

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM
EXPERIMENTAL PARA CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS**

Bernardo Fonseca Tutikian

Porto Alegre
Setembro 2007

BERNARDO FONSECA TUTIKIAN

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM
EXPERIMENTAL PARA CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS**

Tese 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 Doutor em Engenharia

Porto Alegre

Setembro 2007

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca

Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis / Bernardo Fonseca Tutikian. – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2007.

162p.

Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Doutor em Engenharia. Orientador: Denise Carpena Coitinho Dal Molin.

1. Construção Civil I. Método para Dosagem de Concretos Auto-Adensáveis

CCAA2

BERNARDO FONSECA TUTIKIAN

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM
EXPERIMENTAL PARA CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS**

Porto Alegre, 28 de setembro de 2007

Prof.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra pela EPUSP
Orientadora

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Geyer (UFG)
Dr. pela UFRGS

Prof.^a Fernanda Macedo Pereira (CIENITEC/ULBRA)
Dra pela UFRGS

Prof. Ruy Alberto Cremonini (UFRGS)
Dr. pela EPUSP

Prof. Vladimir Antonio Paulon (UNICAMP)
Dr. pela USP e Livre-docência pela UNICAMP

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha noiva Renata
e à minha orientadora.

AGRADECIMENTOS

Início os agradecimentos deste trabalho à minha orientadora Prof.a Denise Dal Molin, que teve uma participação fundamental neste trabalho, resultado de várias discussões técnicas, umas que venci e muitas outras nas quais fui vencido. O que importa é o consenso.

Ao professor Ruy Cremonini, apesar de não ter me orientado na tese, por escolha própria, foi fundamental no desenvolvimento desta.

Ao amigo professor André Geyer, que participou das bancas de mestrado, qualificação e doutorado, sempre solícito e com contribuições construtivas.

À professora Fernanda Pereira, presença confirmada e marcante nas bancas e nos congressos.

Ao professor Vladimir Paulon, sempre apoiando e divulgando o trabalho, mesmo quando longe em suas intermináveis viagens.

A todos os professores do NORIE por todo o conhecimento compartilhado na graduação e na pós-graduação, em especial Ângela Masuero, Carin Schmitt, Luís Carlos Bonin, Carlos Formoso e Miguel Satler.

A minha família, que sempre me apoiou e incentivou nesta árdua empreitada, em especial aos meus pais e colegas, mestre em engenharia Cláudio Morel Tutikian e arquiteta Maria Isabel Tutikian.

À minha noiva Renata Freire de Souza, pelo auxílio em alguns trabalhos deste curso, atenção, apoio e compreensão durante este período e outros de minha vida e pelo resto dela.

Aos seus pais, meus futuros sogros, pelo incentivo incondicional.

Aos amigos e colegas do NORIE, que ajudaram direta ou indiretamente, em especial ao doutorando Daniel Pagnussat, bolsista de verão no trabalho experimental.

Aos funcionários do laboratório do NORIE, Aírton e Éderson, pelas concretagens fora do horário e pelas tarefas extra universidade.

E por fim, às empresas que foram nossos apoiadores em algum momento do projeto do CAA, iniciado em 2004 e que vem plantando e colhendo diversos frutos e alguns caroços também:

Basf, especialmente aos engenheiros Fábio Viecili, Frederico Sadowiski, Paulo Santos e Rodrigo Lamarca; Verdicon, em especial aos engenheiros Henrique Deboni, Carlos Deboni, Giovani Deboni e Sílvio Brescovit; Companhia de Cimento Itambé, em especial aos engenheiros Renato Tortorelli e Aline Rosa Martins; Irmãos Ciocari Ltda, em especial ao Silvério; ABCP, do engenheiro Fernando Druck; Engenhosul, em especial aos engenheiros Aquiles Dal Molin, João Pettersen e Geilma Vieira; Construtora Rex, em especial ao engenheiro Cláudio Tutikian; Cimpor Concretos, em especial aos engenheiros Émerson Busnello e Jonas Delazeri; Engemix, aos engenheiros Carlos Regattieri e Carine Hartman; Allquímica, em especial Jéferson Mayca.

Um crédito especial à Basf que nos apóia desde o início do trabalho até hoje.

“Milhões viram a maçã cair, mas foi Newton quem perguntou por quê.”

Bernard M. Baruch

RESUMO

TUTIKIAN, B.F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis. 2007. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A utilização do concreto auto-adensável (CAA) vem aumentando consideravelmente, no Brasil e no mundo. Com isso, há mais interesse em estudos práticos e teóricos a respeito do material, porém a maioria realizada está centrada em propriedades mecânicas da mistura no estado endurecido. Poucos estudos estão voltados para uma das áreas de maior lacuna: a dosagem. Os métodos de dosagem existentes para o CAA ou são experimentais, baseados na experiência do executor, ou são dependentes de tabelas determinadas a partir de materiais de difícil reprodução em outros locais.

Com o intuito de ajudar a resolver este problema, foi proposto um método de dosagem experimental para CAA nesta tese. Este método visa a dosagem de CAA através de ensaios simples que determinem a composição dos agregados, de forma que o empacotamento granular apresente a menor quantidade de vazios possível, a fim de se minimizar o consumo de pasta na mistura. O método utiliza conceitos novos e já consagrados de outros métodos, como o IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992), o proposto por Tutikian (2004), o de O'Reilly (1992) e o Modelo de Empacotamento Compressivo (CPM) (De Larrard, 1999).

Para a comprovação da eficácia deste método, foram dosadas seis famílias de CAA, sendo três com areia fina e outras três com cinza volante, formando pares dosados por diferentes métodos. Entre as seis famílias, duas utilizaram o método de Tutikian (2004) e quatro o método proposto, porém primeiramente com uma faixa de agregado graúdo e após com duas granulometrias de brita, proporcionando famílias com o esqueleto granular mais compacto. Por fim, foi realizada uma família de concreto convencional (CCV). Os CAA dosados através deste novo método são de obtenção mais simples e menos trabalhosa, dependendo menos da experiência do executor, e os resultados mostraram que estes podem ser mais econômicos e com as propriedades no estado endurecido similares ou até vantajosas em relação às dos CCV e a dos outros CAA, principalmente o com duas granulometrias de agregado graúdo.

Palavras-chave: concreto auto-adensável, método de dosagem, pacote granular, areia fina e cinza volante.

ABSTRACT

TUTIKIAN, B.F. Proposal for a method of experimental dosage for self compacting concrete. 2007. PhD's Degree Thesis – Post Graduation Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The utilization of self compacting concrete (SCC) has been increasing considerably throughout Brazil and the world. Hence, there has been more interest in theoretical and practical studies regarding the issue; however, the majority of such studies have been focused on the mechanical properties of the mixture in the hardened state. Very few studies have been focused on the subject of the dosage. The existing methods of dosage for SCC are either experimental, based on the experience of the executor, or are dependent on customized charts based on local materials which are very difficult to reproduce.

With the intention to aid in the solution of this problem, an experimental dosage method was proposed in this thesis. This method aims at the dosage of SCC through simple tests that determine the composition of the aggregates, so that the packing density presents the least amount of voids, in order to minimize the consumption of binder in the mixture. The method uses new concepts and some concepts already determined from other methods, such as the IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992), the one proposed by Tutikian (2004), the O'Reilly (1992) and the Compressive Packing Model (CPM) (De Larrard, 1999).

In order to substantiate the efficiency of this method, six families of SCC were carried out, three of those with fine sand and the remaining three with fly ash, forming three pairs dosed by different methods. Amongst the six families, two used the Tutikian method (2004) and the other four families used the proposed method, which were divided into two subgroups; two with one class of gravel and the remaining subgroup utilizing two classes of gravel, supplying each family with a more compact granular skeleton. As a control group, a test family of conventional concrete (CCV) was produced. The SCC designed through this new method is simpler to obtain and requires less labor, depending less on the experience of the executor. The results present themselves as more economical and with the properties in the hardened state quite similar or even enhanced in relation to the ones of the CCV and the other SCC, specially with two classes of gravel.

Keywords: self compacting concrete, dosage method, packing density, fine sand and fly ash.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	p.19
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	p.19
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	p.21
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	p.22
2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)	p.24
2.1 DEFINIÇÃO	p.25
2.2 VANTAGENS	p.25
2.3 ENSAIOS DE TRABALHABILIDADE	p.26
2.4 UTILIZAÇÕES RECENTES	p.26
2.4.1 Aplicações do CAA em pré-fabricados	p.28
2.4.2 Aplicações do CAA <i>In situ</i>	p.31
2.5 AVANÇOS NO CAA	p.39
2.5.1 Utilização de alto teor de aglomerantes e materiais alternativos no CAA	p.39
2.5.2 Pressão nas fôrmas	p.41
2.5.3 Reologia do CAA	p.43
3 MÉTODOS DE DOSAGEM E CONCEITOS FUNDAMENTAIS PARA O	
CAA	p.45
3.1 MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR TUTIKIAN (2004)	p.45
3.1.1 Passo 1 – escolha dos materiais	p.45
3.1.2 Passo 2 – determinação do teor de argamassa seca	p.46
3.1.3 Passo 3 – determinação dos traços rico, intermediário e pobre	p.50
3.1.4 Passo 4 – colocação do aditivo e conseqüente segregação	p.50
3.1.5 Passo 5 – acerto dos finos por substituição	p.51
3.1.6 Passo 6 – ensaios de trabalhabilidade até o CCV virar CAA	p.52
3.1.7 Passo 7 – comparação do CAA com e sem VMA	p.52
3.1.8 Passo 8 – ensaios de resistência à compressão nas idades determinadas	p.52

3.1.9 Passo 9 – desenho do diagrama	p.53
3.1.10 Considerações finais sobre o método	p.53
3.2 MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR O'REILLY (1992)	p.54
3.2.1 Determinação da relação ótima dos agregados graúdos e miúdos	p.54
3.2.2 Considerações Finais	p.55
3.3 CONCEITOS PROPOSTOS POR DE LARRARD (1999)	p.55
3.3.1 Pacote granular	p.56
3.3.2 Empacotamento virtual de uma mistura granular	p.56
3.3.3 Mistura polidispersiva	p.60
3.3.4 Índice de compactação	p.60
3.3.5 Efeito container no pacote granular	p.61
3.3.6 Segregação de misturas granulares	p.63
3.3.7 Considerações finais	p.64
4 MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO	p.66
4.1 INTRODUÇÃO	p.66
4.2 ESCOLHA DOS MATERIAIS	p.67
4.3 DETERMINAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR	p.68
4.4 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO OU PERCENTUAL DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	p.71
4.5 MISTURA DOS TRAÇOS RICO, INTERMEDIÁRIO E POBRE	p.72
4.6 ENSAIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE NAS IDADES DETERMINADAS	p.74
4.7 DESENHO DOS DIAGRAMAS DE DOSAGEM E DESEMPENHO	p.74
5 TRABALHO EXPERIMENTAL	p.79
5.1 METODOLOGIA DO TRABALHO EXPERIMENTAL	p.79
5.2 MATERIAIS CONSTITUINTES	p.81
5.3 CÁLCULO DOS TRAÇOS	p.84
5.3.1 Concreto convencional - CCV	p.84
5.3.2 Concreto auto-adensável – CAA	p.85

5.3.2.1	Proporcionamento pelo método de dosagem proposto por Tutikian (2004) – TKAF e TKCV	p.85
5.3.2.2	Proporcionamento pelo método de dosagem proposto com uma granulometria de brita – AF1B e CV1B	p.89
5.3.2.3	Proporcionamento pelo método de dosagem proposto com duas granulometrias de brita – AF2B e CV2B	p.96
6	RESULTADOS	p.104
6.1	CONCRETO CONVENCIONAL - CCV	p.104
6.2	CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL - CAA	p.109
6.2.1	CAA dosado com areia fina através do método Tutikian (2004) – TKAF	p.109
6.2.2	CAA dosado com cinza volante através do método Tutikian (2004) – TKCV	p.113
6.2.3	CAA dosado com areia fina através do método proposto com uma granulometria de brita – AF1B	p.117
6.2.4	CAA dosado com cinza volante através do método proposto com uma granulometria de brita – CV1B	p.121
6.2.5	CAA dosado com areia fina através do método proposto com duas granulometrias de brita – AF2B	p.125
6.2.6	CAA dosado com cinza volante através do método proposto com duas granulometrias de brita – CV2B	p.129
6.3	COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO	p.134
6.3.1	Resistência à compressão a 1 dia	p.136
6.3.2	Resistência à compressão aos 7 dias	p.137
6.3.3	Resistência à compressão aos 28 dias	p.139
6.3.4	Resistência à compressão aos 91 dias	p.144
6.3.5	Módulo de elasticidade	p.146
6.3.6	Velocidade de propagação das ondas de ultra-som	p.147
6.3.7	Penetração de íons cloretos	p.149
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	p.151
7.1	CONCLUSÕES	p.151
7.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	p.154
	REFERÊNCIAS	p.156

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: elementos arquitetônicos com concreto branco auto-adensável (fonte: Walraven, 2005)	p.28
Figura 2: peça tabuleiro utilizada na estação de metro do Amsterdã Arena (fonte: Walraven, 2005)	p.29
Figura 3: pilares de fundação executados com CAA (fonte: Walraven, 2005)	p.29
Figura 4: arcos compostos por cinco peças executadas em CAA (fonte: Walraven, 2005)	p.30
Figura 5: fachada em CAA com detalhes arquitetônicos (fonte: Walraven, 2005)	p.32
Figura 6: ponte recuperada com CAA (fonte: Walraven, 2005)	p.33
Figura 7: vista da armadura da estrutura (fonte: Walraven, 2005)	p.33
Figura 8: parede de simulação de terremotos (fonte: Grace, 2005)	p.33
Figura 9: evolução da edificação em duas datas – (a) março de 2003 e (b) fevereiro de 2004 (fonte: Pacios, 2005)	p.34
Figura 10: pilar sendo reforçado para concretagem com CAA (fonte: Chai e Yang, 2005)	p.35
Figura 11: laje sendo concretada com o CAA com poucos trabalhadores (fonte: Geyer, 2005)	p.36
Figura 12: aspecto do CAA utilizado no museu Iberê Camargo (fonte: Silva Filho <i>et al.</i> , 2004)	p.36
Figura 13: detalhe da borda do material (fonte: Silva Filho <i>et al.</i> , 2004)	p.36
Figura 14: concretagem com CAA da laje tipo (Fonte: Repette, 2005b)	p.38
Figura 15: comparativo de custos entre o CCV e o CAA (fonte: Tutikian <i>et al.</i> , 2007) ..	p.39
Figura 16: modelos reológicos (Fonte: Billberg, 2005)	p.44
Figura 17: passo-a-passo para dosagem do CAA (fonte: Tutikian, 2004)	p.46
Figura 18: grãos maiores dominantes em uma mistura binária sem interação (fonte: De Larrard, 1999)	p.57
Figura 19: grãos menores dominantes em uma mistura binária sem interação (fonte: De Larrard, 1999)	p.57
Figura 20: evolução do pacote granular versus a proporção de agregado miúdo, para uma mistura binária sem interação (fonte: De Larrard, 1999)	p.58

Figura 21: mistura binária com total interação (fonte: De Larrard, 1999)	p.58
Figura 22: evolução do pacote granular versus a proporção de agregado miúdo, para uma mistura binária com total interação (fonte: De Larrard, 1999)	p.58
Figura 23: efeito de perda exercido por um grão pequeno em grãos grandes (fonte: De Larrard, 1999)	p.59
Figura 24: efeito de parede exercido por um grão grande em grãos pequenos (fonte: De Larrard, 1999)	p.59
Figura 25: evolução do pacote granular versus a proporção de agregado miúdo, para o caso geral (fonte: De Larrard, 1999)	p.60
Figura 26: modelo de Bem-Aïm, demonstrando o volume perturbado de <i>container</i> (fonte: De Larrard, 1999)	p.61
Figura 27: possíveis perturbações para uma mistura com interação parcial (fonte: De Larrard, 1999)	p.63
Figura 28: efeito da relação d_2/d_1 no pacote granular (fonte: De Larrard, 1999)	p.64
Figura 29: efeito do empacotamento de cada classe utilizada na mistura (fonte: De Larrard, 1999)	p.65
Figura 30: relação entre a compactação e o pacote granular da mistura (fonte: De Larrard, 1999)	p.65
Figura 31: passo-a-passo para dosagem do CAA através do método proposto nesta tese	p.67
Figura 32: exemplo de diagrama de dosagem com o α variando	p.77
Figura 33: exemplo de diagrama de desempenho	p.78
Figura 34: comportamento dos vazios do pacote granular da brita 19 mm com a areia regular	p.91
Figura 35: comportamento dos vazios do pacote granular da brita 19 mm, areia regular e areia fina	p.93
Figura 36: comportamento dos vazios do pacote granular da brita 19 mm com a brita 9,5 mm	p.97
Figura 37: comportamento dos vazios do pacote granular da brita 19 mm e 9,5 mm com a areia regular	p.99
Figura 38: comportamento dos vazios do pacote granular das britas 19 mm e 9,5 mm, com as areias regular e fina	p.100
Figura 39: organograma do trabalho experimental	p.104
Figura 40: diagrama de dosagem para o CCV	p.108

Figura 41: diagrama de desempenho para o CCV	p.109
Figura 42: diagrama de dosagem do TKAF	p.112
Figura 43: diagrama de desempenho do TKAF	p.113
Figura 44: diagrama de dosagem do TKCV	p.116
Figura 45: diagrama de desempenho do TKCV	p.117
Figura 46: diagrama de dosagem do AF1B	p.120
Figura 47: diagrama de desempenho do AF1B	p.121
Figura 48: diagrama de dosagem do CV1B	p.124
Figura 49: diagrama de desempenho do CV1B	p.125
Figura 50: diagrama de dosagem do AF2B	p.128
Figura 51: diagrama de desempenho do AF2B	p.129
Figura 52: diagrama de dosagem do CV2B	p.133
Figura 53: diagrama de desempenho do CV2B	p.134
Figura 54: comparativo de resistência à compressão a 1 dia	p.136
Figura 55: comparativo de resistência à compressão aos 7 dias	p.138
Figura 56: comparativo de resistência à compressão aos 28 dias	p.140
Figura 57: comparativo de custo (R\$) para a resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias	p.141
Figura 58: comparativo de custo (R\$) para a resistência à compressão de 40 MPa aos 28 dias	p.142
Figura 59: comparativo de custo (R\$) para a resistência à compressão de 60 MPa aos 28 dias	p.143
Figura 60: comparativo de resistência à compressão aos 91 dias	p.145
Figura 61: comparativo de módulo de elasticidade aos 28 dias	p.146
Figura 62: comparativo da velocidade de propagação das ondas de ultra-som aos 28 dias	p.148
Figura 63: comparativo de penetração de íons cloretos aos 56 dias	p.149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: valores aceitos pela maioria dos pesquisadores para os equipamentos de trabalhabilidade (Fonte: TUTIKIAN, 2004)	p.26
Tabela 2: comparativo de custos globais entre o CAA e o CCV (Fonte: Tutikian <i>et al.</i> , 2005a)	p.31
Tabela 3: traços de concreto utilizados no museu Iberê Camargo (Fonte: Silva Filho <i>et al.</i> , 2004)	p.37
Tabela 4: parâmetros que influem na pressão das fôrmas (Fonte: Proske e Graubner, 2002)	p.41
Tabela 5: determinação da proporção entre o material fino e o substituído (Fonte: Tutikian, 2004)	p.51
Tabela 6: medições do pacote granular para investigar o efeito <i>container</i> para agregados arredondados (Fonte: De Larrard, 1999)	p.62
Tabela 7: medições do pacote granular para investigar o efeito <i>container</i> para agregados angulares (Fonte: De Larrard, 1999)	p.62
Tabela 8: determinação da massa unitária compactada de dois materiais hipotéticos A e B	p.69
Tabela 9: determinação da massa específica dos dois materiais hipotéticos A e B	p.69
Tabela 10: determinação do índice de vazios dos dois materiais hipotéticos A e B	p.70
Tabela 11: programa experimental realizado	p.80
Tabela 12: dados dos ensaios realizados	p.80
Tabela 13: análise granulométrica do cimento e cinza volante utilizados	p.82
Tabela 14: fluorescência por raio X do cimento e cinza volante utilizados	p.82
Tabela 15: massas específicas e unitárias dos materiais utilizados	p.83
Tabela 16: análise granulométrica dos agregados utilizados	p.83
Tabela 17: traços unitários e cálculos de consumo de materiais para o CCV	p.85
Tabela 18: teores de substituição da areia regular pela areia fina (traço 1:5)	p.86
Tabela 19: teores de substituição da areia regular pela cinza volante (traço 1:5)	p.86
Tabela 20: traços unitários do CAA com areia fina dosados pelo método Tutikian (2004) – TKAF	p.86
Tabela 21: consumos de materiais calculados para o CAA com areia fina dosados pelo método Tutikian (2004) – TKAF	p.87

Tabela 22: propriedades dos TKAF no estado fresco	p.87
Tabela 23: traços unitários do CAA com cinza volante dosados pelo método Tutikian (2004) – TKCV	p.88
Tabela 24: consumos de materiais calculados para o CAA com cinza volante dosados pelo método Tutikian (2004) – TKCV	p.88
Tabela 25: propriedades dos TKCV no estado fresco	p.88
Tabela 26: ensaio de compacidade entre a brita 19 mm e a areia regular	p.91
Tabela 27: ensaio de compacidade entre a brita 19 mm, areia regular e areia fina	p.92
Tabela 28: traços unitários do CAA com areia fina com uma granulometria de brita – AF1B	p.94
Tabela 29: consumos de materiais do CAA com areia fina com uma granulometria de brita – AF1B	p.94
Tabela 30: propriedades dos AF1B no estado fresco	p.94
Tabela 31: traços unitários do CAA com cinza volante com uma granulometria de brita – CV1B	p.95
Tabela 32: consumos de materiais do CAA com cinza volante com uma granulometria de brita – CV1B	p.95
Tabela 33: propriedades dos CV1B no estado fresco	p.96
Tabela 34: ensaio de compacidade entre a brita 19 mm e a brita 9,5 mm	p.97
Tabela 35: ensaio de compacidade entre a brita 19 mm, a brita 9,5 mm e a areia regular	p.98
Tabela 36: ensaio de compacidade entre a brita 19 mm e 9,5 mm, a areia regular e a areia fina	p.99
Tabela 37: traços unitários do CAA com areia fina empacotado com 2 britas – AF2B ..	p.101
Tabela 38: consumos de materiais calculados para o CAA com areia fina empacotado com 2 britas – AF2B	p.101
Tabela 39: propriedades dos AF2B no estado fresco	p.102
Tabela 40: traços unitários do CAA com cinza volante empacotado com duas britas – CV2B	p.102
Tabela 41: consumos de materiais calculados para o CAA com cinza volante empacotado com duas britas – CV2B	p.103
Tabela 42: propriedades dos CV2B no estado fresco	p.103
Tabela 43: resultados das propriedades no estado endurecido do CCV	p.105

Tabela 44: equações de comportamento e r^2 para o CVV	p.107
Tabela 45: resultados das propriedades no estado endurecido para os TKAF	p.110
Tabela 46: equações de comportamento e r^2 para os TKAF	p.111
Tabela 47: resultados das propriedades no estado endurecido para os TKCV	p.114
Tabela 48: equações de comportamento e r^2 para os TKCV	p.115
Tabela 49: resultados das propriedades no estado endurecido para os AF1B	p.118
Tabela 50: equações de comportamento e r^2 para os AF1B	p.119
Tabela 51: resultados das propriedades no estado endurecido para os CV1B	p.122
Tabela 52: equações de comportamento e r^2 para os CV1B	p.123
Tabela 53: resultados das propriedades no estado endurecido para os AF2B	p.126
Tabela 54: equações de comportamento e r^2 para os AF2B	p.127
Tabela 55: resultados das propriedades no estado endurecido para os CV2B	p.130
Tabela 56: equações de comportamento e r^2 para os CV2B	p.132
Tabela 57: valores de resistência à compressão (MPa) para cada propriedade	p.135
Tabela 58: valores em reais (R\$) para as resistências à compressão de 10, 20 e 30 MPa a 1 dia	p.136
Tabela 59: valores em reais (R\$) para as resistências à compressão de 20, 30, 40 e 50 MPa aos 7 dias	p.137
Tabela 60: valores em reais (R\$) para as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa aos 28 dias	p.139
Tabela 61: valores em reais (R\$) para as resistências à compressão de 40, 50, 60 e 70 MPa aos 91 dias	p.144
Tabela 62: valores dos módulos de elasticidade (GPa) para as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa aos 28 dias	p.146
Tabela 63: valores das velocidades de propagação das ondas de ultra-som (m/s) para as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa aos 28 dias	p.147
Tabela 64: valores de penetração de íons cloretos (C) para as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa aos 28 dias	p.149

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os materiais cimentícios podem ser considerados como um dos materiais mais importantes de todas as épocas da civilização humana, por terem suprido as necessidades de edificações e obras de infra-estrutura. A explicação para esta constatação é simples: a natureza forneceu matérias-primas abundantes e o homem, pela sua inerente capacidade de elaborar relações de causa-efeito, estabeleceu interações entre as necessidades existentes e as possibilidades de aplicação que esses materiais disponibilizaram para solução de seus problemas imediatos (ISAIA, 2005).

O concreto convencional (CCV) conhecido atualmente é, basicamente, uma mistura entre dois componentes: os agregados e a pasta. Os agregados podem ser divididos em miúdos e graúdos, dependendo de sua granulometria. Já a pasta engloba o cimento Portland e a água, sendo que materiais cimentícios suplementares e aditivos podem ser incluídos neste grupo. O endurecimento da pasta une os agregados em uma massa densa devido às reações químicas do cimento com a água (PCA, 2002).

Apesar do concreto ser o material de construção mais utilizado no mundo, atualmente não se pode mais considerar apenas o estudo de CCV. O mercado e as técnicas construtivas exigem concretos que apresentem características especiais. Helene (2005) cita os de alta resistência, de alto desempenho, auto-adensáveis, com altos teores de adições e pozolanas, aparentes, coloridos, brancos, sustentáveis, entre outros.

Com esta tendência, foi desenvolvido, no Japão, em 1988, um concreto capaz de se mover por conta própria e preencher, sem necessidade nenhuma de intervenção, os espaços destinados a ele na fôrma: o concreto auto-adensável (CAA) (Repetto, 2005a).

O CAA é claramente uma das áreas da tecnologia do concreto que tem o maior potencial de desenvolvimento (PETERSEN e REKNES, 2005). O CAA não é apenas um novo tipo de concreto, senão uma tecnologia, que, quando aplicada corretamente, proporciona propriedades diferentes e, principalmente, novas oportunidades (Szecsy, 2005). Com a utilização do CAA, a estrutura deve ser analisada através de uma forma integral, onde tanto o processo construtivo como a concepção arquitetônica podem ser otimizados (Pacios, 2005).

As duas propriedades mais importantes do CAA são a trabalhabilidade e a estabilidade. As características deste concreto têm de ser determinadas e mantidas, assim as propriedades dos materiais e, principalmente, o proporcionamento destes, passam a ser os fatores mais importantes para a otimização da mistura.

O CAA vem atraindo cada vez mais pesquisas no Brasil e vem sendo utilizado em obras correntes e especiais. Porém, os principais temas das pesquisas focam as propriedades mecânicas, a durabilidade e a possibilidade de utilização com determinados tipos de materiais locais. A dosagem, que é um dos aspectos mais importantes deste concreto, vem sendo estudada superficialmente, prejudicando, assim, todos os temas anteriores.

É surpreendente que, ainda hoje, pesquisadores e profissionais responsáveis pela mistura do CAA ainda utilizem métodos de dosagem propostos há mais de 20 anos com o intuito de iniciar o desenvolvimento deste concreto. Sabe-se que, nos últimos tempos, foram propostos métodos de dosagem eficazes já comprovados, e que permitem o proporcionamento de CAA econômicos, como os de Tutikian (2004), de Gomes (2002) e de Melo-Repette (2005).

Pesquisas vêm mostrando que, erroneamente, profissionais tomadores de decisão escolhem outro tipo de concreto ao CAA, devido ao seu custo ser, teoricamente, mais elevado. Ou então, justificam eles, deixam de utilizar este concreto, já que algumas propriedades no estado endurecido podem comprometer o desempenho da estrutura, como o módulo de elasticidade. Sabe-se, no entanto, que o CAA só pode ser diferente do CCV até que a mistura passe do estado fresco para o endurecido, logo suas propriedades mecânicas e de durabilidade serão, simplesmente, o efeito da proporção dos materiais constituintes. Os materiais são parecidos com os do CCV, assim como as propriedades no estado endurecido, quando não superiores.

Baseado nisto, e com o intuito de aprofundar o estudo no proporcionamento de CAA, foi proposto um método de dosagem, a fim de se obter misturas com custo dos materiais cada vez mais próximos ao do CCV, mantendo, ou até mesmo melhorando, as propriedades mecânicas e de durabilidade. Este novo método é de fácil execução, prático e eficiente e pode ser reproduzido em qualquer localidade com materiais disponíveis, desde que se sigam algumas premissas. Ainda, um amplo trabalho experimental foi realizado para a exemplificação e comparação do método, para os materiais escolhidos.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta pesquisa tem por objetivo principal propor um novo método de dosagem experimental para o concreto auto-adensável (CAA).

Dentre os objetivos secundários estão:

- a) comparar as resistências à compressão, obtidas aos 1, 7, 28 e 91 dias, entre seis tipos de CAA e as do CCV;
- b) comparar o módulo de elasticidade, obtido aos 28 dias, entre seis tipos de CAA e o do CCV;
- c) comparar a velocidade da onda ultra sônica, obtida aos 28 dias, entre seis tipos de CAA e a do CCV;
- d) comparar a penetração dos íons cloretos, obtida aos 56 dias, entre seis tipos de CAA e o do CCV;
- e) comparar os custos entre todos os CAA e o CCV para as mesmas faixas de resistências à compressão, para a idade de 1 dia;
- f) comparar os custos entre todos os CAA e o CCV para as mesmas faixas de resistências à compressão, para a idade de 7 dias;
- g) comparar os custos entre todos os CAA e o CCV para as mesmas faixas de resistências à compressão, para a idade de 28 dias;
- h) comparar os custos entre todos os CAA e o CCV para as mesmas faixas de resistências à compressão, para a idade de 91 dias;
- i) comparar todas as propriedades citadas entre os CAA dosados através dos métodos escolhidos;
- j) comparar todas as propriedades citadas entre CAA similares, sendo um com areia fina e outro com cinza volante, para cada método de dosagem utilizado;
- k) correlacionar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade para todos os concretos;
- l) correlacionar o módulo de elasticidade e a velocidade de propagação da onda ultra-sônica para todos os concretos;

- m) correlacionar a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e a penetração de íons cloretos para todos os concretos;
- n) criar um diagrama que abranja as propriedades acima ou outras para que seja facilitada a determinação destes valores graficamente para quaisquer faixas de resistência à compressão.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

No primeiro capítulo, foi realizada uma introdução ao tema, salientando o porquê da escolha do CAA como assunto desta pesquisa, bem como a importância de se propor um método científico para dosá-lo. Após a introdução, foram apresentados os objetivos principal e secundários. Por fim, é detalhada a estrutura desta pesquisa, separada por capítulos.

No capítulo 2, uma breve revisão bibliográfica foi realizada. Como uma extensa revisão bibliográfica já foi feita por este autor em sua dissertação de mestrado (TUTIKIAN, 2004), foi realizada um breve revisão do CAA e foram ressaltadas aplicações recentes do CAA e assuntos não abordados anteriormente, como o alto teor de aglomerantes e materiais alternativos que estão sendo utilizados neste tipo de mistura, bem como a pressão exercida nas fôrmas e a reologia do material.

Já no terceiro capítulo, é apresentado um estudo amplo dos métodos de dosagem dos quais foram extraídas algumas idéias para a proposição deste. Inicia-se com o método de dosagem proposto por Tutikian (2004), onde se apresenta uma série de benefícios que este trouxe para o estudo do CAA, junto com os pontos de não consenso no meio técnico, o que, inclusive, motivou a proposição do novo método. Após, descreve-se, brevemente, as teorias fundamentais do Modelo de Empacotamento Compressivo (CPM), método para dosagem de quaisquer tipos de concretos, proposto por De Larrard (1999), do qual o novo método utiliza algumas idéias, como a do empacotamento máximo entre os agregados, os efeitos de perda, de parede e de container. Por fim, é descrito o método de Vitervo O'Reilly (1992), que propõe realizar o empacotamento e calcular o porcentual de vazios de duas em duas classes de agregados, até chegar no cimento, para se determinar a proporção de uma mistura com o mínimo valor de vazios. O método para CCV IPT/EPUSP (1992) não foi apresentado por já estar inserido no método Tutikian (2004) e por já ter sido amplamente discutido naquela dissertação de mestrado.

Então, no quarto capítulo foi explicado o método de dosagem proposto, com suas equações, conceitos e exemplificações.

O trabalho experimental foi detalhado no quinto capítulo. Foram dosadas sete famílias de concreto, sendo uma de CCV, dosada através do método IPT/EPUSP, e outras seis de CAA, sendo três conjuntos formados por duas famílias, uma com areia fina e outra com cinza volante, como materiais finos responsáveis pela resistência à segregação da mistura. O primeiro conjunto foi dosado através do método proposto por Tutikian (2004), e serviu como base para comparações realizadas no capítulo posterior. E o método proposto nesta tese serviu como procedimento para a determinação dos outros dois pares, com a diferença que um utilizou apenas uma granulometria de agregado graúdo e a outra, duas granulometrias, as quais foram empacotadas para proporcionar uma continuidade ao esqueleto granular.

Com isso, pode-se apresentar, no capítulo seis, os resultados dos ensaios no estado endurecido dos concretos e compará-los. Foram realizados diversos ensaios, como os de resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a penetração de íons cloretos e a velocidade de propagação de ondas de ultra-som, para que se pudesse comparar todos os concretos e, conseqüentemente, a viabilidade técnica e econômica do método proposto. A resistência à compressão foi realizada por ser a propriedade mais comumente utilizada em pesquisas e em aplicações reais, e a mais lembrada por projetistas e outros profissionais da área. O módulo de elasticidade foi realizado por estar servindo como motivo para a não utilização do CAA, porque poderia sofrer uma redução considerável no seu valor, o que contradiz a tecnologia dos materiais, quando tomadas algumas precauções. Já a velocidade de propagação de ondas de ultra-som foi realizada por ser um ensaio que depende fortemente da compacidade das misturas, a qual será a base do método proposto. E a penetração de íons cloretos foi escolhida por ser uma ótima representante da durabilidade, que deve ser considerada em qualquer dosagem, independente da aplicação.

Por fim, encontram-se, no capítulo sete, as conclusões desta tese e sugestões para trabalhos futuros. Como era de se esperar, o método proposto atingiu as expectativas criadas, por se mostrar de fácil execução e por apresentar CAA econômicos e com propriedades no estado endurecido satisfatórias. O método se mostrou, além de viável técnica e economicamente, totalmente inovador, por mesclar conceitos já consagrados de outros pesquisadores, com alguns inéditos, propondo uma forma diferente de se proporcionar as matérias-primas a fim de se obter CAA.

2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)

O CAA vem sendo objeto de uma série de pesquisas no Brasil nos últimos anos. Estas pesquisas, realizadas principalmente em universidades, fizeram com que este material começasse a ser testado e aprovado em diversas empresas. Pode-se citar a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Federal de Goiás (UFG), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), a Coordenação de Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE/UFRJ), entre outros, como os principais locais de desenvolvimento de trabalhos a respeito do assunto.

A maioria das aplicações do CAA em empresas de construção também ocorreu por iniciativa ou, no mínimo, acompanhamento dos profissionais das universidades. Entre as mais destacadas pode-se citar o primeiro edifício residencial com CAA no Brasil, executado em 2004 na cidade de Goiânia, Goiás (Geyer, 2005), o Museu Iberê Camargo, obra emblemática por ser também em concreto branco, na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul (Silva Filho *et al.*, 2004) e os dois casos práticos monitorados através da Comunidade da Construção, sendo o primeiro em Santa Catarina (Repetto, 2005b) e o segundo no Rio Grande do Sul (Tutikian *et al.*, 2007). Em empresas de pré-fabricados a utilização do CAA é mais usual. Observa-se que as obras que serão citadas no capítulo foram as descritas em publicações, excluindo-se as não relatadas no meio acadêmico.

Internacionalmente, a utilização do CAA também vem crescendo substancialmente e se consolidando como o material cimentício com maior potencial de desenvolvimento. Inclusive, a RILEM (União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais de Construção) organiza um congresso sobre CAA a cada dois anos, sendo o primeiro em 1999, na Suécia; o segundo em 2001, no Japão; o terceiro em 2003, na Islândia; e o quarto nos Estados Unidos, em 2005. O quinto ocorrerá em 2007 na Bélgica (RILEM, 2006). Ainda se realizará, em fevereiro de 2008, o 1º Congresso Espanhol sobre CAA.

A revisão bibliográfica desta tese foca os assuntos dentro do CAA que vem sendo mais estudados e aplicações recentes deste concreto, já que a revisão mais ampla, com definição, vantagens e principais métodos de ensaios de trabalhabilidade, será abordada

superficialmente, por já ter sido realizada por este mesmo autor em sua dissertação de mestrado (TUTIKIAN, 2004).

2.1 DEFINIÇÃO

O termo concreto auto-adensável (CAA) identifica uma categoria de material cimentício que pode ser moldado nas fôrmas e preencher cada espaço exclusivamente através de seu peso próprio, sem necessidade de qualquer forma de compactação ou vibração externa. A auto-adensabilidade do concreto no estado fresco é descrita como a habilidade de todo o material preencher espaços e envolver as barras de aço e outros obstáculos, através, exclusivamente, da ação da força da gravidade, mantendo uma homogeneidade adequada.

Um concreto só será considerado auto-adensável, se três propriedades forem alcançadas: a fluidez, a coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço ou habilidade passante, e a resistência à segregação. Fluidez é a propriedade que caracteriza a capacidade do concreto auto-adensável de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços (FURNAS, 2004a). Habilidade passante é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de escoar pela fôrma, passando por entre as armaduras sem obstrução do fluxo ou segregação (FURNAS, 2004b). E resistência à segregação é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de se manter coeso ao fluir dentro das fôrmas, passando ou não por obstáculos (EFNARC, 2002, p.5).

2.2 VANTAGENS

O CAA é descrito como uma grande revolução ocorrida na tecnologia do concreto para a construção nas últimas décadas, já que possibilita vários ganhos, diretos e indiretos, entre os quais (TUTIKIAN, 2004):

- a) acelera a construção;
- b) reduz a mão-de-obra no canteiro;
- c) melhora o acabamento final da superfície;
- d) pode aumentar a durabilidade por ser mais fácil de adensar;
- e) permite grande liberdade de formas e dimensões;
- f) permite concretagens em peças de seções reduzidas;

- g) elimina o barulho de vibração;
- h) torna o local de trabalho mais seguro, em função da diminuição do número de trabalhadores;
- i) pode obter um ganho ecológico, por poder utilizar resíduos industriais, como a cinza volante por exemplo;
- j) pode reduzir o custo final do concreto e/ou da estrutura.

2.3 ENSAIOS DE TRABALHABILIDADE

O conjunto de equipamentos para a avaliação da trabalhabilidade do CAA foi totalmente desenvolvido para este novo tipo de concreto. Para cada uma das propriedades que devem ser medidas há um grupo de equipamentos, uns mais aptos que outros e uns mais práticos que outros. A tabela 1 resume os valores mínimos e máximos aceitos pela maior parte dos pesquisadores para cada equipamento de medição da trabalhabilidade do CAA.

Tabela 1: valores aceitos pela maioria dos pesquisadores para os equipamentos de trabalhabilidade

Ensaio	Unidade	Valores típicos	
		Mínimo	Máximo
<i>Slump flow</i>	milímetro	600	750
<i>slump flow</i> $t_{50\text{cm}}$	segundo	3	7
<i>v-funnel</i>	segundo	6	12
<i>v-funnel</i> (acrécimo tempo)	segundo	0	3
<i>l-box</i>	(h_2 / h_1)	0,80	1,00
<i>u-box</i>	$(h_2 - h_1)$ mm	0	30
<i>fill-box</i>	percentagem %	90	100
<i>u-shaped pipe</i>	percentagem %	90	100
<i>orimet</i>	segundo	0	5
<i>j-ring</i>	milímetro	0	10

(Fonte: Tutikian, 2004)

2.4 UTILIZAÇÕES RECENTES

Eficiência, economia e qualidade são cruciais para os produtos de concreto, sejam eles pré-fabricados ou em construções convencionais (Ramsburg *et al.*, 2005). E aumentar a

velocidade da produção com uma garantia e constância da qualidade é uma condição necessária para alcançar estes objetivos.

Domone (2006) fez um levantamento das publicações que relatavam o uso do CAA, entre 1993, desde a primeira aplicação divulgada ocorrida no Japão, que foi a concretagem no local de colunas e paredes de um edifício, e 2003. O autor observou diversas curiosidades na pesquisa, entre elas que 67% das obras que decidiram pelo uso do CAA foi devido às vantagens técnicas do material comparado ao CCV, como a impossibilidade de acesso ao local ou dificuldade de vibração; 14% decidiram pelo CAA por motivos econômicos, através da redução do número de trabalhadores ou do tempo de construção; por fim os outros 10% que utilizaram o CAA, o fizeram por este material ser uma inovação. Ainda da totalidade dos casos, todos verificaram a trabalhabilidade do CAA com o *slump flow test*, pelo menos, com cerca de 90% do número de casos usando a faixa de 600-750 mm como a ideal. E quase a metade dos casos relatou também o uso do T_{50} , do *V-Funnel* e do *Orimet test*, enquanto que o *L-Box*, *U-Box* e *J-Ring* raramente serviram de parâmetro. Outro dado interessante é que apenas três casos de aplicação do CAA na América do Sul foram relatados neste período. Outras características da aplicação do CAA podem ser lidas na publicação.

Para fins didáticos da revisão, as aplicações do CAA foram divididas em dois ambientes: na indústria de pré-fabricados e em construções onde o concreto é moldado no local. No primeiro setor, o desenvolvimento do CAA é maior, devido a sua sensibilidade a variações em relação ao CCV, o que é mais fácil de se controlar em um ambiente como uma indústria (WALRAVEN, 2005; BROUWERS; RADIX, 2005; TUTIKIAN *et al.*, 2005b). O primeiro autor enumera outras vantagens do ambiente industrial em relação ao de edificações *in situ* convencionais:

- ✓ no caso de falha total de adensamento do CAA, as conseqüências da aplicação *in situ* são mais severas, já que se pode ter de demolir uma estrutura ou parte dela, enquanto que, na indústria de pré-fabricados, basta descartar a peça;
- ✓ normalmente, é complicado de se realizar complexos controles de qualidade de recebimento de materiais em edificações;
- ✓ as características de auto-adensabilidade são mais facilmente alcançáveis e mais econômicas para concretos de resistência à compressão superiores, que são mais utilizados em indústrias de pré-fabricados;

- ✓ a indústria de pré-fabricados tem um melhor entendimento sobre seus custos (Pacios, 2005).

2.4.1 Aplicações do CAA em pré-fabricados

A seguir serão apresentados exemplos de aplicação do CAA na indústria de pré-fabricados, segundo Walraven (2005).

A figura 1 mostra elementos arquitetônicos utilizando concreto branco auto-adensável. Devido a melhor homogeneização da massa de concreto, a cor ficou bem distribuída, algo importante para a estética do painel.



Figura 1: elementos arquitetônicos com concreto branco auto-adensável (Fonte: Walraven, 2005)

Já a figura 2 ilustra um tabuleiro de concreto pré-moldado pré-tensionado, utilizado na estação de metrô do Amsterdã Arena, estádio de futebol do Ajax. Esta estação possui quatro pistas de 135 metros de comprimento, totalizando 1,4 quilômetros. Como cada painel possui um comprimento de 23,30 metros, foram executadas 60 unidades, todas com resistência à compressão de 55 MPa. Um dos motivos para a utilização do CAA foi o alto número de repetições da forma. Com esta solução aumentou-se a vida útil das formas, representando um ganho econômico.



Figura 2: peça tabuleiro utilizada na estação de metrô do Amsterdã Arena (Fonte: Walraven, 2005)

Na figura 3 pode-se observar pilares de fundação, que eram executados com concreto convencional através de um sistema local chamado de choque. Para uma boa compactação do concreto, deixava-se cair os pilares a uma altura de 50 milímetros. Com o uso de CAA, não foi mais necessário utilizar este mecanismo, o que aumentou a vida útil das fôrmas e diminuiu o tempo de produção de uma peça de 7,5 minutos para 1,5 minutos.



Figura 3: pilares de fundação executados com CAA (Fonte: Walraven, 2005)

Uma série de arcos executada com o CAA pode ser vista na figura 4. Estes arcos são compostos por cinco peças de 13 metros, totalizando 65 metros de comprimento. Sua seção transversal é em forma de uma caixa vazada, a qual era movida com a vibração, quando se utilizava o concreto convencional, por isso o sistema de concretagem foi alterado para o

CAA, que ainda proporcionou outras vantagens, como a redução do barulho de vibração e a redução em 50% do número de trabalhadores.



Figura 4: arcos compostos por cinco peças executadas em CAA
(Fonte: Walraven, 2005)

O CAA também foi utilizado para a produção de elementos pré-fabricados em Denver, Colorado, nos Estados Unidos. Foram testadas diversas peças, como vigas ‘T’, pilares, paredes arquitetônicas e outros. Segundo os autores Fernandez *et al.* (2005), o uso da tecnologia do CAA permitiu 20% de redução do tempo de concretagem, 66% de redução do número de trabalhadores, uma drástica melhora no acabamento final, eliminação do barulho de vibração e um ganho ambiental, uma vez que o cimento utilizado no CCV foi substituído em 20% por cinza volante.

Tutikian *et al.* (2005a) relataram a utilização do CAA em pré-fabricados no Brasil. Estes autores realizaram um trabalho comparativo de custos globais, entre o CAA e o CCV, abrangendo todas as etapas do processo, desde a composição unitária dos insumos até a etapa de reparos, a qual foi eliminada com o CAA. A tabela 2 ilustra o resultado para uma empresa que utiliza o concreto de f_{ck} 25 MPa. Nesta empresa o custo global do CAA foi 3% inferior ao CCV, e ainda apresentou diversas vantagens que não puderam ser quantificadas, como a diminuição do barulho de vibração, o aumento da vida útil das fôrmas, a economia de energia elétrica e um ganho ambiental, já que parte do cimento foi substituído por cinza volante.

Tabela 2: comparativo de custos globais entre o CAA e o CCV

EMPRESA 'A'				
ETAPA	CC		CAA	
	Nº Pessoas	Custo (R\$/ m³)	Nº Pessoas	Custo (R\$/ m³)
Composição do concreto	0	142,46	0	177,29
Mistura do concreto	1	3,43	1	3,43
Transporte	1	15,49	1	15,49
Aplicação do desmoldante	3	10,66	3	10,66
Adensamento	5	26,70	2	5,34
Acabamento	4	7,03	2	1,41
Reparos	2	14,55	0	0,00
TOTAL		216,89		210,19

(Fonte: Tutikian *et al.*, 2005a)

2.4.2 Aplicação do CAA *In Situ*

Apesar das dificuldades relatadas na aplicação do CAA em estruturas tradicionais, já são muitos os exemplos de utilização, uma vez que estas barreiras vêm sendo derrubadas ou transpostas pelos tecnologistas de concreto, respaldados pelos resultados que vêm obtendo.

Na figura 5 (Walravem, 2005), está o primeiro exemplo de aplicação em obras convencionais do CAA na Holanda. Em 1998, uma imponente fachada foi executada para o Teatro Nacional no Hague, o qual, por razões estéticas, possuía uma série de estreitas janelas, com lados de oito centímetros. O CAA utilizado para preencher todos os espaços, sem segregação dos agregados graúdos, foi um com elevada fluidez (diâmetro de espalhamento do *Slump Flow Test* de 730 milímetros) e baixa viscosidade (baixo tempo de escoamento do *V-Funnel*).



Figura 5: fachada em CAA com detalhes arquitetônicos (Fonte: Walraven, 2005)

O CAA também pode ser utilizado com sucesso em recuperações de estruturas antigas, onde não é aconselhável a existência de vibração, o que poderia ocasionar falhas maiores ou, até mesmo, ruptura do elemento. Um exemplo disto é uma ponte na Holanda, *The Katelbridge*, ilustrada na figura 6, que foi recuperada em 2002, com 45 anos de idade na época. A falha foi aberturas entre os tabuleiros da ponte, devido à sobrecarga, já que com as sucessivas renovações, os tabuleiros aumentaram sua espessura dos 50mm originais para 180mm, além do aumento de tráfego já previsto neste período. O CAA de resistência à compressão de 35 MPa foi transportado através de uma pequena janela exterior, pois não era possível o desvio do tráfego, para a forma interior na ponte. A figura 7 ilustra a densidade das armaduras por onde o concreto teve de penetrar.



Figura 6: ponte recuperada com CAA
(Fonte: Walraven, 2005)



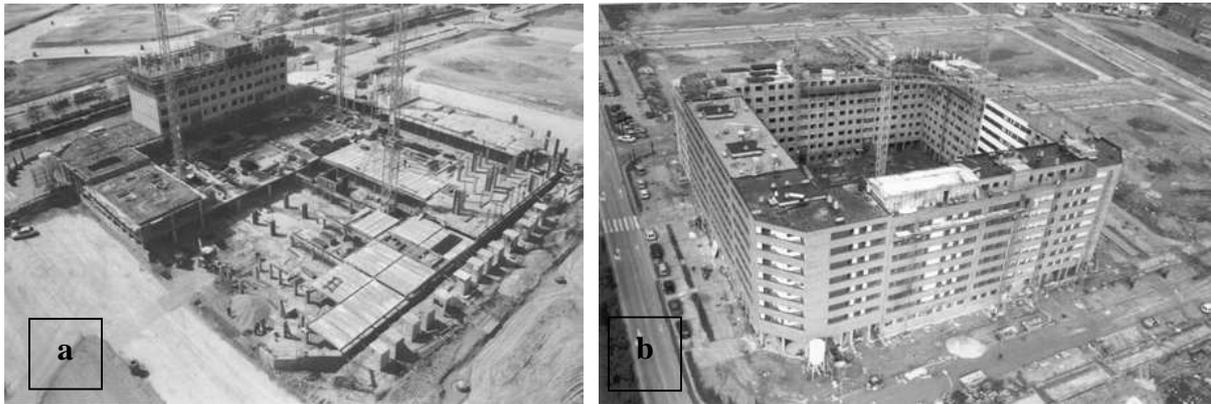
Figura 7: vista da armadura da estrutura
(Fonte: Walraven, 2005)

O CAA também foi utilizado na Universidade de Ilinoi, que comandava um projeto da Rede de Trabalho em Engenharia para Simulação de Terremotos (Grace, 2005). O projeto consistia em construir uma parede, densamente armada, em forma de 'L'; que seria indestrutível, para que se simulasse diversos terremotos com diferentes amplitudes. Uma série de tubos horizontais foi posicionada para futuras medições, os quais não poderiam ter sua posição alterada devido à vibração de um CCV, como se visualiza na figura 8. Ou seja, não poderia haver situação mais desfavorável à concretagem do que esta. Por fim, moldou-se o CAA com sucesso e, depois da desfôrma, a parede pode ser utilizada sem que fossem feitos reparos ou que os tubos tivessem sido danificados.



Figura 8: parede de simulação de terremotos (Fonte: Grace, 2005)

Pacios (2005) descreve uma aplicação em Madri, Espanha, onde foi executado um edifício com 220 apartamentos de 3 dormitórios em CAA. A utilização do CAA como uma tecnologia, em conjunto com outros sistemas construtivos de ponta, permitiu que se fizesse um apartamento de, aproximadamente, 80 m² de área útil, a cada 3 dias. A figura 9 mostra a evolução da obra em um intervalo de 11 meses (março de 2003 a fevereiro de 2004).



Figuras 9: evolução da edificação em duas datas – (a) março de 2003 e (b) fevereiro de 2004 (Fonte: Pacios, 2005)

Chai e Yang (2005) relatam a utilização do CAA para a reabilitação de prédios escolares em Taiwan. Estes prédios foram parcialmente danificados por terremotos e, conseqüentemente, tiveram de ser recuperados, uma vez que não foram totalmente destruídos. Porém as estruturas existentes apresentavam uma alta taxa de armadura, que teve de ser reforçada, e pouco espaço para concretagens. Por estes motivos, e por utilizarem primeiramente um CCV, falhas de concretagem ficaram visíveis, motivo pelo qual foi decidida a utilização do CAA, como mostra a preparação de um pilar na figura 10.



Figura 10: pilar sendo reforçado para concretagem com CAA (Fonte: Chai e Yang, 2005)

Geyer (2005) relata a utilização do CAA em um edifício em Goiás, Brasil, provavelmente a primeira construção convencional no Brasil onde o CAA foi utilizado na totalidade da estrutura com um acompanhamento técnico e econômico de todos os passos. A figura 11 mostra a concretagem de uma laje, onde se observa o reduzido número de trabalhadores necessários. O autor ainda cita como vantagens observadas com o uso do CAA a redução em torno de 70% do número de trabalhadores (de 13 para 4 pessoas), uma maior velocidade na execução da estrutura (em até 300%), maior qualidade e facilidade no nivelamento da laje e eliminação de ninhos e falhas de concretagem, elevando a qualidade e, conseqüentemente, a durabilidade do edifício. Então, o CAA foi aprovado pela empresa, apesar de ter apresentado um custo global 8% superior ao CCV.



Figura 11: laje sendo concretada com o CAA com poucos trabalhadores (Fonte: Geyer, 2005)

Na construção do Museu Iberê Camargo estava se utilizando um concreto fluido, de abatimento de 20 cm, cujo traço está ilustrado na tabela 3 (traço anterior) (Silva Filho *et al.*, 2004; Tutikian *et al.*, 2006). Uma vez que ocorriam problemas com a vibração, como o travamento das fôrmas cedendo, devido à excessiva vibração; defeitos superficiais ocasionados pelo ar aprisionado; e problemas relativos à dificuldade de homogeneização do concreto em camadas subseqüentes resolveu-se testar o CAA, primeiramente sem (CAA 1) e após com o aditivo modificador de viscosidade (VMA) (CAA 2). Em ambos os testes o CAA solucionou os problemas existentes e foi viável economicamente, com um destaque para o CAA 2, que reduziu o custo em quase 7%. A figura 12 mostra o aspecto do CAA utilizado nesta obra, enquanto que a figura 13 mostra um detalhe da borda deste material, onde se observa a coesão do concreto. Nota-se, também, que o consumo de cimento diminuiu 80 kg/m³, do traço anterior para o CAA 2, o que diminui a perda de abatimento do concreto e a possibilidade de ocorrência de manifestações patológicas, como fissuras por dessecação superficial e/ou retração do concreto.



Figura 12: aspecto do CAA utilizado no museu Iberê Camargo (Fonte: Silva Filho et al., 2004)

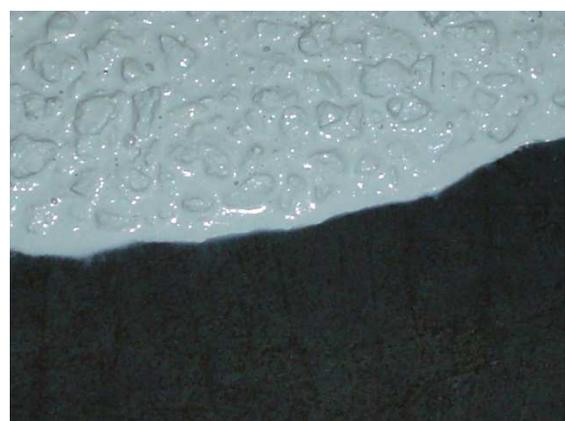


Figura 13: detalhe da borda do material

Tabela 3: traços de concreto utilizados no museu Iberê Camargo

Material	Traço Anterior	CAA 1	CAA 2
Cimento (kg/m ³)	380	375	300
Sílica ativa (kg/m ³)	19	20	15
Fíler calcáreo (kg/m ³)	220	500	650
Areia (kg/m ³)	730	430	370
Brita 9,5 mm (kg/m ³)	1000	1000	1010
Água (litros)	184	186	148
Superplastificante (litros)	2,40	2,40	2,70
Estabilizador de hidratação (litros)	1,60	1,60	1,30
VMA (l)	-	-	2,70
a/agl	0,46	0,47	0,47
Teor Arg (%)	57,50	57	57
Data	03/09/2004	21/09/2004	22/09/2004
Custo/m ³ (R\$)	389,59	389,45	363,94

(Fonte: Silva Filho *et al.*, 2004)

Lançada em 2002, a Comunidade da Construção é um movimento liderado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) que visa a integração da cadeia produtiva e o aumento de competitividade dos sistemas construtivos à base de cimento (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2007). Uma ação da Comunidade da Construção de Florianópolis objetivou determinar os custos de aplicação do CAA, especialmente os de mão-de-obra, na execução de lajes e vigas em uma estrutura de concreto armado, em comparação com a aplicação do CCV (Repette, 2005b). A ação foi dividida em seis etapas, sendo que a última foi a concretagem de demonstração com o CAA. A figura 14 ilustra a concretagem da laje tipo. Os estudos revelam que o CCA trouxe vantagens mesmo no caso das aplicações convencionais, não houve necessidade de alterações significativas nas fôrmas, nos métodos de lançamento e nos procedimentos de cura. Entre os benefícios destacados estão a redução no custo da mão-de-obra, uso de equipes pequenas e menor desgaste dos equipamentos de mistura, transporte e lançamento.



Figura 14: concretagem com CAA da laje tipo (Fonte: Repette, 2005b)

A ação da Comunidade da Construção de Porto Alegre teve como objetivo comparar o processo de concretagem entre o CCV e o CAA (Tutikian *et al.*, 2007). Foram itens da comparação desde o custo dos insumos para a mistura destes dois tipos de concreto até os custos envolvidos na aplicação do material na estrutura. O CAA apresentou inúmeras vantagens frente ao CCV, como a redução do número de trabalhadores de 14 para 5, a redução do custo de equipamentos e energia elétrica, a diminuição do ruído no entorno da edificação, entre outros inerentes do CAA. A figura 15 mostra o comparativo de custos entre o CCV e o CAA, para três resistências à compressão. O custo foi calculado com uma unidade monetária especial, a U.M.C., para não expor os custos das empresas envolvidas no trabalho. Mesmo o CAA tendo apresentado custos maiores de materiais, ao final, o processo com o CAA com cinza volante foi mais econômico que o processo com CCV, que foi mais econômico que com o CAA com areia fina, para todas as resistências à compressão estudadas. Com o trabalho, pode-se ver claramente que o custo dos CAA depende diretamente dos materiais escolhidos, mas como a cinza volante é um material abundante e disponível comercialmente na região, o uso desta mistura pode vir a crescer significativamente nos próximos anos.

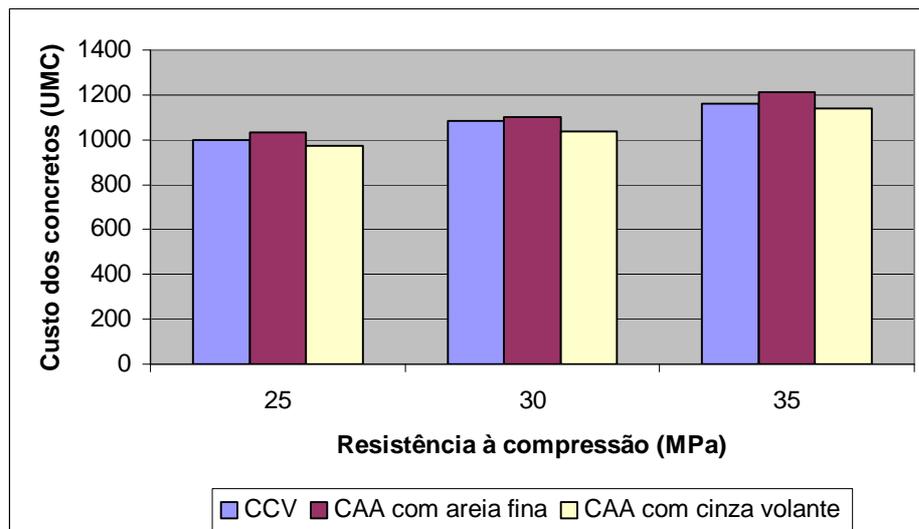


Figura 15: comparativo de custos entre o CCV e o CAA (fonte: Tutikian *et al.*, 2007)

2.5 AVANÇOS NO CAA

Diversos autores classificam, teoricamente, o CAA não como um novo tipo ou classe de concreto, e sim, como uma nova tecnologia (SZECSY, 2005). Este conceito vem conquistando novos adeptos no meio técnico e prático, podendo ser entendido como a grande evolução atual, com sua aceitação crescendo desde 1998 (CHRISTENSEN e ONG, 2005; NUNES *et al.*, 2006).

A seguir serão detalhados conceitos que vem sendo discutidos recentemente dentro da tecnologia do CAA, como a tendência de utilização de altos consumos de aglomerantes (mantendo o consumo de cimento constante) e materiais alternativos, a pressão que o CAA exerce nas fôrmas e a reologia deste tipo de concreto.

2.5.1 Utilização de alto teor de aglomerantes e materiais alternativos no CAA

Cada vez mais tem se utilizado altos teores de materiais pozolânicos no CAA, já que este tipo de concreto necessita um maior teor de finos para dar estabilidade, o que também aumenta o consumo de água e, conseqüentemente, a retração por secagem. Ao se utilizar um material pozolânico como componente fino, aumenta-se a resistência à segregação da mistura ao mesmo tempo em que se contribui para a formação de compostos resistentes no material endurecido.

A necessidade de incorporação de uma nova classe de componente no CAA, a responsável pela coesão, estimula a utilização de uma série de materiais alternativos, alguns, inclusive, já

usados no CCV. Há diversos estudos que viabilizaram o uso de resíduos no CAA, como o de Pagnussat *et al.* (2006), que descreve a incorporação de resíduo de corte de granito no CAA. Trabalhos focados no aproveitamento da cinza volante como agente coesivo são muitos, como o trabalho experimental desta tese, o de Bouzoubaâ e Lachemi (2001), o de Gomes *et al.* (2003), o de Poon e Ho (2004), o de Sahmaran *et al.* (2006), o de Somerville (2002), o de Xie *et al.* (2002) e o de Dietz e Ma (2000). Há também o relato de Ho *et al.* (2002) sobre o uso de quartzo moído no CAA, o de Zhu *et al.* (2001) que usaram escória alto-forno e de Tutikian (2004) quando utilizou cinza de casca de arroz no CAA. Um fino alternativo que também foi usado no CAA foi o pó de giz (ZHU e GIBBS, 2005).

Observa-se a tentativa de vários autores em utilizar resíduos ou materiais que impactem o mínimo possível o ambiente. Inclusive Metha (1999) esclarece que a tecnologia do concreto, para ser considerada não impactante à natureza, deve seguir três elementos básicos: a conservação da matéria-prima, uma durabilidade maior das estruturas e um planejamento holístico do processo.

Troli *et al.* (2003) descrevem o desenvolvimento de CAA para estruturas massivas. A mistura foi dosada com baixo consumo de cimento e com o agregado graúdo com elevado $D_{máx}$, para diminuir a possibilidade de fissuras térmicas. E, novamente, o alto teor de cinza volante foi o responsável pela resistência à segregação do material.

Ainda há casos em que materiais alternativos, como agregados de pneus moídos, são utilizados não para dar a coesão necessária ao CAA, e sim para melhorar outras propriedades, como, por exemplo, o módulo de elasticidade e os isolamentos acústico e térmico, como na publicação de Bignozzi e Sandrolini (2006).

Collepari (2003) cita a utilização da nanosílica como material coesivo para o CAA. A nanosílica é baseada em partículas de 5-50 nm, menores que o diâmetro médio das partículas de sílica ativa já utilizadas, em torno de 0,1-1 μm . O material é utilizado na forma líquida, com concentração entre 10 e 50% de sólidos.

Entre os aditivos químicos para o CAA, há sempre uma diversidade de novos produtos desenvolvidos pelas indústrias, principalmente na área dos superplastificantes e dos modificadores de viscosidade. Inclusive na área dos superplastificantes, Bury e Christensen (2002) e Collepari (2001) relatam a disponibilização de um novo produto com base sintética, com moléculas que podem ser adaptadas para cada caso. Por exemplo, pode controlar o tempo

de pega, melhorar a condição de bombeamento da mistura, manter a trabalhabilidade por mais tempo ou aumentar as resistências finais. O mecanismo de trabalho deste aditivo é similar ao do superplastificante a base de policarboxilatos, já conhecido, através da ativação eletrostática das partículas de cimento. A diferença entre os dois é a propriedade física do tipo sintético, onde suas longas e diversas cadeias moleculares se conectam ao cimento, aumentando a área de contato, possibilitando uma hidratação mais eficiente. E para controlar as propriedades citadas, pode-se aumentar ou diminuir o tamanho e o número das cadeias das moléculas do aditivo sintético.

2.5.2 Pressão nas fôrmas

Este item é importante, já que a utilização do CAA faz com que aumente a pressão exercida nas fôrmas em comparação com o CCV, fazendo com que elas cedam, se não houver cuidados extras.

Proske e Graubner (2002) enumeram 18 itens que influenciam na pressão exercida pelo concreto nas fôrmas, relacionados na tabela 4. Os autores dividiram em três graus de importância cada um dos itens gerais para todo o tipo de concreto. Para o CAA, os parâmetros 1.3, 1.4 e 2.4 não são aplicáveis.

Tabela 4: parâmetros que influem na pressão das fôrmas

1. Primeiro grau	2. Segundo grau	3. Terceiro grau
1.1 velocidade de lançamento	2.1 tempo de endurecimento	3.1 tipo de moldagem
1.2 densidade do concreto	2.2 compatibilidade entre cimento e aditivo	3.2 tipo e dimensão máxima dos agregados
1.3 tipo de compactação	2.3 pressão dos poros de água	3.3 tipo de cimento
1.4 tipo e profundidade de vibração	2.4 tempo de vibração	3.4 temperatura ambiental
1.5 consistência do concreto	2.5 projeto da fôrma	3.5 altura de lançamento e altura total
1.6 temperatura do concreto no estado fresco	2.6 permeabilidade da fôrma	3.6 armadura de reforço

(Fonte: Proske e Graubner, 2002)

Segundo Walraven (2005), é indiscutível que a velocidade de concretagem influi diretamente a pressão nas fôrmas. Um CAA com uma velocidade de concretagem de 2 metros por hora (m/h) exerce pressão semelhante à hidrostática, porém a partir deste ponto até os 10 m/h, a pressão não varia consideravelmente, não ultrapassando a hidrostática. Por isso, afirma-se que é recomendável utilizar a pressão hidrostática para o cálculo da resistência das fôrmas. A

recomendação de se utilizar esta pressão como parâmetro para o cálculo da resistência é aceita pela norma francesa **NF P93-350/89**.

Porém isto pode ser um problema, já que seria um material na forma líquida com uma massa específica de cerca de 2400 kg/m^3 exercendo uma pressão hidrostática nas fôrmas. Uma das grandes vantagens do CAA frente ao CCV é o aumento da velocidade de concretagem, fazendo com que a capacidade dos equipamentos de lançamento do concreto seja a limitação da vazão de concretagem. Quanto mais rápido puder lançar a mistura, melhor para todos os envolvidos no processo. Por isso, uma das maiores vantagens do CAA se tornou um grande risco, conhecido como colapso de fôrmas (BILLBERG, 2003).

Desde o início dos anos 90, diversas aplicações do CAA na Suíça têm ocasionado o colapso de fôrmas ou, simplesmente, as deformado (LEEMANN e HOFFMANN, 2003). Na maioria das aplicações, o CAA é introduzido através da parte inferior das fôrmas, devido a condições de produtividade. Brameshuber e Uebachs (2003) mostraram que a pressão exercida por CAA nas fôrmas é aproximadamente o dobro quando este é bombeado pela parte inferior de uma estrutura vertical se comparado com o bombeamento pela parte superior, com as mesmas velocidades de lançamento do concreto. Inclusive as pressões podem, pontualmente, superar as hidrostáticas.

Porém, muitas publicações relatam que a pressão exercida nas fôrmas pelo CAA foi menor que a hidrostática, já que a mistura apresenta um comportamento tixotrópico (DOUGLAS *et al.*, 2005). Tixotropia é definida como uma diminuição de viscosidade sob uma tensão ou velocidade de corte constante, seguida de uma recuperação gradual quando a tensão ou velocidade de corte é removida. Esta recuperação gradual de viscosidade afeta a trabalhabilidade do concreto, bem como uma série de etapas do processo de concretagem, como a mistura, transporte, bombeamento, lançamento e pressão desenvolvida nas fôrmas. Inclusive, pode ser diminuída a pressão exercida pelo CAA nas fôrmas com o controle do tempo de concretagem, executando uma segunda camada apenas quando a primeira já iniciou o processo de pega.

Djelal *et al.* (2004) propõem a utilização da equação de Janssen adaptada para CAA, a qual é dependente da aceleração gravitacional; das características do concreto, como a massa específica e a tensão de cisalhamento; das características da fôrma, como o espaçamento entre as paredes, a altura e o comprimento; e das interações entre a mistura e a fôrma, na forma de

um ângulo de fricção interna, determinado experimentalmente, e o coeficiente de fricção. É evidente a dificuldade de determinação da pressão através da equação, porém deve-se considerar a importância do atrito entre o CAA e as paredes, ainda mais quando houver estruturas longas e circulares, como a tubulação de bombeamento. Há casos onde é necessário o bombeamento por 2000 metros, por exemplo, sendo prudente cuidados na dosagem da mistura e especificação da tubulação.

Também se pode calcular a tensão de cisalhamento através do ensaio do *L-Box* (NGUYEN *et al.*, 2006). O autor propõe uma equação que relaciona as alturas do CAA 'h₁' e 'h₂', extraídas do ensaio, com a tensão de cisalhamento, a força da gravidade e a massa específica do concreto no estado fresco. A forma de parada (h₁ e h₂) do concreto é diretamente relacionada à tensão de cisalhamento, possibilitando correlacionar ambas em fórmulas matemáticas.

O cálculo da pressão nas fôrmas, exercida pelo CAA, pode ser realizado de diversas formas. Graubner e Proske (2005) propuseram uma nova forma de cálculo, derivada da teoria Silo de Janssen, utilizando os modelos de Euler-Lagrange e de Euler-Euler. Certamente trabalhos mais aprofundados nesta área seriam bem vindos, já que os modelos mencionados parecem não ser consenso no meio técnico, nem ter esgotado o assunto, apesar de que estão buscando maneiras mais precisas do cálculo da pressão nas fôrmas.

2.5.3 Reologia do CAA

Reologia é o estudo da deformação e do fluxo. Do ponto de vista reológico, o comportamento do CAA pode ser entendido pelo modelo de Bingham (WALRAVEN, 2005; ROUSSEL *et al.*, 2005), classificação aceita pela maioria dos autores. Tal fluido é caracterizado por dois parâmetros: a viscosidade plástica e a tensão de cisalhamento. O primeiro é a medida da taxa de fluxo do material, enquanto que a tensão de cisalhamento é uma medida de força, necessária para o movimento do concreto. O CAA apresenta alta fluidez sem segregação graças à baixa tensão de cisalhamento e alta viscosidade, quando comparado ao CCV (OH *et al.*, s/d). A primeira característica é conferida pelo aditivo superplastificante e água, enquanto que a viscosidade é resultado da ação dos materiais finos, incluindo o cimento (BILLBERG, s/d). Porém a água aumenta a fluidez do concreto diminuindo, consideravelmente, sua viscosidade, ao contrário do aditivo superplastificante, que tem por característica aumentar a fluidez com uma desprezível diminuição da viscosidade (OKAMURA, 1997).

Segundo a figura 16 de Billberg (2005), para que se inicie o movimento do CAA é necessária uma tensão de corte inicial (τ_0), a qual é pequena, próxima do zero, onde com a viscosidade plástica (μ_{pl}), que também pode ser determinada pela inclinação da reta, e com a velocidade de corte ($\dot{\gamma}$), pode-se definir a equação linear de comportamento reológico do CAA, relacionando a tensão de corte no eixo 'y' e a velocidade de corte no eixo 'x'.

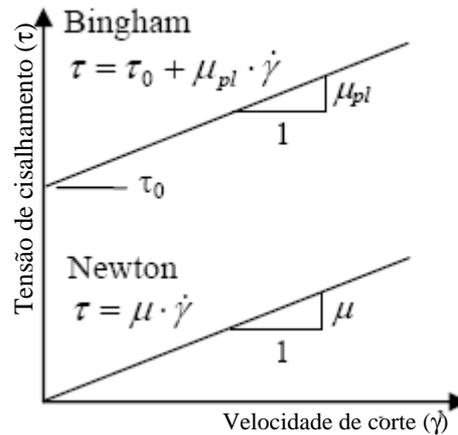


Figura 16: modelos reológicos (Fonte: Billberg, 2005)

Se o CAA apresentar uma viscosidade plástica baixa, da magnitude ou menor de 40 Pa.s, a tensão de cisalhamento deverá ser elevada (WALLEVIC, 2003), e poderá ocorrer a segregação do concreto, já que a mistura não terá condições de manter uma dispersão homogênea de seus constituintes (KHAYAT e DACZKO, 2002). Mas, se o CAA tiver uma alta viscosidade, ou seja, maior de 70 Pa.s, a tensão de cisalhamento será próxima de zero. A característica da mistura que identifica a viscosidade é o valor do *slump flow test*. Com um alto valor de *slump flow test*, sendo assim baixa tensão de cisalhamento, a pressão que o CAA exercerá nas fôrmas será próxima da hidrostática.

3 MÉTODOS DE DOSAGEM E CONCEITOS FUNDAMENTAIS PARA O CAA

O objetivo principal desta tese de doutorado é propor um método experimental para se dosar CAA. Para explicar o procedimento proposto, serão, primeiramente, detalhados os conceitos mais importantes de métodos que foram utilizados como base, como o de O'Reilly (1992) e o de De Larrard (1999). O método de dosagem proposto por Tutikian (2004) será explicado por inteiro, por ser o motivo para a proposição deste novo método de dosagem.

3.1 MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR TUTIKIAN (2004)

O método proposto por Tutikian (2004) é baseado no método de dosagem para CCV IPT/EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1992). Este é experimental e prático e possui passos que devem ser seguidos para que se alcance o objetivo final, que é a moldagem de três traços de concreto ou mais para que se possa desenhar o diagrama de dosagem.

3.1.1 Passo 1 - escolha dos materiais

Na figura 17 observam-se os passos, onde o primeiro é escolher os materiais que têm condições de compor o melhor CAA. As características a serem analisadas são o custo de cada componente, a disponibilidade em quantidade e distâncias aceitáveis, e se ainda houver mais de uma opção para um dado item, é aconselhável que se privilegie aqueles com que o responsável pela dosagem já tenha trabalhado. Deve-se especificar o diâmetro máximo do agregado graúdo, de preferência, menor de 19 mm. Os componentes finos, necessários para garantir a coesão do CAA, devem ser cuidadosamente escolhidos, pois atualmente há boas opções, e muitas, inclusive, são resíduos de indústrias, porém devem ter uma área superficial maior do que a do componente que estão substituindo. Os finos podem ser pozolânicos, como cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica ativa, metacaulim, escória alto forno e outros, ou não pozolânicos, como cerâmica moída, fíler calcáreo, areia fina e outros. Se os materiais forem pozolânicos, substituirão o cimento e se forem não pozolânicos, substituirão o agregado miúdo, com a substituição sendo sempre em massa.

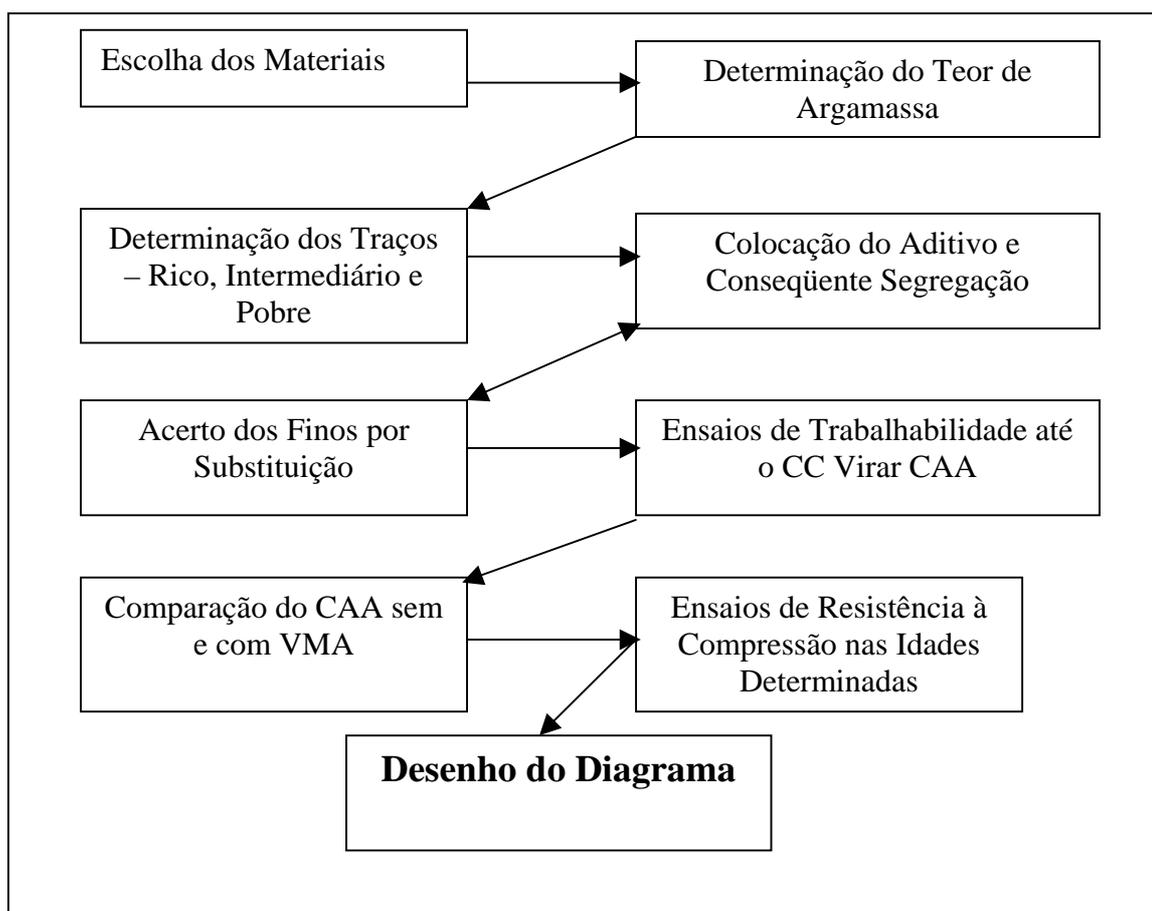


Figura 17: passo-a-passo para dosagem do CAA (Fonte: Tutikian, 2004)

3.1.2 Passo 2 - determinação do teor de argamassa seca

O segundo passo é a determinação experimental do teor de argamassa com os materiais escolhidos, sem aditivos nem finos, sendo que este deve ser mantido constante até o final da dosagem do CAA. Se o fino escolhido para a substituição for um não pozolânico, deve-se utilizar as equações de 1-9 para a determinação de parâmetros para compor o traço e, após a colocação dos finos e aditivos, para o desenho da curva de dosagem. E se o componente fino escolhido for pozolânico, deve-se utilizar as equações 10-20 para se determinar as informações necessárias para o cálculo do traço e, após, para o desenho da curva de dosagem.

O cálculo do consumo dos aglomerantes, para que se determine os outros componentes, deve ser feito através das equações 6 ou 7 se o fino for não pozolânico, e através das equações 15 ou 16 se o fino for pozolânico. Observa-se que para utilizar as equações 7 ou 16, é necessário que se conheça a massa específica dos materiais e que se determine o teor de ar aprisionado no concreto, enquanto que para se utilizar a 6 ou a 15, basta determinar a massa específica do concreto fresco. Através de ambas as opções deve-se chegar a valores parecidos, mas

recomenda-se que se utilize a segunda opção, pois esta considera o ar aprisionado do concreto e não é necessário que se realize ensaios de massa específica dos materiais constituintes do concreto.

Nesta fase o concreto ainda é convencional, sem aditivos e sem finos especiais. Os finos serão adicionados ao concreto por substituição em massa.

a) Fino não pozolânico:

$$fcj = \frac{k_1}{\left(k_2^{a/c}\right)} \quad (\text{eq. 1})$$

$$m = k_3 + k_4 * a / c \quad (\text{eq. 2})$$

$$C = \frac{1000}{\left(k_5 + k_6 * a / c\right)} \quad (\text{eq. 3})$$

$$\alpha = \frac{(1 + f + a)}{(1 + m)} \quad (\text{eq. 4})$$

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

$$C = \frac{\gamma}{(1 + f + a + p + a / c)} \quad (\text{eq. 6})$$

$$C = \frac{(1000 - ar)}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{f}{\gamma_f} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a / c\right)} \quad (\text{eq. 7})$$

$$A = C * a / c \quad (\text{eq. 8})$$

$$Cu = C * \$c + C * f * \$f + C * a * \$a + C * p * \$p + C * SP\% * \$sp + C * VMA\% * \$vma + C * a / c * \$ag \quad (\text{eq. 9})$$

b) Fino pozolânico:

$$fcj = \frac{k_1}{\left(k_2^{a/agl}\right)} \quad (\text{eq. 10})$$

$$m = k_3 + k_4 * a / agl \quad (\text{eq. 11})$$

$$MC = \frac{1000}{\left(k_5 + k_6 * a / agl\right)} \quad (\text{eq. 12})$$

$$\alpha = \frac{(1+a)}{(1+m)} \quad (\text{eq. 13})$$

$$m = a + p \quad (\text{eq. 14})$$

$$MC = \frac{\gamma}{(1+a+p+a/agl)} \quad (\text{eq. 15})$$

$$MC = \frac{(1000-ar)}{\left(\frac{c}{\gamma_c} + \frac{fp}{\gamma_{fp}} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/agl \right)} \quad (\text{eq. 16})$$

$$C = MC * C\% \quad (\text{eq. 17})$$

$$FP = 1 - C \quad (\text{eq. 18})$$

$$A = MC * a / agl \quad (\text{eq. 19})$$

$$Cu = C * \$c + C * fp * \$fp + C * a * \$a + C * p * \$p + C * SP\% * \$sp + C * VMA\% * \$vma + C * a / agl * \$ag \quad (\text{eq. 20})$$

onde:

fcj = resistência à compressão axial, à idade j, em MPa;

a/agl = relação água / aglomerante em massa, em kg/kg;

c = relação cimento / aglomerantes em massa, em kg/kg;

fp = relação fino pozolânico / aglomerantes 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;

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

k1, k2, k3, k4, k5, k6 = constantes que dependem exclusivamente dos materiais (cimentos, adições, agregados, aditivos);

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³;

MC = consumo de material aglomerante por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³;

FP = consumo do fino pozolânico por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m^3 ;

SP% = dosagem de aditivo superplastificante por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m^3 ;

VMA% = dosagem de aditivo modificador de viscosidade por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m^3 ;

γ = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m^3 ;

γ_c = massa específica do cimento, em kg/dm^3 ;

γ_{fp} = massa específica dos finos pozolânicos, em kg/dm^3 ;

γ_f = massa específica dos finos não pozolânicos, em kg/dm^3 ;

γ_a = massa específica do agregado miúdo, em kg/dm^3 ;

γ_p = massa específica do agregado graúdo, em kg/dm^3 ;

ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em dm^3/m^3 ;

A = consumo de água potável por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m^3 ;

Cu = custo do concreto por metro cúbico;

\$c = custo do kg de cimento;

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

\$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 kg de aditivo superplastificante;

\$vma = custo do kg de aditivo modificador de viscosidade;

\$ag = custo do kg de água potável.

3.1.3 Passo 3 - determinação dos traços rico, intermediário e pobre

Com os materiais definidos e o teor de argamassa determinado, devem ser escolhidos pelo menos três traços bases para o desenho do diagrama de dosagem, um rico, um intermediário e um pobre. Com a realização das curvas de dosagem e conseqüente determinação dos coeficientes de correlação para uma família de concretos, se poderá dosar qualquer mistura desejada com os mesmos componentes. Não é aconselhável que se extrapole a curva. Logo, é recomendável que se aumente o número de pontos para se ter um grande intervalo de valores ou escolher pontos já próximos dos parâmetros finais, caso seja possível. Deve-se sempre manter o teor de argamassa constante em massa, em todos os traços realizados, para que estes sejam considerados da mesma família, e possam ser plotados no mesmo diagrama de dosagem. Haverá alguma variação no volume final da argamassa, quando forem utilizados materiais de massa específicas diferentes, mas é imprescindível que não ocorram variações de massa entre as argamassas de traços unitários 1:m diferentes, para não comprometer o diagrama de dosagem.

3.1.4 Passo 4 - colocação do aditivo e conseqüente segregação

Até o terceiro passo, o método é exatamente igual ao do IPT/EPUSP. É no quarto passo que o concreto vai se alterando para ser auto-adensável, primeiramente com a colocação do aditivo superplastificante e, simultaneamente, a de materiais finos. A proporção de aditivo que se coloca é em função da massa do aglomerante e varia muito, devido à variação de cimentos existentes e, principalmente, à grande variedade de aditivos (marcas, tipos). Recomenda-se que se comece com pequenas quantidades, na ordem de 0,30% da massa de cimento, e vá aumentando, até chegar no ponto ideal. O valor final deve ser mantido constante para todos os traços realizados, para que os concretos sejam considerados da mesma família. O ponto ideal é obtido visualmente, e ocorre quando o concreto está bastante fluido, sem levar em consideração a separação dos agregados graúdos da argamassa. Nesta etapa não é necessário realizar os ensaios de trabalhabilidade, pois o material está em uma fase bastante fluida, segregando. A partir deste momento é muito importante agilidade no processo, já que os aditivos superplastificantes têm um período de ação pequeno, ou seja, com o passar do tempo, vão perdendo sua ação, e este tempo é, em média, 50 minutos, mas depende muito do tipo, da marca do aditivo e, principalmente, da temperatura ambiente. O quarto e o quinto passo são realizados simultaneamente, ou seja, à medida que se coloca o aditivo, os finos também são adicionados.

3.1.5 Passo 5 - acerto dos finos por substituição

O quinto passo é a correção da segregação do concreto, tornando-o coeso e fluido ao mesmo tempo. Com a substituição do cimento ou do agregado miúdo pelos finos especificados para tornar o concreto coeso, cria-se o CAA, e dependendo do material fino escolhido, muda-se o componente a ser substituído. Se o material fino escolhido for pozolânico ou cimentante (cinza volante, sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno, cinza de casca de arroz), substitui-se o cimento, e se for não pozolânico (pó de brita, fíler calcário, cerâmica moída, areia fina) substitui-se o agregado miúdo. Para auxiliar o responsável pela dosagem do CAA, foi criada uma tabela auxiliar para o acerto da proporção do material fino em relação ao que será substituído (tabela 5), onde a proporção começa pequena e aos poucos vai crescendo, até que o concreto fique dentro dos limites estabelecidos de trabalhabilidade dos CAA. Esta tabela funciona para CAA 1:3 (massa de aglomerantes : massa de agregados secos), de teor de argamassa seca em 53% e com finos não pozolânicos, onde as massas dos materiais foram calculadas a partir da massa do agregado miúdo, que foi determinada, em função do volume da betoneira, em 10 quilogramas. Já a água é adicionada experimentalmente em relação à massa dos aglomerantes, porém a relação a/agl deve ser a menor possível, para que aumente a durabilidade da estrutura e a resistência dos concretos.

Tabela 5: determinação da proporção entre o material fino e o substituído

TRAÇO UNITÁRIO (c:f:a:b)	CIMENTO (kg)		FINOS (kg)		BRITA (kg)	
	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo
1:0:1,12:1,88	8,93		0,00		16,79	
1:0,1:1,02:1,88	9,80	0,87	0,98	0,98	18,42	1,64
1:0,2:0,92:1,88	10,87	1,07	2,17	1,19	20,44	2,01
1:0,3:0,82:1,88	12,19	1,32	3,66	1,49	22,92	2,48
1:0,4:0,72:1,88	13,89	1,70	5,56	1,90	26,11	3,20
1:0,5:0,62:1,88	16,13	2,24	8,06	2,50	30,32	4,21
1:0,6:0,52:1,88	19,23	3,10	11,54	3,48	36,15	5,83
1:0,7:0,42:1,88	23,81	4,58	16,67	5,13	44,76	8,61
1:0,8:0,32:1,88	31,25	7,44	25,00	8,33	58,75	13,99
1:0,9:0,22:1,88	45,46	14,21	40,91	15,91	85,46	26,71
1:1:0,12:1,88	83,34	37,88	83,34	42,43	156,68	71,21

(Fonte: Tutikian, 2004)

3.1.6 Passo 6 - ensaios de trabalhabilidade até o CCV virar CAA

O sexto passo verifica se o concreto já está ideal ou se ainda são necessárias algumas correções. A medida que acontece a adição de aditivo superplastificante e a substituição de materiais por finos, a mistura vai ficando mais coesa e menos fluida. Assim, cada vez que adiciona-se material fino e tira-se outro componente, é necessário que se realize os ensaios de trabalhabilidade. Caso o concreto se enquadre nos limites, estará pronta a dosagem. Se não se enquadrar, deve-se continuar acertando as proporções. Como os testes realizados para a análise do CAA podem ser demorados, deve-se observar visualmente o material e só realizar os testes quando estiver na eminência da obtenção do CAA, sob pena de o aditivo perder o efeito.

3.1.7 Passo 7 - comparação do CAA com e sem VMA

Segundo Billberg (1999), existem duas formas principais de manter a estabilidade junto com a fluidez do CAA: adicionando sólidos finos ou adicionando o aditivo modificador de viscosidade (VMA). E como são os materiais finos os responsáveis por dar coesão ao CAA, o VMA pode substituir os finos, mas nem sempre é economicamente vantajoso realizar esta troca. Como já se tem o traço do CAA pronto sem o VMA, deve-se calcular o custo dos materiais, e após, substituir parte dos finos pelo aditivo e recalculá-lo o custo do concreto. Assim, poderá ser analisado se compensa o uso do VMA. Uma situação em que o uso do VMA é praticamente obrigatório, é quando não se tem materiais finos disponíveis na região, e se é obrigado a utilizar o cimento como um fino para dar coesão ao CAA, aumentando o custo do concreto e aumentando a possibilidade de ocorrência de manifestações patológicas. Observa-se que este passo não é obrigatório, serve somente para melhorar o traço já determinado, quando finos para dar a coesão necessária ao concreto não forem economicamente disponíveis. Isto porque, para que se efetue a substituição de finos pelo VMA, é necessário que se faça um novo concreto, sendo impossível aproveitar o anterior.

3.1.8 Passo 8 - ensaios de resistência à compressão nas idades determinadas

Nesta etapa já se possui os traços prontos e deve-se moldar os corpos-de-prova para a ruptura à compressão nas idades requeridas. Os CP's devem ser moldados sem vibração ou compactação interna, o CAA deve simplesmente fluir para o interior das fôrmas. No mínimo dois CP's para cada idade de ensaio, realizando cura úmida até as idades escolhidas (normalmente 3, 7 e 28 dias), são necessários. Ensaia-se o concreto à compressão para a

obtenção dos dados que faltavam para o desenho do diagrama e para o cálculo das equações de comportamento e coeficientes de correlação, com o valor da resistência à compressão (MPa), que se somam à relação a/agl, traço 1:m e o consumo de cimento por metro cúbico (kg/m^3).

3.1.9 Passo 9 - desenho do diagrama

Com todos os dados obtidos, pode-se desenhar o diagrama de dosagem e determinar as equações de comportamento e os coeficientes de correlação, e a partir de qualquer condição inicial, dentro do intervalo do estudo experimental, pode-se dosar o CAA com aqueles materiais escolhidos.

3.1.10 Considerações finais sobre o método

O método já foi testado, aprovado e utilizado por diversos autores: o próprio Tutikian (2004), Geyer (2005), Manuel (2005), Pagnussat *et al.* (2006), Ferreira *et al.* (2006), Alencar e Helene (2006), Barbosa *et al.* (2007) e outros. Por se tratar de um método recente, é significativa esta utilização.

Porém, observou-se, durante a dosagem de CAA, que o teor de argamassa ideal é baixo para que a mistura flua e passe por obstáculos facilmente. No entanto, não é aconselhável que se aumente indiscriminadamente o teor de argamassa, por que, provavelmente, diminuiria o módulo de elasticidade da estrutura e aumentaria a retração por secagem do concreto. Outro fato que não é consenso, é que o teor de argamassa não pode ser constante para a família inteira, começando com os traços ricos e acabando nos pobres. Focado nesta linha de discussão, Manuel (2005) realizou diversas famílias de CAA, variando o teor de argamassa e realizando ensaios no estado fresco e no estado endurecido. E, apesar de concluir que é possível e viável a dosagem de CAA com o teor de argamassa ideal, um aumento pequeno, na ordem entre 2% e 4%, é o melhor, tanto no estado fresco quanto no endurecido, para as famílias estudadas. Porém, o problema do teor de argamassa constante ainda perdura, assim como uma forma exata de se determinar o melhor valor de argamassa.

Outro ponto observado com a prática, onde o método pode ser aperfeiçoado, é em relação à dependência de uma certa experiência do responsável pela dosagem. Isto ocorre, pois o acerto da quantidade de água, do aditivo superplastificante e do percentual de finos é experimental, na central de concreto. E este acerto deve ser ágil, devido à possibilidade do aditivo perder o

efeito e ter de se recomeçar todo o processo. Este item pode ser considerado tanto uma desvantagem do método como uma vantagem, para aqueles que possuem um conhecimento do material.

Por fim, ainda há a crítica sobre o fato de o método não contemplar o estudo prévio dos agregados, fazendo com que se determine aleatoriamente a proporção entre duas classes de agregados graúdos, se for de interesse do profissional esta composição.

Então o objetivo do novo método é de utilizar as vantagens do método proposto por Tutikian (2004) e tentar eliminar algumas das desvantagens observadas com o uso na prática do método.

3.2 MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR O'REILLY (1992)

O método de dosagem proposto por O'Reilly (1992) é para CCV, até porque quando de seu desenvolvimento, não se estudava o CAA. Este método pode ser dividido em duas partes: a primeira que determina, experimentalmente, a proporção entre os agregados, e a segunda que calcula, através de tabelas e aproximações, os outros constituintes do concreto.

Será explicada, resumidamente, a primeira parte, a qual pode contribuir para a proposição do método desta tese.

3.2.1 Determinação da relação ótima dos agregados graúdos e miúdos

Será apresentada, a seguir, uma forma experimental de se determinar a melhor composição entre os agregados do concreto, dois em dois, do de maior granulometria para o de menor.

Apesar de muitos métodos de dosagem partirem de uma curva granulométrica ideal para os agregados, como a de Fuller, deve-se ressaltar que a forma dos agregados é decisiva e mais preponderante que a granulometria, por isso, é recomendável evitar maneiras que determinem a relação ótima entre os agregados baseados somente na granulometria teórica ideal.

O método mais preciso é o experimental, que se baseia na determinação da porcentagem de vazios da mistura entre os agregados. A porcentagem de vazios e a superfície específica mínima da mistura de agregados indicarão a composição ótima, para a qual, o consumo de pasta será mínimo.

Para encontrar estes valores, primeiro ensaiam-se diversas porcentagens entre dois componentes, por exemplo 20% de brita e 80% de areia regular (20-80), 30-70, 40-60, 50-50. Este intervalo de 10% é o mais usual; porém, dependendo da aplicação e da necessidade de exatidão, pode-se aumentar ou diminuir este valor. Então, calcula-se, para cada uma das misturas, a massa unitária compactada ($M_{unit AB}$), através das normas locais. Observa-se que a M_{unit} é, simplesmente, a massa da mistura compactada dividida pelo volume do recipiente. É importante que os materiais estejam secos e bem misturados.

Deve-se calcular a massa específica ($M_{esp AB}$) de cada uma das proporções, segundo a equação 21. Este cálculo é necessário para a determinação dos vazios da mistura e independe da $M_{unit AB}$. O %A ou %B é o percentual de cada um dos componentes de uma mistura entre os materiais A e B.

$$M_{espAB} = \frac{(M_{espA} * \%A) + (M_{espB} * \%B)}{100} \quad (\text{eq. 21})$$

Com as massas específicas de cada material e a massa unitária da mistura compactada já calculadas, pode-se determinar a porcentagem de volume dos vazios, para cada uma das composições, através da equação 22. Observa-se que, nem sempre, a mistura com a maior M_{unit} será a com menor índice de vazios.

$$V = \frac{M_{espAB} - M_{unitAB}}{M_{espAB}} * 100 \quad (\text{eq. 22})$$

Com isso, pode-se, facilmente, determinar a mistura ótima entre os agregados, dois a dois, em ordem decrescente de $D_{máx}$.

3.2.2 Considerações Finais

Através deste método, a determinação da mistura ótima dos agregados é encontrada em função dos vazios de cada proporção, e não mais com a visualização do teor de argamassa ótimo. Assim, o teor de argamassa não é mais um parâmetro essencial, podendo ser, inclusive, variável para uma família de concretos.

3.3 CONCEITOS PROPOSTOS POR DE LARRARD (1999)

De Larrard (1999) propôs um método de dosagem científico para quaisquer tipos de concreto, inclusive para o CAA, que foi denominado de Modelo de Empacotamento Compressivo

(CPM). Apesar do método como um todo não ser de fácil aplicação, por depender de programas computacionais e ensaios de viscosidade com aparatos de difícil obtenção, muitos conceitos podem ser utilizados para o aperfeiçoamento do método de dosagem que está sendo desenvolvido. Explicam-se, a seguir, os principais conceitos de De Larrard (1999), sem o intuito de detalhar toda sua publicação.

3.3.1 Pacote granular

A determinação do pacote granular é muito importante para misturas granulares embebidas em matrizes cimentícias, como o concreto, objetivando sempre a combinação dos agregados de forma que minimize a porosidade, diminuindo o consumo de pasta na mistura.

O pacote granular de uma mistura granular depende, principalmente, do tamanho dos grãos, da forma destes e do método de processamento do pacote, ou seja, o pacote granular não é uma propriedade dos materiais. No passado o método da tentativa e erro para se chegar no máximo empacotamento granulométrico era comumente utilizado, já que se tentava obter uma aproximação adaptando os agregados a uma curva ideal granulométrica que, teoricamente, resultaria na mistura com maior massa unitária. Então, a contribuição do CPM é obter a máxima compactação de forma racional para quaisquer forma e tamanho de partículas de agregados.

3.3.2 Empacotamento virtual de uma mistura granular

Ao se compactar uma mistura binária (com 2 tipos de partículas), pode ocorrer uma mistura sem interação, com total interação ou com interação parcial entre os componentes. O caso considerado sem interação significativa entre as partículas é quando o diâmetro de uma delas é muitas vezes superior ao da outra ($d_1 \gg d_2$). Isto significa que o assentamento de uma classe de partículas não é afetado pelo assentamento da outra classe. E ainda pode-se encontrar duas situações, quando os grãos maiores são dominantes e quando os grãos menores são os dominantes. Observa-se na figura 18 o primeiro caso e na figura 19 o segundo.

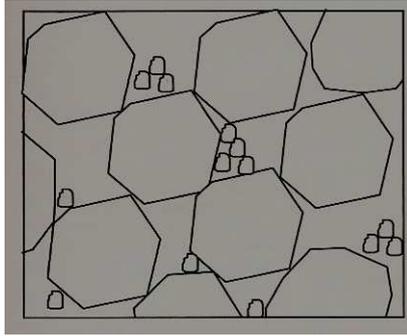


Figura 18: grãos maiores dominantes em uma mistura binária sem interação (Fonte: De Larrard, 1999)

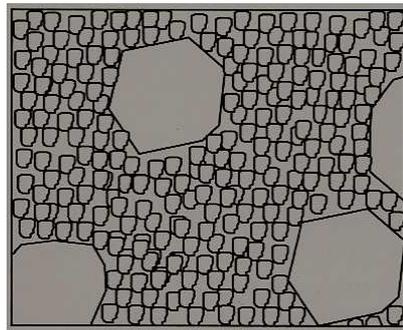


Figura 19: grãos menores dominantes em uma mistura binária sem interação (Fonte: De Larrard, 1999)

A figura 20 ilustra a evolução do pacote granular de uma mistura binária de agregados, sendo que a parte 1 mostra o caso quando o agregado graúdo é dominante e a parte 2 quando o agregado miúdo é quem domina a mistura. A linha contínua representa o β_2 que é a compacidade do agregado miúdo. β_1 é a compacidade do graúdo, enquanto que o empacotamento da mistura, representado no eixo 'y', é o γ , símbolo que também representa os empacotamentos unitários dos agregados miúdo e graúdo, com o γ_1 e γ_2 , respectivamente. Observa-se que é o empacotamento do agregado miúdo quem determina o pacote granular, ou seja, a medida que ele aumenta, cresce o empacotamento da mistura e vice-versa. O ponto de maior empacotamento é quando o agregado miúdo está com alta compacidade junto com a maior quantidade de agregado graúdo, desde que não interfira nas menores partículas.

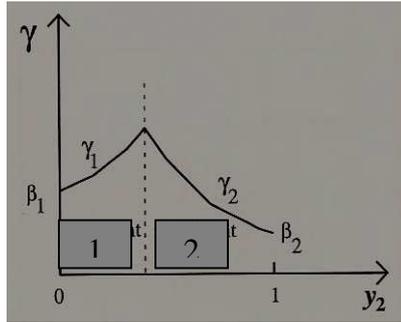


Figura 20: evolução do pacote granular versus a proporção de agregado miúdo, para uma mistura binária sem interação (Fonte: De Larrard, 1999)

Quando o diâmetro de uma classe de partículas é igual ao da outra ($d_1 = d_2$), a mistura é considerada com total interação, embora o empacotamento residual isolado de cada uma das classes possa ser diferente, conforme ilustra a figura 21. A figura 22 mostra que o pacote granular pouco varia com a compacidade ou com a fração de cada uma das classes de partículas (Φ_1 e Φ_2), porém quanto menos houver de uma determinada partícula, melhor.

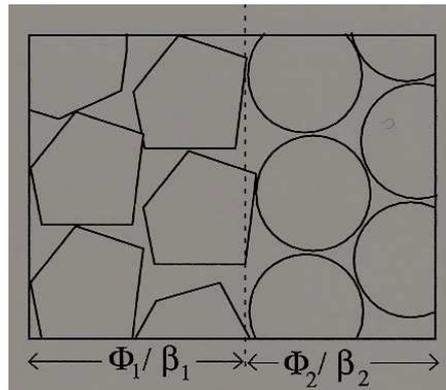


Figura 21: mistura binária com total interação (Fonte: De Larrard, 1999)

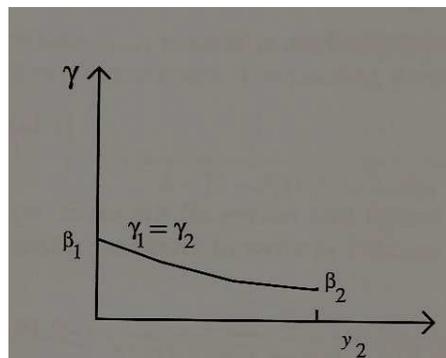


Figura 22: evolução do pacote granular versus a proporção de agregado miúdo, para uma mistura binária com total interação (Fonte: De Larrard, 1999)

Por fim, uma mistura binária apresentará uma interação parcial quando o diâmetro da partícula dominante for maior que o da partícula não dominante, porém próximos. Se for

inserida uma partícula menor nos espaços vazios dentro de um volume preenchido por partículas maiores e a menor for maior que os vazios, ocorrerá uma perturbação do pacote granular inicial. Este fenômeno é o *efeito de perda*, representado na figura 23, e faz com que diminua a quantidade de agregados graúdos dominantes em um volume.

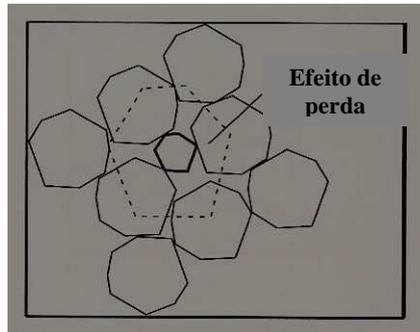


Figura 23: efeito de perda exercido por um grão pequeno em grãos grandes (Fonte: De Larrard, 1999)

Quando for inserida uma partícula maior nas partículas menores dominantes ocorrerá o *efeito de parede*, como se pode observar na figura 24, já que a parede do agregado graúdo impedirá que os agregados miúdos se aproximem nesta área, diminuindo, assim, esta quantidade em um determinado volume.

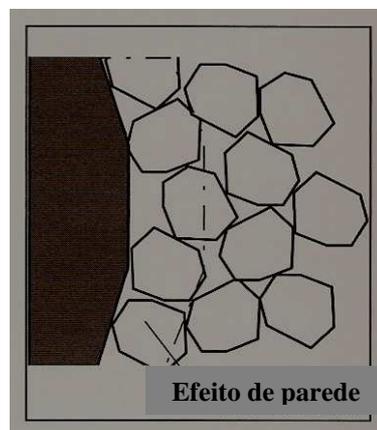


Figura 24: efeito de parede exercido por um grão grande em grãos pequenos (Fonte: De Larrard, 1999)

Por fim, a figura 25 mostra claramente que o pacote granular de uma mistura binária depende, basicamente, do tipo de interação que há entre as partículas. Quanto menor a interação, maior a compacidade da mistura, mostrando que se deve evitar, ao máximo, que ocorra o efeito parede e o efeito de perda, pois estes implicarão em vazios no esqueleto granular.

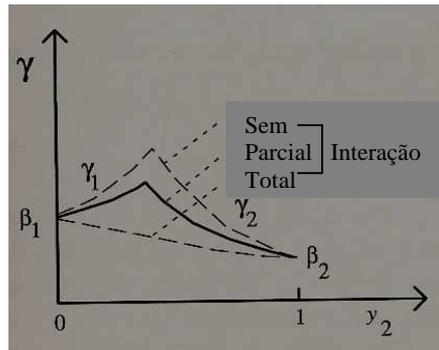


Figura 25: evolução do pacote granular versus a proporção de agregado miúdo, para o caso geral (Fonte: De Larrard, 1999)

3.3.3 Mistura Polidispersiva

Nas misturas de concreto em geral, podem existir várias classes de componentes, com diferentes diâmetros. Mas sempre um deles será o dominante, nem sempre o de maior diâmetro, e sim, o de maior volume.

Contudo, este caso não é comum, o mais usual é quando as classes de componentes de um concreto apresentam diâmetros similares, onde ocorre uma combinação do efeito de parede com o efeito de perda.

3.3.4 Índice de compactação

O índice de compactação de uma mistura depende do processo de construção do pacote.

O pacote granular de uma mistura aumenta com o diâmetro médio das partículas que a compõe, principalmente porque a vibração ou compactação manual é mais efetiva com elementos maiores, por apresentarem menor contato entre as partículas por unidade de volume da mistura. Da mesma forma que agregados arredondados podem ser mais compactados que os alongados. Porém não há nenhuma lei geral que relacione a compactação de uma mistura com seu diâmetro.

Apesar de esta afirmação de De Larrard (1999, p.18) vir acompanhada de uma explicação teórica aparentemente coerente e poder ser confirmada nos ensaios das tabelas 6 e 7, o autor desta tese discorda do fato de que agregados com diâmetros maiores apresentem um empacotamento maior que os agregados de diâmetros menores, por ser contra a prática e contra o fato de que os últimos podem ocupar pequenos vazios que os primeiros não poderiam, por mais eficiente que seja o processo de encaixe das partículas.

3.3.5 Efeito container no pacote granular

Todas as alternativas estudadas até então consideram o concreto sendo utilizado para estruturas com dimensões diversas vezes maiores que o diâmetro dos maiores agregados. Mas nem sempre esta condição se verifica, como, por exemplo, em estreitas peças pré-fabricadas. A **NBR 6118/03** determina as dimensões máximas do agregado graúdo em função dos espaçamentos da estrutura. Então tem de se considerar o efeito container em alguns casos.

O efeito container, estudado por Bem-Aïm (1970, *apud* De Larrard, 1999), basicamente é a existência de um volume perturbado V_p (por unidade total de volume da mistura), no qual a distância da parede até o final da influência é a metade do diâmetro as partículas (em uma mono dispersiva mistura). Então se $V_p = d/2$, pode-se observar que o volume de perturbação de uma parede é diretamente proporcional ao diâmetro das partículas, fato evidente já constatado por Caquot (1937, *apud* De Larrard, 1999). Este modelo de Bem-Aïm também serve para superfícies curvas. A figura 26 representa o efeito container para uma mistura mono dispersiva.

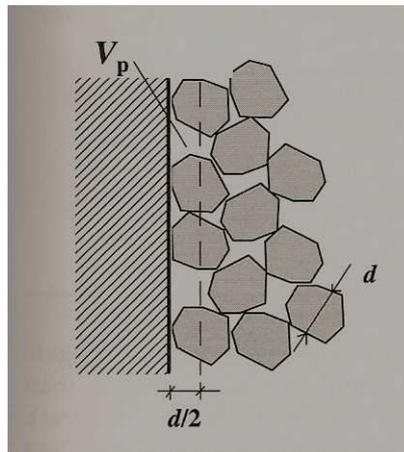


Figura 26: modelo de Bem-Aïm, demonstrando o volume perturbado de *container* (Fonte: De Larrard, 1999)

Para verificar a veracidade destas teorias, De Larrard (1999) determinou o pacote granular de cinco classes (0,5; 1; 2; 4 e 8 mm) de dois tipos de agregado, arredondado e angular, variando o diâmetro do cilindro utilizado. A altura do cilindro e a forma de compactação foram idênticas para todos os exemplares. A tabela 6 mostra os resultados obtidos para os agregados arredondados, enquanto que a tabela 7 ilustra os resultados para os agregados angulares.

Tabela 6: Medições do pacote granular para investigar o efeito *container* para agregados arredondados

D agregado(mm)	D cilindro (mm)	Pacote granular experimental
8	80	0,6263
8	40	0,6119
8	20	0,5907
4	80	0,6196
4	40	0,6126
4	20	0,5997
2	80	0,6214
2	40	0,6177
2	20	0,6106
1	80	0,6124
1	40	0,6105
1	20	0,6069
0,5	80	0,5929
0,5	40	0,5920
0,5	20	0,5902

(Fonte: De Larrard, 1999)

Tabela 7: Medições do pacote granular para investigar o efeito *container* para agregados angulares

D agregado(mm)	D cilindro (mm)	Pacote granular experimental
8	80	0,5945
8	40	0,5671
8	20	0,5220
4	80	0,5768
4	40	0,5624
4	20	0,5360
2	80	0,5719
2	40	0,5645
2	20	0,5503
1	80	0,5630
1	40	0,5593
1	20	0,5520
0,5	80	0,5639
0,5	40	0,5620
0,5	20	0,5583

(Fonte: De Larrard, 1999)

Observa-se que o pacote granular aumentou com o diâmetro do cilindro, principalmente para as maiores frações. Também se pode notar que quando o diâmetro do cilindro é cerca de 5 vezes maior que o diâmetro médio das partículas, o efeito *container* não é mais significativo.

A figura 27 resume todas as possíveis interações que podem ocorrer em uma mistura de agregados. Esta mistura é composta por 3 classes de partículas e se pode observar que a partícula 3 exerce um efeito de perda nas partículas dominantes 2, que também sofrem com o efeito de parede ocasionado pelo agregado 1 e com o efeito container ocasionado pela parede externa. Novamente, deve-se lembrar que estes efeitos podem ser eliminados ou minimizados na seleção dos agregados, considerando-se sua forma e granulometria.

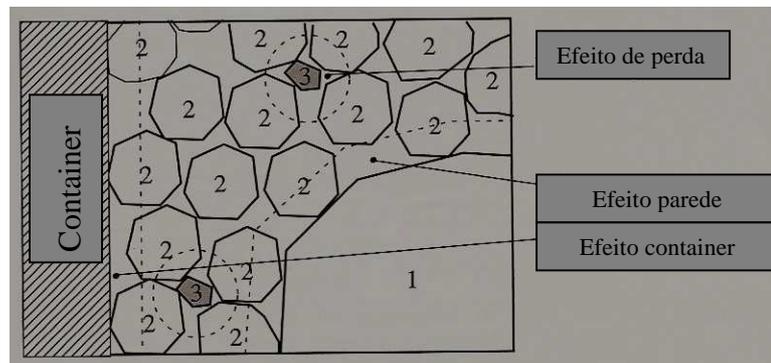


Figura 27: possíveis perturbações para uma mistura com interação parcial (Fonte: De Larrard, 1999)

3.3.6 Segregação de misturas granulares

A segregação de misturas granulares é uma propriedade importante, já que no processo de mistura e adensamento do concreto, a mistura granular é submetida a acelerações (devido à força gravitacional, choques externos, vibração quando presente), o que pode resultar na separação dos constituintes da mistura. Sabe-se, baseado no conhecimento da tecnologia do concreto, que uma segregação elevada pode acarretar problemas na qualidade final do concreto, como na aparência final, resistência, módulo de elasticidade e retração, o que pode prejudicar a durabilidade das estruturas. Alguns cuidados devem ser tomados para evitar futuras segregações.

Para qualquer mistura granular, uma compactação efetiva diminui a probabilidade de segregação, já que cada partícula tende a encontrar uma posição de equilíbrio, se mantendo estável até o final do processo. O mesmo ocorre quando a mistura tem um pacote granular

próximo ao máximo. Ao se eliminar as interações entre as partículas, elas se bloqueiam, evitando a separação de uma fração isolada. Também se devem evitar lacunas de classes entre os agregados. A distribuição deve ser a mais contínua possível. Outros fatores que aumentam a possibilidade de segregação são a dimensão máxima das partículas e a sua densidade. Quanto menor o $D_{\text{máx}}$ e menos denso for o agregado, menor será a possibilidade de separação da mistura.

3.3.7 Considerações finais

Segundo as teorias propostas por De Larrard (1999), deve-se ter alguns cuidados para se obter uma mistura com o máximo empacotamento possível, a qual resultaria em um menor consumo de pasta no concreto.

Primeiro, segundo a figura 28, deve-se utilizar agregados com os diâmetros mais espaçados possível. Quanto menor a relação d_2 / d_1 , maior será o empacotamento da mistura, já que se elimina ou se minimiza ao máximo os efeitos de perda e de parede. Nesta figura, a mistura binária demonstrada teve o $K = 9$ e o $\beta_1 = \beta_2 = 0,71$. Porém, ressalta-se que, segundo a tecnologia conhecida de concretos, não é aconselhável que se permita a ausência de uma faixa de agregados, por exemplo, a utilização de brita com diâmetro máximo de 25 mm, junto com uma de $D_{\text{máx}}$ 9,5 mm, com toda esta lacuna intermediária. Este exemplo, apesar de não ser aconselhável, é o que apresenta o maior pacote granular, segundo De Larrard (1999), porém será o que constitui o melhor e mais econômico concreto?

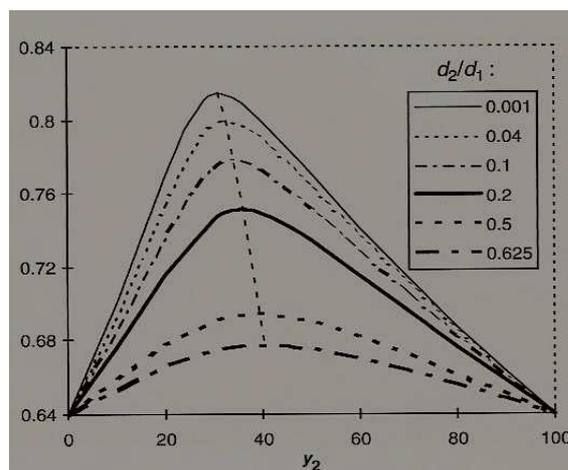


Figura 28: efeito da relação d_2/d_1 no pacote granular (Fonte: De Larrard, 1999)

O segundo item considera o empacotamento de cada classe utilizada na mistura. Obviamente, como ilustrado na figura 29, quanto maior for o empacotamento das classes utilizadas, no

caso a classe 1 variando de 0,61 a 0,71, maior será o pacote granular final da mistura. E para aumentar o empacotamento de um agregado deve-se privilegiar os de maior $D_{m\acute{a}x}$ e arredondados.

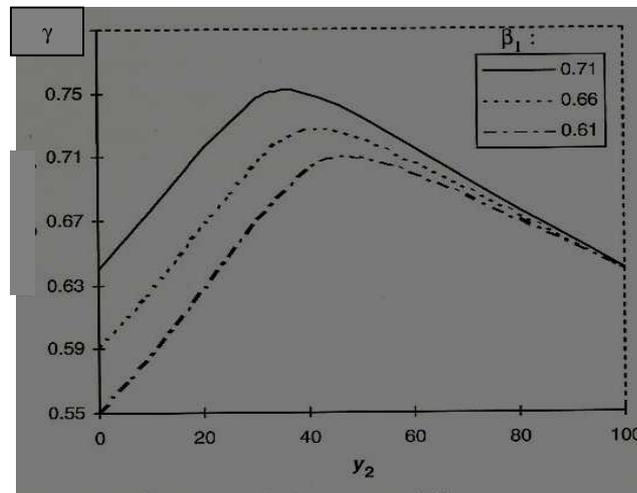


Figura 29: efeito do empacotamento de cada classe utilizada na mistura (Fonte: De Larrard, 1999)

E por último, mas não menos importante que a anterior, quanto maior for o índice de compactação maior será o pacote granular da mistura. Este efeito está retratado na figura 30. Também se observa que é pouco provável que esta variável sirva para o CAA, já que não é utilizada, para este tipo de concreto, compactação de natureza alguma. Apenas pode-se considerar que um CAA mais fluido que outro possa apresentar a característica de uma compacidade maior, já que as partículas se adensariam melhor.

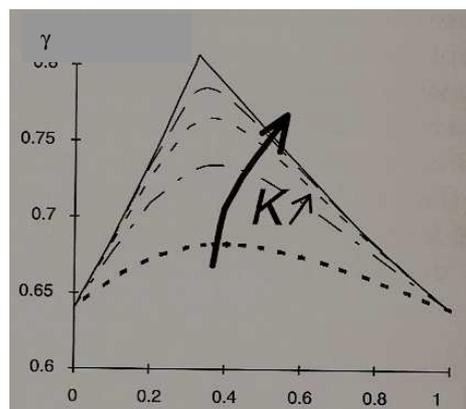


Figura 30: relação entre a compactação e o pacote granular da mistura (Fonte: De Larrard, 1999)

4 MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO

4.1 INTRODUÇÃO

Entende-se por estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland os procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também conhecida por traço do concreto (HELENE, 2005).

Neville (2000) define a dosagem do concreto como um processo de seleção de apropriados ingredientes e sua proporção com o objetivo de produzir um concreto tão econômico quanto possível, atendendo as propriedades requeridas de consistência, resistência e durabilidade.

O objetivo principal desta tese de doutorado é propor um método de dosagem para CAA. Este método utiliza conceitos do método de dosagem para CAA, proposto por Tutikian (2004), e dos métodos de dosagem para CCV, entre os quais o IPT/EPUSP, proposto por Helene e Terzian (1992) e o método de dosagem de concreto de elevado desempenho, proposto por O'Reilly (1992).

O procedimento, cujo esquema está mostrado na figura 31, é simples, experimental e permite a utilização de quaisquer materiais locais, desde que cumpram alguns requisitos básicos que serão detalhados na seqüência. Utiliza os conceitos de O'Reilly para determinar o empacotamento granular máximo, os conceitos de De Larrard para a escolha dos materiais, o diagrama de dosagem do IPT/EPUSP, para permitir os cálculos de qualquer CAA dentro da faixa avaliada da mesma família estudada, o acerto do teor de aditivo, relação água/cimento e o procedimento básico de Tutikian e acrescenta pontos novos, como a junção de todas estas teorias, o teor de argamassa variável, a inclusão da curva de custo no diagrama de dosagem e o diagrama de desempenho. Certamente estes pontos tornam este método inovador e faz com que contribua para o desenvolvimento cada vez maior do CAA.

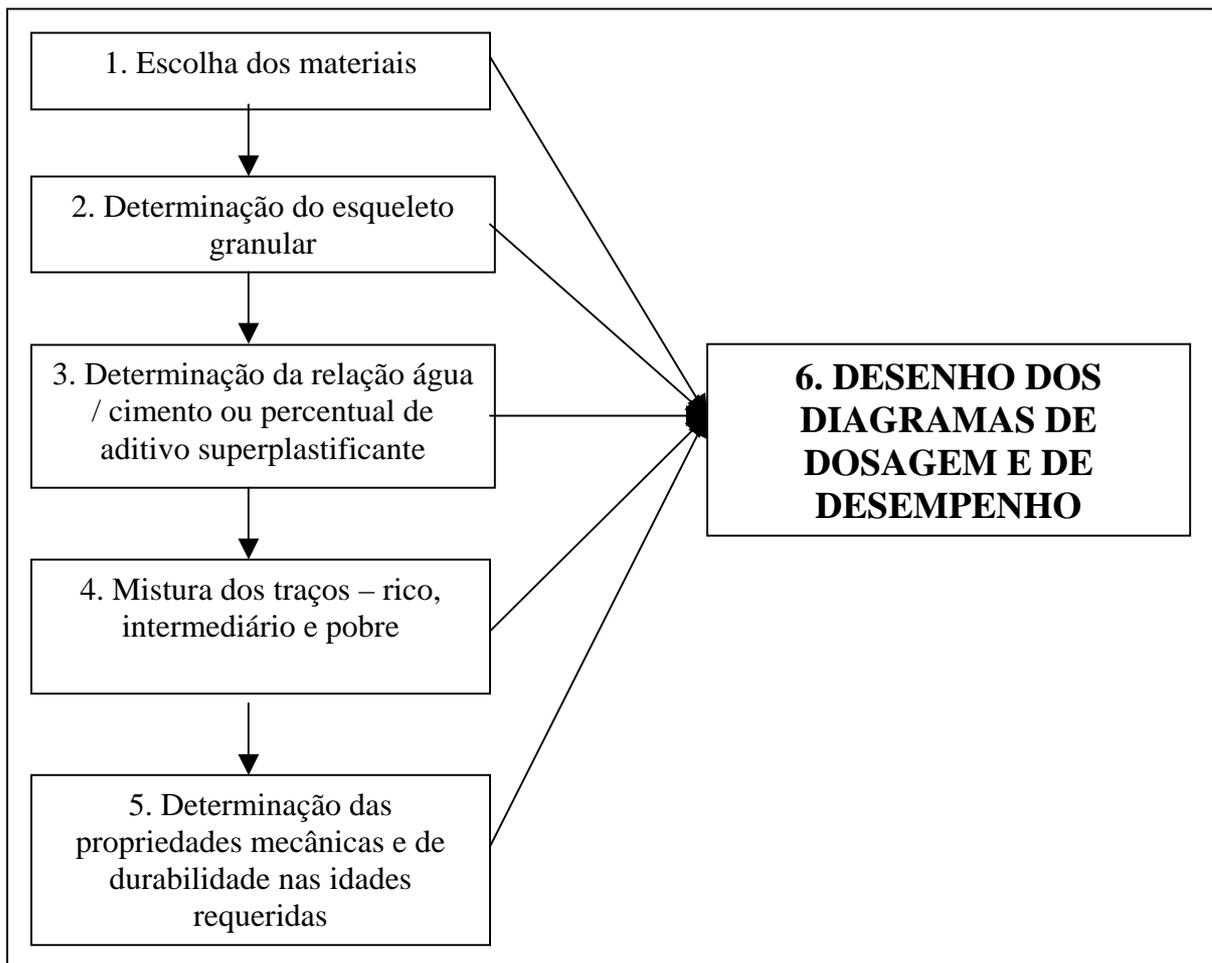


Figura 31: passo-a-passo para dosagem do CAA através do método proposto nesta tese

A seguir, será detalhado cada um dos passos que deverão ser seguidos, a fim de se obter uma família de CAA.

4.2 ESCOLHA DOS MATERIAIS

Este primeiro passo é bastante amplo e similar ao do método Tutikian (2004).

Como já foi comentado, este método pretende que a dosagem de CAA possa ser realizada com quaisquer materiais, desde que seja tecnicamente possível a obtenção de um CAA com os escolhidos. Os componentes são basicamente os mesmos utilizados para os CCV: cimento, agregados miúdo e graúdo e água, acrescidos de um material fino, de granulometria inferior à do agregado miúdo, e aditivo superplastificante. Ocasionalmente pode se acrescentar outras classes de agregado graúdo e o VMA.

Como já explicado, deve-se priorizar a escolha de agregados arredondados e com o $D_{máx}$ o menor possível, para maximizar o empacotamento e, conseqüentemente, diminuir a

possibilidade de segregação da mistura. Ainda há a dúvida entre seguir a recomendação de De Larrard (1999) ao preferir agregados com diâmetros espaçados, evitando ou minimizando ao máximo os efeitos parede e de perda, ou seguir a tradicional tecnologia dos concretos, ao especificar todas as faixas granulométricas, fazendo com que haja uma distribuição contínua dos componentes.

4.3 DETERMINAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR

O objetivo deste passo é determinar a proporção entre dois materiais que possua a menor quantidade de vazios. Para isto, deve-se empacotar todos os componentes do CAA, dois a dois, em ordem decrescente de diâmetro das partículas. Assim que está determinada a primeira composição, entre os dois materiais de maior diâmetro, se realiza o mesmo procedimento com esta mistura e o próximo componente, até chegar ao cimento, o qual é o único elemento que não é empacotado. Por exemplo, empacota-se a brita com a areia média. Esta mistura é empacotada com a areia fina, resultando em um esqueleto granular formado pela brita, areia regular e areia fina, com o mínimo de vazios. Caso se utilize materiais finos pozolânicos, como cinza volante ou escória alto-forno, estes devem ser empacotados após a areia regular, sendo considerados, até o final do processo, como agregados.

Para os ensaios de compacidade, deve ser utilizado um recipiente de diâmetro pelo menos cinco vezes maior que o diâmetro médio das partículas, para evitar o efeito *container* (De Larrard, 1999).

A tabela 8 ilustra um exemplo em que dois materiais são empacotados, A e B, sendo que A possui maior granulometria que B. Observa-se, neste exemplo, que se inicia a mistura com 100% de A e 0% de B, para o cálculo da massa unitária, e vai decrescendo de 10 em 10% a quantidade de A e aumentando, na mesma proporção, a quantidade de B. A taxa de alteração da mistura é variável, dependendo da aplicação do concreto pode ser de 5% (maior precisão) ou de 15 ou 20% (menor precisão).

Tabela 8: determinação da massa unitária compactada de dois materiais hipotéticos A e B

Material A (%)	Material B (%)	Massa mistura (kg)	Volume Recipiente (dm³)	Massa Unitária Compactada (kg/m³)
100	0	38,36	17,10	2243
90	10	39,45	17,10	2307
80	20	42,45	17,10	2482
70	30	43,12	17,10	2522
60	40	45,10	17,10	2637
50	50	44,70	17,10	2614
40	60	43,00	17,10	2515
30	70	41,89	17,10	2450
20	80	39,23	17,10	2294
10	90	38,11	17,10	2229
0	100	37,23	17,10	2177

Com isso, pode-se calcular o valor final dos vazios para uma dada mistura, para então acrescentar o cimento, seguindo o passo 4. Porém, antes de calcular o índice de vazios, é necessário que se determine a massa específica da mistura, através da equação 21. A tabela 9 continua o exemplo anterior, calculando a massa específica da mistura, supondo que a massa específica do material A seja 2880 kg/m³, enquanto que o do B é 2580 kg/m³.

Tabela 9: determinação da massa específica dos dois materiais hipotéticos A e B

Material A (%)	Material B (%)	Massa Específica A (kg/m³)	Massa Específica B (kg/m³)	Massa Específica Mistura (kg/m³)
100	0	2880	2580	2880
90	10	2880	2580	2850
80	20	2880	2580	2820
70	30	2880	2580	2790
60	40	2880	2580	2760
50	50	2880	2580	2730
40	60	2880	2580	2700
30	70	2880	2580	2670
20	80	2880	2580	2640
10	90	2880	2580	2610
0	100	2880	2580	2580

Após calcula-se o índice de vazios da mistura, em porcentual, através da equação 22, para determinar aquela mistura ideal com o menor índice de espaços entre o esqueleto granular. Na

tabela 10 foram realizados os cálculos dos vazios para cada uma das proporções do exemplo anterior.

Tabela 10: determinação do índice de vazios dos dois materiais hipotéticos A e B

Material A (%)	Material B (%)	Massa Específica (kg/m³)	Massa Unitária Compactada (kg/m³)	Índice de Vazios (%)
100	0	2880	2243	28,4
90	10	2850	2307	23,5
80	20	2820	2482	13,6
70	30	2790	2522	10,6
60	40	2760	2637	4,6
50	50	2730	2614	4,4
40	60	2700	2515	7,4
30	70	2670	2450	9,0
20	80	2640	2294	15,1
10	90	2610	2229	17,1
0	100	2580	2177	18,5

Para este exemplo, verificou-se que o teor ideal da mistura seria de 50% para o material A e 50% para o B, apresentando um percentual de 4,4% de vazios. Observa-se que a massa unitária desta mistura não foi a maior entre todas, ou seja, deve-se sempre calcular os índices de vazios para se ter certeza de qual proporção é a ideal, apenas o indicativo da massa unitária compactada não é suficiente para esta conclusão.

Com isso, o esqueleto granular da mistura já está determinado. Assim, há uma grande probabilidade de que o CAA não segregaria e nem ocorreria excesso de material fino. A não confirmação no traço experimental, é indicativo de que os materiais escolhidos não são adequados para a confecção de CAA, independente do misturador ou do método de dosagem utilizado. Então se deve substituir componentes ou apenas acrescentar outros, para suprir as lacunas. A segregação do concreto é um indicativo de que falta material fino para dar coesão à mistura, então seria necessário substituir algum componente por outro de menor granulometria ou adicionar um VMA. Se, por outro lado, a mistura estivesse muito coesa, impossibilitando, por motivos técnicos ou econômicos, a adição de maior quantidade de água ou aditivo superplastificante, é sinal de que há um excesso de materiais finos na composição do concreto, devendo estes ser substituídos por outros de granulometria maior.

Solucionado estes problemas, se existirem, e seguindo os passos posteriores, o acerto do CAA na central de concreto será rápido e simples, restando apenas determinar a quantidade de água, aditivo superplastificante e cimento. Experiência do responsável pela dosagem não é mais um requisito, apenas uma vantagem.

4.4 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO OU PERCENTUAL DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

A determinação da relação a/c ou percentual de aditivo superplastificante é realizada antes da mistura dos materiais, em função da escolha do traço intermediário. Ou se fixa o aditivo, com base do histórico de outros concretos similares (1:m similar) e contando com a experiência do responsável, ou se determina a relação a/c, com base nas tabelas da **NBR 6118/03**, de acordo com a classe de agressividade ambiental e o tipo de concreto, se é armado ou protendido. Porém, estas tabelas só fornecem relação a/c máxima, que servirá como aproximação para o a/c final. Também se pode arbitrar um a/c próximo, se há histórico de outros concretos com os mesmos materiais que se está utilizando.

A partir deste ponto, deve-se escolher o traço intermediário para se realizar a mistura de ajuste, a fim de se confirmar a relação a/c e, principalmente, determinar, experimentalmente, o teor de aditivo superplastificante. Sempre será referido o aditivo superplastificante, apesar de que se pode produzir CAA com aditivos menos eficientes, apesar de não ser usual.

Como o aditivo será colocado no concreto após a adição da água, é importante que se observem alguns pontos, para que este tenha o desempenho aproveitado ao máximo. Recomenda-se fixar um abatimento inicial para a mistura sem aditivo, parecido com o abatimento inicial de um CCV utilizado normalmente. Se não for possível alcançar o abatimento inicial sem o aditivo superplastificante, recomenda-se a adição de um aditivo plastificante, menos eficiente, porém mais econômico. Assim será utilizado o máximo desempenho do aditivo superplastificante, o que não ocorre quando este é colocado em misturas muito secas (*slump test* menor que 60 mm). Observa-se que os valores de *slump test* mais comuns para aplicações convencionais são entre 60 e 90 mm, mas, dependendo da aplicação, pode-se aumentar ou diminuir este valor.

O concreto intermediário não será utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova e, conseqüentemente, para o desenho das curvas de dosagem e desempenho. Mesmo assim,

deve-se realizar todos os ensaios de trabalhabilidade previamente determinados, a fim de se ter certeza que o teor de aditivo está realmente correto.

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

4.5 MISTURA DOS TRAÇOS RICO, INTERMEDIÁRIO E POBRE

Até este ponto, foram determinados o esqueleto granular e o teor de aditivo superplastificante, que serão mantidos, percentualmente, constantes para todos os traços. O próximo passo então será a mistura de, no mínimo, três pontos para a determinação das equações de comportamento e coeficientes de correlação, para a posterior confecção da curva de dosagem e, se desejado, da curva de desempenho. O ideal é a realização de quatro pontos para que as equações possuam um coeficiente de determinação maior, permitindo que as curvas fiquem melhor ajustadas.

É importante frisar que o teor de argamassa seca de todos os pontos não será constante. O que permitirá que todos os pontos sejam considerados da mesma família e possam ser plotados nos mesmos gráficos, será a constância do teor de aditivo superplastificante e as proporções entre todos os agregados, lembrando que materiais pozolânicos são considerados agregados. Para o exemplo anterior, a proporção de 50% do material A e 50% do material B se manterá constante para todos os traços.

Pode-se calcular todos os traços da família previamente, sem a necessidade de ajustes na central de concreto. Como o aditivo já está determinado, a única variável que sobrou foi a relação a/c, já que se possui apenas uma aproximação para o traço intermediário. De acordo com a aplicação do CAA, a água será dosada a fim de tornar a mistura mais ou menos fluida, porém a resistência à segregação e a habilidade de passar por obstáculos já estão garantidas com a compacidade dos agregados.

Durante a mistura dos traços, deve-se realizar os ensaios especiais para se medir a trabalhabilidade dos concretos, para a verificação de suas propriedades de auto-adensabilidade. Como sempre, é importante agilidade no processo, já que o aditivo possui um tempo de trabalho limitado e extremamente dependente das condições ambientais. Mas

devido à facilidade de acerto do CAA na central, a rapidez não será um problema, se tudo ocorrer dentro da normalidade.

Como não há a possibilidade de se adicionar materiais após a determinação do esqueleto granular, a medição das propriedades só é realizada para confirmação. O único ensaio realmente indispensável nesta etapa é algum que avalie a fluidez do CAA, já que a água ainda não é totalmente conhecida. As medidas ideais de fluidez devem ser especificadas em projeto. Quando não há especificação devem ser determinadas de acordo com a aplicação, já que uma mistura pode ser considerada um CAA com pouca fluidez ou não ser considerada, mesmo que o concreto esteja bastante fluido. O importante é que o CAA esteja fluido o suficiente para atender os requisitos.

Com a possibilidade da não realização da totalidade dos ensaios previamente requeridos pelo responsável pela dosagem, a mistura dos CAA se torna mais ágil, minimizando o problema da perda de eficiência do aditivo, principalmente em dias de elevada temperatura (aproximadamente maior de 30°C) e baixa umidade do ar (aproximadamente menor de 50%). Com isso, e com a ausência da etapa de adições de materiais finos, a experiência do profissional responsável pela dosagem passa a ser uma vantagem, e não mais requisito essencial para o sucesso do trabalho. Caso a manutenção da trabalhabilidade do CAA não seja suficiente para a aplicação final, necessitando-se de mais tempo de fluidez da mistura, providências devem ser tomadas, como substituir parte da água por gelo, esfriamento dos agregados, incorporação de aditivos estabilizadores ou outras que se julgar eficiente.

No final desta etapa, moldam-se os CP's a fim de se determinar as propriedades requeridas, como a resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade, velocidade da onda ultrassônica, absorção de água, penetração de íons cloretos ou outras de acordo com os requisitos de projeto. A moldagem dos CP's deve ser realizada através do CAA fluindo pela força da gravidade, sem a ajuda de vibração mecânica ou qualquer outro tipo de compactação. O acabamento superior se realiza igual ao do CCV, por exemplo, com colher de pedreiro, bem como a cura, onde o concreto deve ser coberto com lona plástica comum no primeiro dia e colocado em câmara úmida nos demais, até a execução dos ensaios requeridos.

4.6 ENSAIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE NAS IDADES DETERMINADAS

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

Métodos de dosagem conhecidos para CAA normalmente limitam a quantidade de agregado graúdo, prejudicando seriamente o módulo de elasticidade destes concretos. Apesar do método que está sendo proposto nesta tese não afetar esta propriedade, por não limitar a quantidade de agregado graúdo, é recomendável a realização do ensaio de módulo de elasticidade, para esta comprovação.

4.7 DESENHO DOS DIAGRAMAS DE DOSAGEM E DESEMPENHO

Este é o objetivo final do método, e, conseqüentemente, o último passo. Porém, antes de se desenhar os diagramas de dosagem e desempenho, é necessário o cálculo das equações de comportamento de cada uma das propriedades estudadas. Também devem ser determinados os coeficientes de determinação, que expressam quão ajustadas estão as curvas e retas. A seguir, estão relacionadas as equações de comportamento, de número 23 até o 32, utilizadas para determinar todas as variáveis. Muitas destas equações são similares às do método proposto por Tutikian (2004) para CAA com finos não pozolânicos, como se pode observar.

$$fcj = \frac{k_1}{(k_2^{a/c})} \quad (\text{eq. 23})$$

$$m = k_3 + k_4 * a / c \quad (\text{eq. 24})$$

$$C = \frac{1000}{(k_5 + k_6 * a / c)} \quad (\text{eq. 25})$$

$$\alpha = \frac{(1 + f + a)}{(1 + m)} \quad (\text{eq. 26})$$

$$\alpha = k_7 * C + k_8 \quad (\text{eq. 27})$$

$$m = a + p + f \quad (\text{eq. 28})$$

$$C = \frac{\gamma}{(1 + f + a + p + a / c)} \quad (\text{eq. 29})$$

$$C = \frac{(1000 - ar)}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{f}{\gamma_f} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/c \right)} \quad (\text{eq. 30})$$

$$A = C * a / c \quad (\text{eq. 31})$$

$$Cu = C * \$c + C * f * \$f + C * a * \$a + C * p * \$p + C * SP\% * \$sp + C * a / c * \$ag \quad (\text{eq. 32})$$

Onde:

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

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

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

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

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

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

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

α = teor de argamassa seca, em kg/kg;

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

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

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

γ = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m^3 ;

γ_c = massa específica do cimento, em kg/dm^3 ;

γ_f = massa específica dos finos não pozolânicos, em kg/dm^3 ;

γ_a = massa específica do agregado miúdo, em kg/dm^3 ;

γ_p = massa específica do agregado graúdo, em kg/dm^3 ;

ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em dm^3/m^3 ;

A = consumo de água potável por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m^3 ;

Cu = custo do concreto por metro cúbico;

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

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

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

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

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

$\$ag$ = custo do kg de água potável.

O diagrama de dosagem é conhecido, já que é usualmente utilizado nos métodos de dosagem de Helene e Terzian (1992) para CCV, e de Tutikian (2004), para CAA, logo a forma das equações de comportamento são parecidas às já utilizadas, apesar de haver algumas novas proposições no novo método. O diagrama de dosagem consiste em relacionar a resistência à compressão nas várias idades ensaiadas, com a relação a/c , no primeiro quadrante; a relação a/c com a proporção 1:m, no segundo quadrante; e no terceiro, a proporção 1:m com o custo e com o consumo de cimento por metro cúbico de concreto. Porém nos métodos citados, o teor de argamassa seca era constante para toda a família, o que não ocorre mais. Assim foi acrescentado um quarto quadrante no diagrama de dosagem, relacionando o teor de argamassa seca (que divide o eixo 'y' positivo com a resistência à compressão) com o consumo de cimento.

A figura 32 ilustra um exemplo do diagrama de dosagem modificado. Observa-se a introdução da curva de custo (que divide o eixo 'x' negativo com o consumo de cimento), que não é obrigatória, porém permite a rápida determinação, graficamente, do custo de qualquer ponto dentro de uma família de concretos. Por fim, salienta-se que o diagrama de dosagem deve ser usado no sentido horário a partir da resistência à compressão até o teor de argamassa, ou no sentido anti-horário do consumo de cimento até a resistência à compressão nas diversas idades. E a curva de custo não pode, em hipótese nenhuma, ser utilizada como passagem à outra propriedade, servindo, apenas, para sua própria determinação. Na figura também se nota as proporções entre os agregados, item que é constante para todos os pontos da família. A partir desta relação, pode-se calcular a quantidade unitária dos agregados e, seguindo o procedimento do método, determinar todos os outros componentes dos traços.

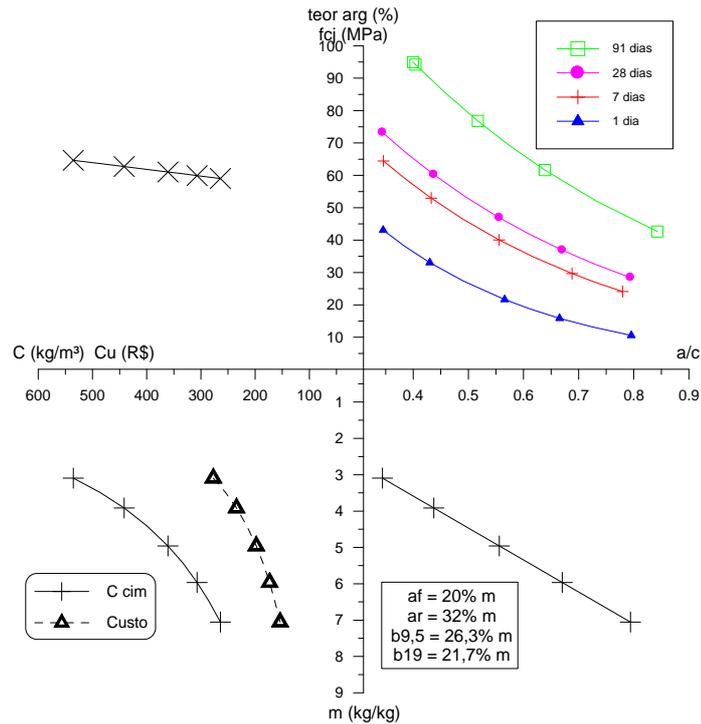


Figura 32: exemplo de diagrama de dosagem com o α variando

O objetivo do diagrama de desempenho é similar ao de dosagem: com dois ou três resultados de um determinado ensaio, preferencialmente os de durabilidade, ter possibilidade da determinação das equações de comportamento e a possibilidade de cálculo desta propriedade para quaisquer valores de resistência à compressão, por exemplo. O diagrama de desempenho consiste em relacionar a resistência à compressão com propriedades de durabilidade ou até mecânicas dos concretos. Pode ser absorção total de água ou por capilaridade, penetração de íons cloretos, carbonatação, módulo de elasticidade, velocidade da onda ultra-sônica, resistência à tração e outros. Apenas deve-se escolher ensaios que não estejam representados no diagrama de dosagem. Normalmente, estes ensaios são relacionados com a resistência à compressão, que é a propriedade do concreto mais utilizada, porém certamente ocorrerão quadrantes no diagrama de dosagem em que os ensaios se correlacionam apenas entre si, sendo necessário determinar as equações de comportamento para cada caso. Observa-se que o desenho deste diagrama não é obrigatório para a dosagem dos concretos, sendo utilizado apenas quando for requisitado. A figura 33 ilustra um exemplo de diagrama de desempenho relacionando resistência à compressão, com módulo de elasticidade, com velocidade de onda ultra-sônica e penetração de íons cloretos.

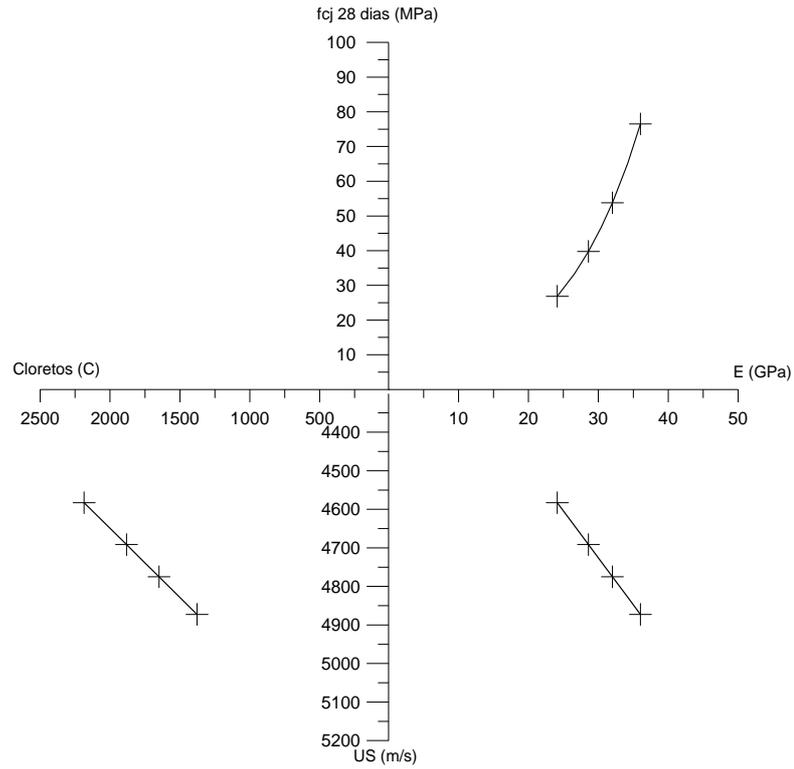


Figura 33: exemplo de diagrama de desempenho

5 TRABALHO EXPERIMENTAL

5.1 EXPOSIÇÃO DA METODOLOGIA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental objetiva exemplificar e comprovar a eficiência do método proposto para os materiais escolhidos. Aproveitar-se-á para também realizar comparativos entre CCV e CAA e entre os CAA dosados através do método proposto por Tutikian (2004) e o proposto nesta tese. Por fim, almeja-se contribuir para a questão imposta por De Larrard (1999) ao confrontar a tecnologia de concretos, ao afirmar que se deve utilizar agregados de $D_{máx}$ mais distantes possíveis, mesmo que surjam lacunas de granulometria, não havendo continuidade. É importante ressaltar que este trabalho experimental não pretende, e nem poderia, validar por completo o método proposto, e sim mostrar que este pode ser eficaz, se comprovado por outros autores no futuro.

Para alcançar os objetivos, foi realizada, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a parte laboratorial da tese. Foram moldadas uma família de CCV referência e seis famílias de CAA, três com fino pozolânico (cinza volante) e três com fino não pozolânico (areia fina), conforme descrito na tabela 11. Estas três famílias foram dosadas por três maneiras diferentes, a primeira através do método de dosagem proposto por Tutikian (2004); e as outras foram dosadas pelo método de dosagem proposto nesta tese, porém a segunda utilizou um agregado graúdo de $D_{máx}$ 19 mm, com a ausência de agregados intermediários até a areia média; e na terceira foram empregadas duas granulometrias de agregado graúdo empacotados, permitindo uma continuidade granulométrica de todos os componentes dos concretos. O CCV foi dosado através do método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992).

Ainda na tabela 11 estão as siglas utilizadas em todo o trabalho experimental para referenciar cada família de concreto. O CCV é o concreto convencional, enquanto que os dois CAA dosados pelo método Tutikian (2004) estão referenciados como TKAF e TKCV, o primeiro com areia fina e o segundo com cinza volante. Nos CAA dosados através do método proposto foram incluídos a sigla do fino utilizado, AF para a areia fina e CV para a cinza volante, e 1B ou 2B, se for com uma ou duas granulometrias de brita.

Tabela 11: programa experimental realizado

Tipo de concreto	CCV	CAA	CAA	CAA	CAA	CAA	CAA
Sigla	CCV	TKAF	TKCV	AF1B	CV1B	AF2B	CV2B
Tipo de fino	-	Areia fina	Cinza volante	Areia fina	Cinza volante	Areia fina	Cinza volante
Método de dosagem	IPT/EPUSP	Tutikian (2004)	Tutikian (2004)	Proposto nesta tese	Proposto nesta tese	Proposto nesta tese	Proposto nesta tese
Varição	-	-	-	1 classe de agregado graúdo	1 classe de agregado graúdo	2 classes de agregado graúdo	2 classes de agregado graúdo

Conforme a tabela 12, foram moldados 2 corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20 centímetros) para realizar os ensaios de resistência à compressão aos 1, 7, 28 e 91 dias, bem como 3 CP's para o módulo de elasticidade e para medir a velocidade de propagação da onda ultra sônica, mais 2 CP's para ensaiar os concretos com a penetração de íons cloretos, totalizando 13 CP's por traço. Como foram moldados 35 traços para todos os concretos, totaliza-se 455 CP's para analisar todas as propriedades requeridas.

Tabela 12: corpos-de-prova ensaiados

Ensaio Realizados	Norma de ensaio	Idades ensaiadas	Número de CP's / por idade / por tipo de concreto
Resistência à compressão	NBR 5739/94	1, 7, 28 e 91 dias	2
Módulo de elasticidade	ASTM 469/94	28 dias	3
Propagação de ondas de ultra-som	-	28 dias	3 (mesmo dos de módulo)
Penetração de íons cloretos	ASTM 1202/97	56 dias	2

Para todas as famílias foram determinadas as equações das linhas de tendência, junto com o coeficiente de determinação. Com isso, pode-se desenhar os diagramas de dosagem, representando as resistências à compressão, relação água/cimento, proporção da massa dos agregados secos em relação à massa do cimento, custo, consumo de cimento por metro cúbico de concreto e teor de argamassa seca; e os diagramas de desempenho, representando a resistência à compressão aos 28 dias, o módulo de elasticidade, a velocidade da onda ultrassônica e a penetração dos íons cloretos. Após, através das equações de comportamento, se calculou, para diversos valores de resistência à compressão, todos os parâmetros já mencionados, para, então, comparar todas as famílias de concreto.

5.2 MATERIAIS CONSTITUINTES

Todos os métodos de dosagem utilizados no trabalho permitem o proporcionamento do concreto com quaisquer materiais disponíveis, desde que cumpram alguns requisitos básicos. Para a execução do trabalho experimental, foram selecionados materiais abundantes na região de Porto Alegre – RS, econômicos e já utilizados pela indústria da construção civil para outros fins. Logo, os concretos realizados nesta tese poderão ser novamente reproduzidos e testados.

O cimento utilizado foi o CPV ARI – RS (cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos). Este cimento foi escolhido por ser adquirido na região e por ser o mais usado em indústrias de pré-fabricados, um dos locais em que o CAA pode ser empregado com mais benefícios. A tabela 13 ilustra a análise granulométrica do cimento, enquanto que a fluorescência por raio X pode ser observada na tabela 14, ensaios estes, realizados no LACER (laboratório de cerâmica) da UFRGS.

Como materiais finos foram escolhidos um não pozolânico, a areia fina, e um pozolânico, a cinza volante. Ambos são disponíveis comercialmente e econômicos. A areia fina é um agregado já utilizado por algumas empresas locais, principalmente concreteiras, para a composição do CCV e pode ser estocada ao ar livre em baias relativamente simples de se construir, não necessitando vultosos recursos na aquisição de um silo, por exemplo. A cinza volante é um subproduto da indústria de carvão e já é largamente utilizada pela indústria do cimento, podendo, inclusive, substituir parcialmente o clínquer. A cinza volante é um material pozolânico, logo reage quimicamente com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), componente da hidratação do cimento. O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é um cristal frágil, lixiviável e que não contribui na

resistência à compressão do concreto. Logo, se pode considerar como um benefício o fato de este composto ser consumido pela cinza volante, apesar de provocar uma ligeira queda do pH da mistura, o que pode contribuir para aumentar a velocidade de carbonatação do concreto, podendo favorecer a despassivação das armaduras. Complementando as tabelas 13 e 14, constam, respectivamente, a fluorescência por raio X e a análise granulométrica da cinza volante. Observa-se que a cinza volante possui uma granulometria maior do que a do cimento, porém consideravelmente menor do que a do agregado miúdo, o qual será substituído, no caso a areia média. Também se pode constatar na tabela 14 que este material é extremamente reativo, já que a soma dos elementos SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 foi superior a 92%.

Tabela 13: análise granulométrica do cimento e cinza volante utilizados

DIAMETRO (%)	CIMENTO (m μ)	CINZA VOLANTE (m μ)
Até 10%	1,16	5,22
Até 50%	9,15	39,91
Até 90%	25,41	128,15
Médio	11,61	56,54

Tabela 14: fluorescência por raio X do cimento e cinza volante utilizados

ELEMENTO	CIMENTO (%)	CINZA VOLANTE (%)
CaO	65,71	3,02
SiO ₂	17,15	65,92
Fe ₂ O ₃	4,93	7,54
Al ₂ O ₃	4,54	18,71
SO ₃	3,88	0,25
MgO	1,44	0,29
K ₂ O	1,33	2,88
TiO ₂	0,58	1,35
SrO	0,27	-
P ₂ O ₅	0,12	0,05
MnO	0,05	-

O agregado graúdo escolhido foi a brita de basalto, também disponível comercialmente na região e comprovadamente eficiente na sua função. Já a areia de rio foi utilizada como agregado miúdo e a água foi captada diretamente na rede pública de abastecimento.

A tabela 15 ilustra as massas específicas e unitárias dos materiais utilizados, enquanto que a tabela 16 mostra a granulometria dos agregados. As massas específicas do cimento e da cinza volante foram determinadas de acordo com a **NBR NM 23/01**, as massa específicas dos

agregados miúdos (areia regular e areia fina) foram realizadas através da **NBR NM 52/03**, enquanto que a **NBR NM 53/03** normalizou o ensaio de massa específica dos agregados graúdos. Já as massas unitárias foram feitas através da **NBR 7251/82**, e as análises granulométricas foram obtidas seguindo o procedimento da **NBR NM 248/03**. Para a realização de todos os ensaios, os agregados foram coletados de acordo com a **NBR NM 26/01**.

Tabela 15: massas específicas e unitárias dos materiais utilizados

	Cimento	Cinza volante	Areia fina	Areia regular	Agregado graúdo 9,5 mm	Agregado graúdo 19 mm
Massa Específica (kg/dm ³)	2,92	1,92	2,65	2,64	2,82	2,82
Massa Unitária (kg/dm ³)	-	-	1,57	1,53	1,50	1,42

Tabela 16: análise granulométrica dos agregados utilizados

Aberturas das peneiras (mm)	Areia fina	Areia regular	Agregado graúdo 9,5 mm	Agregado graúdo 19 mm
	Quantidade Retida Acumulada (%)			
# 19	0	0	0	1
# 12,5	0	0	0	44
# 9,5	0	0	1	81
# 6,3	0	0	53	96
# 4,75	0	3	87	99
# 2,36	0	12	99	100
# 1,18	0	29	100	100
# 600 µm	0	54	100	100
# 300 µm	16	87	100	100
# 150 µm	93	98	100	100
Módulo de Finura	1,09	2,83	5,87	6,81
Dimensão Máxima	0,6 mm	4,75 mm	9,5 mm	19 mm

Por fim, foi usado um aditivo superplastificante de terceira geração à base de policarboxilatos, com um teor de sólidos de 40%. Este aditivo deve reduzir a água de amassamento em 20%.

Porém para o CAA o aditivo é utilizado para aumentar a trabalhabilidade do concreto, mantendo a mesma relação a/c.

5.3 CÁLCULO DOS TRAÇOS

5.3.1 Concreto Convencional - CCV

O cálculo dos traços da família de concretos convencionais foi realizado de acordo com o proposto no método de dosagem de Helene e Terzian (1992). Este determina que, posteriormente à escolha dos materiais, se encontre o teor ideal de argamassa, experimentalmente. Após realiza-se as misturas com, no mínimo, três traços, sendo um rico, um intermediário e um pobre, para, ao final, desenhar o diagrama de dosagem.

O teor de argamassa de 53% foi considerado o teor ideal, valor dependente dos materiais utilizados, porém compatível com o que normalmente se adota localmente. A partir da definição do teor de argamassa se pode calcular todos os traços para se obter a família de concretos. Para abranger toda a faixa de resistência desejada, sem permitir uma grande lacuna entre os pontos, foram misturados 5 traços, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6 e 1:7. A água foi adicionada experimentalmente até se obter o abatimento do tronco de cone desejado, no caso de 100 +/- 20 mm, determinados através do ensaio da **NBR NM 67**. Após foram calculadas as relações a/c das misturas, as quais foram utilizadas posteriormente como base para os CAA. Então foram realizados os ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e penetração dos íons cloretos nas idades recomendadas, para então se determinar as equações de comportamento e coeficientes de correlação para desenhar os diagramas de dosagem e desempenho.

Na tabela 17 estão os traços unitários que foram calculados a partir do teor de argamassa determinado em 53%, a quantidade de água necessária para os concretos atingirem o abatimento do tronco de cone de 100 +/- 20 mm, e os cálculos posteriores, realizados baseados na massa específica no estado fresco. Observa-se que o teor de umidade (H) não foi constante, porém a variabilidade está dentro da que ocorre normalmente. A relação a/c foi calculada e utilizada posteriormente como valor de aproximação para os CAA. Nestes concretos não foram utilizados aditivos químicos.

Tabela 17: traços unitários e cálculos de consumo de materiais para o CCV

Família	Massa específica (kg/m ³)	Traço			Cimento (kg/m ³)	Areia regular (kg/m ³)	Brita 19 mm (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	a/c	H (%)
		c	ar	b19						
3	2420	1	1,12	1,88	553	620	1040	207	0,37	9,35
4	2408	1	1,65	2,35	443	731	1042	192	0,43	8,64
5	2367	1	2,18	2,82	364	794	1027	183	0,50	8,37
6	2343	1	2,71	3,29	309	836	1015	183	0,59	8,49
7	2312	1	3,24	3,76	265	859	997	191	0,72	9,01

Legenda: c – cimento; ar – areia regular; b19 – brita 19 mm; H – teor de umidade.

5.3.2 Concreto Auto-adensável - CAA

5.3.2.1 Proporcionamento pelo método de dosagem proposto por Tutikian (2004) – TKAF e TKCV

Foram dosados CAA através do método proposto por Tutikian (2004) para comparações com o CCV e os CAA dosados com o método proposto nesta tese. Com o mesmo intuito do CCV foram realizados diversos pontos por família para abranger toda a faixa de resistências sem espaçamento muito elevado, sendo cinco pontos para o TKAF (1:3, 1:4, 1:5, 1:6 e 1:7) e seis (1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7 e 1:8) para o TKCV.

Também foi utilizado um elevado número de pontos para abranger toda a faixa de resistência à compressão requerida, uma vez que estas famílias foram misturadas em duas etapas, a primeira com menos pontos e a segunda apenas com os pontos necessários para alcançar os valores determinados. Por isto que as famílias de concretos que foram rodadas posteriormente apresentam menor quantidade e traços mais espaçados, já que se sabia, com base nos concretos anteriores, que pontos que seriam necessários.

Para ser uma comparação confiável, foi realizado o acerto do teor de substituição do material fino (areia fina ou cinza volante) pela areia regular, em massa. Apesar de o método proposto por Tutikian (2004) defender a substituição de materiais pozolânicos, no caso a cinza volante, pelo cimento, neste trabalho isto não foi respeitado, pois o método de dosagem que está sendo proposto não faz esta diferenciação. Este acerto é realizado na betoneira, depende da habilidade do profissional que está realizando a dosagem e demanda um tempo considerável, já que devem ser executados no mínimo três ensaios de trabalhabilidade cada vez que se acrescenta material. Para o CAA com areia fina foi encontrado um valor de 40% de substituição de areia regular, enquanto que para o CAA com cinza volante foi de 20%, devido

à granulometria da cinza volante ser menor que a da areia fina. Esta etapa foi realizada com o traço 1:5 e nas tabelas 18 e 19 observam-se os teores de substituição para os CAA com areia fina e cinza volante, respectivamente.

Tabela 18: teores de substituição da areia regular pela areia fina (traço 1:5)

Teor de substituição (%)	Traço			
	c	af	ar	b19
20	1	0,44	1,74	2,82
30	1	0,65	1,53	2,82
40	1	0,87	1,31	2,82
50	1	1,09	1,09	2,82

Legenda: c – cimento; af – areia fina; ar – areia regular; b19 – brita 19 mm.

Tabela 19: teores de substituição da areia regular pela cinza volante (traço 1:5)

Teor de substituição (%)	Traço			
	c	cv	am	b19
10	1	0,22	1,96	2,82
15	1	0,33	1,85	2,82
20	1	0,44	1,74	2,82
25	1	0,55	1,64	2,82

Legenda: c – cimento; cv – cinza volante; am – areia média; b19 – brita 19 mm.

As tabelas 20 e 21 mostram os traços unitários e os cálculos posteriores para o CAA com areia fina. Observa-se que foi mantido o teor de argamassa mínimo do CCV de 53% e foram utilizados os valores de massas específicas determinadas no concreto no estado fresco para cada traço, as quais foram similares às dos CCV. O aditivo superplastificante foi ajustado experimentalmente em 0,47% da massa do cimento. As relações a/c foram similares às do CCV para os mesmos traços 1:m, enquanto que o teor de umidade novamente variou dentro da normalidade.

Tabela 20: traços unitários do CAA com areia fina dosados pelo método Tutikian (2004) - TKAF

Família	Traço				a/c	H (%)	Adt (%)
	c	af	ar	b19			
3	1	0,45	0,67	1,88	0,36	8,93	0,47
4	1	0,66	0,99	2,35	0,41	8,14	0,47
5	1	0,87	1,31	2,82	0,48	8,08	0,47
6	1	1,08	1,63	3,29	0,62	8,86	0,47
7	1	1,30	1,94	3,76	0,68	8,46	0,47

Legenda: c – cimento; af – areia fina; ar – areia regular; b19 – brita 19 mm; H – teor de umidade; adt - aditivo.

Tabela 21: consumos de materiais calculados para o CAA com areia fina dosados pelo método Tutikian (2004) - TKAF

Família	Massa específica (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Areia fina (kg/m ³)	Areia regular (kg/m ³)	Brita 19 mm (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
3	2446	561	253	376	1055	200	2,64
4	2430	449	297	445	1056	183	2,11
5	2405	371	323	486	1046	180	1,74
6	2362	310	335	505	1020	192	1,46
7	2347	270	352	525	1017	183	1,27

Na tabela 22 estão as propriedades dos concretos no estado fresco. Para caracterizar os CAA no estado fresco foram escolhidos o *slump flow test*, o *V-Funnel test* e o *L-Box test*. Observa-se que todos os valores estão dentro dos parâmetros estabelecidos por Tutikian (2004), EFNARC (2002), FURNAS (2004a), FURNAS (2004b) e FURNAS (2004c).

Tabela 22: propriedades dos TKAF no estado fresco

Família	<i>slump flow test</i> (mm)	<i>V-Funnel test</i> (s)	<i>L-Box test</i> (I ₂ /I ₁)
3	680	9	1,00
4	700	9	1,00
5	690	8	0,95
6	680	10	0,90
7	660	9	0,90

Para o CAA com cinza volante como material fino, o procedimento foi parecido com o do CAA com areia fina. Porém, observou-se que a cinza volante tornou o concreto com as propriedades no estado fresco melhores, provavelmente devido à forma dos grãos deste material, que são arredondadas.

Como os CAA com cinza volante atingiram maiores resistências à compressão que o CCV e que o CAA com areia fina para os mesmos traços 1:m, teve de ser misturado um ponto mais pobre nesta família, o 1:8, além dos já previstos 1:3, 1:4, 1:5, 1:6 e 1:7. O percentual de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento foi de 0,47%, novamente. As relações a/c também foram parecidas com as dos concretos anteriores, assim como a variação do teor de umidade, para os mesmos traços 1:m. Porém os valores de massas específicas, utilizadas para o cálculo dos consumos de cada um dos componentes da mistura, foram inferiores aos das duas famílias anteriores, em decorrência da cinza volante ser um material mais leve que o substituído. As tabelas 23 e 24 mostram os traços unitários e o consumo dos materiais em kg/m³ para o TKCV.

Tabela 23: traços unitários do CAA com cinza volante dosado pelo método Tutikian (2004) - TKCV

Família	Traço				a/c	H (%)	Adt (%)
	c	cv	ar	b19			
3	1	0,22	0,90	1,88	0,35	8,68	0,47
4	1	0,33	1,32	2,35	0,41	8,16	0,47
5	1	0,44	1,74	2,82	0,50	8,42	0,47
6	1	0,54	2,17	3,29	0,61	8,66	0,47
7	1	0,65	2,59	3,76	0,67	8,41	0,47
8	1	0,75	3,02	4,23	0,77	8,57	0,47

Legenda: c – cimento; cv – cinza volante; ar – areia regular; b19 – brita 19 mm; H – teor de umidade; adt - aditivo.

Tabela 24: consumos de materiais calculados para o CAA com cinza volante dosado pelo método Tutikian (2004) - TKCV

Família	Massa específica (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Cinza volante (kg/m ³)	Areia regular (kg/m ³)	Brita 19 mm (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
3	2387	549	121	494	1032	191	2,58
4	2369	438	145	578	1029	179	2,06
5	2363	363	160	632	1024	183	1,71
6	2349	309	167	670	1016	187	1,45
7	2346	270	176	701	1017	182	1,27
8	2302	236	177	711	997	182	1,11

Na tabela 25 estão as propriedades dos CAA com cinza volante dosados pelo método Tutikian (2004) no estado fresco. Para caracterizar os CAA foram escolhidos o *slump flow test*, o *V-Funnel test* e o *L-Box test*. Observa-se que todos os valores estão dentro dos parâmetros estabelecidos por Tutikian (2004), EFNARC (2002), FURNAS (2004a), FURNAS (2004b) e FURNAS (2004c).

Tabela 25: propriedades dos TKCV no estado fresco

Família	<i>slump flow test</i> (mm)	<i>V-Funnel test</i> (s)	<i>L-Box test</i> (I_2/I_1)
3	720	8	0,90
4	680	10	1,00
5	680	11	0,90
6	690	9	0,85
7	700	9	0,90
8	680	10	1,00

5.3.2.2 Proporcionamento pelo método de dosagem proposto com uma granulometria de brita – AF1B e CV1B

Foram dosadas duas famílias de CAA através do método de dosagem proposto nesta tese, sendo uma com areia fina e outra com cinza volante, com uma granulometria de agregado graúdo. Foi utilizado o procedimento descrito na explicação do método no capítulo 4, com o ensaio de compactação dos componentes, à exceção do cimento, para determinar a proporção exata entre os agregados e a posterior mistura de todos os pontos das famílias. Estas primeiras duas famílias de CAA foram constituídas de argamassa e uma granulometria de agregado graúdo, a brita de $D_{máx}$ de 19 mm, evitando, assim, os efeitos de perda e de parede (De Larrard, 1999).

O primeiro pacote do ensaio de compactação foi entre a brita 19 mm e a areia regular, por serem os materiais de maior granulometria. Iniciou-se a determinação dos vazios com 100% de brita 19 mm e 0% de areia regular e prosseguiu-se diminuindo 10% do primeiro, em massa, e adicionando-se o mesmo percentual de areia regular, até quando estava perto de se obter o empacotamento máximo, para, então, a substituição passar para 5%, para se obter um valor mais preciso. No final observou-se a mistura de brita 19 mm e areia regular ideal em 55-45%, conforme mostra a tabela 26. Nesta mesma tabela estão os valores da massa unitária da mistura (M_{unit} mistura), determinada em laboratório, conforme o procedimento de dosagem, a massa específica da mistura (M_{esp} mistura), calculada através da equação 21 e os vazios (%), calculados através da equação 22. Para este primeiro empacotamento serão detalhados os cálculos, para melhor entendimento do que foi realizado. O cálculo da M_{unit} da mistura consiste, unicamente, na divisão da massa compactada, conforme já detalhado, pelo volume do recipiente utilizado. Os cálculos da massa específica e dos vazios estão explicitados abaixo, nas equações de 33 a 51.

$$M_{esp} = \frac{(M_{espB} * \%B2) + (M_{espAR} * \%AR)}{100} = \frac{(2820 * 100) + (2640 * 0)}{100} = 2820 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{eq.33})$$

$$M_{esp} = \frac{(2820 * 90) + (2640 * 10)}{100} = 2802 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{eq. 34})$$

$$M_{esp} = \frac{(2820 * 80) + (2640 * 20)}{100} = 2784 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{eq. 35})$$

$$M_{esp} = \frac{(2820 * 70) + (2640 * 30)}{100} = 2766 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{eq. 36})$$

$$M_{esp} = \frac{(2820 * 60) + (2640 * 40)}{100} = 2748 \text{kg} / \text{m}^3 \quad (\text{eq. 37})$$

$$M_{esp} = \frac{(2820 * 55) + (2640 * 45)}{100} = 2739 \text{kg} / \text{m}^3 \quad (\text{eq. 38})$$

$$M_{esp} = \frac{(2820 * 40) + (2640 * 60)}{100} = 2712 \text{kg} / \text{m}^3 \quad (\text{eq. 39})$$

$$M_{esp} = \frac{(2820 * 30) + (2640 * 70)}{100} = 2694 \text{kg} / \text{m}^3 \quad (\text{eq. 40})$$

$$M_{esp} = \frac{(2820 * 0) + (2640 * 100)}{100} = 2640 \text{kg} / \text{m}^3 \quad (\text{eq. 41})$$

$$V_{azios}(\%) = \frac{M_{esp} - M_{unit}}{M_{esp}} = \frac{2820 - 2190}{2820} = 0,223 = 22,3\% \quad (\text{eq. 42})$$

$$V_{azios}(\%) = \frac{2802 - 2301}{2802} = 0,179 = 17,9\% \quad (\text{eq. 43})$$

$$V_{azios}(\%) = \frac{2784 - 2412}{2784} = 0,134 = 13,4\% \quad (\text{eq. 44})$$

$$V_{azios}(\%) = \frac{2766 - 2479}{2766} = 0,104 = 10,4\% \quad (\text{eq. 45})$$

$$V_{azios}(\%) = \frac{2748 - 2546}{2748} = 0,074 = 7,4\% \quad (\text{eq. 46})$$

$$V_{azios}(\%) = \frac{2739 - 2551}{2739} = 0,069 = 6,9\% \quad (\text{eq. 47})$$

$$V_{azios}(\%) = \frac{2730 - 2538}{2730} = 0,070 = 7,0\% \quad (\text{eq. 48})$$

$$V_{azios}(\%) = \frac{2712 - 2481}{2712} = 0,085 = 8,5\% \quad (\text{eq. 49})$$

$$V_{azios}(\%) = \frac{2694 - 2424}{2694} = 0,100 = 10,0\% \quad (\text{eq. 50})$$

$$V_{azios}(\%) = \frac{2640 - 2252}{2640} = 0,147 = 14,7\% \quad (\text{eq. 51})$$

Tabela 26: ensaio de compactação entre a brita 19 mm e a areia regular

% de Brita 19 mm	% de Areia Regular	Munit mistura	Mesp mistura	Vazios (%)
100	0	2190	2820	22,3
90	10	2301	2802	17,9
80	20	2412	2784	13,4
70	30	2479	2766	10,4
60	40	2546	2748	7,4
55	45	2551	2739	6,9
50	50	2538	2730	7,0
40	60	2481	2712	8,5
30	70	2424	2694	10,0
0	100	2252	2640	14,7

Com base na tabela 26, observa-se que a mistura de 55% de brita 19 mm com 45% de areia regular é a que apresenta o menor percentual de vazios, 6,9%, por isso é a que será utilizada para os próximos ensaios de compactação. Na figura 34 está representado o gráfico para melhor visualização da variação dos vazios desta mistura, sendo que no eixo 'x' estão os percentuais dos agregados e no eixo 'y' os valores dos vazios.

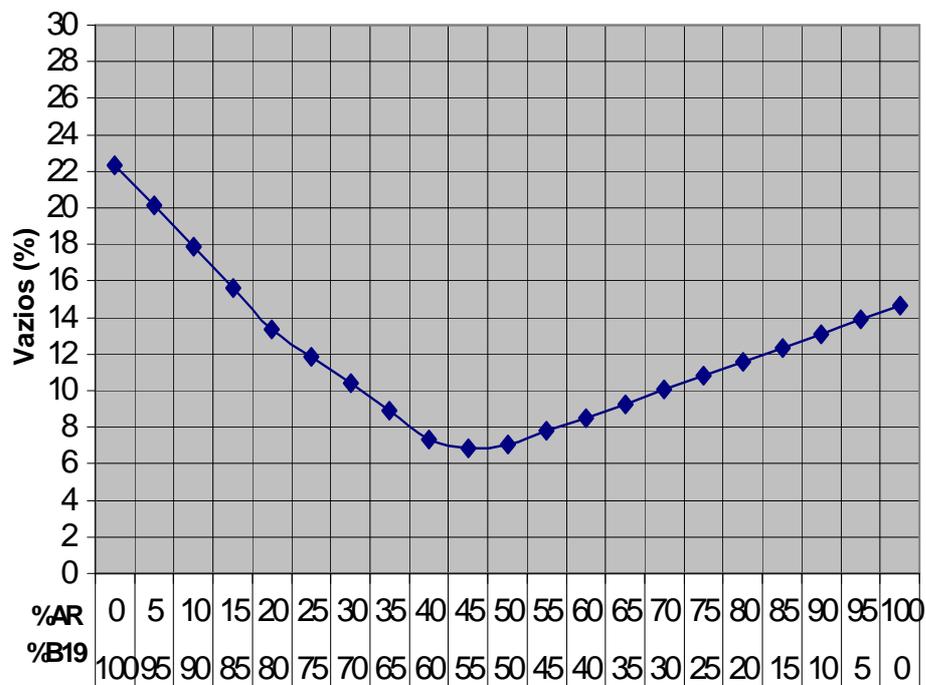


Figura 34: comportamento dos vazios do pacote granular da brita 19 mm com a areia regular

Fixando a proporção ótima entre a mistura anterior e empacotando-a com a areia fina, sendo que esta foi substituída de 5 em 5%, observou-se que, segundo a tabela 27, a proporção ótima é de 10% de areia fina em relação ao total de agregados. O teor de substituição foi diminuído em relação à mistura anterior, pois a areia fina é de menor granulometria e por que já havia uma pequena quantidade de vazios anteriormente, sendo assim, era de se esperar que o teor ótimo de substituição fosse menor em relação ao último ensaio.

Tabela 27: ensaio de compactação entre a brita 19 mm, areia regular e areia fina

% de Brita 19 mm / Areia regular	% de Areia fina	Munit mistura	Mesp mistura	Vazios (%)
100	0	2551	2739	6,9
95	5	2580	2735	5,7
90	10	2609	2730	4,5
85	15	2597	2726	4,7
80	20	2573	2721	5,5
0	100	1897	2650	28,4

Observa-se que o teor de 90% da mistura anterior com 10% de areia fina proporcionou o menor índice de vazios, em 4,5%. Isto quer dizer que, se é possível a produção de CAA com estes materiais, todos os pontos da família já tem seu esqueleto granular definido. Provavelmente os CAA não segregarão nem ocorrerá excesso de material fino. A figura 35 representa o gráfico da compactação para todas as proporções entre a brita 19 mm, a areia regular e a areia fina.

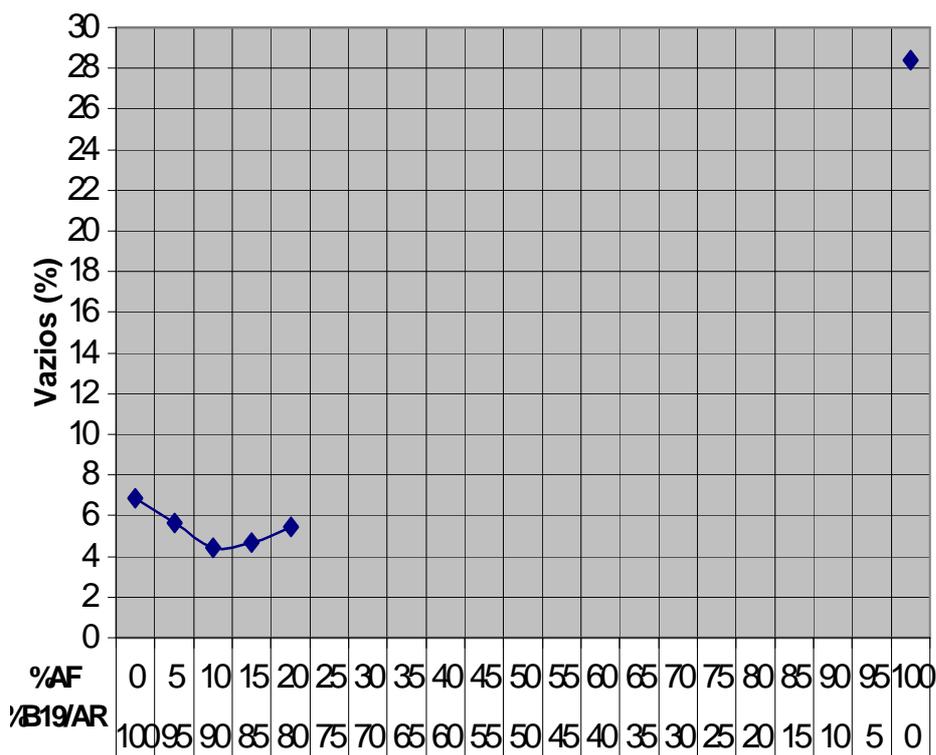


Figura 35: comportamento dos vazios do pacote granular da brita 19 mm, areia regular e areia fina

Com estes valores, pode-se calcular os traços finais dos CAA, sem a necessidade de substituições na central de concreto. Os traços unitários do AF1B estão na tabela 28, enquanto que a tabela 29 mostra os consumos de materiais para esta mesma mistura. O teor experimental obtido para o aditivo superplastificante também foi de 0,47%, com as relações a/c similares às dos concretos anteriores, para os traços com as mesmas proporções de agregados/cimento em massa. Observa-se ainda a variação do teor de argamassa, já que este não foi mantido constante e sim, a proporção entre a brita 19 mm, areia regular e areia fina. O teor variou de 56,7% até 62,8%, aumentando à medida que o CAA fica mais rico, já que vai aumentando o consumo de cimento enquanto diminui o consumo de brita, o que não ocorreria se o teor de argamassa fosse mantido constante. O teor de umidade manteve-se com a variação esperada. Observa-se que foram necessários apenas quatro pontos para o desenho das curvas de dosagem e desempenho, pois estes alcançaram os valores esperados e não foi preciso a confecção de traços extremos.

É importante frisar que os valores de massa específica, usados no cálculo do consumo dos materiais do concreto, foram inferiores aos da família de CAA com areia fina dosada pelo método Tutikian (2004), principalmente nos traços mais pobres. Isto se deve, principalmente, ao aumento do teor de argamassa destas misturas, o que provoca uma diminuição da

quantidade de agregado graúdo, diminuindo também a massa específica. O fato não se verifica dentro das famílias de CAA, já que os traços mais ricos, mesmo apresentando um teor de argamassa superior ao dos traços mais pobres, possuem uma massa específica maior. Este fato já era esperado, uma vez que, nestas misturas, aumenta a proporção dos materiais de maior massa por volume, no caso o cimento, e diminuem os mais leves, como a água e agregados.

Tabela 28: traços unitários do CAA com areia fina com uma granulometria de brita – AF1B

Família	Traço				a/c	H (%)	Adt (%)	α (%)
	c	af	ar	b19				
3	1	0,30	1,22	1,49	0,37	9,15	0,47	62,8
4,33	1	0,43	1,75	2,14	0,46	8,69	0,47	59,8
5,66	1	0,57	2,29	2,80	0,59	8,80	0,47	58,0
7	1	0,70	2,84	3,47	0,79	9,84	0,47	56,7

Legenda: c – cimento; af – areia fina; ar – areia regular; b19 – brita 19 mm; H – teor de umidade; adt – aditivo; α – teor de argamassa.

Tabela 29: consumos de materiais do CAA com areia fina com uma granulometria de brita – AF1B

Família	Massa específica (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Areia fina (kg/m ³)	Areia regular (kg/m ³)	Brita 19 mm (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
3	2401	550	165	671	819	201	2,58
4,33	2382	411	177	720	880	190	1,93
5,66	2336	322	184	738	903	189	1,51
7	2301	262	183	744	909	206	1,23

Na tabela 30 estão as propriedades dos concretos no estado fresco. Os ensaios escolhidos foram o *slump flow test*, o *V-Funnel test* e o *L-Box test*, para caracterizar os CAA. Observa-se que todos os valores estão dentro dos parâmetros estabelecidos por Tutikian (2004), EFNARC (2002), FURNAS (2004a), FURNAS (2004b) e FURNAS (2004c).

Tabela 30: propriedades dos AF1B no estado fresco

Família	<i>slump flow test</i> (mm)	<i>V-Funnel test</i> (s)	<i>L-Box test</i> (l_2/l_1)
3	710	8	0,90
4,33	740	8	1,00
5,66	710	7	0,95
7	680	9	0,95

O mesmo procedimento de empacotamento foi realizado entre a mistura de brita 19 mm e areia regular com a cinza volante. Chegou-se à proporção de 5% de cinza volante em relação à quantidade total de material como a que proporciona a menor quantidade de vazios. Assim

pode-se calcular, como ilustrado na tabela 31, os traços unitários para esta família de CAA, enquanto que a tabela 32 mostra os consumos dos materiais, calculados através da massa específica dos concretos no estado fresco. As relações a/c se mantiveram próximas às dos valores dos traços 1:m similares dos outros concretos, enquanto que o teor de umidade apresentou a variação já esperada. Os teores de argamassa seca, em massa, foram menores que os dos CAA com areia fina, provavelmente porque a quantidade de agregado graúdo é maior na última mistura. Isto se deve ao fato de que o teor de cinza volante na quantidade total de agregados é menor, aumentando o consumo de brita. E, por fim, o percentual de aditivo superplastificante ficou como nos outros CAA, em 0,47%. Quatro traços foram suficientes para cobrir toda a faixa de resistências desejadas. Novamente pode-se observar um decréscimo nas massas específicas destes traços, porém, neste caso, apenas nos pontos mais ricos.

Tabela 31: traços unitários do CAA com cinza volante com uma granulometria de brita – CV1B

Família	Traço				a/c	H (%)	Adt (%)	α (%)
	c	cv	ar	b19				
3	1	0,15	1,28	1,57	0,36	8,98	0,47	60,7
4,66	1	0,23	1,99	2,43	0,48	8,41	0,47	57,0
6,33	1	0,32	2,71	3,31	0,62	8,50	0,47	54,9
8	1	0,40	3,42	4,18	0,78	8,64	0,47	53,6

Legenda: c – cimento; cv – cinza volante; ar – areia regular; b19 – brita 19 mm; H – teor de umidade; adt – aditivo; α – teor de argamassa.

Tabela 32: consumos de materiais do CAA com cinza volante com uma granulometria de brita – CV1B

Família	Massa específica (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Cinza volante (kg/m ³)	Areia regular (kg/m ³)	Brita 19 mm (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
3	2353	540	81	691	847	194	2,54
4,66	2335	381	88	757	925	181	1,79
6,33	2323	292	93	792	967	182	1,37
8	2310	236	94	808	988	184	1,11

Na tabela 33 estão as propriedades dos concretos no estado fresco. Para caracterizar os CAA no estado fresco foram escolhidos o *slump flow test*, o *V-Funnel test* e o *L-Box test*. Observa-se que todos os valores estão dentro dos parâmetros estabelecidos por Tutikian (2004), EFNARC (2002), FURNAS (2004a), FURNAS (2004b) e FURNAS (2004c).

Tabela 33: propriedades dos CV1B no estado fresco

Família	<i>slump flow test</i> (mm)	<i>V-Funnel test</i> (s)	<i>L-Box test</i> (I_2/I_1)
3	750	7	1,00
4,66	720	7	1,00
6,33	740	7	0,95
8	730	8	0,95

5.3.2.3 Proporcionamento pelo método de dosagem proposto com duas granulometrias de brita – AF2B e CV2B

Para se comparar a eficácia do empacotamento com agregados com granulometria distintas, já detalhado no item anterior, com o de agregados com granulometria contínua, foram moldados mais duas famílias de CAA, uma utilizando a areia fina e a outra cinza volante, como materiais finos. Nestes concretos foram utilizados brita 19 mm, brita 9,5 mm, areia regular e areia fina ou cinza volante, além do cimento, água e aditivo superplastificante.

O procedimento ocorreu de forma similar ao realizado no empacotamento dos agregados dos CAA anteriores, ou seja, de dois em dois materiais, dos de maior granulometria para os de menor. Então primeiro foram empacotadas as britas 19 mm e 9,5 mm, para seguir com a compactação com a areia regular e, por fim, com os componentes de menor diâmetro das partículas, a areia fina ou a cinza volante.

A tabela 34 mostra o resultado do empacotamento da brita 19 mm com a brita 9,5 mm. Observa-se que o percentual de mistura que proporcionou o menor índice de vazios foi o de 45% de brita 19 mm e 55% de brita 9,5 mm, com o percentual de 20,13%. A massa específica da mistura foi constante já que a massa específica de cada uma das partículas é a mesma, por se tratar da mesma origem. Os cálculos das massas unitárias e dos percentuais de vazios foram realizados similarmente aos anteriores.

Tabela 34: ensaio de compacidade entre a brita 19 mm e a brita 9,5 mm

% de Brita 19 mm	% de Brita 9,5 mm	Munit mistura	Mesp mistura	Vazios (%)
100	0	2140	2820	24,11
90	10	2193	2820	22,22
80	20	2207	2820	21,74
70	30	2201	2820	21,94
60	40	2197	2820	22,10
50	50	2220	2820	21,26
45	55	2252	2820	20,13
40	60	2243	2820	20,45
30	70	2236	2820	20,72
20	80	2234	2820	20,76
10	90	2217	2820	21,38
0	100	2209	2820	21,66

A figura 36 ilustra a curva de variação do percentual de vazios pelas proporções das britas. Observa-se nesta figura que não houve uma considerável variação de picos, uma vez que os índices de vazios foram similares para todas as proporções de britas, aumentando, assim, o peso das variabilidades dos ensaios.

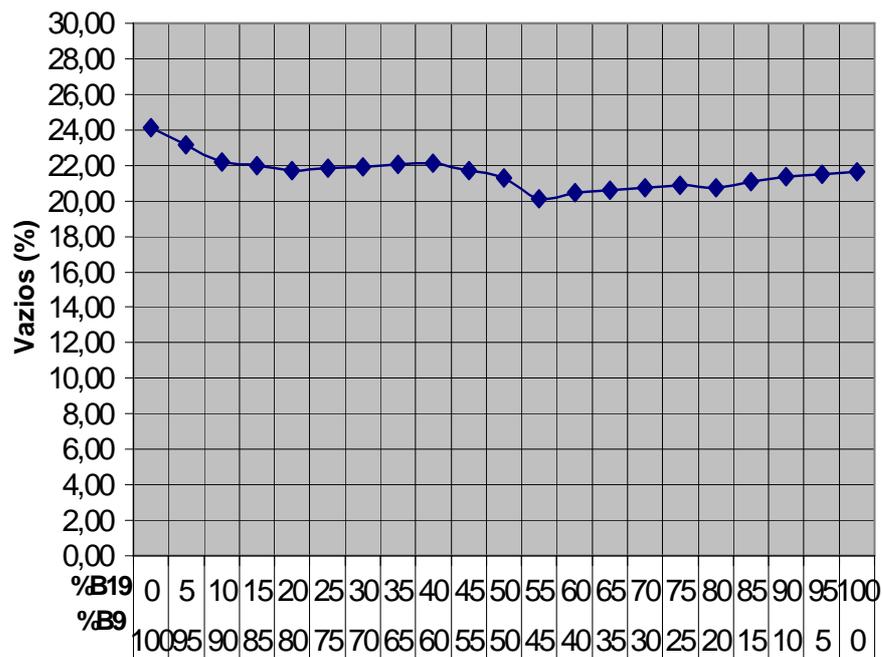


Figura 36: comportamento dos vazios do pacote granular da brita 19 mm com a brita 9,5 mm

A tabela 35 ilustra o segundo passo do empacotamento para o CAA dosado através do método de dosagem proposto nesta tese, que foi a compactação entre a mistura anterior, com britas 19 mm e 9,5 mm, e a areia regular.

Tabela 35: ensaio de compactação entre a brita 19 mm, a brita 9,5 mm e a areia regular

% de Brita 19 mm / Brita 9,5mm	% de Areia regular	Munit mistura	Mesp mistura	Vazios (%)
100	0	2252	2820	20,1
90	10	2332	2802	16,8
80	20	2412	2784	13,4
70	30	2492	2766	9,9
65	35	2482	2757	10,0
60	40	2520	2748	8,3
55	45	2506	2739	8,5
50	50	2491	2730	8,7
40	60	2476	2712	8,7
30	70	2433	2694	9,7
20	80	2376	2676	11,2
10	90	2316	2658	12,9
0	100	2252	2640	14,7

Observou-se que a composição ótima foi de 60% da mistura entre as britas 19 mm e 9,5 mm e 40% de areia regular, resultando em um índice de vazios de 8,3%. A seguir, a figura 37 mostra o comportamento do percentual de vazios pela proporção entre os agregados.

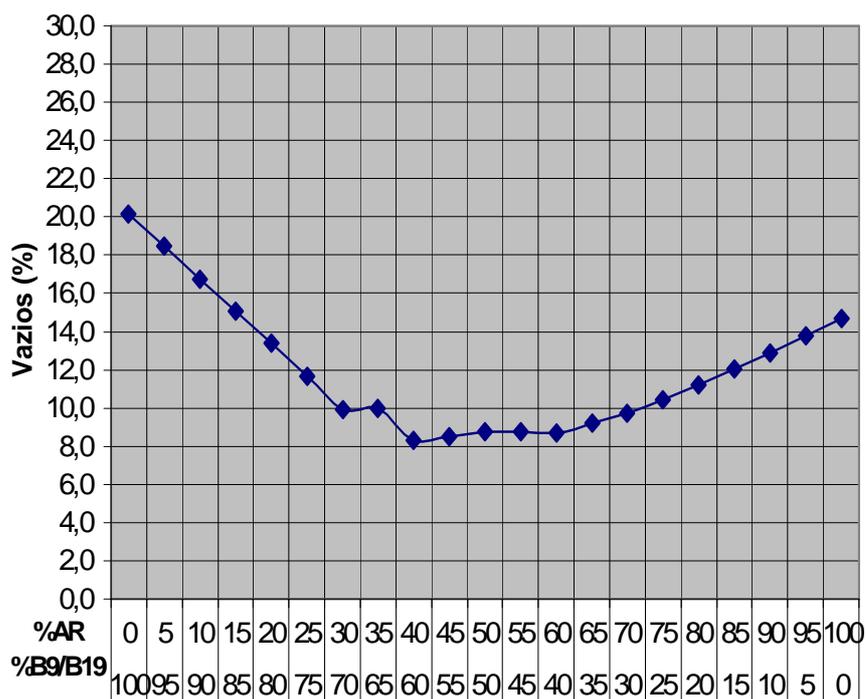


Figura 37: comportamento dos vazios do pacote granular da brita 19 mm e 9,5 mm com a areia regular

Para o CAA com areia fina, foi realizado o último empacotamento, entre este fino e os outros agregados já empacotados. A tabela 36 mostra os resultados obtidos com o ensaio de compactação destes materiais. Novamente, como se podia esperar, o máximo empacotamento ocorreu com pouca quantidade de areia fina, já que havia poucos espaços vazios na mistura. Assim, não foi necessário realizar o ensaio para quantidades superiores a 30%.

Tabela 36: ensaio de compactação entre a brita 19 mm e 9,5 mm, a areia regular e a areia fina

% de Brita 19 mm / Brita 9,5 mm / Areia regular	% de Areia Fina	Munit mistura	Mesp mistura	Vazios (%)
100	0	2509	2748	8,7
95	5	2534	2743	7,6
90	10	2560	2738	6,5
85	15	2568	2733	6,0
80	20	2578	2728	5,5
75	25	2553	2724	6,3
70	30	2527	2719	7,0
0	100	1897	2650	33,8

Então, o teor ideal foi de 20% de areia fina e 80% da mistura já determinada com areia regular, brita 9,5 mm e brita 19 mm. Esta composição possui mais vazios do que quando

havia apenas uma granulometria de brita, já que com as granulometrias dos agregados mais próximas ocorre o efeito de perda (De Larrard, 1999). O CAA com areia fina com uma classe de agregado graúdo pode ser considerado uma mistura sem interação, ao contrário da composição com duas britas, onde há uma interação parcial, mas com maior volume dos materiais finos, importante para a reologia do CAA. Porém o fato de apresentar um índice de vazios menor, porém similares, não confere aos primeiros CAA melhores propriedades, apesar de ser um indicativo. As conclusões serão discutidas nos capítulos posteriores, após a apresentação dos resultados. A figura 38 mostra o comportamento do ensaio de compactação entre os agregados para o CAA com areia fina e duas granulometrias de brita.

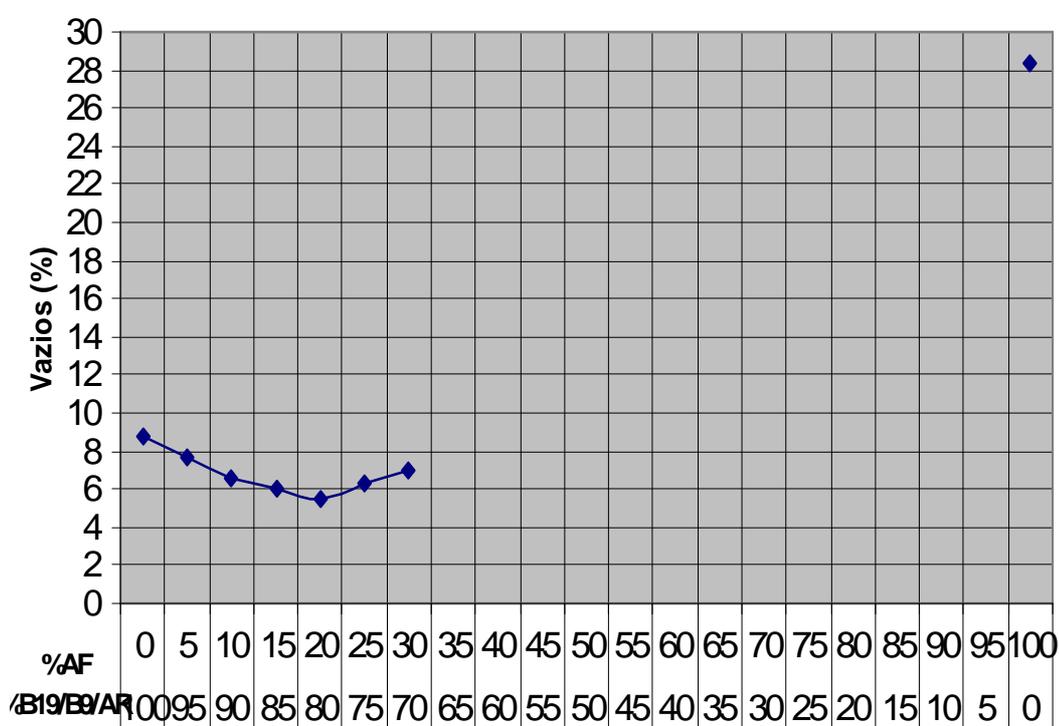


Figura 38: comportamento dos vazios do pacote granular das britas 19 mm e 9,5 mm, com as areias regular e fina

Com estes valores pode-se calcular os traços unitários dos concretos e simplesmente misturá-los na betoneira para a determinação da relação água/cimento, do teor de aditivo superplastificante e para moldar os corpos-de-prova para os ensaios futuros.

Os traços unitários do AF2B estão na tabela 37, enquanto que os consumos de materiais estão na tabela 38. Novamente observa-se que foi necessária a mistura de pontos extremos, para que se obtivesse a faixa de valores requerida para futuras comparações. Os cálculos dos consumos dos componentes deste concreto foram realizados baseados na massa específica no estado fresco. Observa-se novamente que o teor de argamassa seca variou de 58,0% até 64,0 %,

porém estes traços podem ser considerados da mesma família e, conseqüentemente, plotados na mesma curva de dosagem por manterem as proporções entre os agregados fixas. As relações a/c estão próximas das dos concretos anteriores com os mesmos traços 1:m, assim como a variação dos teores de umidade, à exceção do traço 1:6 que apresentou um H um pouco elevado em comparação aos demais. O teor de aditivo superplastificante também pode ser mantido em 0,47 %, para conservar a possibilidade dos CAA serem viáveis economicamente.

O aumento dos teores de argamassa seca, se comparados com os das outras famílias, pode ser um indicativo de redução dos módulos de elasticidade. Mas este fato será confirmado ou não com a apresentação dos resultados no capítulo 6.

Tabela 37: traços unitários do CAA com areia fina empacotado com 2 britas – AF2B

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

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

Tabela 38: consumos de materiais calculados para o CAA com areia fina empacotado com 2 britas – AF2B

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

Na tabela 39 estão as propriedades dos concretos no estado fresco. Os ensaios escolhidos foram o *slump flow test*, o *V-Funnel test* e o *L-Box test*, para caracterizarem os CAA. Observa-se que todos os valores estão dentro dos parâmetros estabelecidos por Tutikian (2004), EFNARC (2002), FURNAS (2004a), FURNAS (2004b) e FURNAS (2004c).

Tabela 39: propriedades dos AF2B no estado fresco

Família	<i>slump flow test</i> (mm)	<i>V-Funnel test</i> (s)	<i>L-Box test</i> (I_2/I_1)
3	680	9	0,90
4	690	9	0,95
5	680	10	0,90
6	660	11	0,90
7	670	10	1,00

O mesmo empacotamento anterior foi realizado para a mistura com cinza volante. O menor índice de vazios foi encontrado com 90% de agregados graúdo e miúdo e 10% de cinza volante. Com os valores pode-se calcular todos os traços desta família de CAA.

Para o CAA com cinza volante, a massa específica determinada no estado fresco foi a base para os cálculos dos consumos dos materiais, representados na tabela 41. Já na tabela 40 estão os traços unitários. Também para esta família de concretos foi necessária a introdução de mais pontos extremos nas curvas de dosagem e desempenho. O teor de aditivo superplastificante ficou bastante próximo dos utilizados nos concretos, em 0,46%, enquanto que o teor de argamassa seca foi o menor de todos, variando entre 52% e 59,5%, devido ao teor de cinza volante ser levemente elevado em relação aos agregados totais, se comparado com os das outras famílias. A relação a/c e o teor de umidade se mantiveram na faixa esperada, com exceção do traço 1:8, o que indica que o concreto ficou mais seco que os demais, como pode ser observado na tabela 42, a qual expressa os resultados dos ensaios de trabalhabilidade para esta família de CAA.

Tabela 40: traços unitários do CAA com cinza volante empacotado com duas britas – CV2B

Família	Traço					a/c	H (%)	Adt (%)	α (%)
	c	cv	ar	b9	b19				
3	1	0,30	1,08	0,89	0,73	0,38	9,45	0,46	59,50
4	1	0,40	1,44	1,19	0,97	0,43	8,62	0,46	56,80
5	1	0,50	1,80	1,49	1,22	0,51	8,50	0,46	54,91
6	1	0,60	2,16	1,78	1,46	0,60	8,57	0,46	53,71
7	1	0,70	2,52	2,08	1,70	0,66	8,21	0,46	52,75
8	1	0,80	2,88	2,38	1,94	0,72	7,97	0,46	52,00

Legenda: c – cimento; cv – cinza volante; ar – areia regular; b9 – brita 9,5 mm; b19 – brita 19 mm; H – teor de umidade; adt – aditivo; α – teor de argamassa.

Tabela 41: consumos de materiais calculados para o CAA com cinza volante empacotado com duas britas – CV2B

Família	Massa específica (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Cinza volante (kg/m ³)	Areia regular (kg/m ³)	Brita 9,5 mm (kg/m ³)	Brita 19 mm (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
3	2343	535	161	578	476	391	202	2,46
4	2333	430	172	619	511	417	185	1,98
5	2330	358	179	644	533	437	183	1,65
6	2323	306	183	660	544	446	183	1,41
7	2304	266	186	671	554	452	175	1,22
8	2301	237	189	682	564	459	170	1,09

As massas específicas dos concretos dosados pelo método proposto nesta tese com duas granulometrias de brita, tanto os AF2B quanto os CV2B, não apresentaram redução em relação às outras famílias estudadas. Provavelmente porque o aumento do teor de argamassa foi compensado pelo aumento do empacotamento dos agregados.

Na tabela 42 estão as propriedades dos concretos no estado fresco. Para caracterizar os CAA no estado fresco foram escolhidos o *slump flow test*, o *V-Funnel test* e o *L-Box test*. Observa-se que todos os valores estão dentro dos parâmetros estabelecidos por Tutikian (2004), EFNARC (2002), FURNAS (2004a), FURNAS (2004b) e FURNAS (2004c).

Tabela 42: propriedades dos CV2B no estado fresco

Família	<i>slump flow test</i> (mm)	<i>V-Funnel test</i> (s)	<i>L-Box test</i> (l ₂ /l ₁)
3	750	7	1,00
4	730	6	1,00
5	710	8	0,95
6	700	8	0,90
7	710	9	0,95
8	700	9	0,85

6 RESULTADOS

Os resultados serão apresentados neste capítulo, bem como as comparações entre todas as propriedades estudadas dos diversos concretos. A figura 39 representa o organograma do trabalho experimental desta tese, para melhor visualização.

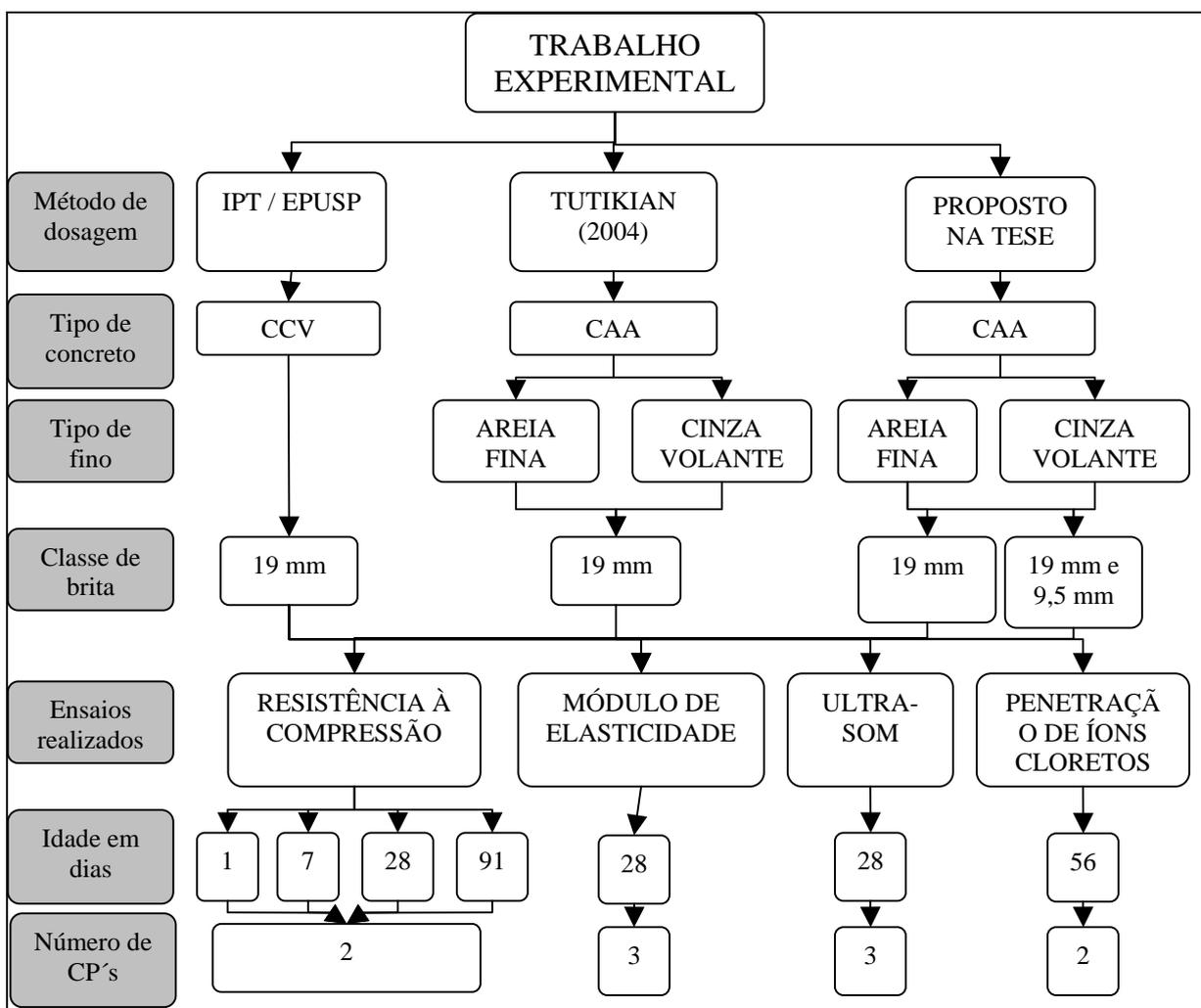


Figura 39: organograma do trabalho experimental

As famílias serão apresentadas individualmente, constando resultados, equações de comportamento, coeficientes de determinação, curvas de dosagem e desempenho, para, após ser realizado um comparativo fixando a resistência à compressão, característica principal da maioria das aplicações, e determinando as outras propriedades para as comparações.

6.1 CONCRETO CONVENCIONAL - CCV

Os resultados de todos os ensaios estão representados na tabela 43. Para a resistência à compressão nas idades de 1, 7, 28 e 91 dias foi utilizado o resultado potencial, ou seja, aquele que foi mais alto. O mesmo ocorreu para os outros ensaios, porém no caso da penetração de

íons cloretos, o melhor resultado é o mais baixo, por apresentar maior dificuldade para penetração de elementos externos.

Tabela 43: resultados das propriedades no estado endurecido do CCV

Traço 1:m	a/c	Resistência à compressão (MPa)				Ec (GPa)	US (m/s)	CI (C)
		1 dia	7 dias	28 dias	91 dias			
1:3	0,37	34,6	48,7	53,5	64,1	37,79	4884	2655
		35,8	48,3	49,0	63,2	35,39	4872	2748
		-	-	-	-	35,44	4922	-
1:4	0,43	27,7	39,4	46,4	56,0	34,31	4884	3240
		27,9	40,0	45,6	53,9	33,83	4803	2878
		-	-	-	-	36,00	4786	-
1:5	0,50	19,5	31,6	38,9	44,9	30,16	4798	3757
		19,5	32,4	38,4	46,8	25,35	4697	4221
		-	-	-	-	31,28	4719	-
1:6	0,59	15,6	27,1	32,7	37,9	23,09	4617	4253
		15,8	28,1	31,1	37,1	20,85	4623	4689
		-	-	-	-	26,28	4615	-
1:7	0,72	9,6	21,2	26,4	27,9	19,82	4414	4671
		9,5	22,6	27,8	29,0	17,87	4471	5171
		-	-	-	-	11,50	4467	-

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

A faixa de abrangência da resistência à compressão foi satisfatória, já que contemplou de 27,8 até 53,5 MPa, aos 28 dias. Considerando o desvio padrão na resistência à compressão de projeto, pode-se considerar o f_{ck} entre 20 e 45 MPa, aproximadamente. Observa-se também que houve significativo crescimento dos valores de idade para idade, inclusive até aos 91 dias, ganho este que, normalmente, é desprezado por projetistas e profissionais da área. Este ganho já era esperado, pois o cimento é o ARI-RS, o qual possui em sua composição cerca de 15% de cinza volante, material pozolânico que reage com produtos de hidratação do cimento em idades após 28 dias.

O módulo de elasticidade variou conforme a resistência à compressão, como era de se esperar, porém a equação de correlação que melhor se ajustou aos pontos obtidos foi uma logarítmica, que é a inversa da exponencial. Como não há consenso nos modelos de previsão mais aceitos

de normas nacionais e internacionais, como a **NBR 6118/03**, o código modelo da **CEB (1990)** e a norma norueguesa **NS 3473/89**, esta equação pode ser considerada válida. Também o módulo de elasticidade se comportou como uma reta de inclinação positiva para resistências convencionais e diminuiu seu crescimento, ao ultrapassar os 45 MPa, o que também é relatado na bibliografia (Dal Molin, 1995).

A velocidade da onda ultra-sônica cresceu linearmente em relação à resistência à compressão. Já era de se esperar este crescimento simultâneo, porém vale ressaltar que a variação foi pequena.

A penetração de íons cloretos também variou linearmente em relação à resistência à compressão, porém inversamente. Só que os valores encontrados foram elevados, de acordo com a **ASTM 1202/97**, onde resultados acima de 4000 C, que indicam uma penetração alta, foram encontrados nos dois traços mais pobres (1:6 e 1:7) e valores entre 2000 e 4000 C, que indicam uma penetração moderada, ocorreu nos outros três traços.

A partir dos dados obtidos nos diversos ensaios realizados, foram determinadas as equações de comportamento, bem como o coeficiente de correlação. Estes resultados estão expressos na tabela 44. Observa-se que todas as equações podem ser consideradas satisfatórias, já que o r^2 foi sempre superior a 0,90, o que permite que se calcule traços intermediários com ótima precisão.

Salienta-se que, para o CCV dosado através do método IPT/EPUSP, o teor de argamassa seca é constante, sendo assim, não depende de nenhuma variável adicional para ser calculado. Só foi representado nesta tabela para servir de comparação para os CAA dosados através do método proposto, onde o teor de argamassa não permanece mais constante.

Tabela 44: equações de comportamento e r^2 para o CCV

Propriedade		Equação de comportamento	R^2
Resistência à compressão (Lei de Abrams)	1 dia	$f_{cj1d} = \frac{137,37}{40,62^{a/c}}$	0,99
	7 dias	$f_{cj7d} = \frac{102,47}{8,59^{a/c}}$	0,97
	28 dias	$f_{cj28d} = \frac{105,03}{6,68^{a/c}}$	0,98
	91 dias	$f_{cj91d} = \frac{150,18}{9,95^{a/c}}$	1,00
Traço unitário 1:m (lei de Lyse)		$m = 11,39 * a / c - 0,9751$	0,98
Consumo de cimento por m^3		$C = \frac{2033}{m + 0,6206}$	1,00
Custo		$Cu = C * (0,4033 + 0,0163 * m)$	1,00
Teor de argamassa seca		$\alpha = 53$ (constante)	1,00
Módulo de elasticidade		$Ec = \frac{\log(f_{cj28d}) - 1,124}{0,0154}$	0,97
Propagação da onda de ultra-som		$US = 25,699 * Ec + 3962,6$	0,99
Penetração de íons cloretos		$Cl = -\frac{(US - 5506,5)}{0,2105}$	0,93

A equação de custo foi determinada com base nos valores repassados pelos fornecedores de cada um dos materiais, no mês de setembro de 2007, quando o dólar paralelo estava em R\$1,95 e o custo unitário básico do Rio Grande do Sul (CUB-RS) em R\$948,23. O preço repassado do cimento ARI-RS foi de 0,40 R\$/kg, o da cinza volante foi de 0,10 R\$/kg, os da areia regular e da areia fina foram de 0,013 R\$/kg, os das duas classes de agregado graúdo foram de 0,02 R\$/kg, enquanto que o custo do aditivo superplastificante foi repassado como 14,30 R\$/kg. Observa-se que estes custos são de mercado para pequenas quantidades e foram utilizados os mesmos para todas as famílias de CAA. Estes custos, se pesquisados em outros locais, podem sofrer variações, modificando todas as comparações entre as famílias.

Para a determinação da equação de custo para o CCV foram realizadas operações matemáticas a fim de se simplificar o cálculo final e, principalmente, a determinação deste através do método gráfico. Com esta equação, se pode calcular o custo para concretos de qualquer idade, resistência à compressão ou outra característica, como o consumo de cimento por metro cúbico, por exemplo.

Na figura 40 está o diagrama de dosagem para o CCV, relacionando as resistências à compressão aos 1, 7, 28 e 91 dias com a relação água/cimento, esta com as proporções do traço 1:m, este último com o custo e com o consumo de cimento, que se relaciona, por fim, com o teor de argamassa seca. A utilização deste diagrama de dosagem deve ser no sentido horário, a partir da resistência à compressão ou no sentido oposto, sendo iniciado no consumo de cimento e chegando até as resistências à compressão. A curva de custo não pode ser utilizada como passagem para a reta do teor de argamassa, servindo, apenas, para sua própria determinação. É importante lembrar que a representação da curva de custo não é obrigatória, embora recomendável. O eixo 'y', com valores positivos, representa, ao mesmo tempo, a resistência à compressão em MPa e o teor de argamassa, em porcentagem, enquanto que o eixo 'x' negativo representa, também simultaneamente, o consumo de cimento e o custo.

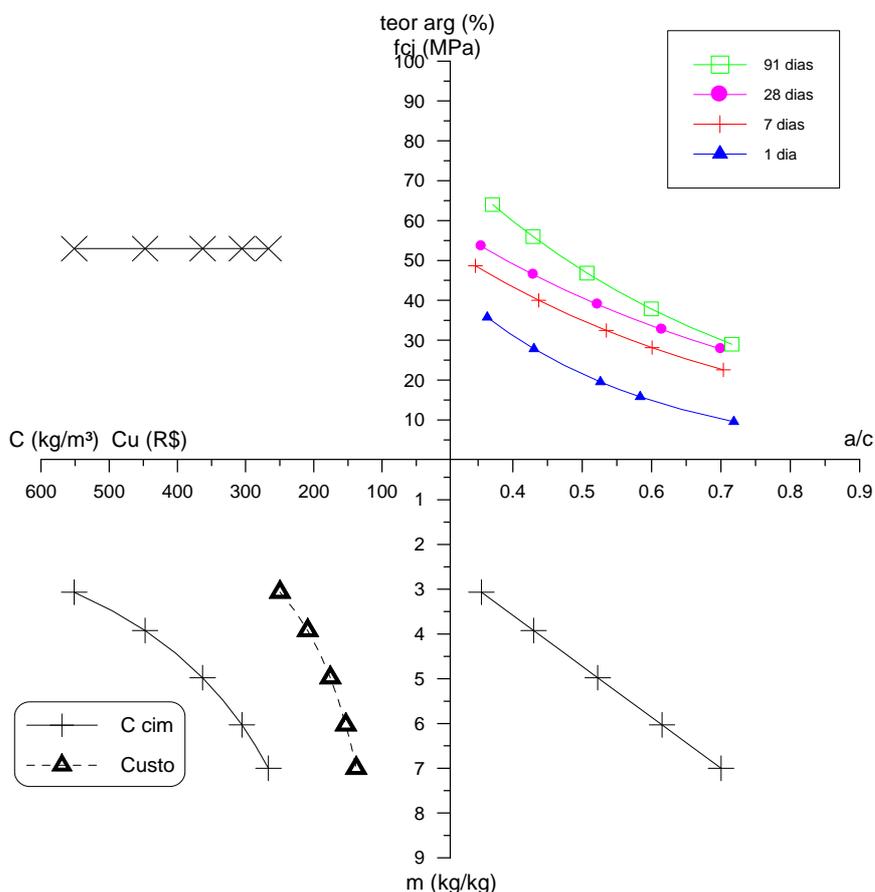


Figura 40: diagrama de dosagem para o CCV

O diagrama de desempenho é mostrado na figura 41. Observa-se que, nesta tese, relacionou-se a resistência à compressão aos 28 dias com o módulo de elasticidade aos 28 dias, este com a velocidade de propagação da onda de ultra-som, medida aos 28 dias, e esta última propriedade com a penetração de íons cloretos aos 56 dias. Estes três ensaios foram escolhidos por caracterizarem os concretos, porém, segundo o método proposto, poderiam ser escolhidos outros, como a resistência à tração ou a absorção, por exemplo. Ou então poderia se inverter a ordem de apresentação do diagrama. Também é importante salientar que os métodos IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992) e Tutikian (2004), utilizados para comparações, não prevem o diagrama de desempenho, porém foi realizado nos mesmos termos do método proposto, para que todos os concretos tenham estudos similares.

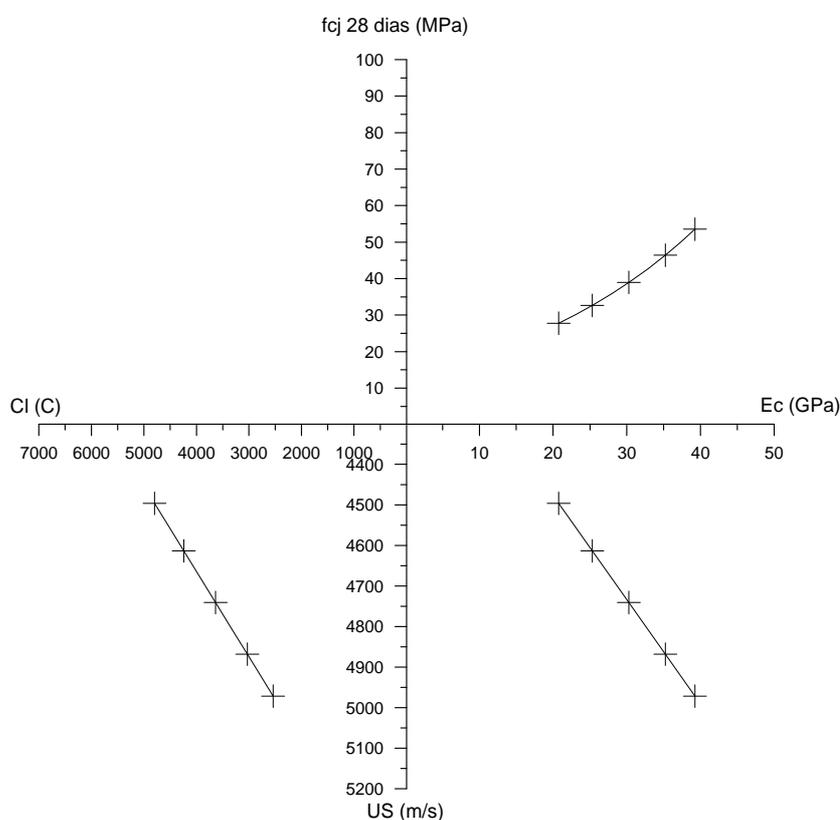


Figura 41: diagrama de desempenho para o CCV

6.2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL - CAA

6.2.1 CAA dosado com areia fina através do método Tutikian (2004) - TKAF

A tabela 45 detalha os resultados para todos os traços do TKAF, dosado através do método proposto por Tutikian (2004). Novamente, para a determinação das equações de

comportamento e o desenho dos diagramas de dosagem e desempenho, foram utilizados os valores potenciais para todos os ensaios.

Tabela 45: resultados das propriedades no estado endurecido para os TKAF

Traço 1:m	a/c	Resistência à compressão (MPa)				Ec (GPa)	US (m/s)	CI (C)
		1 dia	7 dias	28 dias	91 dias			
1:3	0,36	46,3	57,4	62,6	69,2	39,8	4798	1596
		46,3	58,7	65,2	67,3	43,3	4872	1998
		-	-	-	-	40,8	4798	-
1:4	0,41	41,8	48,3	67,3	66,5	41,2	4798	1593
		38,1	50,0	58,2	62,4	45,8	4798	2190
		-	-	-	-	41,1	4847	-
1:5	0,48	17,0	42,4	47,8	56,4	34,6	4798	2929
		27,3	41,8	48,7	53,8	38,2	4691	2637
		-	-	-	-	33,6	4714	-
1:6	0,62	16,3	27,1	32,2	38,7	29,4	4612	3555
		15,5	25,5	34,3	38,7	23,1	4545	3429
		-	-	-	-	25,1	4668	-
1:7	0,68	12,3	23,4	29,2	25,9	27,9	4578	4644
		12,7	22,4	30,2	33,4	24,3	4545	3960
		-	-	-	-	26,6	4328	-

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

Observa-se na tabela acima que o comportamento dos resultados foi similar aos do CCV, com o módulo de elasticidade e a velocidade do ultra-som aumentando com a resistência à compressão e a penetração dos íons cloretos diminuindo. A relação a/c foi parecida entre estes dois concretos, já que foram utilizadas as mesmas proporções 1:m e a quantidade de água do CCV foi utilizada como parâmetro para o CAA com areia fina.

Os módulos de elasticidade foram sempre superiores aos dos CCV, mostrando que CAA nem sempre apresentam módulos inferiores, porém ainda deve-se esperar as comparações entre os mesmos valores resistências à compressão, apesar de que os traços 1:m já podem ser considerados como um indicativo do resultado final. Isto se deve, provavelmente, à propriedade da areia fina de fechar poros no concreto, tornando-o menos deformável no estado endurecido. A velocidade de propagação da onda de ultra-som, apesar de apresentar

um crescimento linear em relação à resistência à compressão, pouco variou, passando de um valor de 4578 m/s para o traço mais pobre a 4872 m/s para o traço 1:3, uma variação de apenas 6,4%. E a penetração de íons cloretos foi menor que a do CCV, porém ainda um pouco elevada, sendo considerada alta para o traço 1:7, moderada para os traços 1:6 e 1:5 e baixa para os traços 1:4 e 1:3.

A partir destes resultados, pode-se calcular as equações de comportamento com seus respectivos coeficientes de correlação, representadas na tabela 46, para, então, se desenhar os diagramas de dosagem e desempenho.

Tabela 46: equações de comportamento e r^2 para os TKAF

Propriedade		Equação de comportamento	R ²
Resistência à compressão (Lei de Abrams)	1 dia	$f_{cj1d} = \frac{210,72}{63,27^{a/c}}$	1,00
	7 dias	$f_{cj7d} = \frac{165,31}{17,97^{a/c}}$	1,00
	28 dias	$f_{cj28d} = \frac{178,36}{13,925^{a/c}}$	0,97
	91 dias	$f_{cj91d} = \frac{170,14}{10,775^{a/c}}$	0,99
Traço unitário 1:m (lei de Lyse)		$m = 11,43 * a / c - 0,8201$	0,98
Consumo de cimento por m ³		$C = \frac{2067,6}{m + 0,6346}$	1,00
Custo		$Cu = C * (0,470 + 0,0163 * m)$	1,00
Teor de argamassa seca		$\alpha = 53$ (constante)	1,00
Módulo de elasticidade		$E_c = \frac{\log(f_{cj28d}) - 0,9451}{0,0196}$	0,99
Propagação da onda de ultra-som		$US = 14,258 * E_c + 4230,40$	0,94
Penetração de íons cloretos		$Cl = -\frac{(US - 5043,8)}{0,1087}$	0,96

Observa-se que, novamente, os dados ajustaram-se perfeitamente às curvas de dosagem, confirmados através dos coeficientes de correlação que foram todos superiores a 0,94. A

equação do custo foi obtida de forma similar à do CCV, utilizando-se os mesmos valores unitários dos materiais. O teor de argamassa é constante, no caso em 53% e, por isso, não é necessário utilizar equações. Os comportamentos da Lei de Abrams, Lyse e consumo de cimento por metro cúbico já eram conhecidos para os TKAF. As outras propriedades confirmaram a tendência do CCV, ou seja, uma curva exponencial relacionando a resistência à compressão com o módulo de elasticidade e duas equações lineares, sendo uma entre o módulo de elasticidade e a velocidade de propagação da onda de ultra-som e a outra entre esta e a penetração de íons cloretos nos concretos.

A seguir, na figura 42, está representado o diagrama de dosagem para o TKAF. É importante salientar, novamente, que este diagrama deve ser sempre utilizado no sentido horário a partir da resistência à compressão, ou no anti-horário a partir do consumo de cimento, e apenas para aproximações, já que para cálculos exatos devem ser utilizadas as equações de comportamento. A curva de custo não pode ser utilizada como passagem para o teor de argamassa.

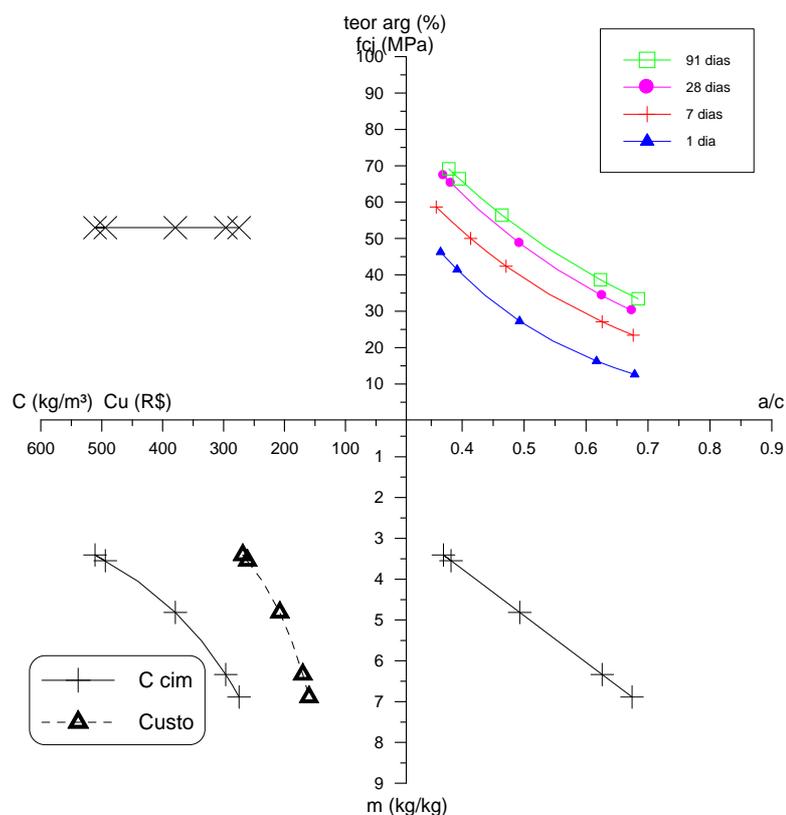


Figura 42: diagrama de dosagem do TKAF

Observa-se no diagrama de dosagem, representado na figura 42, o ganho de resistência à compressão nas idades ensaiadas, já mostrados na tabela de resultados deste concreto. O

ganho é visível, inclusive entre as idades de 28 e 91 dias, período em que já se considera como estável a resistência dos concretos dosados com cimento de alta resistência inicial, que é o caso. Apesar de que o cimento utilizado, o ARI-RS, possuir em sua composição cinza volante, material que reage com idades mais avançadas.

Já na figura 43, está o diagrama de desempenho do TKAF. No diagrama de desempenho já se pode observar, antes da realização de comparações detalhadas, que o CAA com areia fina teve resultados superiores de módulo de elasticidade e inferiores na penetração dos íons cloretos que os do CCV, provavelmente utilizando os benefícios do maior empacotamento.

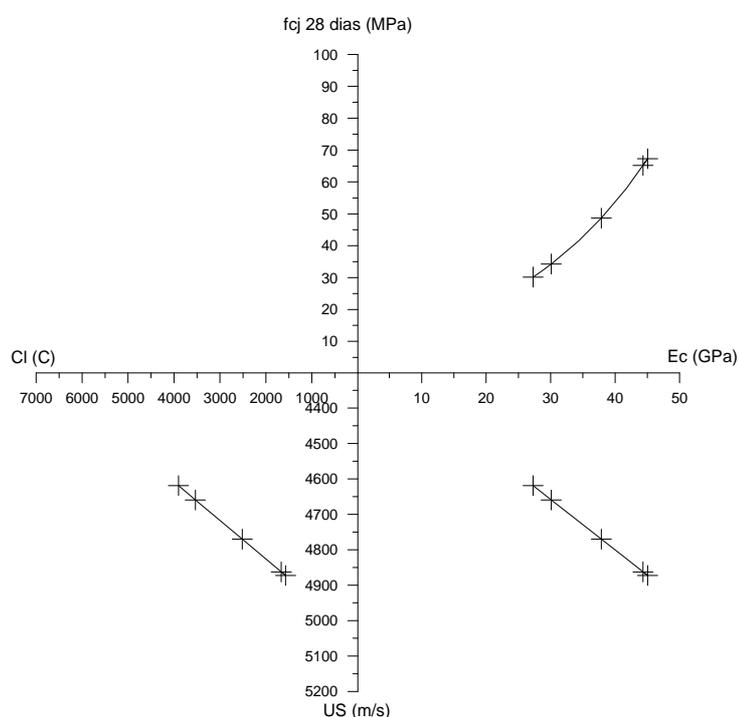


Figura 43: diagrama de desempenho do TKAF

6.2.2 CAA dosado com cinza volante através do método Tutikian (2004) - TKCV

Utilizando o mesmo procedimento adotado para os TKAF, dosaram-se CAA com cinza volante para comparações. A tabela 47 mostra os resultados que foram obtidos nas idades pré-determinadas, onde os valores potenciais serviram para a determinação das equações de comportamento e coeficientes de correlação para todas as propriedades.

Tabela 47: resultados das propriedades no estado endurecido para os TKCV

Traço 1:m	a/c	Resistência à compressão (MPa)				Ec (GPa)	US (m/s)	CI (C)
		1 dia	7 dias	28 dias	91 dias			
1:3	0,35	44,0	70,7	82,2	82,3	41,1	5060	675
		43,5	68,4	81,2	91,3	40,4	5040	894
		-	-	-	-	39,2	5040	-
1:4	0,41	41,0	68,2	69,4	91,3	39,5	4935	1012
		39,5	58,6	73,8	79,9	38,4	5020	835
		-	-	-	-	40,0	4872	-
1:5	0,50	27,0	45,4	60,2	76,5	34,9	4859	1067
		22,1	45,4	59,8	68,6	35,2	4872	873
		-	-	-	-	36,0	4980	-
1:6	0,61	16,8	37,5	44,7	54,3	26,0	4935	954
		15,5	35,7	46,3	57,3	30,9	4872	955
		-	-	-	-	30,6	4859	-
1:7	0,67	14,2	29,7	31,5	40,1	24,9	4822	1100
		15,8	22,2	34,0	44,8	25,5	4762	1153
		-	-	-	-	23,0	4773	-
1:8	0,77	11,9	19,5	23,5	27,2	19,5	4795	1150
		11,3	19,3	27,5	29,2	23,2	4668	1150
		-	-	-	-	15,9	4691	-

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

Observa-se, na tabela 47, que teve de ser moldado um traço mais pobre, o 1:8, uma vez que as resistências à compressão desta família de concretos foram mais elevadas que os previstos, obrigando, para que se pudesse comparar com os níveis de resistência inferiores, misturar um ponto extremo. As relações a/c foram parecidas com as dos concretos anteriores, os quais serviram de ponto de aproximação.

Destacam-se as resistências à compressão dos traços mais ricos, que chegaram aos 91 MPa aos 91 dias, utilizando-se as mesmas proporções 1:m. Isto se deve ao fato de se considerar a cinza volante como um agregado miúdo, o que é coerente quando do estado fresco da mistura, já que este material não demanda elevada quantidade de água; porém, no estado endurecido, este contribui de forma decisiva e positiva nas propriedades de durabilidade e mecânicas. Ao mesmo tempo em que os TKCV apresentaram altas resistências à compressão, se comparados

às dos concretos anteriores, também se obtiveram elevados valores de módulo de elasticidade e velocidade de propagação da onda de ultra-som e, simultaneamente, reduzidos valores para a penetração dos íons cloretos.

Na tabela 48, estão ilustradas as equações de comportamento e os coeficientes de determinação, para os TKCV.

Tabela 48: equações de comportamento e r^2 para os TKCV

Propriedade		Equação de comportamento	R ²
Resistência à compressão (Lei de Abrams)	1 dia	$f_{cj1d} = \frac{142,66}{26,97^{a/c}}$	0,98
	7 dias	$f_{cj7d} = \frac{219,33}{20,92^{a/c}}$	0,98
	28 dias	$f_{cj28d} = \frac{218,37}{14,43^{a/c}}$	0,98
	91 dias	$f_{cj91d} = \frac{279,06}{15,89^{a/c}}$	0,95
Traço unitário 1:m (lei de Lyse)		$m = 11,557 * a / c - 0,8754$	1,00
Consumo de cimento por m ³		$C = \frac{2076,4}{m + 0,7417}$	1,00
Custo		$Cu = C * (0,467 + 0,0202 * m)$	1,00
Teor de argamassa seca		$\alpha = 53$ (constante)	1,00
Módulo de elasticidade		$E_c = \frac{\log(f_{cj28d}) - 0,8757}{0,0251}$	0,99
Propagação da onda de ultra-som		$US = 14,148 * E_c + 4471,50$	0,98
Penetração de íons cloretos		$Cl = -\frac{(US - 5491,1)}{0,5968}$	0,96

Nota-se que, novamente, os coeficientes de correlação foram elevados, aumentando a confiança no cálculo de traços intermediários. Observa-se que o comportamento das correlações anteriores foi confirmado para esta família de CAA. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade se relacionaram de forma exponencial e as outras propriedades

apresentaram um comportamento linear, mostrados no diagrama de desempenho. Com estas equações pode-se desenhar os diagramas de dosagem e desempenho, objetivos finais dos métodos de dosagem estudados nesta tese. A figura 44 representa o diagrama de dosagem desta família de concreto.

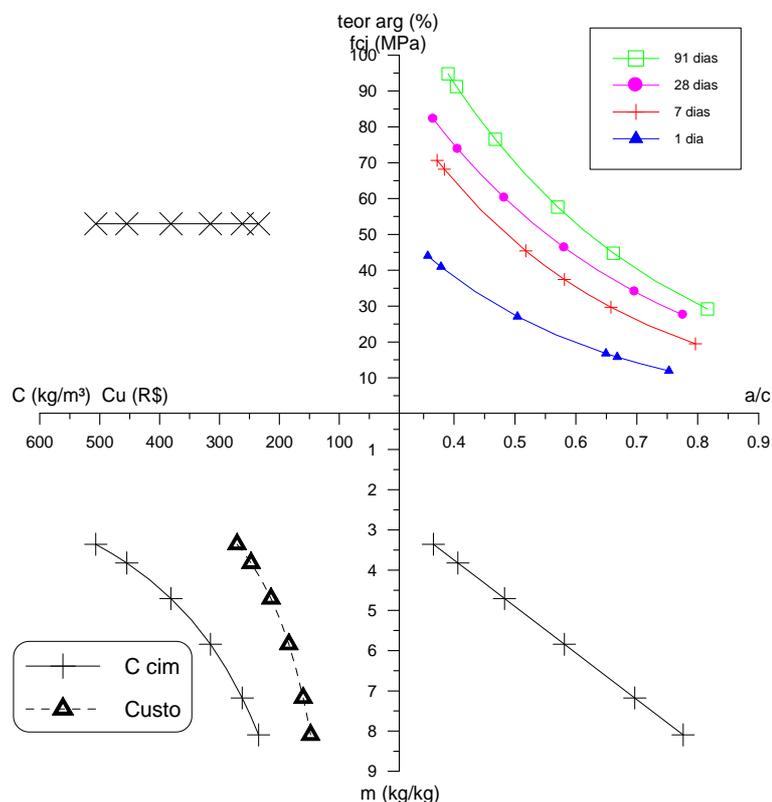


Figura 44: diagrama de dosagem do TKCV

No diagrama de dosagem da figura 44, observa-se, claramente, o ganho de resistência à compressão ao longo das idades de ensaio, inclusive um ganho expressivo dos 28 aos 91 dias. A facilidade de se determinar, aproximadamente, o custo de qualquer CAA, em qualquer idade de rompimento, a partir da resistência à compressão, do consumo de cimento ou do traço 1:m, por exemplo, é uma vantagem considerável.

Na figura 45, apresenta-se o diagrama de desempenho dos TKCV. Como os valores de penetração de íons cloretos foram consideravelmente inferiores aos dos concretos anteriores, teve de ser alterada a escala do eixo y desta propriedade, para que a reta pudesse ser melhor visualizada.

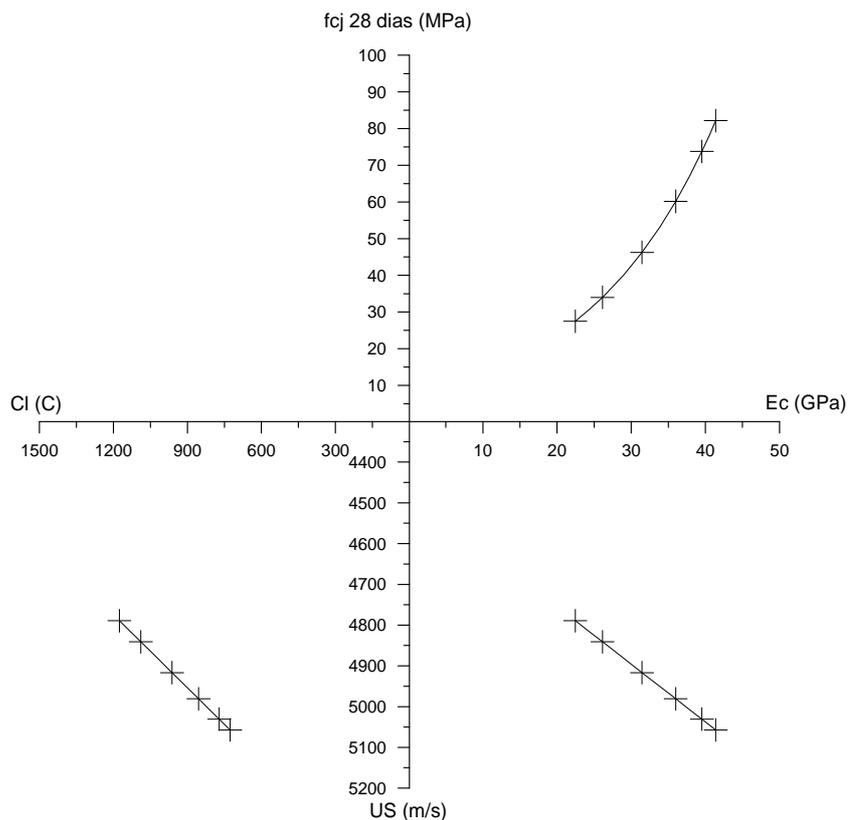


Figura 45: diagrama de desempenho do TKCV

6.2.3 CAA com areia fina dosado através do método proposto com uma granulometria de brita – AF1B

A tabela 49 mostra os resultados dos diversos ensaios realizados para a caracterização dos AF1B, ou seja, com empacotamento dos agregados, sendo que esta família é composta por apenas uma granulometria de agregado graúdo. Com os valores pode-se determinar as equações de comportamento e os coeficientes de correlação, para se desenhar os diagramas de dosagem e desempenho.

Tabela 49: resultados das propriedades no estado endurecido para os AF1B

Traço 1:m	a/c	Resistência à compressão (MPa)				Ec (GPa)	US (m/s)	CI (C)
		1 dia	7 dias	28 dias	91 dias			
1:3	0,37	28,9	59,3	69,5	79,8	36,0	4922	1940
		28,2	60,9	62,2	77,2	36,0	4948	2169
		-	-	-	-	35,7	4935	-
1:4,33	0,46	22,2	44,7	53,9	59,5	34,3	4715	2763
		21,7	43,3	50,6	63,3	35,3	4750	2646
		-	-	-	-	-	4850	-
1:5,66	0,59	13,8	31,9	35,6	39,9	26,0	4726	4968
		13,2	32,3	35,1	42,4	31,1	4726	5121
		-	-	-	-	28,5	4680	-
1:7	0,79	7,4	19,8	23,1	27,2	25,8	4524	8019
		7,8	19,4	22,4	26,2	24,9	4492	6611
		-	-	-	-	25,5	4492	-

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

Nesta família, puderam ser realizados quatro traços para cobrir toda a faixa de resistência à compressão desejada. Já se sabia, baseado nos concretos anteriores, que, para os CAA com areia fina, o traço mais rico seria o 1:3 e o mais pobre 1:7. Então, intercalou-se dois traços intermediários.

As relações a/c foram similares às anteriores, enquanto que a resistência à compressão abrangeu toda a faixa requerida, como era de se esperar. Os valores de módulos de elasticidade foram inferiores aos dos CAA já analisados, porém similares aos dos CCV, apesar de possuírem um teor de argamassa variável e superiores aos dos CCV. Os dados do ensaio de ultra-som foram decrescendo à medida que a mistura ficava mais pobre, e foram similares à outra família de CAA a TKAF. Porém a penetração de íons cloretos foi superior para esta família, se comparada às três anteriores, apresentando uma penetração baixa para o traço 1:3, moderada para o traço 1:4,33 e alta para os dois últimos concretos, segundo a classificação proposta pela ASTM C1202 (1997). Ressalta-se que as comparações entre as mesmas faixas de propriedades, entre todas as misturas, que serão apresentadas nos itens subsequentes, complementarão estas explicações.

Assim, os resultados serviram para a determinação das equações de comportamento e dos coeficientes de correlação, mostrados na tabela 50. Observa-se que, para esta família de concretos, há uma equação que relaciona o teor de argamassa com o consumo de cimento, propriedade variável de acordo com o traço escolhido.

Tabela 50: equações de comportamento e r^2 para os AF1B

Propriedade		Equação de comportamento	R ²
Resistência à compressão (Lei de Abrams)	1 dia	$f_{cj1d} = \frac{92,07}{23,46^{a/c}}$	1,00
	7 dias	$f_{cj7d} = \frac{155,27}{13,99^{a/c}}$	1,00
	28 dias	$f_{cj28d} = \frac{179,72}{14,08^{a/c}}$	0,99
	91 dias	$f_{cj91d} = \frac{205,35}{13,43^{a/c}}$	0,99
Traço unitário 1:m (lei de Lyse)		$m = 9,3444 * a / c - 0,1466$	0,97
Consumo de cimento por m ³		$C = \frac{1995,9}{m + 0,5766}$	1,00
Custo		$Cu = C * (0,467 + 0,0165 * m)$	1,00
Teor de argamassa seca		$\alpha = 0,0213 * C + 51,065$	1,00
Módulo de elasticidade		$Ec = \frac{\log(f_{cj28d}) - 0,2186}{0,0438}$	0,97
Propagação da onda de ultra-som		$US = 38,391 * Ec + 3531,7$	0,98
Penetração de íons cloretos		$Cl = -\frac{(US - 5100,7)}{0,0838}$	0,97

A curva de dosagem, que está representada na figura 46, foi determinada com base nas equações de comportamento acima e deve, sempre, ser utilizada no sentido horário a partir da resistência à compressão ou no sentido anti-horário a partir do teor de argamassa. Nela, já se pode observar a reta inclinada que relaciona o teor de argamassa seca em porcentual com o consumo de cimento por metro cúbico. Novamente, o diagrama relaciona resistência à compressão com a relação a/c, com o traço 1:m, com o custo e com o consumo de cimento e,

por fim, com o teor de argamassa. O eixo 'y' positivo é dividido entre a primeira e a última propriedade, e o eixo 'x' negativo é dividido entre o consumo de cimento e o custo dos traços.

A legenda que foi acrescentada no diagrama de dosagem representa o percentual do traço unitário 'm' que pertence a cada um dos agregados. Neste caso, observa-se que, da totalidade do 'm', a areia fina representa 10%, enquanto que a areia regular 40,6%, restando 49,4% para o agregado graúdo. Estes valores foram extraídos dos cálculos anteriores que foram realizados e só estão representados aqui para agilizar a leitura do diagrama e cálculo dos concretos.

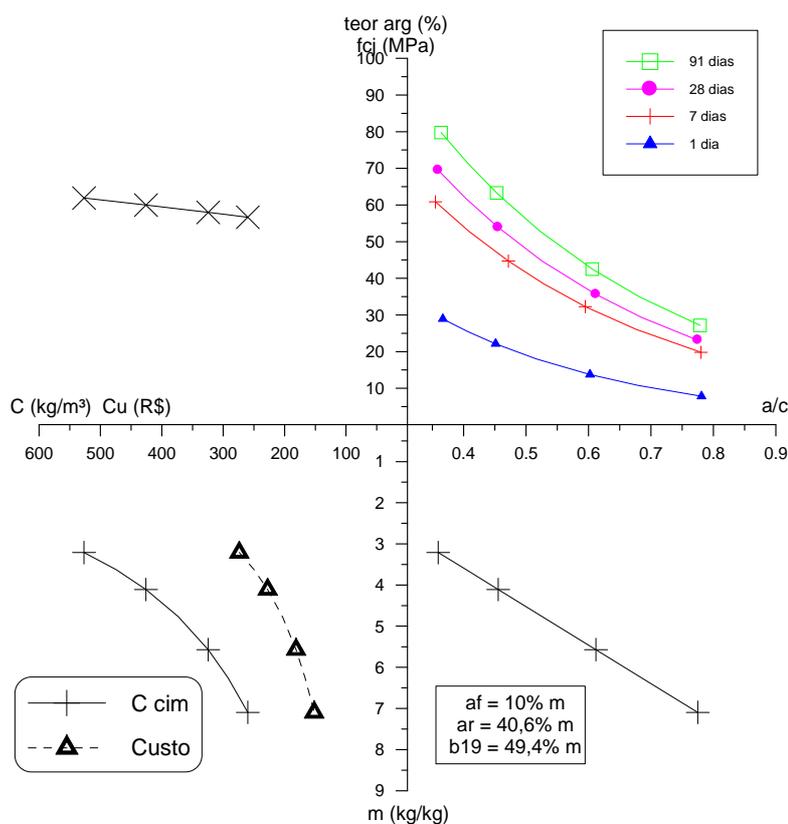


Figura 46: diagrama de dosagem do AF1B

Outro fato que se observa é que o teor de argamassa seca aumenta à medida que o concreto vai ficando mais rico, pois aumenta o consumo de cimento e diminui, conseqüentemente, a quantidade de agregados. Sabe-se que o ideal era que ocorresse o oposto, aumentasse o teor de argamassa para traços pobres, já que estes necessitam de mais material fino para ajudar na trabalhabilidade. Porém é importante ressaltar que o método proposto não utiliza o teor de argamassa como um parâmetro para calcular traços, ao contrário do IPT/EPUSP (1992) e do Tutikian (2004), apenas calcula esta propriedade no final para verificações e comparações com outros traços conhecidos. Logo, não há como alterar previamente este fato.

Na figura 47, está representado o diagrama de desempenho para o AF1B. O diagrama de desempenho representa a resistência à compressão com o módulo de elasticidade, com a velocidade da onda de ultra-som e com a penetração de íons cloretos no concreto, e deve-se, sempre, ser utilizada no sentido horário a partir do eixo 'y' positivo.

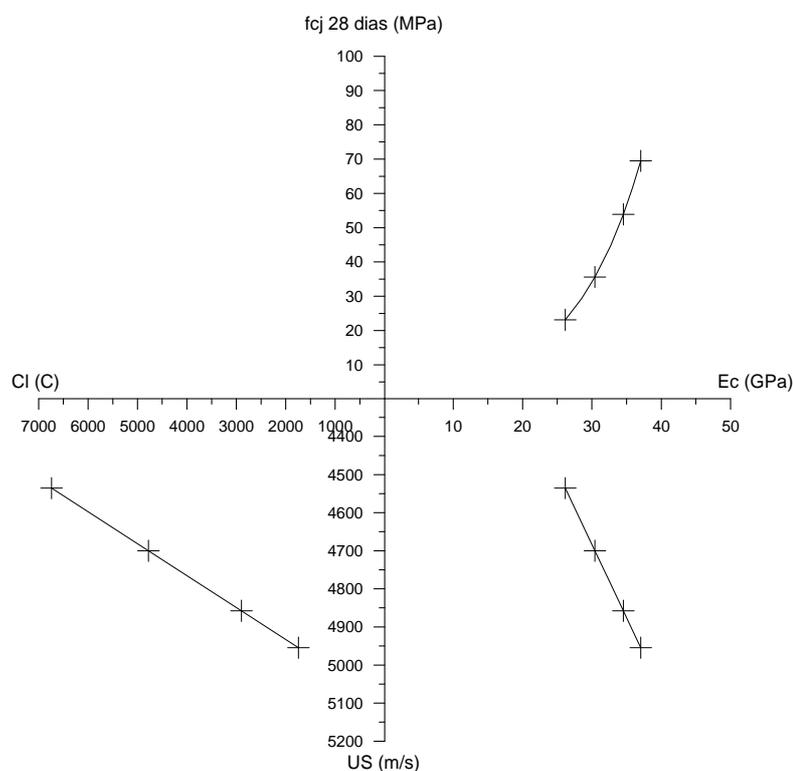


Figura 47: diagrama de desempenho do AF1B

6.2.4 CAA com cinza volante dosado através do método proposto com uma granulometria de brita – CV1B

A tabela 51 ilustra os resultados para os CV1B, com uma classe de agregado graúdo, dosados através do método proposto. Os valores descritos permitiram a determinação das equações de comportamento e dos coeficientes de correlação das diversas propriedades, para que, ao final, fosse possível o desenho dos diagramas de dosagem e desempenho.

Tabela 51: resultados das propriedades no estado endurecido para os CV1B

Traço 1:m	a/c	Resistência à compressão (MPa)				Ec (GPa)	US (m/s)	CI (C)
		1 dia	7 dias	28 dias	91 dias			
1:3	0,36	37,5	62,8	52,5	79,8	36,1	4842	1553
		37,3	64,5	76,5	77,2	35,3	4878	1307
		-	-	-	-	34,6	4884	-
1:4,66	0,48	21,3	39,4	53,8	59,5	32,0	4810	1782
		22,3	39,4	53,8	63,3	30,0	4847	1952
		-	-	-	-	30,1	4872	-
1:6,33	0,62	15,0	31,2	37,9	39,9	28,2	4639	1908
		14,5	30,5	39,8	42,5	28,5	4657	2051
		-	-	-	-	27,8	4668	-
1:8	0,78	9,5	20,3	26,9	27,2	24,2	4601	2272
		9,0	19,5	26,3	26,2	23,2	4439	2095
		-	-	-	-	23,0	4601	-

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

Já que se sabia, aproximadamente, os traços extremos para cobrir toda a faixa de valores necessários às comparações futuras, apenas calcularam-se outros dois pontos intermediários, compondo, assim, a família com quatro traços.

Observa-se que as relações a/c foram similares às das outras famílias de concreto, para os mesmos traços 1:m. As resistências à compressão novamente foram superiores para a família de CAA com cinza volante, por este material fino, que foi considerado um agregado na dosagem, agir como um componente pozolânico, melhorando as propriedades mecânicas e de durabilidade das misturas.

Os resultados de módulo de elasticidade foram levemente inferiores aos das famílias de CAA dosados através do método Tutikian (2004). Isto se deve, provavelmente, por estes concretos apresentarem um teor de argamassa superior, o que pode prejudicar a propriedade analisada. Porém, o módulo de elasticidade para esta família foi similar aos dos CCV, para os traços mais ricos, e superior para os traços mais pobres, mesmo com o teor de argamassa mais elevado. Certamente o empacotamento mais eficiente deste método permite este ganho.

A penetração de íons cloretos, segundo a norma **ASTM 1202/97**, para os CAA com cinza volante com uma classe de agregado graúdo, é considerada baixa para os três primeiros traços e moderada para o traço mais pobre. Novamente os valores para a família com cinza volante foram inferiores, apresentando uma diferença expressiva para as outras famílias. Porém os valores destas misturas foram superiores aos da família TKCV.

A seguir, na tabela 52, estão as equações de comportamento com seus respectivos coeficientes de determinação, para cada propriedade. Como já se podia esperar, o teor de argamassa para esta família é variável, apresentando, assim, sua equação de comportamento.

Tabela 52: equações de comportamento e r^2 para os CV1B

Propriedade		Equação de comportamento	R ²
Resistência à compressão (Lei de Abrams)	1 dia	$f_{cj1d} = \frac{110,43}{24,22^{a/c}}$	0,99
	7 dias	$f_{cj7d} = \frac{153,285}{13,60^{a/c}}$	0,97
	28 dias	$f_{cj28d} = \frac{179,60}{11,516^{a/c}}$	1,00
	91 dias	$f_{cj91d} = \frac{166,53}{8,07^{a/c}}$	1,00
Traço unitário 1:m (lei de Lyse)		$m = 11,828 * a / c - 1,1144$	1,00
Consumo de cimento por m ³		$C = \frac{2100,2}{m + 0,8748}$	1,00
Custo		$Cu = C * (0,467 + 0,0185 * m)$	1,00
Teor de argamassa seca		$\alpha = 0,0237 * C + 47,978$	1,00
Módulo de elasticidade		$E_c = \frac{\log(f_{cj28d}) - 0,5072}{0,0382}$	1,00
Propagação da onda de ultra-som		$US = 24,345 * E_c + 3995,3$	0,98
Penetração de íons cloretos		$Cl = -\frac{(US - 5366,8)}{0,3586}$	0,94

A figura 48 ilustra a curva de dosagem para a família de CV1B, relacionando a resistência à compressão com a relação a/c, com o traço unitário 1:m, com o custo e consumo de cimento

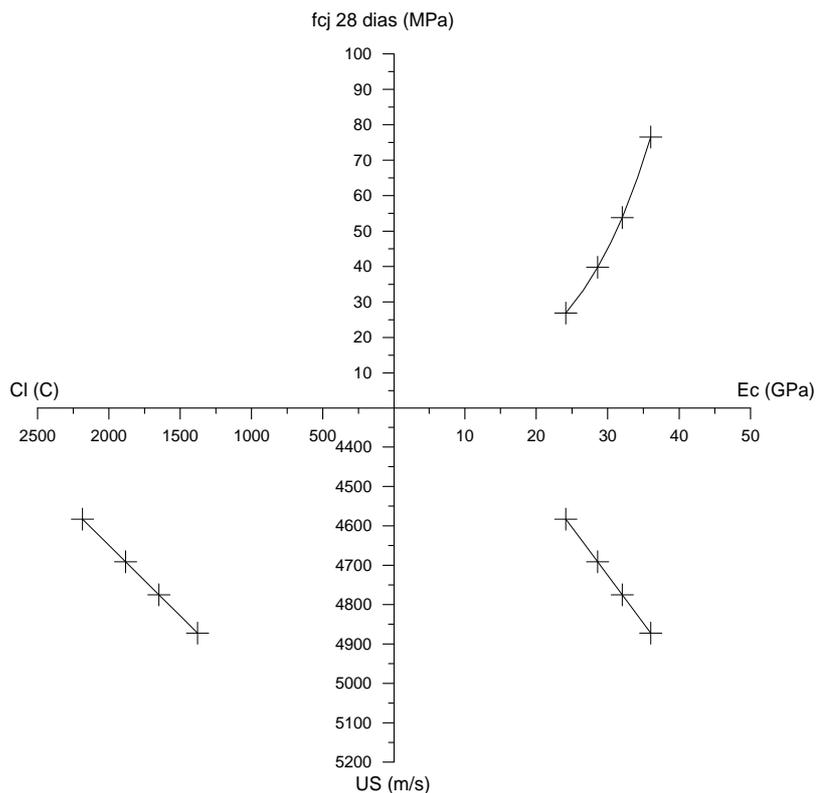


Figura 49: diagrama de desempenho do CV1B

6.2.5 CAA com areia fina dosado através do método proposto com duas granulometrias de brita – AF2B

A tabela 53 ilustra os resultados das propriedades no estado endurecido para os AF2B. Os valores potenciais foram utilizados para o cálculo das equações de comportamento, coeficientes de correlação e, conseqüentemente, o desenho dos diagramas de dosagem e desempenho.

Tabela 53: resultados das propriedades no estado endurecido para os AF2B

Traço 1:m	a/c	Resistência à compressão (MPa)				Ec (GPa)	US (m/s)	Cl (C)
		1 dia	7 dias	28 dias	91 dias			
1:3	0,36	43,1	63,9	73,3	95,0	40,6	4910	2825
		42,8	64,5	70,5	93,2	40,6	4860	3066
		-	-	-	-	40,0	4900	-
1:4	0,42	31,9	52,8	60,2	89,9	37,4	4897	3321
		33,1	53,0	59,5	94,2	38,3	4872	3054
		-	-	-	-	36,8	4835	-
1:5	0,53	21,7	40,1	44,7	69,5	35,9	4762	4091
		20,7	39,8	46,9	76,8	32,6	4774	3825
		-	-	-	-	34,6	4774	-
1:6	0,71	14,0	29,7	35,8	61,6	30,3	4680	4590
		15,9	28,2	36,9	57,4	28,5	4657	4617
		-	-	-	-	30,0	4668	-
1:7	0,77	10,6	24,1	27,3	42,7	24,1	4429	5451
		10,4	23,8	28,4	40,0	22,7	4424	5751
		-	-	-	-	20,9	4429	-

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

Após os ensaios das propriedades no estado endurecido, observou-se que os valores alcançados não tinham sido suficientes para abranger toda a faixa requerida, assim foi necessário a mistura de um traço mais pobre, o 1:7.

A mesma tabela mostra relações a/c similares às das famílias anteriores, para os mesmos traços. Também se nota a maior resistência à compressão, um dos motivos da execução do último traço, provavelmente, devido ao empacotamento mais eficaz que se obteve com a introdução de uma classe a mais de agregado graúdo. Outro fato interessante, foi o crescimento da resistência à compressão entre as idades de 28 para 91 dias, com alguns pontos apresentando valores mais de 60% superiores, com a média de 53%, fato que, normalmente não ocorre de forma tão incisiva para concretos sem pozolanas. Os valores de módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ondas de ultra-som foram crescendo à medida que os traços ficavam mais ricos e abrangeram toda a faixa esperada, acompanhando a resistência à compressão. E a penetração dos íons cloretos foi elevada para esta família, sendo que foi moderada para os dois traços mais ricos e alta para os traços 1:5, 1:6 e 1:7.

A seguir a tabela 54 ilustra as equações de comportamento e os coeficientes de correção para a família com CAA com areia fina dosada pelo método proposto com duas granulometrias de agregados graúdos empacotados com a areia regular.

Tabela 54: equações de comportamento e r^2 para os AF2B

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

Na figura 50 está representado o diagrama de dosagem para o AF2B. Este gráfico representa as resistências à compressão, em várias idades, o traço unitário 1:m, o custo e o consumo de cimento e o teor de argamassa, que é variável para este método. Como sempre, o diagrama deve ser utilizado apenas para aproximações, pois para cálculos precisos usa-se as equações de comportamento. Nota-se que a curva de custo serve, somente, para as próprias determinações, não podendo ser utilizada como passagem para o teor de argamassa.

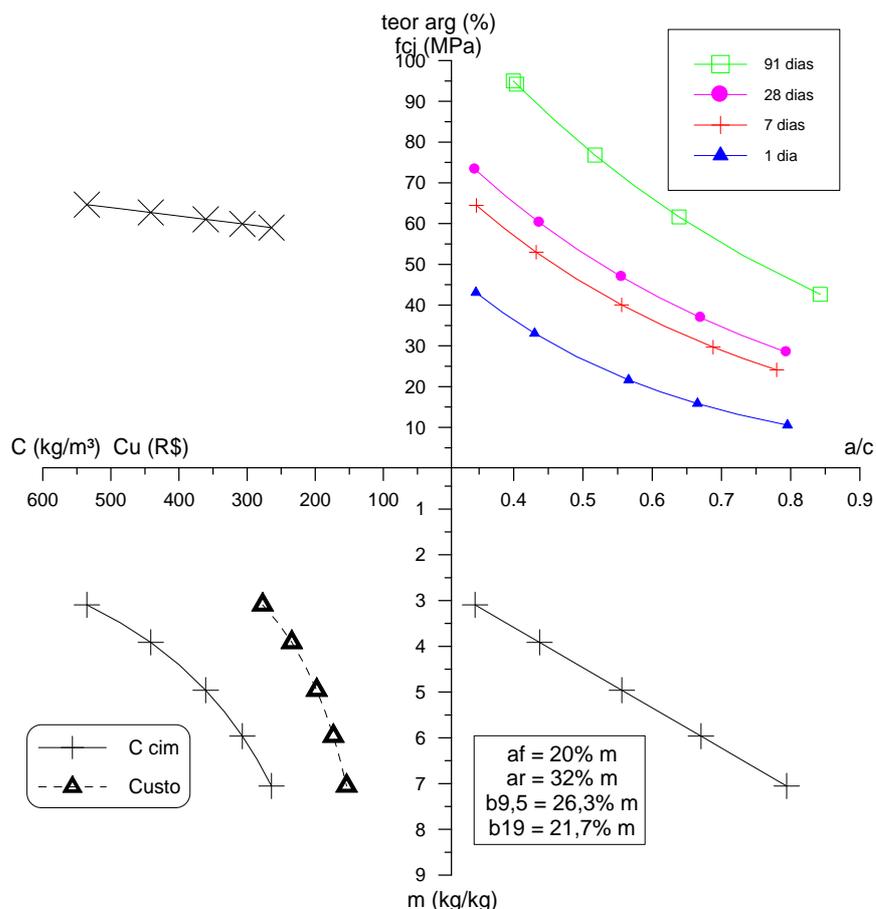


Figura 50: diagrama de dosagem do AF2B

Observa-se na figura o grande crescimento, já relatado, da resistência à compressão dos 28 aos 91 dias, assim como do 1 aos 7 dias. Também se pode notar que a inclinação da curva do custo não acompanha a do consumo de cimento, ou seja, não se tem um aumento dos valores proporcional à medida que se aumenta o consumo de cimento, quando se torna a mistura mais rica.

E, por fim, a figura 51 representa o diagrama de desempenho para esta mesma família, o qual representa as relações entre a resistência à compressão com o módulo de elasticidade, este com a velocidade de propagação de ondas de ultra-som e esta com a penetração de íons cloretos. Logicamente o diagrama deve ser utilizado no sentido horário e para aproximações.

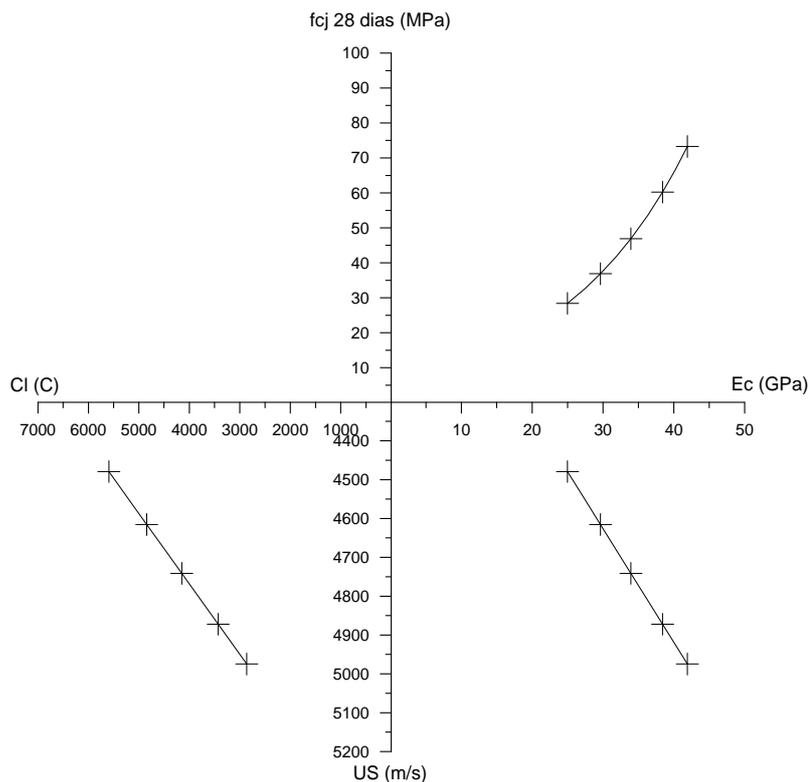


Figura 51: diagrama de desempenho do AF2B

6.2.6 CAA com cinza volante dosado através do método proposto com duas granulometrias de brita – CV2B

Por fim, serão apresentados os resultados das propriedades no estado endurecido para os CV2B, conforme a tabela 55. Como já ocorreu anteriormente, foram utilizados os maiores valores das resistências à compressão, módulo de elasticidade e velocidade de propagação das ondas de ultra-som e os menores valores para a penetração de íons cloretos.

Observa-se que, para esta família, foi necessária a confecção de seis traços, já que os valores obtidos com os primeiros pontos foram muito elevados, não possibilitando comparações com as outras famílias para faixas de resistências à compressão baixas. Assim, mais dois traços pobres foram incluídos, aumentando de quatro para seis a quantidade de pontos.

Tabela 55: resultados das propriedades no estado endurecido para os CV2B

Traço 1:m	a/c	Resistência à compressão (MPa)				Ec (GPa)	US (m/s)	CI (C)
		1 dia	7 dias	28 dias	91 dias			
1:3	0,38	43,0	66,3	84,2	88,0	38,2	4910	480
		42,8	66,4	80,0	89,0	41,0	4932	450
		-	-	-	-	40,0	4900	-
1:4	0,43	36,8	63,3	80,0	84,9	37,7	4910	500
		37,9	62,6	79,9	89,0	38,4	4738	600
		-	-	-	-	34,8	4822	-
1:5	0,51	28,6	50,9	60,9	73,6	36,8	4860	612
		26,1	50,1	62,6	76,8	32,4	4850	620
		-	-	-	-	34,9	4872	-
1:6	0,60	19,5	36,8	49,9	63,5	34,3	4859	720
		19,1	35,1	52,3	61,7	31,0	4802	675
		-	-	-	-	31,3	4798	-
1:7	0,66	14,8	31,2	33,6	47,0	29,9	4810	780
		15,2	27,0	36,4	42,3	30,5	4750	775
		-	-	-	-	30,4	4780	-
1:8	0,72	11,6	28,7	37,7	45,4	29,0	4760	1000
		12,3	28,6	38,5	40,0	28,5	4750	868
		-	-	-	-	27,9	4750	-

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

Os valores de resistência à compressão foram elevados, se comparados com os das famílias anteriores, chegando, nos dois traços mais ricos, a 80 MPa aos 28 dias. O ponto 1:6, que originalmente era o mais pobre, alcançou mais de 50 MPa aos 28 dias, impossibilitando extrapolar a equação de comportamento para o cálculo de 30 MPa, por exemplo. Assim foram incluídos os traços 1:7 e 1:8, que também foram elevados, mas, apesar de não recomendado pelo método, extrapolou-se para realizar as comparações com as outras opções de dosagem, para fins acadêmicos. Estes altos resultados foram ocasionados, provavelmente, devido ao método proposto considerar a cinza volante como um agregado e pelo empacotamento mais eficaz. Então como este componente forma produtos resistentes, aumenta consideravelmente a resistência à compressão, algo benéfico para quem escolhe pozolanas como material fino.

Outro fato interessante é o pequeno crescimento de resistência à compressão dos 28 para os 91 dias. Como se utilizou a cinza volante, pozolana que reage em longas idades (mais de 28 dias), era de se esperar por um maior crescimento, o que não ocorreu.

Os resultados do módulo de elasticidade e da velocidade de propagação das ondas de ultra-som aumentaram junto com a resistência à compressão, mesmo que estas misturas apresentassem um teor de argamassa mais elevado, o que poderia prejudicar, principalmente o módulo. Observa-se que o ensaio de velocidade de propagação das ondas de ultra-som apresentou uma alta variabilidade, se comparado com os outros ensaios. Este fato não foi novidade, já que neste ensaio normalmente ocorre isto. E, assim como para as outras famílias, o comportamento do módulo de elasticidade foi exponencial em relação a resistência à compressão e a equação linear se repetiu para as outras duas propriedades do diagrama de desempenho.

A penetração de íons cloretos foi novamente baixa, assim como para as outras famílias com cinza volante, sendo, todos os traços, considerados de penetração baixa, segundo a norma **ASTM 1202/97**.

A seguir, na tabela 56, são apresentados as equações de comportamento e os coeficientes de correlação para todas as propriedades do CV2B.

Tabela 56: equações de comportamento e r^2 para os CV2B

Propriedade		Equação de comportamento	R^2
Resistência à compressão (Lei de Abrams)	1 dia	$f_{cj1d} = \frac{191,16}{45,48^{a/c}}$	1,00
	7 dias	$f_{cj7d} = \frac{194,446}{15,125^{a/c}}$	0,98
	28 dias	$f_{cj28d} = \frac{237,30}{13,88^{a/c}}$	0,95
	91 dias	$f_{cj91d} = \frac{223,56}{9,24^{a/c}}$	0,94
Traço unitário 1:m (lei de Lyse)		$m = 14,127 * a / c - 2,2532$	0,99
Consumo de cimento por m^3		$C = \frac{2116,2}{m + 0,934}$	1,00
Custo		$Cu = C * (0,4658 + 0,0205 * m)$	1,00
Teor de argamassa seca		$\alpha = 0,0251 * C + 46,038$	1,00
Módulo de elasticidade		$Ec = \frac{\log(f_{cj28d}) - 0,607}{0,0326}$	0,96
Propagação da onda de ultra-som		$US = 13,426 * Ec + 4387,3$	0,96
Penetração de íons cloretos		$Cl = -\frac{(US - 5112,9)}{0,3955}$	0,98

Observa-se, nos coeficientes de correlação acima, que todos foram superiores a 0,94, aumentando o grau de confiabilidade das equações de comportamento e, conseqüentemente, cálculos posteriores.

Na figura 52 consta o gráfico de dosagem para esta família de CAA, lembrando que este gráfico correlaciona resistência à compressão em várias idades com a relação a/c , com o traço unitário 1:m, com o custo e com o consumo de cimento e com o teor de argamassa variável. Este gráfico deve sempre ser utilizado no sentido horário a partir da resistência à compressão ou no sentido anti-horário, a partir do teor de argamassa. A curva de custo não pode ser utilizada como passagem para o teor de argamassa. O eixo 'y' positivo representa, ao mesmo tempo, a resistência à compressão e o teor de argamassa, enquanto que o eixo 'x' negativo é dividido entre o consumo de cimento e o custo.

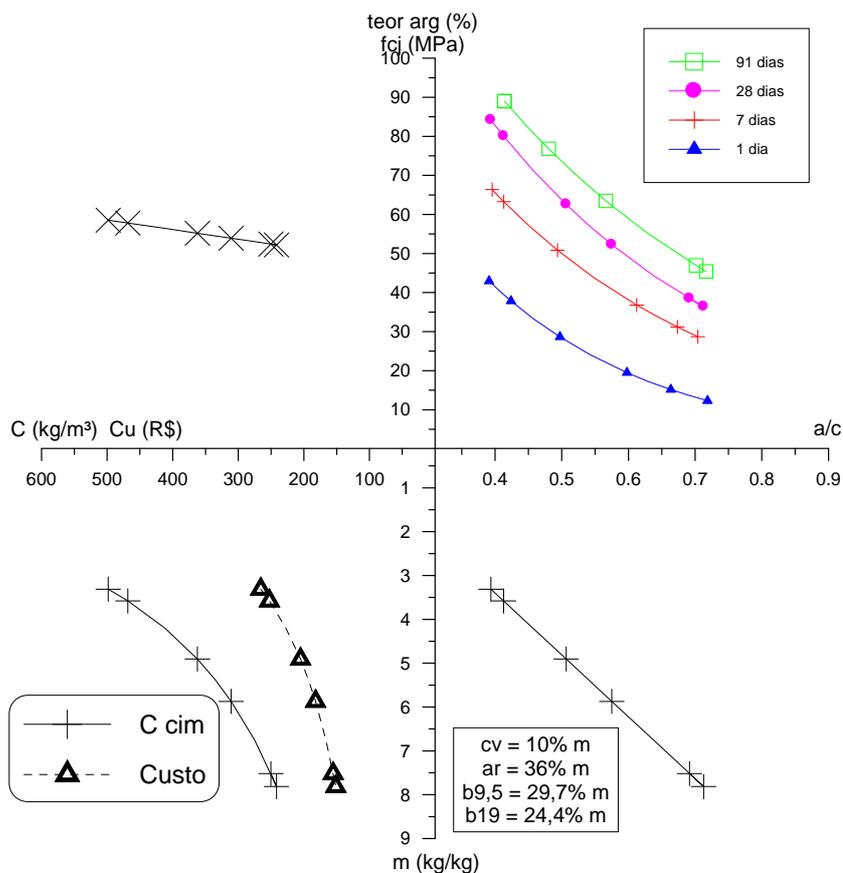


Figura 52: diagrama de dosagem do CV2B

Observa-se no gráfico de dosagem que o crescimento da resistência à compressão mais expressivo foi entre 1 e 7 dias, porém com um aumento similar entre as outras idades, chegando a valores altos aos 28 e 91 dias. Se nota o teor de argamassa variável, novidade do método proposto, e a curva de custo, facilitando sua determinação para qualquer ponto do diagrama.

Na figura 53 está o diagrama de desempenho para a família de CV2B. Estas curvas correlacionam a resistência à compressão, com o módulo de deformação, com a velocidade de propagação de onda de ultra-som e com a penetração de íons cloretos. Deve ser utilizado no sentido horário.

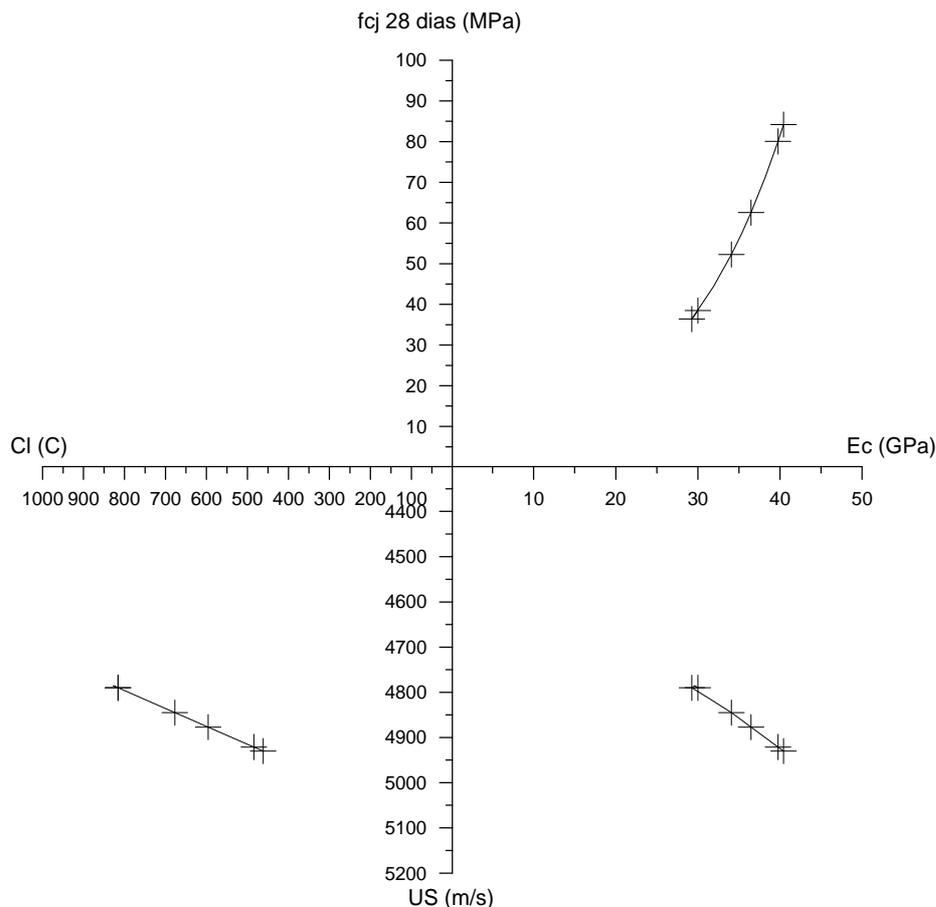


Figura 53: diagrama de desempenho do CV2B

6.3 COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

Neste item serão comparados os custos e as propriedades de todos os concretos para as mesmas resistências à compressão, a uma determinada idade. Serão utilizadas as idades de 1, 7, 28 e 91 dias, e comparados os custos para estas misturas, assim como o módulo de elasticidade, a velocidade de propagação da onda de ultra-som e a penetração de íons cloretos.

Os valores que serão utilizados na comparação variam conforme a idade de ruptura, já que também mudam as necessidades. Ou seja, a resistência à compressão para um concreto a 1 dia não é a mesma para 28 dias, já que nas primeiras idades apenas se busca um módulo de elasticidade, através da verificação da resistência inicial para desfôrma, no caso de obras convencionais, ou saque de peças, no caso de indústrias de pré-fabricados. E sabe-se que a mistura atingirá resistências mais elevadas nas idades posteriores, tendo, inclusive, que respeitar os requisitos mínimos da **NBR 6118/03** para concretos armados ou protendidos. Então, conforme mostra a tabela 57, foram fixadas as resistências à compressão de 10, 20 e 30 MPa para 1 dia, 20, 30, 40 e 50 MPa para 7 dias e 40, 50, 60 e 70 MPa para 91 dias para as

comparações. A idade de 28 dias, por ser a mais considerada por projetistas e outros profissionais da área, será a idade padrão para as comparações com o módulo de elasticidade, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e penetração de íons cloretos. Então para esta foram determinadas as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa, já que as primeiras equivalem a resistência à compressão característica utilizada normalmente de 20 a 35 MPa, e as últimas seriam para comparar o início do considerado concreto de alta resistência.

Tabela 57: valores de resistência à compressão (MPa) para cada propriedade

Propriedade		Valores de resistência (MPa)
Resistência à compressão	1 dia	10, 20 e 30
	7 dias	20, 30, 40 e 50
	28 dias	25, 30, 40, 50 e 60
	91 dias	40, 50, 60 e 70
Módulo de elasticidade		25, 30, 40, 50 e 60
Propagação de ondas de ultra-som		25, 30, 40, 50 e 60
Penetração de íons cloretos		25, 30, 40, 50 e 60

Quando as famílias de concreto não atingiram os valores de comparação ou foram mais elevados, extrapolou-se as curvas de dosagem, apesar de não recomendado pelos métodos utilizados. Apenas aos 28 dias não se pode comparar o CAA dosado pelo método proposto com duas granulometrias de agregado graúdo com 25 MPa, por sua primeira resistência ser de 38,5 MPa, valor muito superior, podendo ocorrer distorções se extrapolado até o número requerido.

É importante ressaltar que estes valores foram escolhidos analisando as utilizações mais correntes de concreto nas obras, porém se poderia escolher outros valores, dependendo da aplicação e da opinião do profissional responsável. Com as equações de comportamento já determinadas é simples o cálculo das misturas para qualquer resistência, sendo assim, bastaria recalcular para outros valores.

Nas próximas figuras e tabelas, e nas anteriores, conforme já descrito, as misturas estão representadas por símbolos, para simplificar a escrita. O CCV significa concreto convencional, o TKAF é o CAA com areia fina dosado pelo método Tutikian (2004) e o TKCV é o CAA com cinza volante dosado pelo método Tutikian (2004). Já o AF1B é o CAA com areia fina dosado pelo método proposto com uma granulometria de brita, enquanto que o CAA com cinza volante dosado pelo método proposto com uma granulometria de brita é o CV1B. Por fim, os CAA dosados pelo método proposto com duas granulometrias de agregado graúdo são o AF2B com areia fina e CV2B com cinza volante. Estas siglas serão utilizadas constantemente nos próximos gráficos.

6.3.1 Resistência à compressão a 1 dia

A primeira comparação é o custo das misturas para a resistência à compressão de 10, 20 e 30 MPa a 1 dia. A tabela 58 mostra todos os valores em reais (R\$) para todos os concretos.

Tabela 58: valores em reais (R\$) para as resistências à compressão de 10, 20 e 30 MPa a 1 dia

f_{cj} (MPa)	CCV	TKAF	AF1B	AF2B	TKCV	CV1B	CV2B
10	136,90	149,51	163,30	151,44	144,11	148,11	141,80
20	176,61	184,60	217,37	189,52	180,86	194,15	177,70
30	217,98	217,12	276,44	225,91	217,88	244,97	214,12

A figura 54 representa os mesmos custos citados acima, porém em uma forma mais fácil de visualizar os comparativos. No eixo 'x' estão as resistências à compressão de 10, 20 e 30 MPa, enquanto que no eixo 'y' estão os custos em reais (R\$) para todos os concretos.

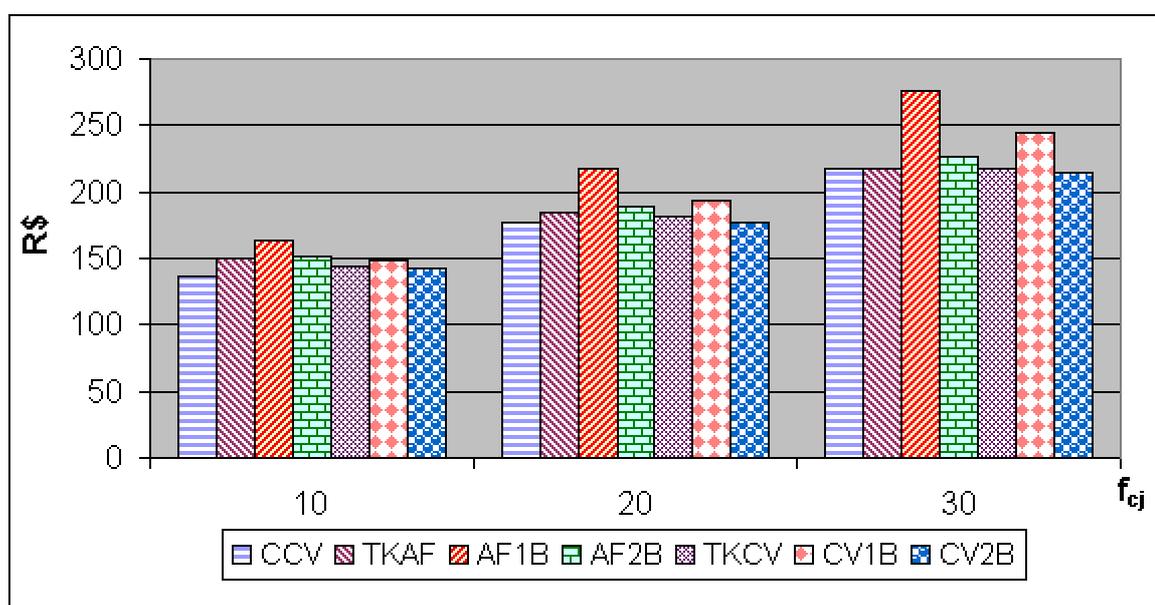


Figura 54: comparativo de resistência à compressão a 1 dia

Observa-se que todos os concretos alcançaram as resistências à compressão esperadas a 1 dia, apesar de que alguns, como o AF1B e o CV1B, apresentaram um retardo inicial, sendo necessário a utilização de traços mais ricos, prejudicando seus desempenhos quanto ao custo. Por sinal, estas duas famílias de CAA também foram as únicas que foram apresentando uma diferença de custo maior em relação ao CCV, à medida que o valor de resistência à compressão aumentava. Inclusive o TKAF, TKCV e o CV2B tiveram custos muito parecidos ou até inferiores que o CCV para as resistências à compressão de 20 e 30 MPa, mostrando que se pode utilizar um CAA com o mesmo custo de materiais, para a mesma faixa de resistência a 1 dia, que um CCV.

Observa-se que, ao analisar todas as famílias para as três faixas de resistência, o CCV foi o grupo mais econômico, como era de se esperar. Após está o CV2B, TKCV, TKAF, AF2B, CV1B e o AF1B. Nota-se que os concretos com cinza volante sempre foram mais econômicos que os com areia fina, quando dosados através dos mesmos métodos. Para esta idade de rompimento, os CAA dosados pelo método proposto nesta tese com uma granulometria de brita foram os menos econômicos, por apresentarem um retardo inicial. Após a análise do comportamento desta CAA nas próximas idades, se poderá concluir que isto foi apenas coincidência. E as famílias de CAA dosados pelo método proposto com duas granulometrias de brita e pelo método Tutikian (2004) apresentaram, em geral, um custo similar, com leve vantagem do AF2B sobre o TKAF e o oposto do TKCV sobre o CV2B.

6.3.2 Resistência à compressão aos 7 dias

A tabela 59 mostra os custos para todos os concretos rompidos aos 7 dias, para as resistências à compressão de 20, 30, 40 e 50 MPa. Observa-se que apesar dos valores de comparação de resistência à compressão parecerem elevados, principalmente os mais altos, há casos em que se requer assim, como em desfôrmas precoces ou pré-tensionamentos.

Tabela 59: valores em reais (R\$) para as resistências à compressão de 20, 30, 40 e 50 MPa aos 7 dias

f_{cj} (MPa)	CCV	TKAF	AF1B	AF2B	TKCV	CV1B	CV2B
20	130,06	150,12	151,68	145,39	146,62	144,28	133,28
30	163,92	178,56	178,97	171,05	168,33	171,35	155,85
40	207,01	208,94	207,41	197,82	190,14	200,87	180,24
50	266,68	242,98	238,46	227,04	213,05	234,73	207,89

A figura 55 mostra os comparativos em forma de gráfico. No eixo 'x' estão as resistências à compressão de 20, 30, 40 e 50 MPa, enquanto que no eixo 'y' estão os custos em reais (R\$) de todas as famílias de concreto.

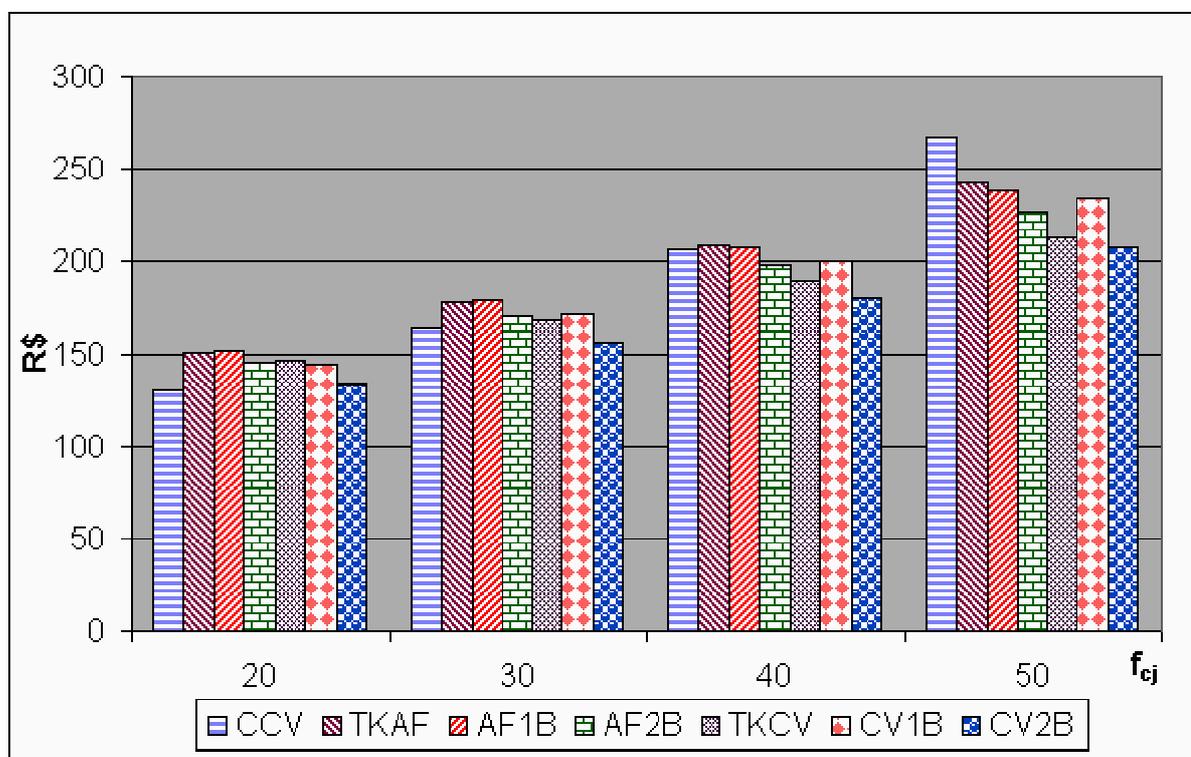


Figura 55: comparativo de resistência à compressão aos 7 dias

Esta figura demonstra alguns pontos interessantes e, talvez, não esperados. Para a resistência à compressão de 20 MPa o CCV foi o mais econômico, enquanto que para 30 MPa já foi superado pelo CV2B e ficou muito próximo das outras famílias, menos de 5% mais econômico que o AF2B, TKCV e CV1B, por exemplo. Porém aos 40MPa e aos 50MPa, o CCV foi o concreto mais caro, à exceção da comparação com o TKAF aos 40MPa e ainda assim com custos similares. Este fato vem a confirmar a teoria de que os CAA se viabilizam economicamente com mais facilidade para as resistências à compressão maiores, por possuírem mais finos em sua composição em relação aos CCV, o que aumenta o ponto de contato entre os grãos, evitando a segregação da mistura e o empacotamento granulométrico, melhorando suas propriedades no estado endurecido.

Nota-se, com base na tabela 59 e na figura 55, que os CAA dosados pelo método proposto com duas granulometria de brita foram os que apresentaram o melhor desempenho conjunto, se comparados com os outros CAA. Isto quer dizer que esta foi a opção mais econômica, se for considerada uma média entre todas as faixas de resistência e os dois finos utilizados, a

cinza volante e a areia fina. Após, os CAA que se mostraram mais viáveis foram os dosados pelo método Tutikian (2004). Já os CAA dosados pelo método proposto com uma granulometria de agregado graúdo apresentaram, novamente, os maiores custos, porém próximos das outras opções e com o ganho de resistência compatível com o esperado, ao contrário do que ocorreu para a resistência à compressão a 1 dia. Provavelmente estes concretos estão recuperando as propriedades afetadas pelo retardo inicial, causado ou pelo aditivo superplastificante ou pelo fato de os CAA trabalharem com relações a/c menores que os CCV, e podem, inclusive, superar as outras famílias para as idades seguintes.

Em geral, fazendo-se uma média entre todas as faixas de resistência, o CV2B foi o mais econômico, seguido pelo TKCV, AF2B, CV1B, AF1B e TKAF. Observa-se que os CAA com cinza volante foram mais econômicos que seus pares, dosados através da mesma metodologia, com areia fina.

6.3.3 Resistência à compressão aos 28 dias

A tabela 60 mostra os valores para as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa para a idade de rompimento de 28 dias. Observa-se que estes valores são os usualmente utilizados pela indústria da construção, resistência à compressão de projeto (f_{ck}) entre 20 e 35 MPa, com outros valores para comparar as famílias no início do chamado concreto de alta resistência (CAR).

Tabela 60: valores em reais (R\$) para as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa aos 28 dias

f_{cj} (MPa)	CCV	TKAF	AF1B	AF2B	TKCV	CV1B	CV2B
25	129,93	147,73	156,32	146,26	143,43	140,71	131,13
30	144,71	159,68	168,09	157,55	152,90	151,37	139,91
40	180,13	184,65	192,04	180,84	172,05	173,65	158,01
50	228,16	212,05	217,39	205,97	192,16	198,11	177,52
60	299,17	243,12	245,00	233,92	213,88	225,84	199,18

A figura 56 mostra o gráfico comparativo entre todas as misturas para as faixas de resistência citadas aos 28 dias. Nota-se que a resistência à compressão aos 28 dias é, seguramente, a mais usada por projetistas e outros profissionais da área tecnológica para caracterizar o concreto.

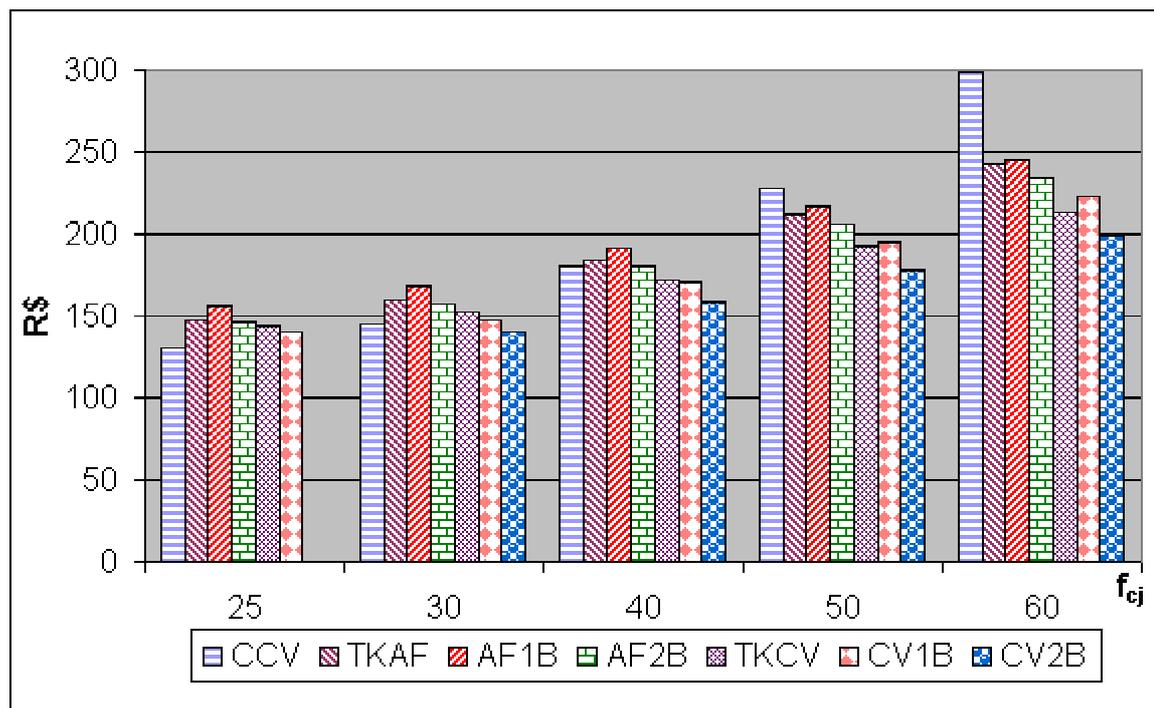


Figura 56: comparativo de resistência à compressão aos 28 dias

Observa-se na figura acima que para as três primeiras resistências o custo do CCV foi inferior que o dos CAA, porém esta diferença foi diminuindo até que, a partir dos 50 MPa, o CCV apresentou dificuldade para acompanhar os CAA, confirmando o comportamento observado aos 7 dias. Com isto, pode-se dizer que, para os materiais escolhidos neste trabalho experimental, os CAA se viabilizam economicamente com mais facilidade para as maiores resistências à compressão, especificamente a partir dos 40 MPa.

Analisando o comportamento geral de cada família se constata que o CV2B foi o CAA mais econômico, seguido do TKCV, CV1B, AF2B, TKAF e AF1B. Inclusive o CV2B foi mais econômico que o CCV para todas as faixas de resistência, à exceção dos 25 MPa onde não pode ser mensurado. Isto significa que utilizar um CAA com cinza volante, dosado através do método proposto nesta tese, para qualquer faixa de resistência à compressão aos 28 dias, é mais econômico que usar um CCV, para estes materiais.

Novamente os CAA com cinza volante apresentaram custos inferiores que os CAA areia fina, independente da forma de dosagem, o que era esperado, uma vez que o primeiro fino foi considerado, no processo de dosagem, como um agregado, quando sabe-se que, na realidade, a cinza volante é um fino pozzolânico.

Também se constatou que os CAA dosados através do método proposto com duas granulometrias de brita foram os mais viáveis economicamente, provavelmente por possuírem

um empacotamento dos grãos melhor, utilizando uma curva granulométrica mais contínua que a dos outros concretos. Já as outras duas formas de dosagem de CAA utilizadas neste trabalho experimental, por Tutikian (2004) e pelo método proposto com uma granulometria de brita, foram similares quanto ao custo, para a idade de 28 dias, porém com vantagem para o primeiro. Estes resultados mostram que, para os materiais escolhidos, a vantagem do método proposto em relação ao Tutikian (2004) é a possibilidade de inclusão de outra faixa de agregado graúdo, seguindo um procedimento, com a possibilidade de se melhorar o empacotamento granulométrico dos agregados.

Finalmente, cabe ressaltar que é possível a mistura de CAA, dependendo dos materiais escolhidos e da forma de dosagem, com custos similares ou até inferiores que o CCV, para a mesma resistência à compressão aos 28 dias.

Como a resistência à compressão aos 28 dias é a mais referendada, logo a mais importante para os profissionais da área, esta comparação será detalhada, com os gráficos individuais das resistências de 30, 40 e 60 MPa. A figura 57 ilustra os custos somente para os concretos com a resistência de 30 MPa.

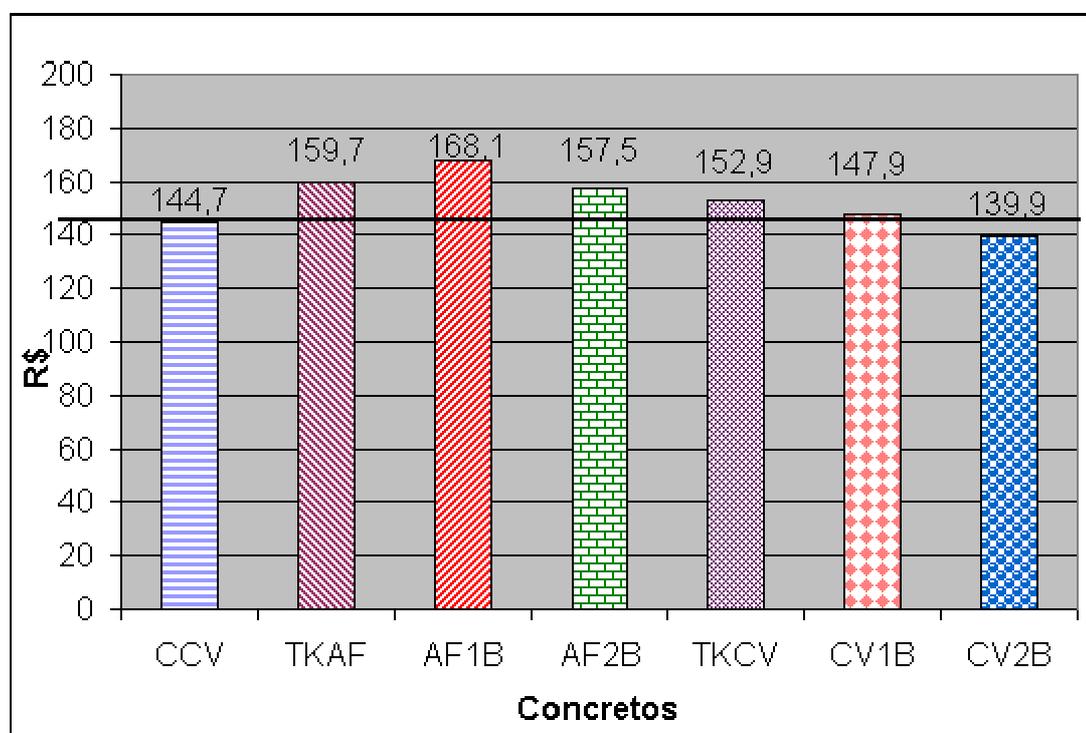


Figura 57: comparativo de custo (R\$) para a resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias

Observa-se que o CV2B está praticamente no mesmo nível do CCV, ainda 3,3% mais econômico. Os outros concretos estão pouco mais dispendiosos que o CCV, em uma faixa

intermediária, caso do CV1B, que apresentou um custo apenas 2,2% superior; do TKCV, 5,7% mais caro; do AF2B, que foi 8,8% mais dispendioso; e do TKAF com um custo 10,3% superior. E o CAA mais anti econômico foi o AF1B, que apresentou um custo de 16,2% superior. Nota-se que o custo do TKCV foi 4,4% inferior que o do TKAF, o do CV1B foi 12% menos que o do AF1B e o CV2B foi 11,2% mais econômico que o AF2B, ou seja, os CAA com cinza volante apresentaram sempre custos inferiores aos com areia fina.

Bem como os CAA dosados pelo método proposto com duas granulometria de brita foram os mais econômicos, com o AF2B sendo 1,4% em relação ao TKAF e 6,3% ao AF1B, e o CV2B com custo inferior ao CV1B em 5,4% e em 8,5% em relação ao TKCV. Com estes valores também se pode constatar que os CAA dosados através do método proposto por Tutikian (2004) foram mais econômicos que os dosados pelo método proposto nesta tese com uma granulometria de agregado graúdo, porém com pequena diferença.

Portanto um CAA pode ter um custo muito próximo ao CCV ou 16% maior para a resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias, dependendo da escolha dos materiais e do método de dosagem.

A figura 58, continuando a seqüência, ilustra os custos dos concretos aos 28 dias para a resistência à compressão de 40 MPa.

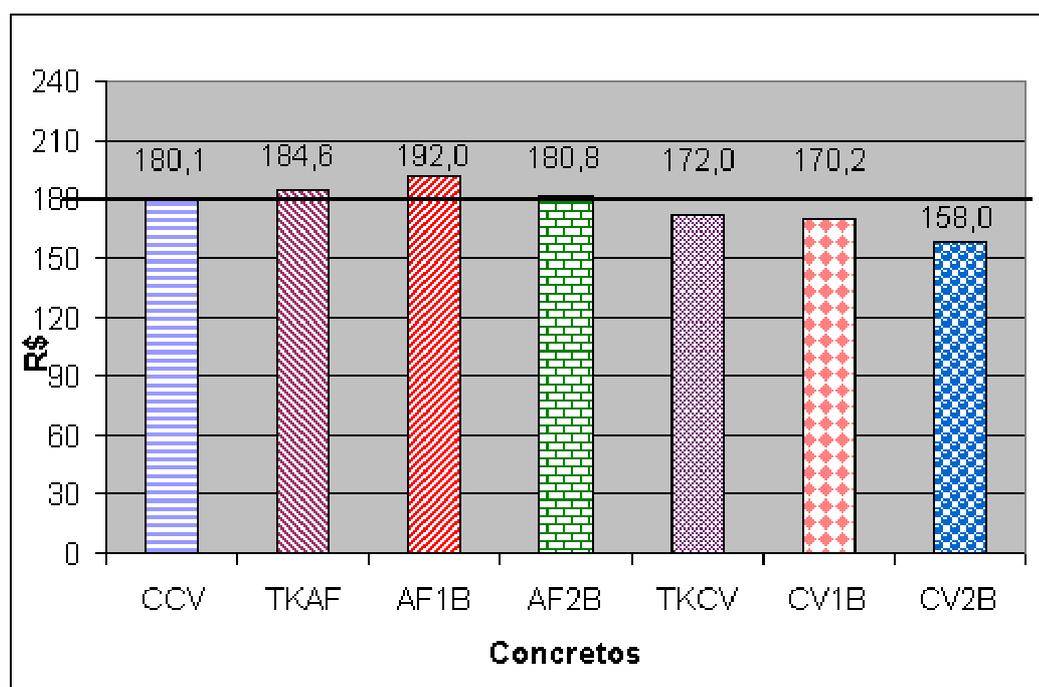


Figura 58: comparativo de custo (R\$) para a resistência à compressão de 40 MPa aos 28 dias

Observa-se nesta figura, visualmente, que a linha horizontal do custo do CCV está acima dos retângulos dos três CAA com cinza volante, e próxima dos CAA com areia fina. Isto mostra que os CAA ficaram mais viáveis economicamente com o aumento da resistência. O CV2B apresentou um custo 12,3% inferior que o CCV, assim como o TKCV foi 4,5% inferior, enquanto que o CV1B foi 3,5% mais econômico. Já os CAA com areia fina foram mais caros que o CCV, em 0,4% para o AF2B, 2,5% para o TKAF e 6,6% para o AF1B.

Assim também está explícito que os CAA com cinza volante novamente foram mais econômicos que os com areia fina, com as diferenças de 6,8% do TKCV para o TKAF, de 9,5% do CV1B para o AF1B e de 12,6% do CV2B para o AF2B.

Entre os métodos de dosagem, o comportamento se manteve igual ao da resistência à compressão de 25 MPa, com o par de CAA dosados pelo método proposto com duas granulometrias de brita como o mais econômico, seguido do par dosado pelo método de Tutkian (2004) com pequena vantagem sobre o proposto com uma granulometria de agregado graúdo.

A última figura, a 59, representa o comportamento dos concretos aos 28 dias com a resistência à compressão de 60 MPa.

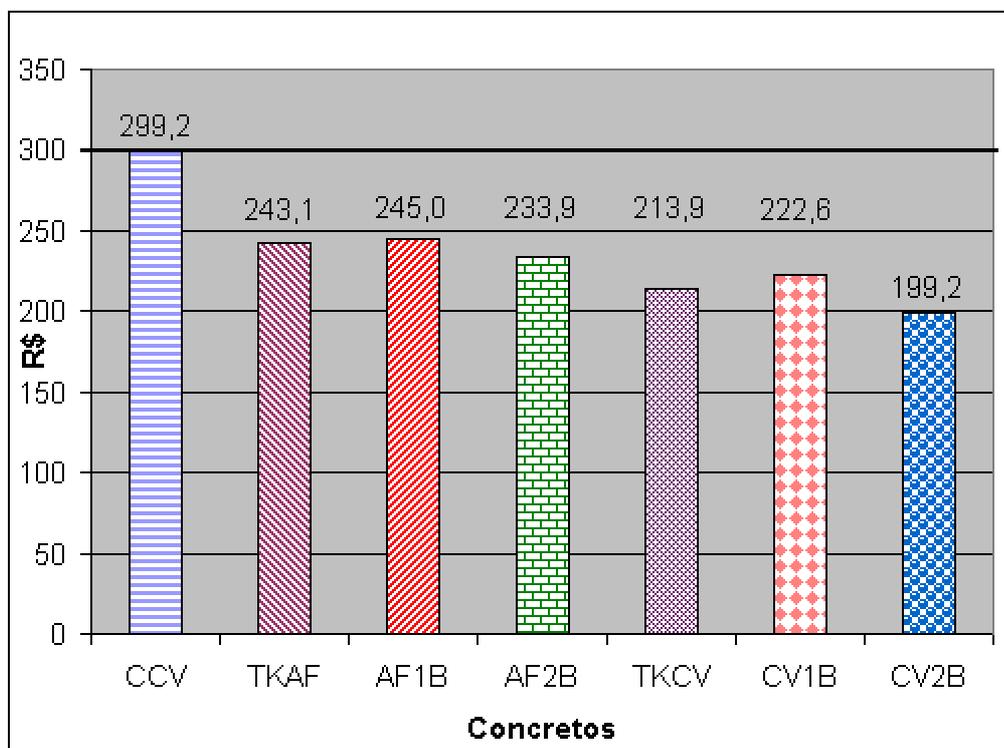


Figura 59: comparativo de custo (R\$) para a resistência à compressão de 60 MPa aos 28 dias

Nota-se que todos os CAA foram mais econômicos que o CCV, para a resistência de 60 MPa aos 28 dias. Assim se pode concluir, para os materiais escolhidos, que à medida que cresce a resistência os CAA são mais viáveis economicamente, por possuírem uma quantidade maior de finos, o que facilita a coesão do CAA, sem a necessidade de muitas alterações na dosagem.

O CAA mais econômico foi o CV2B, com um custo 33,4% inferior que o CCV. É uma diferença considerável, provavelmente devido ao método utilizado para dosar o CCV não ser apropriado para altas resistências e também pela facilidade de se obter este nível com os CAA. Em seguida, estão os TKCV e o CV1B, com as diferenças de 28,5% e 24,5%, respectivamente, devido aos mesmos motivos anteriores. Com custos também inferiores, porém mais próximos, estão os CAA com areia fina, na ordem o AF2B, TKAF e o AF1B, com as diferenças de 21,8%, 18,8% e 18,1%.

Os CAA com cinza volante, para confirmar a tendência, foram sempre mais econômicos que os com areia fina, se comparado os mesmos pares, em 12% de diferença entre o TKCV e o TKAF, em 7,8% entre o CV1B e o AF1B e de 14,8% entre o CV2B e o AF2B. No trabalho experimental, definitivamente, os CAA com cinza volante apresentaram custos inferiores aos dos CAA com areia fina.

A outra tendência que foi mais uma vez confirmada para esta faixa de resistência foi a maior eficácia do método proposto com duas granulometrias de agregado graúdo. As outras duas alternativas de dosagem apresentaram comportamentos similares, porém com vantagem para o proposto por Tutikian (2004).

6.3.4 Resistência à compressão aos 91 dias

Para finalizar as comparações de custo entre todas as famílias de concreto, a tabela 61 mostra os resultados para as resistências à compressão de 40, 50, 60 e 70 MPa para os 91 dias. Observa-se que as primeiras resistências são consideradas normais enquanto que as últimas são altas.

Tabela 61: valores em reais (R\$) para as resistências à compressão de 40, 50, 60 e 70 MPa aos 91 dias

f_{cj} (MPa)	CCV	TKAF	AF1B	AF2B	TKCV	CV1B	CV2B
40	161,95	174,10	177,54	143,61	159,54	159,75	141,65
50	189,90	200,52	198,61	159,57	175,09	182,97	158,65
60	223,69	230,83	221,00	176,52	191,21	209,82	177,63
70	266,16	266,61	245,25	194,87	208,24	241,78	199,34

A figura 60 mostra as comparações entre as famílias de concretos graficamente, com os custos, em reais, no eixo 'y' e as resistências à compressão no eixo 'x'.

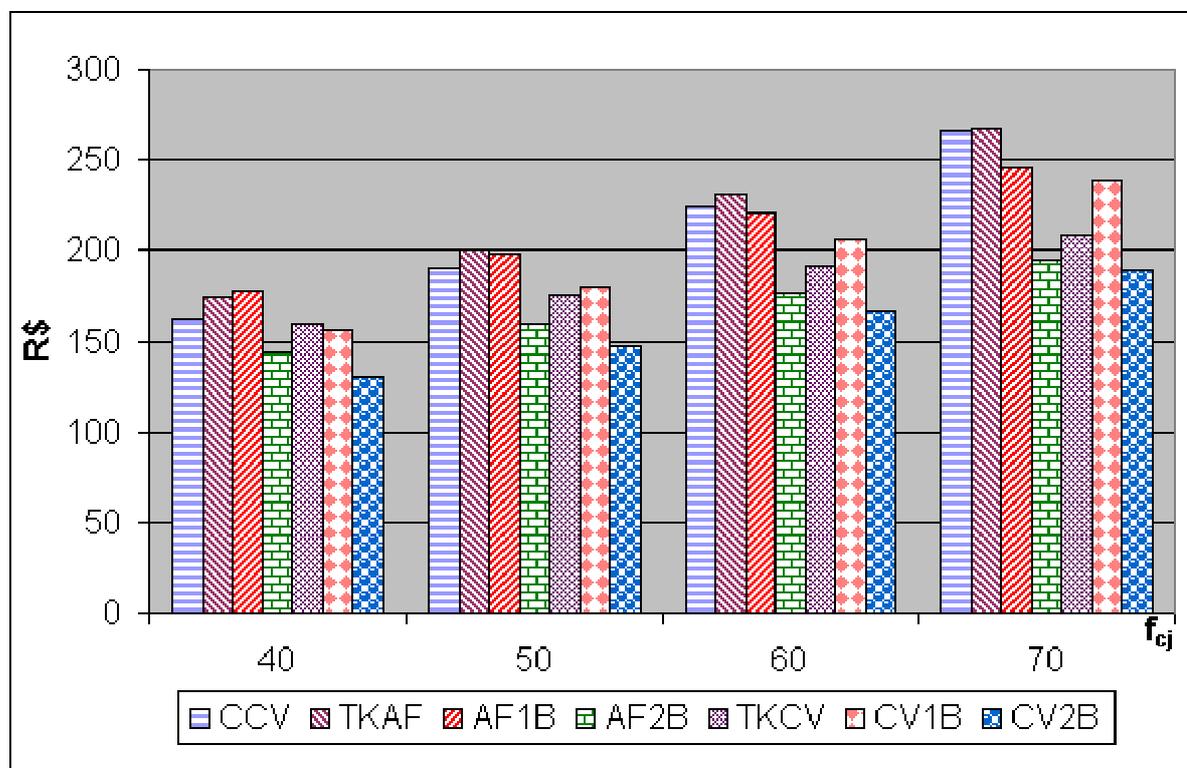


Figura 60: comparativo de resistência à compressão aos 91 dias

Pode-se constatar, através dos dados expostos, que o CCV teve um ganho de resistência considerável, maior que o ganho proporcional dos CAA, entre os 28 dias e os 91 dias. Ganho este que, inclusive, não é usualmente considerado por projetistas ao especificar a resistência à compressão do concreto aos 28 dias. Então o CCV não foi o concreto mais custoso entre os CAR, ao contrário do que ocorreu aos 28 dias, porém ainda assim foi se distanciando das outras famílias à medida que a resistência foi aumentando.

Também se observa que, novamente, o CV2B foi a mistura mais econômica entre os CAA, em linhas gerais, observando todas as faixas de resistência, com o AF2B apresentando custos muito próximos. A seguir vieram o TKCV, CV1B, AF1B e o TKAF. Com a mesma tendência ocorrendo com a última comparação de custo entre as diversas idades de rompimento, pode-se afirmar, para estes materiais usados, que os CAA com cinza volante são mais econômicos que os com areia fina, assim como que a dosagem através do método proposto com duas granulometrias de brita é a mais viável, seguida dos procedimentos de Tutikian (2004) e o proposto na tese, porém com apenas uma granulometria de agregado graúdo.

6.3.5 Módulo de elasticidade

O ensaio do módulo de elasticidade foi realizado aos 28 dias. Assim, foram definidas as mesmas faixas de resistência à compressão para o cálculo do módulo pelas mesmas razões quando do cálculo do custo para a resistência aos 28 dias. Pode-se observar, na tabela 62, os valores para este ensaio.

Tabela 62: valores dos módulos de elasticidade (GPa) para as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa aos 28 dias

f_{ck} (MPa)	CCV	TKAF	AF1B	AF2B	TKCV	CV1B	CV2B
25	17,79	23,10	26,93	22,70	20,81	23,32	24,26
30	22,93	27,14	28,73	25,96	23,96	25,39	26,69
40	31,04	33,52	31,59	31,10	28,94	28,66	30,52
50	37,34	38,46	33,80	35,09	32,80	31,20	33,50
60	42,48	42,50	35,61	38,35	35,95	33,27	35,92

A figura 61 ilustra o comparativo entre todas as famílias de concretos, sendo que as resistências à compressão estão no eixo 'x', enquanto que o eixo 'y' representa o módulo de elasticidade.

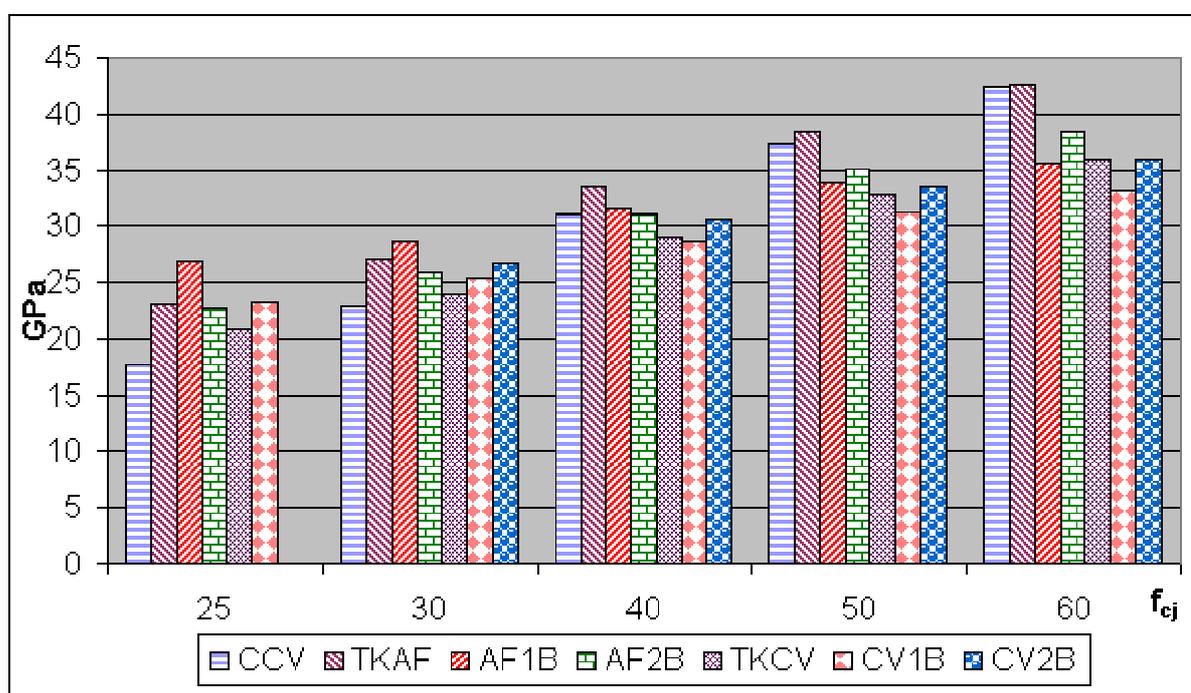


Figura 61: comparativo do módulo de elasticidade aos 28 dias

O módulo de elasticidade apresentou dois comportamentos distintos, um dos 25 aos 40 MPa e outro para as resistências mais elevadas. Observa-se que até os 40 MPa, os módulos dos CAA foram superiores ao do CCV, com exceção dos módulos dos CAA com cinza volante aos 40 MPa. Ainda assim, a diferença pró CAA nas resistências inferiores foi maior que aos 30 MPa

e maior ainda que aos 40 MPa. E a partir dos 50 MPa apenas o TKAF conseguiu acompanhar o ganho de módulo de elasticidade do CCV, enquanto todos os outros CAA foram sendo superados e se afastando cada vez mais. Neste gráfico, nota-se uma clara tendência de diminuição do módulo de elasticidade para os CAA nas resistências à compressão mais elevadas, porém se pode analisar que, mesmo com alguns CAA apresentando um teor de argamassa superior ao CCV, não houve perda de módulo nas resistências inferiores. Assim após este trabalho experimental, se poderia dizer que, para os materiais escolhidos, a confecção de CAA até os 35 MPa de resistência à compressão de projeto não teria problemas com o módulo de elasticidade, e para misturas de resistência superiores a esta, se deveria realizar mais estudos preliminares, dependendo do módulo exigido para determinada aplicação.

Como previsto, os módulos de elasticidade dos CAA com areia fina foram quase sempre superiores aos dos CAA cinza volante, se comparado as mesmas resistências à compressão para os pares dosados através do mesmo método, já que o módulo dos agregados é sempre superior que o da pasta do concreto, formada por cimento, água e, neste caso, cinza volante. Nos CAA dosados através do método proposto ainda ocorre o fato de que os com cinza volante possuem teores de argamassa superiores aos com areia fina, porém o mesmo não ocorre com o par dosado através do método proposto por Tutikian (2004), onde todas as misturas apresentam teores de argamassa idênticos, mas, ainda assim, o com areia fina teve módulo de elasticidade superiores aos com cinza volante para todas as resistências à compressão.

6.3.6 Velocidade de propagação das ondas de ultra-som

As medições da velocidade de propagação das ondas de ultra-som nos concretos foram realizadas com os CP's do ensaio do módulo de elasticidade, assim foram definidas as mesmas faixas de resistência à compressão para as comparações, bem como a idade do ensaio: 28 dias. A tabela 63 mostra os resultados para todos os concretos.

Tabela 63: valores das velocidades de propagação das ondas de ultra-som (m/s) para as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa aos 28 dias

f_{ck} (MPa)	CCV	TKAF	AF1B	AF2B	TKCV	CV1B	CV2B
25	4420	4560	4565	4412	4766	4563	4713
30	4552	4617	4635	4508	4811	4613	4746
40	4760	4708	4744	4658	4881	4693	4797
50	4922	4779	4829	4775	4936	4755	4837
60	5054	4836	4899	4870	4980	4805	4870

A figura 62 ilustra, assim como ocorreu para as comparações anteriores, os valores da tabela anterior, porém em forma de gráfico de barras. No eixo 'x' estão as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa, e no eixo 'y' os valores para a velocidade das ondas de ultra-som.

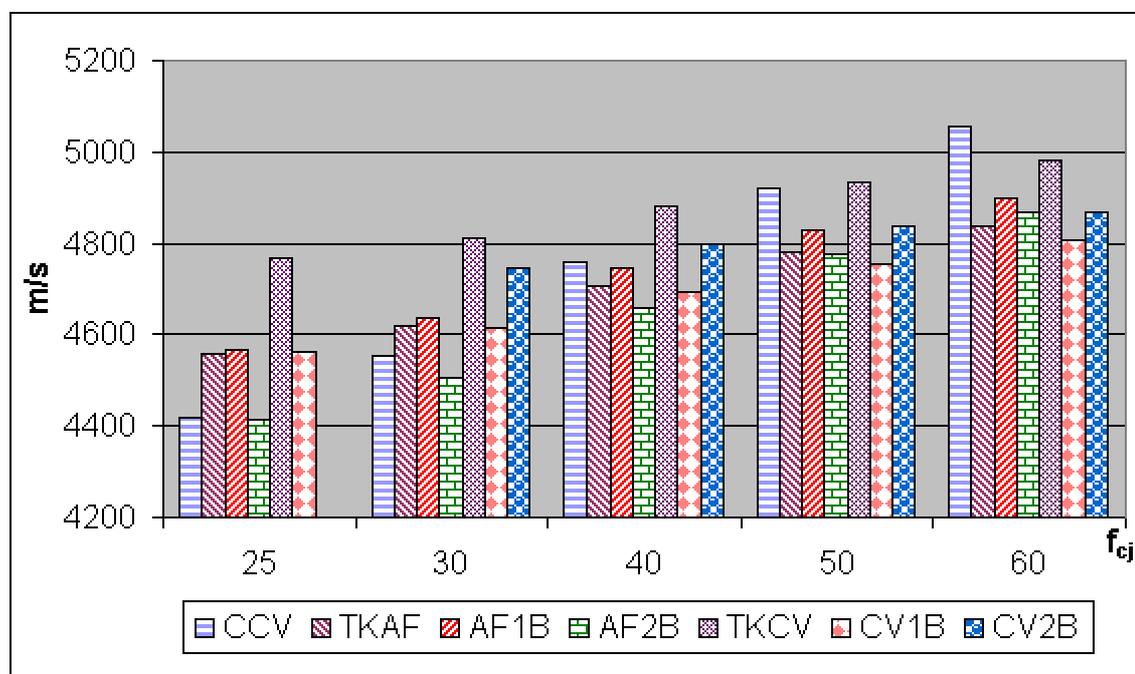


Figura 62: comparativo da velocidade de propagação das ondas de ultra-som aos 28 dias

O comportamento da velocidade de propagação das ondas de ultra-som foi similar que o do módulo de elasticidade, conforme já estudado por Hasparyk (2005), já que até os 30 MPa os CAA foram superiores que o CCV, à exceção do AF2B, e nas resistências mais elevadas o CCV superou a todos os outros. Porém observa-se que a diferença é pequena, uma vez que os CAA que apresentaram a maior diferença percentual em relação ao CCV foi o TKCV na resistência de 25 MPa com 7,8% superior e o CV1B na resistência à compressão de 60 MPa, com 4,9% inferior.

Em relação à comparação com o módulo de elasticidade, foi observado um comportamento inverso, onde os CAA com cinza volante apresentaram valores maiores para as mesmas faixas de resistência do que os CAA com areia fina, dentro dos pares de cada método de dosagem, e à exceção dos concretos dosados pelo método proposto com uma granulometria de agregado graúdo.

Assim como no caso anterior, esta propriedade merece mais estudos à respeito, para preencher algumas lacunas.

6.3.7 Penetração de íons cloretos

Por fim, a tabela 64 mostra os valores obtidos para todos os concretos para a penetração dos íons cloretos. Este ensaio foi realizado aos 56 dias, e, para manter a coerência de comparação entre as propriedades do diagrama de desempenho, foram mantidas as faixas de resistências à compressão escolhidas para os outros itens, ou seja, 25, 30, 40, 50 e 60 MPa.

Tabela 64: valores de penetração de íons cloretos (C) para as resistências à compressão de 25, 30, 40, 50 e 60 MPa aos 28 dias

f_{ck} (MPa)	CCV	TKAF	AF1B	AF2B	TKCV	CV1B	CV2B
25	5163	4452	6388	5965	1215	2242	1011
30	4535	3923	5560	5440	1140	2101	929
40	3545	3086	4253	4610	1022	1879	798
50	2776	2438	3239	3967	931	1707	698
60	2149	1908	2411	3441	856	1566	615

A figura 63 mostra os valores da tabela acima em forma de gráfico de barras, ilustrando no eixo 'x' as resistências à compressão e no eixo 'y' a penetração de íons cloretos.

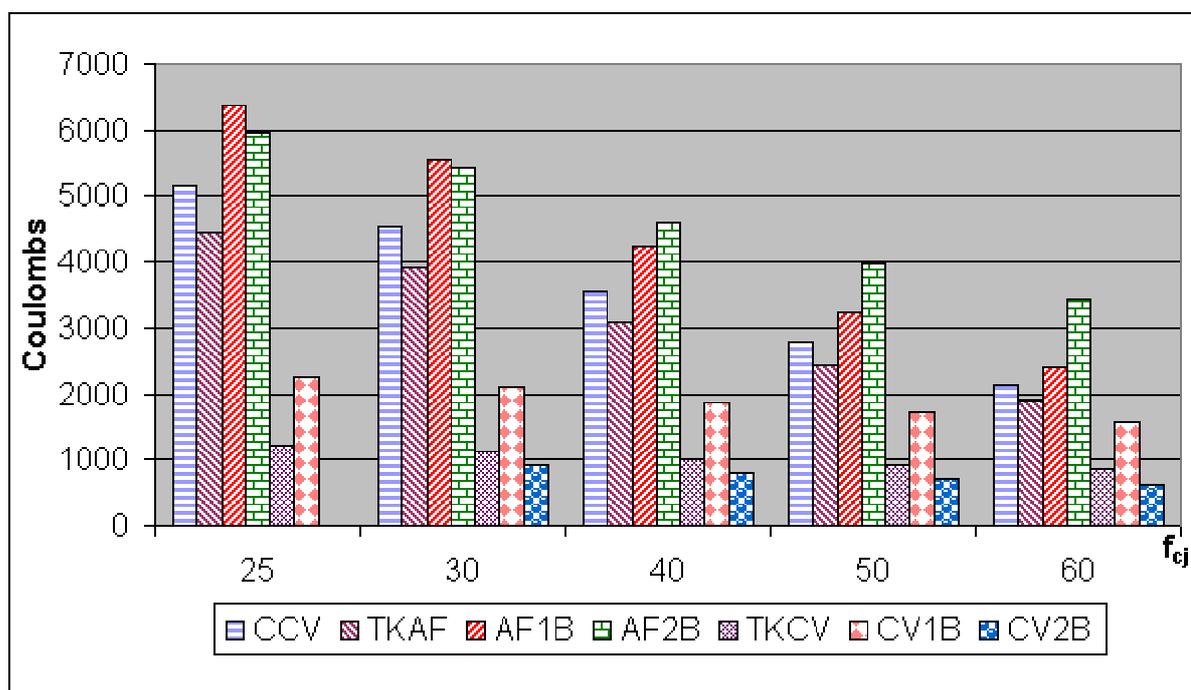


Figura 63: comparativo de penetração de íons cloretos aos 56 dias

Observa-se, na figura acima, que o desempenho dos concretos ocorreu como esperado, com o CCV e os CAA com areia fina apresentando uma penetração de íons cloretos parecidos e os CAA com cinza volante com valores bastante inferiores. Sabe-se que a cinza volante, por ser um material pozolânico, ajuda no fechamento dos poros da mistura, dificultando a entrada de agentes externos, como íons cloretos, por exemplo.

Também se nota que os CAA dosados pelo método Tutikian (2004) apresentaram as menores penetrações, se considerada a média dos pares, apesar de que o CV2B foi a mistura que obteve os menores valores para todas as resistências, provavelmente por ter o melhor empacotamento granular. A família de concreto que não seguiu a lógica esperada foi o AF2B, que, apesar de possuir um empacotamento granular otimizado, apresentou as maiores penetrações para as resistências a partir dos 40 MPa e a segunda maior para as primeiras resistências.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

Nesta tese foi proposto um método de dosagem para CAA, o qual se mostrou altamente embasado, teoricamente, permitindo o proporcionamento de maneira experimental, para quaisquer materiais, dentre os escolhidos, desde que se cumpram alguns requisitos básicos. Apesar de ter sido testado e aprovado no trabalho experimental, deverá ainda ser comprovado sua aplicabilidade com testes realizados por outros autores. E, embora seja cedo para afirmar, as diversas lacunas deixadas por outros métodos podem estar sendo preenchidas, isto sem complicar e exigir vultuosos ensaios preliminares.

Após a parte laboratorial da tese, pode-se concluir que:

- a) as resistências à compressão dos CAA abrangeram a mesma faixa e até superior às dos CCV, tanto os que utilizaram areia fina quanto os com cinza volante. Inclusive todos os CAA, com exceção do TKAF, atingiram resistências próximas ou superiores aos 80 MPa, valor de difícil obtenção para CCV dosado através do método IPT/EPUSP, necessitando utilizar outros métodos de dosagem específicos para CAR. Também as resistências à compressão iniciais, a 1 ou 7 dias, não foram problema para o CAA, já que estes atingiram as mesmas resistências que o CCV para estas idades. Ou seja, o quesito de resistência à compressão foi atingido para os CAA facilmente;
- b) o módulo de elasticidade, conforme comentado anteriormente, apresentou dois comportamentos distintos, um até a resistência à compressão de 40 MPa e outro para as resistências superiores. Nas primeiras resistências, os módulos de elasticidade dos CAA foram, quase sempre, superiores aos do CCV. Porém houve uma inversão para os CAR, com o módulo do CCV crescendo em ritmo maior que os dos CAA, fazendo com que se constatasse a necessidade de estudos mais aprofundados para esta propriedade para as altas resistências. Assim, pode-se concluir que os CAA apresentam módulos de elasticidade iguais ou superiores que o CCV nas resistências à compressão convencionais, e módulos inferiores para os CAR. Mais estudos de confirmação e/ou averiguação são necessários para conclusões mais confiáveis à respeito do assunto;

- c) o comportamento da velocidade de propagação das ondas de ultra-som foi similar ao do módulo de elasticidade, já que os CAA foram iguais ou superiores ao CCV até os 40 MPa e depois superados com uma certa diferença para os CAR. Também são necessários mais estudos a respeito do assunto para conclusões mais apuradas, porém pode-se concluir, com base nestes resultados, que os CAA apresentam as mesmas velocidades de propagação das ondas de ultra-som para as resistências convencionais e inferiores para os CAR;
- d) os CAA com cinza volante apresentaram a penetração de íons cloretos inferior que os CAA com areia fina e aos CCV, os quais foram similares. Ou seja, a utilização de CAA pouco influi na penetração de íons cloretos, o que influi é a escolha do material que será usado para dar coesão à mistura;
- e) para idade de 1 dia, o CCV foi mais econômico que todos os CAA para todas as faixas de resistência à compressão, como era de se esperar, porém esta diferença foi sempre inferior a 10%, valor considerado aceitável, à exceção do AF1B, onde a diferença variou de 15 a 20%. Assim pode-se concluir que os CAA foram viáveis economicamente a 1 dia, inclusive o AF1B, dependendo da aplicação e dos critérios de aceitação;
- f) para a idade de 7 dias o CCV foi mais econômico aos 20 MPa, em cerca de 12% e após foi se aproximando dos CAA até que foi superado nas resistências à compressão superiores. Portanto pode-se concluir que os CAA podem ser viáveis economicamente aos 7 dias, preferencialmente nas resistências mais elevadas, como a partir dos 30 MPa;
- g) nos 28 dias o comportamento geral verificado nas idades anteriores se manteve, com o CCV mais econômico nas resistências à compressão inferiores a 40 MPa, e sendo superado aos poucos até que superado por todos os CAA nas resistências superiores. Pode-se concluir, com base nos resultados observados, que os CAA são totalmente viáveis economicamente a partir dos 40 MPa, por serem mais econômicos, e provavelmente viáveis até a resistência à compressão de 30 MPa, por não serem mais econômicos mas com diferenças sempre inferiores a 15%, o que, dependendo dos critérios de aceitação e da aplicação, pode ser assimilado;

- h) aos 91 dias os CAA foram mais econômicos a partir dos 40 MPa, a exceção do TKAF e do AF1B, e com menos de 5% de diferença de custo. E alguns CAA, como o AF2B e o CV2B, foram mais econômicos para todas as faixas de resistências à compressão. Então pode se concluir que os CAA são viáveis economicamente para as resistências à compressão aos 91, também. Logo, após a análise das quatro principais idades de rompimento dos concretos, 1, 7, 28 e 91 dias, pode se concluir que o custo não deve ser um empecilho para a escolha do CAA, para os materiais escolhidos neste trabalho experimental;
- i) para a definição do método de dosagem mais eficiente entre os escolhidos foi necessário realizar um estudo amplo, englobando questões de custo, propriedades mecânicas e de durabilidade. Todas as três alternativas de dosagem alcançaram altas resistências à compressão iniciais e finais, não sendo este item um critério de escolha. Porém os CAA dosados através do método de dosagem proposto com duas granulometrias de brita sempre foram os mais econômicos para as mesmas resistências, enquanto as outras duas alternativas foram similares. No módulo de elasticidade os CAA se equivaleram, porém com uma certa vantagem para os dosados pelo método Tutikian (2004), o mesmo ocorrendo para a velocidade de propagação de ondas de ultra-som, só que, desta vez, com uma certa desvantagem para os CAA dosados pelo método proposto com duas granulometrias de brita. Por fim, na penetração de íons cloretos o que mais influenciou foi a escolha de materiais e não o método, não sendo possível maiores conclusões a este respeito. Assim pode-se concluir que o método proposto com duas granulometrias de brita foi o mais eficiente, seguido do Tutikian (2004) e do proposto com uma granulometria de agregado graúdo, porém os dois últimos muito próximos. Provavelmente, quanto mais classes de agregado graúdos e miúdos intermediários houvesse, melhor seriam as propriedades dos concretos, e para adicionar classes de brita e areia não é uma tarefa árdua, como já foi visto, para o método proposto;
- j) os CAA com cinza volante foram superiores aos CAA com areia fina em todos os quesitos, à exceção do módulo de elasticidade. Foram mais econômicos em todas as idades de rompimento, tiveram maior velocidade de propagação das ondas de ultra-som e, principalmente, apresentaram uma penetração de íons cloretos muito inferior. Ou seja, sempre que houver duas opções de escolha, deve-se priorizar a cinza volante, ou outro tipo de material pozolânico;

- k) Existe correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade para todos os concretos, definindo as equações de comportamento e os coeficientes de correlação, permitindo, assim, o cálculo de uma das duas propriedades a partir da outra, dentro da faixa obtida;
- l) foi possível correlacionar o módulo de elasticidade com a velocidade de propagação das ondas de ultra-som para todos os concretos, definindo as equações de comportamento e os coeficientes de correlação, permitindo, assim, o cálculo de uma das duas propriedades a partir da outra, dentro da faixa obtida;
- m) foi possível correlacionar a velocidade de propagação das ondas de ultra-som com a penetração de íons cloretos para todos os concretos, definindo as equações de comportamento e os coeficientes de correlação, permitindo, assim, o cálculo de uma das duas propriedades a partir da outra, dentro da faixa obtida;
- n) pôde ser criado um diagrama que abrangesse todas as propriedades citadas acima, o qual foi denominado diagrama de desempenho. Este diagrama permite, através das equações de comportamento ou graficamente, determinar propriedades a partir de outra conhecida, como por exemplo, determinar a penetração de íons cloretos para um concreto a partir de sua resistência à compressão. Observa-se que o diagrama de desempenho pode ser usado com outras propriedades. Neste trabalho foi usado com estas como um exemplo.

Certamente, CAA realizados através deste método poderão ser mais econômicos ou apresentarem propriedades melhores do que os outros métodos, ou não, porém o que deve ser ressaltado, é a existência de uma boa opção de procedimento.

7.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Sugestões para futuros trabalhos são muitas, já que este é assunto interessante e que está longe de se esgotar.

Primeiramente surge a necessidade de se testar este método com outros materiais, em outros locais, a fim de se verificar sua aplicabilidade. Mesmo tendo sido possível a dosagem de uma série de CAA por este autor, ainda não se pode afirmar, com certeza, que o método pode abranger quaisquer materiais.

Sempre que se propõe um método de dosagem surge uma incógnita sobre as vantagens técnicas e econômicas deste em relação a outros existentes. Então, mesmo que tenha sido executado no trabalho experimental em nível de objetivo secundário e com apenas outro método, é necessário que se faça um trabalho comparativo entre os métodos de dosagem para CAA, analisando as vantagens e desvantagens de cada uma das opções. Cita-se o método proposto na tese (com uma, duas ou mais granulometrias de agregado graúdo), o de Tutikian (2004), o de Melo-Repetto (2005), o de Gomes (2002), o de Okamura (1997), o de Nan Su *et al.* (2001) e outros como possíveis candidatos.

Também se deve estudar as propriedades de módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ondas de ultra-som, principalmente para as resistências à compressão mais elevadas, a partir dos 40 MPa. Como foi visto no trabalho experimental, os CAA tendem a apresentar uma diminuição destas propriedades em relação ao CCV.

É necessário o aprofundamento das questões quanto à pressão nas fôrmas exercida pelo CAA, mais especificamente na questão do cálculo das solicitações e resistência em peças verticais. Alguns autores, como descrito no capítulo 2, vêm estudando o item e propondo formas de cálculo, porém o assunto ainda está incipiente.

Com estes pontos, novamente o estudo do CAA terá avançado bastante, porém, ainda longe do esgotamento total do assunto.

REFERÊNCIAS

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C469. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression.** ASTM 469/94.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1202. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.** ASTM 1202/97.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto - procedimento.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251: agregado em estado solto – Determinação da massa unitária.** Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23: cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

BARBOSA, L.A.G.; LAVANDOSCKI, F.L.; Novas tecnologias e o concreto auto-adensável. **In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO.** CD-ROM, Bento Gonçalves, 2007.

BEM-AÏM, R. *Etude de la texture des empilements de grains. Application à la détermination de la perméabilité des mélanges binaires em régime moléculaire, intermédiaire, laminaire.* Thèse d'Etat de l'Université de Nancy. França, 1970.

BIGNOZZI, M.C.; SANDROLINI, F. *Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete.* **In: Cement and Concrete Research**, n° 36, p.735-739, 2006.

BILLBERG, P. *Fine mortar rheology in mix design of SCC.* **In: 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete.** Suécia, p.47-58, 1999.

- BILLBERG, P. *Form pressure generated by self-compacting concrete. In: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Islândia, p.271-280, 2003.
- BILLBERG, P. *Development of SCC static yield stress at rest and its effect on the lateral form pressure. In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.
- BILLBERG, P. *Influence of superplasticizers and slag blended cement on the rheology of fine mortar part of concrete*. s/d.
- BOUZOUBAË, N.; LACHEMI, M. *Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash preliminary results. In: Cement and Concrete Research*, n. 31, p. 413-420, 2001.
- BRAMESHUBER, W.; UEBACHS, S. *Investigations on the formwork pressure using self-compacting concrete. In: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Islândia, p.281-287, 2003.
- BROUWERS, H.J.H; RADIX, H.J. *Self-compacting concrete: theoretical and experimental study. In: Cement and Concrete Research*, n° 35, p. 2116-2136, 2005.
- BURY, M.A.; CHRISTENSEN, B.J. *The role of innovative chemical admixtures in producing self-consolidating concrete. In: First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, November 12-13, 2002*.
- CHAI, P.H.W; YANG, M. *Case study: R.C building rehabilitated with self-compacting concrete. In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.
- CHRISTENSEN, B.J.; ONG, F.S. *The performance of high volume of fly ash self-consolidating concrete (SCC). In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.
- 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, Setembro 16-19, 2001*.
- COLLEPARDI, M. *Self compacting concrete: what is new? In: Proceedings of 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, p.1-16, Outubro 20-24, 2003.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. *CEB-FIP model code 1990*. Lausanne, 1991. (Bulletin d'information, 203).
- COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. Disponível em 06 de setembro de 2007. <http://www.abcp.org.br/comunidade/>.
- DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssilica**. Tese de doutorado, POLI-USP, São Paulo, 1995.

DE LARRARD, F. *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. E & FN Spon, London, 1999.

DIETZ, J. MA, J. *Preliminary examinations for the production of self-compacting concrete using lignite fly ash*. In: *Lacer*, n.5, p. 125-139, 2000.

DJELAL, C.; VANHOVE, Y.; MAGNIN, A. *Tribological behaviour of self-compacting concrete*. In: *Cement and Concrete Research*, n° 34, p.821-828, 2004.

DOMONE, P.L. *Self-compacting concrete: an analyses of 11 years of cases studies*. In: *Cement & Concrete Composites*, n° 28, p. 197-208, 2006.

DOUGLAS, R.P.; GREGORI, A.; SUN, Z.; BONEN, D. SHAH, S.P. *The effect of ingredients and shear history on the thixotropic rate of rebuilding of SCC*. In: *Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

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

FERNANDEZ, P.; LUCIANO, J.; CONSTANTINER, D. *Successful implementation of SCC in a precast operation-A case study*. In: *Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

FERREIRA, L.B; LIMA, M.B; PEREIRA, A.C.; ANGELIM, R.R.; ANDRADE, M.A. Avaliação do módulo de elasticidade de concretos auto-adensáveis com diferentes consistências e níveis de resistência. In: **48° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**. CD-ROM, Rio de Janeiro, 2006.

FURNAS. Concreto – **determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável utilizando-se o cone de Abrams (*slump flow test*)** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-6, 2004a.

FURNAS. Concreto – **determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método do funil V** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-7, 2004b.

FURNAS. Concreto – **determinação das habilidades passante e de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método da caixa L (*L-Box test*)** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-7, 2004c.

GEYER, A.L.B. Utilização de concreto auto-adensável em estruturas de edifícios com custos inferiores ao concreto convencional. In: **12° Concurso Falcão Bauer**, 2005.

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

GOMES, P.C.C; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; TENÓRIO, J.J.L. Concreto auto-adensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. In: **45° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, CD-ROM, Vitória, 2003.

GRACE. *Seismic testing wall needs no vibration*. 2005.

GRAUBNER, C.A.; PROSKE, T. Formwork pressure a new concept for the calculation. *In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

HASPARYK, N.P. **Investigação de concretos afetados pela relação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. Tese de doutorado, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. *In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. Ed: G.C. ISAIA. São Paulo, volume 1, capítulo 15, p.439-471, 2005.

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

HO, D.W.S; SHEINN, A.M.M; TAM, C.T. *The use of quarry dust for SCC applications*. *In: Cement and Concrete Research*, n. 32, p. 505-511, 2002.

ISAIA, G.C. O concreto: da era clássica à contemporânea. *In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. Ed: G.C. ISAIA. São Paulo, volume 1, capítulo 1, p.1-43, 2005.

KHAYAT, K.H.; DACZKO, J.A. *The holistic approach to self-consolidating concrete*. *In: First North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete*, 2002.

LEEMANN, A.; HOFFMANN, C. *Pressure of self-compacting concrete on the formwork*. *In: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Islândia, p.288-295, 2003.

MANUEL, P.J. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis**. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

MELO, K.A.. **Proposição de método de dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcáreo**. Dissertação de mestrado, UFSC, 2005.

METHA, P.K. *Concrete technology for sustainable development – an overview of essential principles*. *In: Livro: Concrete Technology for Sustainable Development in the Twenty First Century*. Ed: P.K.Metha, Cement Manufactures' Association, Índia, 1999.

NEVILLE, A.M. *Properties of concrete*. Fourth edition, Prentice Hall / Pearson, London, 2000.

NGUYEN, T.L.H.; ROUSSEL, N.; COUSSOT, P. *Correlation between L-Box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid*. *In: Cement and Concrete Research*, n° 36, p.1789-1796, 2006.

NORME FRANÇAISE. NF P93-350 06.95: **Banches industrialisées pour ouvrages en béton**. 1989 (em francês).

NORWEGIAN STANDARD. **Design of concrete structures: NS 3473**. Oslo, 1989.

NUNES, S.; FIGUEIRAS, H.; OLIVEIRA, P.M.; COUTINHO, J.S.; FIGUEIRAS, J. *A methodology to assess robustness of SCC mixtures. In: Cement and Concrete Research*, n°36, p.2115-2122, 2006.

O'REILLY, V.D. *Método de dosagem de concreto de elevado desempenho*. Pini, São Paulo, 1992.

OH, S.G.; NOGUSHI, T.; TOMOSAWA, F. *Toward mix design for rheology of self-compacting concrete*. s/d.

OKAMURA, H. *Self-compacting High-performance concrete. In: Concrete International*, v.19, n.7, p. 50-54, Julho 1997.

PACIOS, A. *Optimization of in situ constructions system to benefit from SCC technology. In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

PAGNUSSAT, D.; MOURA, C.; TUTIKIAN, B.F.; MASUERO, A.; DAL MOLIN, D.C. Avaliação de concretos auto-adensáveis dosados pelo método Tutikian incorporando resíduos de serragem de mármore e granitos. **In: 48° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**. CD-ROM, Rio de Janeiro, 2006.

PERSSON, B. Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete. **In: Cement and Concrete Research**, n. 33, p. 373-379, 2003.

PETERSEN, B.G; REKNES, K. *Advances in self-compacting concrete with lignosulphonate superplasticizer. In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

POON, C.S.; HO, D.W.S. *A feasibility study on the utilization of r-FA in SCC. In: Cement and Concrete Research*, n° 34, p. 2337-2339, 2004.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. *FUNDAMENTALS OF CONCRETE. In: Design and control of concrete mixtures. Chapter I*, p 1-21, 2002.

PROSKE, T.; GRAUBNER, C.A. – *Self-compacting concrete- pressure on formwork and ability to deaerate. In: Darmstadt Concrete*, n.17, 2002.

RAMSBURG P.; LUDIRDJA, D.; MASIK, O. *Utilizing SCC in double cycling production of double T beams. In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

REPETTE, W.L. Concretos de última geração: presente e futuro. **In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. Ed: G.C. ISAIA. São Paulo, volume 2, capítulo 49, p.1509-1550, 2005a.

REPETTE, W.L. Implementação do concreto auto-adensável na execução de estrutura de concreto armado. In: Comunidade da Construção Florianópolis. Ação n° 6, 2005b.

RILEM. Disponível em <http://www.rilem.net/eventdetails.php?event=115>. Acesso em 28 de novembro de 2006.

ROUSSEL, N.; NGUYEN, T.L.H.; COUSSOT, P. *Yield stress measurements using stoppage tests. In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

SAHMARAN, M.; CHRISTIANTO, H.A; YAMAN, I.O. *The affect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. In: Cement and Concrete Composites*, nº 28, p.432-440, 2006.

SILVA FILHO, L.C; KIRCHHEIM, A P.; DAL MOLIN, D.C.C; TUTIKIAN, B.F. **Desenvolvimento de traço de concreto auto-adensável branco (CAAB) – Museu Iberê Camargo**. In: Relatório técnico n. 31, 2004.

SOMERVILLE, S. *The benefits of utilizing fly ash in producing self-consolidating concrete (SCC). In: First North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete*, 2002.

SZECSY, R. *Integration and application of self compacting concrete as a technology into other types of performance concrete. In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

TROLI, R.; OLAGOT, J.J.O.; MONOSI, S.; COLLEPARDI, M. *Low heat development in self-compacting concretes for massive structure. In: Proceedings of 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, p.103-112, Outubro 20-24, 2003.

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

TUTIKIAN, B.F; DAL MOLIN, D.C; CREMONINI, R.A.; LAMARCA, R.L.M.; VIECILI, F.A. *A comparison of production costs using conventional concrete and self-compacting concrete in Brazilian precast. In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005a.

TUTIKIAN, B.F; DAL MOLIN, D.C; CREMONINI, R.A. Viabilização econômica do concreto auto-adensável. *In: 12^o Concurso Falcão Bauer, Categoria Novos Materiais*, 2005b.

TUTIKIAN, B.F; DAL MOLIN, D.C; CREMONINI, R.A. Concreto auto-adensável: uma nova tecnologia. *In: Sinduscon Premium, Case Acadêmico*, Porto Alegre, 2006.

TUTIKIAN, B.F; MANUEL P.J; MASUERO, A.B; DAL MOLIN, D.C; Produção de estrutura de concreto armado com o concreto auto-adensável. *In: Comunidade da Construção* Porto Alegre. Ação nº 1, 2007.

WALLEVIK, O.H. *Rheology – a scientific approach to develop self-compacting concrete. In: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Islândia, p.23-31, 2003.

WALRAVEN, J. *Structural aspects of SCC. In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

XIE, Y.; LIU, B.; YIN, J.; ZHOU, S. *Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultra pulverized fly ash. In: Cement and Concrete Research*, n. 32, p. 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. In: Cement and Concrete Composites*, n. 23, p. 57-64, 2001.

ZHU, W.; GIBBS, J.C. *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. In: Cement and Concrete Research*, n° 35, p.1457-1462, 2005.