisitos como as suas propriedades no estado endurecido. Corinaldesi e Moriconi (2003) dizem que um concreto que não deva ser vibrado ainda é um desafio para a indústria da construção.

## 2.3 VANTAGENS DO CAA

A eliminação da necessidade de vibração pode levar a um concreto de melhor qualidade, eficiência econômica (maior velocidade de concretagem e redução no trabalho, energia e custo de equipamento), melhoria rumo à automação de produtos pré-moldados, e melhoria substancial das condições de trabalho (alto consumo de subprodutos/resíduos industriais, ou seja, benefícios ambientais, e redução de barulho e dos riscos de saúde) (SONEBI, 2004).

O CAA pode ser considerado como um material de alto desempenho que flui sob ação de seu peso próprio ao longo de uma distância longa sem a necessidade do uso de vibradores para se alcançar o seu adensamento ou compactação (POON e HO, 2004).

A eliminação da necessidade de vibração leva um concreto de melhor qualidade e melhoria substancial nas condições de trabalho (SONEBI, 2004).

Além das vantagens descritas anteriormente, o CAA também é capaz de oferecer ao cliente um produto final mais homogêneo, com superior acabamento e menos defeitos. Outra

vantagem é que menos mão-de-obra é necessária para que o CAA seja lançado. À medida que a falta de mão-de-obra qualificada no canteiro de obra continua crescendo no Reino Unido e em muitos outros países, essa é uma vantagem do material que se tornará cada vez mais importante (GOODIER, 2003).

Por outro lado, é tecnicamente viável utilizar resíduos como parte do teor de finos na produção de CAA. Além dos benefícios ambientais, também poderia haver algumas vantagens técnicas e econômicas (POON e HO, 2004).

Devido as suas propriedades reológicas, a vibração pode ser eliminada e ainda assim se obter um concreto bem consolidado, sem os riscos de uma eventual vibração deficiente (HAN e YAO, 2004).

A figura 3 apresenta um exemplo de uma viga de concreto armado cuja vibração foi inadequada, resultando em concreto poroso (menos denso) e exposição da armadura, prejudicando fortemente a vida útil da estrutura, além dos aspectos de segurança estrutural envolvidos.

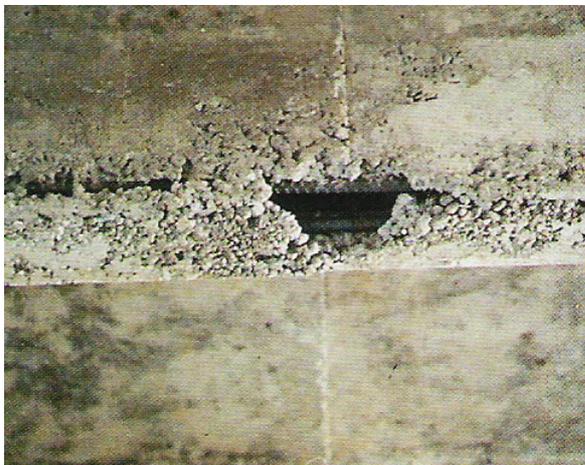


Figura 3: exemplo do aspecto de uma falha de concretagem em uma viga de concreto armado (fonte: Kosmatka et al, 2002)

Portanto, a grande vantagem do CAA é a garantia de que um concreto bem dosado, que atende às especificações de projeto e características no estado fresco com lançamento e cura adequados, vai propiciar um produto final endurecido com qualidade, ao contrário do concreto convencional (CCV) cujo produto final depende largamente do processo de adensamento ou compactação.

## 2.4 APLICAÇÕES PRÁTICAS DO CAA

Embora não seja esperado que o CAA substitua completamente o concreto convencional (CCV), a sua utilização nos mercados de pré-moldados e na indústria de concreto pré-misturado (das centrais de concreto) na Europa, Reino Unido e no resto do mundo mostram que seu uso vai continuar a crescer à medida que a experiência e a tecnologia melhorem, os clientes demandem produtos finais com qualidades maiores e a disponibilidade de mão-de-obra qualificada continue a decrescer (GOODIER, 2003).

Desde o início da década de 1990, o CAA tem sido aplicado no Japão em construções de pontes, edifícios e túneis. Nos últimos 5 anos, algumas pontes em CAA foram executadas na Europa, porém a produção de CAA no Japão, conforme ilustrado na figura 4, é a que mais impressiona o mundo (OUCHI ET AL, 2003).

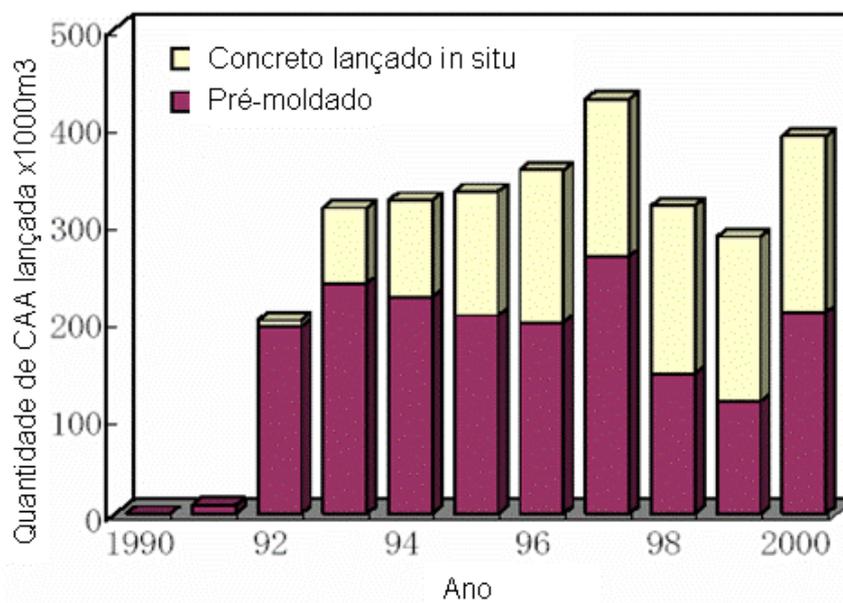


Figura 4: volume de CAA lançado no Japão (fonte: Ouchi et al, 2003)

Segundo Okamura e Ouchi (2003), a primeira aplicação de CAA no Japão foi ao mês de junho do ano de 1990 durante a execução de um edifício. A partir daí, o CAA foi aplicado em diversas estruturas e em 1991 foi aplicado na estrutura de uma ponte estaiada em concreto protendido, ilustrada na figura 5.



Figura 5: ponte Shin-kiba Ohashi executada no Japão em CAA (fonte: Okamura e Ouchi, 2003)

Em termos de produção de CAA em larga escala, os mesmos autores referem-se à ponte suspensa Akashi-Kaikyo, inaugurada em abril de 1998, na época com o maior vão livre do mundo (1991 m), cujos dois blocos de ancoragem, que a figura 6 ilustra, foram totalmente executados em CAA. Nessa obra, foi introduzido um novo sistema de construção que fez total uso das vantagens que o CAA oferece.



(a)



(b)

Figura 6: blocos de ancoragem - ponte Akashi-kaikyo (a) vista aérea e (b) vista lateral (fontes: Nunes, 2001 e Okamura, 2003)

O concreto foi produzido e bombeado a partir de uma usina montada próximo ao local de construção. A tubulação que transportava o CAA para a obra, munida de válvulas de controle

automático a cada 5 metros ao longo do comprimento de cada linha, era composta por 3 tubos, de 200 m cada, dispostos paralelamente e afastados por 3 metros. Foi utilizado fíler calcário como fino e o concreto, cujo agregado graúdo possuía dimensão máxima de 40 mm, foi lançado de uma altura máxima de 3 metros e não ocorreu segregação, apesar do tamanho do agregado. A análise final mostrou que a aplicação do CAA reduziu o prazo de execução em cerca de 20%, de dois anos e meio para dois.

Outro exemplo da aplicação do CAA é o das paredes de um enorme reservatório de metano liquefeito (LNG), ilustrado na figura 7, pertencente a *Osaka Gas Company*. Nunes (2001) e Okamura e Ouhci (2003) relatam que a adoção do CAA neste projeto, em particular, teve os seguintes méritos: (1) diminuição do número inicial de camadas de concretagem de 14 para 10; (2) o número de trabalhadores para concretagens passou de 150 para 50 e (3) o período de construção, estimado para 22 meses, ficou em 18 meses, implicando numa redução de 18%. Nessa obra foram lançados em torno de 12 mil m<sup>3</sup> de concreto.

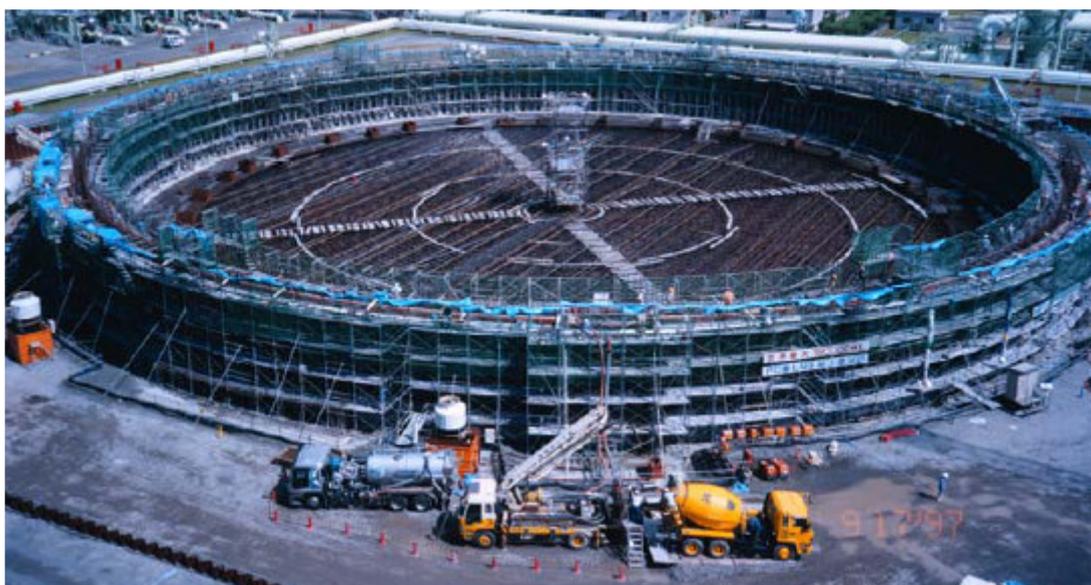


Figura 7: execução de um reservatório de metano liquefeito com CAA (fonte: Nunes, 2001)

A figura 8 ilustra o plano de concretagem da execução do revestimento de um túnel e o mesmo revestimento já executado.

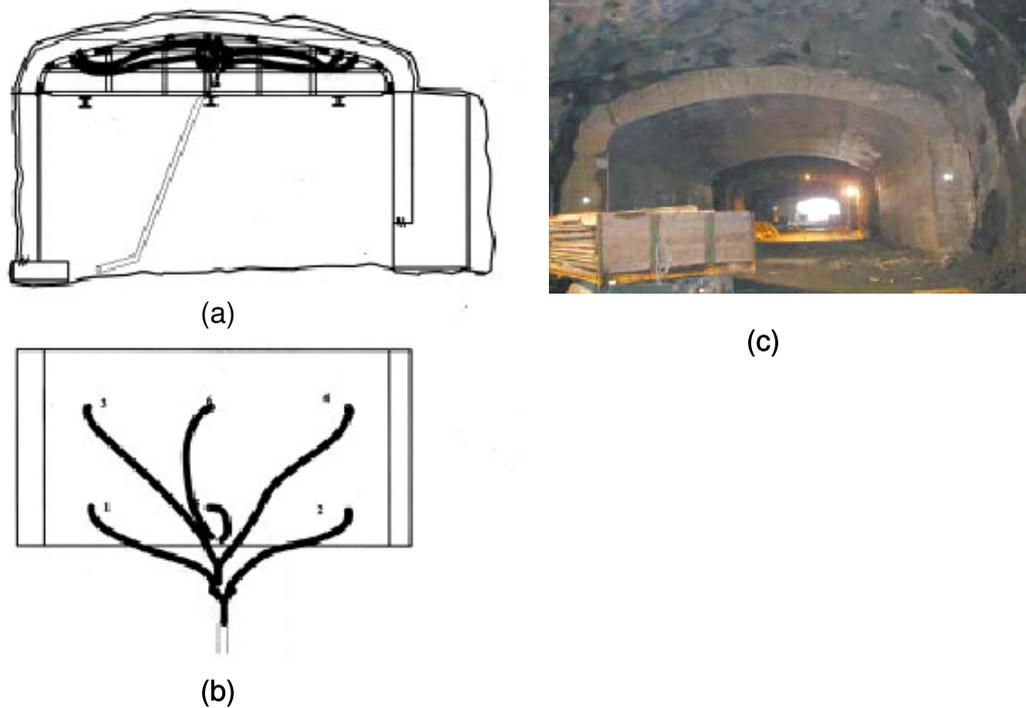


Figura 8: CAA aplicado em revestimento de túnel - (a) corte transversal, formas e esquema de concretagem, (b) pontos de alimentação do concreto situados sob o teto do túnel e (c) o túnel após concretagem (fonte: Ouchi et al, 2003)

Até ao momento, o uso de CAA para pontes rodoviárias nos Estados Unidos é bastante limitado, porém a indústria de pré-moldados americana começou a aplicar a tecnologia do CAA em painéis arquitetônicos (OUCHI et al, 2003). A figura 9 mostra a aplicação de CAA na concretagem de painéis pré-moldados nos Estados Unidos.



Figura 9: utilização de CAA em indústria de pré-moldados nos EUA (fonte: MAINE DOT, 2003)

A figura 10 apresenta uma obra em CAA branco, que é uma variante interessante em termos estéticos. Trata-se de uma das paredes da obra de uma igreja na cidade de Pescara, na Itália.



Figura 10: vista de uma parede em CAA branco – Pescara/Itália (fonte: Collepardi, 2001)

Na Suécia, o CAA já foi usado em 19 pontes rodoviárias e em lajes de residências onde foi observado um aumento de 60% na produtividade (PERSSON, 2001). Uma dessas obras executadas na Suécia, uma pequena passagem hidráulica, pode ser visualizada figura 11.

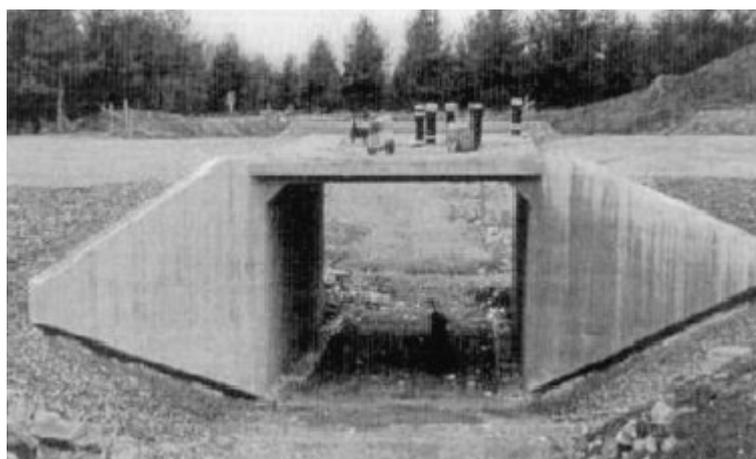


Figura 11: passagem hidráulica executada em CAA na Suécia (fonte: Goodier, 2003)

Existem alguns exemplos de aplicação de CAA no Brasil que podem ser considerados como casos isolados, ou seja, ainda é uma aventura para a indústria de construção brasileira a utilização do CAA. Em Porto Alegre foi aplicado CAA branco na obra do Museu Iberê

Camargo, ilustrado na figura 12, além de uma empresa de pré-moldados que vem aplicando CAA branco de alta resistência há algum tempo.



Figura 12: obra do museu Iberê Camargo em execução com CAA branco – Porto Alegre (fonte: archinect.com)

Há também o exemplo da região de Goiânia, onde foi aplicado CAA na obra de um edifício residencial em dezembro de 2004, que a figura 13 mostra sua vista geral.



Figura 13: vista geral de edifício executado em CAA em Goiânia (fonte: REALMIX, 2005)

Finalmente, Corinaldesi e Moriconi (2003) salientam que, atendendo aos tipos de aplicações de elementos delgados pré-moldados, a durabilidade que pode ser propiciada pelo CAA é mais satisfatória e parece competitiva aos outros materiais na manufatura desses elementos.

## 2.5 CONCRETO AUTO ADENSÁVEL *VERSUS* CONCRETO CONVENCIONAL

A grande diferença do CCV para o CAA, além da concepção de ambos, é que o primeiro está envolvido, durante o processo de concretagem, por fatores que podem comprometer a sua qualidade como produto final, dos quais se destaca o seu adensamento ou compactação.

Neville (1982) afirma que a qualidade do concreto, no sentido amplo da palavra, quase sempre é posta em evidência, embora com referência especial no que diz respeito à sua permeabilidade. Além dos poros da pasta de cimento e dos agregados, o concreto, como um todo, contém vazios causados por adensamento incompleto, ou por exsudação.

Estes vazios do concreto ocupam de 1 a 10% do seu volume, sendo que concretos com valores de 10% são concretos com muitas falhas (ninhos) e resistências muito baixas. Desde que as partículas dos agregados são envolvidas pela pasta de cimento, nos concretos plenamente adensados, é a permeabilidade da pasta que tem maior efeito sobre a permeabilidade do concreto (NEVILLE, 1982).

O lançamento do concreto é a atividade do processo de produção de estruturas que mais muda quando se usa o CAA. Uma vez no ponto de aplicação, a operação final de colocação e lançamento do CAA requer muito menos habilidade ou mão-de-obra para se obter um produto (concreto) final uniforme e denso, comparado com concreto tradicional. Sendo a vibração desnecessária, o barulho e o risco de desenvolver problemas devido ao uso de equipamentos são reduzidos.

Apesar da redução da mão-de-obra para concretagem, maior tempo para testar o concreto antes do lançamento é consumido. No geral, as propriedades no estado endurecido do CAA são similares ou superiores as dos concretos convencionais equivalentes.

Pode-se então dizer que o adensamento e, portanto, a durabilidade do concreto é mais garantida com o uso de CAA já que o uso dele reduz o potencial do erro humano (na forma de adensamento inadequado).

Com relações água/cimento (a/c) similares, a resistência do CAA é, pelo menos, igual à do CCV e apresenta a mesma evolução ao longo do tempo para uma mesma classe de resistência. Quando uma baixa relação a/c é usada no CAA, a sua resistência à compressão geralmente

situa-se acima dos 40 MPa e pode chegar aos 100 MPa. A resistência à tração é também similar à da mesma classe de resistência de um CCV, assim como a retração por secagem (GOODIER, 2003).

A maioria dos materiais para produzir CCV pode ser usada na produção de CAA, apesar de haver diferenças significativas na obtenção do CAA comparado com a produção de CCV. Portanto, em termos de composição dos concretos, alguns autores ilustram a diferenciação entre um CAA e um CCV. As figuras 14 e 15 apresentam dois exemplos para a composição, em proporção do volume de seus componentes, desses concretos.

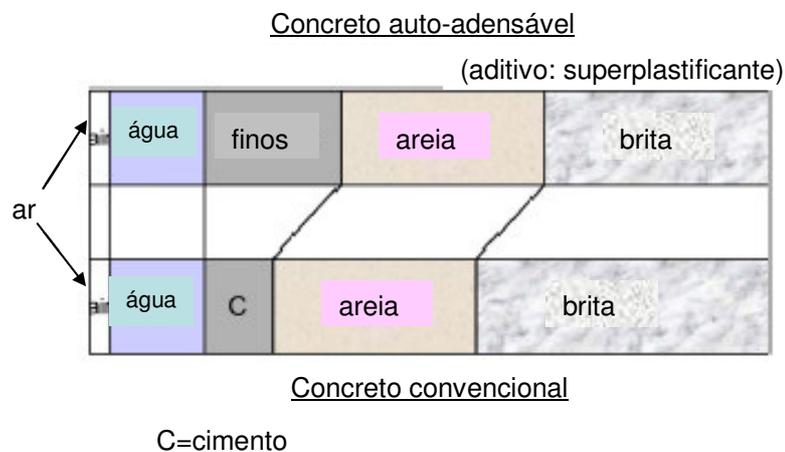


Figura 14: comparação da composição de um CAA e de um CCV (fonte: Okamura, 2003)

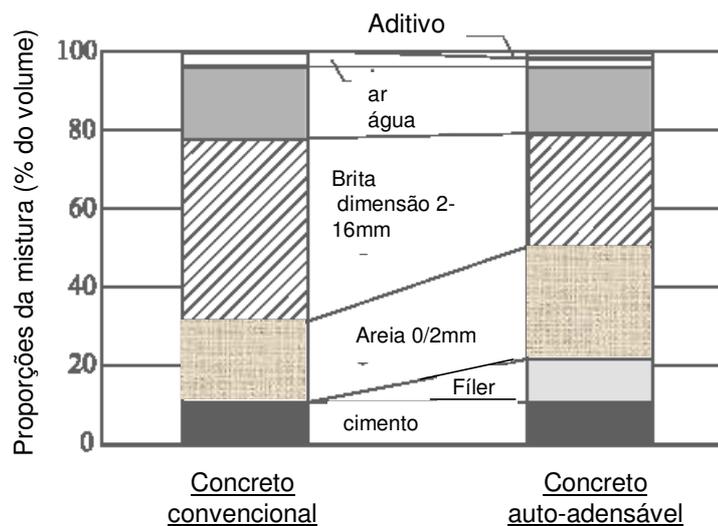


Figura 15: representação esquemática das composições do CAA e do CCV (fonte: Holschemacher e Klug, 2003)

O CAA no estado fresco é muito mais sensível às variações de qualidade e uniformidade dos constituintes que o compõem. Em virtude dessa maior sensibilidade, uma proporção precisa dos materiais constituintes é essencial para se obter um CAA com sucesso (GOODIER, 2003).

## 2.6 MATERIAIS CONSTITUINTES

Como cita Tutikian (2004), e observado no item anterior, a passagem de concreto convencional para concreto auto-adensável altera os materiais constituintes de quatro componentes (cimento, areia, brita e água) para seis componentes.

Assim, um concreto auto-adensável é constituído pelos materiais conforme se segue:

- Cimento
- Filers (pozolânicos e/ou não-pozolânicos)
- Areia
- Brita
- Água
- Aditivos (os mais importantes são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade)

Uma das principais características do CAA é a sua elevada resistência à segregação apesar de sua elevada fluidez ou deformabilidade no estado fresco. Persson (2001) salienta que, para evitar a separação entre as partículas maiores no CAA são usados aditivos modificadores de viscosidade (VMA's) ou filers para aumentar a viscosidade. Esse autor cita ainda que, podem ser usados os seguintes filers, entre outros: cinza volante, fíler de vidro, fíler calcário, sílica ativa e fíler de quartzo.

O fíler calcário tem sido o tradicional fíler usado para a produção de CAA. Além do calcário, outras adições minerais têm sido consideradas. Por exemplo, materiais finos como areia fina ou pó granítico também podem ser usados.

A primeira geração de CAA usado no Reino Unido e na Europa, desenvolvido num grande projeto de pesquisa europeu, que avaliou a viabilidade do uso de CAA na engenharia civil, continha alto teor de finos e uma alta dosagem de superplastificante para assegurar adequada capacidade de preenchimento, habilidade de passar por espaços estreitos e resistência à segregação (SONEBI).

Os finos referem-se às partículas de cimento e de fíler com dimensões inferiores a 125  $\mu\text{m}$ . Um alto teor de finos (cimento+adições), na ordem dos 500-600  $\text{kg}/\text{m}^3$  de concreto, é geralmente necessário para minimizar o potencial de segregação de concretos fluidos. (C.S. POON & D.W.S. HO, 2004).

Assim, Poon e Ho (2004) citam que, na produção de concretos, as misturas normalmente contêm 350-450  $\text{kg}$  de aglomerante/ $\text{m}^3$  de concreto e que uma quantidade de fíler na ordem dos 100-200  $\text{kg}/\text{m}^3$  de concreto é necessária para satisfazer a demanda de finos na mistura.

SONEBI (2004) afirma também que o uso de adições minerais como cinza volante, escória de alto-forno ou fíler calcário pode aumentar a fluidez do concreto, sem qualquer aumento no custo. O mesmo autor realça que em alguns estudos realizados (SONEBI et al, 2002, 2001 e YAHIA et al, 1999) a incorporação de cinza volante, escória ou fíler calcário reduziu a quantidade necessária de superplastificante para se obter um espalhamento (*slump flow*) similar quando comparado com o mesmo concreto contendo apenas cimento.

Resultados desses mesmos estudos citados por Sonebi (2004) mostraram que esses materiais suplementares também melhoraram os parâmetros e propriedades reológicas do concreto fresco, reduziram o risco de fissuração do concreto devido ao calor de hidratação e, portanto, a durabilidade melhorou.

Segundo Poon e Ho (2004), em algumas regiões, o que não é ainda o caso do Brasil, VMA's são frequentemente usados, uma vez que o fíler calcário tem de ser importado a um custo similar ao do cimento Portland. Os mesmos autores salientam também que existe ainda a possibilidade de substituir os VMA's ou o fíler calcário por materiais de baixo custo, tais como resíduos locais disponíveis. Esse conceito de utilização de resíduos no CAA tem sido bastante explorado em Cingapura.

Quanto aos aditivos superplastificantes, responsáveis pela alta fluidez do CAA, se pode dizer que os mesmos são praticamente uma obrigação para a obtenção de concretos fluidos e auto-adensáveis.

Ramachandran et al (1998) colocam que a função principal dos superplastificantes no concreto é alcançar e controlar a trabalhabilidade do concreto fresco sem afetar adversamente outras características do sistema cimentício, como tempo de pega, ar incorporado, resistência mecânica, ou quantidade de vazios.

Segundo Hartmann (2002), quando as partículas de cimento entram em contato com a água apresentam forte tendência à floculação, resultado de diversas interações, entre as quais as forças de Van der Waals – que são forças eletrostáticas entre zonas com cargas opostas e forte ligação, envolvendo moléculas de água ou compostos hidratados.

A mesma autora salienta ainda, que uma parte da água fica aprisionada entre os grãos de cimento, reduzindo assim a disponibilidade de água e a lubrificação da mistura. Isso faz aumentar a viscosidade da mistura e também reduz a área específica dos grãos de cimento disponível para as reações de hidratação.

A figura 16(a) apresenta a micrografia de partículas de cimento floculadas em uma suspensão de água-cimento sem aditivo e a figura 16(b) representa a micrografia de um sistema disperso com a adição de um aditivo superplastificante.

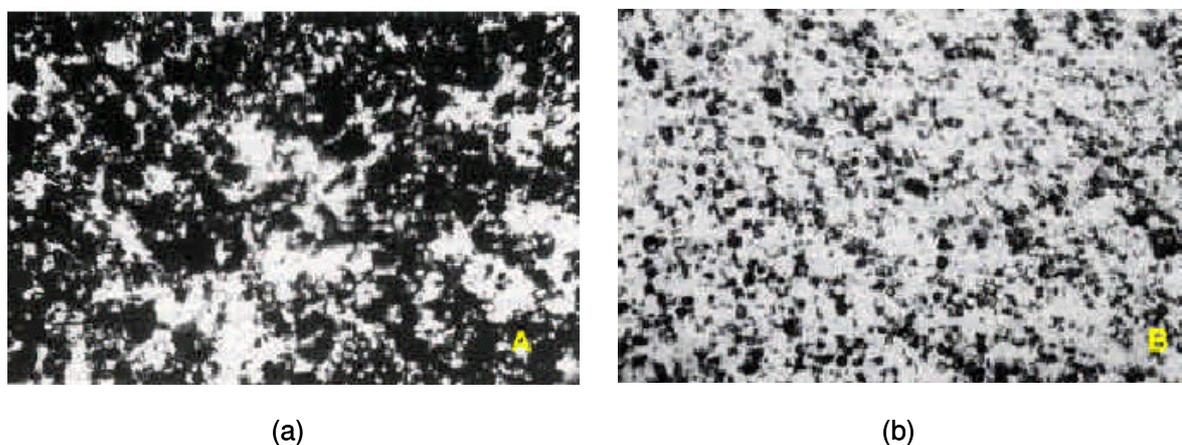


Figura 16: (a) aglomeração de partículas de cimento (b) sua dispersão após o efeito de aditivo superplastificante (fonte: Collepardi, 2001)

Os aditivos superplastificantes agem quando adsorvidos nas partículas de cimento, provocando repulsão eletrostática, que resulta na dissociação do cimento aglomerado em partículas, com significativa redução da viscosidade do sistema cimento-água-superplastificante (HARTMANN, 2002).

Griesser (2002) cita que os três tipos de superplastificantes mais comuns na atualidade são: os de base naftaleno sulfonados, os de base melanina sulfonados e os chamados de superplastificantes de nova geração ou 3ª geração que são os policarboxilatos. O mesmo autor salienta ainda que, estes últimos são considerados os que apresentam melhor capacidade de dispersão e habilidade de fluidificar.

## 2.7 TIPOS DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Do ponto de vista da sua composição, os CAA's no Japão costumam ser divididos em três categorias (NUNES, 2001 e KOSMATKA et al., 2002), em função do método para torná-lo auto-adensável:

- **tipo finos** (*powder type*): este tipo de CAA caracteriza-se por possuir alto teor de finos para evitar a segregação, proporcionando uma viscosidade adequada. São os finos que proporcionam a viscosidade necessária para que as partículas de agregado graúdo se mantenham em suspensão na argamassa. Este tipo de CAA é que será produzido no presente trabalho de pesquisa;

- **tipo agente de viscosidade** (*viscosity agent [stabilizer] type*): este tipo de CAA apresenta-se com um teor de finos similar ao de um concreto convencional, ao qual é adicionado um agente ou aditivo modificador de viscosidade (VMA) para estabilizar a mistura e inibir a segregação dos materiais. Este aditivo tem a função de aumentar a viscosidade para manter a mistura coesa e resistente à segregação. Esse tipo de CAA é geralmente produzido quando não existem finos para aumentar a viscosidade ou quando a aplicação destes não for econômica e/ou tecnicamente viável;

- **tipo combinado** (*combination type*): este é o tipo caracterizado pela adição de uma pequena quantidade de VMA aos finos para balancear as flutuações da mistura durante a produção do CAA, uma vez que o CAA é bastante sensível às variações de umidade e composição granulométrica dos seus componentes. Portanto, o VMA, neste caso, possui apenas a função de fazer o ajuste da dosagem.

A seguir, nas tabelas 2 a 4, são apresentados exemplos de traços de CAA produzidos no Japão, na Europa e nos Estados Unidos da América, mostrando os três tipos de dosagem: tipo finos, tipo VMA e tipo combinado.

Tabela 2: Exemplos de traços de CAA produzidos no Japão (Ouchi et al, 2003)

Materiais (kg)	Mistura J1 (Tipo finos)	Mistura J2 (Tipo VMA)	Mistura J3 (Tipo combinado)
Cimento Portland	530*	220	298
Cinza volante	70	0	206
Escória de alto-forno	0	220	0
Agregado miúdo	751	870	702
Agregado graúdo	789	825	871
Aditivo superplastificante	9,0	4,4	10,6
Aditivo VMA	0	4,1	0,0875
Água	175	165	175
Espalhamento do CAA (mm)	625	600	660
Teor de argamassa (%)	63,13	61,36	58,06

\*Mistura J1: no Japão é usado um tipo de cimento com baixo calor de hidratação

Tabela 3: Exemplos de traços de CAA produzidos na Europa (Ouchi et al, 2003)

Materiais (kg)	Mistura E1 (Tipo finos)	Mistura E2 (Tipo VMA)	Mistura E3 (Tipo combinado)
Cimento Portland	280	330	310
Cinza volante	0	0	190
Fíler calcário	245	0	0
Escória de alto-forno	0	200	0
Agregado miúdo	865	870	700
Agregado graúdo	750	750	750
Aditivo superplastificante	4,2	5,3	6,5
Aditivo VMA	0	N/A	7,5
Água	190	192	200
Espalhamento do CAA (mm)	600-750	600-750	600-750
Teor de argamassa (%)	64,95	65,12	61,53

Tabela 4: Exemplos de traços de CAA produzidos nos Estados Unidos (Ouchi et al, 2003)

Materiais (kg)	Mistura U1 (Tipo finos)	Mistura U2 (Tipo VMA)	Mistura U3 (Tipo combinado)
Cimento Portland	408	357	416
Cinza volante	45	0	0
Escória de alto-forno	0	119	0
Agregado miúdo	1052	936	1015
Agregado graúdo	616	684	892
Aditivo superplastificante (ml)	1602	2500	2616
Aditivo VMA (ml)	0	N/A	542
Água	174	180	154
Espalhamento do CAA (mm)	710	660	610
Teor de argamassa (%)	70,96	67,36	61,60

## 2.8 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO CAA NO ESTADO FRESCO

Tattersal e Banfill (1983) definem reologia como a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria, o que significa que a reologia trata das relações entre tensão, carga, taxa de deformação e tempo.

Outra definição atesta que reologia é o ramo da mecânica dos fluidos que estuda as propriedades físicas que influenciam o transporte de quantidade de movimento num fluido. E que viscosidade é a propriedade reológica mais conhecida, e a única que caracteriza os fluidos newtonianos.

Tattersal e Banfill (1983) salientam que, além do objetivo de fornecer informações úteis para explicar e prever algumas propriedades do concreto, outros objetivos do estudo da reologia da pasta de cimento podem ser resumidos em:

- caracterizar o real comportamento reológico do material, por exemplo, a reologia de um *grout*;
- fazer do estudo reológico um meio possível de controlar a produção de cimento, através da realização em laboratórios de testes reológicos em pequena escala;
- prever os efeitos dos aditivos sobre o concreto fresco, correlacionando os seus efeitos na pasta de cimento e no concreto.

A reologia do concreto fresco é frequentemente descrita pelo modelo de Bingham, que é caracterizado pela tensão de cisalhamento (ou tensão de corte) limite e pela viscosidade plástica (POON e HO, 2004).

Já a viscosidade pode ser definida como a propriedade de resistir à deformação, ou melhor, é a medida da resistência interna ou fricção interna de uma substância ao fluxo quando submetida a uma tensão. Esta propriedade é medida por um coeficiente que depende do atrito interno em consequência à coesão das partículas de seus componentes.

Portanto, quanto mais viscosa a massa do material, mais difícil de fluir e maior o seu coeficiente de viscosidade. Ou seja, quanto maior a viscosidade, menor a velocidade em que o fluido se movimenta. Ela define-se pela lei de Newton da viscosidade, mostra a equação 1:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (\text{eq.1})$$

onde:  $\tau$  = tensão de cisalhamento

$\mu$  = coeficiente de viscosidade ou viscosidade dinâmica

$\partial u/\partial y$  = gradiente velocidade/deslocamento

Segundo o modelo de Bingham, ilustrado na figura 17, é necessário aplicar certa tensão de corte ou de cisalhamento ( $\tau_0$ ) para que se inicie o movimento, seguido pelo aumento da tensão de cisalhamento a uma velocidade de corte crescente (NUNES, 2001 apud DAVID, 1999). O declive da reta corresponde à viscosidade plástica ( $\mu_{pl}$  em Pa.s).

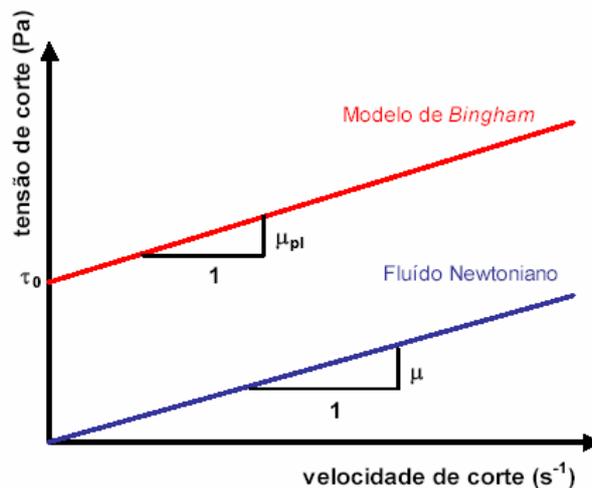


Figura 17: modelo reológico de Bingham e comportamento de um fluido Newtoniano (fonte: NUNES, 2001)

O CAA é caracterizado por baixo limite de cisalhamento (*yield value*) necessário para alta capacidade de deformação e por moderada viscosidade para garantir suspensão uniforme das partículas sólidas durante e após o processo de concretagem até ao início de pega (KHAYAT et al., 2002).

A redução da viscosidade diminui a habilidade da mistura manter uma dispersão homogênea dos seus constituintes. A falta de estabilidade (coesão) pode levar à segregação e bloqueio do fluxo, e anisotropia na direção da concretagem que enfraquece a interface entre a pasta de cimento e agregado e armadura (KHAYAT et al, 2002).

O CAA se enquadra na faixa de valores baixos de tensão de cisalhamento (limite de cisalhamento), aproximando-se de um fluido Newtoniano, e apresentando ao mesmo tempo

uma viscosidade plástica adequada. Portanto, na figura 18 as propriedades reológicas do CAA são vistas como (a) tendo uma tensão de cisalhamento próxima à zero, de forma que se comporte como um fluido Newtoniano e (b) com alta, mas “adequada” viscosidade para minimizar o potencial de segregação da mistura.

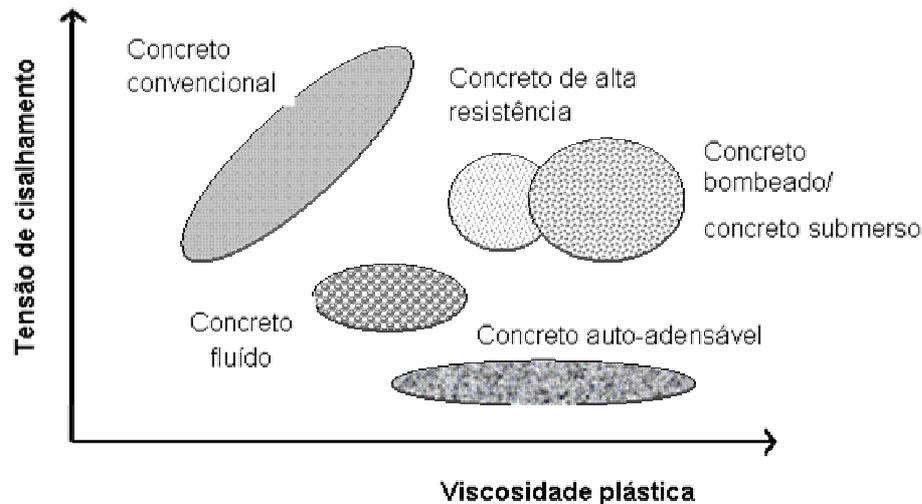


Figura 18: comportamento reológico do concreto em função do seu tipo (fonte: NUNES, 2001)

## 2.9 MECANISMOS PARA SE ATINGIR A CAPACIDADE DE AUTO-ADENSAMENTO SEGUNDO OKAMURA E OUCHI

A forma para se alcançar a auto-adensabilidade envolve não somente a alta deformabilidade da pasta ou da argamassa, mas também a resistência à segregação entre a brita e argamassa quando o concreto flui por zonas com alta taxa de armadura.

A frequência de colisão e contato entre as partículas de agregado pode aumentar à medida que a distância relativa entre as mesmas diminui e assim a tensão interna pode aumentar quando o concreto se deforma (ou flui) particularmente próximo a obstáculos.

Estudos feitos por Okamura e Ouchi (2003) confirmaram que a energia necessária para o concreto fluir é consumida pelo aumento da tensão interna, resultando em bloqueio das partículas de agregado graúdo. Por isso, limitar o teor desse agregado, cujo consumo de

energia é particularmente intenso, a um nível inferior ao normal, torna-se eficaz para evitar este tipo de bloqueio.

Por outro lado, é também necessária uma pasta suficientemente viscosa para evitar o bloqueio da brita quando próximo de zonas com armadura. Quando o concreto flui, a pasta com alta viscosidade também previne o surgimento de acréscimos pontuais na tensão interna, devido à menor distância relativa entre as partículas. Isto pode ser entendido melhor através da ilustração da figura 19.

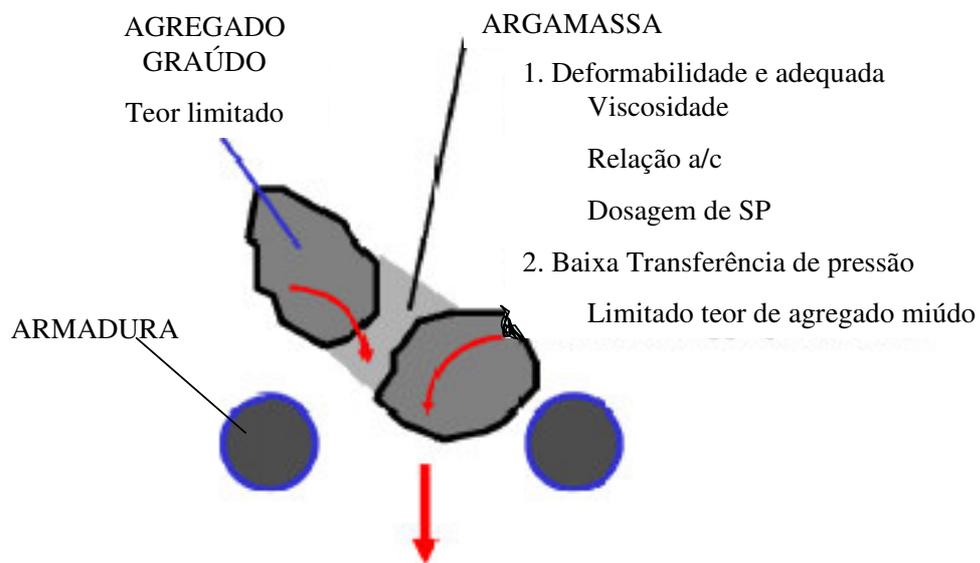


Figura 19: mecanismos para atingir auto-adensabilidade (fonte: OKAMURA, 2003)

Além da importância da fase argamassa no CAA, cuja deformabilidade e viscosidade fazem que o concreto possa ser compactado nas fôrmas apenas pela ação da gravidade, a argamassa também tem um papel como partículas sólidas. Esta é a propriedade chamada “transferenciabilidade de pressão”, que pode ser verificada quando as partículas de brita se aproximam umas das outras e a argamassa entre elas fica sujeita a uma pressão normal, conforme ilustrado na figura 20a, e que, por analogia, pode ser mais bem compreendido pelo esquema representado na figura 20b onde a argamassa é comprimida (tensão normal:  $\sigma$ ) entre dois discos de aço (no papel da brita), provocando o surgimento de uma tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) na mesma.

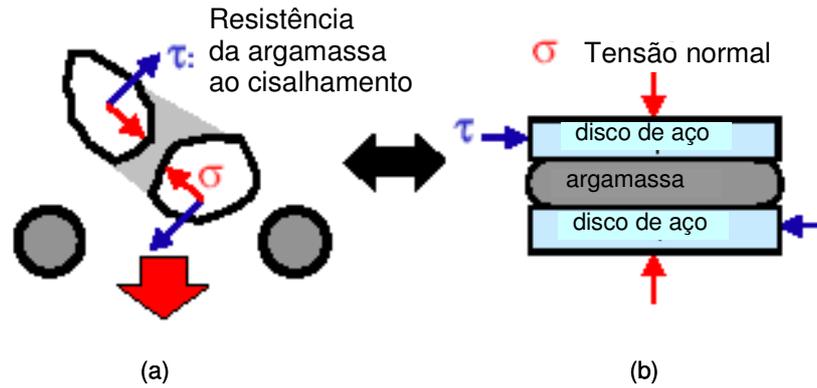


Figura 20: (a) tensões normal e de cisalhamento geradas na argamassa devido à aproximação das partículas de brita e (b) ilustração simplificada do mesmo fenômeno (fonte: OKAMURA, 2003)

O nível de decréscimo da tensão de cisalhamento que age sobre a argamassa depende sobremaneira das características físicas das partículas que a compõem a argamassa.

Uma boa resistência à segregação significa uma distribuição equivalente das partículas dos agregados no volume de concreto. A resistência à segregação tem papel importante para o CAA, uma vez que uma baixa resistência à segregação pode causar baixa deformabilidade, bloqueio em volta das armaduras, provocando o efeito arco ilustrado na figura 21, e alta retração por secagem, além de uma resistência à compressão não uniforme (TVIKSTA, 2000; BUI et al, 2002).

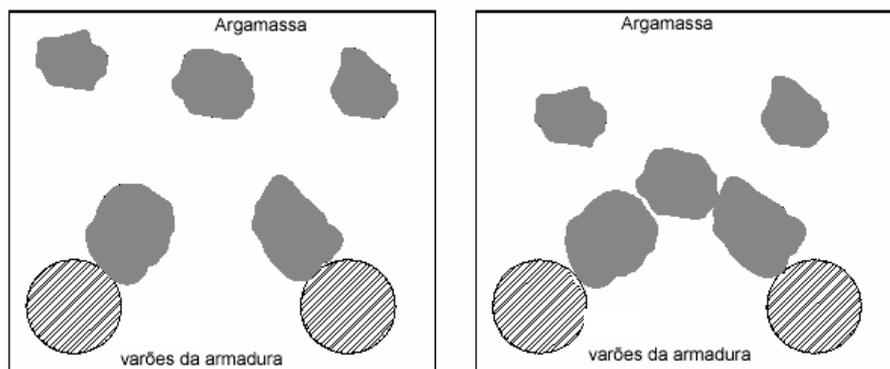


Figura 21: processo da ocorrência do mecanismo de bloqueio no CAA (fonte: NUNES, 2001)

Para que essas propriedades do CAA sejam alcançadas, a dosagem do concreto deve satisfazer os critérios de capacidade de preenchimento, da habilidade de passar por entre espaços estreitos e da resistência à segregação. Portanto, é importante ter um método confiável e apropriado para avaliar a resistência à segregação desse novo tipo de concreto.

Um CAA inevitavelmente segregará sempre que a resistência ao cisalhamento de sua argamassa ( $R_{arg}$ ) for insuficiente para suportar a ação do peso das partículas de agregado graúdo ( $P_{brita}$ ), como ilustrado na figura 22a (CAA com segregação: quando  $P_{brita} > R_{arg}$ ). Por outro lado, se existir um equilíbrio entre a ação da brita e a resistência da argamassa (garantida por sua viscosidade adequada) então haverá a suspensão do agregado graúdo distribuído uniformemente no interior da argamassa conforme representado na figura 22b (CAA resistente à segregação: quando  $P_{brita} = R_{arg}$ ).

Essa distribuição uniforme do agregado graúdo na argamassa é particularmente para que o concreto endurecido apresente características uniformes.

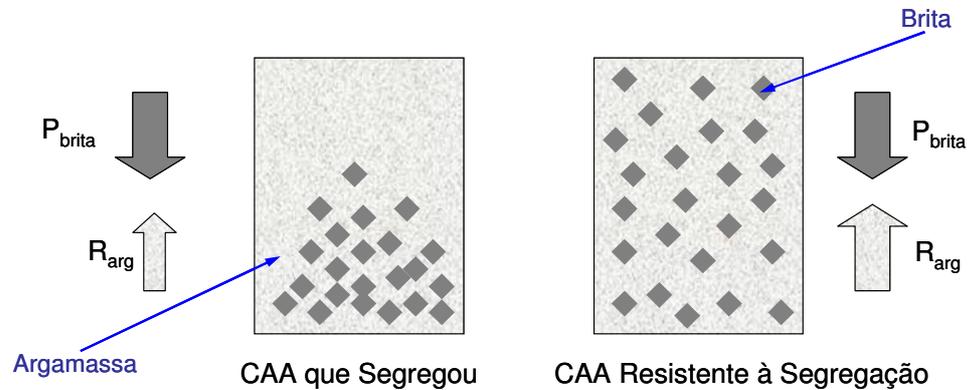


Figura 22: visão interna de um concreto (a) com segregação e (b) um CAA resistente à segregação

Diante do explanado anteriormente, Okamura e Ouchi (2003) explicam que, a forma para se alcançar a auto-adensabilidade do concreto é através do controle da proporção da mistura, conforme resumido na figura 23.

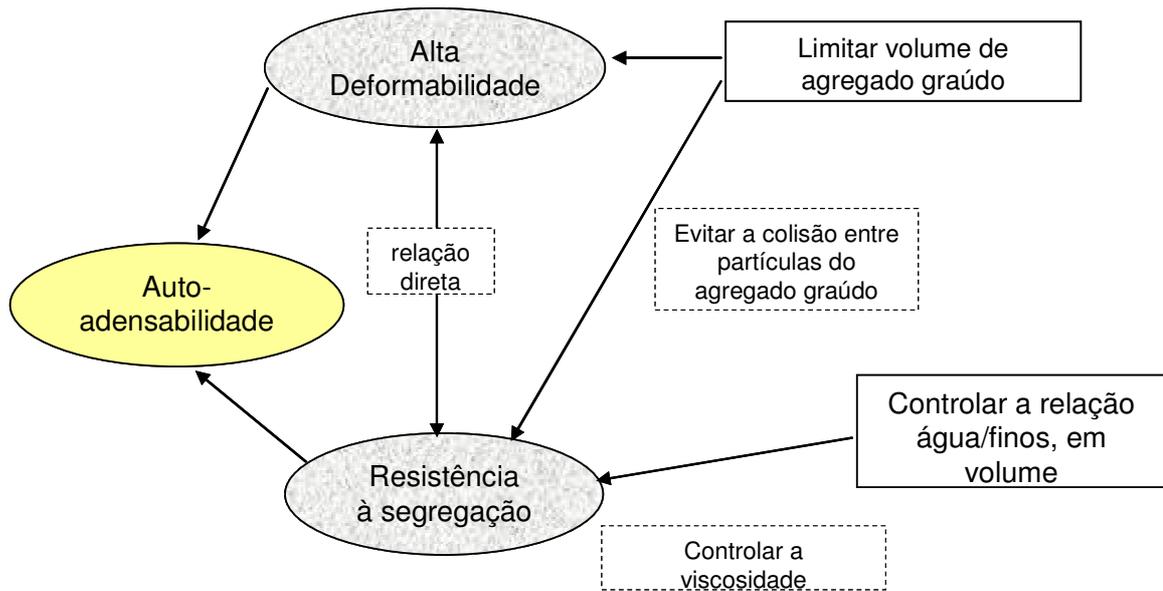


Figura 23: Forma para se alcançar a auto-adensabilidade (OKAMURA, 2003)

Assim, Okamura desenvolveu o método, ilustrado na figura 24, para se obter CAA sem o risco de haver segregação e garantir a capacidade de auto-adensamento, considerando que o concreto consiste de duas fases: argamassa e agregado graúdo. Desta forma, o efeito do superplastificante, no equilíbrio entre a capacidade de fluir e viscosidade da argamassa do CAA, foi estudado quantitativamente.

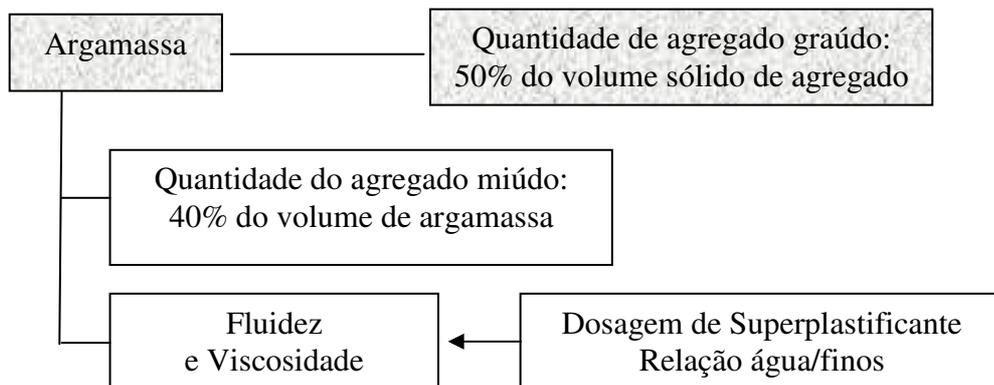


Figura 24: Método de dosagem para CAA proposto por Okamura

Neste contexto, julga-se importante a realização de pesquisas e estudos científicos que possam contribuir para o entendimento da concepção de um concreto auto-adensável, principalmente as suas características no estado fresco que são fundamentalmente influenciadas pelo método de dosagem aplicado. O próximo capítulo vai tratar dos métodos de ensaios para avaliar as principais propriedades do CAA no estado fresco.

## **3 ENSAIOS PARA AVALIAR AS PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

Os ensaios para caracterizar um CAA no estado fresco são, na verdade, procedimentos que foram adotados por praticamente todos os que trabalham com esse tipo de concreto. São, portanto, ensaios não normalizados baseados nas experiências de muitos pesquisadores e que para cada um dos ensaios existe uma faixa de valores recomendados pela maioria.

Existem várias propriedades do CAA fresco que devem ser avaliadas por ensaios ou procedimentos particulares. Porém as três propriedades listadas a seguir são tidas como os mais importantes critérios para definir ou caracterizar a auto-adensabilidade do concreto:

- Deformabilidade ou fluidez;
- resistência à segregação;
- propriedade de não bloquear.

Contudo, estas propriedades não são sempre independentes, aliás, elas de certa forma interagem entre si. Por exemplo, conforme Takada (2004), a definição de deformabilidade inclui a capacidade de se deformar, ou seja, a deformabilidade última, e a velocidade de deformação. Esta última, por sua vez, está relacionada com a viscosidade da mistura, mas a viscosidade naturalmente é que governa a resistência à segregação entre a argamassa e o agregado graúdo.

A resistência à segregação não pode somente ser definida pela viscosidade da mistura, mas deve também depender da quantidade e do tamanho do agregado graúdo. Já a propriedade de não bloquear é governada pela deformabilidade, pela resistência à segregação e pelas condições de contorno das estruturas onde o concreto for aplicado (TAKADA, 2004).

A seguir são apresentados os principais ensaios propostos para avaliar as propriedades do CAA no estado fresco.

### 3.2 ENSAIO DE ESPALHAMENTO (*SLUMP FLOW TEST*)

*Slump flow test* – este ensaio bastante simples, cujo aparato está ilustrado na figura 25, é feito com as mesmas ferramentas utilizadas para o ensaio de abatimento do concreto convencional (*slump test*), sendo que aqui é necessária uma base maior (normalmente uma chapa plana metálica quadrada com 800 ou 1000 mm de lado), já que o CAA se espalha muito e requer mais espaço para a leitura do ensaio.

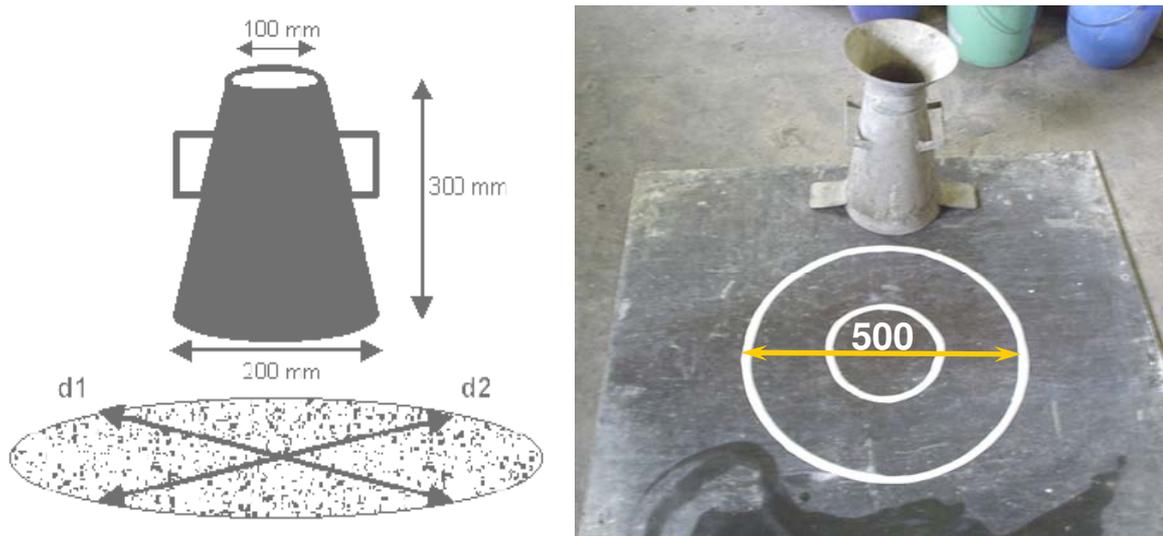


Figura 25: Ensaio de espalhamento do concreto (*slump flow test*).

O procedimento de ensaio consiste em preencher o cone de Abrams até o topo (cerca de 6 litros de concreto), como no ensaio para o CCV, só que sem compactação. O tronco de cone deverá ser umedecido e estar posicionado bem no centro da chapa metálica (também previamente umedecida). Nesta chapa deverá ser marcada, a partir do seu centro geométrico e de forma bem visível, uma circunferência com diâmetro de 500 mm. Uma vez preenchido o tronco de cone, o mesmo é erguido verticalmente deixando o concreto livre para fluir pela superfície da chapa metálica. A partir do momento em que se ergue o tronco de cone, marca-se o tempo que o concreto leva para alcançar a marca feita na chapa e medem-se, em duas direções ortogonais (d1 e d2), os diâmetros finais alcançados pelo concreto.

O ensaio de espalhamento fornece então os seguintes valores característicos:

- diâmetro médio do slump flow, através da média das duas medidas ortogonais efetuadas: para avaliar a capacidade de fluidez do concreto;
- tempo para concreto fluir dos 200 mm para os 500 mm: normalmente serve para avaliar a viscosidade do concreto;

- tempo final para o concreto estabilizar (até atingir o diâmetro final);
- grau de segregação, através de observação visual (principalmente nas bordas e centro do concreto espalhado).

As tabelas 5 e 6 fornecem valores recomendados por diferentes pesquisadores para o diâmetro médio do *slump flow* e para o tempo necessário para o concreto fluir dos 200 aos 500 mm (T500), respectivamente.

Tabela 5: valores de espalhamento recomendados por diversos autores (fonte: Tutikian, 2004)

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

Tabela 6: valores de T<sub>500</sub> recomendados por alguns pesquisadores (fonte: Tutikian, 2004)

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

**Slump flow test + Anel japonês** ou **J-Ring** – este ensaio, também bastante simples, é uma outra variante do ensaio de espalhamento normal, sendo aqui colocado um aparato metálico conforme a figura 26 e ilustrado na figura 27.

O procedimento é o mesmo para o ensaio de espalhamento normal, porém coloca-se o *J-ring* para simular uma situação real de armadura. Este anel contém furos com roscas onde são fixadas barras de aço com 100 mm de comprimento espaçadas de  $48 \pm 2$  mm, ou conforme a realidade da obra em que será aplicado o CAA (EFNARC, 2002).

Portanto, esta variante, além das informações já mencionadas, também mede a capacidade do concreto de passar pelas barras da armadura e, portanto é uma opção para, de forma expedita, avaliar essa característica do CAA.

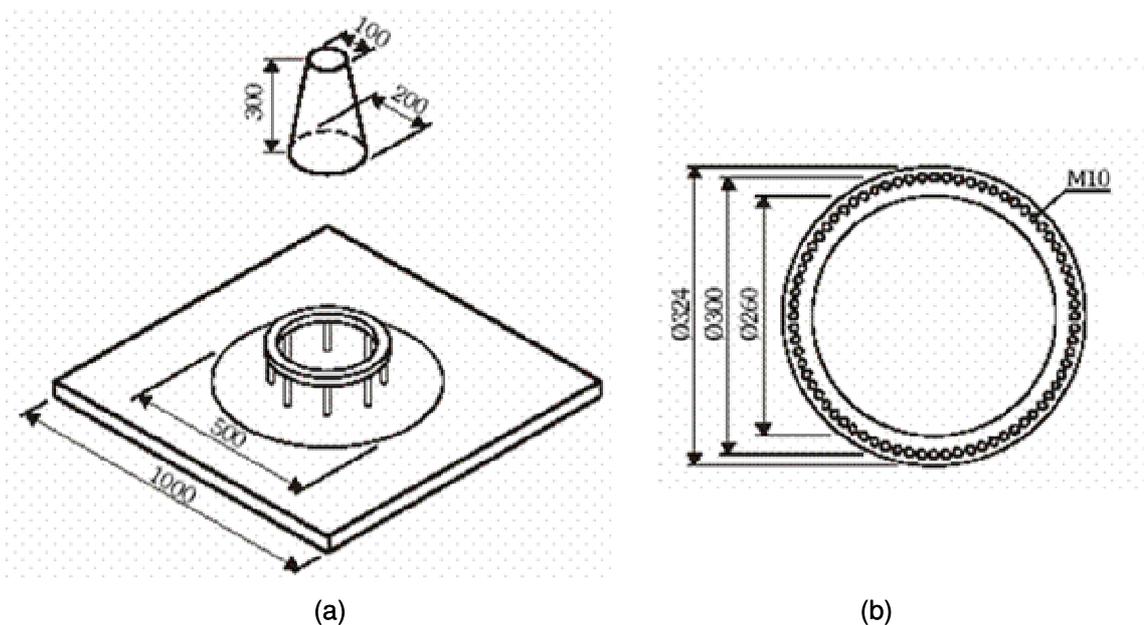


Figura 26: (a) combinação do espalhamento do concreto+anel japonês e (b) detalhe do anel em planta (Grunewald, 2004).



Figura 27: ensaio de espalhamento do concreto+anel japonês (Sonebi, 2004).

### 3.3 ENSAIO DO FUNIL V (*V-FUNNEL*)

*V-funnel* – Este ensaio utiliza um molde em forma de funil, conforme figura 28, podendo ser feito em acrílico ou metal, e também é bastante simples de ser feito executado.

**O procedimento de ensaio:** o molde, previamente umedecido, é preenchido com 10 litros de concreto até o topo e depois a abertura na parte inferior é liberada e mede-se o tempo para o concreto escoar pelo funil. A tabela 7 apresenta valores recomendados por diferentes pesquisadores.

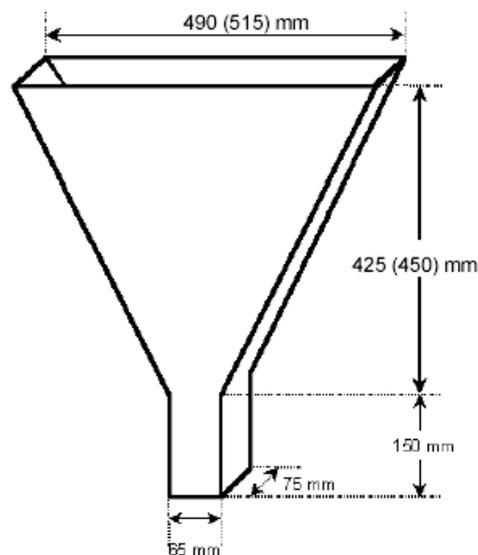


Figura 28: molde para o ensaio do V-funnel

Tabela 7: valores de tempo de escoamento pelo funil V recomendados por diversos autores  
(fonte: Tutikian, 2004)

REFERÊNCIAS	TEMPO (s)	
	Mínimo	Máximo
EFNARC (2002)	6	12
Gomes (2002)	10	15
Gomes <i>et al.</i> (2003a)	7	13
Araújo <i>et al.</i> (2003)	6	12
Noor e Uomoto (1999)	9,5	9,5
Peterssen (1998 e 1999)	5	15

Este ensaio também mede a viscosidade e a tendência à segregação da mistura. O concreto normalmente estará segregando quando o tempo para esvaziar o funil é grande ou quando ocorre o bloqueio do funil.

Além disso, se o concreto tiver pouca fluidez haverá também uma tendência em levar muito mais tempo para escoar pelo funil. Por outro lado, deve-se observar, durante o ensaio, a forma como o escoamento do concreto pelo funil está ocorrendo. Um bom CAA deverá escoar de maneira contínua e ao cair deverá se espalhar bem.

### 3.4 ENSAIO DA CAIXA EM U (*U-BOX*)

Há duas variantes desse equipamento: um conforme ilustrado na figura 29 e outro como mostrado na figura 30. Ambos podem ser feitos em metal, madeira ou acrílico e possuem obstáculos compostos por barras de aço (para representar a armadura de um caso real) na parte de saída da amostra de concreto. Esses obstáculos podem ser compostos por 5 barras de 10 mm (chamado de obstáculo R1) ou por 3 de 12,5 mm (chamado de obstáculo R2), que definem o grau de exigência do concreto em ser auto-adensável, conforme detalhe ilustrado na figura 29.

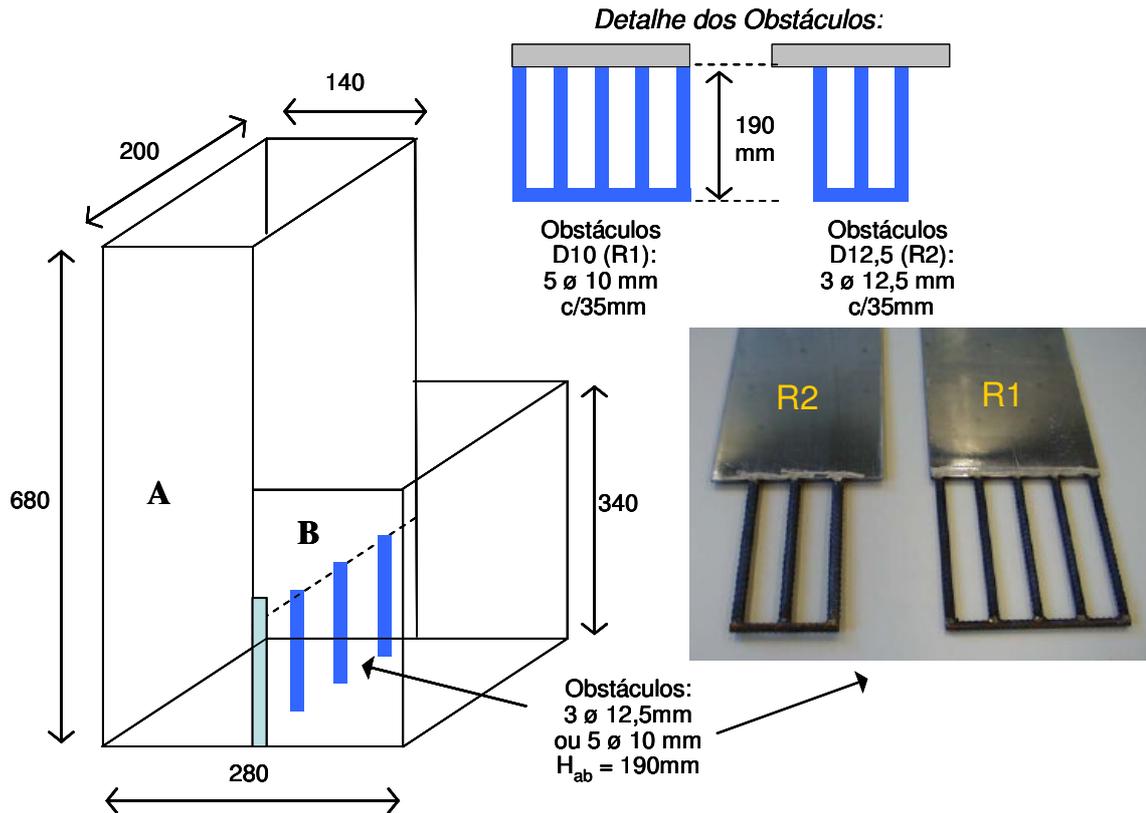


Figura 29: dimensões (mm) da *Box-shape* e detalhe dos obstáculos que simulam a armadura

O aparato da figura 29 é considerado mais exigente por apresentar ângulos retos na base, ao contrário do aparato da figura 30, que se apresenta curvo na parte inferior, o que faz com que o concreto deslize melhor para o lado oposto (NUNES, 2001 e TAKADA, 2004).

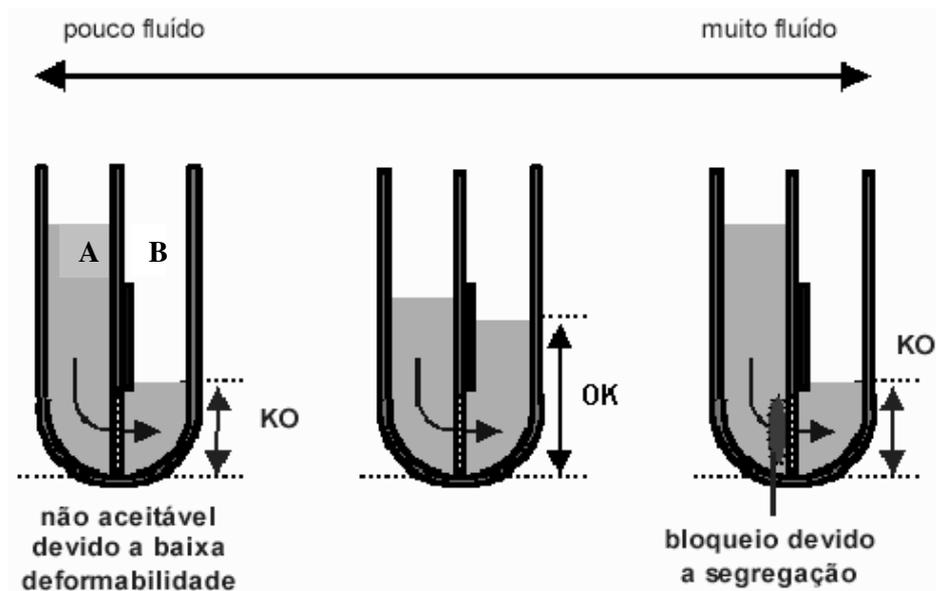


Figura 30: *U-box* e situações que podem ocorrer durante o ensaio (fonte: Nunes, 2001)

Este ensaio avalia a capacidade do concreto fresco, sob pressão hidrostática, de passar por espaços estreitos, simulando uma situação real com alta taxa da armadura, que inclui a deformabilidade e a propriedade de não bloquear, ou seja, as partículas de agregado graúdo não se atritam, podendo fechar o caminho entre as armaduras e impedir que o concreto flua livremente.

O procedimento de ensaio consiste em preencher a coluna A (de 680 mm de altura) com cerca de 19 litros de concreto, com prévio umedecimento das paredes internas de todo o aparato, e deixa-se o concreto repousar por um minuto a fim de estabilizar o conteúdo e para não se obter resultados falsos. A porta na parte inferior (190 mm de altura) que contém os obstáculos é aberta e o concreto deverá fluir de um lado (A) para o outro (B) passando por entre os obstáculos.

Observa-se o comportamento do concreto ao passar pelos obstáculos e sua capacidade de preenchimento e anota-se o valor da altura final ( $H_{CAA}$ ) que o concreto alcança na coluna B. O valor  $H_{CAA}$  é anotado e deve ser igual ou maior do que 300 mm para ser considerado auto-adensável (NUNES, 2001, EFNARC, 2002 e TAKADA, 2004).

Concretos com maiores valores de  $H_{CAA}$  são considerados com melhor habilidade de superar obstáculos estreitos e melhor capacidade de preenchimento. A viscosidade do concreto também pode ser avaliada ao se medir o tempo desde a abertura da porta até o concreto estabilizar.

Durante a execução desse ensaio podem ocorrer três situações diferentes conforme ilustrado nas figuras 30 e 31. Na primeira situação, ilustrada pela figura 31(a), o concreto poderá não estar segregando e ter bom aspecto, mas, no entanto, ao passar ou fluir para o outro lado (B) pode não atingir a altura mínima exigida de 300 mm devido à sua baixa capacidade de se deformar.

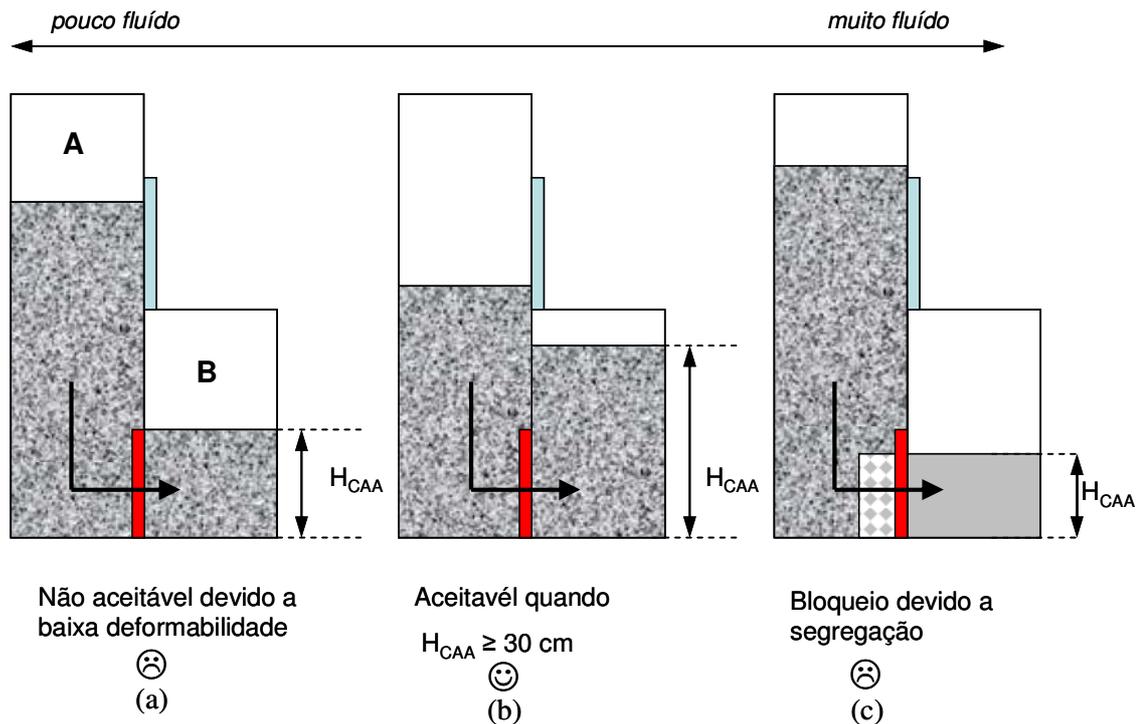


Figura 31: *Box-shape* - situações que podem ocorrer durante o ensaio (adaptado de Nunes, 2001)

A figura 31(c) acima retrata o caso de bloqueio por segregação da mistura, ou seja, o concreto está sem a viscosidade necessária para manter a brita em suspensão e esta, por sua vez, desce ao fundo deixando toda a argamassa na parte de cima e bloqueia a abertura do aparato. Para as duas situações a dosagem deverá ser corrigida para melhorar essas propriedades, e os ensaios deverão ser repetidos até acontecer a terceira situação que está ilustrada nas figuras 30(b) e 31(b).

### 3.5 ENSAIO DA CAIXA EM L (L-BOX)

**L-box** – diferentes variações para este ensaio têm sido desenvolvidas. Numa classificação bem simples, há dois tipos desse equipamento: um tipo sem obstáculos (*L-box* sem obstáculos) e outro tipo (*L-box* com obstáculos) ilustrado na figura 32, que normalmente dispõe de algumas barras paralelas de aço ( $5\phi 10$  ou  $3\phi 12,5$  mm) logo após a abertura, localizada na parte inferior da caixa, para representar a armadura de um caso real.

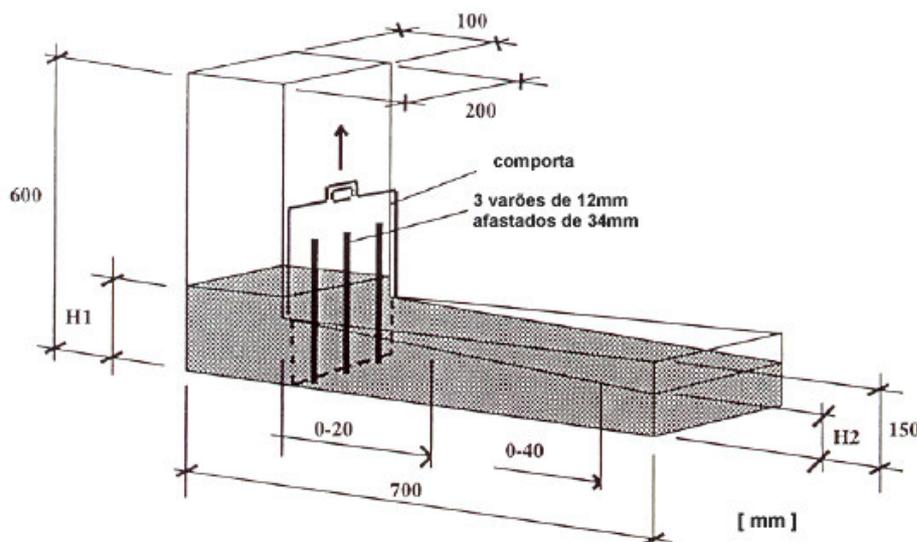


Figura 32: L-box (fonte: FERREIRA, 2001)

O primeiro tipo é usado para concretos cujo agregado graúdo não exceda os 25 mm (Dimensão Máxima Característica). Ambos podem ser feitos em metal, madeira ou acrílico. A *L-box* também serve para observar se há segregação do concreto (quando há bloqueio na abertura inferior onde barras de aço que simulam a situação real de concretagem estão fixadas) e a capacidade de passar por espaços estreitos, além da capacidade de preenchimento.

**O procedimento de ensaio**, como no ensaio anterior, consiste em preencher a coluna de 600 mm de altura com 12 litros de concreto, com prévio umedecimento das paredes internas de todo o aparato, e deixa-se o concreto repousar por um minuto a fim de estabilizar o conteúdo e para não obter resultados falsos, quando é então aberta e observa-se o comportamento do concreto ao passar pelos obstáculos e sua capacidade de se deformar ou de preencher a parte horizontal da caixa, anotando-se os valores das alturas que o concreto alcançou na coluna vertical ( $H_1$ ) e na parte horizontal da caixa ( $H_2$ ). O valor  $H_2/H_1$  chamado de taxa de bloqueio, é usado para quantificar a habilidade de passar por espaços estreitos, que inclui a capacidade de se deformar e a propriedade de bloquear. O valor da taxa de bloqueio deve se situar na faixa entre 0,80 e 1,00, como recomendado por alguns autores conforme mostra a tabela 8. Takada (2004) cita que o princípio deste ensaio é quase o mesmo do ensaio da Caixa-U ou da *Box-shape*.

Tabela 8: valores mínimos recomendados por vários autores para o ensaio da L-box (fonte: Tutikian, 2004)

REFERÊNCIA	RELAÇÃO $H_2/H_1$
EFNARC (2002)	$\geq 0,80$
Gomes (2002)	$\geq 0,80$
Gomes <i>et al.</i> (2003a)	$\geq 0,80$
Araújo <i>et al.</i> (2003)	$\geq 0,80$
Rigueira Victor <i>et al.</i> (2003)	$\geq 0,80$
Peterssen (1998 e 1999)	$\geq 0,80$
Tviksta (2000)	$\geq 0,85$
Coppola (2000)	$\geq 0,90$
Palma (2001)	$\geq 0,80$

Por outro lado a velocidade de escoamento a distâncias particulares (200 e 400 mm após a abertura) é usada para medir a velocidade de deformação. Portanto, esse ensaio avalia, ao mesmo tempo a deformabilidade e habilidade do concreto de passar por entre as barras de aço.

### 3.6 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. Assim, as tabelas 9 e 10 apresentam uma série de possíveis causas da não conformidade de resultados dos diferentes ensaios.

Se os resultados entre diferentes misturas variam consideravelmente, 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 e do tempo para realização de cada ensaio.

Tabela 9: possíveis causas para resultados inferiores aos esperados (fonte: EFNARC, 2002)

Ensaio		Resultado menor do que		Possível causa
1	<i>Slump flow</i> pelo cone de Abrams	650 mm	a	alta viscosidade
			c	tensão de cisalhamento alta
2	T500mm no <i>slump flow</i>	2 seg.	b	viscosidade muito baixa
3	<i>J-ring</i> (anel japonês)	10 mm	a	alta viscosidade
			c	alta tensão de cisalhamento
			d	segregação
			f	bloqueio
4	<i>V-funnel</i> (funil em V)	8 seg.	b	viscosidade muito baixa
5	<i>L-box</i> (caixa em L) H1/H2	0,80	a	alta viscosidade
			c	alta tensão de cisalhamento
			f	bloqueio
6	<i>U-box</i> (caixa) H2-H1	0 mm	g	resultado falso

Tabela 10: possíveis causas para resultados superiores aos esperados (fonte: EFNARC, 2002)

Ensaio		Resultado maior do que		Possível causa
1	<i>Slump flow</i> pelo cone de Abrams	750 mm	b	viscosidade muito baixa
			d	segregação
2	T500mm no <i>slump flow</i>	5 seg.	a	alta viscosidade
			c	tensão de cisalhamento alta
3	<i>J-ring</i> (anel japonês)	>10mm	b	viscosidade muito baixa
			d	segregação
4	<i>V-funnel</i> (funil em V)	12 seg.	a	alta viscosidade
			c	alta tensão de cisalhamento
			f	bloqueio
5	<i>L-box</i> (caixa em L) H1/H2	1,00	g	resultado falso
6	<i>U-box</i> (caixa) H2-H1	30 mm	a	alta viscosidade
			c	alta tensão de cisalhamento
			f	bloqueio

A tabela 11 apresenta alguns procedimentos como possíveis ações corretivas a partir das causas identificadas nos resultados não satisfatórios dos diferentes ensaios.

Tabela 11: ações corretivas possíveis a partir do observado nos ensaios (fonte: EFNARC, 2002)

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 fíler	?	?	?	?	?	?
<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

## 4 MÉTODO DE DOSAGEM PARA CAA PROPOSTO POR TUTIKIAN

A base do método proposto por Tutikian (2004) é o método de dosagem para concretos convencionais descrito por Helene e Terzian (1992). O princípio básico do método, simplificado na figura 33, é a obtenção de um CAA a partir de um CCV cujo teor ideal de argamassa deverá ser previamente determinado.



Figura 33: princípio básico do método proposto por Tutikian (2004)

Os materiais devem ser escolhidos e devidamente caracterizados a fim de que possam ser conhecidas as propriedades que influenciam na dosagem. Uma vez escolhidos os materiais, que são também função dos requisitos de projeto, começa-se por definir os parâmetros de dosagem, como relação água/cimento pretendida de acordo com os requisitos de durabilidade estabelecidos no projeto.

A seguir devem ser definidos 3 traços que vão formar a família do concreto a ser dosado, normalmente, para concretos de resistências convencionais, são usados os traços (1:3,5), (1:5) e (1:6,5). Porém, sempre é assim e outros traços podem ser usados. Determina-se o teor ideal

de argamassa a partir do traço central ou intermediário (o traço 1:5, caso fossem esses os escolhidos).

Com o teor de argamassa determinado para o traço intermediário procede-se da mesma maneira para os outros dois traços (podem ser mais do que 3 traços) quando se desejar montar uma curva de dosagem para o concreto de partida, que é ainda um concreto convencional. Caso contrário pode-se partir do traço 1:5, com o teor ideal de argamassa obtido, diretamente para a obtenção do CAA.

Conforme ilustrado na figura 34, coloca-se então o aditivo superplastificante na mistura, o que vai causar uma segregação dos materiais. A partir desse ponto começa o processo iterativo do método que é o acerto da viscosidade da mistura através da introdução de finos sobre o teor de areia (isso quando se trata de fino não-pozolânico).

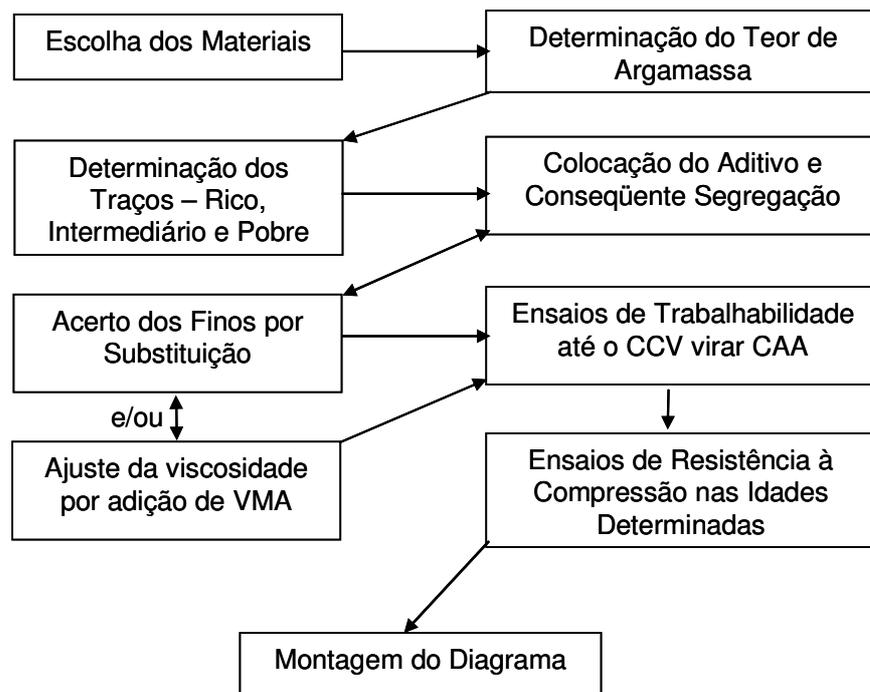


Figura 34: procedimentos para dosagem do CAA segundo Tutikian  
(fonte: Tutikian, 2004)

Ao contrário do tradicional método do IPT/EPUSP que mantém fixa a quantidade de brita na betoneira durante a determinação do teor ideal de argamassa, a quantidade que deve se manter constante ao longo do acerto é a da areia, ou seja, a areia se mantém constante na betoneira, porém em  $m^3$  é a soma de areia com finos que se mantém constante.

Para cada tentativa de acerto da viscosidade, variam-se as quantidades do cimento, da brita e do próprio material fino, que está substituindo areia à medida que esse teor de substituição vai aumentando.

Cabe ressaltar que o teor de argamassa deve ser o mesmo do início até ao final do ajuste da dosagem. Prossegue-se então a introdução dos finos até que se julgue a mistura estar no ponto de começar a avaliar as suas características reológicas através dos ensaios preconizados para o CAA. Em função dos resultados desses ensaios, deve-se voltar a ajustar, até o acerto definitivo ou, em caso positivo, procede-se a moldagem do concreto em corpos de prova para posterior montagem do diagrama de dosagem.

As equações 2 a 10 são as ferramentas analíticas (para o caso de introdução de finos não pozolânicos) que o método proporciona para se efetuar o cálculo das quantidades de materiais e dos custos envolvidos para a dosagem em causa. Portanto, trata-se de uma forma bastante simples e prática de dosagem de concretos auto-adensáveis. O método só necessita ser testado muitas vezes com diferentes materiais para que surjam contribuições a fim de que o mesmo possa, eventualmente, ser melhorado.

O método estabelece as seguintes equações para o cálculo das diferentes variáveis em se tratando da adição de um fino não pozolânico (fíler calcário, por exemplo):

$$fcj = \frac{k_1}{(k_2 \wedge a/c)} \quad (\text{eq. 2})$$

$$m = k_3 + k_4 * a/c \quad (\text{eq. 3})$$

$$C = \frac{1000}{(k_5 + k_6 * a/c)} \quad (\text{eq. 4})$$

$$\alpha = \frac{(1 + f + a)}{(1 + m)} \quad (\text{eq. 5})$$

$$m = a + p + f \quad (\text{eq. 6})$$

$$C = \frac{\gamma}{(1 + f + a + p + a/c)} \quad (\text{eq. 7})$$

$$C = \frac{(1000 - ar)}{\left( \frac{1}{\gamma_c} + \frac{f}{\gamma_f} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/c \right)} \quad (\text{eq. 8})$$

$$A = C * a/c \quad (\text{eq. 9})$$

$$C_u = C * \$c + C * f * \$f + C * a * \$a + C * p * \$p + C * SP\% * \$sp + C * MV\% * \$vma + C * a/c * \$ag \quad (\text{eq. 10})$$

onde:

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

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

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

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

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

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

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

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

$C$  = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$SP\%$  = dosagem de aditivo superplastificante por metro cúbico de concreto adensado, em  $\text{l}/\text{m}^3$ ;

$\gamma$  = massa específica do concreto, medida no canteiro em  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\gamma_c$  = massa específica do cimento, em  $\text{kg}/\text{dm}^3$ ;

$\gamma_f$  = massa específica dos finos não pozolânicos, em  $\text{kg}/\text{dm}^3$ ;

$\gamma_a$  = massa específica do agregado miúdo, em  $\text{kg}/\text{dm}^3$ ;

$\gamma_p$  = massa específica do agregado graúdo, em  $\text{kg}/\text{dm}^3$ ;

$ar$  = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em  $\text{dm}^3/\text{m}^3$ ;

$A$  = consumo de água potável por metro cúbico de concreto adensado, em  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$C_u$  = custo do concreto por metro cúbico;

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

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

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

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

$\$sp$  = custo do litro de aditivo superplastificante; e  $\$ag$  = custo do litro de água potável.

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 5.1 PLANEJAMENTO GERAL

O presente projeto de pesquisa, foi desenvolvido no laboratório de materiais do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação – NORIE, e no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, foi dividido em duas etapas.

Esta divisão do estudo em duas etapas deveu-se ao fato dos resultados iniciais, obtidos a partir do ajuste da dosagem de aditivo superplastificante pelo traço mais pobre (1:7,5), terem fornecido altos consumos de aditivo superplastificante. Assim, resolveu-se não estudar todos os traços novamente, mas estudar apenas os CAA's com os melhores resultados, dosando-os agora a partir do traço 1:4,5, e verificando a influência do ajuste de aditivo superplastificante por este traço intermediário no consumo de aditivo. Por outro lado, dosar um concreto convencional (CCV) com os mesmos materiais e torná-lo auto-adensável (CAA), a fim de compará-lo com os melhores CAA's.

A primeira etapa (etapa I) do programa experimental, ilustrada na figura 35, envolveu a produção de seis concretos auto-adensáveis partindo do teor de argamassa igual a 50%. Os outros cinco CAA foram produzidos com os teores de argamassa de 55% (CAA-55), 60% (CAA-60), 65% (CAA-65), 70% (CAA-70) e 75% (CAA-75), respectivamente.

A escolha destes teores de argamassa teve em conta, primeiro, os valores comuns de teores de argamassa encontrados para os materiais do estado do Rio Grande do Sul e, segundo, a faixa de valores para teores de argamassa utilizados na obtenção de CAA, conforme mostrado na tabela 1 do Capítulo 1 deste trabalho.

A fixação da faixa dos valores de teor de argamassa estudados em 5 pontos percentuais levou em conta o fato de esse intervalo ser considerado satisfatório para os objetivos do estudo da influência do teor de argamassa sobre as propriedades dos concretos realizados nesta pesquisa.

O valor mínimo de teor de argamassa adotado de 50% foi considerado bom para representar a média do teor ideal para a região. Manuel e Dal Molin (2005) determinaram para 4 tipos de

agregados graúdos os teores ideais de argamassa de 47, 49 e 51%. Tutikian (2004) determinou um teor ideal igual a 53%.

O máximo adotado de 75% foi julgado interessante como sendo o limite para os objetivos a que se propõe esta pesquisa, apesar dos dados da bibliografia apresentada na tabela 1 divulgar o teor de 79,8% utilizado por Corinaldesi e Moriconi (2003) que se trata de um CAA com fibras, que não é objeto de estudo deste trabalho.

Portanto, não foram determinados os teores de argamassa experimentalmente e sim todos estabelecidos previamente conforme explicado anteriormente.

Os resultados com o teor de argamassa de 50% não foram apresentados neste trabalho por terem sido considerados não satisfatórios (não se conseguiu obter um concreto auto-adensável com este teor de argamassa) e, por isso, foram descartados.

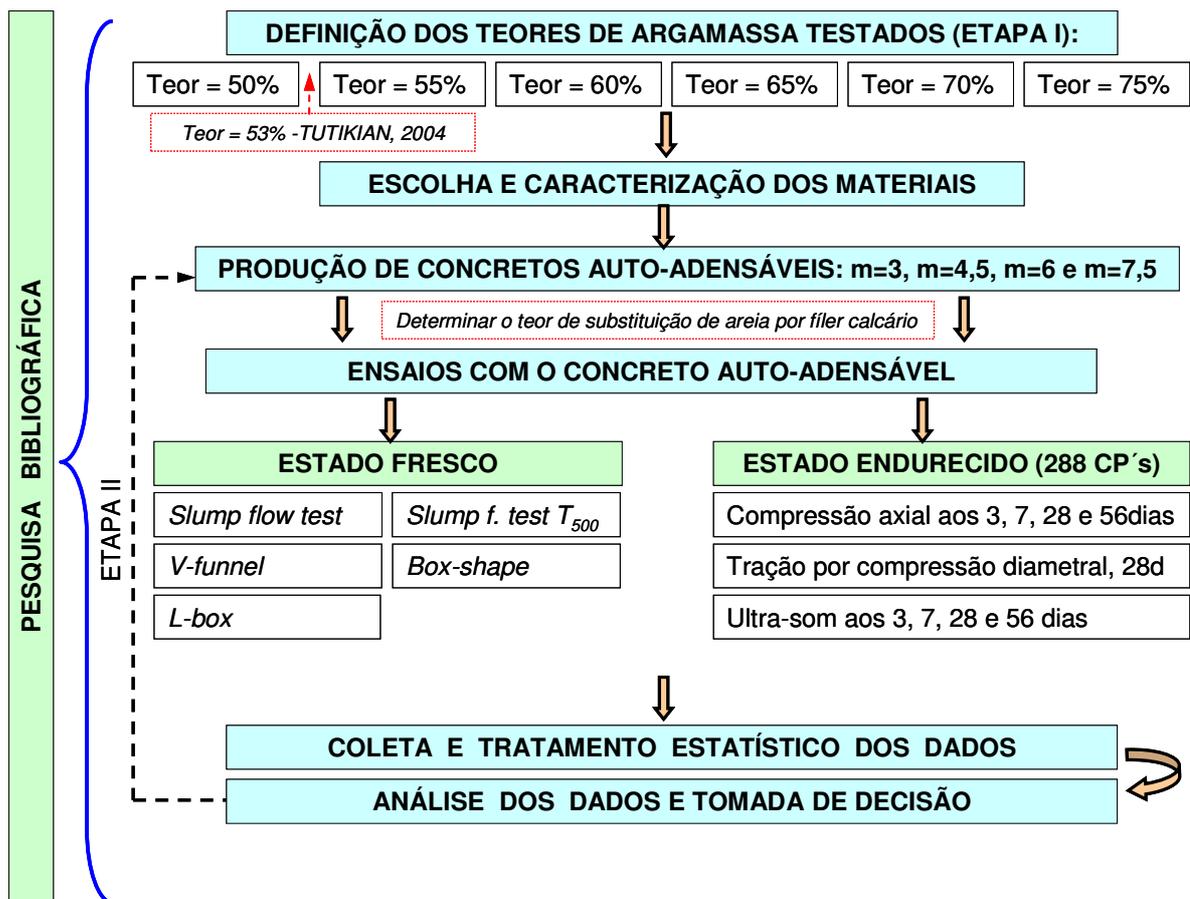


Figura 35: fluxograma do planejamento da etapa I

Vale justificar que o motivo que levou a ajustar o teor de aditivo pelo traço 1:7,5 foi que, no início tentou-se o ajuste pelo traço 1:3 (mais rico) e chegava-se a altos valores de relação a/c (em torno de 1,21) para os traços 1:6 e 1:7,5, o que não é interessante do ponto de vista de aplicação prática.

Por isso, decidiu-se fixar em torno de 0,80 a relação a/c para o traço mais pobre (1:7,5) e ajustou-se o teor de aditivo em função do espalhamento pretendido. Este procedimento funcionou, porém chegava-se ao traço 1:3 com concretos altamente viscosos.

A produção dos CAA's da segunda etapa (etapa II), ilustrada na figura 36, foi planejada em função dos resultados obtidos na etapa I. Uma vez analisados os resultados da etapa I, decidiu-se estudar de novo os concretos até o teor de argamassa de 60%, pois o CAA-55 e o CAA-60 apresentaram boas características no estado fresco e no estado endurecido, bem como tiveram os menores custos por metro cúbico em todos os traços estudados.

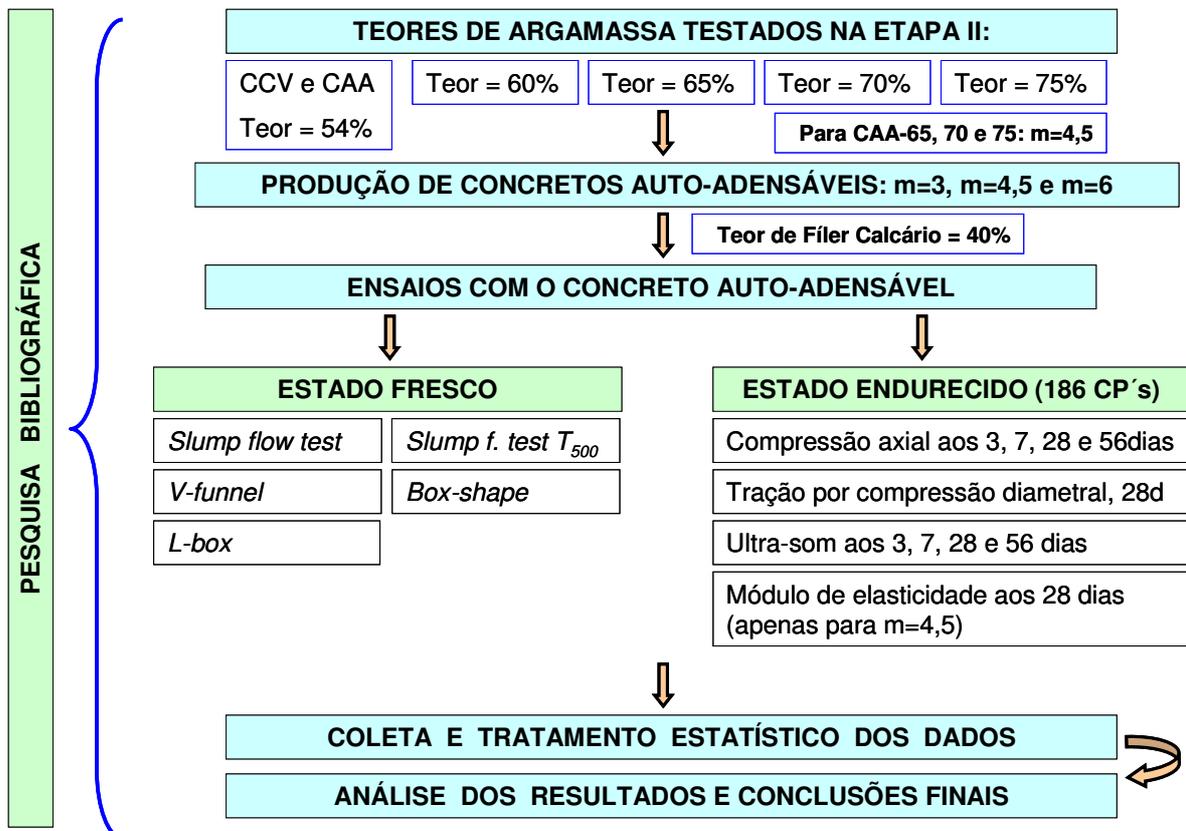


Figura 36: planejamento da etapa II

Por outro lado, procedeu-se a determinação do teor ideal de argamassa para o concreto convencional (denominado de CCV-REF ou CCV-54) dosado com os mesmos materiais aplicados para os CAA da etapa I.

Este estudo forneceu um teor ideal de argamassa de 54% para o concreto convencional, que pode ser diferente para materiais de outras regiões (mas, em princípio, isso não importa, e julga-se que o que importa é que se determine o teor ideal de argamassa para os materiais disponíveis), a partir do qual também se obteve um CAA (com esse mesmo teor de argamassa), para testar o método proposto por Tutikian, 2004.

O outro CAA estudado na etapa II foi obtido com teor de argamassa de 60% por ter se apresentado com boas características no estudo da etapa I, como já dito anteriormente. A intenção inicial era estudar na etapa II o CAA-55, o CAA-60 e mais um CAA a ser obtido com o mesmo teor ideal de argamassa determinado para o concreto convencional (CCV). Mas o teor ideal de argamassa do CCV foi de 54%, muito próximo do CAA-55, por isso abandonou-se o CAA-55 para a etapa II.

Para os concretos com o teor de argamassa de 54% (CAA-54) e 60% (CAA-60) foram produzidos e moldados três traços (1:3, 1:4,5 e 1:6) com o intuito de se montar os diagramas de dosagem dos mesmos e compará-los com o CCV-54.

Para o CAA foi abandonado o traço 1:7,5 por não se mostrar interessante do ponto de vista prático durante a etapa I.

Decidiu-se também determinar o módulo de elasticidade ( $E_c$ ) dos concretos CCV-REF ( $\alpha = 54\%$ ) e dos CAA ( $\alpha = 54, 60, 65, 70$  e  $75\%$ ), apenas para os produzidos com o traço 1:4,5. Por isso para o CAA-65, CAA-70 e CAA-75 foram produzidos apenas os traços 1:4,5. Escolheu-se este traço por se enquadrar na faixa de valores recomendados por Tutikian (2004) para aplicação prática de CAA (entre 1:3 e 1:4,5).

Por outro lado, decidiu-se ajustar a percentagem de aditivo superplastificante (que deverá se manter fixa para cada família em estudo) pelo traço 1:4,5 ao contrário do que foi feito inicialmente na etapa I (que foi pelo traço mais pobre, ou seja, 1:7,5), tendo em vista a economia verificada na dosagem deste aditivo, que é um componente bastante caro, e conseqüente redução no custo final dos concretos.

Para o concreto convencional (CCV), após determinação do teor ideal de argamassa, foram confeccionados quatro (4) traços para a obtenção de uma curva de dosagem bem ajustada, sendo que foram moldados 48 corpos-de-prova (CP's) dos traços produzidos, conforme a seguir:

- traço 1:3 (12 CP's)
- traço 1:4,5 (12 CP's)
- traço 1:6 (12 CP's)
- traço 1:7,5 (12 CP's)

## 5.2 ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para realização dessa etapa, foi feito um levantamento no qual se observou os tipos de materiais mais utilizados e disponíveis no mercado regional de Porto Alegre e arredores. A partir desse estudo, os materiais foram então selecionados e caracterizados.

Para tanto foram realizados ensaios de caracterização físico-químico-mecânica para o cimento, físico-química para o fíler calcário, caracterização granulométrica dos agregados, bem como suas massas específicas e massas unitárias, além da definição das características do aditivo superplastificante fornecidas pelo fabricante.

Assim, os materiais selecionados e utilizados no estudo experimental foram os seguintes:

- a) cimento: cimento Portland pozolânico CP IV-32;
- b) fíler calcário (granulometria da faixa C);
- c) agregado miúdo: areia oriunda da região do rio Jacuí;
- d) agregado graúdo: brita de basalto, com dimensão máxima característica=19 mm;
- e) aditivo: aditivo superplastificante à base de policarboxilatos
- f) água potável.

## 5.2.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland pozolânico CP IV-32, por ser um cimento bastante comum e disponível no mercado do estado do Rio Grande do Sul. Segundo a NBR 5736 (ABNT, 1991), o cimento utilizado respeita os limites com relação à proporção dos seus componentes químicos (tabela 12), bem como em relação às exigências físicas e mecânicas (tabela 13).

Tabela 12: características químicas do cimento Portland pozolânico CP IV-32 empregado.

Propriedades Químicas	Dados do Fabricante	Limites (NBR 5736)
Resíduo insolúvel (% em massa)	40,88	N/A*
Perda ao fogo (% em massa)	1,90	≤ 4,5
Óxido de magnésio – MgO (% em massa)	5,05	≤ 6,5
Trióxido de enxofre – SO <sub>3</sub> (% em massa)	1,85	≤ 4,0
Anidrido carbônico – CO <sub>2</sub> (% em massa)	N/A*	≤ 3,0
SiO <sub>2</sub>	39,32	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,39	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,62	-
CaO	34,76	-

Composição Química do Cimento Pozolânico Utilizado

Elemento	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
%	3,95	34,14	2,47	37,73	14,76	2,43	0,02	1,96	2,54

\* Não disponível

Tabela 13: características físicas e mecânicas do cimento Portland pozolânico CP IV-32

Características e propriedades	Unidade	Fabricante	Limites
		CP IV -32	
Finura (resíduo na peneira de 75µm)	%	0,18	≤ 8,0
Tempo de início de pega	min.	-	≥ 60
Expansibilidade a quente	mm	0,07	≤ 5
Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	m <sup>2</sup> /kg	529,00	> 400,00
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	≥ 10,0
	7 dias de idade	MPa	≥ 20,0
	28 dias de idade	MPa	≥ 32,0
Massa Específica Determinada em Laboratório = 2,71 kg/dm <sup>3</sup>			
Diâmetro Médio da Partícula = 11,85 µm			

A análise granulométrica a *laser* do cimento da figura 37, feita no LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS forneceu um resultado de 11,85  $\mu\text{m}$  para o diâmetro médio das partículas do cimento. A sua massa específica determinada em laboratório foi de 2,71  $\text{kg}/\text{dm}^3$ .

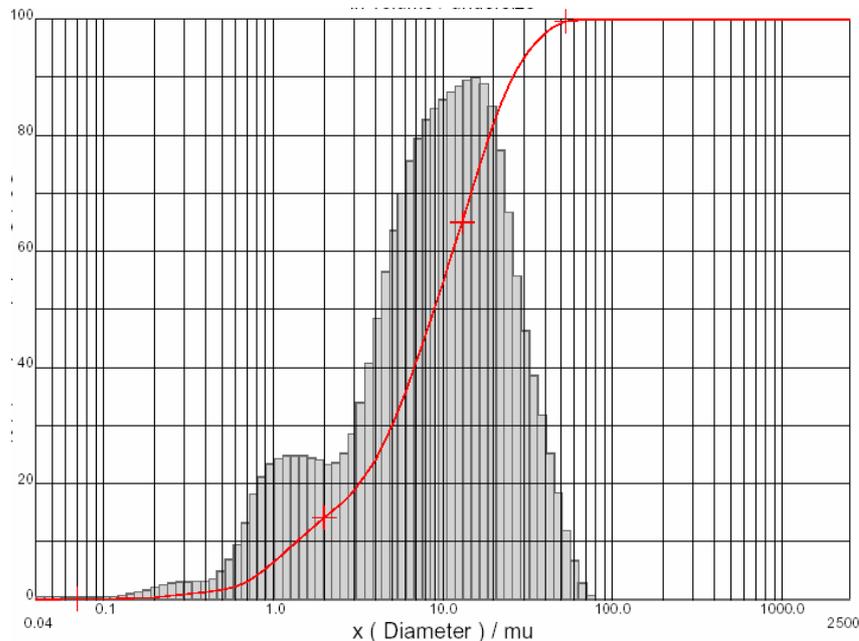


Figura 37: curva granulométrica do cimento pozolânico utilizado

### 5.2.2 Fíler calcário

No presente trabalho foi utilizado um fíler calcário comercializado para o ramo da agricultura. O calcário é uma rocha composta por carbonatos de cálcio e magnésio, e que quando moído em partículas finas e aplicado sobre o solo age como neutralizador e corrige a acidez do solo.

Para os fabricantes, a qualidade do calcário corretivo, o fíler calcário, depende, basicamente, do seu Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT), que é definido por duas características: o teor de carbonatos presentes na rocha calcária (Poder de Neutralização - PN) e o grau de finura do produto final, ou seja, a sua granulometria. (fonte: [www.fida.com.br](http://www.fida.com.br), 2005).

A legislação atual, segundo os fabricantes, adota quatro (4) faixas de variação do PRNT, conforme a seguir (fonte: [www.fida.com.br](http://www.fida.com.br), 2005):

- Faixa A: PRNT entre 45 e 60%;
- Faixa B: PRNT entre 60,1 e 75%;

- Faixa C: PRNT entre 75,1 e 90%;
- Faixa D: PRNT acima de 90%.

O fíler calcário utilizado neste estudo, de coloração branca, se enquadra na faixa C e possui um diâmetro médio de 46,52  $\mu\text{m}$ . A sua massa específica determinada foi de 2,73  $\text{kg}/\text{dm}^3$  e as suas características físico-químicas estão apresentadas na tabela 14, enquanto a sua massa unitária solta determinada foi de 1,37  $\text{kg}/\text{dm}^3$ .

Tabela 14: características do fíler calcário faixa C

Características	Exigência do Ministério da Agricultura	Garantia do Fabricante
Soma dos Óxidos	40,0	
Óxido de Cálcio	25,0	
Óxido de Magnésio	15,0	
PN	81,95	81,95
<b>PRNT</b>	75,39	
Granulometria:		
Peneira ABNT NR 010 (2,00 mm)	100	100
Peneira ABNT NR 020 (0,84 mm)	98	100
Peneira ABNT NR 050 (0,30 mm)	82	100

Registro do Laboratório : CR N° 00004802 - 5ª Região/RS; Registro do Produto: RS-06536 0003-2 (fonte: [www.fida.com.br](http://www.fida.com.br), 2005)

Composição Química do Fíler Calcário Utilizado									
Elemento	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
%	2,17	30,82	0,22	17,44	1,89	10,95	0,02	0,07	36,42

Massa Específica Determinada em Laboratório = 2,73  $\text{kg}/\text{dm}^3$

Diâmetro Médio da Partícula = 46,52  $\mu\text{m}$

Para verificar a distribuição granulométrica das partículas do fíler calcário utilizado, foi feito o ensaio de granulometria a *laser* realizado no LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS, cuja curva está ilustrada na figura 38.

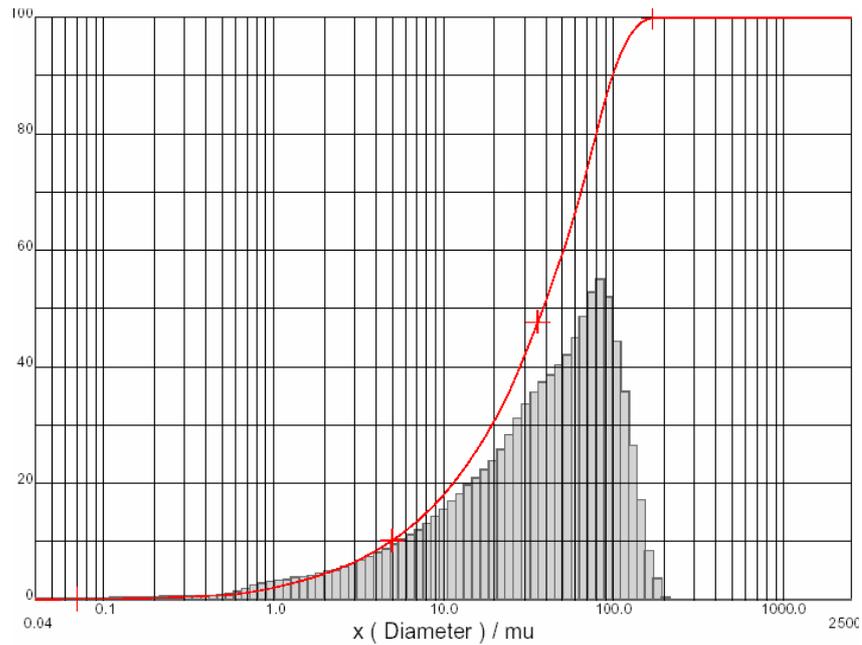


Figura 38: curva granulométrica do fíler calcário utilizado

Através do ensaio de granulometria da figura 38 observa-se que as partículas de fíler calcário são maiores do que as partículas de cimento, mas, no entanto, essas partículas de fíler contribuirão para um melhor preenchimento ou empacotamento dos grãos do concreto, conferindo uma maior compactidade, uma vez que vão substituir a areia.

A forma das partículas desse fíler calcário utilizado no presente estudo pode ser observada, na figura 39, através da imagem de microscopia realizada, cujo aumento é de 300x. Nota-se que as partículas não têm a forma esférica, mas são suficientemente pequenas para cumprir o seu papel na composição do CAA.

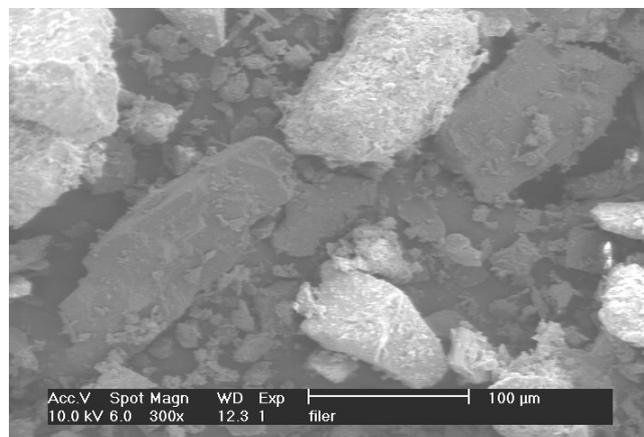


Figura 39: imagem do fíler calcário utilizado, obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons secundários) e ampliada 300 vezes

### 5.2.3 Agregado miúdo

A areia utilizada neste estudo foi uma areia natural quartzosa oriunda do rio Jacuí, região de Porto Alegre. O único processamento realizado com o agregado miúdo foi o peneiramento na peneira com abertura de 4,8 mm, aproveitando-se somente a parcela passante nesta peneira.

Foi realizado o ensaio de determinação da composição granulométrica desse agregado seguindo-se os procedimentos sugeridos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados obtidos e a curva granulométrica do mesmo podem observados, respectivamente, na tabela 15 e figura 40.

Tabela 15: composição granulométrica do agregado miúdo

Abertura da Peneira (mm)	% Média Retida	% Média Retida Acumulada
4,8	0	0
2,4	4	4
1,2	9	13
0,6	21	34
0,3	53	87
0,15	12	99
fundo	1	100

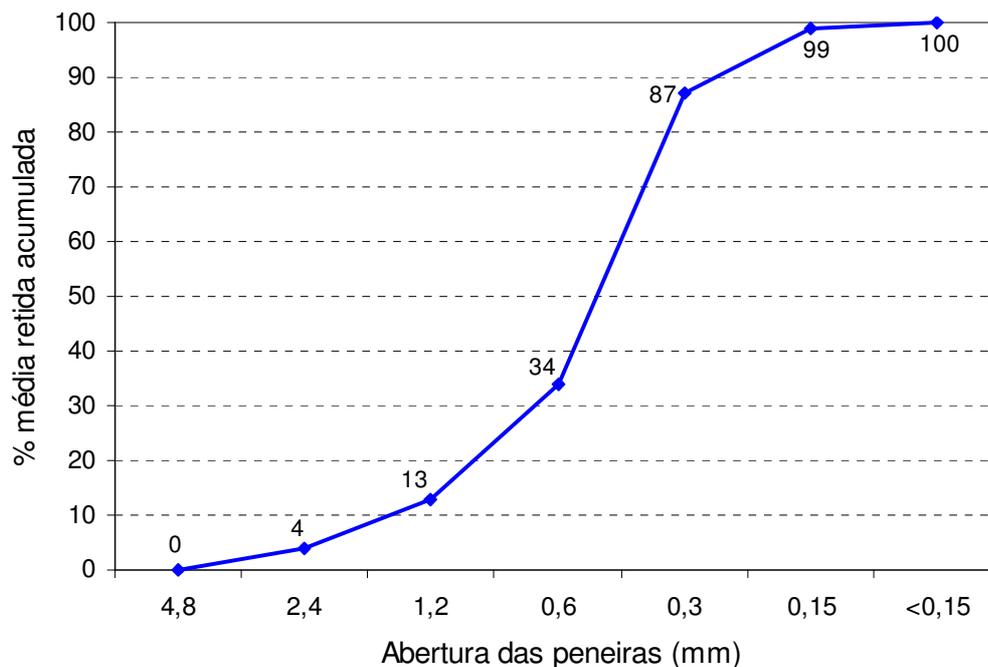


Figura 40: curva granulométrica da areia utilizada

A Tabela 16, por sua vez, ilustra todos os ensaios que foram realizados para a caracterização do agregado miúdo utilizado neste trabalho experimental.

Tabela 16: características físicas do agregado miúdo

Ensaio Realizados	Resultados	Método de Ensaio
*DMC (mm)	2,4	NBR NM 248
Módulo de finura	2,37	NBR NM 248
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,62	NBR9776/86
Massa unitária solta (kg/dm <sup>3</sup> )	1,50	NBR7251
Graduação	Zona 3 - média	NBR7211/83

\*DMC= dimensão máxima característica do agregado

#### 5.2.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado neste estudo foi uma brita de basalto por ser a mais disponível e utilizada no estado do Rio Grande do Sul.

Foram realizados os ensaios de determinação da sua composição granulométrica, da massa unitária e da massa específica no Laboratório de Materiais do NORIE/UFRGS, seguindo-se os procedimentos prescritos pelas Normas Brasileiras. Os resultados dos ensaios e a curva granulométrica do mesmo estão sendo mostrados na tabela 17 e na figura 41, respectivamente.

Tabela 17: composição granulométrica do agregado graúdo

Abertura da Peneira (mm)	% Média Retida	% Média Retida Acumulada
25	0	0
19	2	2
12,5	38	40
9,5	31	71
6,3	20	91
4,8	5	96
< 4,8	4	100

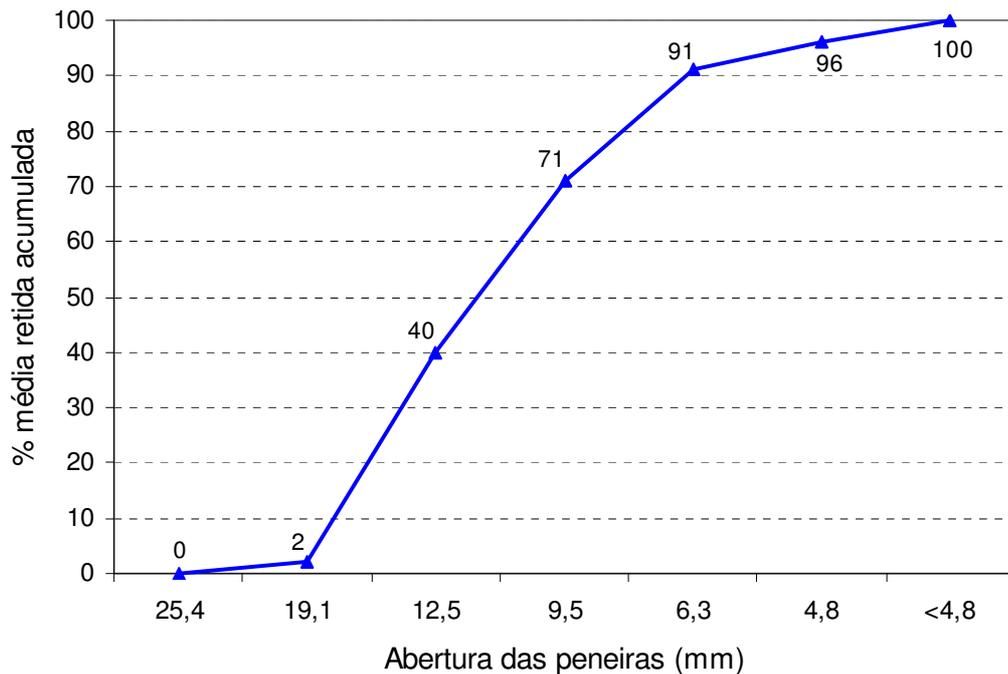


Figura 41: curva granulométrica da brita utilizada

A tabela 18 apresenta as principais características físicas do agregado utilizado no presente estudo.

Tabela 18: características físicas do agregado graúdo

Ensaio Realizados	Resultados	Método de Ensaio
*D.M.C. (mm)	19	NBR NM 248
Módulo de finura	6,69	NBR NM 248
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,82	NBR9776/86
Massa unitária solta (kg/dm <sup>3</sup> )	1,44	NBR7251
Gradação	Brita 1	NBR7211/83

\*DMC= dimensão máxima característica do agregado

### 5.2.5 Aditivo e água

O aditivo superplastificante e água são os principais responsáveis pela fluidez do concreto, jogando, portanto, importante papel na obtenção dos CAA's. O aditivo utilizado no presente estudo foi um superplastificante de 3ª geração. Segundo o fabricante, esse aditivo possui alta taxa de redução de água, cerca de 40%.

O grande benefício do uso de aditivos superplastificantes é a redução da relação a/c. As principais características técnicas deste tipo de aditivo (segundo o fabricante) são as seguintes:

- Base química: policarboxilatos
- Densidade: 1,067 à 1,107 g/cm<sup>3</sup>
- pH: 5 à 7
- Sólidos: 38 à 42%
- Viscosidade: 95 à 160 cps.

### 5.3 OBTENÇÃO DO TEOR IDEAL DE ARGAMASSA PARA O CONCRETO CONVENCIONAL (CCV)

Após a produção dos CAA's na etapa I, foi elaborado um estudo de dosagem através do método publicado por Helene e Terzian (1992), com o objetivo de se determinar o teor de argamassa ideal para os materiais escolhidos para a realização deste trabalho experimental.

Helene e Terzian (1992) afirmam que qualquer estudo de dosagem deve partir do pressuposto de que o concreto a ser produzido deve ter capacidade de ser lançado e adensado adequadamente no interior das fôrmas do elemento estrutural.

Por se tratar de uma das fases mais importantes do estudo de dosagem, pois é a que determina a adequabilidade do concreto quando lançado na fôrma, a determinação do teor ideal de argamassa é crucial, uma vez que, como citam Helene e Terzian (1992), a falta de argamassa na mistura pode causar porosidade no concreto ou falhas de concretagem.

Por outro lado, prosseguem os mesmos autores, o excesso de argamassa proporciona um concreto com melhor aparência, mas aumenta o custo por metro cúbico, além de aumentar o risco de fissuração por origem térmica e por retração de secagem.

Conforme sugerido no método do IPT, a determinação do teor ideal de argamassa para concretos convencionais pode ser feita para o traço 1:5 (cimento: agregados totais secos, em massa), que é também chamado de traço-piloto ou intermediário. É nesse traço intermediário que são definidas características da mistura como o abatimento do concreto (determinado pelo cone de Abrams), coesão e o próprio teor de argamassa que depois deverão ser mantidas

constantes para as outras misturas, como, por exemplo, traço 1:3,5 (chamado de traço rico) e traço 1:6,5 (chamado de traço pobre).

Como se pode facilmente observar, o traço-piloto representa o ponto central entre os três pontos espaçados de um ponto e meio entre um e seu próximo, da curva de dosagem a ser traçada. Para o caso do presente trabalho, o traço-piloto foi definido como sendo o ponto central dos quatro traços escolhidos (1:3; 1:4,5; 1:6 e 1:7,5), também espaçados entre si de um ponto e meio, para montar os diagramas de dosagem. Assim, determinou-se o ponto central dentro do intervalo entre os traços 1:3 e 1:7,5, definido em 1:5,25.

### 5.3.1 Determinação do teor ideal de argamassa para o traço 1:5,25

O processo de determinação do teor de argamassa para o traço central ou piloto começou com uma mistura, conforme o esquema da figura 42, cujo teor inicial de argamassa foi de 47% e que, por tentativas com acréscimos a este teor inicial (mantendo-se a quantidade de brita fixa, em 20 kg, variando o cimento e areia, conforme mostrado na tabela 19), chegou-se ao valor mínimo ideal de 54%. O abatimento foi fixado em  $90 \pm 10$  mm.

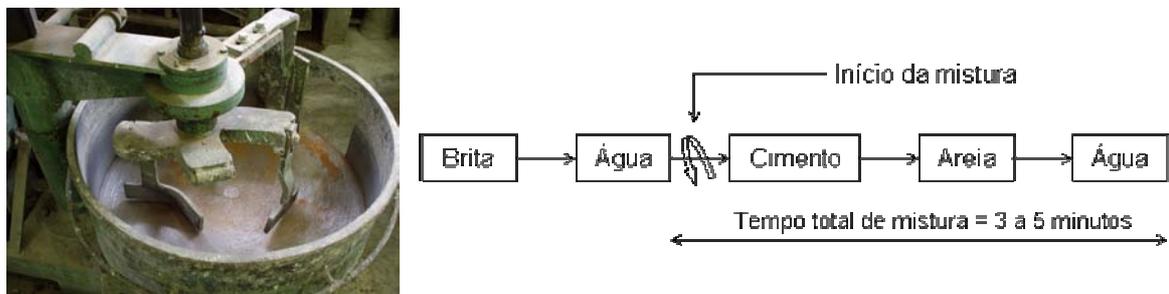


Figura 42: betoneira utilizada e procedimento e tempo de mistura aplicado para o CCV-REF

Uma vez definido esse teor de argamassa, foram então confeccionados concretos com os quatro traços definidos inicialmente, mantendo-se o mesmo teor de 54% e a faixa de abatimento do concreto entre os 80 e 100 mm ( $90 \pm 10$  mm), formando assim uma família com quatro pontos na curva de dosagem. Os traços e resultados obtidos desse estudo estão ilustrados nas tabelas 19, 20 e 21 a seguir.

Tabela 19: planilha auxiliar para determinação experimental do teor de argamassa mínimo para o traço-piloto 1:5,25 do CCV-REF

$\alpha$ (%)	Traço unitário c:a:p, em massa			m (a+p)	Areia		Cimento		Brita (kg)
	Cimento	Areia	Brita		(kg)	acréscimo (kg)	(kg)	acréscimo (kg)	
41	1	1,5625	3,6875	5,25	8,47	0	5,42	0	20
43	1	1,6875	3,5625	5,25	9,47	1,00	5,61	0,19	20
45	1	1,8125	3,4375	5,25	10,55	1,07	5,82	0,20	20
<b>47</b>	<b>1</b>	<b>1,9375</b>	<b>3,3125</b>	<b>5,25</b>	<b>11,70</b>	<b>1,15</b>	<b>6,04</b>	<b>0,22</b>	<b>20</b>
49	1	2,0625	3,1875	5,25	12,94	1,24	6,27	0,24	20
51	1	2,1875	3,0625	5,25	14,29	1,34	6,53	0,26	20
53	1	2,3125	2,9375	5,25	15,74	1,46	6,81	0,28	20
<b>54</b>	<b>1</b>	<b>2,375</b>	<b>2,875</b>	<b>5,25</b>	<b>16,52</b>	<b>0,78</b>	<b>6,96</b>	<b>0,15</b>	<b>20</b>
55	1	2,4375	2,8125	5,25	17,33	0,81	7,11	0,15	20

Tabela 20: resumo dos resultados obtidos para o traço-piloto

$\alpha$ ideal obtido	Traço unitário c:a:p (em massa)	Quantidade de materiais da mistura para o traço-piloto 1:5,25, em kg				Relação a/c (kg/kg)	Abatimento (mm)
		Cimento	Areia	Brita	Água		
54%	1:2,375:2,875	6,96	16,52	20,00	4,017	0,577	90

Tabela 21: resumo dos resultados obtidos para os traços da família do concreto convencional (CCV-REF) para  $\alpha = 54\%$

Traço 1:m	Traço unitário, em massa	Quantidade de materiais das misturas por traço, em kg				Relação a/c (kg/kg)	Abatimento (mm)
		Cimento	Areia	Brita	Água		
1:3	1:1,16:1,84	10,87	12,61	20,00	4,529	0,417	100
1:4,5	1:1,97:2,53	7,91	15,57	20,00	3,966	0,502	100
1:6	1:2,78:3,22	6,21	17,27	20,00	3,893	0,627	100
1:7,5	1:3,59:3,91	5,12	18,36	20,00	4,000	0,782	90

## 5.4 PRODUÇÃO E ENSAIOS DOS CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS

Uma vez determinado o teor ideal de argamassa para o concreto convencional (CCV), através do método do IPT/EPUSP, parte-se agora para a tentativa de obter um CAA utilizando o método de dosagem proposto por Tutikian (2004).

Como já foi descrito no capítulo 4 o método proposto por Tutikian (2004), desenvolvido a partir do método original do IPT/EPUSP, é uma ferramenta inovadora em se tratando de dosagem de CAA's.

Como no caso do CCV, os CAA's foram produzidos a partir dos mesmos quatro pontos com a diferença de 1,5 pontos entre pontos próximos. Aqui, definiu-se como família os traços com mesmo teor de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento e mesmo teor de fíler em relação ao teor de areia+fíler total do traço para um CCV, além do mesmo teor de argamassa e faixa de valores para os ensaios no estado fresco, como o espalhamento e funil V (conforme definido no item 5.4.3).

#### **5.4.1 Procedimento e tempo de mistura dos materiais**

A definição do procedimento de colocação e do tempo de mistura dos materiais é bastante importante para qualquer método de dosagem de concretos. Segundo Takada (2004), que estudou e testou vários procedimentos e seqüências de mistura, isso se torna ainda mais importante quando se trata da produção de concretos auto-adensáveis, cujos procedimentos e tempos de mistura exercem grande influência no aspecto do concreto após mistura.

Em seu trabalho sobre dosagem de concretos convencionais, Helene e Terzian (1992) definem que para a introdução dos materiais na betoneira, deve-se obedecer a seguinte ordem: 80% da água, 100% do agregado graúdo, 100% do agregado miúdo, 100% do cimento, restante da água e aditivos quando forem usados. Esta foi a seqüência adotada por Tutikian (2004) para produção de CAA.

Para o presente trabalho, os CAA's foram produzidos numa betoneira de eixo vertical do LEME/UFRGS, cuja capacidade é de cerca de 45 kg de material seco, e os materiais constituintes foram colocados obedecendo a seguinte ordem de colocação e mistura: agregado graúdo + água (mistura) + cimento (mistura) + fíler calcário (mistura) + aditivo(mistura) + agregado miúdo (mistura) + água+aditivo (para ajuste final).

O tempo médio de mistura ficou entre os 6 e 9 minutos, conforme ilustrado na figura 43.

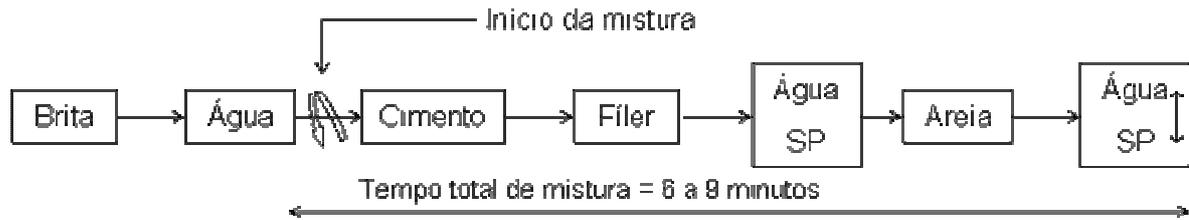


Figura 43: esquema do procedimento de mistura adotado para os CAA's

### 5.4.2 Cálculo das proporções dos materiais

Para realização dos cálculos dos traços para os diferentes CAA's produzidos ao longo desta pesquisa, foram desenvolvidas planilhas eletrônicas para facilitar a obtenção de qualquer concreto para os traços e teores de argamassa desejados. Nessas planilhas, os dados de entrada podem ser os teores de argamassa a serem estudados, os traços escolhidos e a quantidade de areia, que deve ser fixa em cada traço. A figura 44 mostra uma planilha de exemplo para o cálculo de dosagem.

teor de argamassa 60	pedra+finos	filer+areia	m-finos	teor de filler	teor de areia	verificação finos	CIMENTO (kg)	Acréscimo (kg)	FILLER (kg)	Acréscimo (kg)	AREIA (kg)	BRITA (kg)	Acréscimo (kg)	Total Material	Verif. alfa
	m		pedra												
	3	1,4	1,6												
0%filer				0	1,4	1,4	6,79	0,00	0,00	0,00	9,50	10,86	0,00	27,14	0,60
5%filer				0,07	1,33	1,4	7,14	0,36	0,50	0,50	9,50	11,43	0,57	28,57	0,60
10%filer				0,14	1,26	1,4	7,54	0,40	1,06	0,56	9,50	12,06	0,63	30,16	0,60
15%filer				0,21	1,19	1,4	7,98	0,44	1,68	0,62	9,50	12,77	0,71	31,93	0,60
20%filer				0,28	1,12	1,4	8,48	0,50	2,38	0,70	9,50	13,57	0,80	33,93	0,60
25%filer				0,35	1,05	1,4	9,05	0,57	3,17	0,79	9,50	14,48	0,90	36,19	0,60
30%filer				0,42	0,98	1,4	9,69	0,65	4,07	0,90	9,50	15,51	1,03	38,78	0,60
35%filer				0,49	0,91	1,4	10,44	0,75	5,12	1,04	9,50	16,70	1,19	41,76	0,60
40%filer				0,56	0,84	1,4	11,31	0,87	6,33	1,22	9,50	18,10	1,39	45,24	0,60
45%filer				0,63	0,77	1,4	12,34	1,03	7,77	1,44	9,50	19,74	1,65	49,35	0,60
50%filer				0,7	0,7	1,4	13,57	1,23	9,50	1,73	9,50	21,71	1,97	54,29	0,60
55%filer				0,77	0,63	1,4	15,08	1,51	11,61	2,11	9,50	24,13	2,41	60,32	0,60
60%filer				0,84	0,56	1,4	16,96	1,88	14,25	2,64	9,50	27,14	3,02	67,86	0,60

Figura 44: exemplo de planilha adotada para cálculo de dosagem de CAA

Na figura 44 nota-se ainda que, o teor de fíler aumenta à medida que se busca experimentalmente o ajuste da viscosidade da mistura, através da introdução de fíler calcário. Portanto, o traço final, com as proporções de fíler e de areia, é determinado durante a dosagem de CAA através do teor ideal de substituição de areia por fíler para ajuste da viscosidade da mistura.

Neste trabalho, para a determinação do teor ideal de fíler calcário, começou-se com o teor de 10% (em relação ao traço total de areia) de fíler calcário (FC) e chegou-se ao valor ideal de 40% (para os teores de argamassa de 54 e 55%). Este teor de fíler calcário foi adotado para todos os outros teores de argamassa durante todo o estudo.

Salienta-se que, para o teor de argamassa de 60% um teor de FC de 35% já se apresentava suficiente para conferir a viscosidade adequada à mistura e se obter um CAA. Isso supõe pensar que para os teores de argamassa mais elevados (65, 70 e 75%), não seria necessário um teor de FC tão elevado. Então, em princípio, para teores de argamassa maiores do que 60%, o teor de fíler deveria ser inferior aos 40 ou 35%, uma vez que o teor de brita diminui com o aumento do teor de argamassa demandando menor viscosidade para manter as partículas de agregado graúdo em suspensão.

Como dados de saída da tabela ilustrada na figura 44, tem-se as quantidades de cimento, de fíler calcário (neste trabalho) e de brita, com os seus respectivos acréscimos quando o teor de fíler varia, e a quantidade total de material a ser misturado, tendo em conta a capacidade máxima da betoneira.

A figura 45 ilustra o aspecto do concreto durante o processo de ajuste da viscosidade, desde o ponto onde foi adicionado aditivo superplastificante até o ponto em o que teor de fíler adicionado torna o concreto com a viscosidade adequada para um CAA.

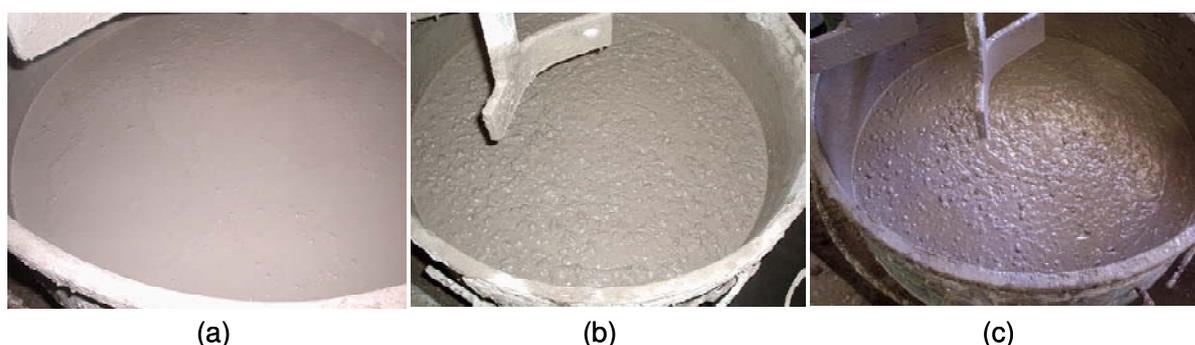


Figura 45: aspecto do CAA (a) segregado, (b) praticamente ajustado e (c) ponto ideal durante o processo de dosagem

O aspecto do CAA em movimento também é importante para verificar a estabilidade da mistura, além da observação do concreto na betoneira. A figura 46 mostra duas situações com o concreto em movimento: 46(a) em queda livre, onde se pode ver a brita e argamassa bem coesas e 46(b) em movimento horizontal, onde brita e argamassa com viscosidade adequada se movem juntos, sem ocorrência de borda de segregação.



Figura 46: aspecto do CAA em movimento com (a) agregado graúdo e argamassa coesos em queda livre e (b) agregado graúdo e argamassa coesos em espalhamento

A figura 47 ilustra a visão geral do concreto após o ensaio de espalhamento, que é executado logo que se constate visualmente na betoneira que a mistura esteja com a viscosidade adequada, conforme explicado anteriormente, onde se nota em (a) uma concentração de agregado graúdo no centro do material espalhado e com ocorrência de borda de segregação, enquanto em (b) observa-se uma mistura coesa similar ao concreto da figura 46 (b).



Figura 47: aspecto do CAA após o ensaio de espalhamento, onde (a) concreto segregando nas bordas e no centro e (b) concreto coeso com bom espalhamento

Após obtenção da viscosidade adequada das misturas, neste caso ajustada com 40% de fíler calcário em relação ao traço de areia, os traços unitários definitivos em massa dos concretos produzidos foram calculados e encontram-se apresentados na tabela 22.

Tabela 22: resultados dos traços unitários secos obtidos por traço para cada concreto produzido, com 40% de FC em relação ao teor de areia inicial (ou areia+fíler)

Concretos estudados	Traço 1:m	Traço unitário C:FC:A:B, em massa			
		Cimento (C)	Fíler Calcário (FC)	Areia (A)	Brita (B)
CCV-REF $\alpha = 54\%$	1:3	1	0,00	1,160	1,840
	1:4,5	1		1,970	2,530
	1:6	1		2,780	3,220
	1:7,5	1		3,590	3,910
CAA-54 $\alpha = 54\%$	1:3	1	0,464	0,696	1,840
	1:4,5	1	0,788	1,182	2,530
	1:6	1	1,112	1,668	3,220
CAA $\alpha = 55\%$	1:3	1	0,48	0,720	1,800
	1:4,5	1	0,81	1,215	2,475
	1:6	1	1,14	1,710	3,150
	1:7,5	1	1,47	2,205	3,825
CAA $\alpha = 60\%$	1:3	1	0,56	0,840	1,600
	1:4,5	1	0,92	1,380	2,200
	1:6	1	1,28	1,920	2,800
	1:7,5	1	1,64	2,460	3,400
CAA $\alpha = 65\%$	1:3	1	0,64	0,960	1,400
	1:4,5	1	1,03	1,545	1,925
	1:6	1	1,42	2,130	2,450
	1:7,5	1	1,81	2,715	2,975
CAA $\alpha = 70\%$	1:3	1	0,72	1,080	1,200
	1:4,5	1	1,14	1,710	1,650
	1:6	1	1,56	2,340	2,100
	1:7,5	1	1,98	2,970	2,550
CAA $\alpha = 75\%$	1:3	1	0,80	1,200	1,000
	1:4,5	1	1,25	1,875	1,375
	1:6	1	1,70	2,550	1,750
	1:7,5	1	2,15	3,225	2,125

Os traços unitários em massa forneceram as quantidades de cimento, areia e brita para a produção de cada mistura em laboratório, que foram calculadas tendo em conta a capacidade máxima da betoneira utilizada.

Estas quantidades calculadas para as etapas I e II estão apresentadas a seguir nas tabelas 23 e 24, respectivamente.

Tabela 23: quantidades de materiais calculadas e obtidas para confecção em laboratório de cada mistura da etapa I, mais o CCV

Concretos estudados	Traço 1:m	Quantidade de materiais das misturas de cada traço							
		Cimento (kg)	Fíler (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Relação a/c	*H (%)	Aditivo SP (g)
CCV-REF $\alpha = 54\%$	1:3	10,87	0,00	12,61	20,00	4,529	0,4170	10,42	0,00
	1:4,5	7,91		15,57	20,00	3,966	0,5020	9,12	
	1:6	6,21		17,27	20,00	3,893	0,6270	8,95	
	1:7,5	5,12		18,36	20,00	4,000	0,7820	9,20	
CAA-55 $\alpha = 55\%$	1:3	11,53	5,53	8,30	20,75	4,265	0,3699	9,25	165,45
	1:4,5	8,23	6,67	10,00	20,37	3,909	0,4750	8,63	118,10
	1:6	6,43	7,33	11,00	20,26	3,858	0,6000	8,57	92,27
	1:7,5	5,44	8,00	12,00	20,82	4,463	0,8203	9,65	78,06
CAA-60 $\alpha = 60\%$	1:3	11,31	6,33	9,50	18,10	4,256	0,3763	9,41	141,37
	1:4,5	8,33	7,67	11,50	18,33	4,231	0,5079	9,23	104,12
	1:6	6,51	8,33	12,50	18,23	4,161	0,6392	9,13	81,37
	1:7,5	5,37	8,80	13,20	18,24	4,352	0,8104	9,54	67,12
CAA-65 $\alpha = 65\%$	1:3	11,46	7,33	11,00	16,04	4,011	0,3500	8,75	200,55
	1:4,5	8,28	8,53	12,80	15,95	4,617	0,5576	10,13	144,90
	1:6	6,57	9,33	14,00	16,10	4,429	0,6741	9,63	114,97
	1:7,5	5,38	9,73	14,60	16,00	4,448	0,8268	9,73	94,15
CAA-70 $\alpha = 70\%$	1:3	11,48	8,27	12,40	13,78	4,197	0,3656	9,14	198,60
	1:4,5	8,19	9,33	14,00	13,51	4,057	0,4954	9,01	141,68
	1:6	6,58	10,27	15,40	13,82	4,161	0,6324	9,03	113,83
	1:7,5	5,39	10,67	16,00	13,74	4,348	0,8067	9,49	93,24
CAA-75 $\alpha = 75\%$	1:3	11,33	9,07	13,60	11,33	4,189	0,3697	9,24	312,70
	1:4,5	8,21	10,27	15,40	11,29	4,252	0,5179	9,41	226,59
	1:6	6,51	11,07	16,60	11,39	4,303	0,6608	9,44	179,67
	1:7,5	5,40	11,60	17,40	11,47	4,579	0,8480	9,98	149,04

\*H = relação água/materiais secos: água/(cimento+fíler+areia+brita)

Tabela 24: quantidades de materiais calculadas e obtidas para confecção em laboratório de cada mistura da etapa II

Concretos estudados	Traço 1:m	Quantidade de materiais das misturas de cada traço							
		Cimento (kg)	Fíler (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Relação a/c	H (%)	Aditivo SP (g)
CCV-REF $\alpha = 54\%$	1:3	10,87	0,00	12,61	20,00	4,529	0,4170	10,42	0,00
	1:4,5	7,91		15,57	20,00	3,966	0,5020	9,12	
	1:6	6,21		17,27	20,00	3,893	0,6270	8,95	
	1:7,5	5,12		18,36	20,00	4,000	0,7820	9,20	
CAA-54 $\alpha = 54\%$	1:3	9,48	4,40	6,60	17,45	4,080	0,4304	10,76	58,77
	1:4,5	6,77	5,33	8,00	17,12	3,418	0,5049	9,18	41,97
	1:6	5,40	6,00	9,00	17,37	3,436	0,6363	9,10	33,48
CAA-60 $\alpha = 60\%$	1:3	9,05	5,07	7,60	14,48	3,785	0,4182	10,46	61,54
	1:4,5	6,52	6,00	9,00	14,35	3,298	0,5058	9,19	44,34
	1:6	5,21	6,67	10,00	14,58	3,568	0,6848	9,79	35,43
CAA-65 $\alpha = 65\%$	1:4,5	6,47	6,67	10,00	12,46	3,851	0,5952	10,82	45,29
CAA-70 $\alpha = 70\%$	1:4,5	6,43	7,33	11,00	10,61	3,669	0,5706	10,37	62,24
CAA-75 $\alpha = 75\%$	1:4,5	6,40	8,00	12,00	8,80	3,850	0,6016	10,94	61,44

Os dados de consumo de materiais, em  $\text{kg/m}^3$ , para as etapas I e II podem ser conferidos a seguir nas tabelas 25 e 26, respectivamente.

Tabela 25: resultados dos consumos de materiais para cada concreto produzido na etapa I, em kg/m<sup>3</sup>

Concretos estudados	Traço 1:m	Consumo de materiais, em kg/m <sup>3</sup>					
		Cimento	Fíler Calcário	Areia	Brita	Água	Aditivo SP
CCV-REF $\alpha = 54\%$ 0% SP	1:3	532	0,00	617	978	222	0,00
	1:4,5	397		782	1004	199	
	1:6	313		869	1007	196	
	1:7,5	256		919	1001	200	
CAA-55 $\alpha = 55\%$ 1,43%SP	1:3	547	263	394	985	202	7,82
	1:4,5	403	326	490	997	191	5,76
	1:6	317	361	542	998	190	4,53
	1:7,5	255	374	562	974	209	3,64
CAA-60 $\alpha = 60\%$ 1,25%SP	1:3	544	305	457	870	205	6,80
	1:4,5	397	365	547	873	201	4,96
	1:6	312	400	599	874	200	3,90
	1:7,5	255	418	627	866	206	3,18
CAA-65 $\alpha = 65\%$ 1,75%SP	1:3	551	352	529	771	193	9,63
	1:4,5	388	400	600	747	216	6,79
	1:6	308	438	656	755	208	5,39
	1:7,5	253	458	687	753	209	4,43
CAA-70 $\alpha = 70\%$ 1,73%SP	1:3	545	392	588	654	199	9,42
	1:4,5	397	452	679	655	197	6,87
	1:6	311	486	729	654	197	5,39
	1:7,5	254	503	754	647	205	4,39
CAA-75 $\alpha = 75\%$ 2,76%SP	1:3	542	434	651	542	200	14,96
	1:4,5	392	491	736	540	203	10,83
	1:6	308	524	785	539	204	8,50
	1:7,5	251	539	808	533	213	6,92

Tabela 26: resultados dos consumos de materiais para cada concreto produzido na etapa II, em kg/m<sup>3</sup>

Concretos estudados	Traço 1:m	Consumo dos materiais em kg/m <sup>3</sup> de concreto					
		Cimento	Fíler Calcário	Areia	Brita	Água	Aditivo SP
CCV-REF $\alpha = 54\%$	1:3	532	0	617	978	222	0
	1:4,5	397		782	1004	199	
	1:6	313		869	1007	196	
CAA-54 $\alpha = 54\%$ 0,62%SP	1:3	530	246	369	975	228	3,28
	1:4,5	398	314	471	1008	201	2,47
	1:6	313	348	523	1009	199	1,94
CAA-60 $\alpha = 60\%$ 0,68%SP	1:3	532	298	447	851	222	3,62
	1:4,5	397	365	548	873	201	2,70
	1:6	308	394	591	862	211	2,09
CAA-65 $\alpha = 65\%$ 0,70%SP	1:4,5	383	394	591	736	228	2,68
CAA-70 $\alpha = 70\%$ 0,97%SP	1:4,5	385	439	659	636	220	3,73
CAA-75 $\alpha = 75\%$ 0,96%SP	1:4,5	380	475	712	522	229	3,64

### 5.4.3 Ensaio realizados no estado fresco

Para avaliação das propriedades dos CAA no estado fresco foram utilizados os seguintes ensaios:

- a) *Slump flow test*;
- b)  $T_{500\text{mm}}$  *test*;
- c) *V-funnel* . Neste trabalho, optou-se em colocar a *L-Box* por baixo do funil de modo que, o concreto liberado por este caia diretamente na *L-box* e já se começava a fazer outro ensaio, completando apenas com o concreto que faltava;
- d) *L-box* (o obstáculo usado foi o com  $3\phi 12,5$  mm c/ 35mm);
- e) *Box-shape* (o obstáculo usado foi o com  $3\phi 12,5$  mm c/35mm, da figura 29);

Como parâmetro de controle de qualidade dos concretos produzidos e em função dos valores recomendados por diversos autores já citados no capítulo 3, decidiu-se fixar os seguintes valores para os diferentes ensaios executados no estado fresco:

- Espalhamento = 600 a 700 mm;
- Tempo para alcançar a marca dos 500 no espalhamento,  $T_{500\text{mm}} = 2$  a 7 segundos;
- Tempo para escoar no Funil V = 5 a 15 segundos;
- Altura mínima do CAA na caixa (*Box-shape*) = 300 mm;
- Relação entre  $H_1$  e  $H_2$  na Caixa L (*L-box*),  $H_2/H_1 = 0,80$  a 1,00.

A escolha destes ensaios tem como justificativa a verificação de que a maior parte dos estudos sobre o CAA utiliza e recomenda os mesmos (EFNARC, 2002), (TVIKSTA, 2000), entre outros. Portanto, julgou-se pertinente a escolha dos referidos ensaios para a presente pesquisa. Para outros detalhes os resultados individuais destes ensaios constam no Anexo 1 deste trabalho.

#### 5.4.4 Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova

Após confirmação pelos testes no estado fresco de que os concretos obtidos eram auto-adensáveis, os corpos-de-prova foram moldados (sem compactação nenhuma), conforme ilustra a figura 48, por cada traço dosado. Esses corpos-de-prova, devidamente identificados, permaneceram durante as primeiras 24 horas cobertos com lona plástica, e colocados posteriormente em câmara úmida (temperatura de  $20\pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa superior a 95%) do laboratório do NORIE/UFRGS para a sua cura.



Figura 47: moldagem dos corpos-de-prova de CAA sem compactação

Após 3, 7, 28 e 56 dias de cura em câmara úmida, os corpos-de-prova foram rompidos por compressão axial visando avaliar a evolução da resistência ao longo do tempo. Os corpos-de-prova eram retirados da câmara úmida 24 horas antes dos ensaios de ruptura e deixados ao ambiente normal de laboratório, a fim de deixar evaporar a água contida nos poros do concreto, para minimizar a influência desta nos resultados dos ensaios mecânicos.

#### **5.4.5 Ensaios realizados no estado endurecido**

Os ensaios no estado endurecido, realizados através da moldagem do concreto em doze (12) corpos-de-prova (CP's) cilíndricos com  $\varnothing 9,5\text{cm}$  e altura de 19 cm, para cada traço (totalizando 288 corpos-de-prova para o estudo dos diferentes teores de argamassa) foram os seguintes:

- a) resistência à compressão axial (aos 3, 7, 28 e 56 dias), segundo a NBR 5739 (ABNT, 1994);
- b) resistência à tração por compressão diametral (aos 28 dias), segundo a NBR 7222 (ABNT, 1994);
- c) ensaio de ultra-som para avaliação da qualidade e uniformidade (ausência de vazios) dos CAA (aos 3, 7, 28 e 56 dias), segundo a NBR 8802;
- d) módulo de elasticidade ( $E_c$ ), segundo a NBR 8522 (2003);

Os corpos-de-prova dos ensaios foram distribuídos da seguinte forma:

- 2 para o ensaio de compressão axial/ultra-som aos 3 dias;
- 2 para o ensaio de compressão axial/ultra-som aos 7 dias;
- 3 para o ensaio de compressão axial/ultra-som aos 28 dias (2 dos quais com determinação do  $E_c$ );
- 2 para o ensaio de compressão axial/ultra-som aos 56 dias e
- 3 para o ensaio de tração por compressão diametral aos 28 dias.

A escolha desses ensaios visou analisar as principais propriedades dos concretos endurecidos para verificar o produto final obtido através da dosagem realizada.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO

Nesta seção do trabalho serão apresentados os resultados do comportamento do CAA no estado fresco, que envolveram os principais ensaios recomendados para esse tipo de concreto.

#### 6.1.1 Ensaio de espalhamento do concreto

Na figura 49 estão apresentados os resultados do ensaio de espalhamento do CAA para cada um dos traços executados na etapa I em função do teor de argamassa e do teor de aditivo superplastificante sobre a massa de cimento (%SP/cim.).

Observa-se na mesma figura que o CAA com teor de argamassa de 75% (CAA-75) obteve o maior valor de espalhamento, teoricamente devido o seu maior teor de aditivo (2,76%) e pelo seu menor teor de brita (maior liberdade para fluir), e ultrapassou o valor máximo estabelecido para o presente estudo (700 mm).

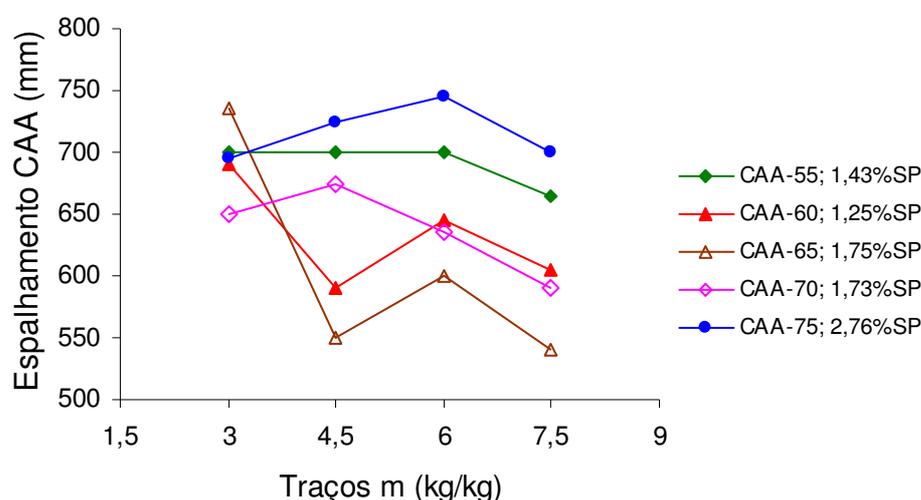


Figura 49: diâmetros médios obtidos no ensaio de espalhamento do CAA (etapa I)

Na figura 50 observam-se os mesmos resultados em forma de barras, e nota-se que 4 dos 20 traços ficaram abaixo do mínimo estipulado para o ensaio de espalhamento (600 mm) e 3 passaram dos 700 mm, que foi o máximo estabelecido. Isto pode ser corrigido efetuando-se

ajustes na quantidade de água e/ou de aditivo superplastificante, desde que não prejudique a viscosidade da mistura em causa.

Portanto, dentro dos critérios estabelecidos, a maioria dos concretos, cerca de 80% dos traços, apresentou uma deformabilidade aceitável, ou seja, entre os 600 e 700 mm. Por outro lado, nota-se que os traços correspondentes ao CAA-55 na figura 49, apresentaram resultados com a menor variabilidade.

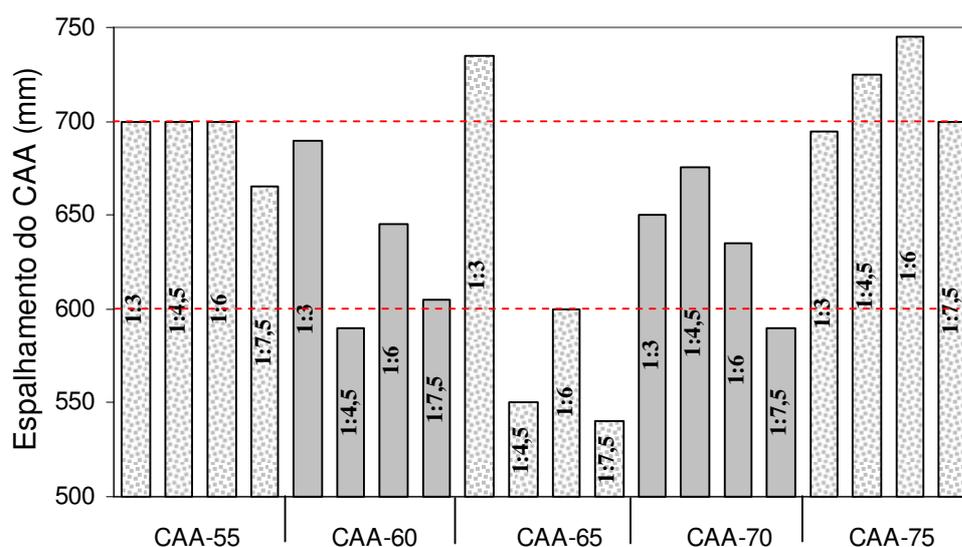


Figura 50: diâmetros médios obtidos no ensaio de espalhamento do CAA (etapa I)

Salienta-se que os ajustes da dosagem de aditivo superplastificante para as famílias de CAA da etapa I foram executados pelo traço mais pobre, 1:7,5, a partir da fixação da relação a/c em torno de 0,80 pelos motivos já explicados no capítulo 5.

Para a etapa II, o ajuste da dosagem de aditivo superplastificante para as famílias de CAA foi efetuado pelo traço 1:4,5, o que proporcionou uma significativa economia no consumo de aditivo comparativamente aos consumos dos concretos dosados na etapa I.

A figura 51 ilustra bem como o concreto pode se comportar ao longo da obtenção de CAA quando se busca o ponto ideal do ajuste de aditivo superplastificante, visando alcançar viscosidade e fluidez adequadas. Na imagem da figura 51(a) observa-se um concreto pouco fluido e necessitando de aditivo, já na imagem da figura 51(b) tem-se um concreto que segregou (observar bordas e centro), ou seja, foi colocado aditivo além do ponto certo. A imagem da figura 51(c) mostra um concreto com seu teor de aditivo no ponto em que a

mistura se apresenta sem segregação, onde pode se ver uma distribuição uniforme do agregado graúdo e da argamassa.

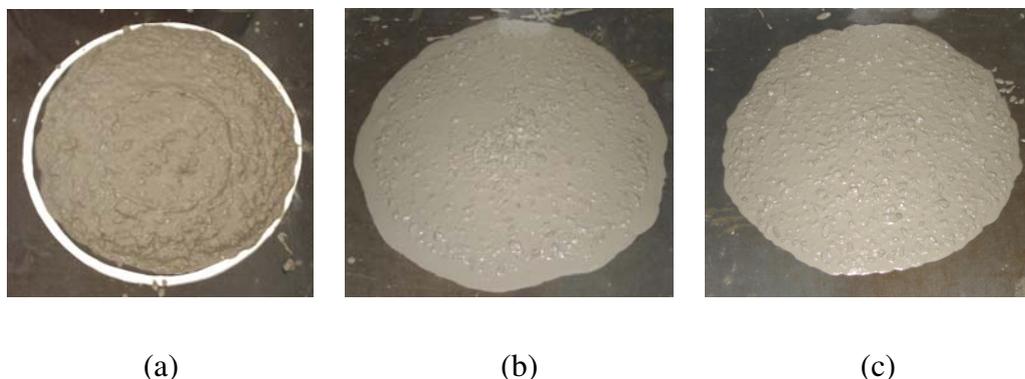


Figura 51: comportamento do CAA durante o ajuste de superplastificante (a) pouco fluído, faltando aditivo, (b) segregado, com excesso de aditivo e (c) ajustado

Para melhor ilustrar um CAA sem segregação visual nas bordas durante o ensaio de espalhamento, a figura 52 mostra bem dois exemplos de detalhes de CAA coesos.

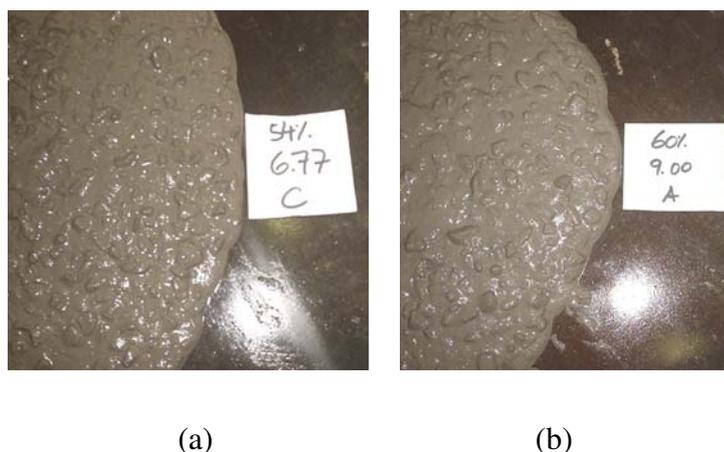


Figura 52: detalhes do (a) CAA-54 e (b) CAA-60 no ensaio de espalhamento do CAA, ambos coesos e sem segregação

A figura 53 ilustra os resultados do ensaio de espalhamento dos concretos confeccionados na etapa II e verifica-se que, dos 9 traços executados, 1 ficou abaixo do mínimo estabelecido (600 mm). Isso representa um valor de quase 89% de valores acima do valor mínimo de 600 mm para esse ensaio, no conjunto de 9 traços da etapa II.

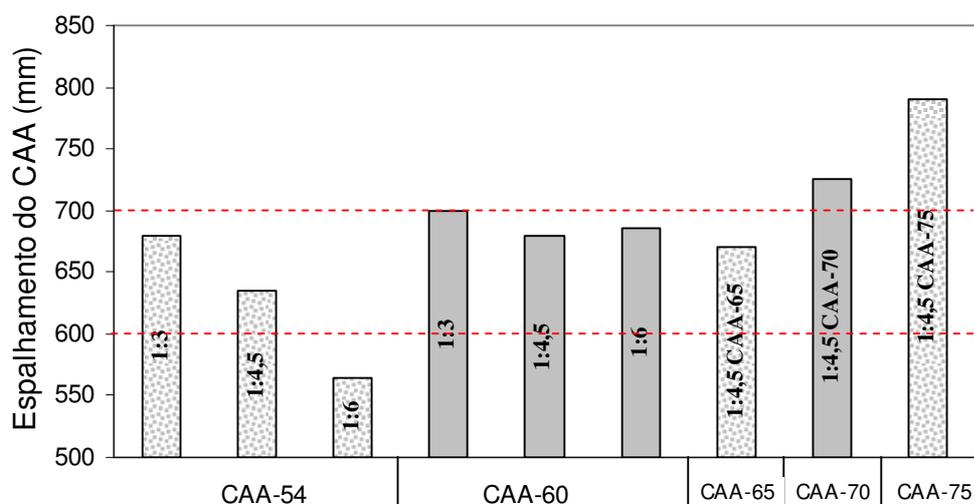


Figura 53: diâmetros médios obtidos no ensaio de espalhamento do CAA (etapa II)

Para os CAA-54 e CAA-60, produzidos na etapa II, os resultados individuais de espalhamento podem ser conferidos na figura 54. O traço 1:6 do CAA-60 teve um comportamento abaixo do esperado com espalhamento bem abaixo dos 600 mm (e isso se refletiu no resultado do ensaio da *L-box*, a ser apresentado no item 6.1.4), porém não se pôde adicionar água com o objetivo manter o fator água/materiais secos (H) na mesma faixa dos outros traços, e o aditivo superplastificante constante para cada família já havia sido totalmente colocado.

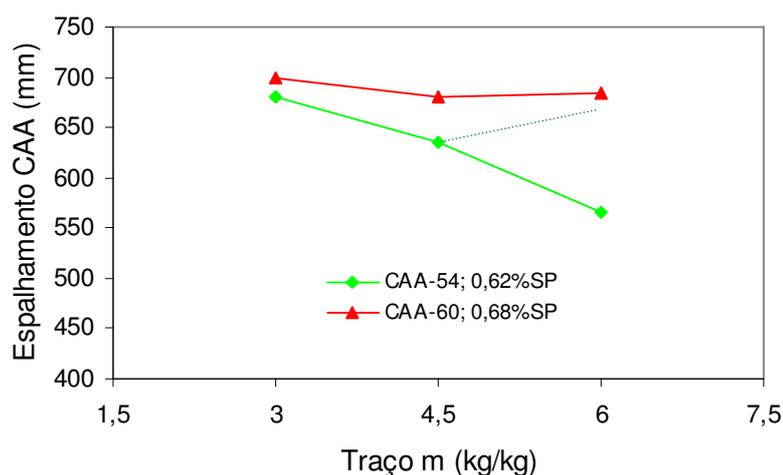


Figura 54: diâmetros médios obtidos no ensaio de espalhamento do CAA (etapa II)

### 6.1.2 Ensaio de espalhamento – $T_{500\text{mm}}$

Para este ensaio, que é realizado em simultâneo com o ensaio de espalhamento, a maior parte dos traços da etapa I, como pode se visto na figura 55, teve comportamento aceitável dentro

do recomendado pela maioria dos pesquisadores (conforme apresentado no capítulo 3). Apenas dois traços ficaram abaixo do tempo mínimo e 4 passaram do limite superior médio, ou seja, 90% dos traços tiveram resultado acima do mínimo estabelecido nesse parâmetro.

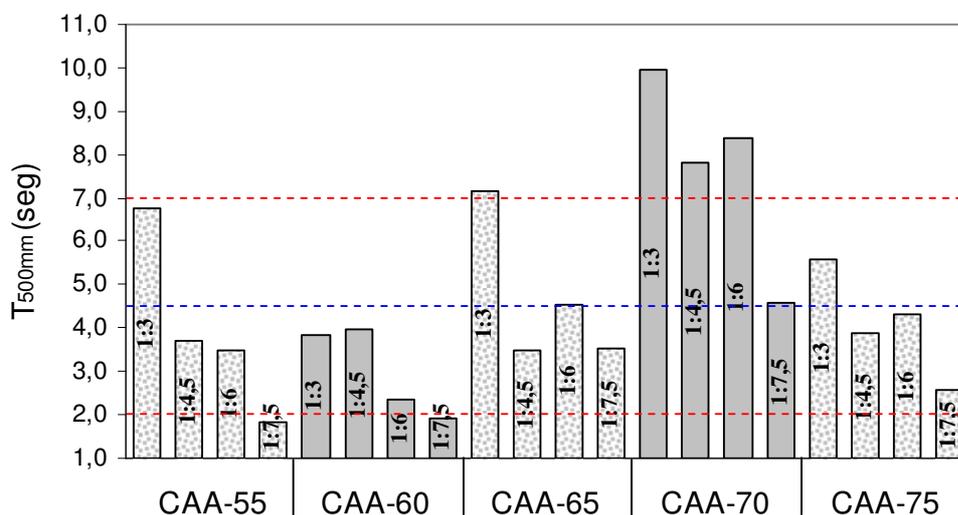


Figura 55: tempo para alcançar a marca dos 500 mm no ensaio de espalhamento ( $T_{500\text{mm}}$ )

Os concretos da etapa II, como pode ser visto na figura 56, tiveram comportamento excelente, sendo que nenhum traço ficou fora da faixa estabelecida. Isso leva a crer que o ajuste de aditivo feito pelo traço médio seja o procedimento mais recomendável.

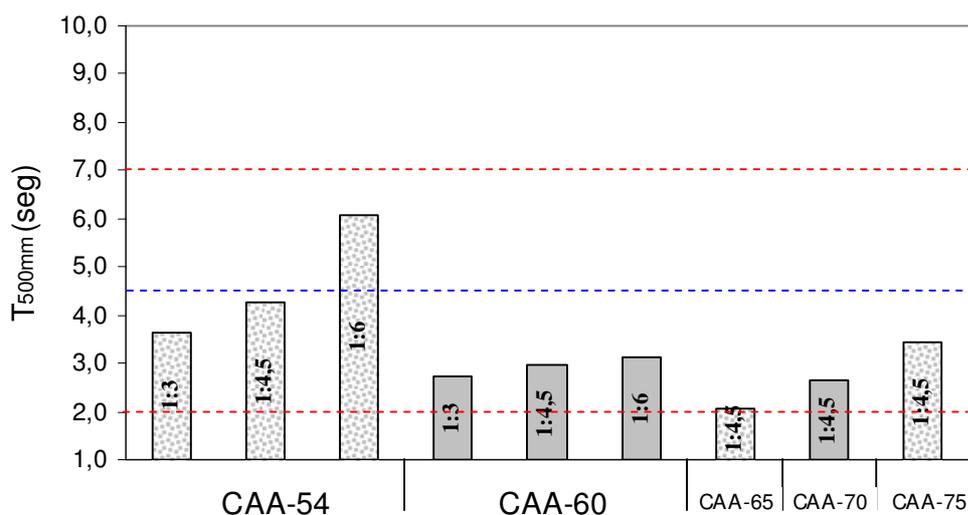


Figura 56: tempo para alcançar a marca dos 500 mm no ensaio de espalhamento ( $T_{500\text{mm}}$ )

Pode-se ainda comentar que os traços que tiveram tempos maiores para alcançar a marca dos 500 mm apresentam, teoricamente, para o mesmo traço e valor de espalhamento, uma mistura mais viscosa. O contrário ocorre para os traços com tempos menores.

Portanto, o  $T_{500\text{mm}}$  pode ser uma medida indireta da viscosidade da mistura, e a figura 57 apresenta algumas correlações observadas durante o presente estudo, onde se pode notar que existe certa relação entre o  $T_{500\text{mm}}$  e correspondente traço da mistura traço, independente do teor de argamassa. Outras correlações do estudo experimental são apresentadas no anexo 2.

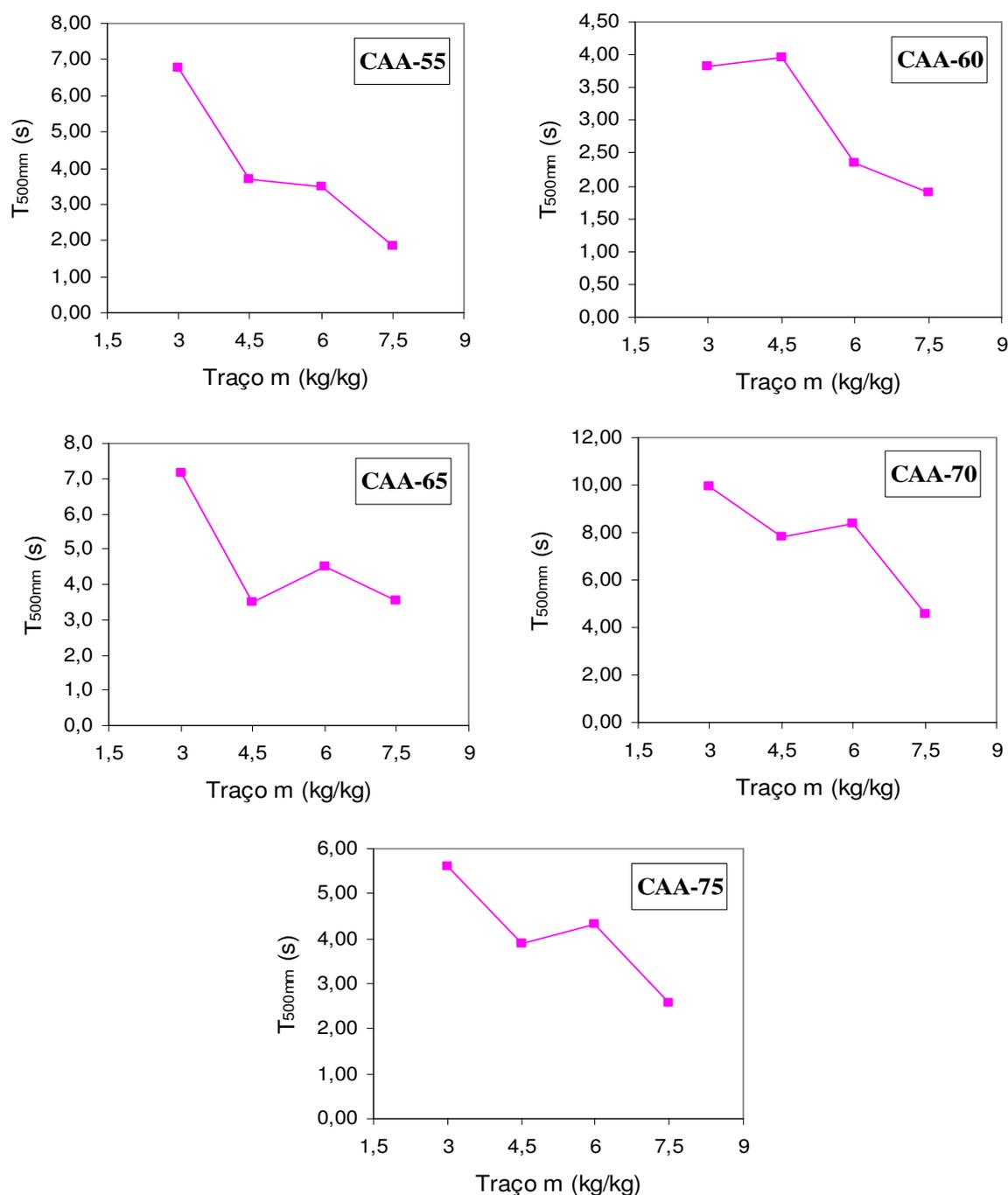


Figura 57: comportamento do ensaio de espalhamento ( $T_{500\text{mm}}$ ) em função do traço (etapa I)

Assim, observou-se que o  $T_{500\text{mm}}$  para os quatro traços, em todos os teores de argamassa da etapa I, tende a diminuir à medida que o traço fica mais pobre (menor consumo de cimento), ou seja, os traços mais pobres tendem a ser menos viscosos, em virtude da menor quantidade de pasta, responsável pela quebra de atrito entre as partículas sólidas da mistura.

Na figura 58 observa-se que o  $T_{500\text{mm}}$  para os três traços dos dois teores de argamassa da etapa II (CAA-54 e CAA-60) tende a aumentar do traço mais rico (maior consumo de cimento) para o traço mais pobre (1:6), ou seja, o efeito contrário do que ocorreu com os concretos da etapa I. Não se sabe ao certo o motivo deste comportamento não esperado, todavia o ajuste pelo traço médio deve ser um dos fatores, entre outros possíveis.

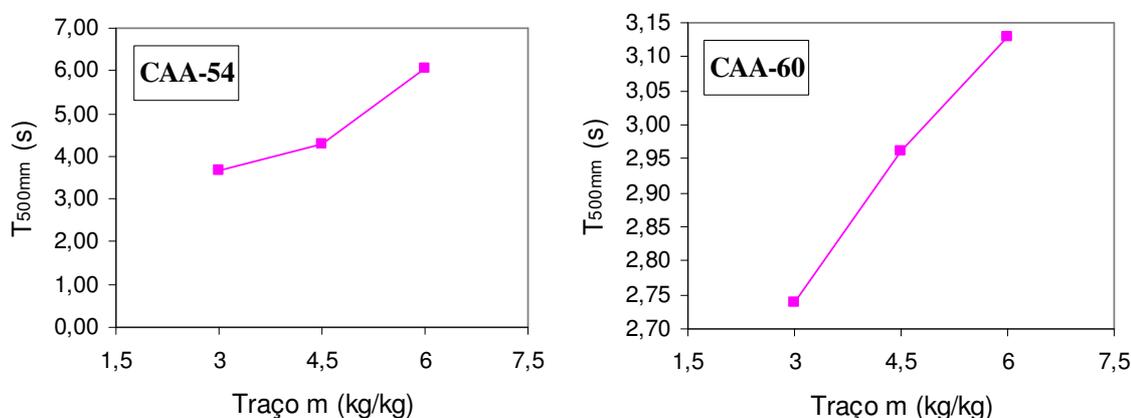


Figura 58: tendência do comportamento entre  $T_{500\text{mm}}$  e o traço m (etapa II)

Por outro lado, como se vê na figura 59, também na etapa II verifica-se que o  $T_{500\text{mm}}$  denota uma correlação com a relação superplastificante/água (SP/a). A relação SP/a aumenta à medida que o traço fica mais rico e o correspondente  $T_{500\text{mm}}$  diminui, ou seja, o traço 1:6 seria mais viscoso do que o 1:4,5 e o 1:3, confirmando as relações da figura 58.

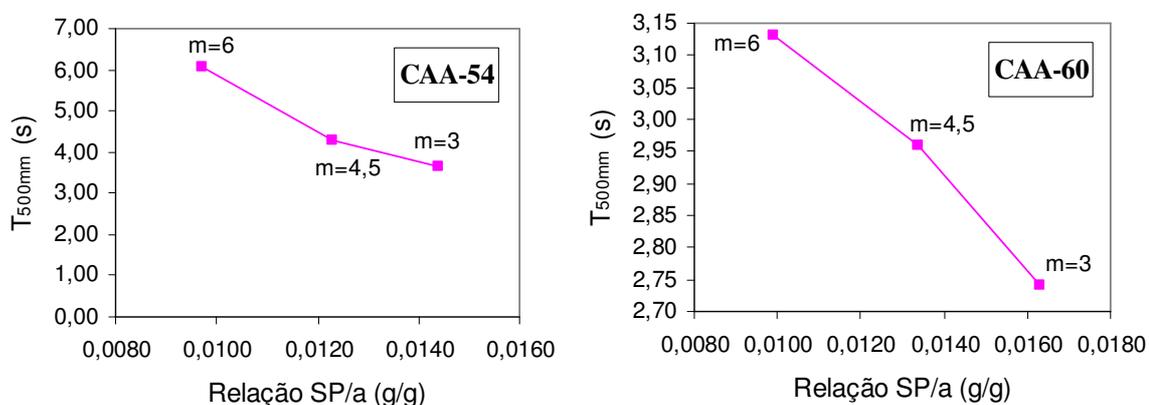


Figura 59: tendência de comportamento entre o  $T_{500\text{mm}}$  e a relação SP/água (etapa II)

### 6.1.3 Ensaio do funil V (*V-funnel test*)

Similar ao caso anterior, a maior parte dos traços, como mostram as figuras 60 e 61, teve comportamento aceitável, dentro do recomendado pela maioria dos pesquisadores (de 5 a 15 segundos). Cerca de 67% dos traços tiveram bom resultado quanto à recomendação do tempo de escoamento no funil V.

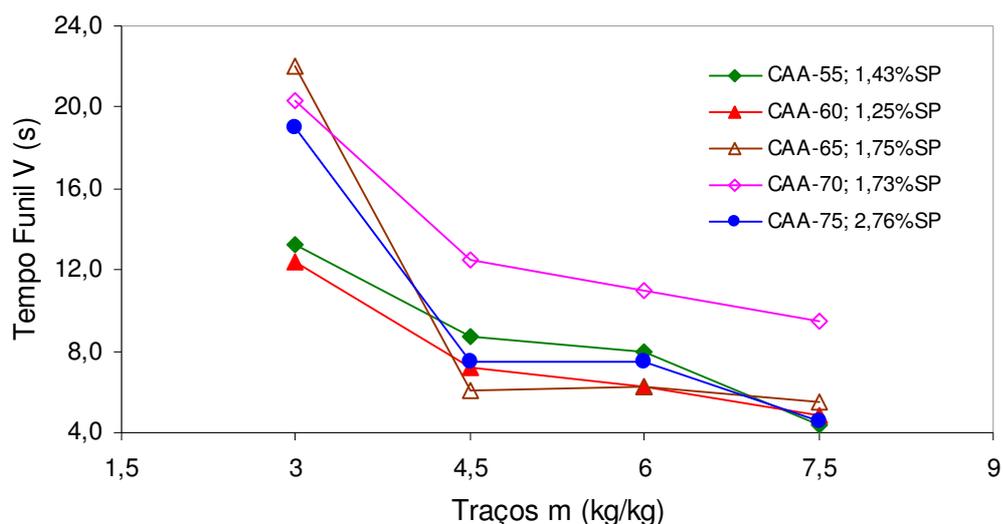


Figura 60: tempos de escoamento no funil V para os CAA's da etapa I

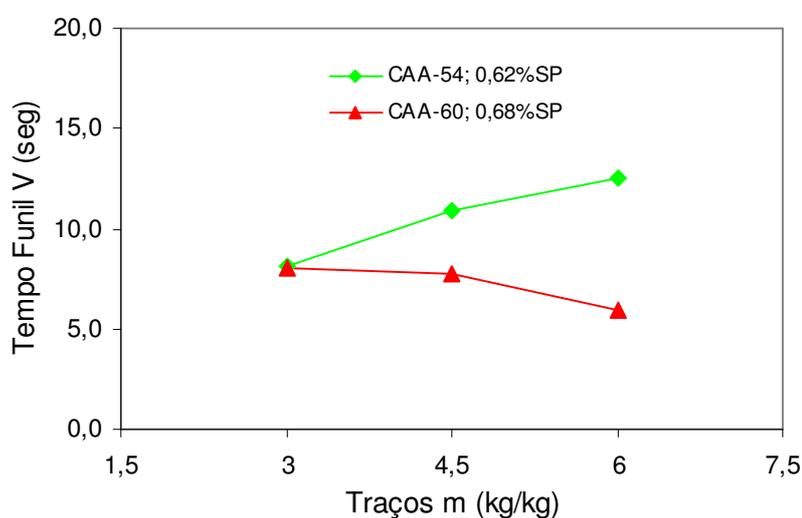


Figura 61: tempos de escoamento no funil V para os CAA's da etapa II

A figura 62, que mostra todos os resultados do ensaio de *V-funnel* da etapa I, apresenta três traços cujos tempos de escoamento foram superiores a 15 segundos. Para esse ensaio, a experiência de laboratório durante a pesquisa mostrou que misturas com tempos de escoamento acima dos 20 segundos geralmente estão segregando, e que um CAA com

adequada viscosidade deve apresentar um tempo de escoamento no funil V entre 7 a 12 segundos, para as condições de armadura simuladas.

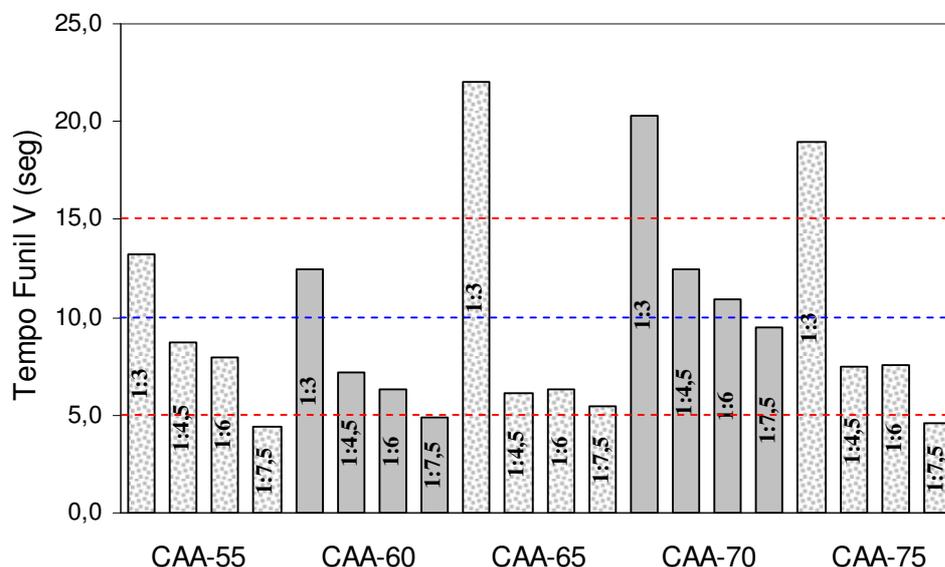


Figura 62: tempos de escoamento no funil V para todos os traços da etapa I

A figura 63 mostra apenas os resultados dos CAA-55 e CAA-60 que, para a pesquisa, apresentaram os melhores resultados relativos.

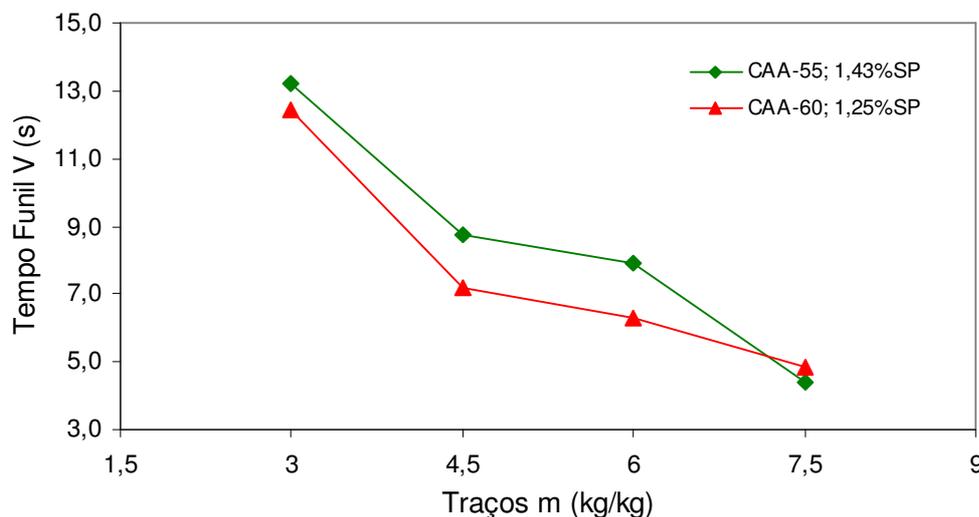


Figura 63: tempos de escoamento no funil V para CAA- 55 e CAA-60 (etapa I)

Os concretos produzidos na etapa II, conforme mostra a figura 64, tiveram excelentes resultados no ensaio do *V-funnel*. Uma vez mais, pelos resultados obtidos, destaca-se a importância do ajuste pelo traço intermediário haja vista a menor dispersão nos resultados deste ensaio, cuja execução é ilustrada na figura 65 com a *L-box* e com a *Box-shape*.

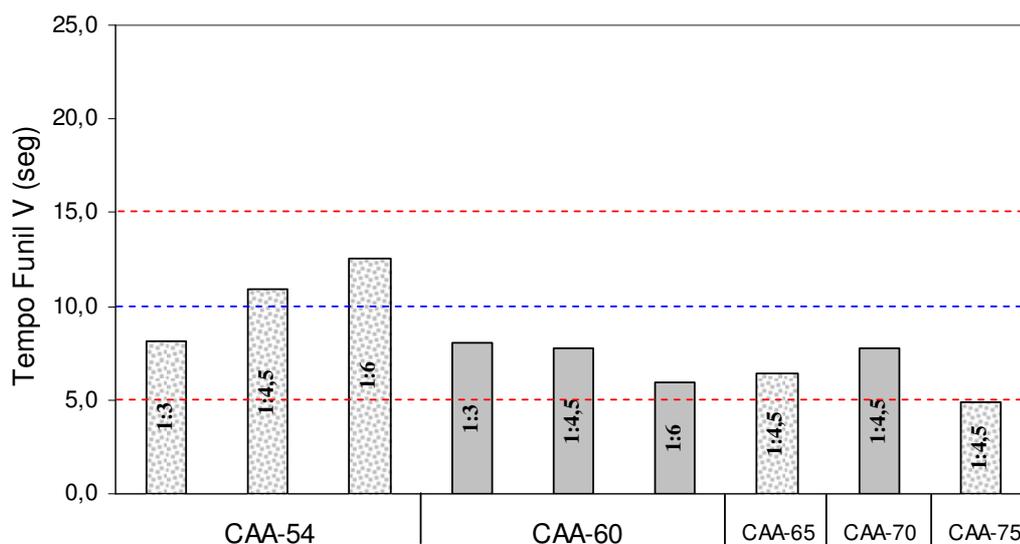


Figura 64: tempos de escoamento no funil V para os CAA's da etapa II

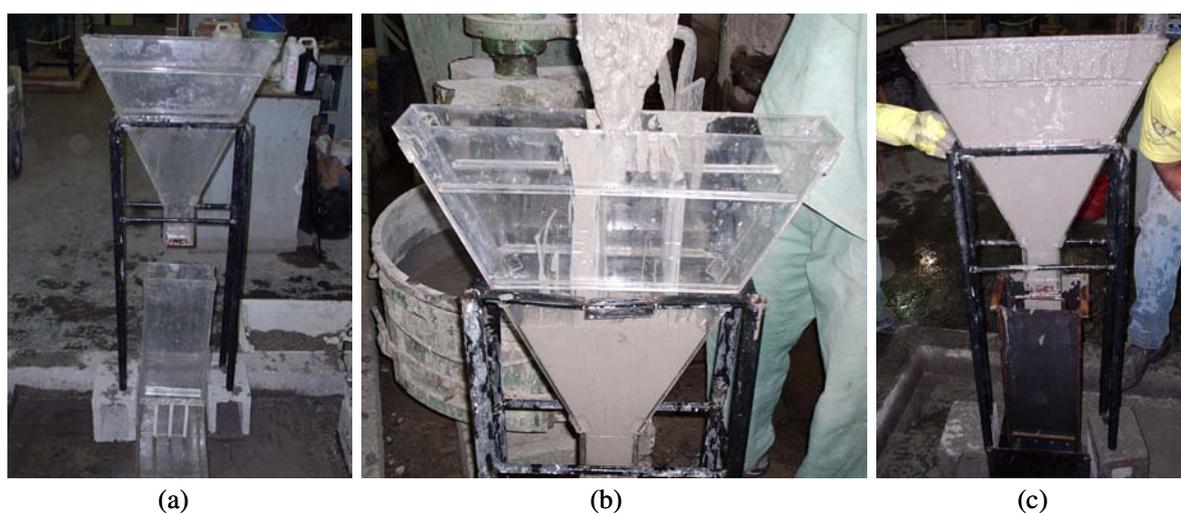


Figura 65: ensaio de escoamento no funil V com (a) molde vazio pronto com a *L-box*, (b) preenchimento do molde e (c) concreto escoando diretamente para dentro da *Box-shape*

Na figura 66 observa-se que o tempo de escoamento do CAA pelo *V-funnel* na etapa I tende a aumentar para os traços mais ricos, que são os traços que apresentam maior relação SP/a. Portanto, os traços  $m=3$  de todos os teores de argamassa podem ser considerados como mais viscosos em relação aos demais traços.

Lembra-se que o  $T_{500\text{mm}}$  na etapa I, discutido anteriormente, também foi maior para o traço  $m=3$  como o verificado agora com o tempo de escoamento no funil V, sugerindo, em princípio, que concretos com maiores  $T_{500\text{mm}}$  também terão tempos maiores no ensaio do funil.

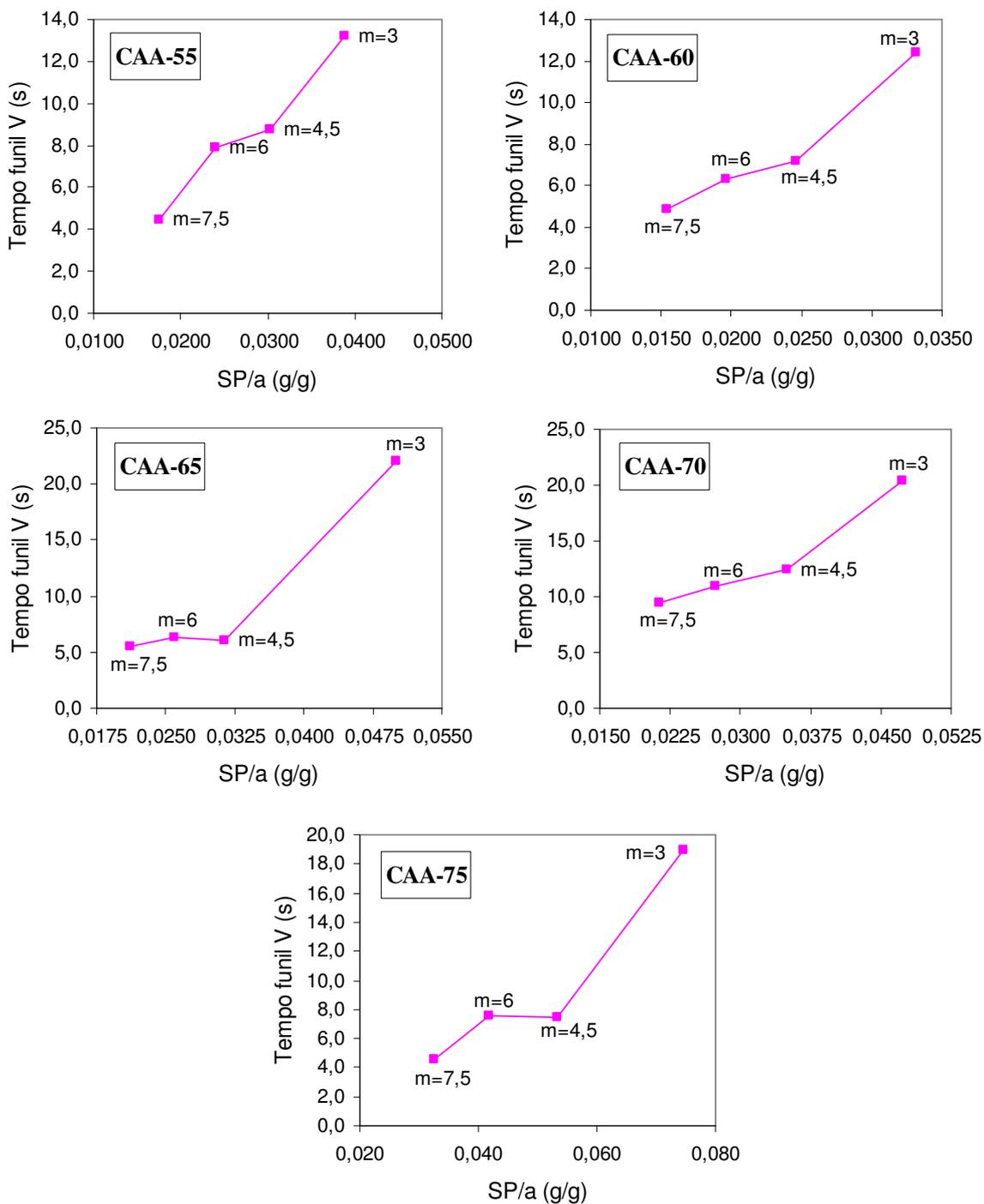


Figura 66: tempos de escoamento no funil V x relação SP/a para os CAA's da etapa I

Na figura 67 observa-se a mesma relação para os concretos produzidos na etapa II, só que desta vez apresentando comportamentos contrários. Para o CAA-54 o traço mais viscoso foi o m=6, enquanto que para o CAA-60 foi o traço m=3. Não se entende muito bem o porquê desse comportamento.

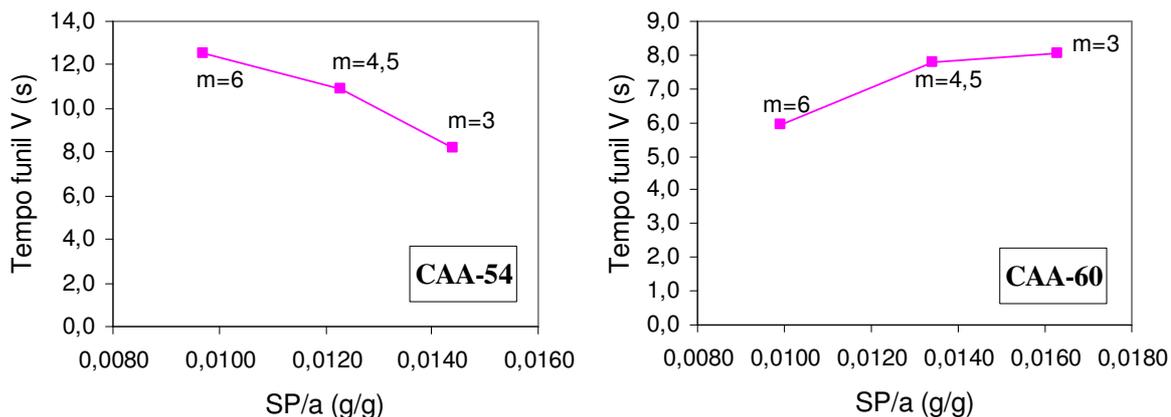


Figura 67: tempos de escoamento no funil V x relação SP/a para os CAA's da etapa II

#### 6.1.4 Ensaio da caixa (*Box-Shape test*) e Ensaio da *L-Box*

Os resultados obtidos nesses dois ensaios, apresentados nas figuras 68 e 69, foram positivos, uma vez que todos os 20 traços testados com a *Box-shape* alcançaram a altura mínima de 300 mm, assim como os 9 traços testados com a *L-box* tiveram a relação  $H_2/H_1$  maior ou igual a 0,80 (com exceção do traço 1:6 do CAA-54, que não teve fluidez suficiente). Isto significa que todos tiveram excelente deformabilidade e excelente capacidade de passar por aberturas estreitas, além da ótima capacidade de preenchimento.

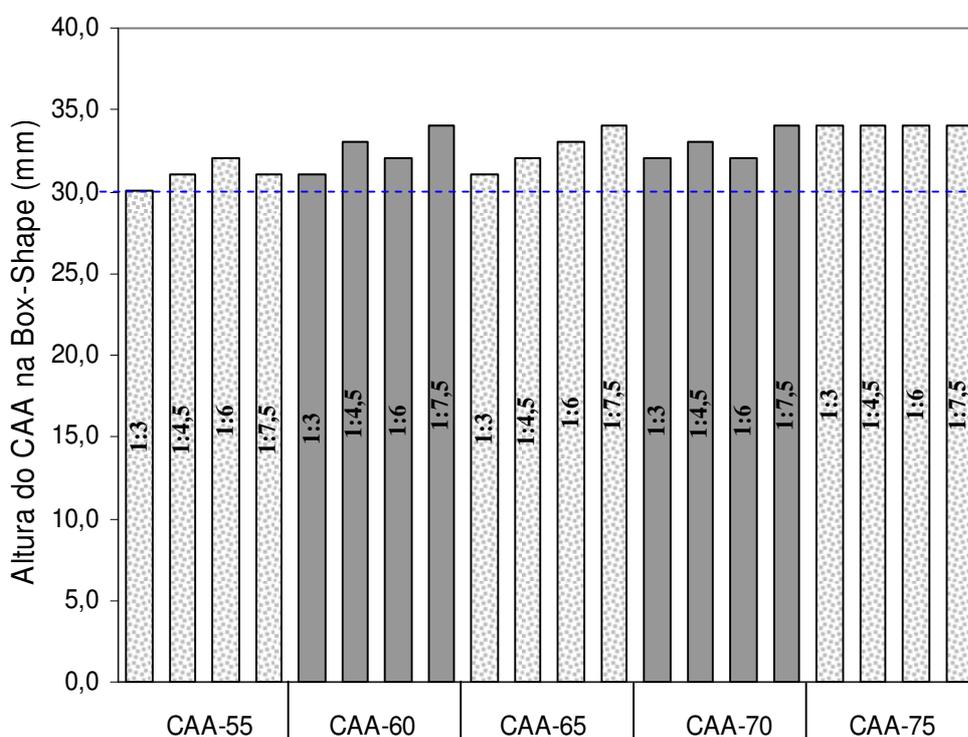


Figura 68: altura do CAA *Box-Shape* (etapa I)

Na figura 68 destaca-se que os quatro traços do teor de argamassa de 75% alcançaram uma altura máxima de 340 mm, pelo fato de possuírem o menor teor de brita, podendo mesmo ser chamados de argamassas com algumas partículas de brita em suspensão.

Conforme já mencionado no item 6.1.1, o traço 1:6 do CAA-54, na figura 69, apresentou diâmetro médio inferior a 600 mm no ensaio de espalhamento. Este mesmo traço foi o único, dos 9 traços ensaiados na etapa II, que teve seu espalhamento abaixo dos 600 mm e que teve também no ensaio da *L-box* a relação  $H_2/H_1$  inferior ao valor mínimo estabelecido e recomendado na literatura.

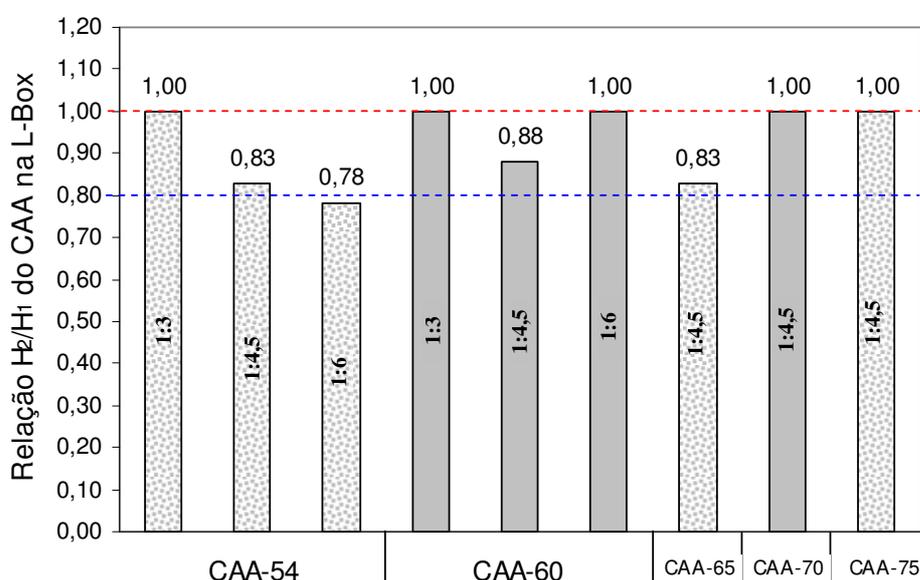


Figura 69: resultados do ensaio com a *L-box* para os CAA's da etapa II

A figura 70 ilustra como o CAA se comportou durante os ensaios com a *Box-shape* em função da sua composição. O concreto, ao passar de um lado para o outro, poderá passar livremente por entre as barras de aço sem que ocorra bloqueio, porém não alcançar a altura mínima de 300 mm. Por outro lado, se a mistura estiver segregando, somente a argamassa passará pelo obstáculo composto pelas barras de aço e, neste caso, ocorrerá o bloqueio, conforme mostra a figura 70(c).

As figuras 70(a) e 70(b) ilustram bem o caso do CAA bem dosado e ajustado com excelente comportamento no ensaio da *Box-shape*. Nota-se que as partículas de agregado graúdo aparecem em ambos os lados do aparato após o ensaio, o que representa que a brita e argamassa estão bem coesas (portanto, a brita está bem distribuída na argamassa).



Figura 70: exemplos do comportamento do CAA durante o ensaio na *Box-shape* (a) vista superior do aparato com excelente CAA (b) vista lateral do mesmo CAA e (c) detalhe do fenômeno de bloqueio do CAA segregado ao passar por entre as armaduras

Como no caso anterior, a figura 71 ilustra como o CAA pode se comportar durante o ensaio com *L-box*. A figura 71(a) mostra um concreto que passou através das barras para o outro, mas depois ocorreu bloqueio pela viscosidade inadequada. A figura 71(b) ilustra um concreto que passou por entre as barras de aço sem ocorrer bloqueio, porém não teve fluidez necessária para preencher a caixa convenientemente. Já a imagem da figura 71(c) ilustra um excelente CAA cuja relação entre alturas ( $H_2/H_1$ ) foi de 1,00.

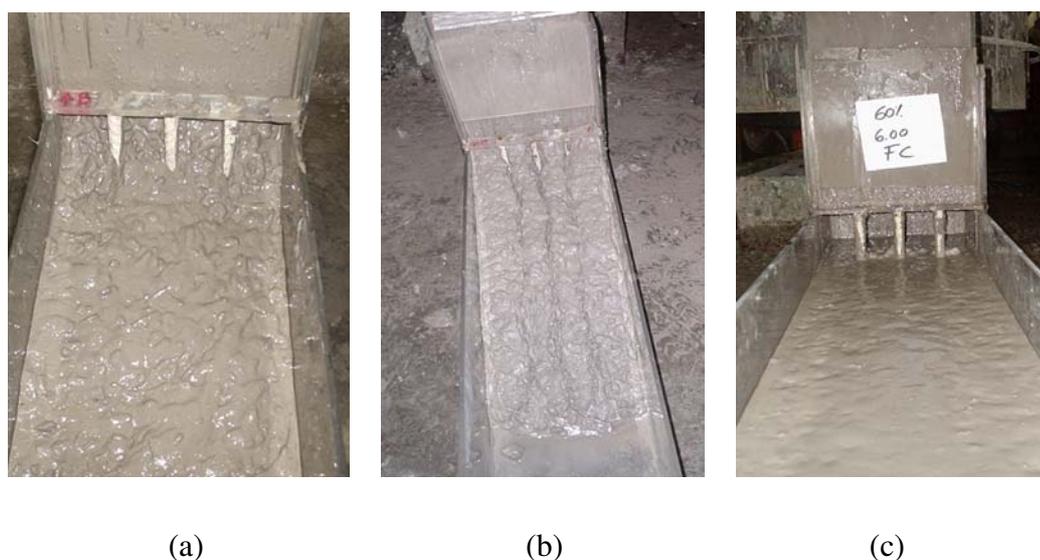


Figura 71: comportamento do CAA durante o ensaio na *L-box* em que (a) CAA passou pelo obstáculo mas ocorreu um pequeno bloqueio, (b) CAA passou pelo obstáculo sem bloqueio mas sem fluidez adequada e (c) CAA com excelente capacidade de preenchimento e de passar pelo obstáculo

Na figura 72 observa-se o comportamento da demanda de aditivo superplastificante (SP) em função do teor de argamassa da misturas. Na etapa I o ajuste de SP para cada família de CAA foi feito primeiramente para o traço mais pobre (1:7,5), fixando-se o valor obtido (em percentagem) para os outros traços, o que resultou em alto consumo de SP.

Já durante a etapa II esse ajuste de SP foi feito a partir do traço intermediário 1:4,5, o que garantiu uma considerável economia na demanda de SP. Portanto, recomenda-se que esse ajuste deva ser feito para o ponto central entre os que formam a família de determinado concreto a ser dosado.

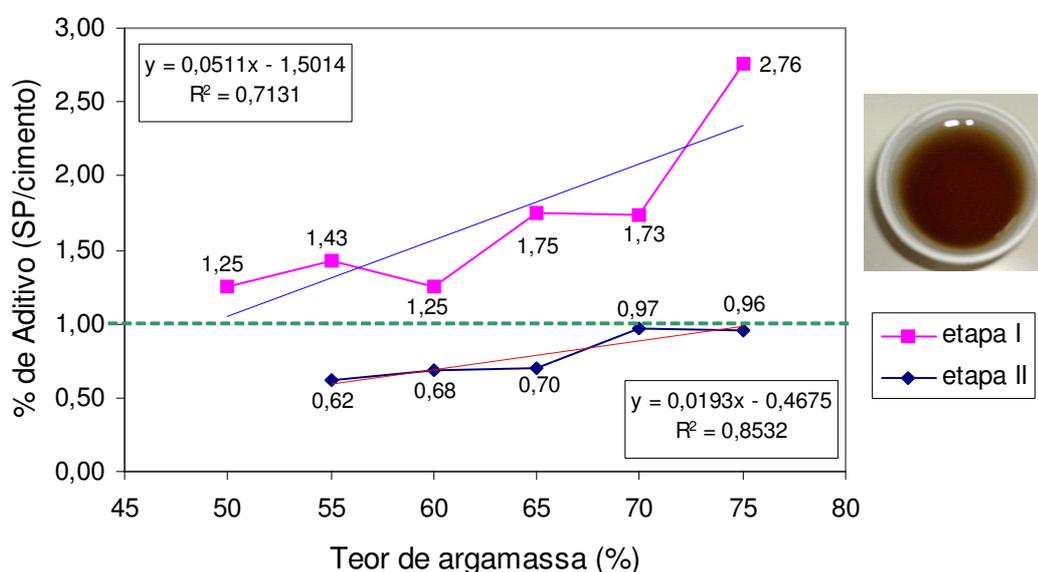


Figura 72: dosagem de aditivo SP em função do teor de argamassa

Em síntese, pode-se dizer sobre os ensaios realizados no estado fresco que o traço 1:7,5 não pareceu ser interessante em se tratando de dosagem de CAA e a diferença de 1,5 pontos entre os traços também é desaconselhada em virtude da sensibilidade dos parâmetros do CAA no estado fresco.

Notou-se a dificuldade em manter todos os parâmetros dentro de uma faixa pequena, por isso julga-se que se deve testar famílias com traços espaçados por 1 ponto (ou 0,75), por exemplo 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6, no máximo. Isso é extremamente importante quando se pretende obter pontos para formar uma mesma família de traços com curvas de dosagem bem ajustadas

## 6.2 ESTADO ENDURECIDO

Os resultados no estado endurecido aqui apresentados referem-se às principais propriedades mecânicas dos concretos analisadas neste estudo: resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias, resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, módulo de elasticidade dos concretos com traço  $m=4,5$  e o ensaio de ultra-som, realizado às mesmas idades e com os mesmos corpos-de-prova do ensaio de compressão axial para determinação da resistência à compressão.

### 6.2.1 Curvas de dosagem dos concretos

Nas figuras 73 a 80 estão representados os diagramas ou curvas de dosagem para os concretos produzidos, que correlacionam resistência à compressão, relação água/cimento, teor de agregados total (traço  $m$ )<sup>1</sup> e consumo de cimento por  $m^3$  de concreto. As curvas do CAA-55 e do CAA-75 indicam que nestes dois concretos houve um crescimento lento das resistências de suas primeiras idades, sendo os únicos com resistências entre os 15 e 30 MPa para as idades de 3 e 7 dias. Para o caso do CAA-75 julga-se que o motivo seja a alta dosagem de aditivo superplastificante que, como citam alguns autores (Nunes, 2001 apud Roncero et al, 2001), aumenta o tempo de início de pega e isso afeta diretamente a resistência nas primeiras idades.

Por outro lado, nota-se que as curvas dos concretos CAA-55, CAA-60 (da etapa I) e CAA-75 para a idade de 56 dias estão com uma região abaixo da curva de 28 dias sendo que para o caso do CAA-60 (etapa I) a curva de 56 dias está totalmente abaixo da de 28 dias. Foi verificado comportamento similar em dois concretos no estudo desenvolvido por Tutikian (2004). Não se sabe a explicação correta desse comportamento não esperado da resistência do concreto (pode ser devido à presença de água nos poros, propiciando o surgimento de uma poro-pressão durante o ensaio de compressão axial que pode afetar negativamente a resistência), mas o fato é que 8 dos 27 (29,6%) traços deste trabalho e 7 dos 28 (25%) avaliados por Tutikian (2004) apresentaram este comportamento. Salienta-se que foram utilizados os mesmos laboratórios e equipamentos, e os materiais aplicados também foram bastante semelhantes, com exceção do cimento, que no caso do estudo de Tutikian (2004) foi usado o cimento de alta resistência inicial (ARI-RS).

---

<sup>1</sup> Para CCV-REF:  $m = \text{brita} + \text{areia}$ ;

Para CAA:  $m = \text{brita} + \text{areia} + \text{fller calcário}$ .

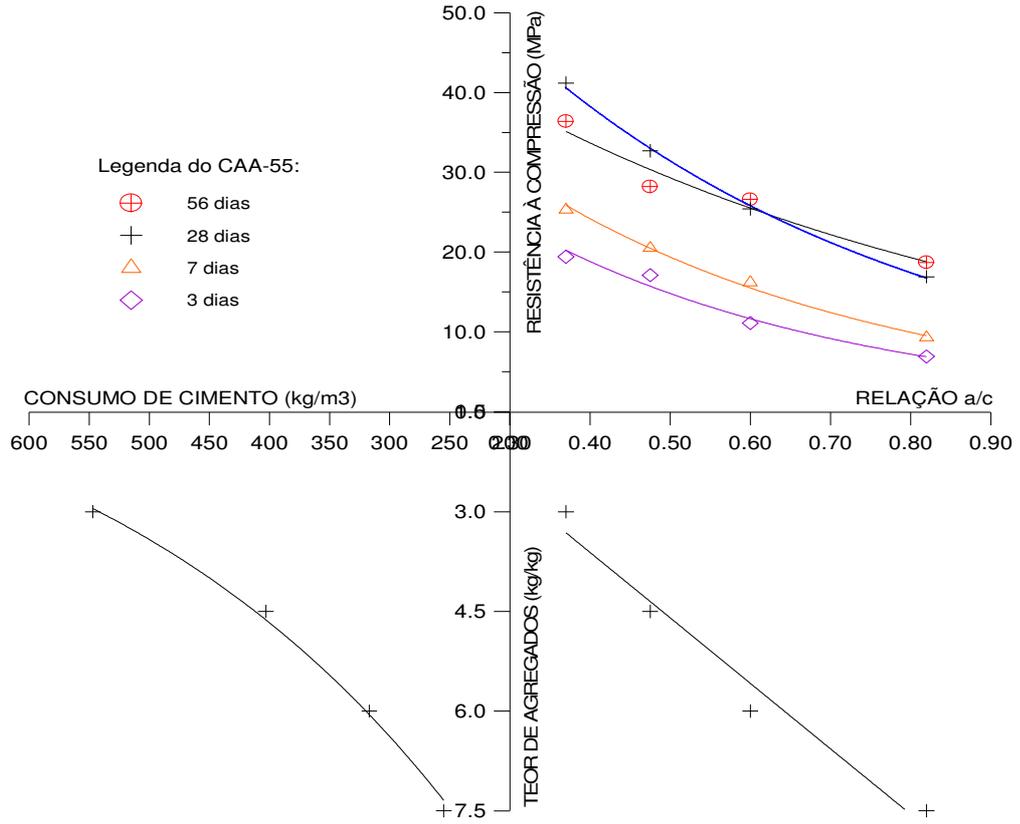


Figura 73: curva de dosagem do CAA-55

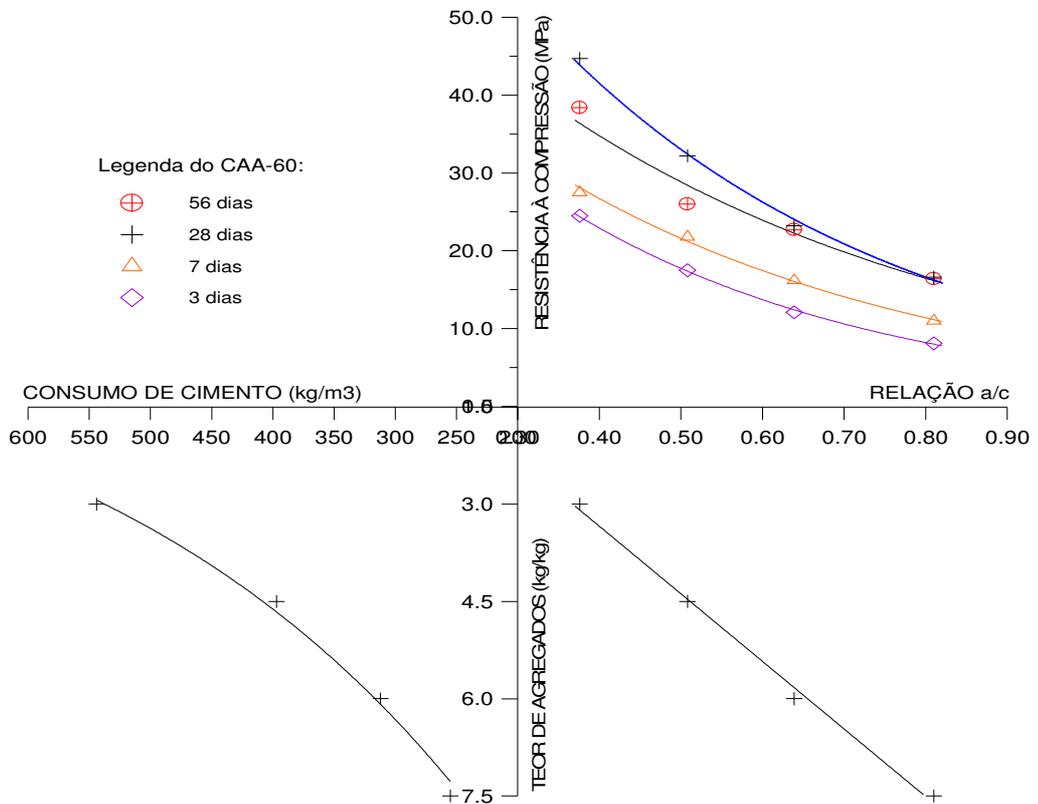


Figura 74: curva de dosagem do CAA-60 (etapa I)

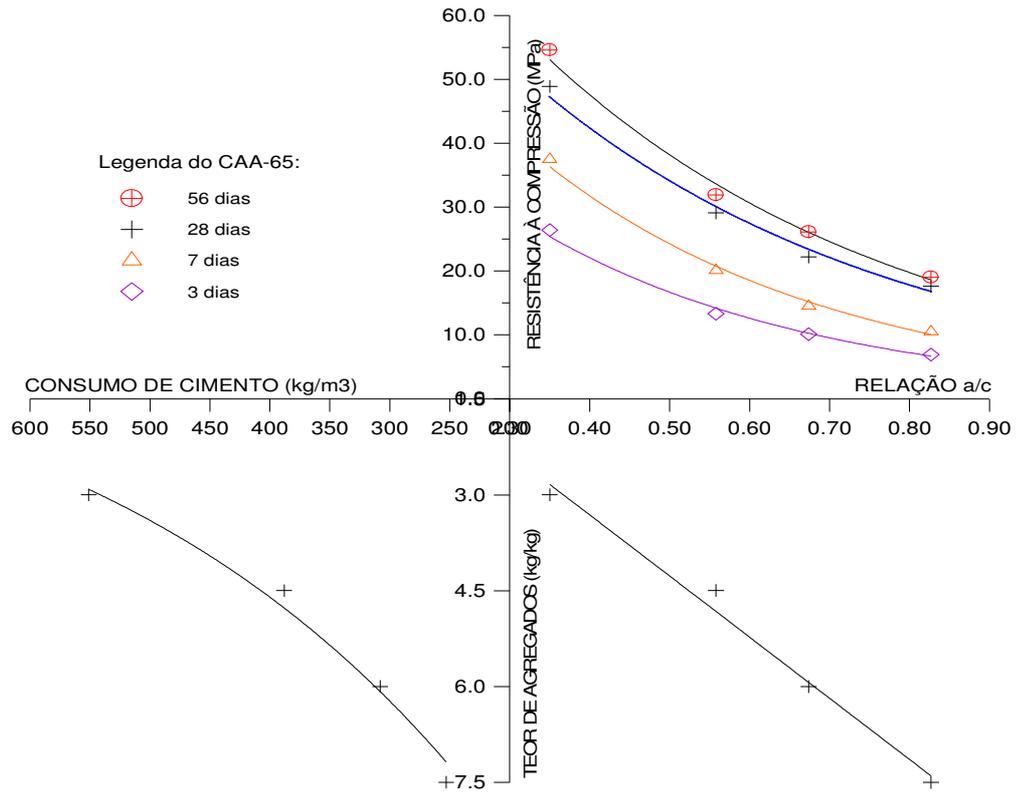


Figura 75: curva de dosagem do CAA-65

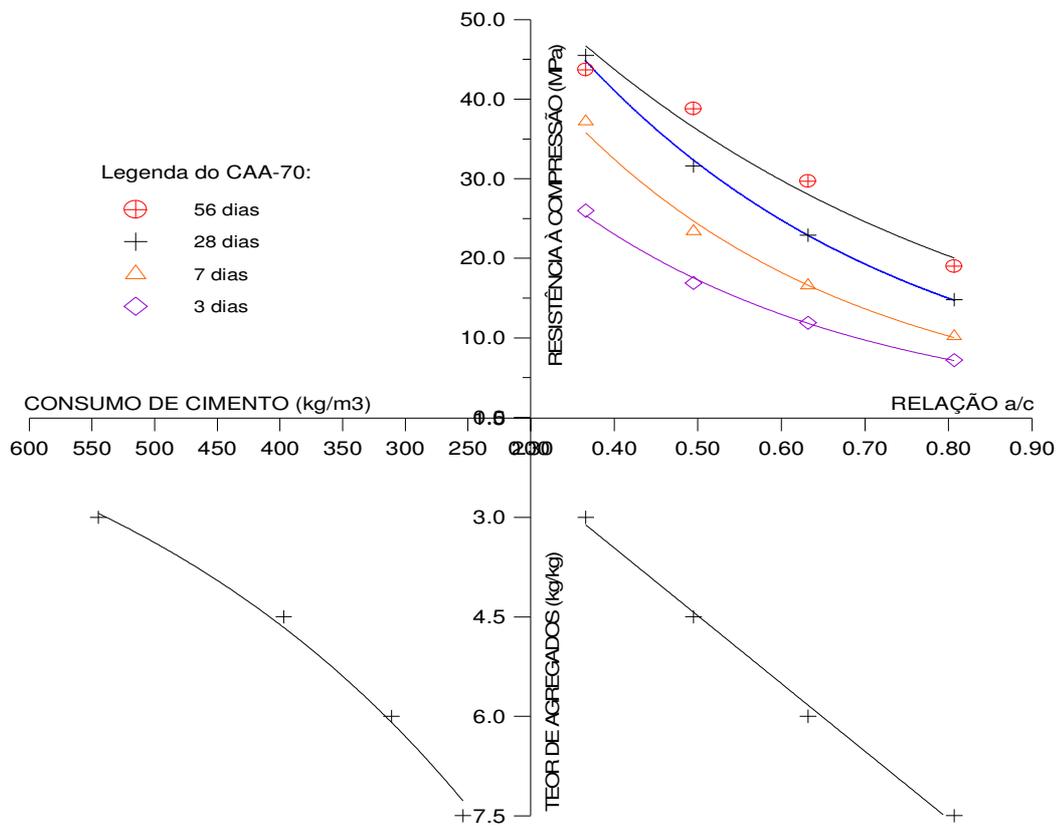


Figura 76: curva de dosagem do CAA-70

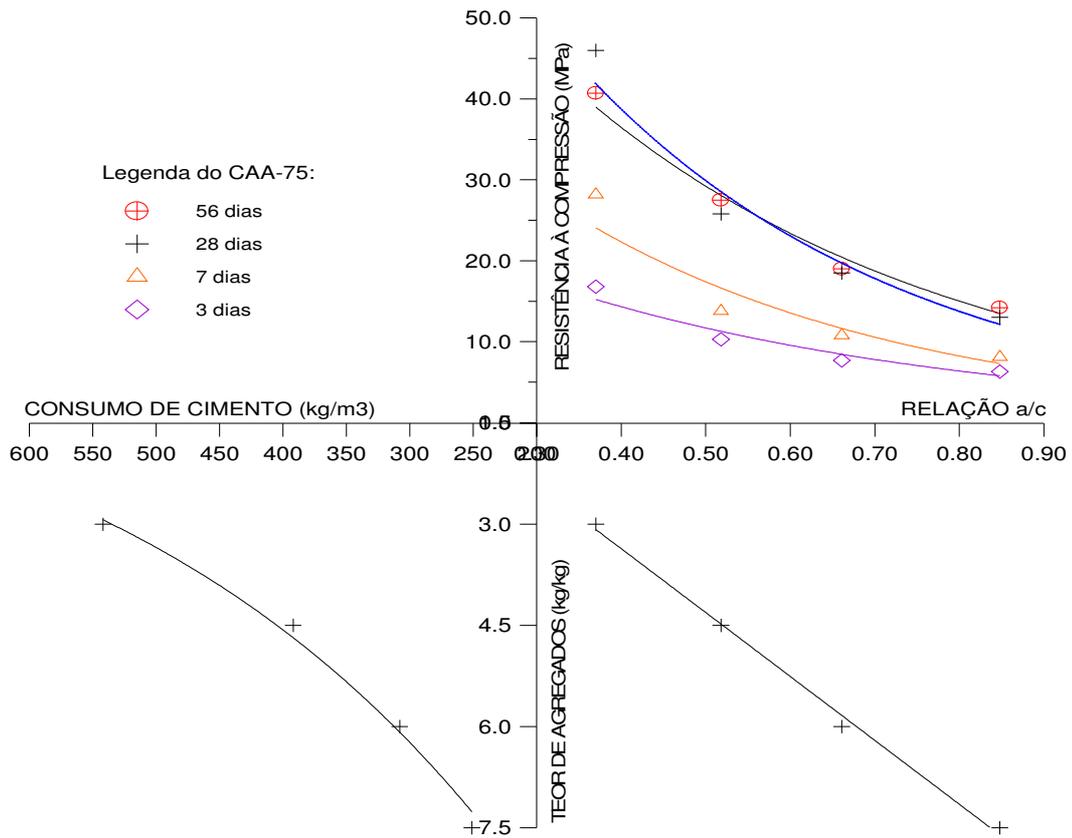


Figura 77: curva de dosagem do CAA-75

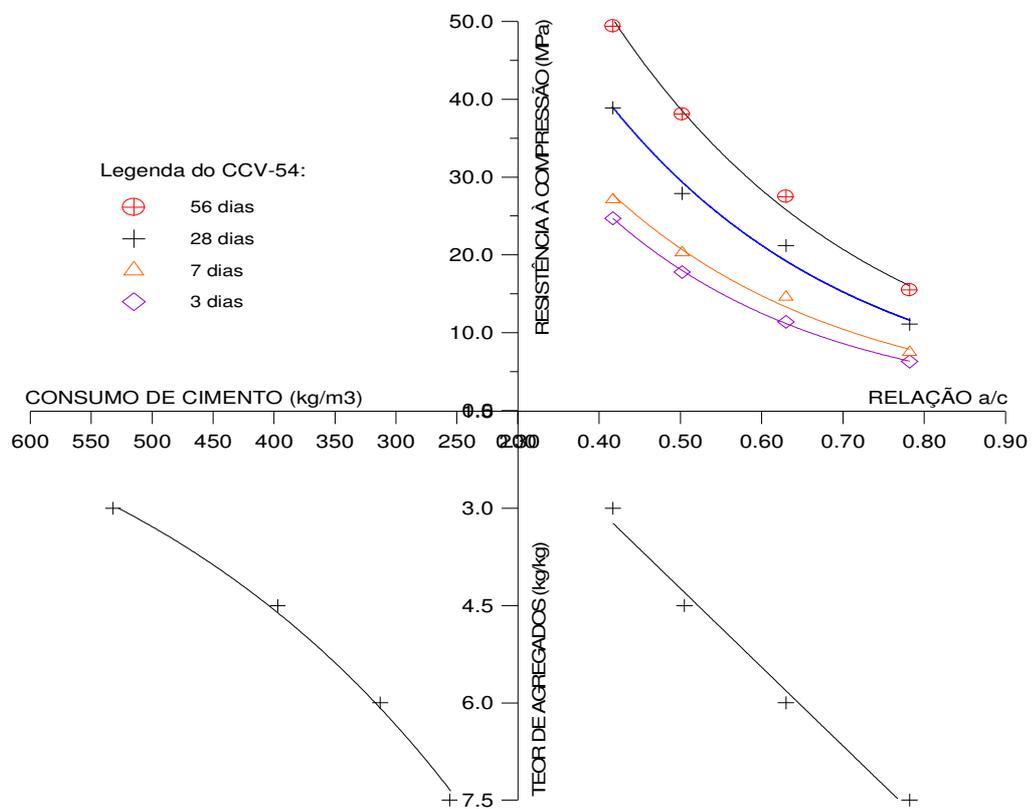


Figura 78: curva de dosagem do concreto convencional (CCV-54)

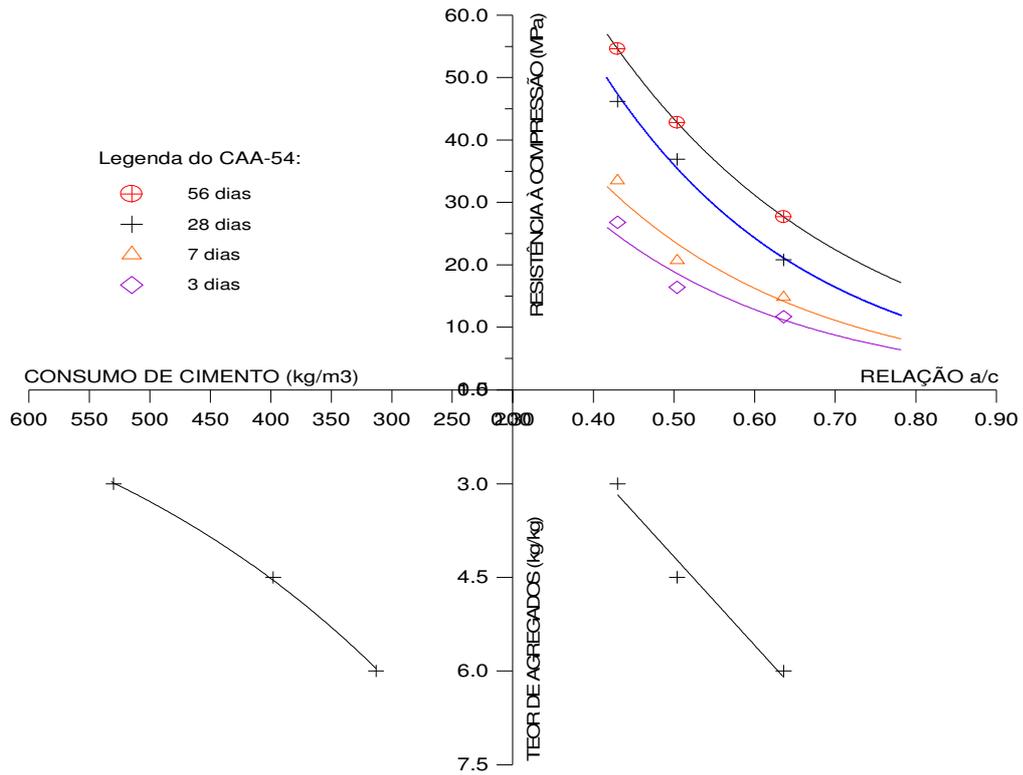


Figura 79: curva de dosagem do CAA-54

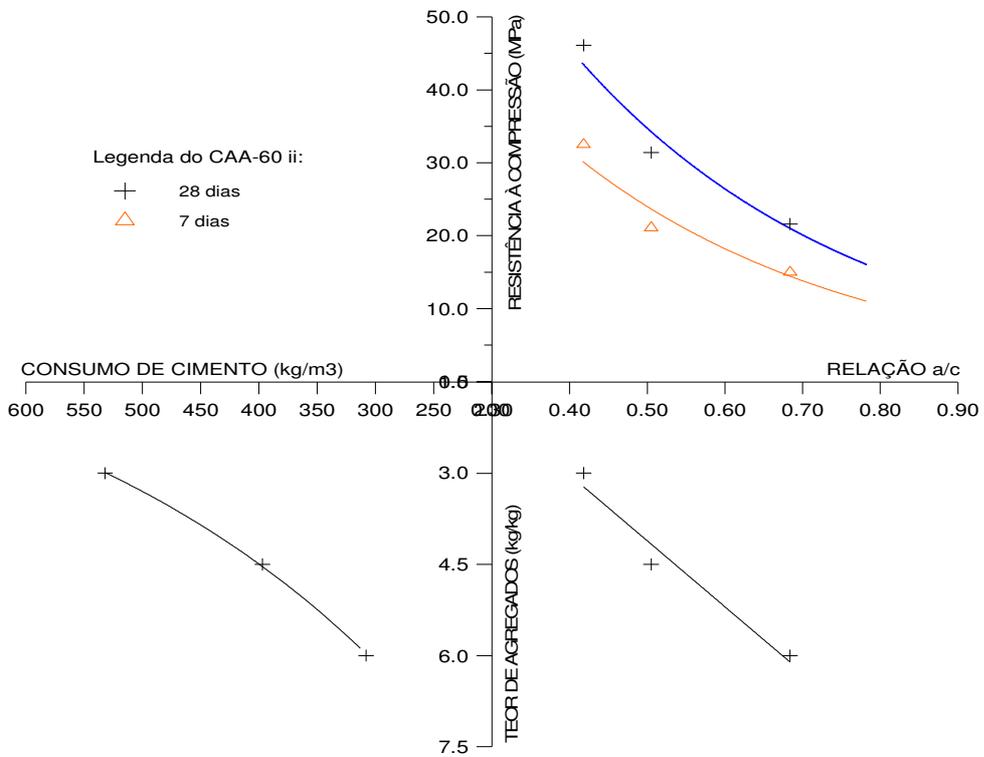


Figura 80: curva de dosagem do CAA-60 (etapa II)

Contudo, observando-se as curvas de dosagem, nota-se que os dados obtidos apresentam ajustes bem satisfatórios e dentro do esperado. Isso representa uma vantagem do método de dosagem utilizado, uma vez que com estes diagramas de dosagem tem-se uma faixa considerável de CAA, diferente de outros métodos que para cada estudo de dosagem buscam apenas um traço.

A seguir, na tabela 27, apresentam-se as equações das curvas de dosagem obtidas para cada concreto produzido, para a idade de 28 dias.

Tabela 27: equações e respectivos coeficientes de correlação das curvas de dosagem

CONCRETOS	Lei de Abrams	Lei de Lyse	Lei de Molinari
	$fcj = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$	$m = k_3 + k_4.a/c$	$C = \frac{1000}{k_5 + k_6.m}$
CAA-55	$f_{c28} = \frac{86,24}{7,52^{a/c}}$	$m = 9,84.a/c - 0,3246$	$C = \frac{1000}{0,47 + 0,451.m}$
	$r^2=0,9992$	$r^2=0,9839$	$r^2=0,9996$
CAA-60 (etapa I)	$f_{c28} = \frac{108,38}{10,72^{a/c}}$	$m = 10,42.a/c - 0,8277$	$C = \frac{1000}{0,46 + 0,458.m}$
	$r^2=0,9988$	$r^2=0,9977$	$r^2=0,9999$
CAA-65	$f_{c28} = \frac{108,37}{9,97^{a/c}}$	$m = 9,57.a/c - 0,5130$	$C = \frac{1000}{0,37 + 0,482.m}$
	$r^2=0,9964$	$r^2=0,9934$	$r^2=0,9996$
CAA-70	$f_{c28} = \frac{103,35}{8,35^{a/c}}$	$m = 10,21.a/c - 0,6259$	$C = \frac{1000}{0,44 + 0,462.m}$
	$r^2=0,9683$	$r^2=0,9973$	$r^2=0,9999$
CAA-75	$f_{c28} = \frac{136,84}{20,51^{a/c}}$	$m = 9,47.a/c - 0,4271$	$C = \frac{1000}{0,43 + 0,471.m}$
	$r^2=0,9876$	$r^2=0,9980$	$r^2=0,9999$
CCV-54	$f_{c28} = \frac{145,98}{24,51^{a/c}}$	$m = 12,13.a/c - 1,8263$	$C = \frac{1000}{0,55 + 0,442.m}$
	$r^2=0,9927$	$r^2=0,9931$	$r^2=0,9998$
CAA-54	$f_{c28} = \frac{235,72}{42,78^{a/c}}$	$m = 14,19.a/c - 2,9251$	$C = \frac{1000}{0,59 + 0,430.m}$
	$r^2=0,9953$	$r^2=0,9870$	$r^2=0,9997$
CAA-60 (etapa II)	$f_{c28} = \frac{157,62}{20,49^{a/c}}$	$m = 10,84.a/c - 1,3097$	$C = \frac{1000}{0,54 + 0,446.m}$
	$r^2=0,9779$	$r^2=0,9806$	$r^2=0,9994$

## 6.2.2 Consumo de cimento dos concretos

O consumo de cimento, para os traços entre 1:3 e 1:7,5, variou aproximadamente entre os 250 e 550 kg por metro cúbico de concreto. Pelas figuras 81 e 82, nota-se que o consumo de cimento por teor de argamassa é praticamente constante para os mesmos traços, ou seja, o aumento do teor de argamassa não aumenta o consumo de cimento quando comparado com um teor de argamassa inferior do mesmo traço.

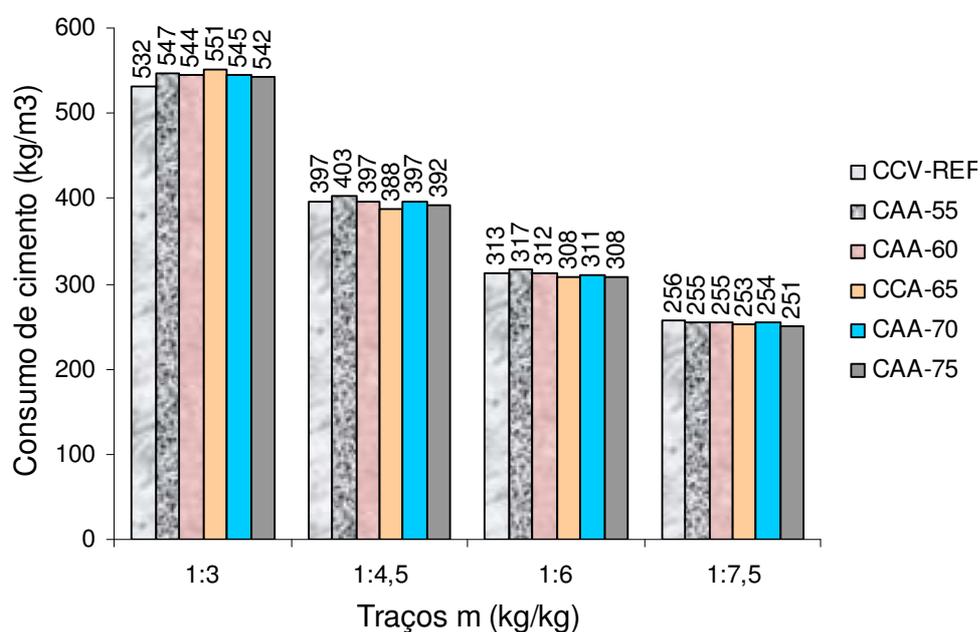


Figura 81: consumo de cimento dos concretos da etapa I

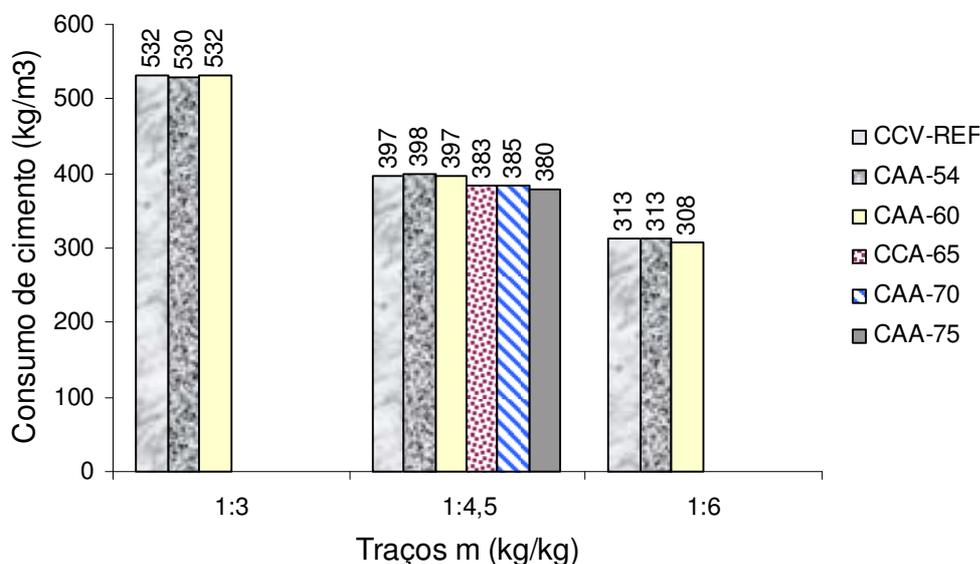


Figura 82: consumo de cimento dos concretos da etapa II

Para compreender melhor a situação do consumo de cimento por teor de argamassa, estabeleceu-se para uma mistura hipotética, a quantidade total de 1000 kg de material (cimento, fíler, areia e brita) e foram calculadas as quantidades de cada material para o traço 1:3 para os cinco teores de argamassa diferentes (54, 60, 65, 70 e 75%).

Os resultados obtidos estão ilustrados na figura 83, onde se nota que a quantidade de cimento é constante para os cinco teores de argamassa, praticamente o mesmo que o ilustrado nas figuras 81 e 82 (com as devidas diferenças entre os valores em virtude da influência das relações a/c e da dosagem de aditivo para cada teor de argamassa). Já a quantidade de brita diminui, enquanto que a areia e o fíler aumentam com o acréscimo do teor de argamassa.

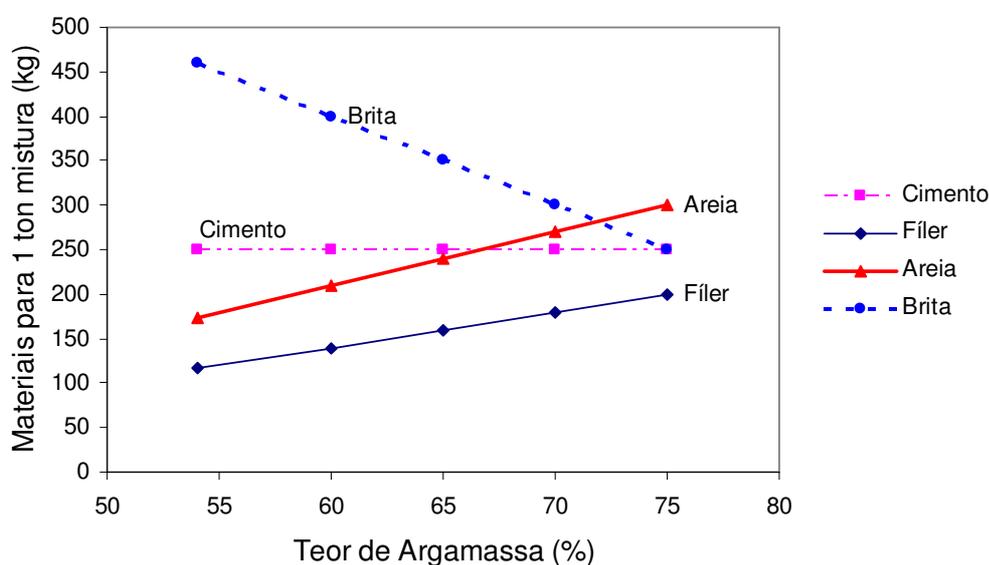


Figura 83: exemplo de consumo de cimento (constante) para o traço 1:3 com diferentes teores de argamassa

Depois, com os custos unitários reais dos mesmos materiais e a partir do consumo de materiais para a mistura hipotética foram calculados os custos para os teores de argamassa considerados. Observa-se na figura 84 que o custo total dos materiais, que estão ilustrados na figura 85, aumenta com o incremento do teor de argamassa.

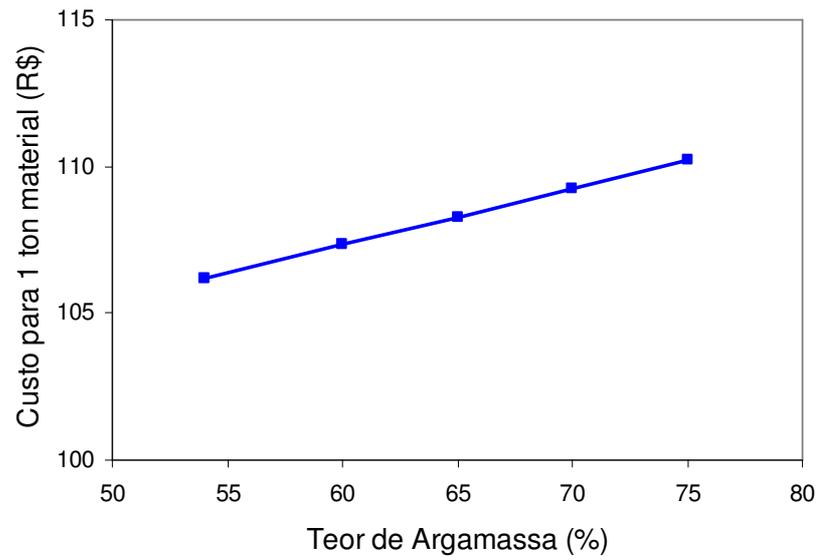


Figura 84: custo total de materiais para o traço 1:3 do exemplo anterior

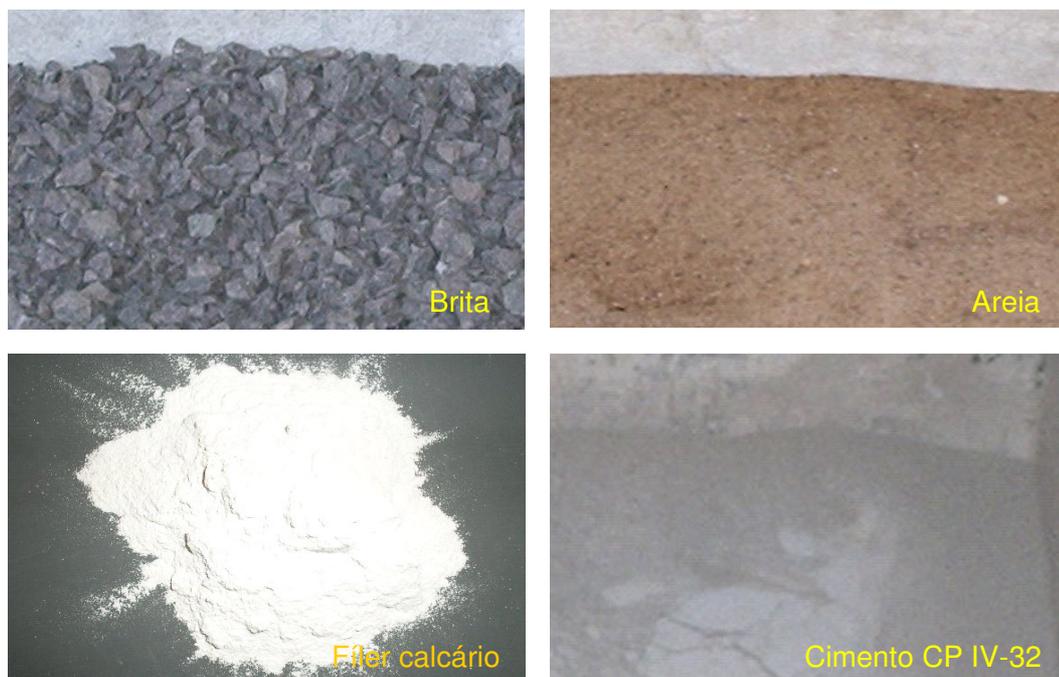


Figura 85: materiais utilizados

### 6.2.3 Resistências à compressão e à tração

A tabela 28 apresenta as médias da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias e da resistência à tração aos 28 dias dos concretos produzidos na etapa I, além da relação entre estas resistências. A evolução da resistência à compressão ao longo do tempo será abordada na seção 6.2.4.

Tabela 28: resistências à compressão e à tração dos concretos CCV-REF e CAA's da etapa I, e relação entre resistências

Concretos estudados	Traço 1:m	Relação a/c	SP/cim. (%)	Resistência à compressão, $f_{cm}$ (MPa)				Resist. à tração, $f_{tm}$ 28 dias (MPa)	$f_{tm}/f_{cm}$ $f_{tm,28}/f_{cm,28}$
				3 dias	7 dias	28 dias	56 dias		
CCV-REF $\alpha = 54\%$	1:3	0,417	0,00	24,7	27,1	38,90	49,4	2,49	0,06
	1:4,5	0,502		17,8	20,3	27,90	38,1	1,96	0,07
	1:6	0,630		11,4	14,6	21,20	27,5	1,93	0,09
	1:7,5	0,782		6,3	7,5	11,10	15,5	1,09	0,10
CAA $\alpha = 55\%$	1:3	0,370	1,43	19,4	25,3	41,20	36,4	2,78	0,07
	1:4,5	0,475		17,1	20,5	32,70	28,2	2,02	0,06
	1:6	0,600		11,1	16,2	25,40	26,7	2,21	0,09
	1:7,5	0,820		6,9	9,3	16,90	18,7	1,54	0,09
CAA $\alpha = 60\%$	1:3	0,376	1,25	24,5	27,5	44,70	38,4	3,40	0,08
	1:4,5	0,508		17,5	21,8	32,20	26,0	2,91	0,09
	1:6	0,639		12,1	16,2	23,20	22,7	1,89	0,08
	1:7,5	0,810		8,1	11,0	16,60	16,4	1,33	0,08
CAA $\alpha = 65\%$	1:3	0,350	1,75	26,4	37,5	48,90	54,6	2,83	0,06
	1:4,5	0,558		13,3	20,1	29,10	31,9	2,38	0,08
	1:6	0,674		10,1	14,5	22,20	26,1	2,36	0,11
	1:7,5	0,827		6,9	10,5	17,60	19,0	1,46	0,08
CAA $\alpha = 70\%$	1:3	0,366	1,73	26,0	37,2	45,50	43,7	4,26	0,09
	1:4,5	0,495		16,9	23,4	31,60	38,8	2,51	0,08
	1:6	0,632		11,9	16,6	22,90	29,7	2,15	0,09
	1:7,5	0,807		7,2	10,2	14,80	19,0	1,14	0,08
CAA $\alpha = 75\%$	1:3	0,370	2,76	16,8	28,2	46,0	40,7	2,47	0,05
	1:4,5	0,518		10,3	13,8	25,8	27,5	1,59	0,06
	1:6	0,661		7,7	10,8	18,5	19,0	1,46	0,08
	1:7,5	0,848		6,3	8,1	13,0	14,2	1,04	0,08
OBS:				2 CP's	3 CP's	2 CP's	2 CP's	3 CP's	

Os CAA's apresentaram propriedades mecânicas (resistências à compressão e à tração) relativamente superiores às do CCV-REF, excetuando o CAA-75 que, em alguns casos, teve comportamento similar ao do CCV-REF. Essa superioridade se deve, em princípio, à melhor

homogeneidade da estrutura interna proporcionado pelos CAA's, além do fato de não sofrerem influência da variabilidade decorrente do adensamento mecânico (vibração).

Quanto às relações entre as resistências à tração e à compressão pode-se afirmar que os resultados foram bem similares, tanto para o CCV como para o CAA. Esta relação, em média, resultou no valor de 0,08, ou seja a tração representando 8% da compressão, que é um valor bastante parecido com os valores encontrados por Tutikian (2004).

Observando a figura 86 e comparando os CAA's entre si, nota-se que não houve nenhum comportamento padrão definido da resistência à compressão. Porém, no traço  $m=3$ , a resistência à compressão aumentou com o incremento do teor de argamassa (do CAA-55 ao CAA-65; ainda assim os CAA-70 e CAA-75 foram ligeiramente superiores ao CAA-60). O CAA-65 superou o CAA-55, CAA-60, CAA-70 e o CAA-75 em 18,7%, 9,4%, 7,5% e 6,3%, respectivamente.

Em relação ao CCV-REF, o CAA-65 teve resistência 25,7% superior no traço 1:3. Ainda nesse mesmo traço, nota-se certo equilíbrio entre os teores de argamassa de 60, 70 e 75%, cujas diferenças entre si não passaram dos 3%.

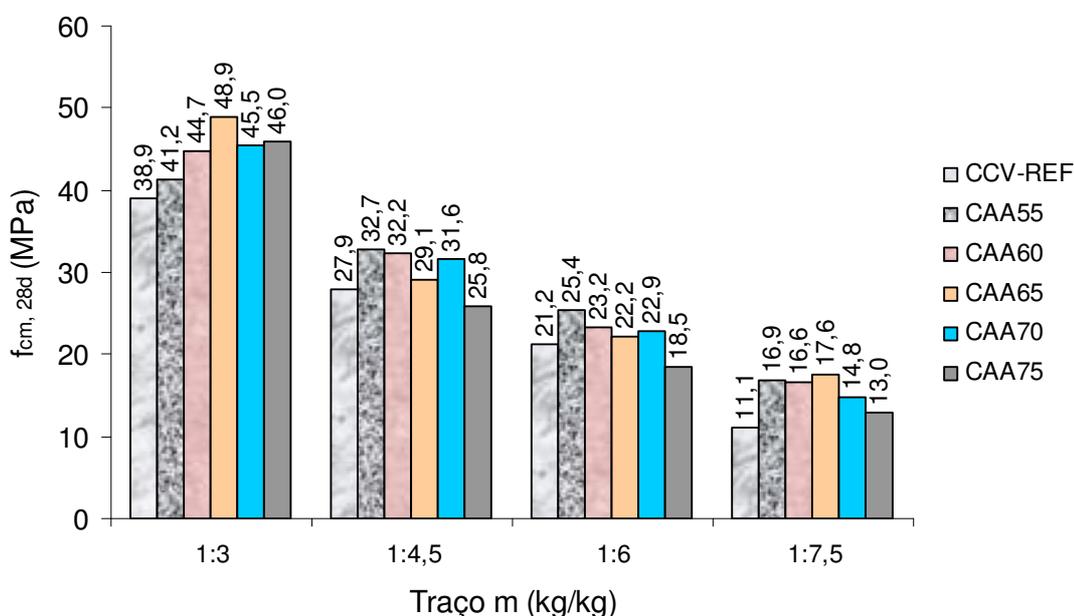


Figura 86: resistência média a compressão aos 28 dias (etapa I)

Para os traços  $m=4,5$  a  $m=7,5$  verifica-se que a resistência diminuiu com o aumento do teor de argamassa. Apenas o teor de argamassa de 70%, nos traços  $m=4,5$  e  $m=6$ , e o teor de

argamassa de 65%, no traço  $m=7,5$ , não seguiram a mesma tendência. O CAA-55 foi o que teve os melhores resultados, com exceção no traço  $m=7,5$  onde o CAA-65 foi 4% superior.

Verifica-se que os teores de argamassa de 55% (CAA-55) e 60% (CAA-60) apresentam resultados bem similares nos traços  $m=4,5$  e  $m=7,5$ , e que o CAA-60 no traço  $m=3$  foi 8,5% superior ao CAA-55, enquanto que o CAA-55 foi 9,5% superior no traço  $m=6$ .

Em relação ao CCV-REF, o CAA-55 foi superior em todos os traços, com percentagens de 5,9%, 17,2%, 19,8% e 52,3%, para  $m=3$ ,  $m=4,5$ ,  $m=6$  e  $m=7,5$ , respectivamente.

Com exceção do traço  $m=3$ , onde apresentou o segundo melhor resultado, o teor de argamassa de 75% (CAA-75), entre os CAA's, teve o pior desempenho nos traços estudados, sendo inclusive superado pelo CCV-REF nos traços  $m=4,5$  e  $m=6$ , em 8 e 14,6%, respectivamente.

Na figura 87, onde são apresentados os resultados da resistência média à tração aos 28 dias, nota-se que em cada um dos quatro traços, um teor de argamassa diferente obteve o melhor resultado. No traço  $m=3$  o CAA-70 teve o melhor desempenho, no traço  $m=4,5$  foi o CAA-60, no traço  $m=6$  foi o CAA-65 e no traço  $m=7,5$  o melhor foi o CAA-55.

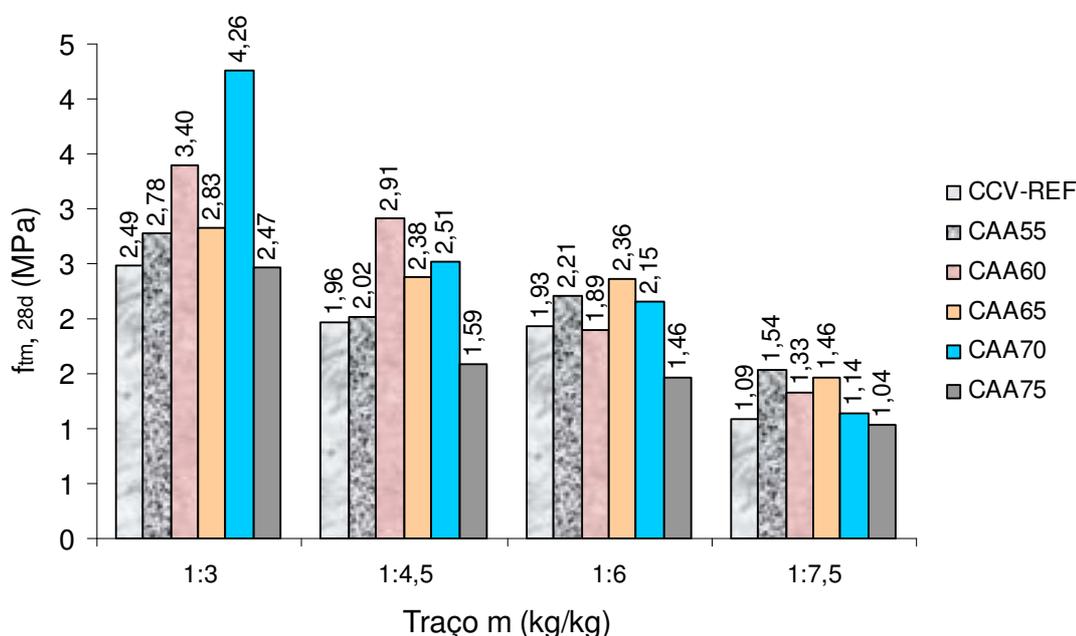


Figura 84: resistência média a tração aos 28 dias (etapa I)

Apesar do ensaio de tração se tratar de um ensaio que apresenta tradicionalmente bastante variabilidade nos resultados, observa-se um comportamento parecido com o observado na figura 83, ou seja, certa tendência de no traço  $m=3$  a resistência aumentar à medida que o teor

de argamassa aumenta (com exceção dos CAA-65 e CAA-75). Com algumas exceções, a suave tendência se inverte para os outros traços, ou seja, há diminuição da resistência quando o teor de argamassa aumenta.

Como no caso da resistência à compressão, onde apresentou os piores resultados em 3 traços entre os CAA's, o CAA-75 obteve o pior desempenho à tração em todos os traços. Esse comportamento reforça a idéia de se evitar CAA's com altos teores de argamassa.

Assim como na etapa I, os resultados das resistências à compressão e à tração dos CAA's produzidos na etapa II, apresentados na tabela 29 e nas figuras 88 e 89, foram superiores às do CCV-REF. As relações entre as resistências à tração e à compressão também se mantiveram com valores similares aos dos valores da etapa I.

Tabela 29: resultados das resistências à compressão e à tração dos concretos CCV-REF e CAA da etapa II, e relação entre resistências

Concretos estudados	Traço l:m	Relação a/c	SP/cim. (%)	Resistência à compressão, f <sub>cm</sub> (MPa)				Resist. à tração, f <sub>tm</sub> 28 dias (MPa)	f <sub>tm</sub> /f <sub>cm</sub> f <sub>tm,28</sub> /f <sub>cm,28</sub>
				3 dias	7 dias	28 dias	56 dias		
CCV-REF α = 54%	3	0,417	0,00	24,7	27,1	38,9	49,4	2,49	0,06
	4,5	0,502		17,8	20,3	27,9	38,1	1,96	0,07
	6	0,630		11,4	14,6	21,2	27,5	1,93	0,09
CAA-54	3	0,430	0,62	26,8*	33,5	46,2	54,6	2,62	0,05
	4,5	0,504		16,4*	20,7	36,9	42,8	2,37	0,06
	6	0,636		11,7*	14,8	20,8	27,7	1,83	0,08
CAA-60	3	0,418	0,68	-	32,5	46,1	-	1,96	0,05
	4,5	0,505		-	21,1	31,4	-	1,86	0,06
	6	0,684		-	15	21,6	-	1,42	0,07
CAA-65	4,5	0,595	0,70	-	19,6	27,5	-	2,02	0,07
CAA-70	4,5	0,570	0,97	-	19,6	28,8	-	1,77	0,06
CAA-75	4,5	0,601	0,96	-	18,8	27,4	-	2,37	0,08
OBS:				2 CP's	2 CP's	3 CP's	2 CP's	3 CP's	

\*4 dias

Na figura 88 observa-se o comportamento do CAA-54 e do CCV-REF (ou CCV-54) quanto às suas resistências à compressão. Para o mesmo teor de argamassa, o CAA foi superior ao CCV nos traços m=3 e m=4,5 com diferenças de 18,8% e 32,2%, respectivamente. No traço m=6 o CCV-54 foi praticamente igual ao CAA-60 e cerca de 2% superior ao CAA-54.

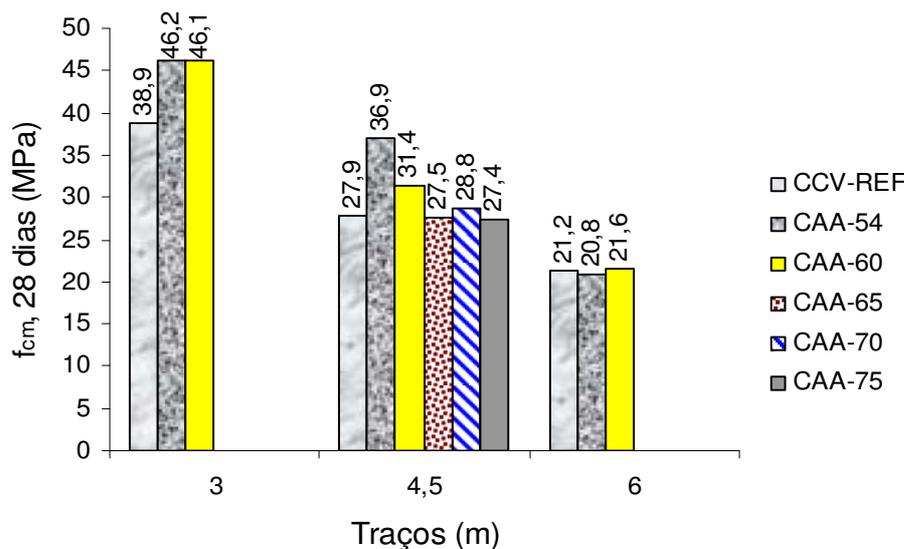


Figura 88: resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da etapa II

Para o traço  $m=4,5$ , o CAA-54 foi superior aos demais concretos. O CAA-60, que foi superado pelo CAA-54 em 17,5%, foi o segundo melhor nesse traço. Os outros quatro concretos, o CCV-54, CAA-65, CAA-70 e CAA-75, apresentaram resistências bem similares entre si. No traço 1:6 as resistências dos CCV-REF, CAA-54 e CAA-60 foram bem similares e tiveram diferença máxima abaixo dos 4%.

Quanto à resistência à tração da etapa II, cujos resultados estão ilustrados na figura 89, uma vez mais, verifica-se um equilíbrio entre o CAA-54 e o CAA-60, nos traços  $m=3$  e  $m=6$ . Apenas no traço  $m=4,5$  em que o CAA-54 e CAA-75 foram os melhores, o CAA-60 foi superado em 27% pelo CAA-54.

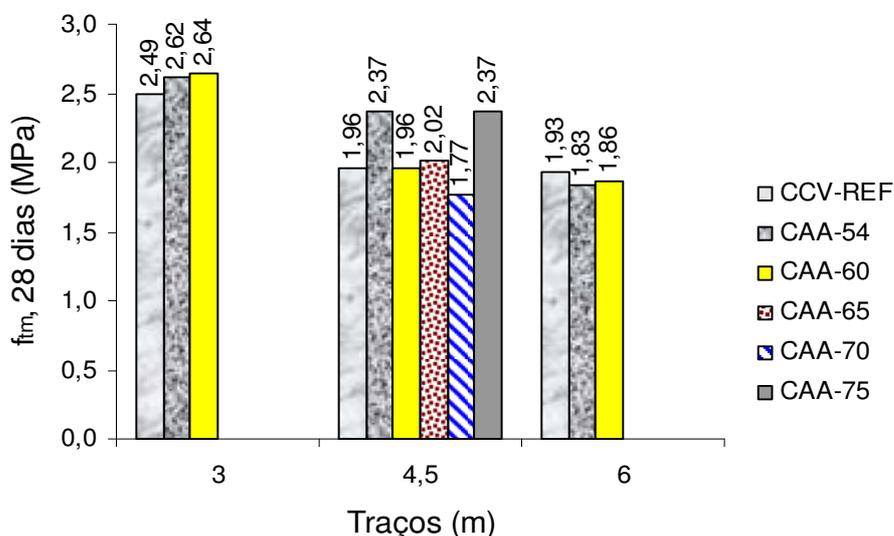


Figura 89: resistência à tração aos 28 dias dos concretos da etapa II

Ainda na figura 89, observa-se que o CCV-REF teve resistência média maior 5,5% do que o concreto auto-adensável CAA-54 para o traço 1:6.

Finalmente, salienta-se que os corpos-de-prova rompidos por tração diametral foram aproveitados para se fazer uma análise visual da distribuição da brita na argamassa, uma vez que o concreto foi moldado sem qualquer vibração. Este procedimento, simples de ser feito, visou confirmar o aspecto do CAA endurecido, que apesar de não ser vibrado deve apresentar aspecto visual similar ao de um concreto convencional vibrado.

A figura 90 apresenta os corpos-de-prova dos traços estudados para os 5 teores de argamassa (55, 60, 65, 70 e 75%) produzidos na etapa I rompidos à tração por compressão diametral. Observa-se que o traço 1:4,5 do CAA-75 da figura 90(e) apresentou uma tendência de segregar, enquanto que as demais imagens ilustram concretos com o agregado graúdo bem disperso na fase argamassa, que é o desejável.

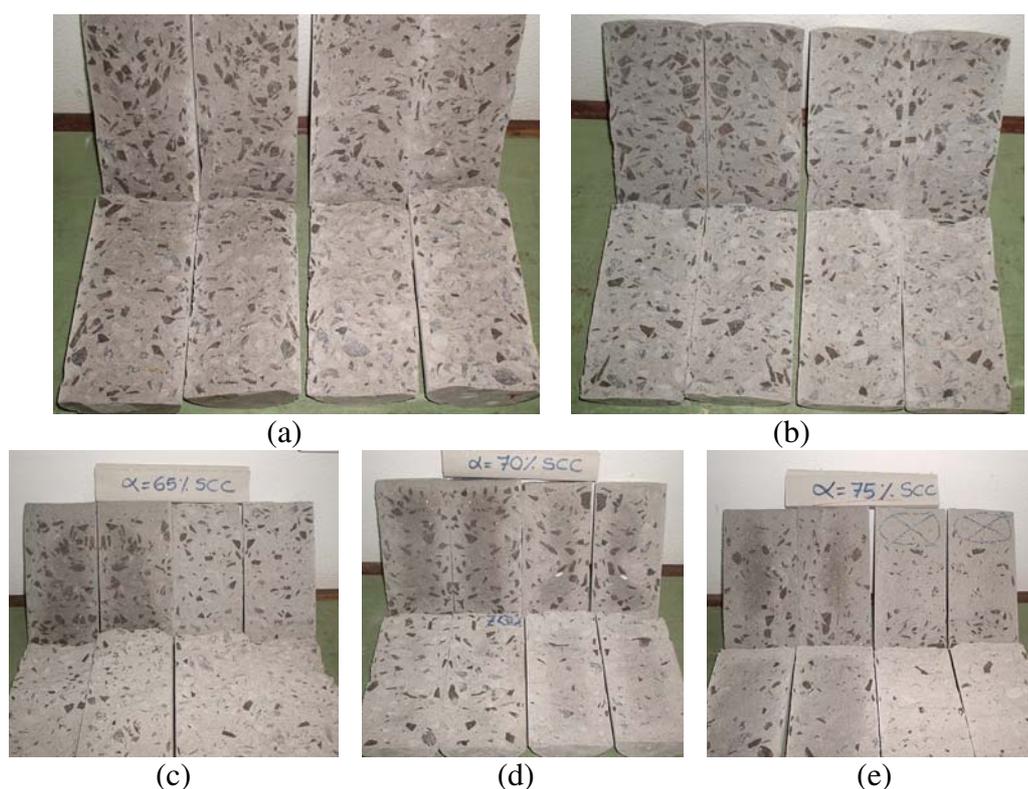


Figura 90: corpos-de-prova rompidos por tração diametral dos 4 traços estudados com (a) CAA-55, (b) CAA-60, (c) CAA-65, (d) CAA-70 e (e) CAA-75

A figura 91 apresenta os corpos-de-prova do traço 1:4,5 para os 5 teores de argamassa (54, 60, 65, 70 e 75%) da etapa II também rompidos à tração por compressão diametral. Pode-se

constatar nas imagens a diminuição do teor de brita à medida que o teor de argamassa aumenta e que não houve segregação dos materiais em 4 dos 5 concretos.

As figuras 91(e) e 91(f) apresentam corpos-de-prova de um concreto com teor de argamassa de 75% que segregou durante a dosagem e foi moldado para que se pudesse observar o aspecto do concreto já endurecido. Observa-se nas duas imagens que a brita depositou-se na parte inferior do molde indicando a segregação do concreto quando no estado fresco.

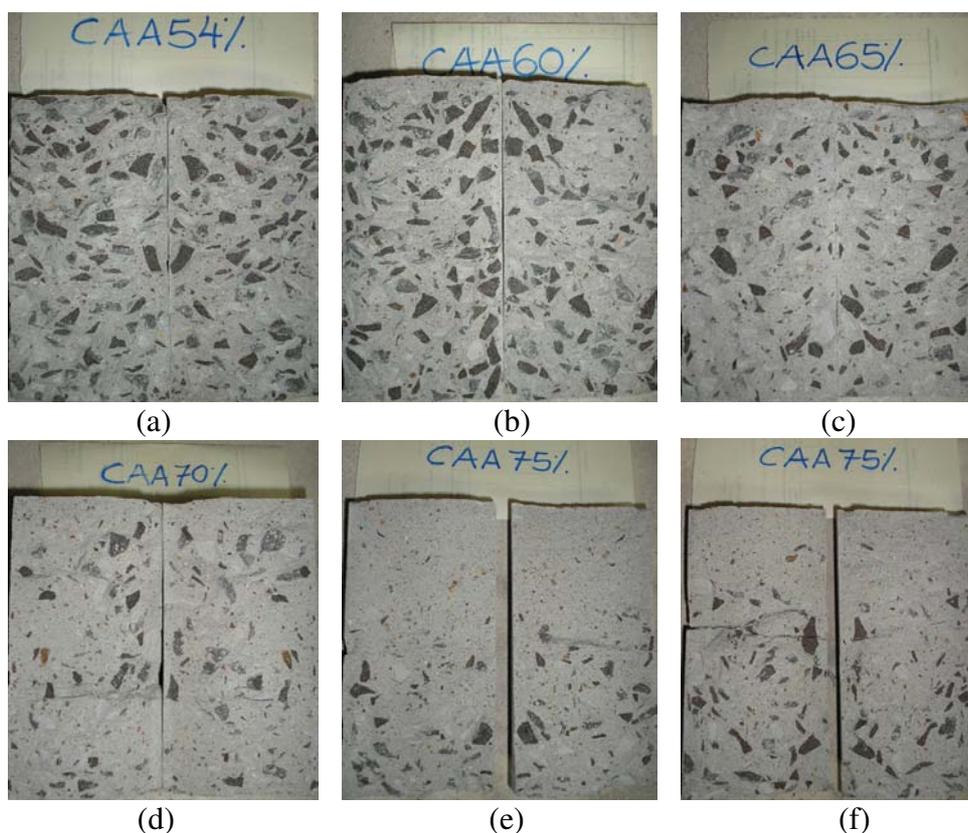


Figura 91: corpos-de-prova do traço 1:4,5 rompidos por tração diametral (a) CAA-54, (b) CAA-60, (c) CAA-65, (d) CAA-70, (e) e (f) CAA-75

Portanto, esta constatação visual dos corpos-de-prova de CAA rompidos por compressão diametral pareceu atender o propósito desejado na fase inicial deste projeto, ou seja, foi possível confirmar a situação do CAA fresco segregado no estado endurecido.

## 6.2.4 Análise da evolução da resistência à compressão dos concretos

A resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, geralmente a sua propriedade mecânica mais mencionada, por se tratar de uma referência em termos de cálculo estrutural e de projeto para dosagem, trata-se de uma informação bastante importante. No entanto, a evolução dessa propriedade ao longo do tempo não deixa de ser menos importante, principalmente em casos onde são previstos carregamentos prematuros e ou imediatos, acidentais ou não.

Neste contexto, resolveu-se então avaliar como os concretos produzidos se apresentam em termos do crescimento ou evolução da resistência à compressão ao longo do tempo. A figura 92 apresenta, para os 4 traços separadamente, como a resistência dos concretos evoluiu ao longo do tempo para todos os teores de argamassa dos CAA's, incluindo o comportamento do crescimento da resistência do CCV-REF com suas respectivas relações a/c.

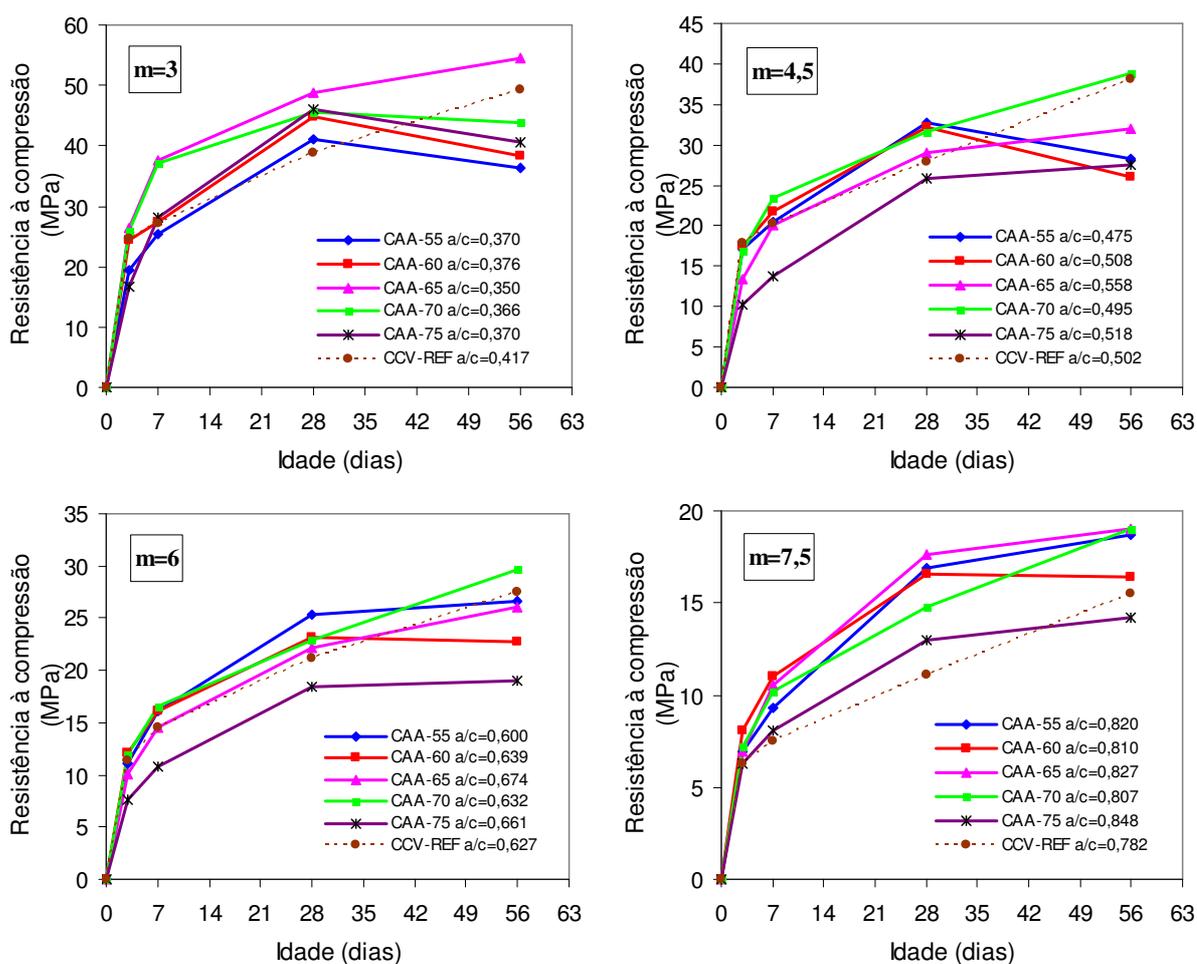


Figura 92: evolução da resistência à compressão dos concretos da etapa I e do CCV-REF

Como salienta Neville (1982), concretos com relações água/cimento menores apresentam aumento de resistência mais rápido do que os de relação água/cimento mais alta, em relação à resistência de longo prazo. O mesmo autor sugere que isso é devido a que nos concretos com relações a/c menores os grãos de cimento estão mais próximos entre si e se estabelece mais rapidamente um sistema contínuo de gel.

Portanto, a relação a/c, tendo influencia na hidratação do cimento (menor relação a/c implica maior resistência inicial e maior crescimento nas primeiras idades), deve ser levada em consideração ao se comparar os diferentes concretos. Neville (1982) cita ainda que em ambiente quente o aumento de resistência às primeiras idades é grande, e a relação entre as resistências a 28 e 7 dias tende a ser menor do que em ambiente mais frio.

A tabela 30 apresenta os resultados individuais, em percentagem, do crescimento da resistência para idades subseqüentes.

Tabela 30: crescimento da resistência, em %, dos concretos da etapa I

Concretos Produzidos	Traço <i>m</i> (kg/kg)	$f_{c3\text{dias}}$ (MPa)	Evolução da resistência (%)			Relação a/c
			3 a 7d	7 a 28d	28 a 56d	
CCV-REF	3	24,7	10	44	27	0,417
	4,5	17,8	14	37	37	0,502
	6	11,4	28	45	30	0,627
	7,5	6,3	19	48	40	0,782
CAA-55	3	19,4	30	63	-12	0,370
	4,5	17,1	20	60	-14	0,475
	6	11,1	46	57	5	0,600
	7,5	6,9	35	82	11	0,820
CAA-60	3	24,5	12	63	-14	0,376
	4,5	17,5	25	48	-19	0,508
	6	12,1	34	43	-2	0,639
	7,5	8,1	36	51	-1	0,810
CAA-65	3	26,4	42	30	12	0,350
	4,5	13,3	51	45	10	0,558
	6	10,1	44	53	18	0,674
	7,5	6,9	52	68	8	0,827
CAA-70	3	26	43	22	-4	0,366
	4,5	16,9	38	35	23	0,495
	6	11,9	39	38	30	0,632
	7,5	7,2	42	45	28	0,807
CAA-75	3	16,8	68	63	-12	0,370
	4,5	10,3	34	87	7	0,518
	6	7,7	40	71	3	0,661
	7,5	6,3	29	60	9	0,848

Ainda na figura 92, pode-se observar os seguintes destaques positivos quanto ao crescimento da resistência: no traço 1:3 o CAA-65 e o CAA-70; no traço 1:4,5 destaque para o CAA-55, CAA-60 e CAA-70; no traço 1:6 destaque para CAA-55, CAA-60 e CAA-70; no traço 1:7,5 CAA-65, CAA-60 e CAA-55 destacam-se.

Na figura 93 apresenta-se o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto convencional com teor de argamassa igual a 54% (CCV-REF) e do seu correspondente concreto auto-adensável (CAA-54). Nota-se que o CAA-54, apesar de ter as maiores relações  $a/c$ , apresentou resistências maiores nos traços 1:3 e 1:4,5, embora ligeiramente superado em 8,5% pelo CCV-REF aos 3 dias no traço 1:4,5.

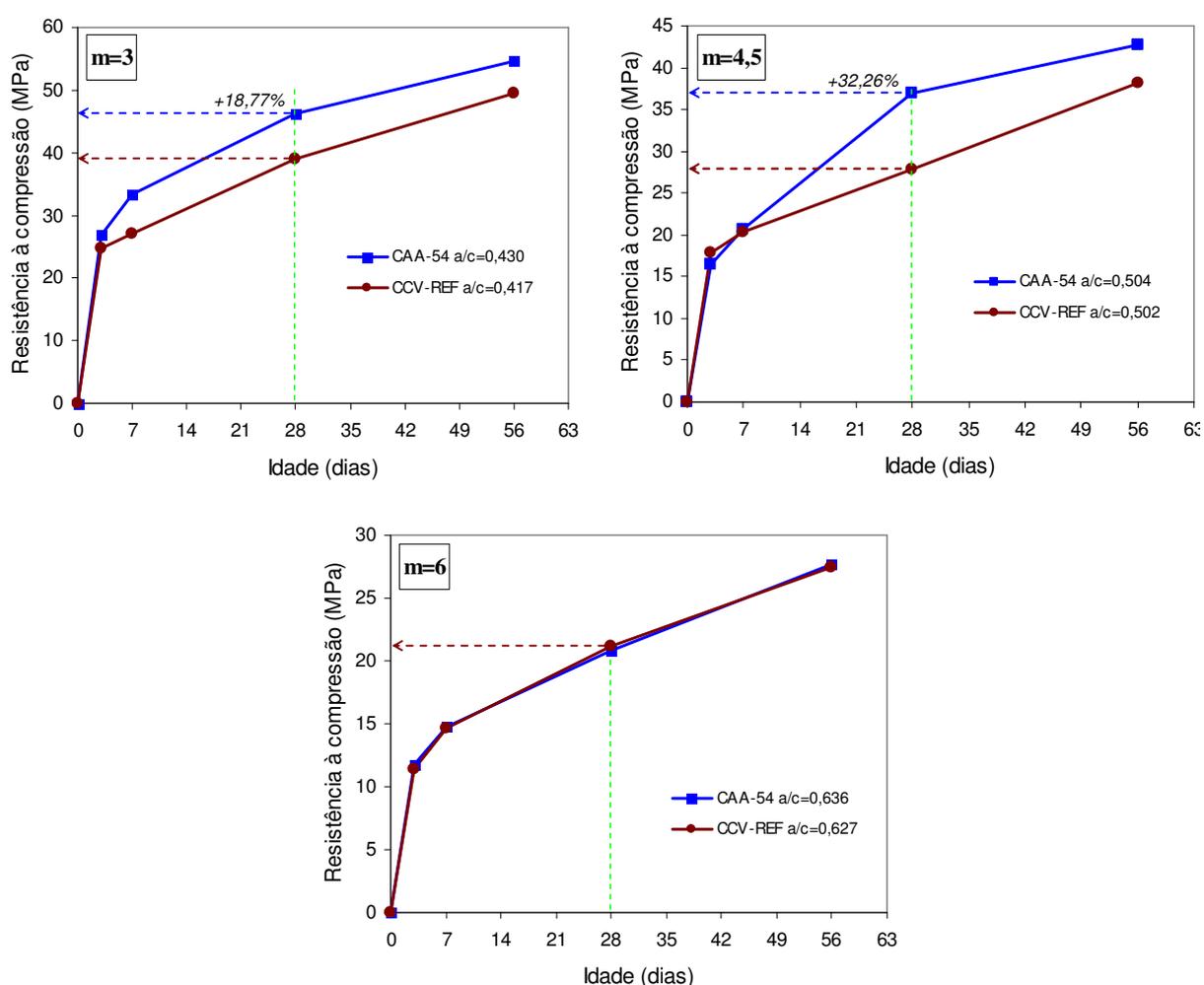


Figura 93: evolução da resistência à compressão do CCV-REF e do CAA-54

Este superior desempenho do CAA-54 quanto ao crescimento da resistência, pode ser explicado pelo seu melhor empacotamento granulométrico através do efeito fíler proporcionado pelo fíler de calcário incorporado, que preenchem os espaços entre os grãos de

areia. Além desse efeito físico do fíler calcário, pode ainda haver o efeito químico entre o fíler e o cimento, tanto interagindo entre si como criando pontos de nucleação (como energia de ativação das reações) para a hidratação do cimento, fazendo com que as reações de hidratação ocorram praticamente ao mesmo tempo, gerando cristais menores e mais resistentes, e conferindo assim uma estrutura mais homogênea.

Curiosamente, no traço 1:6, os dois concretos apresentaram crescimentos da resistência à compressão, praticamente iguais como ilustra a figura 93. Será que se pode concluir que, em termos de ganhos na resistência à compressão do concreto, a aplicação do CAA parece ser mais interessante do que o CCV para traços entre 1:3 e 1:4,5? Só como referência, vale mencionar que dos traços internacionais vistos os traços do CAA raramente passam do 1:4.

Por último, comparou-se a evolução da resistência até os 28 dias dos concretos produzidos na etapa II que, além do CCV-REF e CAA-54 já discutidos, inclui ainda o CAA-60, como mostra a figura 94.

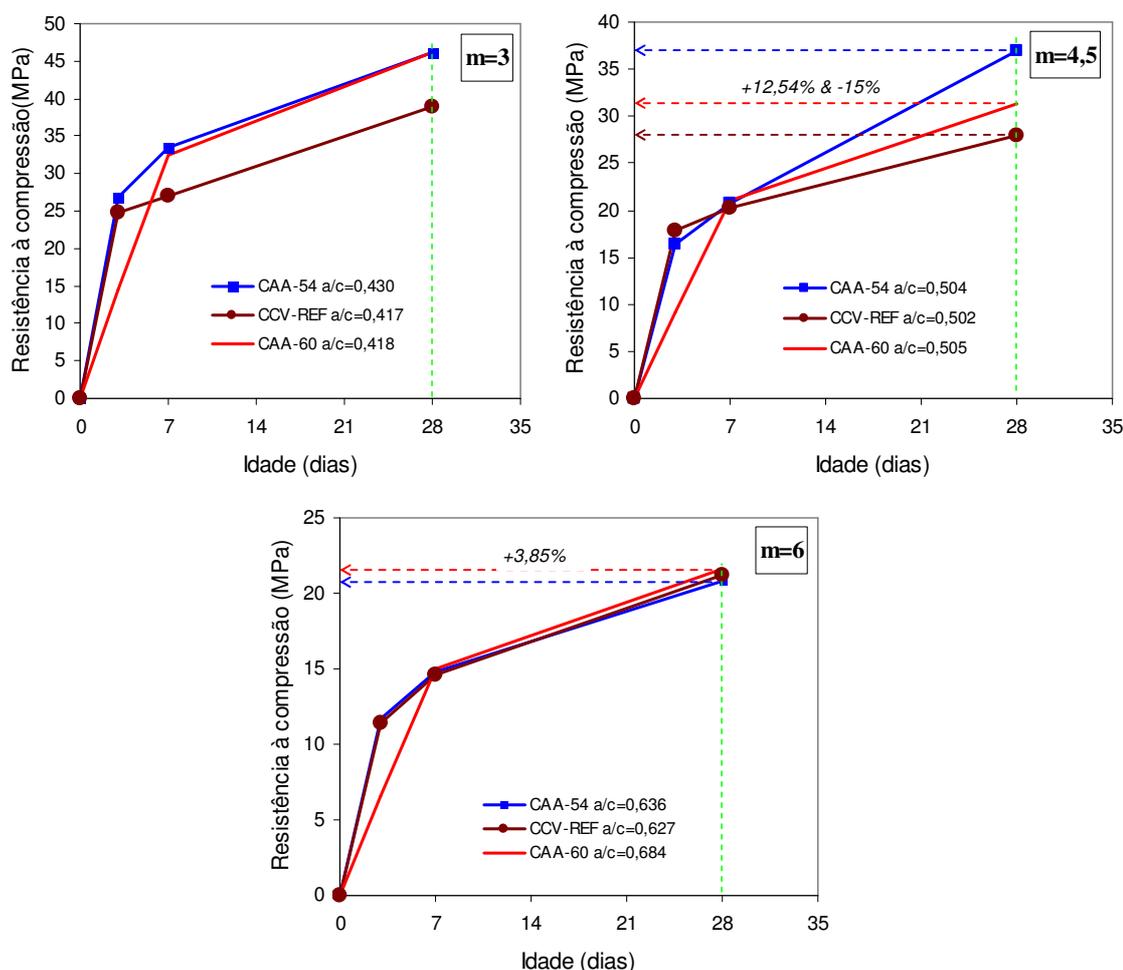


Figura 94: evolução da resistência do CCV-REF, CAA-54 e do CAA-60 (etapa II)

Nesta mesma figura 94, observa-se que o CAA-60 aos 28 dias foi bem similar ao CAA-54 no traço 1:3, ficou 12,5% acima do CCV-REF e 15% abaixo do CAA-54 no traço 1:4,5, enquanto que no traço 1:6 foi o que melhor se apresentou, com uma pequena superioridade de quase 4% em relação ao CAA-54.

A tabela 31 apresenta um resumo dos crescimentos individuais das resistências para os 3 traços de cada concreto estudado.

Tabela 31: crescimento da resistência, em %, dos concretos da etapa II

Concretos Produzidos	Traço m (kg/kg)	f <sub>c3dias</sub> (MPa)	Evolução da resistência (%)			Relação a/c
			3 a 7d	7 a 28d	28 a 56d	
CCV-REF	3	24,7	10	44	27	0,417
	4,5	17,8	14	37	37	0,502
	6	11,4	28	45	30	0,627
CAA-54	3	26,8	25	38	18	0,430
	4,5	16,4	26	78	16	0,504
	6	11,7	26	41	33	0,637
CAA-60	3	0	0	42	0	0,418
	4,5	0	0	49	0	0,505
	6	0	0	44	0	0,684

### 6.2.5 Módulo de elasticidade dos concretos (traço 1:4,5)

Além das resistências à compressão e à tração do concreto, outro aspecto fundamental no projeto de estruturas de concreto consiste na relação entre as tensões e as deformações. Da Resistência dos Materiais sabe-se que a relação entre as tensões e as deformações, para determinada faixa de valores, pode ser considerada linear, ou seja, obedecendo a Lei de Hook:  $\sigma = E_c \cdot \varepsilon$ , onde  $\sigma$  é a tensão,  $E_c$  é o módulo de elasticidade e  $\varepsilon$  é a deformação específica (em mm/mm).

Para a realização do ensaio do módulo de elasticidade dos concretos produzidos, cujos resultados estão apresentados na tabela 32, foi escolhido apenas o traço 1:4,5 de todos os concretos obtidos na etapa II (CCV-REF, CAA-54, CAA-60, CAA-65, CAA-70 e CAA-75).

No geral, observa-se nos resultados da tabela 32 que o módulo tende a diminuir com o aumento do teor de argamassa. Porém, chama-se atenção para ter em conta que as relações a/c, também indicadas na tabela 32, dos diferentes concretos não são iguais, o que afeta

diretamente na resistência à compressão e que, por sua vez, influi no valor do módulo de elasticidade.

Tabela 32: resultados do módulo de elasticidade dos concretos da etapa II

Módulo de Elasticidade	CCV-REF	CAA – Traço 1:4,5				
	$\alpha = 54\%$	$\alpha = 54\%$	$\alpha = 60\%$	$\alpha = 65\%$	$\alpha = 70\%$	$\alpha = 75\%$
$E_{c1}$ (GPa)	26,552	27,580	28,901	25,364	24,933	24,239
$E_{c2}$ (GPa)	26,219	28,437	27,067	24,651	22,691	22,023
<b><math>E_{cm}</math> (GPa)</b>	<b>26,39</b>	<b>28,01</b>	<b>27,98</b>	<b>25,01</b>	<b>23,81</b>	<b>23,13</b>
DP	0,235	0,606	1,297	0,504	1,585	1,567
CV	0,9%	2,2%	4,6%	2,0%	6,7%	6,8%
OBS.		40% FC	40% FC	40% FC	40% FC	40% FC

$E_{cm}$ =média, DP=desvio padrão; CV=coeficiente de variação.

Comparando os módulos do concreto CCV-REF e do concreto CAA-54, ambos com relação a/c aproximadas e mesmo teor de argamassa de 54%, observa-se que o concreto auto-adensável apresenta melhores propriedades mecânicas – maior resistência à compressão, já discutido anteriormente, e agora maior módulo de elasticidade (+6% do que o CCV-54).

O resultado desta última comparação (CCV-54 x CAA-54) é uma informação bastante interessante do ponto de vista do cálculo estrutural, uma vez que maior módulo de elasticidade implica em menores deformações, portanto, peças com menores seções (mais esbeltas) podem ser projetadas, resultando em economia no volume de concreto da estrutura e, quem sabe, no custo global do processo construtivo.

Salienta-se, por outro lado, que o CAA-65 apresentou um módulo de deformação 5% inferior ao do CCV-REF, como pode ser visto na figura 95, apesar de possuir maior relação a/c em relação ao CCV-REF. Isto se torna interessante uma vez que o CAA-65 apresentou outros bons resultados no estado fresco.

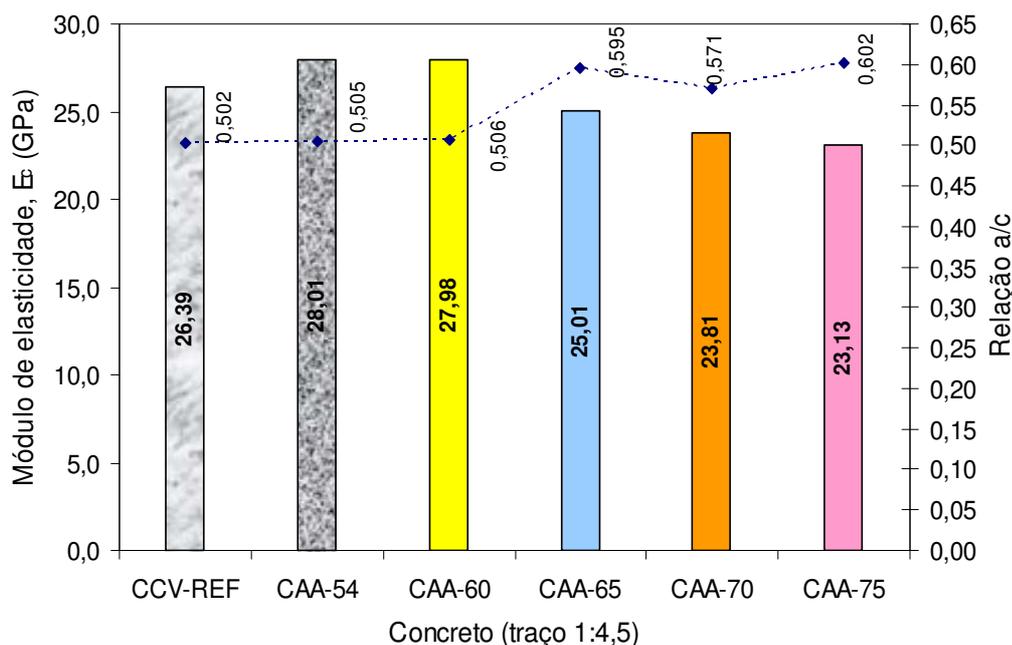


Figura 95: módulo de elasticidade e relação a/c dos concretos (etapa II)

Finalmente, realça-se que para uma diferença maior do que 20 pontos percentuais no teor de argamassa (54% a 75%) o módulo baixou apenas 3,26 GPa (12,4%) do CCV-REF para o CAA-75. E entre o CAA-54 e o CAA-75 diminuiu em cerca de 5 GPa (17,4%). Era de se esperar um decréscimo maior no módulo de elasticidade pelo elevado teor de argamassa. Porém, talvez a presença de filer, por preencher melhor os vazios, e a ausência de discontinuidades internas devido as próprias características de fluidez e de preenchimento de espaços proporcionados pelo CAA, justifiquem os resultados obtidos.

### 6.2.6 Análise comparativa da qualidade dos concretos através do ensaio de ultra-som

O uso do ensaio de ultra-som é de extrema utilidade na defectoscopia do concreto, quando há interesse na verificação da homogeneidade do concreto endurecido, de eventuais falhas de concretagem internas (ninhos), na determinação de fissuras e outros defeitos, tanto de concretagem quanto decorrentes de acidentes (BAUER, 2000).

Neville (1982) cita que o ensaio de ultra-som é usado como meio de controle de qualidade de produtos que se supõe preparados com concretos semelhantes. Nestes podem ser detectados prontamente a falta de adensamento como variações da relação a/c. O mesmo autor apresenta alguns valores propostos por Whithurst para concretos com massa específica aproximada de

2400 kg/m<sup>3</sup>, ilustrados na tabela 33. Estes valores servem apenas como referência e não para uma eventual comparação direta com resultados obtidos neste trabalho.

Tabela 33: valores propostos por Whithurst (Neville, 1982)

Velocidade de pulsos longitudinais, em m/s	Qualidade do concreto
> 4500	Excelente
3500 a 4500	boa
3000 a 3500	duvidosa
2000 a 3000	pobre
< 2000	muito pobre

Portanto, a verificação de variação da velocidade de propagação do ultra-som no CAA poderá indicar a sua homogeneidade interna comparada com o concreto convencional vibrado, o que é bastante interessante tendo em conta que este tipo de concreto é compactado apenas através de seu peso próprio.

Neste trabalho, decidiu-se proceder à execução do ensaio de ultra-som para conferir a capacidade do CAA de adquirir a densidade desejada sem vibração externa quando comparado com um concreto convencional. E por outro lado, serve também para se fazer uma comparação relativa entre os CAA produzidos com os diferentes teores de argamassa.

Hwang e Chen (2003) também salientam em seu trabalho que a qualidade do concreto pode ser avaliada através da velocidade do pulso ultra-sônico emitido pelo aparato. No estudo destes autores, notou-se que a velocidade do som aumentou gradualmente para valores acima dos 4000 m/s à medida que o volume de pasta de cimento diminuiu o que significa que a redução da quantidade de pasta de cimento é benéfica para o CAA.

Bauer (2000) reforça ainda que, com a medição do tempo de propagação do pulso ultra-sônico ao longo de uma peça de concreto, podem-se detectar vazios decorrentes de falhas de concretagem e regiões em que o material se acha segregado.

Para o presente estudo, a figura 96 apresenta os resultados do ensaio de ultra-som para o CCV-REF e para o CAA-54, realizados no sentido longitudinal dos CP's, nos quais se pode observar que o concreto CAA-54 pode ser considerado como de boa qualidade se comparado ao CCV-REF, e que as diferenças entre os valores dos 3 traços não passaram de 3%.

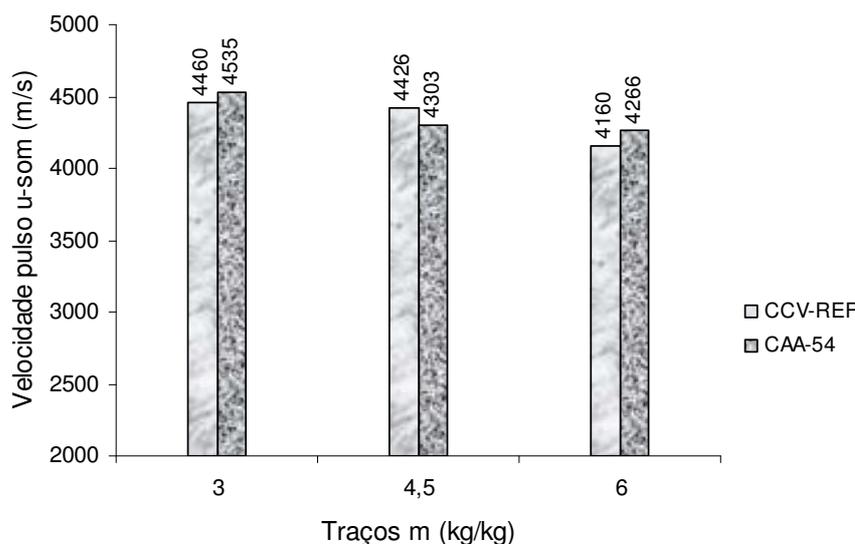


Figura 96: velocidade do pulso ultra-sônico através de corpos-de-prova dos concretos CCV-REF E CAA-54 (etapa II).

Para os outros traços ilustrados na figura 97, os concretos se equivalem entre si demonstrando, inclusive, que o CAA mesmo sem vibração apresenta uma estrutura compacta. Por lado, e conforme Hwang e Chen (2003) também acharam em seu trabalho, a velocidade do pulso ultra-sônico tende a diminuir com o aumento do teor de argamassa. Isso é notado claramente nas figuras 97 e 98 para o teor de argamassa de 75%. Porém, é possível notar que o CAA-60 destaca-se ao ser o concreto com melhor resultado dentre os concretos auto-adensáveis apresentados na figura 94, superando inclusive o CCV-REF (exceto no traço 1:4,5 onde foram praticamente iguais, com a mínima diferença de 1%).

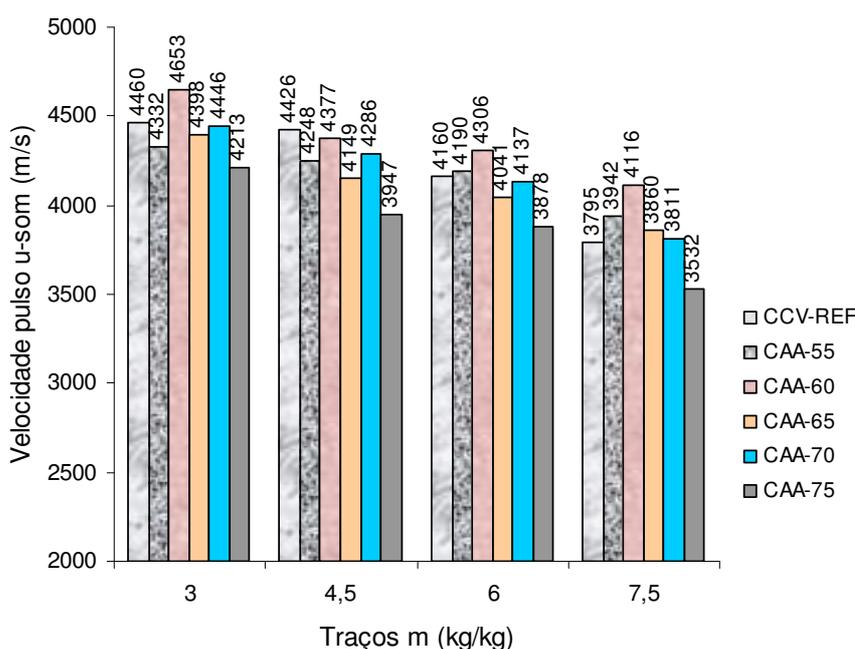


Figura 97: velocidade do pulso ultra-sônico através de CP's dos concretos (etapa I)

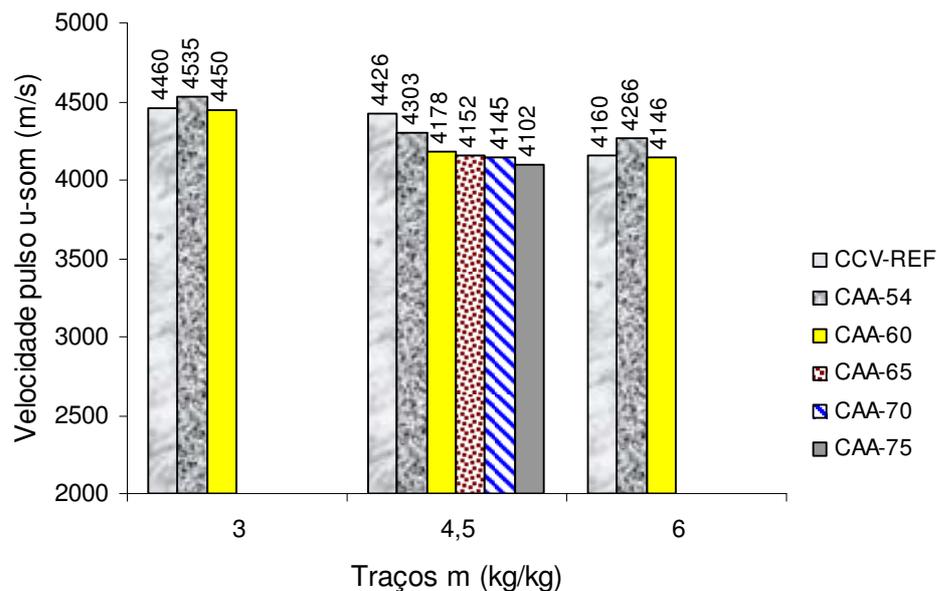


Figura 98: velocidade do pulso ultra-sônico através de CP's dos concretos (etapa II)

A figura 99 apresenta a correlação verificada entre a velocidade do pulso ultra-sônico e a resistência à compressão do concreto aos 28 dias dos diferentes teores de argamassa. Nota-se a tendência de um incremento na resistência quando aumenta a velocidade do pulso emitido pela onda de ultra-som, independente do teor de argamassa.

Porém, há uma posição definida para cada teor de argamassa, por exemplo, verifica-se que o pulso passa muito mais rápido pelo CAA-60 e mais lento pelo CAA-75. Ajustados linearmente os resultados das correlações forneceram coeficientes ( $r^2$ ) de 90, 97, 94, 92 e 83%, respectivamente para os dados dos CAA-55, CAA-60, CAA-65, CAA-70 e CAA-75.

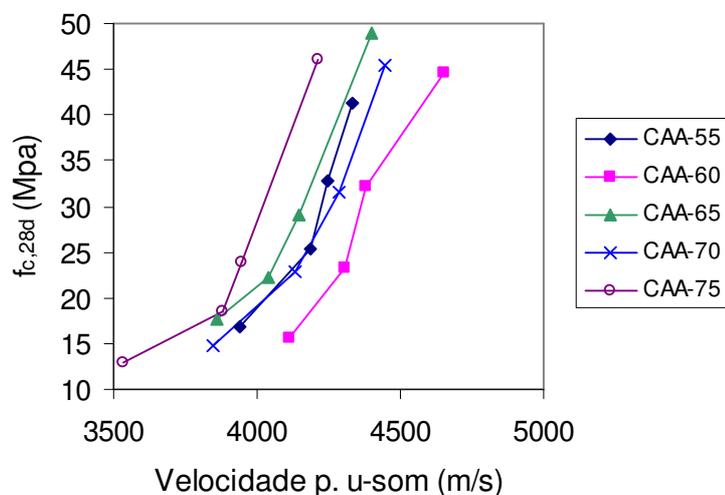


Figura 99: correlação entre velocidade do pulso ultra-sônico e resistência à compressão dos concretos produzidos na etapa I

A figura 100 apresenta a correlação verificada entre a relação a/c e a velocidade do pulso ultra-sônico através do concreto para os diferentes teores de argamassa. Ajustados linearmente os resultados das correlações forneceram coeficientes ( $r^2$ ) de 97, 94, 98, 99 e 96%, respectivamente para os dados dos CAA-55, CAA-60, CAA-65, CAA-70 e CAA-75.

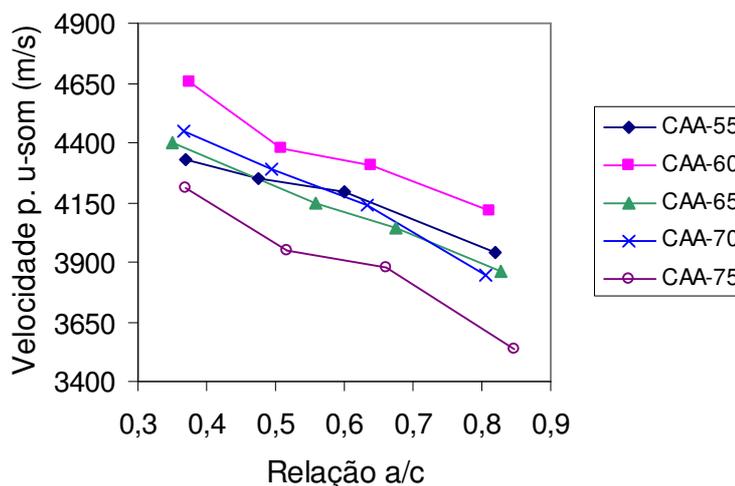


Figura 100: correlação entre a relação água/cimento e a velocidade do pulso ultra-sônico dos concretos produzidos na etapa I

Observando o comportamento dos diferentes teores de argamassa nota-se que o concreto CAA-60 apresenta comportamento superior, atendendo ao fato da velocidade do pulso ultra-sônico no concreto ser um indicador de sua qualidade relativa. O CAA-75 bem abaixo dos restantes concretos e houve um comportamento semelhante entre o CAA-55, CAA-65 e o CAA-70.

### 6.2.7 Custos dos concretos

Os resultados de custos apresentados na tabela 34 são relativos ao CCV-REF e aos CAA's produzidos na etapa I, cujos teores de aditivo superplastificante para cada família de concreto foram ajustados a partir do traço 1:7,5, que é o traço mais pobre e também o que contém maior quantidade de fíler calcário e a menor quantidade de cimento, em relação aos outros traços para o mesmo teor de argamassa.

Tabela 34: custos dos materiais por m<sup>3</sup> dos concretos produzidos na etapa I, em R\$, e custo total dos concretos, em R\$/m<sup>3</sup>

Concretos estudados	Traço 1:m	Custo dos materiais usados/m <sup>3</sup> de concreto, em R\$						Custo total (R\$/m <sup>3</sup> )
		Cimento	Fíler Calcário	Areia	Brita	Água	Aditivo SP	
CCV-REF $\alpha = 54\%$	1:3	180,88	0,00	8,22	20,39	1,11	0,00	210,61
	1:4,5	134,98		10,42	20,93	1,00		167,32
	1:6	106,42		11,59	21,00	0,98		139,99
	1:7,5	87,04		12,25	20,85	1,00		121,14
CAA $\alpha = 55\%$	1:3	185,98	21,00	5,25	20,51	1,01	117,33	351,09
	1:4,5	137,02	26,11	6,52	20,78	0,96	86,44	277,84
	1:6	107,78	28,91	7,22	20,80	0,95	68,00	233,66
	1:7,5	86,7	29,99	7,49	20,32	1,05	54,70	200,24
CAA $\alpha = 60\%$	1:3	184,96	24,37	6,09	18,13	1,02	102,00	336,58
	1:4,5	134,98	29,22	7,30	18,20	1,38	74,44	265,51
	1:6	106,08	31,95	7,98	18,20	1,00	58,50	223,71
	1:7,5	86,7	33,46	8,36	18,06	1,03	47,81	195,42
CAA $\alpha = 65\%$	1:3	187,34	28,21	7,05	16,07	0,96	144,64	384,27
	1:4,5	131,92	31,97	7,99	15,56	1,08	101,85	290,37
	1:6	104,72	34,99	8,74	15,72	1,04	80,85	246,06
	1:7,5	86,02	36,63	9,15	15,68	1,05	66,41	214,95
CAA $\alpha = 70\%$	1:3	185,3	31,39	7,84	13,63	1,00	141,43	380,58
	1:4,5	134,98	36,21	9,05	13,65	0,98	103,02	297,88
	1:6	105,74	38,81	9,70	13,61	0,98	80,70	249,54
	1:7,5	86,36	40,23	10,05	13,49	1,02	65,91	217,08
CAA $\alpha = 75\%$	1:3	184,28	34,69	8,67	11,29	1,00	224,39	464,32
	1:4,5	133,28	39,20	9,79	11,23	1,02	162,29	356,81
	1:6	104,72	41,89	10,47	11,23	1,02	127,51	296,83
	1:7,5	85,34	43,17	10,79	11,11	1,06	103,91	255,39

Em relação aos custos do CCV-REF, os CAA's com melhores resultados foram os CAA-55 e o CAA-60, sendo que este último teve o melhor resultado apresentando os menores custos por m<sup>3</sup> em todos os traços estudados, conforme os dados ilustrados na figura 98. Nota-se que o alto consumo de superplastificante, causado pelo ajuste a partir do traço mais pobre, elevou bastante os custos dos CAA's (que, neste estudo, são mais altos quanto maior for o consumo de aditivo superplastificante) quando comparados com os custos do CCV-REF. O ideal, como já mencionado, é fazer o ajuste do superplastificante pelo traço intermediário que, neste caso, foi escolhido o traço 1:4,5.

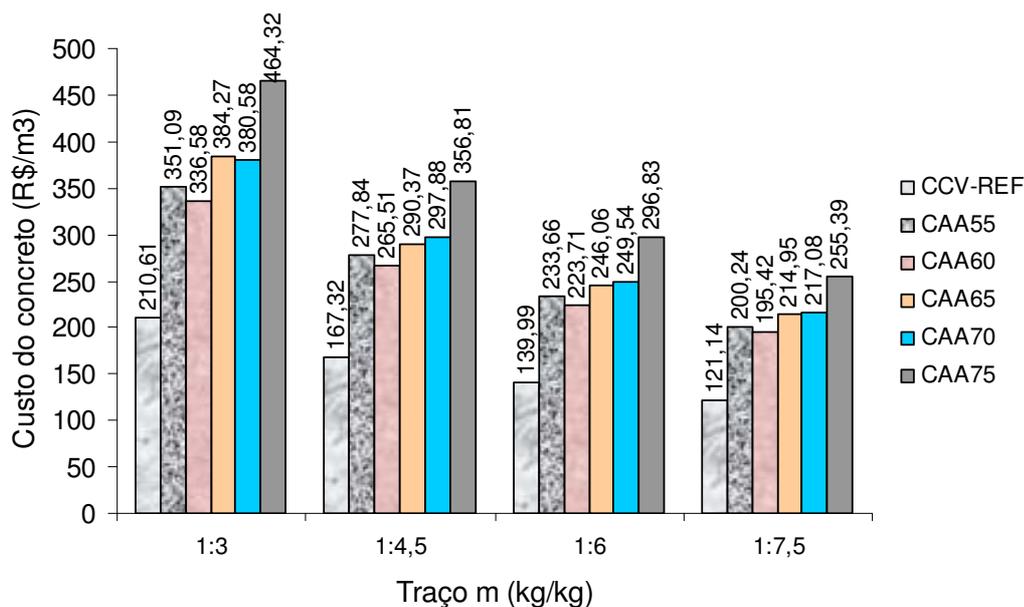


Figura 101: custos dos concretos da etapa I

A tabela 35 apresenta um resumo de quanto os custos de cada traço dos CAA's aumentam comparativamente ao CCV-REF.

Tabela 35: comparação entre custos dos CAA's da etapa I e do custo do CCV-REF

TRAÇOS	Aumento de custos dos CAA's em relação ao CCV-REF				
	CAA-55	CAA-60	CAA-65	CAA-70	CAA-75
<b>m=3</b>	+66,7%	+59,8%	+82,4%	+80,7%	+120,0%
<b>m=4,5</b>	+66,0%	+58,7%	+73,5%	+78,0%	+132,5%
<b>m=6</b>	+66,9%	+59,8%	+75,8%	+78,3%	+120,4%
<b>m=7,5</b>	+65,3%	+61,3%	+77,4%	+79,2%	+108,2%

Os resultados de custos apresentados na tabela 36 são relativos ao CCV-REF e aos CAA's produzidos na etapa II, cujos teores de aditivo superplastificante foram ajustados a partir do traço 1:4,5, que foi o traço intermediário escolhido. Este ajuste gerou uma enorme economia no consumo de aditivo superplastificante por m<sup>3</sup> quando comparado aos resultados da etapa I.

Tabela 36: custos dos materiais por m<sup>3</sup> dos concretos produzidos etapa II, em R\$, e custo total dos concretos, em R\$/m<sup>3</sup>

Concretos estudados	Traço 1:m	Custo dos materiais usados/m <sup>3</sup> de concreto, em R\$						Custo total (R\$/m <sup>3</sup> )
		Cimento	Fíler Calcário	Areia	Brita	Água	Aditivo SP	
CCV-REF $\alpha = 54\%$	1:3	180,88	0,00	8,22	20,39	1,11	0,00	210,61
	1:4,5	134,98		10,42	20,93	1,00		167,32
	1:6	106,42		11,59	21,00	0,98		139,99
CAA-54 $\alpha = 54\%$	1:3	180,20	19,67	4,92	20,32	0,98	49,29	275,38
	1:4,5	135,32	25,09	6,27	20,98	0,95	37,01	225,62
	1:6	106,42	27,84	6,96	21,00	0,94	29,11	192,27
CAA-60 $\alpha = 60\%$	1:3	180,88	23,83	5,95	17,73	1,00	54,26	283,67
	1:4,5	134,98	29,22	7,30	18,20	1,35	40,49	231,54
	1:6	104,72	31,54	7,88	17,97	0,98	31,42	194,51
CAA-65	1:4,5	130,22	31,56	7,88	15,36	1,07	40,22	226,31
CAA-70	1:4,5	130,90	35,11	8,77	13,23	0,95	55,90	244,87
CAA-75	1:4,5	129,20	38,00	9,49	10,89	0,98	54,61	243,17

Observa-se que para os resultados da etapa II, apresentados na figura 99, o CAA com melhor resultado, em termos de custos em cada traço, foi o CAA-54. O CAA-60 teve custos superiores ao CAA-54 em até 3%. Para o traço 1:4,5 verifica-se que o CAA-65 apresentou custo muito aproximado ao do CAA-54; o mesmo ocorreu com o CAA-70 em relação ao CAA-75, que foram em média 8% mais caros do que o CAA-54; já o CAA-60 foi 2,6% mais caro em relação ao CAA-54.

Portanto, no traço m=4,5 da figura 102 verifica-se que os concretos CAA-54, 60 e 65 apresentaram custos bem similares entre si, sendo, portanto, os teores de argamassa mais indicados desde que sejam atendidos os requisitos do CAA no estado fresco e endurecido. Será que isto sugere concluir que o CAA-65 poderia também oferecer custos similares aos CAA-54 e CAA-60 nos traços m=3 e m=6?

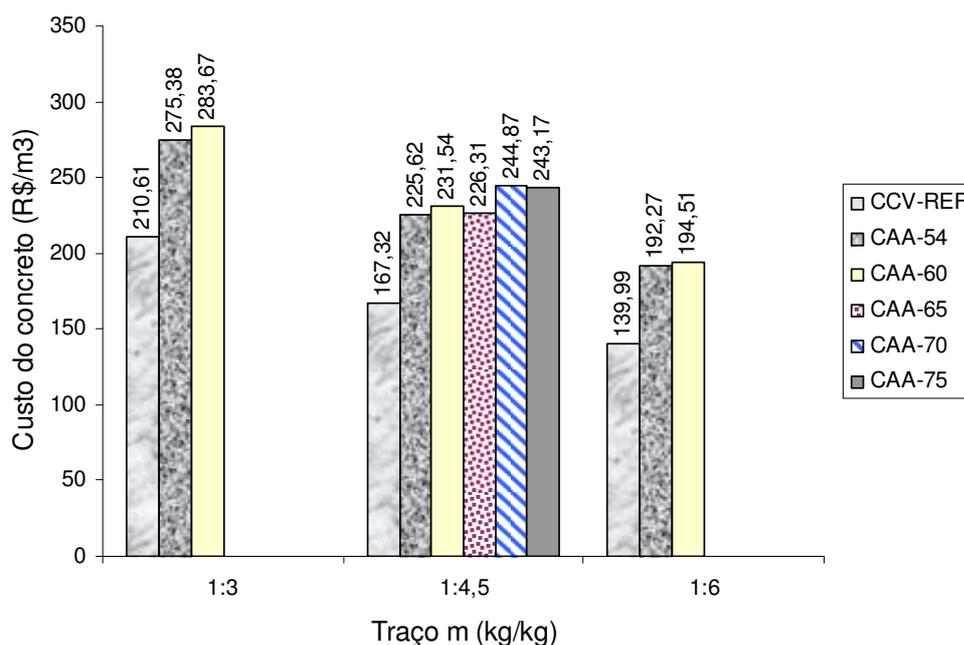


Figura 102: custos dos concretos produzidos na etapa II

Nota-se que o alto consumo de superplastificante, causado pelo ajuste a partir do traço mais pobre, que elevou bastante os custos dos CAA's quando comparados com os custos do CCV-REF, não ocorre quando o ajuste é feito pelo traço 1:4,5. Portanto, o melhor é fazer o ajuste do superplastificante para cada família pelo traço intermediário.

É assim que, como resultado do ajuste pelo traço 1:4,5, na tabela 37 pode se ver que as diferenças dos custos de cada traço entre os CAA's da etapa II e o CCV-REF produzidos no presente trabalho reduziram significativamente.

Tabela 37: comparação entre custos dos CAA's da etapa II e do custo do CCV-REF

TRAÇOS	Aumento de custos dos CAA's em relação ao CCV-REF				
	CAA-54	CAA-60	CAA-65	CAA-70	CAA-75
<b>m=3</b>	+30,8%	+34,7%	-	-	-
<b>m=4,5</b>	+34,8%	+38,4%	+35,2%	+46,3%	+45,3%
<b>m=6</b>	+37,3%	+38,9%	-	-	-

Portanto, em termos de custos o CCV-REF apresenta-se como a opção mais econômica de curto e médio prazo, pois numa estrutura real não se tem certeza de que todo o concreto foi vibrado adequadamente e se poderá mais tarde revelar problemas advindos de uma vibração ou adensamento deficiente. Assim, a opção do CAA apesar de ser mais cara inicialmente,

possui *garantia* de que o produto final (a estrutura acabada) tem qualidade (ou um concreto durável para as condições a que se propõe).

A análise do consumo de cimento por classe de resistência aos 28 dias do concreto para a etapa I, ilustrado na figura 103, indica que o teor de argamassa de 75% apresentou maior consumo até a classe de 35 MPa. O teor de argamassa de 55%, que teve o segundo maior consumo para as classes de 30 e 35 MPa, apresentou-se com maior consumo em relação aos outros teores para a classe de resistência de 40 MPa.

Ainda na figura 103, nota-se também que, em todas as classes de resistência aos 28 dias do concreto, o consumo de cimento para os teores de argamassa de 60 a 70% tende a diminuir à medida que o teor de argamassa aumenta. Aliás, isso é verificado também nas faixas de 55 a 70% de argamassa para as classes de 30, 35 e 40 MPa.

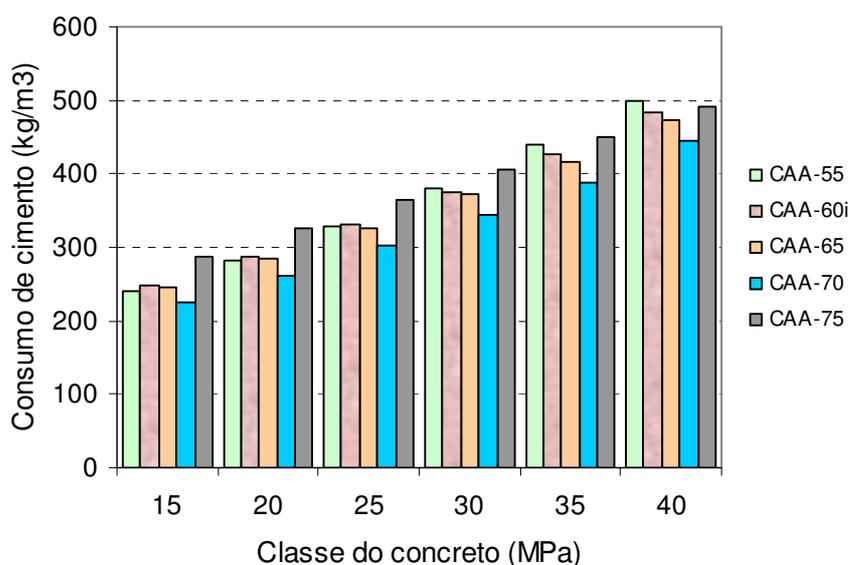


Figura 103: consumo de cimento por classe de resistência dos concretos da etapa I

Os custos por metro cúbico de concreto para as classes de resistência avaliadas estão ilustrados na figura 104 e, como esperado, o custo/m<sup>3</sup> aumenta à medida que aumenta a resistência do concreto para todos os teores de argamassa.

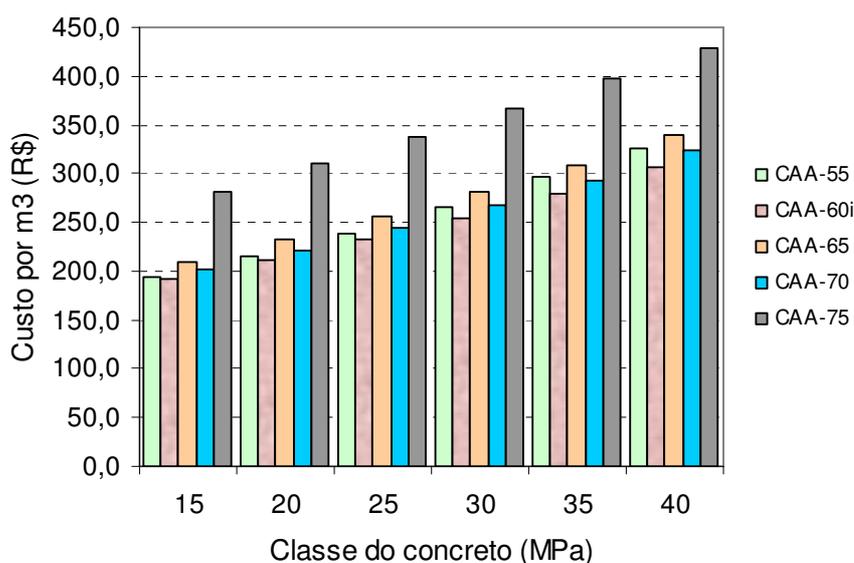


Figura 104: custos dos concretos para  $f_{c, 28d}$  da etapa I

Ainda na figura 104, nota-se que o teor de argamassa de 60% (CAA-60) apresentou, com os seus menores custos por  $m^3$ , resultados bem competitivos em todas as classes de resistência aos 28 dias, em virtude do menor consumo de aditivo superplastificante. O teor de argamassa de 55% (CAA-55) apresentou os segundos melhores resultados, sendo seus custos bem similares aos do teor de argamassa de 70% (CAA-70) para as classes de 35 e 40 MPa.

Por outro lado, verifica-se que para todas as classes de resistência aos 28 dias os teores de argamassa de 65 (CAA-65) e 75% (CAA-75) apresentaram os custos mais elevados, com destaque para o teor de 75% cujos custos foram bem superiores aos dos demais teores de argamassa. Os altos consumos de cimento e de aditivo superplastificante contribuíram significativamente para que o teor de argamassa de 75% tivesse esse comportamento em termos econômicos.

Dos resultados de custos por MPa apresentados na figura 105 pode-se observar que o teor de argamassa de 60% (CAA-60) apresentou os menores valores para todas classes de resistência sendo, portanto, o mais barato em R\$/MPa. E nota-se ainda que o teor de argamassa de 55% (CAA-55), com o segundo melhor resultado, é praticamente igualado pelo CAA-70.

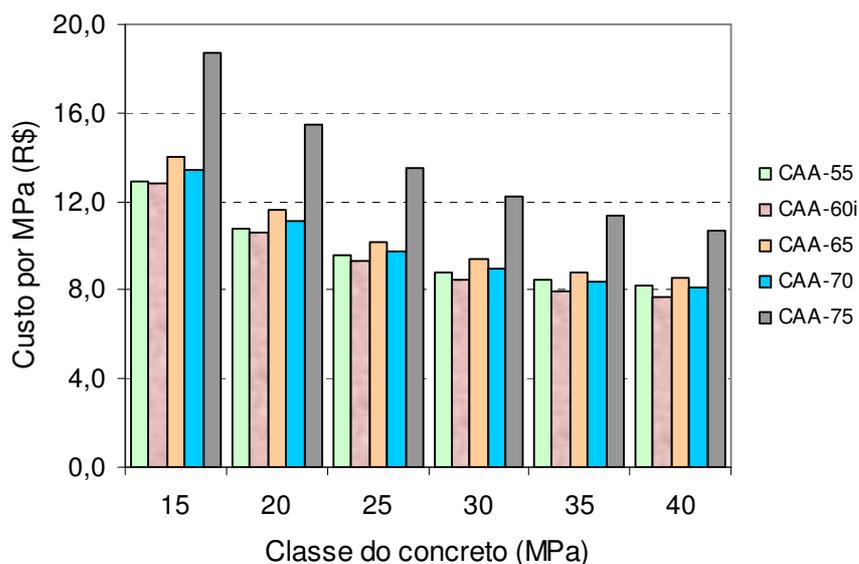


Figura 105: custo por MPa dos concretos da etapa I

Diante destes resultados de custos para o CAA-55 e CAA-60, a decisão por um ou outro teor de argamassa será uma questão mais técnica do que econômica. Portanto, as condições reais de cada projeto ou estrutura devem sempre ser analisadas para ajudar na tomada de decisão.

Para os resultados da etapa II, onde foram produzidas três famílias de concretos, tem-se na figura 106 apresentado o consumo de cimento por  $m^3$  de concreto. Verifica-se que o concreto convencional (CCV-REF) possui maior consumo de cimento em relação aos dois concretos auto-adensáveis confeccionados, e que a diferença no consumo de cimento aumenta à medida que o concreto se apresenta com classe de resistência aos 28 dias maior.

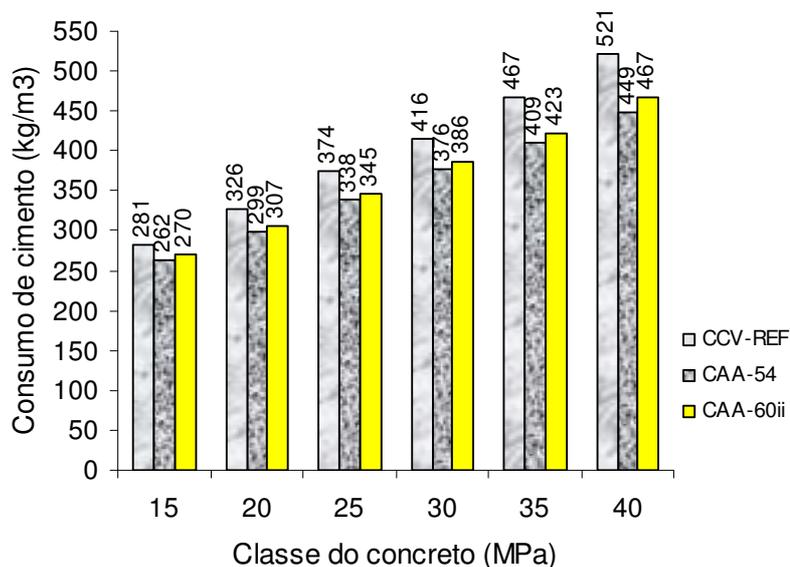


Figura 106: consumo de cimento por classe de resistência dos concretos da etapa II (CCV-REF, CAA-54 e CAA-60)

Apesar do maior consumo de cimento, que varia entre 7 a 16% em relação ao CAA-54, o CCV-REF apresentou menor custo por  $m^3$  para todas as classes de resistência de concreto ilustradas na figura 107.

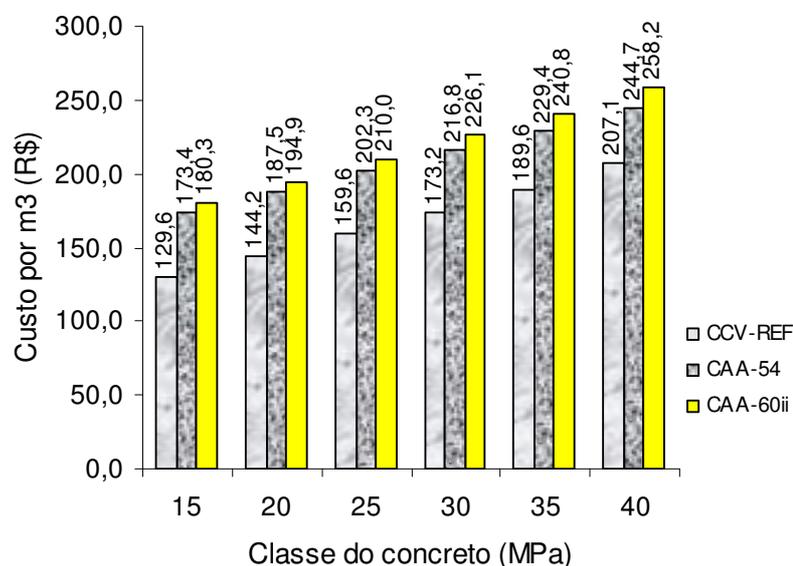


Figura 107: custos dos concretos para  $f_{c, 28d}$  da etapa II

Os resultados da figura 107 indicam que as diferenças entre os custos por  $m^3$  do CCV-REF em relação ao CAA-54 variaram entre 18,2 a 33,8%, e é tanto maior quanto menor for a classe do concreto. Ferreira (2001) que estudou concretos de 20 até 55 MPa chegou a uma faixa entre 15 a 24% de diferença entre os custos do CCV e o do CAA.

Comparando o CAA-54 com o CAA-60, verifica-se que existe a tendência contrária da observada no caso anterior (CCV-REF x CAA-54), ou seja, a diferença entre custos tende aumentar à medida que a resistência do concreto aumenta. As diferenças para este caso variaram entre 3,8 a 5,5%, para concretos entre 15 a 40 MPa de resistência.

No estudo de Tutikian (2004), para um concreto de 40 MPa aos 28 dias a diferença entre os custos do CCV e os do CAA foi de 40,8% para um CAA obtido com fíler calcário, enquanto que para um CAA obtido com cinza de casca de arroz (CCA) a diferença foi de 7,3%. No mesmo estudo de Tutikian, as diferenças nos custos entre o CCV e o CAA obtido com fíler calcário para 20 e 30 MPa, aos 28 dias, foram de 45 e 42,5%, respectivamente.

Normalmente os custos por MPa variam na mesma faixa de valores da variação dos custos por  $m^3$  de concreto. Desta forma, os resultados apresentados na figura 108 indicam que as

diferenças entre o CCV-REF e o CAA-54 variaram entre 34,8 a 17,3%, sendo menores quanto maior a classe de concreto. Para o caso de comparação entre o CAA-54 e o CAA-60, verifica-se que a diferença tende a aumentar à medida que a classe de concreto se torna maior, e varia entre 3,2 a 6,5%.

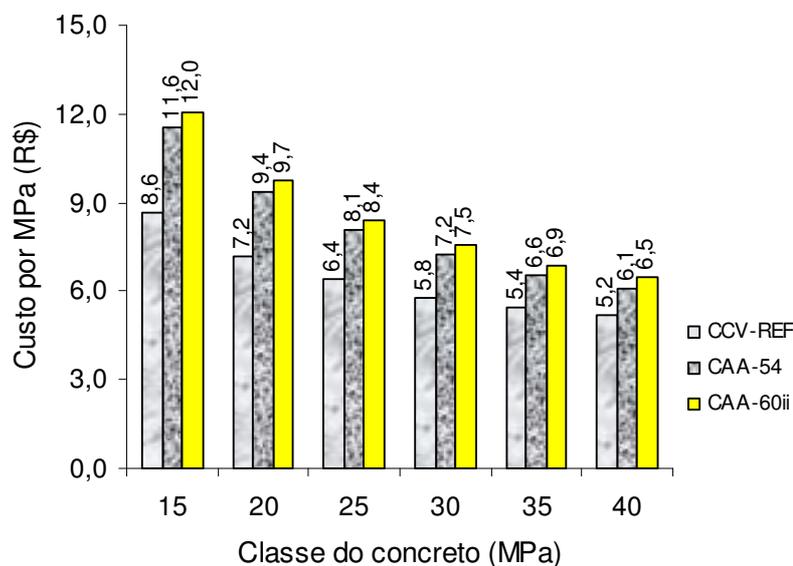


Figura 108: custos por MPa dos concretos produzidos na etapa II

Para encerrar a análise de custos deste trabalho, fez-se uma comparação entre dois concretos obtidos durante a parte experimental, ambos com mesmo teor de argamassa de 60%. A diferença entre estes dois concretos é que seus traços foram ajustados de forma diferente.

Na primeira família de traços (CAA-60i), obtida na etapa I do trabalho, foi feito o ajuste de superplastificante para todos os traços pelo traço mais pobre utilizado (1:7,5). Já na segunda família de traços (CAA-60ii), este mesmo ajuste foi feito pelo traço intermediário 1:4,5.

As figuras 109, 110 e 111 apresentam o consumo de cimento e os custos desses dois concretos por  $m^3$  e por MPa, respectivamente. Os resultados indicam que houve uma economia no consumo de superplastificante de 45% ajustando a família de concreto do CAA-60ii pelo traço 1:4,5 em relação ao CAA-60i ajustado pelo traço 1:7,5.

Verifica-se que o consumo de cimento para os dois concretos ilustrado na figura 109 é maior para o concreto com menor dosagem de aditivo superplastificante (o CAA-60ii) até a classe de 30 MPa, sendo que essa diferença não chega a ser maior do que 9%. Para a classe de 25 MPa, por exemplo, o consumo de cimento do CAA-60ii é 4,5% maior.

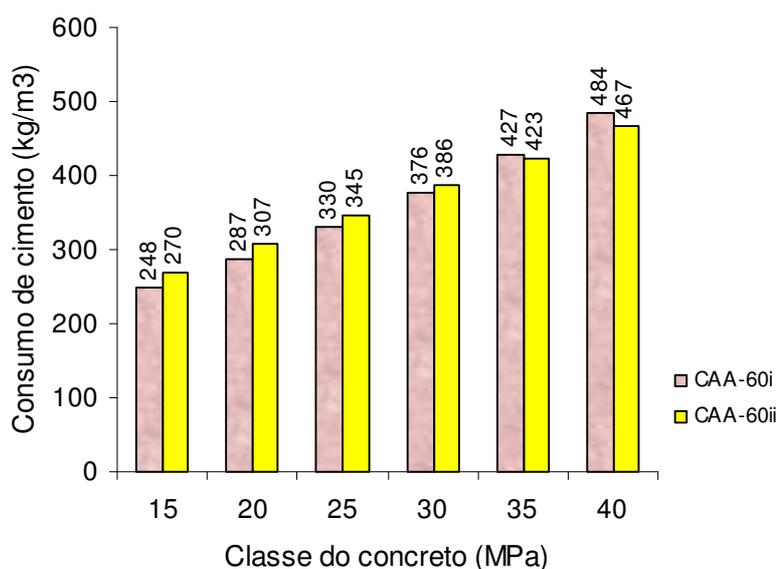


Figura 109: comparação de consumo de cimento/m<sup>3</sup> do CAA-60i da etapa I (1,25% de SP) e do CAA-60ii da etapa II (0,68% de SP)

Em contrapartida, o concreto com maior dosagem de superplastificante (o CAA-60i) acabou sendo o mais caro, e nota-se que a diferença entre os custos, apresentados na figura 110, tende a aumentar (de 6,7% a 19%) à medida que a resistência do concreto aumenta.

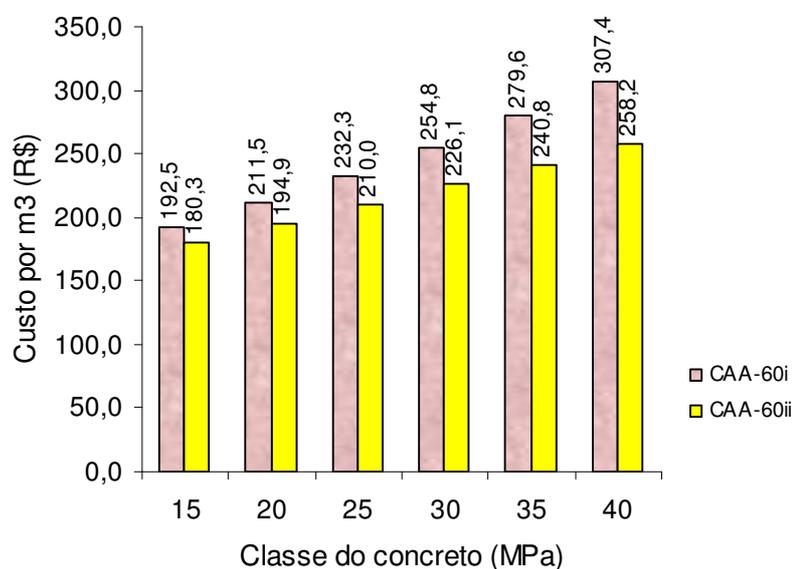


Figura 110: comparação dos custos/m<sup>3</sup> do CAA-60i da etapa I (1,25% de SP) e do CAA-60ii da etapa II (0,68% de SP)

Por exemplo, para um concreto com resistência de 25 MPa o CAA-60i seria 10,6% mais caro do que o CAA-60ii. Já se for o caso de concreto com 35 MPa a diferença entre custos subiria para cerca de 16%, e para 19% no caso de 40 MPa.

Os custos por MPa para cada um dos concretos estão apresentados na figura 111, onde observa-se que o CAA-60ii apresenta os menores custos para cada MPa. As diferenças entre esses custos dos dois concretos comparados tendem a aumentar (de 6,7% a 18,5%) para classes de concreto com maior resistência.

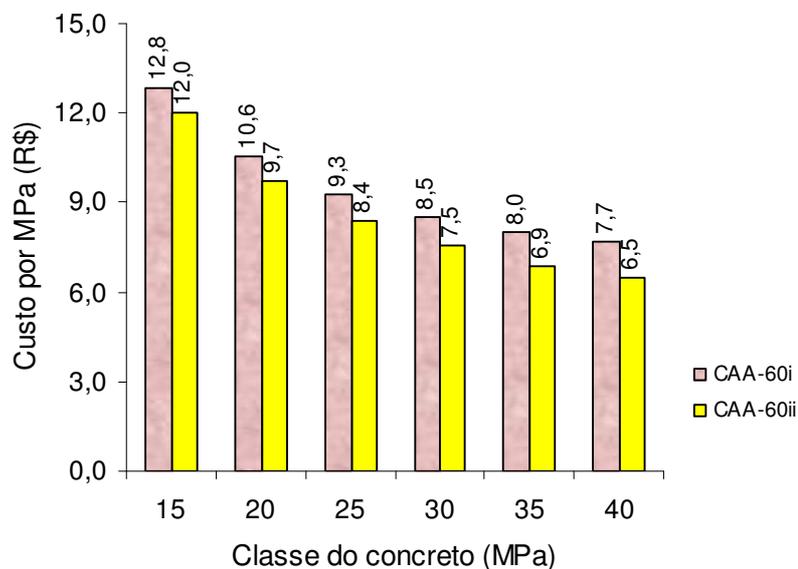


Figura 111: comparação de custos/MPa do CAA-60i da etapa I (1,25% de SP) e do CAA-60ii da etapa II (0,68% de SP)

Por exemplo, para a classe de 30 MPa a diferença nos custos por MPa é de 13,3%, sobe para 15,9% quando a classe é a de 35 MPa e para 18,5% quando o concreto é de 40 MPa. Portanto, o CAA-60ii apresenta melhor relação custo/benefício.

Finalizando essa comparação, pode-se dizer que pelos resultados obtidos, esta análise deve sempre ser tida em conta em se tratando de dosagem de CAA pelo método proposto por Tutikian (2004). Além disso, como cita Griesser (2002), o efeito da temperatura ambiente deve ser considerado em se tratando de dosagem de aditivo superplastificante, pois se espera que temperaturas mais elevadas gerem valores menores de fluidez e maiores perdas de fluidez, mas que não é uma regra geral para todos os cimentos superplastificados.

Aliás, esse efeito da temperatura foi observado neste estudo durante a repetição de um traço de CAA: foi feita a mesma dosagem de superplastificante em dia mais frio do que no dia da primeira dosagem e o concreto segregou, sugerindo que menos aditivo era necessário para o concreto não segregar, uma vez que era o mesmo traço e as mesmas quantidades de materiais.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo estudar a influência do teor de argamassa sobre o desempenho de concretos auto-adensáveis quanto as suas propriedades no estado fresco: fluidez, capacidade de preencher espaços e resistência à segregação; e no estado endurecido: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e velocidade do pulso ultra-sônico.

Com base no comportamento dos CAA produzidos em relação à variável teor de argamassa, pretendia-se colaborar para o desenvolvimento do processo de dosagem de CAA's.

Deve ficar claro que as conclusões apresentadas a seguir, apesar de estarem em consonância com a bibliografia existente, não devem ser tomadas de forma absoluta, pois se referem somente aos dados obtidos nesta pesquisa, na qual os concretos produzidos utilizaram tipos, quantidades e qualidades específicas de materiais, e técnicas de execução. Desta forma, sua representatividade deve ser firmada através da execução de novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementar e confirmar os obtidos neste estudo.

### 7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado em duas etapas, sendo que na primeira os ajustes para transformar o concreto convencional em auto-adensável foram feitos no traço mais pobre (1:7,5), sendo avaliados os traços 1:3, 1:4,5, 1:6 e 1:7,5 para os teores de argamassa variando de 55 a 75%.

Na segunda etapa, os ajustes para transformar o concreto convencional (CCV) em concreto auto-adensável (CAA) foram feitos no traço intermediário, sendo avaliados os traços 1:3, 1:4,5 e 1:6. Nesta segunda etapa, foram estudados os teores de argamassa que tiveram melhor desempenho na etapa I (55 e 60%), com exceção do estudo do módulo de elasticidade, em que foram avaliados teores de argamassa variando de 54 a 75% para o traço 1:4,5.

Considerando os resultados dos ensaios realizados para avaliar o comportamento no estado fresco dos concretos auto-adensáveis produzidos, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- O método de dosagem utilizado proporcionou, para todos os ensaios realizados no estado fresco, resultados muito parecidos com os valores encontrados na literatura nacional e internacional;
- os resultados obtidos na etapa II apresentaram variabilidade menor em relação aos resultados dos ensaios executados na etapa I, ou seja, o ajuste de aditivo pelo traço intermediário parece ser o mais indicado ;
- verificou-se um tempo de escoamento do CAA no funil maior para os traços mais ricos, o que denota maior viscosidade desses traços;
- Tutikian (2004) conseguiu, e neste estudo também foi obtido, um CAA com o mesmo teor de argamassa do CCV, capaz de atingir os parâmetros estabelecidos para o material no estado fresco;
- para o presente trabalho o teor ideal de argamassa está na faixa entre 54 (ideal determinado para o CCV-REF) e 60% (teor que apresentou melhores resultados nas dosagens realizadas), para um teor de filler entre 35 a 45% (sobre o teor total de areia para o traço do CCV), dependendo dos valores que se pretenderem alcançar para os ensaios de avaliação no estado fresco.

Com relação aos resultados obtidos nos ensaios mecânicos, podem-se enumerar as seguintes conclusões, todas já comentadas anteriormente:

#### A. EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

- Em relação ao CCV-REF (ou CCV-54), a resistência à compressão do CAA-55 (da etapa I) foi superior em todos os traços, com percentagens de 5,9%, 17,2%, 19,8% e 52,3%, para  $m=3$ ,  $m=4,5$ ,  $m=6$  e  $m=7,5$ , respectivamente;
- em relação ao CCV-REF, o CAA-65 (da etapa I) teve resistência 25,7% superior; ainda nesse mesmo traço, nota-se certo equilíbrio entre os teores de argamassa de 60, 70 e 75%, cujas diferenças entre si não passaram dos 3%, para idade de 28 dias;
- verificou-se na etapa I que os teores de argamassa de 55% (CAA-55) e 60% (CAA-60) apresentaram resultados bem similares nos traços  $m=4,5$  e  $m=7,5$ , e que o CAA-60 no traço  $m=3$  foi 8,5% superior ao CAA-55, enquanto que o CAA-55 foi 9,5% superior no traço  $m=6$ ;
- ainda na etapa I e comparando os CAA's entre si, notou-se que, no traço  $m=3$ , houve certa tendência da resistência à compressão aumentar com o incremento do teor de argamassa (do CAA-55 ao CAA-65; ainda assim os CAA-70 e CAA-75 foram ligeiramente superiores ao

CAA-60). O CAA-65 superou o CAA-55, CAA-60, CAA-70 e o CAA-75 em 18,7%, 9,4%, 7,5% e 6,3%, respectivamente;

- a evolução da resistência dos CAA na etapa II foi superior ao CCV-REF para os traços 1:3 e 1:4,5; para o traço 1:6 ambos apresentaram comportamento bastante similar.

## B. EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

- Para o traço  $m=4,5$ , o CAA-54 (da etapa II) foi superior aos demais concretos. O CAA-60 (da etapa II), que foi superado pelo CAA-54 em 17,5%. foi o segundo melhor nesse traço. Os outros quatro concretos (da etapa II), o CCV-54, CAA-65, CAA-70 e CAA-75, apresentaram resistências bem similares entre si;
- os dados de resistência à tração da etapa II apresentaram-se similares para o CAA-54 e o CAA-60, nos traços  $m=3$  e  $m=6$ ; apenas no traço  $m=4,5$  em que o CAA-54 e CAA-75 foram os melhores, o CAA-60 foi superado em 27% pelo CAA-54;
- o quociente da relação entre resistência à tração e a resistência à compressão para os CAA foi semelhante ao do CCV;
- a avaliação do grau de segregação do concreto já endurecido pela observação de corpos-de-prova rompidos por compressão diametral mostrou-se interessante, uma vez que reproduziu a realidade do estado fresco, tendo sido verificada uniformidade na distribuição do agregado graúdo ao longo do corpo-de-prova.

## C. EM RELAÇÃO AO MÓDULO DE ELASTICIDADE

- A influência do teor de argamassa no módulo de deformação foi como o esperado, ou seja, o módulo diminuiu à medida que o teor de argamassa;
- em termos comparativos entre os CAA's produzidos na etapa II (CAA-54, CAA-60, CAA-65, CAA-70 e CAA-75), observou-se um melhor desempenho dos CAA-54 e CAA-60, que tiveram módulo de elasticidade cerca de 6% maior do que o do concreto convencional (CCV-54), representando uma vantagem técnica do CAA;
- em termos numéricos e para as relações água/cimento apresentadas neste estudo, observou-se que o módulo do CAA-54 superou o do CAA-65, do CAA-70 e o do CAA-75 em 12, 18 e 21%, respectivamente.

#### D. EM RELAÇÃO AO ENSAIO DE ULTRA-SOM

- O ensaio de ultra-som mostrou ser um ensaio bastante interessante para verificar a qualidade e homogeneidade do concreto endurecido;
- os resultados provam que a velocidade do pulso ultra-sônico tende a diminuir à medida que aumenta o teor de argamassa, apesar das diferenças nas relações água/cimento dos concretos ensaiados, uma vez que o teor de agregado graúdo, que diminui com o aumento do teor de argamassa, exerce forte influência sobre a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico;
- independente do teor de argamassa, observou-se em todos os concretos produzidos que a velocidade do pulso diminui a medida que o traço do concreto fica mais pobre (com consumo de cimento menor) por apresentarem as maiores relações água/cimento que é um fator que influencia, além da resistência, a formação da porosidade interna do concreto;
- nos resultados da etapa I deste trabalho nota-se que o CAA-60 apresentou os melhores resultados em três dos quatro traços, sendo superado por apenas 4% pelo CCV-REF (CCV-54) no traço 1:4,5;
- os valores médios da velocidade do pulso ultra-sônico obtidos para cada teor de argamassa foram todos bem similares aos do concreto convencional vibrado deste estudo, o que leva a concluir que os concretos produzidos podem ser considerados concretos de boa qualidade, quando comparados ao CCV-REF;
- a comparação dos resultados obtidos para o CCV-54 (CCV-REF) e CAA-54 comprova que o CAA, apesar de não ser vibrado, apresenta uma estrutura interna bem similar a de um concreto convencional;
- os resultados indicaram que existe para os dados deste estudo uma correlação entre a velocidade do pulso de ultra-som e a respectiva resistência à compressão em todos os concretos produzidos; para os concretos da etapa I os coeficientes de determinação das correlações ( $r^2$ ) foram de 90, 97, 94, 92 e 83% para o CAA-55, CAA-60, CAA-65, CAA-70 e CAA-75, respectivamente; para o CCV-REF, CAA-54 e CAA-60 produzidos na etapa II, os coeficientes de determinação das correlações ( $r^2$ ) foram de 87, 73 e 91%, respectivamente;
- conseqüentemente, verificou-se que existe também uma correlação da relação a/c dos concretos produzidos com o resultado do ultra-som.

## E. EM RELAÇÃO AO CONSUMO DE CIMENTO

- O consumo de cimento dos concretos da etapa I, para mesma classe de resistência do concreto, diminuiu à medida que o teor de argamassa aumentou, com exceção do teor de argamassa de 75% , que não teve a mesma tendência e teve o maior consumo em quatro das seis classes de concreto analisadas;
- o teor de argamassa de 70%, portanto, foi o teor com o menor consumo de cimento para todas as seis classes de concreto;
- Para todos os teores de argamassa estudados o consumo de cimento aumentou com o aumento da classe de resistência do concreto, como esperado;
- pela análise feita com dois concretos com mesmo teor de argamassa (CAA-60 da etapa I e CAA-60 da etapa II) verificou-se que uma maior dosagem de superplastificante reduz a quantidade de cimento no traço; portanto, o concreto com maior consumo de cimento por  $m^3$  requereu menor dosagem de superplastificante para a mesma faixa de trabalhabilidade.
- o CCV-REF apresentou maior consumo de cimento, que variou entre 7 a 16% em relação ao CAA-54 para concretos entre 15 a 40 MPa;
- em se tratando de dosagem de CAA, um maior consumo de cimento por  $m^3$  não significa maior custo por  $m^3$  do concreto, o que rege o custo total é o consumo de superplastificante.

## F. EM RELAÇÃO AOS CUSTOS

- Os resultados indicam que as diferenças entre os custos por  $m^3$  do CCV-REF em relação ao CAA-54 variam entre 18,2 a 33,8%, e é tanto maior quanto menor for a classe do concreto, ou seja, o CAA se torna mais competitivo em relação ao CCV para classes de resistência maiores;
- comparando o CAA-54 com o CAA-60, verificou-se que existe a tendência contrária da observada no caso anterior (CCV x CAA). Ou seja, a diferença entre custos tende a aumentar à medida que a resistência do concreto aumenta; as diferenças para este caso variaram entre 3,8 a 5,5%, para concretos entre 15 a 40 MPa de resistência;
- para CAA o aumento do teor de argamassa aumenta o custo do concreto e a diferença entre concretos com diferentes teores de argamassa tende a aumentar para resistências maiores, o contrário do que ocorre com o CCV em relação ao CAA;
- os custos por metro cúbico de concreto para as classes de resistência avaliadas aumenta à medida que aumenta a resistência do concreto, para todos os teores de argamassa.

## 7.2 COMENTÁRIOS FINAIS

Com relação a todos os resultados obtidos no estado fresco e no estado endurecido, pode-se concluir que a utilização do conceito de teor ideal de argamassa adotado para os concretos convencionais continua válido para os concretos auto-adensáveis, sendo que para o CAA este valor ideal pode ser acrescido em até 5 pontos percentuais.

Todas as propriedades do CAA testadas tiveram os melhores resultados para os teores de 54 (teor ideal para CCV) a 60%, tanto do ponto de vista técnico como econômico. Desta forma, o método de dosagem proposto por Tutikian (2004) pode ter validade pelos resultados obtidos nesta pesquisa, sem alterações.

Os valores elevados de teores de argamassa encontrados na literatura trazem reflexos negativos tanto nas propriedades do CAA no estado fresco, endurecido no seu custo, dificultando seu uso competitivo ao concreto convencional.

Salienta-se, no entanto, que é necessário ainda corroborar estes resultados através de novas pesquisas com outros materiais bem como com a aplicação em situações reais.

## 7.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Em virtude da escassez de trabalhos realizados sobre concreto auto-adensável no Brasil, com técnicas e materiais nacionais, inúmeras sugestões poderiam ser listadas. Contudo, e uma vez que o entendimento da dosagem do CAA tem crescido sugere-se o seguinte para futuros estudos:

- Estudar o efeito do procedimento e do tempo de mistura dos materiais, em função do tipo de betoneira;
- Proceder a ensaios de durabilidade do CAA, a fim de conhecer ou estimar seu comportamento de longo prazo;
- Testar o método proposto por Tutikian com outros materiais, em outras regiões do Brasil a fim de se confirmar sua aplicação;

- Estudar a microestrutura do concreto que permitiram uma visualização dos efeitos físico-químicos causados pelas adições e aditivos superplastificante/VMA que ajudam a explicar os mecanismos pelos quais ocorrem mudanças nas propriedades mecânicas do concreto auto-adensável;
- Estudar as vantagens técnico-econômicas do uso do CAA numa situação real.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7211 - Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1984.

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

\_\_\_\_\_. NBR 7222 - **Argamassa e concreto: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.

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

\_\_\_\_\_. NBR NM 45 - **Agregados - Determinação da massa unitária e dos espaços vazios.** Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. NBR 5736 – **Cimento Portland pozolânico.** Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 5738 - **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. NBR 5739 – **Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto.** Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. NBR 6118 - **Projeto e execução de obras de concreto armado.** Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 6474 - **Cimento portland: Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1998.

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

\_\_\_\_\_. NBR 8802 – **Concreto endurecido– determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 8953 – **Concreto para fins estruturais: Classificação por grupos de resistência.** Rio de Janeiro, 1992.

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

\_\_\_\_\_. NBR 9935 - **Agregados: Terminologia.** Rio de Janeiro, 1987.

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

\_\_\_\_\_. NBR 12654 – **Controle tecnológico de materiais componentes do concreto.** Rio de Janeiro, 1992.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção.** Vol.1, 5a Ed. LTC: São Paulo, 2000.

BOSILJKOV, Violeta B. **Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash – Preliminary results.** Cement and Concrete research 33 (1279-1286), 2003.

BOUZOUBAÂ, N. & LACHEMI, M. **SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler.** Cement and Concrete research 3 (413-420), 2001.

BUI, V.K., MONTGOMERY, D., HINCZAK, I. e K. TURNER. **Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete.** Cement and Concrete research, 2002.

CHOPIN, D., DE LARRARD, F. & CAZACLIU, B. **Why do HPC and SCC require a longer mixing time?** Cement and Concrete research, 2004.

COLLEPARDI, M. **A very close precursor of self-compacting concrete (SCC).** In: Supplementary volume of the Proceedings of Three-day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology, September 16-19, 2001.

CORINALDESI, V. & MORICONI, G. **Durable fiber reinforced self-compacting concrete.** Cement and Concrete research 34 (249-254), 2004.

DJELAL, C., VANHOVE, Y & MAGNIN, A. **Tribological behaviour of self-compacting concrete.** Cement and Concrete research 34 (821-828), 2004.

EFNARC - European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete.** In: *EFNARC*. Fevereiro, 2002.

FERREIRA, Rui M.S. **Betão auto-compactável: metodologia de composição.** Guimarães, 2001. 178p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia do Minho. Universidade do Minho, Portugal.

GEIKER, M.R., BRANDL, M., THRANE, L.N., BAGER, D.H., WALLEVIK, O. **The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete.** Cement and Concrete research 32 (1791-1795), 2002.

GOMES, Paulo C.C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.** Barcelona, 2002. 139p. Doctoral Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.

GOODIER, C.I. **Development of self-compacting concrete.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures & Buildings 156. November, 2003 Issue SB4, pages 405-414. Paper 13118.

GRIESSER, Andreas. **Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures.** Zurich, 2002. 147p. Doctoral Thesis. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

GRÜNEWALD, Steffen. **Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete.** Delft, 2004. 232p. Doctoral Thesis. Delft University of Technology, The Netherlands.

GRÜNEWALD, Steffen & WALRAVEN, J.C. **Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete.** Cement and Concrete research 31 (1793-1798), 2001.

HAN, LIN-HAI & YAO, GUO-HUANG. **Experimental behavior of thin-walled hollow structural steel (HSS) columns filled with self-compacting concrete (SCC)**. *Thin-Walled Structures* 42, 2004.

HARTMANN, Carine T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. São Paulo, 2002. 234p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

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

HOLSCHEMACHER, K. & KLUG, Y. **A database for the evaluation of hardened properties of SCC**. LACER No. 7, 2002. HTWK Leipzig.

HWANG, C.L. and CHEN, Y.Y. **The property of self-consolidating concrete designed by the Densified Mixture Design Algorithm**. In: First north american conference on the design and use of self-consolidating concrete. Conference notes November 12-13, 2002 (Evanston, IL). A Hanley-Wood publication, 2003. Addison, IL, USA.

ISATTO, E.L. et al. **Lean Construction: Diretrizes e Ferramentas para o Controle de Perdas na Construção Civil**. Porto Alegre: SEBRAE-RS, 2000.

KHAYAT, K.H., HU, C. and LAYE, J.-M. **Importance of aggregate packing density on workability of self-consolidating concrete**. In: First north american conference on the design and use of self-consolidating concrete. Conference notes November 12-13, 2002 (Evanston, IL). A Hanley-Wood publication, 2003. Addison, IL, USA.

KHAYAT, K.H. and DACZKO, J.A. **The holistic approach to self-consolidating concrete**. In: First north american conference on the design and use of self-consolidating concrete. Conference notes November 12-13, 2002 (Evanston, IL). A Hanley-Wood publication, 2003. Addison, IL, USA.

KOSMATKA, S.H., KERHOF, B. e PANARESE, W.C. **Design and control of concrete mixtures**. 14th. Ed. Skokie, Illinois, USA, 2002.

LISBÔA, Edvaldo M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. Maceió, 2004. 144p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas.

Maine Department of Transportation, Transportation Research Division. **Experimental Use of Self-Compacting Concrete for Precast Prestressed Box Beams**. Technical Memorandum ME 03-10. Augusta, Maine, USA, 2003.

MANUEL, P.J.M e DAL MOLIN, D.C.C. **Influência do tipo de agregado graúdo na dosagem de concretos convencionais**. In: Simpósio Ibero-Americano "O Betão nas Estruturas" (9-16) 5-7 julho, Coimbra, Portugal, 2005.

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Salvador E. Giammusso. 1 ed. São Paulo: PINI, 1982.

NUNES, Sandra C.B. **Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades**. Porto, 2001. 198p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Portugal.

OKAMURA, H. & OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. Journal of Advanced Technology Vol. 1, No. 1, 5-15. Japan Concrete Institute, 2003.

OUCHI, M., NAKAMURA, S., OSTERBERG, T., HALLBERG, S.E. & LWIN, M. **Application of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States**. In: International Symposium on High Performance Concrete, 2003.

PERSSON, B. **A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete**. Cement and Concrete research, 2001.

POON, C.S. & HO, D.W.S. **A feasibility study on the utilization of r-FA in SCC**. Cement and Concrete research, 2004.

PROCEEDINGS INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE. **International course on durability of concrete structures**. Florianópolis, 1996, Brazil.

SONEBI, Mohammed. **Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans**. Cement and Concrete research, 2004.

SU, N., HSU, K.-C. & CHAI, H.-W. **A simple mix design method for self-compacting concrete**. Cement and Concrete research 31, (1799-1807), 2001.

RAMACHANDRAN, V.S., MALHOTRA, V.M., JOLICOEUR, C. & SPIRATOS, N. **Superplasticizers: properties and applications in concrete**. CANMET, Ottawa, 1998.

RAVINDRARAJAH, S., FARROKHZADI, F. & LAHOUD, A. **Properties of flowing concrete and self-compacting concrete with high-performance superplasticiser**. In: Proceedings of the 3th International RILEM Symposium, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003, Edited by O. Wallevik and I. Nielsson, (RILEM Publications), 1 Vol., 1048 pp.

RAVINDRARAJAH, S., SILADYI, D. & ADAMOPOULOS, B. **Development of high-strength self-compacting concrete with reduced segregation potential**. In: Proceedings of the 3th International RILEM Symposium, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003, Edited by O. Wallevik and I. Nielsson, (RILEM Publications), 1 Vol., 1048 pp.

TAKADA, Kazunori. **Influence of admixtures and mixing efficiency on the properties of self compacting concrete: the birth of self compacting concrete in the Netherlands**. Delft, 2004. 220p. Doctoral Thesis. Delft University of Technology, The Netherlands.

TATTERSALL, G.H & BANFILL, P.FG. **The rheology of fresh concrete**. Boston: Pitman Advanced Publishing Inc., 1983.

TUTIKIAN, Bernardo F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Porto Alegre, 2004. 149p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TVIKSTA, L.-G. **Guidelines for Self-compacting concrete**. Brite EuRam Proposal No. BE96-3801, Task 9 End Product, Guideline, 2000.

XIE, Y., LIU, B., YIN, J. & ZHOU, S. **Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash**. Cement and Concrete research 32, (477-480), 2002.

ZHU, W., GIBBS, J.C. & BARTOS, P.J.M. **Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements**. Cement & Concrete Composites 23 (2001) 57-64.

ZHU, W., & GIBBS, J.C. **Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete**. Cement and Concrete research , 2004.

## **ANEXO 1 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ESTADO FRESCO**

Tabela 1 - resultados no estado fresco dos concretos auto-adensáveis produzidos na etapa I

Concretos Etapa I	Traço <i>m</i> (kg/kg)	Slump flow (mm)	$T_{500}$ (s)	V-funnel (s)	Box-shape $H_{CAA}$ (cm)	Peso/volume do CP (kg/m <sup>3</sup> )
CAA-55	3	700	6,77	13,21	30,0	2248
	4,5	700	3,71	8,73	31,0	2212
	6	700	3,49	7,93	32,0	2323
	7,5	665	1,83	4,42	31,0	2375
CAA-60	3	690	3,82	12,42	31,0	2301
	4,5	590	3,96	7,21	33,0	2360
	6	645	2,35	6,31	32,0	2322
	7,5	605	1,90	4,85	34,0	2373
CAA-65	3	735	7,15	22,06	31,0	2327
	4,5	550	3,50	6,10	32,0	2247
	6	600	4,52	6,28	33,0	2248
	7,5	540	3,55	5,48	34,0	2319
CAA-70	3	650	9,95	20,34	32,0	2293
	4,5	675	7,82	12,46	33,0	2245
	6	635	8,30	10,95	32,0	2309
	7,5	590	4,56	9,47	34,0	2225
CAA-75	3	695	5,59	18,96	34,0	2189
	4,5	725	3,88	7,47	34,0	2095
	6	745	4,33	7,53	34,0	2179
	7,5	700	2,56	4,60	34,0	2175

Tabela 2 - resultados no estado fresco dos concretos auto-adensáveis produzidos na etapa II

Concretos Etapa II	Traço <i>m</i> (kg/kg)	Slump flow (mm)	$T_{500}$ (s)	V-funnel (s)	L-Box $H_2/H_1$	Peso/volume do CP (kg/m <sup>3</sup> )
CAA-54	3	680	3,65	8,16	1,00	2355
	4,5	635	4,27	10,91	0,83	2369
	6	565	6,07	12,52	0,78	2391
CAA-60	3	700	2,74	8,03	1,00	2339
	4,5	680	2,96	7,76	0,88	2365
	6	685	3,13	5,94	1,00	2345
CAA-65	4,5	670	2,05	6,38	0,83	2343
CAA-70	4,5	725	2,67	7,80	1,00	2321
CAA-75	4,5	790	3,42	4,93	1,00	2221

**ANEXO 2 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ESTADO ENDURECIDO  
E CORRELAÇÕES DE ALGUMAS VARIÁVEIS DE DOSAGEM**

## 1. RELAÇÕES ENTRE RESISTÊNCIAS DOS CAA DA ETAPA I E DO CONCRETO CONVENCIONAL (CCV-REF)

Concretos Estudados	Traço 1:m	Relação a/c	SP/cim. (%)	Resistência à compressão, $f_{cm}$ (MPa)				Tração 28d (MPa)	Relação entre resistências			
				3 dias	7 dias	28 dias	56 dias		3d/28d	7d/28d	28d/56d	$f_{tm,28}/f_{cm,28}$
CCV-REF $\alpha = 54\%$	1:3	0,42	0	24,7	27,1	38,90	49,40	2,49	0,63	0,70	0,79	0,06
	1:4,5	0,5		17,8	20,3	27,90	38,10	1,96	0,64	0,73	0,73	0,07
	1:6	0,63		11,4	14,6	21,20	27,50	1,93	0,54	0,69	0,77	0,09
	1:7,5	0,78		6,3	7,5	11,10	15,50	1,09	0,57	0,68	0,72	0,10
CAA $\alpha = 55\%$	1:3	0,370	1,43	19,4	25,30	41,20	36,40	2,78	0,47	0,61	1,13	0,07
	1:4,5	0,475		17,1	20,50	32,70	28,20	2,02	0,52	0,63	1,16	0,06
	1:6	0,600		11,1	16,20	25,40	26,70	2,21	0,44	0,64	0,95	0,09
	1:7,5	0,820		6,9	9,30	16,90	18,70	1,54	0,41	0,55	0,90	0,09
CAA $\alpha = 60\%$	1:3	0,376	1,25	24,5	27,50	44,70	38,40	3,40	0,55	0,62	1,16	0,08
	1:4,5	0,508		17,5	21,80	32,20	26,00	2,91	0,54	0,68	1,24	0,09
	1:6	0,639		12,1	16,20	23,20	22,70	1,89	0,52	0,70	1,02	0,08
	1:7,5	0,810		8,1	11,00	16,60	16,40	1,33	0,49	0,66	1,01	0,08
CAA $\alpha = 65\%$	1:3	0,350	1,75	26,4	37,50	48,90	54,60	2,83	0,54	0,77	0,90	0,06
	1:4,5	0,558		13,3	20,10	29,10	31,90	2,38	0,46	0,69	0,91	0,08
	1:6	0,674		10,1	14,50	22,20	26,10	2,36	0,45	0,65	0,85	0,11
	1:7,5	0,827		6,9	10,50	17,60	19,00	1,46	0,39	0,60	0,93	0,08
CAA $\alpha = 70\%$	1:3	0,366	1,73	26,0	37,20	45,50	43,70	4,26	0,57	0,82	1,04	0,09
	1:4,5	0,495		16,9	23,40	31,60	38,80	2,51	0,53	0,74	0,81	0,08
	1:6	0,632		11,9	16,60	22,90	29,70	2,15	0,52	0,72	0,77	0,09
	1:7,5	0,807		7,2	10,20	14,80	19,00	1,14	0,49	0,69	0,78	0,08
CAA $\alpha = 75\%$	1:3	0,370	2,76	16,8	28,2	46,0	40,7	2,47	0,37	0,61	1,13	0,05
	1:4,5	0,518		10,3	13,8	25,8	27,5	1,59	0,40	0,53	0,94	0,06
	1:6	0,661		7,7	10,8	18,5	19,0	1,46	0,42	0,58	0,97	0,08
	1:7,5	0,848		6,3	8,1	13,0	14,2	1,04	0,48	0,62	0,92	0,08
OBS:				2 CP's	3 CP's	2 CP's	2 CP's	3 CP's				

2. DADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, À TRAÇÃO, U-SOM E MASSA DOS CP'S PARA OS 4 TRAÇOS DOS CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS PRODUZIDOS NA ETAPA II NAS IDADES ESTUDADAS

CAA-54: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,62% 3 dias									
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Velocidade u-som (m/s)			Massa do CP (g)		
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)
m=3	26,8	0,70	2,61	4171,25	6,48	0,16	3136,00	7,07	0,23
m=4,5	16,4	1,80	10,93	-	-	-	3123,00	9,90	0,32
m=6	11,7	0,00	0,00	3725,62	30,99	0,83	3180,00	4,24	0,13

CAA-54: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,62% 7 dias									
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Velocidade u-som (m/s)			Massa do CP (g)		
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)
m=3	33,5	0,25	0,74	4051,25	24,43	0,60	3126,00	5,66	0,18
m=4,5	20,7	0,90	4,33	4112,57	12,59	0,31	3163,50	14,85	0,47
m=6	14,8	0,15	1,01	3721,84	5,16	0,14	3138,50	16,26	0,52

CAA-54: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,62% 28 dias									
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Tração (MPa)			Velocidade u-som (m/s)		
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)
m=3	46,2	0,92	1,99	2,35	0,26	10,95	4535,25	66,38	1,46
m=4,5	36,9	1,68	4,55	2,25	0,15	6,66	4302,78	76,23	1,77
m=6	20,8	2,41	11,60	1,76	0,06	3,44	4265,99	69,62	1,63

CAA-54: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,62% 56 dias									
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Velocidade u-som (m/s)			Massa do CP (g)		
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)
m=3	54,6	1,85	3,38	-	-	-	0,00	0,00	-
m=4,5	42,8	0,00	0,00	-	-	-	0,00	0,00	-
m=6	27,7	1,00	3,60	-	-	-	0,00	0,00	-

CAA-60: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,68% 7 dias									
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Velocidade u-som (m/s)			Massa do CP (g)		
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)
m=3	32,5	0,45	1,38	4060,74	85,90	2,12	3074,00	19,80	0,64
m=4,5	21,1	0,25	1,18	4139,43	0,00	0,00	3038,00	1,41	0,05
m=6	15,0	0,15	1,00	3707,74	56,27	1,52	3091,00	14,14	0,46

CAA-60: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,68% 28 dias									
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Tração (MPa)			Velocidade u-som (m/s)		
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)
m=3	46,1	0,47	1,02	2,24	0,35	15,82	4450,15	57,83	1,30
m=4,5	31,4	1,02	3,25	1,80	0,18	10,10	4178,17	55,15	1,32
m=6	21,6	0,31	1,42	1,45	0,37	25,85	4145,51	18,87	0,46

CAA-65: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,70%										7 dias
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Velocidade u-som (m/s)			Massa do CP (g)			
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	
m=4,5	19,6	1,30	6,61	3962,57	29,22	0,74	3097,50	21,92	0,71	

CAA-65: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,70%										28 dias
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Tração (MPa)			Velocidade u-som (m/s)			
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	
m=4,5	27,5	3,33	12,13	2,00	0,02	0,86	4151,76	40,95	0,99	

CAA-70: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,968%										7 dias
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Velocidade u-som (m/s)			Massa do CP (g)			
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	
m=4,5	19,6	0,15	0,76	3857,87	5,54	0,14	2966,50	3,54	0,12	

CAA-70: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,968%										28 dias
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Tração (MPa)			Velocidade u-som (m/s)			
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	
m=4,5	28,8	1,25	4,36	1,65	0,12	7,27	4145,49	13,80	0,33	

CAA-75: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,9578%										7 dias
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Velocidade u-som (m/s)			Massa do CP (g)			
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	
m=4,5	18,8	0,05	0,27	4187,52	73,33	1,75	3001,00	12,73	0,42	

CAA-75: teor de fíler calcário= 40%, dosagem de SP=0,9578%										28 dias
Traço (kg/kg)	Compressão (MPa)			Tração (MPa)			Velocidade (m/s)			
	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	MÉDIA	DP	CV(%)	
m=4,5	27,4	0,75	2,75	2,25	0,15	6,66	4101,63	74,61	1,82	

### 3. RELAÇÃO PESO/VOLUME DOS CORPOS-DE-PROVA NO ESTADO FRESCO E AOS 28 DIAS DE HIDRATAÇÃO

Resultados dos cálculos da relação entre o peso do concreto que ocupa o volume de um corpo-de-prova cilíndrico ( $\varnothing 9,5 \times 19$  cm) e este mesmo volume, em  $\text{kg/m}^3$ . Estes cálculos foram efetuados para os concretos no estado fresco e no estado endurecido aos 28 dias. As figuras 1 e 2 apresentam o comportamento dessa relação peso/volume, no estado fresco e no estado endurecido, para os concretos da etapa I e da etapa II, respectivamente.

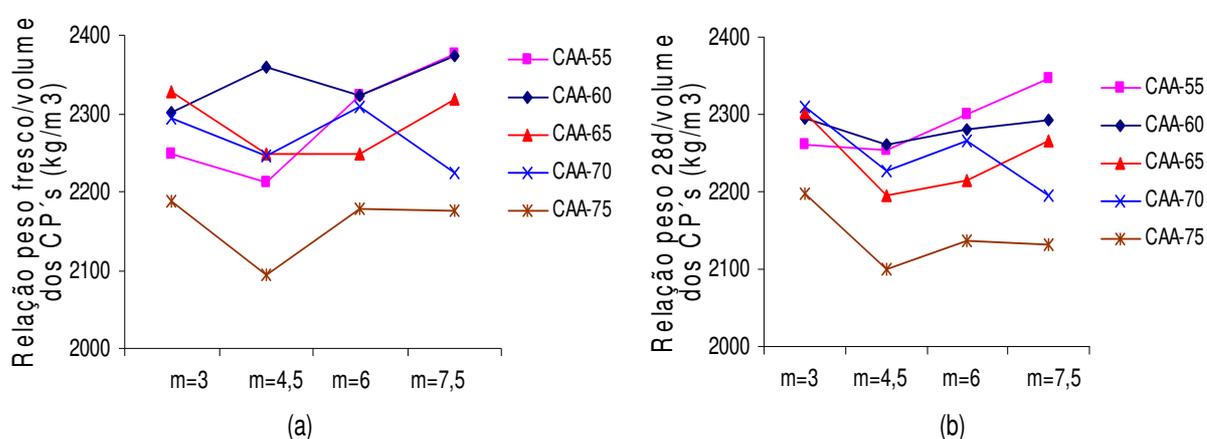


Figura 1: relação entre o peso e volume dos CP's no (a) estado fresco e (b) aos 28 dias (etapa I)

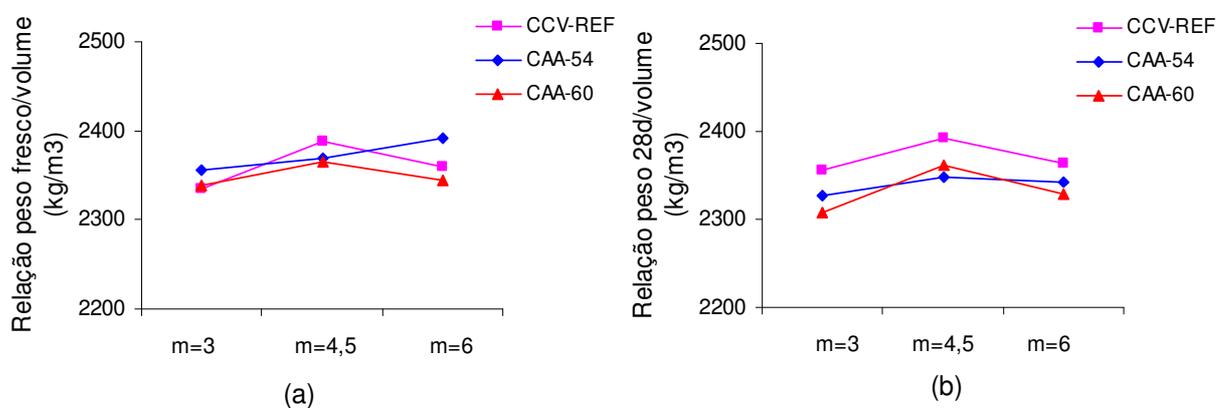


Figura 2: relação entre o peso e volume dos CP's no (a) estado fresco e (b) aos 28 dias (etapa II)

#### 4. MASSA ESPECÍFICA ESTIMADA DOS CONCRETOS

A massa específica dos concretos convencionais produzidos com os agregados normais varia segundo o processo de adensamento aplicado na sua fabricação, sofrendo também uma influência menor do meio ambiente em que são mantidos em função da variação da proporção de água contida nos seus poros. São os seguintes os valores médios (BAUER, 2000):

- concreto não adensado: 2100 kg/m<sup>3</sup>;
- concreto comprimido: 2200 kg/m<sup>3</sup>;
- concreto socado: 2250 kg/m<sup>3</sup>
- concreto vibrado: 2300 a 2400 kg/m<sup>3</sup>.

Neste estudo, a massa específica dos concretos foi estimada através da seguinte fórmula:

$$M.E = \frac{C}{(1+f+a+p+a/c)} \quad \text{onde:}$$

$M.E.$  = massa específica do concreto, em kg/m<sup>3</sup>;

$C$  = consumo de cimento, em kg/m<sup>3</sup>;

$f$ ,  $a$  e  $p$  = proporções de fíler, areia e brita em relação a massa de cimento do traço, em kg/kg;

$a/c$  = relação água-cimento.

Assim, os resultados obtidos para os concretos obtidos nas etapas I e II estão representados na figura 3(a) e (b), respectivamente.

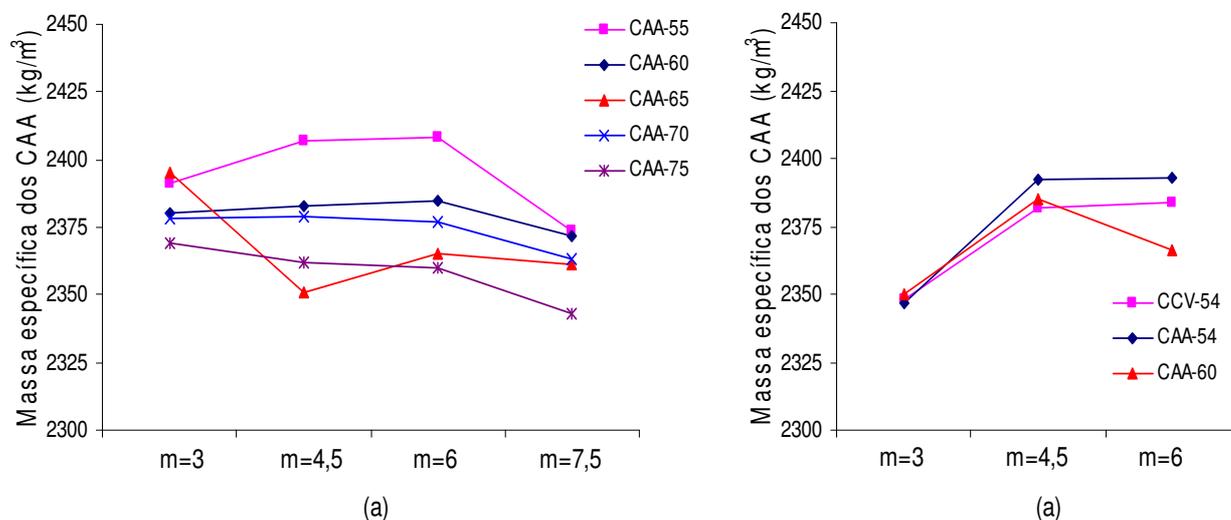


Figura 3: massa específica teórica dos concretos das etapas (a) I e (b) II

Tabela 3 - RESULTADOS NO ESTADO ENDURECIDO DOS CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS PRODUZIDOS NA ETAPA I

Concreto Etapa I	Traço <i>m</i> (kg/kg)	Velocidade <i>u-som</i> (m/s)				Peso/volume do CP (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
		3 dias	7 dias	28 dias	56 dias		
CAA-55	3	4086	4251	4332	4399	2262	2391
	4,5	4075	4223	4248	4279	2254	2407
	6	3770	3926	4190	4067	2300	2408
	7,5	3381	3730	3942	3965	2346	2374
CAA-60	3	4205	4383	4653	-	2294	2380
	4,5	3972	4139	4377	-	2261	2383
	6	3757	3874	4306	-	2281	2385
	7,5	3544	3711	4116	-	2292	2372
CAA-65	3	4077	4233	4398	-	2303	2395
	4,5	3727	4036	4149	4451	2196	2351
	6	3603	3958	4041	4077	2214	2365
	7,5	3439	3743	3860	4105	2266	2361
CAA-70	3	4454	4588	4446	4606	2310	2378
	4,5	4155	4188	4286	4393	2228	2379
	6	3987	4096	4137	4251	2266	2377
	7,5	3626	3556	3811	3889	2196	2363
CAA-75	3	3871	3944	4213	-	2197	2369
	4,5	3469	3661	3947	-	2101	2362
	6	3368	3476	3878	-	2137	2360
	7,5	3120	3277	3532	-	2132	2343

Tabela 4 - RESULTADOS NO ESTADO ENDURECIDO DOS CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS PRODUZIDOS NA ETAPA II

Concreto Etapa I	Traço <i>m</i> (kg/kg)	Velocidade <i>u-som</i> (m/s)				Peso/volume do CP (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
		3 dias	7 dias	28 dias	56 dias		
CAA-54	3	-	4051	4535	-	2326	2347
	4,5	-	4113	4303	-	2348	2392
	6	-	3722	4266	-	2343	2393
CAA-60	3	-	4061	4450	-	2307	2350
	4,5	-	4139	4178	-	2362	2385
	6	-	3708	4146	-	2329	2366
CAA-65	4,5	-	3963	4152	-	2290	2332
CAA-70	4,5	-	3858	4145	-	2221	2339
CAA-75	4,5	-	4188	4102	-	2222	2319

## 5. CORRELAÇÕES ENTRE ALGUMAS VARIÁVEIS DO ESTUDO DE DOSAGEM

As figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9 ilustram algumas correlações encontradas ao longo do estudo realizado, que poderão eventualmente ajudar em estudos futuros.

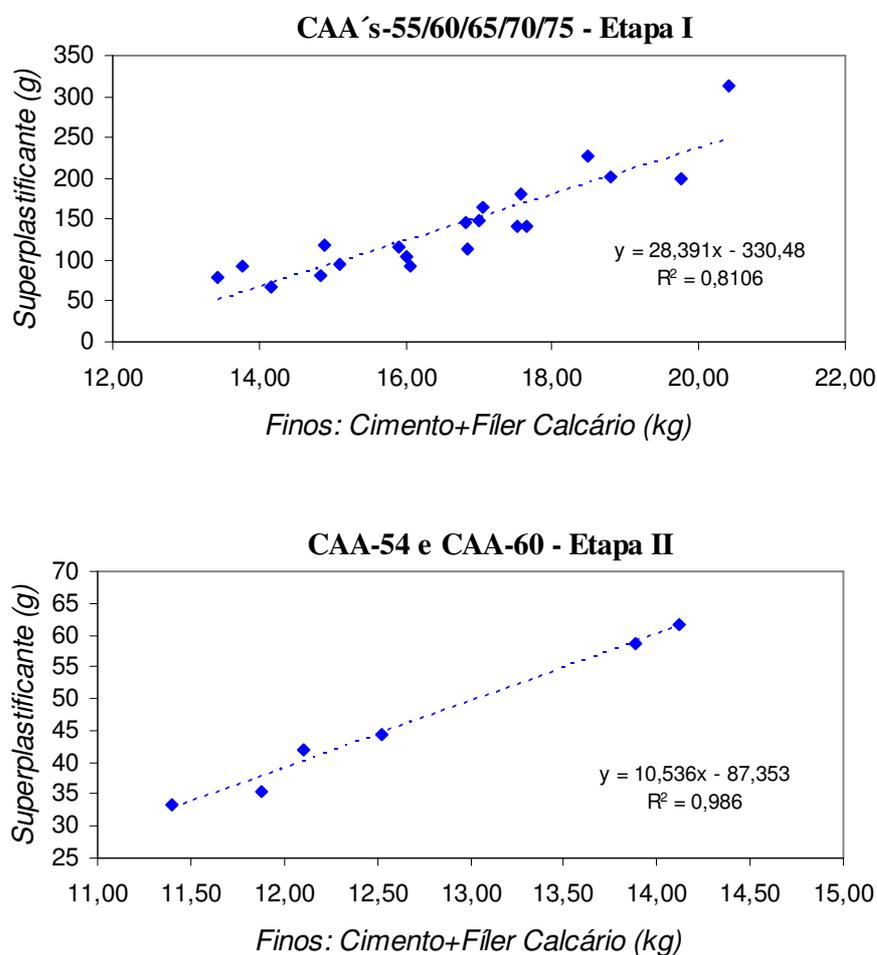


Figura 4: correlação entre os finos e superplastificante nas etapas I e II

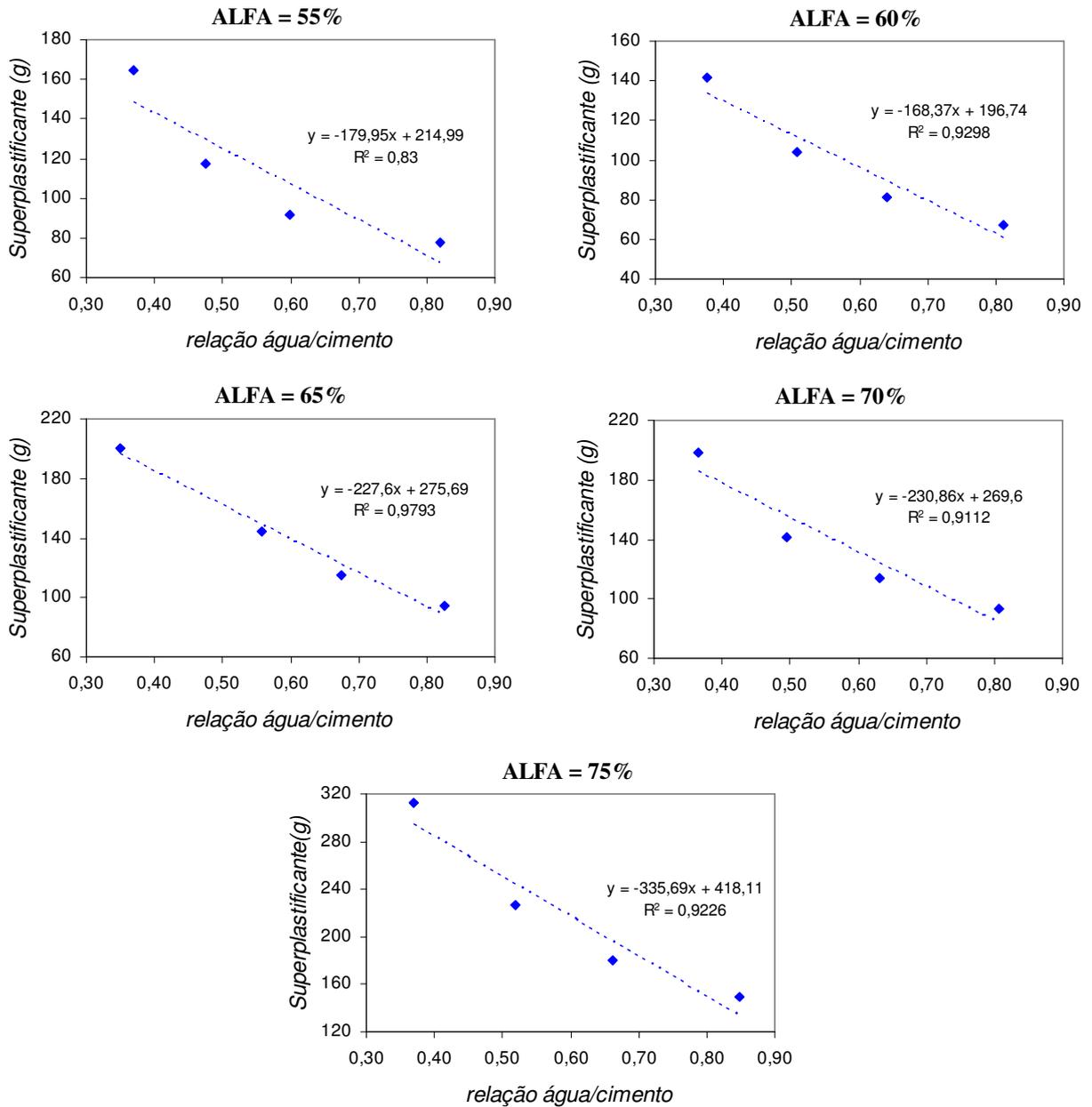


Figura 5: correlação entre a relação a/c e o aditivo superplastificante da etapa I

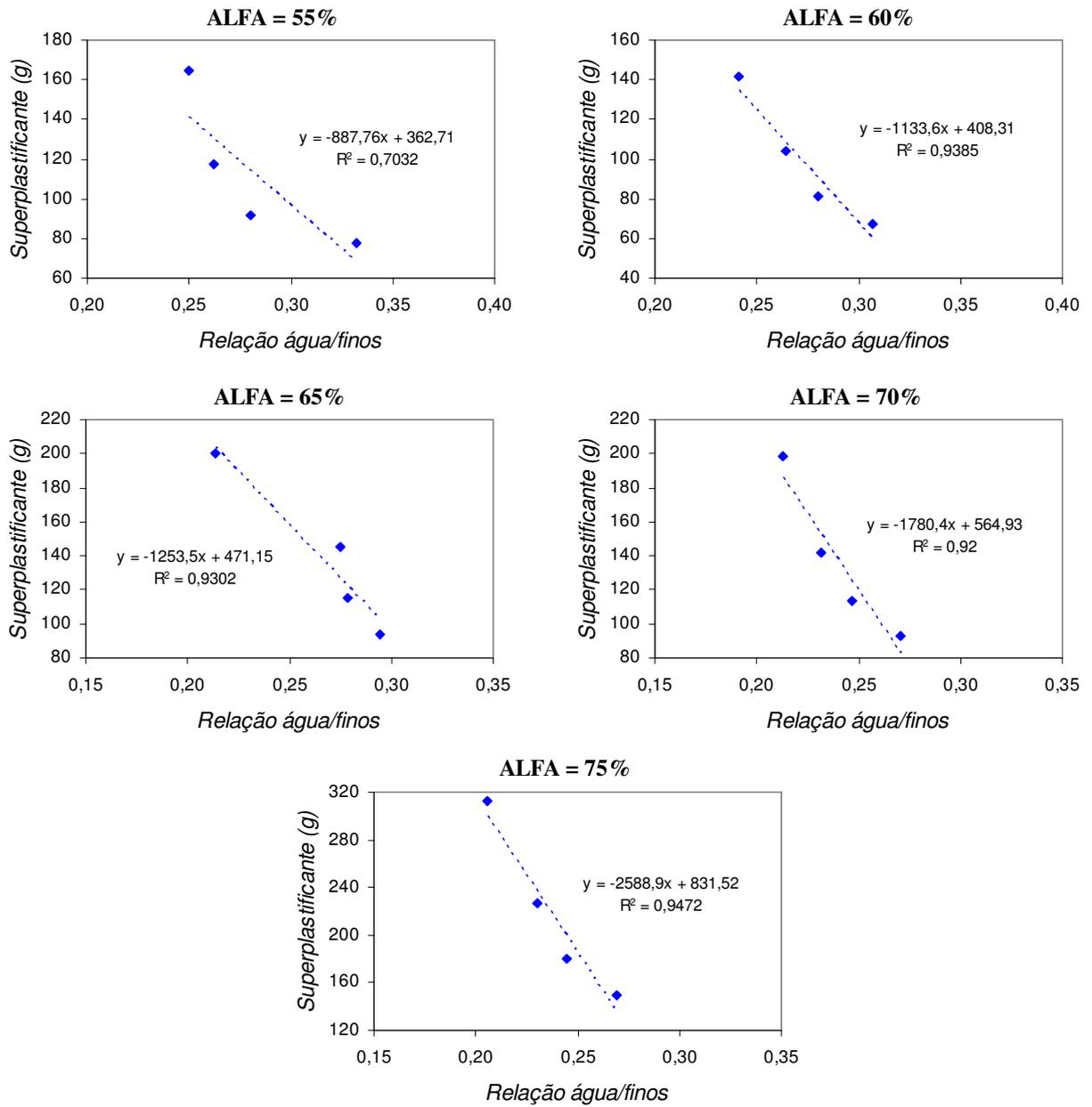


Figura 6: correlação entre a relação a/finos e o aditivo superplastificante da etapa I

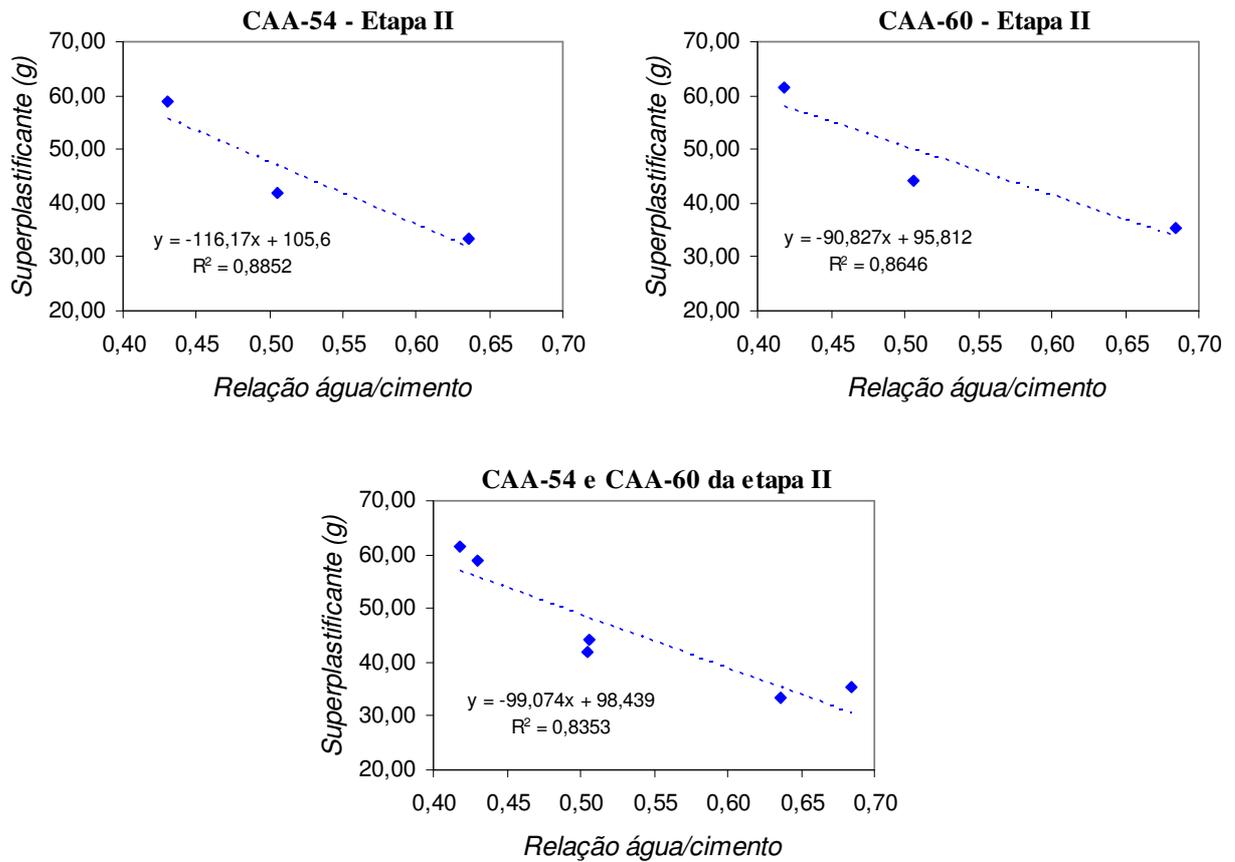


Figura 7: correlação entre a relação a/c e a dosagem de superplastificante na etapa II

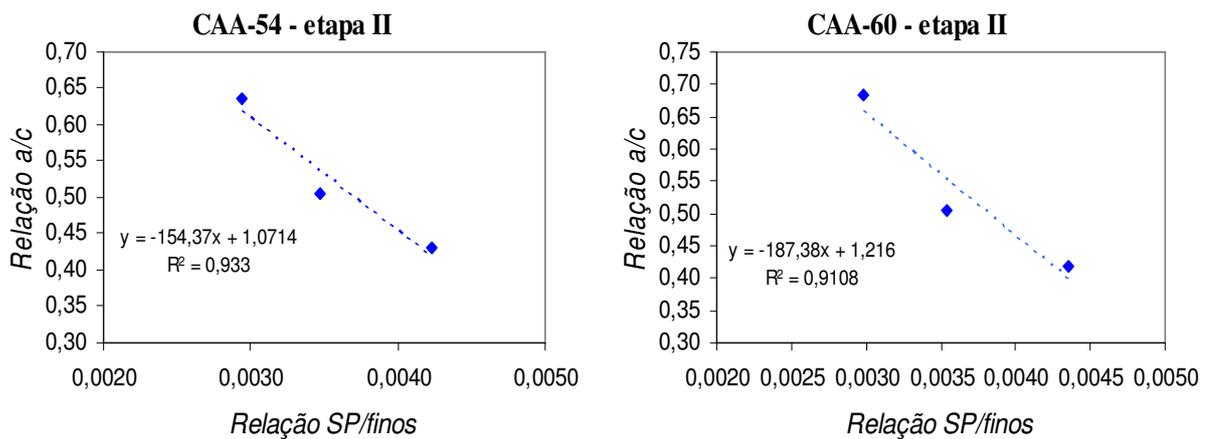


Figura 8: correlação entre a relação a/c e a relação superplastificante/finos na etapa II

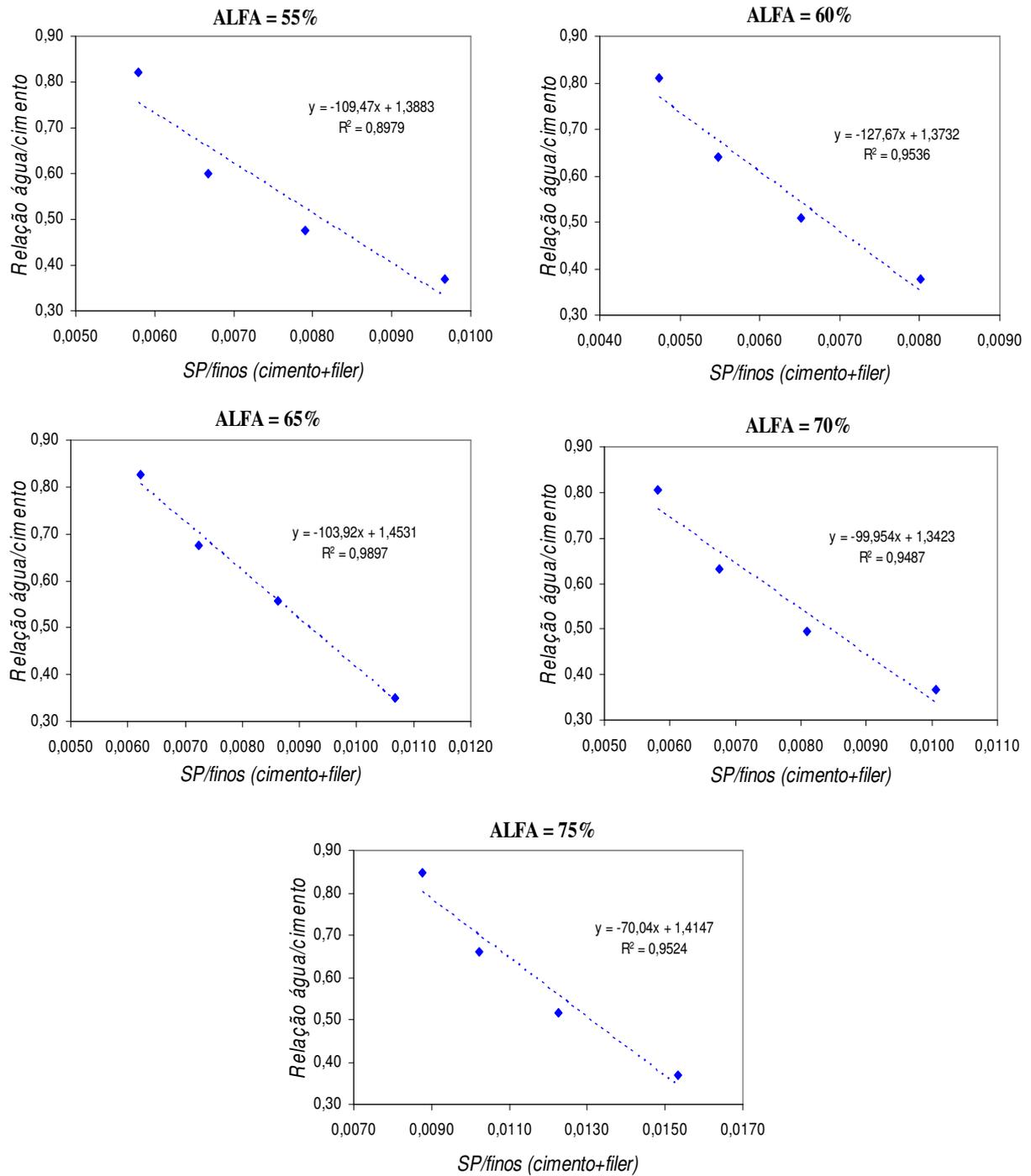


Figura 9: correlação entre a relação a/c e a relação superplastificante/finos na etapa I