

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO
AUTO-ADENSÁVEL**

Shingiro Tokudome

Campinas
Fevereiro 2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO
AUTO-ADENSÁVEL**

Shingiro Tokudome

Orientador: Vladimir Antonio Paulon

Dissertação de Mestrado apresentado à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Campinas

Fevereiro 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

T573c Tokudome, Shingiro
Contribuição para o desenvolvimento do concreto
auto-adensável. / Shingiro Tokudome.--Campinas, SP:
[s.n.], 2006.

Orientador: Vladimir Antonio Paulon .
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Concreto, 2. Concreto – Testes, 3. Concreto
armado. I. Paulon, Vladimir Antonio. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Contribution to development of self-compacting concrete.

Palavras-chave em Inglês: Concrete, Concrete - test , Reinforced concrete.

Área de concentração: Edificações

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Aparecido Fujimoto e Ana Elisabete Paganelli Guimarães de
Ávila Jacintho

Data da defesa: 21/02/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**

Shingiro Tokudome

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon
Presidente e Orientador / Unicamp



Prof. Dr. Aparecido Fujimoto
PUC-Campinas



Prof. Dr^a. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho
Unicamp

Campinas, 21 de Fevereiro de 2006

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon que de maneira competente, tem contribuído para o desenvolvimento da pesquisa científica e tecnológica, criando assim, oportunidade para a realização de inúmeros trabalhos, dentre os quais, este se inclui, e pelo extremo profissionalismo com que sempre se prontificou para a orientação desta dissertação.

À Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, que através do estímulo de vários Professores, Colegas, e da dedicação de Técnicos e Funcionários cooperaram imensamente para a realização deste trabalho.

À Empresa MC-Bauchemie, ao Grupo L. A. Falcão Bauer, e à Central de Concreto Concrebase, pelo apoio e compreensão indispensável cedendo, sua estrutura de laboratório e espaços físicos para a parte experimental desta pesquisa, e pela presteza e eficiência com que seus Técnicos e Funcionários sempre se dispuseram a colaborar.

Aos amigos que sempre estimularam em momentos de difícil decisão, apoiando e demonstrando a importância desta etapa para a formação da minha vida profissional e pessoal.

Aos meus pais e meus irmãos pela atitude amorosa e constante que sempre mantiveram para aliviar as dificuldades deste duro período de execução da tese, além de tudo que já fizeram por mim.

À minha esposa Erica, com o mais sincero desejo que toda a capacidade de sacrifício, compreensão e paciência demonstrada durante todo o período deste mestrado possa ser, de forma alguma recompensada.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE EQUAÇÕES	XIV
LISTA DE GRÁFICOS	XV
RESUMO	XVIV
ABSTRACT	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 JUSTIFICATIVAS	4
1.3 OBJETIVO	6
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA	7
2. CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1-DEFINIÇÕES E TERMINOLOGIA	9
2.2-ESTADO DE ARTE DO CONCRETO AUTO – ADENSÁVEL (CAA)	10

2.2.1 REOLOGIA	10
2.2.2 PRESSÃO NAS FÔRMAS	12
2.2.3 ADIÇÃO DE MATERIAIS FINOS	16
2.2.4 ADITIVOS QUÍMICOS	18
2.2.5 RETRAÇÃO DO CAA.....	24
2.2.6 ADERÊNCIA DO CAA.	25
2.2.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	26
2.2.8 MÉTODOS DE DOSAGEM.	27
2.3 ESTUDOS DE CASOS.....	31
2.3.1-PONTE AKASHI KAIKYO, JAPÃO.	31
2.3.2 PONTE RITTO, JAPÃO	34
2.3.3 VIADUTO HIGASHI-OOZU, JAPÃO.	35
2.3.4 PROJETO SODRA LANKEN, SUÍÇA.....	37
2.4 METODOLOGIA DE ENSAIO PARA CARACTERIZAR O CAA	39
2.4.1 DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE – NBR NM 67/98	39
2.4.2 DETERMINAÇÃO DA TRABALHABILIDADE DO CAA PELO ESPALHAMENTO.	40
2.4.3 ENSAIO DE ESCOAMENTO	43
2.4.4 ENSAIO DE FLUIDEZ PELO MÉTODO FUNIL - V.....	44
2.4.5 ENSAIO DE FLUIDEZ PELO MÉTODO DA CAIXA "U"	46

2.4.6 ENSAIO DE FLUIDEZ PELO MÉTODO DA CAIXA "L".	47
2.4.7 MÉTODO <i>FILL BOX TEST</i>	49
2.4.8 MÉTODO <i>U-SHAPEDE PIPE TEST</i>	51
2.4.9 ENSAIO DE TRABALHABILIDADE PELA NORMA DIN 1045-2 - <i>DAFSTB SELBSTVERDICHTENDER BETON (SVB-RICHTLINIE) 11/2003.</i>	52
2.4.10 ENSAIO DE FLUIDEZ DO CONCRETO NO MISTURADOR.....	54
3.PROGRAMA EXPERIMENTAL	57
3.1 EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO.....	57
3.1.1 VARIÁVEIS DO ESTUDO	58
3.1.2 MATERIAIS UTILIZADOS PARA O CONCRETO.....	60
3.1.3 CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS.....	63
TABELA 3.8 - PROGRAMAÇÃO DE ENSAIOS.	64
3.1.4 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM LABORATÓRIO. ..	64
3.2 EXPERIMENTAL EM CAMPO	65
4 RESULTADOS E ANÁLISES	69
4.1 EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO.....	69
4.1.1 COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS:.....	69
4.1.3 RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO FRESCO:.....	71
4.1.4 RESULTADOS OBTIDOS NO CONCRETO ENDURECIDO.	77
4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	78

4.2.3 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.....	80
4.2.4 ABSORÇÃO	80
4.3 RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS EM CAMPO.....	81
4.3.1 CONCRETAGEM DO PILAR ARMADO.....	85
4.3.2 CONCRETAGEM DA VIGA ARMADA.	87
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
5.1 EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO.....	89
5.2 EXPERIMENTAL EM CAMPO	90
5.3 COMENTÁRIOS	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura Unitária do Lignossulfonato.....	20
Figura 2.2 – Estrutura Unitária do Formaldeído Condensada de Melamina Sulfonada (SMF).....	21
Figura 2.3 – Estrutura Unitária do Formaldeído Condensada de Naftaleno Sulfonado (SNF).....	22
Figura 2.4 – Estrutura Básica dos Éteres Policarboxilato.....	23
Figura 2.5 – Modelo da Estrutura ativa da relação entre o éter policarboxilato e o cimento.....	24
Figura 2.6 – Comparativo do concreto convencional com o CAA, conforme OKAMURA e OUCHI (2003).....	28
Figura 2.7 – Esquema de dosagem, conforme OKAMURA e OUCHI (2003).....	28
Figura 2.8 – Ponte Pênsil – Akashi Kaikyo [Ouchi (2003)]	32
Figura 2.9 – Ensaio de abatimento antes da adição de aditivo.....	40
Figura 2.10 – Ensaio de espalhamento.....	41
Figura 2.11 – Ensaio de escoamento: <i>Orimet test</i>	44
Figura 2.12 – Ensaio Método V Funil.....	45
Figura 2.13 – Método da Caixa "U".....	46
Figura 2.14 – Método da caixa "L".....	48
Figura 2.15 – Método <i>fill box test</i>	49
Figura 2.16 – Método <i>U-shapede pipe test</i>	51
Figura 2.17 – Método <i>SVB Richtlinie</i>	53
Figura 2.18 – Equipamento de verificação da fluidez para descarga em campo	54
Figura 2.19 – Equipamento verificando a fluidez do CAA para descarga em campo	55
Figura 3.1 – Croqui da fôrma e armadura do pilar	66
Figura 3.3 – Croqui da fôrma e armadura da viga – (0,30x0,40x4,00)m	67
Figura 3.3 – Croqui dos pontos de extração dos testemunhos do pilar	68

Figura 4.1 – Ensaio de abatimento em concreto convencional.....	73
Figura 4.2 – Ensaio de Espalhamento em concreto auto adensável.....	73
Figura 4.3 – Ensaio de Espalhamento com grade – <i>SVB-Richtlinie</i> (a)	74
Figura 4.4 – Ensaio de Espalhamento com grade – <i>SVB-Richtlinie</i> (b).....	74
Figura 4.5 – Ensaio de fluidez com caixa “L” (a).....	75
Figura 4.6 – Ensaio de fluidez com caixa “L” (b).....	75
Figura 4.7 – Ensaio em campo de espalhamento (650 x640) mm	81
Figura 4.8 – Ensaio de espalhamento – <i>SVB-Richtlinie</i> (650 x 630) mm.....	82
Figura 4.9 – Ensaio de fluidez com a caixa L em campo (a).....	82
Figura 4.10 – Ensaio de fluidez com a caixa L em campo (b).....	83
Figura 4.11 – Concretagem do pilar	84
Figura 4.12 – Corpo-de-prova extraído do topo do pilar	85
Figura 4.13 – Corpo-de-prova extraído da base do pilar	86
Figura 4.14 – Concretagem da Viga (0,30x0,40x4,00)m	87
Figura 4.15 – Viga concretada após decimbramento	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Ordem cronológica dos eventos para a divulgação do concreto auto-adensável	3
Tabela 2.1 – Influências da pressão nas fôrmas	12
Tabela 2.2 – Programa de testes para avaliação da pressão	14
Tabela 2.3 – Dosagens utilizadas para 1 m ³ de concreto no teste de pressão	15
Tabela 2.4 – Avaliação no aumento de custo do CAA, conforme Örjan P. (1998)	30
Tabela 2.5 – Características da dosagem para o bloco de ancoragem	33
Tabela 2.6 – Dosagem do concreto auto-adensável utilizado na ponte Akashi Kaikyo	33
Tabela 2.7 – Recomendações do Japan Society Civil Engineers e Japan Highway Public Corporation.....	34
Tabela 2.8 – Dosagem de materiais secos para 1m ³ de concreto (kg/m ³) e resultados obtidos.....	35
Tabela 2.9 – Resultados do controle de qualidade.....	36
Tabela 2.10 – Dosagem de CAA utilizado no Viaduto Higashi-Oozu.	36
Tabela 2.11 – Comparativo de custo entre o CAA e concreto convencional	37
Tabela 2.12 – Consumo de material seco para 01 m ³ de concreto.....	37
Tabela 2.13 – Limites de resultados para o espalhamento, segundo diversas referências, conforme TUTIKIAN B. F. (2004)	43
Tabela 2.14 – Dimensões encontradas do funil V, conforme TUTIKIAN (2004).....	45
Tabela 2.15 – Dimensões da caixa “U” em utilização, conforme TUTIKIAN (2004)	47
Tabela 2.16 – Dimensões da Caixa “L” em utilização, conforme Tutikian (2004).....	48
Tabela 2.17 – Dimensões do Fill Box, conforme TUTIKIAN (2004)	50
Tabela 2.18– Características da grade conforme o agregado do método <i>SVB Richtlinie</i>	53
Tabela 3.1 – Resumo das variáveis independentes utilizadas no estudo	59
Tabela 3.2 – Análise físico-química do cimento	60

Tabela 3.3 – Característica física das areias	61
Tabela 3.4 – Características físicas dos agregados graúdos	62
Tabela 3.5 – Proporção dos aditivos	63
Tabela 3.6 – Ensaio físico dos aditivos	63
Tabela 3.7 – Características dos concretos	64
Tabela 3.8 – Programação de ensaios	64
Tabela 4.1 – Dosagem unitária do concreto	69
Tabela 4.2 – Características das dosagens verificadas	70
Tabela 4.3 – Resultados do concreto no estado fresco	71
Tabela 4.4 – Resultados obtidos do concreto no estado endurecido em laboratório.....	77
Tabela 4.5 – Dosagem utilizada no ensaio experimental em campo	80
Tabela 4.6 – Resultado obtido no CAA no estado fresco em campo	83
Tabela 4.7 – Resultados obtidos no concreto endurecido em campo.....	85

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Descreve a equação obtida por CHIARA	11
Equação 2.2 – Descreve a pressão em função dependente do tempo	16
Equação 2.3 – Descreve a pressão máxima	16
Equação 2.4 – Descreve a equação para o método <i>fill box</i>	49
Equação 2.5 – Descreve a equação para o método <i>U shaped pipe test</i>	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 – Volume de CAA comercializado do ano de 1990 a 2000.....	4
Gráfico 4.1 – Ar incorporado do concreto convencional e CAA	76
Gráfico 4.2 – Resistência à compressão axial do concreto convencional e CAA	78
Gráfico 4.3 – Evolução da resistência à compressão axial do concreto convencional e CAA	78
Gráfico 4.4 – Módulo de deformação do concreto convencional e CAA	79
Gráfico 4.5 – Absorção do concreto convencional e CAA	80

RESUMO

TOKUDOME, Shingiro. Contribuição para o desenvolvimento do concreto auto-adensável. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 107p. Dissertação (Mestrado).

A presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento da especialidade da tecnologia do concreto de elevado desempenho, o concreto auto-adensável.

A tendência do mercado em construir cada vez mais estruturas arrojadas exige o desenvolvimento de tecnologias que coadunem com a realidade técnico-econômica da obra. A concretagem destas estruturas, quando realizada em formas irregulares e em armação densa, ocasiona, na maioria das vezes, problemas no adensamento, formando descontinuidade e/ou segregação na peça concretada. Contudo, quando executada em concreto auto-adensável, estas ocorrências tendem a diminuir.

Este trabalho apresenta a confrontação da metodologia de avaliação do concreto auto-adensável no estado fresco com o método da caixa L e o utilizado atualmente na Alemanha conforme a norma *DIN 1045 -2 DAfStb- Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)*, com o propósito de levar para a prática procedimentos simples e de fácil análise do controle de trabalhabilidade do concreto, e também a aplicação do concreto auto-adensável em estruturas de escala real para analisar a segregação do concreto quando lançados a 4,00 metros de altura.

Palavras-chave: concreto, concreto – testes, concreto armado.

ABSTRACT

TOKUDOME, Shingiro. Contribution to development of self-compacting concrete. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 107p. Dissertação (Mestrado).

This study concerns a special kind of high performance concrete technology development, called self-compacting concrete.

The growing market tendency to build bold structures requires construction technology development, which fits real technical-economical needs. The concrete placing in irregular shape structures, and reinforced concrete structures, most of time brings compacting problems and result on segregation, and/or not satisfactory concrete surfacing. However, the use of self-compacting concrete can reduce these problems.

The main objective of this research is to compare L box method and the German standard *DIN 1045 -2 DAfStb- Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)* for fresh self compacting concrete workability analysis, in order to propose the L box method as an practical and easy way test to control the fresh concrete quality. This study also provides an accurate description of self-compaction concrete history, its development and the advantages reached by the structures based on concrete self-compacting concrete, as well. Furthermore this research sets a real beam and column structure concrete applications from 4,00 m high filling to analyze segregation behavior.

Key-words: Concrete, Concrete - test , Reinforced concrete.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O surgimento do concreto vem da evolução do uso de aglomerante de gesso calcinado pelos egípcios, aos calcários calcinados pelos gregos e romanos que aprenderam, posteriormente, a misturar cal e água, areia e pedra fragmentada, tijolos ou telhas em cacos. Segundo Neville (1997) foi o primeiro concreto da história.

No início do uso desta tecnologia, a trabalhabilidade para melhor compactação era obtida somente através da água de amassamento e o adensamento era realizado de forma rudimentar, golpeando a fôrma e socando o concreto com pedaços de vergalhões.

Em 1900, o engenheiro francês Rabut descobriu a influência do vibrador nas tensões internas do concreto e o engenheiro Freyssinet, seu discípulo na escola de Paris, foi o primeiro a praticar seus ensinamentos, realizando-os na construção dos hangares de Orly em 1917.

Em 1925, utilizou-se nos Estados Unidos a vibração superficial para compactação de estradas de rodagem. Os vibradores internos foram utilizados por Deniau, no ano de 1926. (BAUER,1999)

Dando seqüência à evolução do concreto, surge, em 1932, a primeira publicação referente à utilização de aditivos em pequenas quantidades de materiais orgânicos para o aumento da fluidez em cimentos, em que se utilizou sal de naftaleno formaldeído sulfonado e

polimerizado. Com o mesmo propósito, em meados de 1930 a 1940, foram feitas várias revelações a respeito do uso de lignossulfonatos e de composições melhoradas (RIXON; MAILVAGANAM, 1999). No decorrer da década de 60, principalmente no Japão, deu-se grande impulso ao desenvolvimento desses produtos, que eram basicamente constituídos por naftaleno sulfonados (ALVES, 1984).

Segundo Okamura e Ouchi (2003) a partir de 1983, no Japão, o problema de durabilidade nas estruturas de concreto foi o assunto de maior interesse. A criação de um concreto durável requeria compactação adequada por operários da construção civil. No entanto, a gradual redução no número de trabalhadores na indústria da construção civil japonesa também reduziu a mão-de-obra qualificada para os serviços de construção. Uma das soluções para obter estruturas de concreto durável independente da qualificação da mão-de-obra é o emprego de um concreto auto-adensável, com capacidade para preencher todos os espaços da forma, somente com o peso próprio sem a necessidade de vibração para o adensamento. A necessidade deste tipo de concreto foi proposta por Okamura em 1986. Estudos para o desenvolvimento de um concreto auto-adensável, incluindo os estudos fundamentais da trabalhabilidade foram projetados por Ozawa e Maekawa na Universidade de Tokyo.

O primeiro protótipo de concreto auto-adensável foi completado em 1988 usando materiais utilizados no mercado. O desempenho do protótipo foi satisfatório, com atenção especial para a retração por secagem, calor de hidratação, densidade depois de endurecido e outras propriedades.

Entende-se como concreto auto-adensável o resultado obtido da mistura homogênea dos componentes, sem necessidade da vibração para que haja o adensamento, pois se obtém uma massa de alta fluidez e estável, ou seja, sem segregação e baixa exsudação.

De acordo com Nagataki, citado por Metha, (1999), o sucesso do desenvolvimento do aditivo superplastificante, anti-segregante em concretos submersos no Oeste da Alemanha durante os anos 70 do século XX, proporcionou o impulso subsequente para o desenvolvimento do concreto auto-adensável e alta trabalhabilidade no Japão nos anos 80 do mesmo século. Em ambos os casos, a alta fluidez e a resistência à segregação são obtidos simultaneamente com o

uso do aditivo superplastificante e aditivo anti-segregante (celulose e polímero acrílico solúvel em água).

Após a apresentação desta tecnologia pelo professor Okamura, o concreto auto-adensável tem sido divulgado conforme ordem cronológica apresentada na tabela 1.1 :

Tabela 1.1- Ordem cronológica dos eventos para a divulgação do concreto auto-adensável

Ano	Evento
1989	2º EASEC-2 (East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction). Primeira apresentação do concreto auto-adensável realizado pelo professor Ozawa.
1992	CAMMET & ACI (American Concrete Institute)
1994	ACI (American Concrete Institute) em Bangkok. Este evento foi liderado pelo professor Zia.
1997	Comitê da RILEM, foram estabelecidos as premissas sobre concreto-auto-adensável
1998	O primeiro “workshop” específico sobre concreto auto-adensável foi realizado em Kochi, no Japão.
1999	No primeiro Simpósio Internacional da RILEM realizado em Estocolmo, discutiram-se os fundamentos para cooperação e confrontação, em âmbito mundial, deste importante tópico do concreto.

Segundo Metha, (1999), na França as centrais de concreto e as indústrias de pré-moldados estão utilizando o concreto auto-adensável como um produto que não provoca ruídos e podem ser utilizados em horários e áreas urbanas com restrições. Devido à redução de ruído, diminuir a mão de obra, aumentar a vida útil da fôrma, a indústria de pré-moldado está investindo no uso deste material.

A utilização do concreto auto-adensável vem crescendo no Japão conforme o volume do demonstrado no gráfico 1.1. A produção do concreto auto-adensável em porcentagem em relação ao concreto usinado (70% da produção total de concreto) representa apenas 0,1% (valores verificados até o ano 2000).

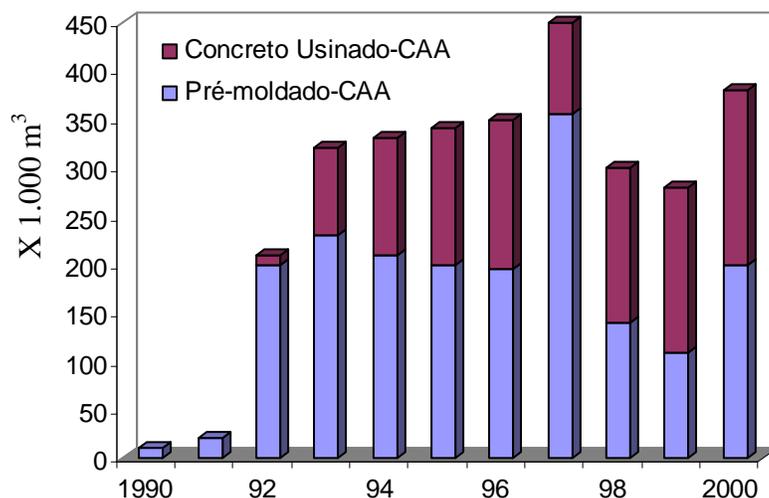


Gráfico 1.1 - Volume de CAA no Japão, conforme OKAMURA H et al (2003)

Aplicações do concreto auto-adensável:

- ponte (blocos de ancoragem, arcos, vigas, torres, cais, união entre estruturas);
- edifícios;
- colunas de aço (material de enchimento);
- túneis (paredes, túneis imersos, enchimento de túneis de inspeção);
- barragens;
- pré-moldados (blocos, paredes, reservatórios de água, lajes, aduelas e outros);
- paredes diafragmas.

1.2 JUSTIFICATIVAS

O concreto auto-adensável, por se tratar de tecnologia ainda recente em relação ao concreto tradicionalmente vibrado, vem sendo estudado em muitos países, cada qual criando

procedimentos, metodologias e referências próprias para avaliar principalmente a trabalhabilidade. Esta preocupação se deve aos grandes benefícios sócio-econômico e tecnológico que este concreto vem demonstrando no seu uso conforme citadas abaixo.

A exploração desta tecnologia se deve aos seguintes benefícios verificados:

- aumentar a variedade de formas arquitetônicas através de variação no projeto das fôrmas;
- alta qualidade de preenchimento em áreas de alta concentração de armaduras;
- alta qualidade na homogeneidade do concreto, alcançando um concreto mais denso;
- excelente superfície de acabamento;
- melhora a durabilidade contra ataques químicos médios nas primeiras idades.

As justificativas econômicas para aplicação do concreto auto-adensável são:

- simplificação no processo de lançamento nas fôrmas e melhoria na moldagem das peças;
- aumento de eficiência, mesmo diminuindo a mão de obra;
- diminuição do cronograma de obra;
- melhoria nas condições de trabalho;
- benefícios para o meio ambiente e condições de trabalho com menos ruído;
- baixo custo de investimento e maior durabilidade das fôrmas.

Na maioria dos concretos tradicionais os resultados são expressos em números pelo ensaio de abatimento do tronco de cone ou ensaio do tempo vebê, em muitos casos não considerando o aspecto visual do concreto. Quando se trata de concretos com alta fluidez, onde a capacidade de espalhamento sem o auxílio de vibração é o ponto mais importante, é imprescindível o consenso quanto aos parâmetros a serem utilizados para avaliar a qualidade do concreto.

Embora os métodos existentes - quais sejam, caixa L, caixa U, espalhamento (slump flow), entre outros – tem sido muito estudados em diversos países, existe grande dificuldade de se colocar em prática mencionados métodos, devido às peculiaridades de cada equipamento. Alguns

exigem volumes grandes de concreto para avaliação, peso do equipamento que nem sempre pode ser manuseado por uma pessoa, além da dificuldade de justificar o custo do equipamento.

Em situações de campo, a liberação ou não da descarga do concreto exige decisão rápida quanto à qualidade do mesmo. Muitas vezes, dependendo da metodologia a ser aplicada para avaliar a trabalhabilidade do concreto, pode-se prejudicar o andamento da concretagem, bem como, devido à susceptibilidade com relação à temperatura ambiente, principalmente em dias de calor (superior a 25°C) e de baixa umidade relativa do ar (menor que 60%), os resultados do ensaio podem sofrer alterações.

Entretanto, em um país como o Brasil, com tantas variantes regionais de clima e culturais de mão-de-obra, existe um trabalho considerável a ser desenvolvido com o propósito da mesma não resultar desacreditada devido a desconhecimento da tecnologia do concreto auto-adensável.

1.3 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é apresentar a metodologia de ensaio para concreto auto-adensável, utilizado atualmente na Alemanha conforme a norma *DIN 1045 -2 DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)*, como uma metodologia complementar para avaliar a trabalhabilidade do concreto auto-adensável, em comparação com a caixa “L”, para a utilização deste método em laboratórios e obras no Brasil.

Como objetivo secundário pretende-se avaliar a concretagem das estruturas de viga e pilar em dimensões reais em campo, para verificar a utilização da metodologia alemã *SVB-Richtlinie*, a segregação do concreto onde lançado de grandes alturas onde normalmente os agregados tendem a se separar da mistura homogênea ocasionando concretos desagregados e de baixa durabilidade, e também as características mecânicas do concreto no estado endurecido como a resistência à compressão, absorção e massa específica.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

No primeiro capítulo é feita uma introdução à pesquisa, destacando a importância do tema e, conseqüentemente, a justificativa para o seu desenvolvimento. São descritos os objetivos principal e secundário, e a estrutura desta pesquisa.

No capítulo dois, é apresentada a definição, metodologias de dosagem, propriedades no estado fresco e endurecido, tipos de concreto auto-adensável, influência dos materiais de composição e obras em concreto auto-adensável. Também é apresentado um estudo dos diversos equipamentos para medir a trabalhabilidade do concreto auto-adensável, a maioria não normatizada. Os objetivos de cada um dos equipamentos adotados por diversos autores, consta nesta parte do trabalho com a descrição do procedimento detalhado de cada equipamento individualmente.

No capítulo três, são definidos o planejamento dos ensaios, os materiais utilizados e a metodologia para a avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido.

No capítulo quatro, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados no programa experimental.

No capítulo cinco são feitas às considerações finais referentes à pesquisa, assim como sugestões para o prosseguimento dos estudos nesta linha de pesquisa e conclusões resultantes deste trabalho.

2. CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1-DEFINIÇÕES E TERMINOLOGIA

Conforme mencionado no item 1.1 Considerações Iniciais, o concreto auto-adensável é definido pela particularidade da sua reologia no estado fresco, apresentando alta trabalhabilidade para adensar sem necessidade da energia de vibração, apenas com o peso próprio, e mantendo a estabilidade da mistura com baixa exsudação e sem segregação.

O primeiro concreto auto-adensável foi feito no Japão em 1988, usando materiais utilizados do mercado. O desempenho desse concreto auto-adensável foi satisfatório, com atenção especial para a retração por secagem, calor de hidratação, densidade após seu endurecimento. Este concreto foi nomeado de “Concreto de Alto Desempenho” e foi definido acompanhando três premissas:

- 1) estado fresco: auto-compactabilidade;
- 2) primeiras idades: evitar defeitos iniciais;
- 3) estado endurecido: proteção contra fatores externos.

Quase ao mesmo tempo, o termo “Concreto de Alto Desempenho” foi definido como um concreto de alta durabilidade devido à baixa relação água/cimento pelo professor Aïtcin em 1989. Desde então, o termo concreto de alto desempenho é utilizado para referenciar o concreto de alta durabilidade. Portanto, os autores mudaram o termo e propuseram “Concreto auto-adensável de alto desempenho” (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Na definição de Hayakawa, et al., (1993), o concreto auto-adensável é estudado pelo termo super trabalhável, entendido como um novo tipo de concreto com excelente moldabilidade e alta resistência à segregação, o qual pode ser executado sem o uso de vibradores. Este concreto mostra excelentes propriedades no estado fresco e também quanto às propriedades mecânicas e de durabilidade. Entende-se como concreto super trabalhável a abertura do espalhamento (flow) apresentando entre 600 mm e 700 mm.

Quanto à terminologia, entre diversas bibliografias sobre o concreto auto-adensável, as mais utilizadas são: concreto fluido (GIOVANETTI, 1989), concreto super trabalhável (HAYAKAWA et al., 1993), concreto super fluido (NEVILLE, 1997), concreto auto-compactado (OKAMURA, 2003), concreto de alta trabalhabilidade (MEHTA & MONTEIRO, 1994) e outros. Nesta dissertação, utiliza-se a terminologia **concreto auto-adensável** é simplificado por **CAA**, por ser a mais difundida no Brasil.

2.2-ESTADO DE ARTE DO CONCRETO AUTO – ADENSÁVEL (CAA).

2.2.1 Reologia

A reologia do CAA tem sido alvo de estudos para se entender melhor o seu desempenho na aplicação em campo, garantindo a propriedade de fluir e preencher espaços da estrutura sem a necessidade de vibração.

Segundo Tattersal e Banfill (1983) reologia é a ciência da deformação e fluidez da matéria e isto diz respeito à relação entre pressão e tensão, sendo a tensão em função do tempo, e a reometria é a notação para medir a reologia. O CAA é a suspensão de materiais sólidos com várias dimensões na água. A medida da reologia fornece resultados fundamentais nos efeitos da composição na mistura, da interação dos componentes e no comportamento do fluido.

Diferentes tipos de viscosímetros têm sido aplicados na tecnologia do concreto para determinar estas características no estado fresco.

Uma suspensão do tipo concreto fresco responde com uma deformação ou tensão quando aplicado uma carga ou força, sendo que o tempo e a tensão do cisalhamento afetam as características reológicas da matriz do cimento.

- a característica da pasta de cimento muda com o tempo devido à aglomeração das partículas, quebra da estrutura e o progresso da hidratação do cimento.
- as forças entre partículas do grupo de pequenos grãos interagem com o tempo e a hidratação.

Noguchi e Tomozawa (1999) estudaram a reologia do CAA, analisando a viscosidade plástica e a capacidade de escoamento, se baseando na teoria do excesso de pasta de Kennedy proposta 20 anos após Abrams ter proposto o método de dosagem em 1918. Primeiramente ajustaram a consistência da pasta seguindo o modelo de Bingham, e em seguida adicionaram os agregados gradativamente. Verificaram que conforme o aumento da quantidade de agregado diminui a viscosidade plástica e a capacidade de escoamento.

Chiara et al (2000) realizou um comparativo entre os reômetros IBB – Institute for Biotechnology and Bioengineering – (desenvolvido no Canadá) e BTRHEOM – Beton Tester Rheometer – (desenvolvido na França). O CAA utilizado foi caracterizado quanto à sua trabalhabilidade medindo o abatimento, o espalhamento e pelo método da caixa “U” considerando como concreto auto-adensável aqueles que apresentaram 70% da altura máxima, e a fluidez pelo método do funil “V”. Foi obtida uma boa correlação de raio $R= 84\%$, sendo uma correlação máxima de 100% e no ensaio conforme equação 2.1.

$$\eta_B = 35 + 16\eta_i \quad \text{equação 2.1}$$

η_B = viscosidade medida com o reômetro BTRHEOM

η_i = viscosidade medida com o reômetro IBB

Chiara. et al (2003) comparam os reômetros IBB(desenvolvido no Canadá) e BML onde encontrou incompatibilidade de unidade de medida entre esses dispositivos medidores de corrente elétrica. O IBB não utiliza a notação científica Pa.s, utiliza Nm.s, impossibilitando um comparativo direto dos resultados sendo necessário determinar uma função empírica para cada reômetro.

No Brasil o CAA não foi estudado no âmbito da reologia devido o equipamento reômetro existente ser especificamente para argamassa. Neste tema, apesar da sua importância em vários países, tem sido estudado com diversos reômetros dificultando até mesmo a escolha do equipamento mais adequado para pesquisas.

2.2.2 Pressão nas fôrmas

Devido à característica reológica, de alta fluidez, o CAA quando lançado na fôrma se comporta como líquido e gera pressão maior em relação ao concreto convencional. Necessariamente cuidados maiores devem ser tomados na escolha do tipo de escoramento da fôrma e na vistoria antes da concretagem.

Segundo Proske e Graubner (2002) existem dezoito parâmetros que influenciam na pressão vertical das fôrmas. Todos os parâmetros afetam a pressão do concreto nas fôrmas, com diferentes intensidades, na tabela 2.1 os autores classificam em primeiro, segundo e terceiro, conforme o grau de importância.

Tabela 2.1 . Influências da pressão nas fôrmas:

1. primeiro	2. segundo	3. terceiro
1.1 Velocidade de lançamento	2.1 tempo de solidificação	3.1 tipo de lançamento
1.2 Densidade do concreto	2.2 relação cimento/aditivo	3.2 dimensão máxima do agregado
1.3 Tipo de compactação	2.3 pressão da água nos poros	3.3 tipo de cimento
1.4 Tipo de vibração	2.4 tempo de vibração	3.4 temperatura ambiente

1. primeiro	2. segundo	3. terceiro
1.5 Consistência do concreto	2.5 projeto da fôrma	3.5 altura de lançamento e
1.6 Temperatura do concreto fresco	2.6 permeabilidade da fôrma	altura total
		3.6 condição de armadura

A pressão do concreto na fôrma está relacionada com o tempo de lançamento até a estabilidade interna na estrutura. Isto depende da atual pressão vertical e da relação entre a pressão horizontal e vertical (λ). A pressão na fôrma cresce com o montante do nível do concreto (pressão vertical), e o incremento da pressão diminui com o processo de pega e solidificação (redução do λ). Para o CAA, no momento do lançamento, a relação λ é aproximadamente 1,0. O cálculo da pressão na fôrma, geralmente é obtido por aproximação, e baseado em valores e métodos empíricos, diferente dos parâmetros utilizados para o concreto convencional. O parâmetro mais importante sempre será a velocidade de lançamento.

Quando se utiliza o CAA, o método de cálculo baseado em concreto convencional não é mais válido. A falta da vibração diminui a pressão e a mudança da consistência aumenta a carga. Um fator importante junto com a mudança de consistência é o comportamento no processo de endurecimento do concreto. Isto pode influenciar significativamente no uso de aditivos superplastificantes de alto desempenho e estabilizadores. As freqüentes publicações técnicas aproximam a pressão do CAA na fôrma com a pressão hidrostática, assumindo o concreto como um líquido.

No projeto verificado por Proske, Graubner (2002) a influência da velocidade de lançamento na pressão da fôrma, está sustentada pelo Comitê Alemão de Concreto Armado (*DAfStb*). Onze testes experimentais em colunas esbeltas foram realizados seguindo procedimentos diferenciados para a verificação da pressão na fôrma. Dez das colunas foram armadas. Todas as colunas tinham seção de 30x30cm e altura de 4,00 m. O programa de testes foi dividido em três series I, II e III, conforme tabela 2.2 p. 13.

Tabela 2.2-Programa de testes para avaliação da pressão.

Serie	n° da coluna	Velocidade de lançamento (m/h)	Espalhamento (cm)	Tempo de espalhamento t_{500} (s)
I	1a	12,5	75	2,5
	2a	25,0		2,0
	3a	40,0		2,0
	4a	80,0		2,0
	5a	160,0		2,5
II	2b	25,0	70	3,0
	2c	25,0	60	5,0
	3b	40,0	70	3,0
	4c	60,0	55	6,0
	2b ¹⁾	25,0	70	3,0
III	5r ²⁾	160,0	47,5	-

1) Coluna sem armadura;

2) Adensamento com uso de vibrador.

A velocidade de lançamento (coluna v = 25 a 80 m/h) é orientada em valores utilizados na prática.

Serie I - Influência do lançamento em alta velocidade na pressão da fôrma;

Serie II – Influência do valor do espalhamento (*flow*) interagindo com a velocidade de lançamento

Serie III – Adensamento convencional por vibração e influência da armadura na pressão da fôrma.

Em todos os testes foram utilizados a mesma dosagem conforme tabela 2.3, pg. 14. A única modificação foi no consumo de aditivo superplastificante para modificar a trabalhabilidade. A altura de lançamento em queda livre foi de 4,30 m.

Tabela 2.3-Dosagens utilizadas para 1 m³ de concreto no teste de pressão:

Materiais	Concreto convencional	Concreto auto-adensável
Cimento	350 kg	350 kg
Cinza volante	90 kg	90 kg
Água	190 L	190 L
Superplastificante 01	-	6 L
Superplastificante 02	6 L	-
Areia 0/2	834 kg	834 kg
Agregado graúdo 2/8	420 kg	420 kg
Agregado graúdo 8/11	465 kg	465 kg

Nos testes da série I, quase todos apresentaram pressão hidrostática nos pontos medidos. O espalhamento (*flow*) utilizado foi de 75 cm. Somente no caso da coluna que foi concretado em 25 minutos ($v = 12,5$ m/h), a redução na pressão medida na fôrma foi de 23%.

Nos testes da série II, com a velocidade de lançamento definido em 25 m/h em correlação com a diminuição do valor de espalhamento – uma redução na pressão foi determinada. Com o espalhamento de 71cm, uma redução máxima de pressão de 40% foi observado em relação à pressão hidrostática. A redução de espalhamento e a influência da velocidade de lançamento diminuem a pressão significativamente.

Baseado nos resultados dos testes, uma proposta para o cálculo, fundamentada na DIN 18 218-Determinação da Pressão do Concreto, foi desenvolvida. A proposta é de manuseio na aplicação prática, levando em conta a velocidade de lançamento e desenvolvimento de resistência do concreto fresco. As vantagens da influência do efeito silo e das armaduras não foram incluídas. A idéia para o cálculo do modelo deverá ser até o fim da solidificação do concreto, quando não ocasionar mais pressão, sendo a razão entre a pressão horizontal e vertical $\lambda_{final}=0$.

A equação 2.2 presume a continuidade da pega – desde o lançamento e o final da solidificação.

$\lambda(t)$ – descreve a função dependente do tempo;

λ_0 = razão entre a pressão horizontal e vertical no começo do lançamento; para CAA o λ_0 é aproximadamente 1,0.

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot (1-t/t_E) \quad (\text{equação 2.2})$$

A integração do incremento da pressão sobre a altura, obtém a pressão máxima p_{\max} , com os correspondentes parâmetros conforme equação 2.3.

$$P_{\max} = \frac{\gamma_b \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot t_E}{2} \quad (\text{equação 2.3})$$

t_E – final da solidificação (h);

γ_b – massa específica (kg/m^3)

v – velocidade de lançamento (m/h)

2.2.3 Adição de materiais finos

O equilíbrio entre a grande fluidez e a suspensão dos materiais que compõe o CAA, está diretamente atrelado ao alto consumo de finos que mantém a estabilidade evitando a segregação do concreto. Entendem-se como finos grãos inferiores a 0,0125 mm. A necessidade do alto consumo de finos, tem sido alvo de estudos para a utilização de resíduos industriais, alguns com índices de pozolanicidade e outros apenas como inerte. Os materiais encontrados nas bibliografias estudadas são:

Filer calcáreo, basáltico;

Sílica ativa;
Caulim calcinado;
Escória de alto forno;
Cinza volante;
Argila calcinada
Cinza vulcânica;
Cinza de casca arroz ;
Cinza de Lignita;
Sílica de casca de arroz.

A utilização destes materiais contribui para diminuir o consumo do cimento como finos e também apresenta melhorias no conceito do desenvolvimento sustentável do concreto conforme (Gomes P.et al 2004). Também contribui para diminuir o calor de hidratação e a retração autógena do concreto.

Jörg (2000) verificou a possibilidade da utilização da cinza da lignita tratada e não tratada, originado da termoelétrica, que em comparação com o carvão contém maior teor de cal livre e sulfato. A utilização da lignita não tratada foi prejudicial ao concreto auto-adensável, devido à grande expansibilidade verificada no ensaio da agulha de Le Chatelier e perda de resistência quando em substituição ao cimento e acelerar bastante o tempo de início e o fim de pega.

A lignita tratada não apresentou expansão, mas apresentou uma pequena aceleração no tempo do início e fim de pega. Comparando a resistência à compressão ambas as lignitas apresentaram queda de resistência à compressão quando em substituição ao cimento, entretanto a lignina tratada apresentou menor queda de resistência à compressão quando comparado à lignita não tratada. Quanto à reologia do concreto foi observada uma melhora quando adicionada em ambas as situações.

Tutikian et al (2004) comparou o desempenho da utilização do metacaulim e do filer calcáreo. O CAA com adição de filer calcáreo apresentou resistência à compressão superior a adição com metacaulim, somente nas primeiras idades, com menor consumo de aditivo

superplastificante. Entretanto o CAA com metacaulim apresentou melhor relação custo/resistência.

A utilização da cinza de casca de arroz em CAA tem apresentado vantagens em relação a outros tipos de finos com atividade pozolânica, devido ao seu baixo custo e alta pozolanicidade conforme foi verificado por Costenaro F. (2001) em concretos convencionais. Tutikian (2004) verificou o desempenho da cinza de casca de arroz em CAA e obteve excelentes resultados técnicos e econômicos. Entretanto a cinza de casca de arroz ainda não está disponibilizada comercialmente.

O trabalho realizado por Barbosa, M et al (2004) mostra a viabilidade da utilização dos finos basálticos para a melhoria das características reológicas do CAA no estado fresco, sem grandes prejuízos na resistência a compressão, resolvendo desta forma mais uma questão da sustentabilidade desta tecnologia.

Dos aditivos minerais citados, a pozolana, a escória de alto forno e o fíler são adicionados à produção do cimento, dentro das proporções determinadas por norma.

Além das adições de finos em CAA, também estão sendo estudados adições de fibras de aço e as fibras de polipropileno para melhorar o desempenho no estado fresco e endurecido.

2.2.4 Aditivos químicos

A tecnologia do aditivo químico é um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento e inovação do material concreto.

Petrucci (1987) entende por aditivos as substâncias que são adicionadas intencionalmente ao concreto, com a finalidade de reforçar ou melhorar certas características, inclusive facilitando seu preparo e utilização. Ressalta que um aditivo nunca pretenderá corrigir defeitos intrínsecos ao concreto, provenientes de dosagem incorreta ou colocação mal feita.

Assim, por exemplo, nenhum impermeabilizante poderá suprir as deficiências de um concreto mal proporcionado e poroso.

Os aditivos variam de tensoativos, sais solúveis e polímeros a minerais insolúveis. As finalidades para as quais eles são geralmente empregados no concreto incluem melhora da trabalhabilidade, aceleração ou retardo do tempo de pega, controle do desenvolvimento da resistência e melhoria da resistência à ação do gelo, à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e a soluções ácidas e sulfatadas.

Segundo Neville (1997) o motivo do grande crescimento do uso dos aditivos é a capacidade de proporcionar ao concreto considerável melhorias físicas e econômicas. Essas melhorias incluem o uso em condições nas quais seria difícil ou até impossível usar concreto sem aditivos

Neste trabalho, estaremos estudando apenas os aditivos diretamente relacionados com o concreto auto-adensável fresco. Os aditivos utilizados para plastificar, reduzir água, bem como retardar a pega serão considerados aditivos químicos e os responsáveis pelo aumento da coesão, resultante da reposição de finos, que são os fílers considerados anteriormente, são os aditivos minerais.

É de 1932 a primeira publicação referente à utilização de aditivos em pequenas quantidades de materiais orgânicos para o aumento da fluidez de cimento contendo composições, em que se utilizou sal de naftaleno formaldeído sulfonado e polimerizado. Com o mesmo propósito, em meados de 1930 a 1940, foram realizadas várias revelações a respeito do uso de lignossulfonatos e composições melhoradas. No decorrer da década de 60, principalmente no Japão, deu-se grande impulso ao desenvolvimento desses produtos, que eram basicamente constituídos por naftaleno sulfonatos (ALVES, 1984, p.02).

Os aditivos utilizados no concreto auto-adensável são os redutores de água (plastificante ou superplastificante), por propiciar às misturas de concreto o aumento da fluidez, sem adição de cimento e água. Segundo Metha e Monteiro (1994) esse aumento de fluidez é conseguido por uma forte carga negativa, provocada pela adsorção do aditivo nas partículas de cimento, a qual

auxilia a reduzir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e a aumentar acentuadamente a fluidez do sistema.

A composição química dos aditivos plastificantes pode ser a base de ácidos lignossulfônicos (lignossulfonato), ácidos carboxílicos hidroxilados e carboidratos.

Como aditivos de concreto, os lignossulfonatos são empregados como plastificantes e redutores de água, proporcionando aumento de resistência, redução do aparecimento de fissuras e porosidade. Muitos lignossulfonatos, em particular os dos tipos menos puros, podem levar à incorporação de ar. Portanto, na produção de aditivos é utilizada uma pequena quantidade de agentes desaeradores, sendo usual o emprego do tributílfosfato. A estrutura unitária que representa o aditivo de lignossulfonato está representada na figura 2.1.

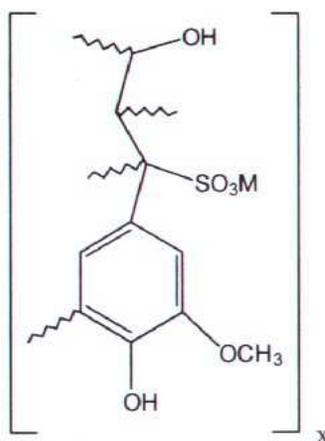


Figura 2.1 – Estrutura Unitária do Lignossulfonato

A atuação da substância é particularmente detectada no sistema sólido-líquido ou líquido-líquido, cujo fenômeno decorre da facilidade com que os seus íons migram para as interfaces das duas bases e também pelo mecanismo físico de adsorção, capaz de alterar a tensão interfacial. Mesmo em pequenas quantidades, pode molhar superfícies, remover partículas, penetrar em materiais porosos, dispersar partículas sólidas, emulsificar substâncias e favorecer a formação de espuma. Isso ocorre devido a sua propriedade tensoativa. Os lignossulfonatos são também utilizados como agentes dispersantes em sistema sólido-líquido, onde partículas sólidas de

reduzidas dimensões necessitam de dispersão em meio aquoso. Essa atividade é basicamente de natureza eletrocinética.

A partir do momento em que as moléculas de lignossulfonatos são adsorvidas na superfície das partículas sólidas dispersas no meio aquoso, cargas negativas são conferidas a essas partículas, que por se encontrarem negativamente carregadas, passam a repelir mutuamente. Dessa forma, evita-se a formação de aglomerados de partículas, que tenderiam a precipitar-se rapidamente. A adsorção do lignossulfonato na superfície da partícula suspensa pode também provocar a formação de uma película fina (filme) que vai atuar como uma barreira física, impedindo o contato direto das partículas entre si e entre as partículas e o meio aquoso ao redor. Os lignossulfonatos previnem a formação de agregados de partículas insolúveis finamente divididas em suspensão.

Existem cinco categorias principais de superplastificantes: condensados sulfonados de melamina-formaldeído; condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos; condensados de lignossulfonatos modificados; ésteres de ácido sulfônico e/ou carboidratos e éter-policarboxilato, sendo este último o mais recente entre os aditivos redutores de água.

Os dois primeiros são os mais comuns. Por simplicidade são mencionados como superplastificantes de melamina e superplastificantes de naftaleno. As estruturas unitárias estão representadas conforme figuras 2.2 e 2.3.

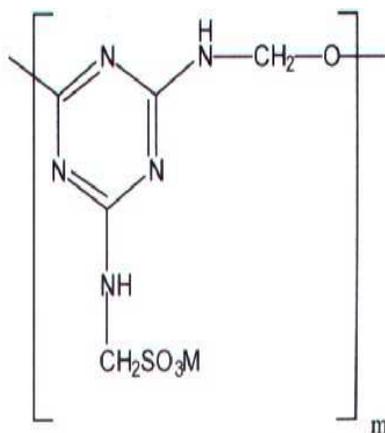


Figura 2.2 – Estrutura Unitária da Formaldeído Condensada de Melamina Sulfonada (SMF)

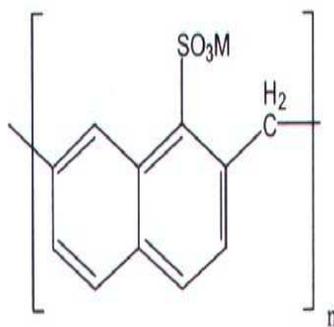


Figura 2.3 – Estrutura Unitária da Formaldeído Condensada de Naftaleno Sulfonado (SNF)

Os superplastificantes são polímeros orgânicos hidrossolúveis obtidos sinteticamente, usando um processo complexo de polimerização para obtenção de moléculas longas de elevada massa molecular, portanto, relativamente caros. Por outro lado, por eles serem produzidos para um fim específico, suas características podem ser otimizadas no que diz respeito ao comprimento das moléculas com um mínimo de entrelaçamento. Eles têm também um teor baixo de impurezas, de modo que, mesmo em dosagens elevadas, não apresentam efeitos colaterais prejudiciais.

Segundo Neville (1997), não é possível uma generalização da superioridade final nem dos aditivos de naftleno, nem dos aditivos de melamina, pois, mais do que sua propriedade de superplastificante, as propriedades químicas do cimento têm influências sobre seu desempenho.

Gay (2004) explica num comparativo, que os aditivos à base de melamina sulfonado com peso molecular de 30.000 g/mol, geralmente favorece o crescimento rápido da resistência inicial em condições de temperaturas mais baixas ou em locais onde o auto-adensamento é excepcionalmente necessário em relação ao naftaleno. Os naftalenos geralmente oferecem melhor custo/benefício e melhor retenção da consistência, melhoram a coesão e reduzem a tendência à exsudação e à segregação de misturas fluidas, tornando-as fáceis ao manuseio.

O principal efeito das moléculas longas é o de se enrolarem ao redor das partículas de cimento, conferindo-lhes uma carga altamente negativa, de modo que elas passam a se repelir. Isto resulta em uma defloculação e dispersão das partículas de cimento. O melhoramento resultante da trabalhabilidade pode ser aproveitado de dois modos: produzindo-se concreto com trabalhabilidade muito alta ou concreto com resistência muito alta.

Segundo Gay (2004), a base de policarboxilato é tipicamente formada por polimerização de ácido acrílico; entretanto, o fabricante pode substituir o ácido acrílico por moléculas imidizadas, tais como succinimido ou acetato de vinilo, estireno ou ácido sulfanílico, para modificar as propriedades de dispersão. Depois, esse polímero é copolimerizado com etoxilato, geralmente um polietileno ou glicol polipropileno, ou ainda um copolímero dos dois. O comprimento da cadeia do etoxilato e o número de reações em uma cadeia de policarboxilato reagem às propriedades do superplastificante éter-policarboxilato. A estrutura básica do policarboxilato está representada conforme figura 2.4.

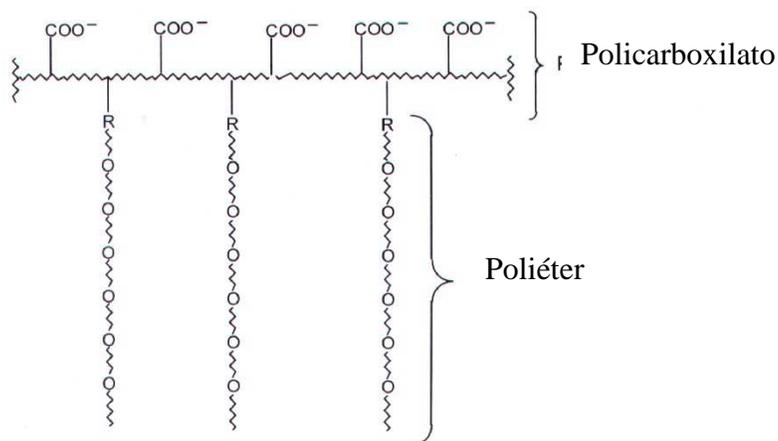


Figura 2.4 – Estrutura Básica dos Éteres Policarboxilato.

Segundo GAY (2004), os aditivos superplastificantes à base de éter policarboxilato apresentam mecanismos de atuação no concreto um pouco diferenciado dos aditivos à base de melamina e naftaleno. Os policarboxilatos também adsorvem em cimento hidratado pelos grupos de carboxilato, mas menos intensamente do que os grupos sulfonados nos superplastificantes anteriores. Contudo, as cadeias laterais de etoxilato são hidrófilas e formam uma resistente camada de solvatação ao redor da molécula, tanto na solução como quando adsorvidas na superfície de cimento, formando uma camada esférica ao redor do cimento, eficaz em sua capacidade de evitar a refloculação das partículas, menos afetadas pelo processo contínuo da hidratação do cimento, que, em outros superplastificantes, provoca a neutralização do efeito dispersante. A figura 2.5 representa um modelo da estrutura ativa da relação entre o éter policarboxilato e o cimento.

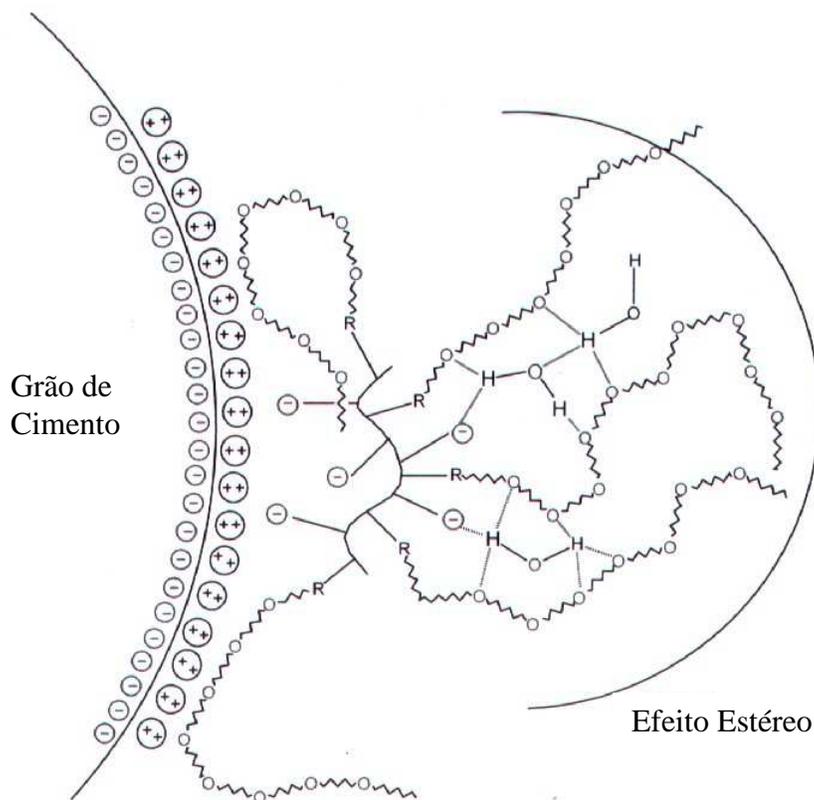


Figura 2.5 - Modelo da Estrutura ativa da relação entre o éter policarboxilato e o cimento.

No concreto auto-adensável, é sempre importante o uso de um aditivo anti-segregante ou estabilizador. Nos casos em que os materiais nem sempre são os mais adequados para o concreto auto-adensável, citando o de uma areia grossa ou a falta de coesão do concreto devido à falta de finos, é sempre preferível a utilização deste aditivo à base de celulose, que proporciona coesão e estabilidade sem prejudicar a trabalhabilidade.

2.2.5 Retração do CAA.

A retração do CAA é uma preocupação a ser considerada devido ao alto consumo de finos que este concreto exige. A retração total, segundo o *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete* (2005) é a soma da retração autógena e retração por secagem. A retração autógena ocorre durante o endurecimento e é causada pelo consumo interno da água durante a hidratação do cimento. O volume do produto da hidratação é menor do que o volume original

antes da hidratação do cimento e água, esta redução no volume causam tensões que resultam na retração autógena.

A retração por secagem é causada pela perda de água do concreto na atmosfera. Geralmente esta perda da água é originada da pasta de cimento, mas em alguns casos o tipo de agregado é o causador principal da perda de água.

Segundo o *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete* (2005), testes de desempenho de fluência e retração em diferentes tipos de concretos auto-adensáveis e concreto referência mostram que:

- a deformação causada pela retração pode ser maior;
- a deformação ocasionada pela fluência pode ser menor;
- os valores da soma das deformações por retração e fluência são praticamente similares;

Estudos realizados por Kare e Hammer (2000), utilizando concreto auto-adensável com relação água/aglomerante = 0,60 (ambiente com agressividade média), três tipos de agregados, sílica ativa e três aditivos superplastificante a base de éter-policarboxilato, concluem que não houve diferença entre os resultados de retração obtidos entre os diferentes aditivos, e concretos dosados com sílica ativa tiveram retração maior que as dosadas com filler. As retrações medidas no concreto auto-adensável não foram diferentes das normalmente encontradas em concretos normais. Entre as dosagens realizadas com 4%, 7% e 10% de sílica ativa, não foi observado diferenças significativas de retração, sendo que a retração está relacionada diretamente com o consumo de aglomerante.

2.2.6 Aderência do CAA.

Uma das propriedades do concreto auto-adensável no estado endurecido de suma importância é a aderência da armadura com o concreto. Vários pesquisadores têm realizado testes cada qual utilizando as metodologias existentes em seu país.

Segundo Arbaláez (2003), estudos realizados em CAA no concreto protendido desenvolvido na Universidade Politécnica de Valência verificaram que o concreto auto-adensável em comparação ao concreto convencional com grandes consumos de cimento não apresentam diferenças entre si no que diz respeito ao comportamento de aderência e deslizamento. Entretanto, para concretos com baixo consumo de cimento os comprimentos de ancoragem são ligeiramente superiores no concreto auto-adensável. O mesmo foi concluído pelo pesquisador Frank (2000), num ensaio realizado pelo método da RILEM modificado.

Segundo Barbosa (2004) nos testes realizados conforme ABNT/NBR 7477 (1982) de Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial das Barras de Aço, o concreto auto-adensável apresentou tensão média de aderência superior ao concreto convencional. O autor explica este resultado devido à resistência à compressão e tração terem sido superior ao do concreto convencional.

Segundo Alcântara (2004) que avaliou a influência da posição da armadura no desenvolvimento de aderência na interface entre o concreto auto-adensável e a armadura, concluiu que a posição vertical da armadura é a mais favorável para barras lisas e nervuradas. No caso das barras posicionadas verticalmente, as barras lisas são menos sensíveis à posição da armadura do que nos casos da armadura nervurada.

O Guia Europeu FR CAA (2005), explica que a vibração durante a concretagem ocasiona a exsudação e segregação prejudicando a aderência da armadura com o concreto, e no caso do concreto auto-adensável, por não ter essa influência, a aderência é melhor do que nos concretos convencionais. OUCHI M. et al (2003) explicam a mesma teoria.

2.2.7 Resistência à Compressão

A resistência à compressão é sem dúvida uma das propriedades mais investigadas para concretos fluidos. Vários pesquisadores vêm estudando essa propriedade e as conclusões obtidas parecem convergir para o aspecto de que os superfluidificantes utilizados em concretos fluidos e,

conseqüentemente, com a finalidade de apenas aumentar a trabalhabilidade, não alteram significativamente a resistência a compressão, em comparação com as misturas de controle. Os valores de resistência do concreto fluido endurecido são, em geral, iguais aos do concreto de controle sem aditivo. Porém, essa afirmação é contestada por outros pesquisadores, que chegaram a resultados maiores e menores que o concreto de controle. Essa variação nos resultados é originada dos tipos de aditivos e materiais utilizados para cada tipo de pesquisa.

Segundo Arbelaéz (2003), o concreto auto-adensável apresentou resistências a compressão levemente superiores às do concreto convencional equivalente, mas a resistência à tração indireta (compressão diametral) são superiores em aproximadamente 40%.

Quando se trata de concreto de alta resistência, os ensaios de compressão axial também exigem atenção especial quanto à forma de se obter a superfície plana do corpo-de-prova, assim como a velocidade de carregamento. Na prática se observa que devido a estes fatores o desvio padrão normalmente tende a ser maior. O processo mais recomendado do tratamento de superfície para este caso é o desbaste da superfície através de equipamentos apropriados.

2.2.8 Métodos de Dosagem.

Atualmente existem várias metodologias de dosagem do CAA, sendo cada qual apropriado para cada usuário. A metodologia de CAA proposta por Okamura e Ozawa será detalhada por se tratar do primeiro. Em 1995 Okamura e Ozawa fizeram uma simples proposta do método de dosagem para concreto auto-adensável presumindo uma visão geral dos fornecedores de concreto. Nesta proposta o consumo do agregado graúdo e miúdo são fixados, e a trabalhabilidade do CAA é alcançada ajustando a relação água/aglomerante e a dosagem do superplastificante. Na figura 2.6 está apresentado um comparativo do concreto convencional com o CAA e na figura 2.7 o esquema de dosagem proposto por Okamura.

Concreto auto-adensável

Ar	Água	Aglomerante	Areia	Brita
Ar	Água	Aglomerante	Areia	Brita

Concreto Convencional

Figura 2.6- Comparativo do concreto convencional com o CAA, conforme Okamura e Ouchi (2003).

Na figura 2.6 Okamura e Ouchi mostram as diferenças na proporção dos materiais na composição da dosagem entre o CAA e o concreto convencional. As mudanças ocorrem nas quantidades de aglomerante e brita.

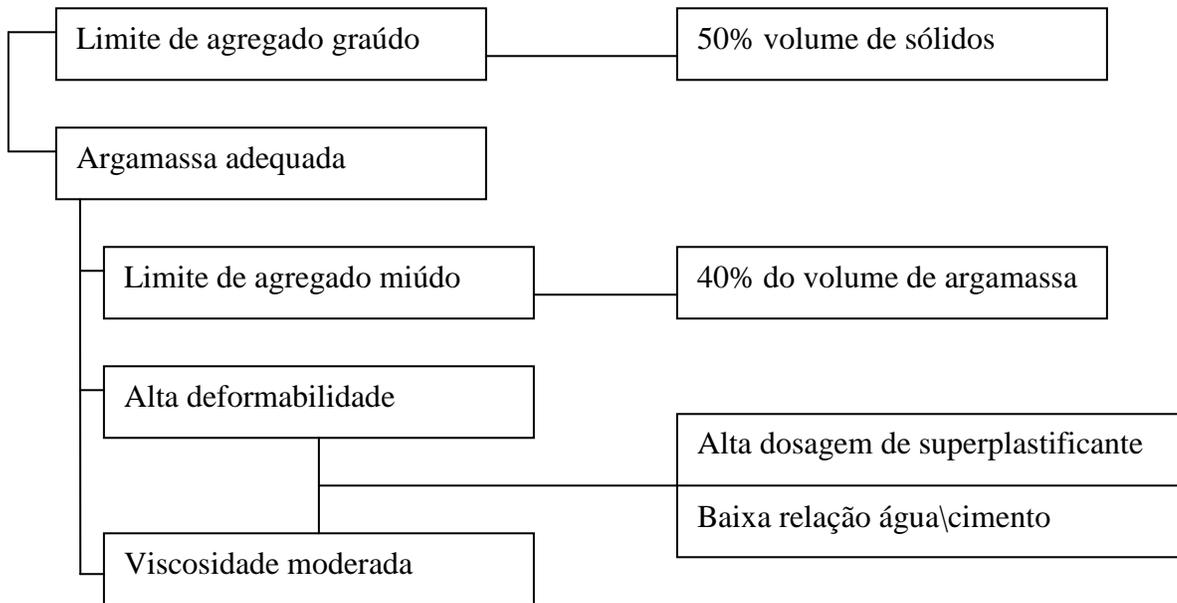


Figura 2.7. Esquema de dosagem, conforme Okamura e Ouchi (2003).

Na figura 2.7 Okamura e Ouchi propuseram as premissas para a dosagem do concreto auto-adensável fixando os seguintes parâmetros:

- 1) o consumo de agregado graúdo é fixado em $\leq 50\%$ do volume do concreto;
- 2) o consumo de agregado miúdo é fixado em $\leq 40\%$ do volume da argamassa;
- 3) a relação água/aglomerante em volume entre 0,9 e 1,0, dependendo das propriedades do tipo de fino;
- 4) a dosagem do superplastificante e a relação água/aglomerante final é determinada quando assegura características de um CAA.

Para a determinação da dosagem em concretos convencionais, a relação água/cimento é fixada primeiramente para atender a sua resistência. Devido à alta sensibilidade do concreto auto-adensável a relação água/aglomerante será decidida em função da trabalhabilidade do CAA. Em muitos casos, a resistência à compressão requerida não determina a relação água/cimento porque a relação água/aglomerante é menor obtendo a resistência à compressão maior do que a requerida nas estruturas convencionais, a menos que se usem finos não reativos.

Nan Su (2001) sugere uma metodologia que trabalha com a massa unitária compactada dos agregados, montando o esqueleto granular e o consumo mínimo de argamassa. Em seguida determina-se o consumo de cimento em função da resistência requerida, e conhecendo a relação água/cimento se define a quantidade da água. Os finos são calculados para o restante do volume faltante para 1m^3 de concreto.

Gomes (2002) trabalha com o conceito da dosagem para CAA de alta resistência. Normalmente o CAA gera resistências altas devido a sua composição da dosagem, e com a preocupação da durabilidade da estrutura em concreto armado esta consequência pode ser vista como uma vantagem desta tecnologia. Nesta metodologia o concreto é tratado como bifásico, sendo numa fase a pasta e na outra o esqueleto granular. Cada uma das fases pode ser otimizada separadamente se adequando às propriedades desejadas do concreto. A relação água/aglomerante sempre será inferior a 0,40 e sempre será necessário um aditivo superplastificante de elevado

desempenho. A definição de um esqueleto granular mais compacto também é importante para a dosagem racional do concreto.

Tutikian (2004) propôs a metodologia de dosagem para o CAA, baseado no método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992) para concretos convencionais. Neste método Tutikian conclui que deve ser utilizado o menor teor de argamassa necessário para preencher os vazios entre os agregados graúdos no CAA, para evitar manifestações patológicas e diminuir custos. Entretanto, é importante lembrar que no conceito do CAA a argamassa é responsável pela veiculação do agregado graúdo dentro da fôrma vencendo obstáculos como as armaduras e as tubulações inseridas na estrutura.

Segundo o estudo realizado pelo pesquisador Örjan (1998) foi verificado que o custo do concreto auto-adensável sem fibra de aço e com fibra de aço tiveram aumento no custo para resistências equivalentes conforme tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Avaliação no aumento de custo do CAA. (fonte: Örjan P. 1998)

Concreto	Custo ECU	Aumento no custo ECU	Aumento de custo esperado ECU
“Convencional”	46,9	-	-
CAA	69,6	22,7	15
CAA + 30 kg/m ³ de fibra de aço	116,5	24,9*	23

Nota: valores na Suécia

* sem o custo da fibra de aço

Segundo Okamura e Ouchi (2003) a utilização do concreto auto-adensável reduz o custo da compactação por vibração e assegura a compactação do concreto na estrutura. Entretanto, o custo total da construção nem sempre pode ser reduzido, exceto em construções de grande escala. Isto porque as construções convencionais são essencialmente desenhadas e baseadas em concretos necessariamente vibrados .

Tutikian (2004) realizou estudos em concreto auto-adensável com adição de cinza de casca de arroz, onde esta adição tem a propriedade pozolânica similar ao da sílica ativa e menor

custo. Nesta condição o concreto auto-adensável obteve uma redução no custo quando comparado ao concreto convencional. Entretanto, a resistência nas primeiras idades é menor, um fator negativo para fábricas de pré-moldados. Neste trabalho não foi comparado o concreto convencional com adição de cinza de casca de arroz.

2.3 ESTUDOS DE CASOS.

2.3.1-Ponte Akashi Kaikyo, Japão.

O concreto auto-adensável foi utilizado no maior projeto de blocos de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo, no Japão, que foi aberta para o tráfego em 1998, conforme figura 2.8. Trata-se da ponte pênsil mais extensa do mundo, com 3.911 metros total de extensão e com o vão central de 1.991 metros. O lançamento do concreto auto-adensável foi iniciado em novembro de 1992 e finalizado em março de 1994.

Os quatro blocos de ancoragem, com 84,5 m x 63,0 m x 47,5 m de dimensão, foram densamente armados, sendo que dois blocos foram concretados com concreto tradicional e os outros com concreto auto-adensável, conforme característica da dosagem apresentada na tabela - 2.5 e a dosagem na tabela 2.6. Para reduzir o calor de hidratação e as fissuras de retração térmica, fez-se uso do cimento com adição de escória de alto forno. O uso do concreto auto-adensável reduziu o tempo de construção de 30 meses para 24 meses, uma redução de 20%.

O concreto foi misturado numa central próxima ao local e bombeado por aproximadamente 200m, utilizando tubos de 3,00 a 5,00 metros, providos a cada 5,00 metros de uma saída para analisar e assegurar um concreto auto-adensável constante. O concreto foi lançado de uma altura de 3,00 metros e não houve segregação, apesar da utilização de agregados com 40,0mm de diâmetro máximo característico.

Bloco de ancoragem



Figura 2.8 Ponte pênsil – Akashi Kaikyo
Fonte: Ouchi (2003)

Três fatores foram considerados essenciais para o sucesso:

1. garantia da qualidade, apesar da alta fluidez e resistência à segregação do concreto;
2. controle de fissuras de retração térmica, utilizando cimento de baixo calor de hidratação;
3. lançamento de grandes volumes de concreto, aproximadamente 1900 m^3 por dia.

Os enfoques para uma dosagem racional do concreto auto-adensável foram:

1. utilização de cimento com baixo calor de hidratação;
2. diâmetro máximo característico do agregado de 40mm, para reduzir o consumo de cimento;
3. adequada fluidez, requerida por 30 minutos para o bombeamento e lançamento sem segregação.

A fluidez foi conseguida com o uso de aditivos superplastificantes, incorporadores de ar e filler calcário. Muitos testes foram realizados para garantir as propriedades do concreto auto-adensável em estado fresco. O tempo de mistura foi importante e a pressão lateral nas fôrmas foi considerada para tal fluidez do concreto.

Tabela 2.5 - Características da dosagem para o bloco de ancoragem:

Resistência à compressão aos 91 dias	MPa	24,0
Diâmetro máximo do agregado	mm	40,0
Espalhamento (<i>Flow</i>)	cm	55,0 ± 5,0
Ar incorporado	%	4,0 ± 1,0
Temperatura máxima	° C	≤ 25,0
Exsudação	%	≤ 3,0
Densidade do concreto fresco	kg/m ³	≥ 2.300
Cimento	Baixo calor de hidratação	

Tabela 2.6 - Dosagem do concreto auto-adensável utilizado na ponte Akashi Kaikyo:

		Bloco 01	Bloco 02	
Diâmetro máximo do agregado	mm	40,0	40,0	
Relação água/cimento	-	0,56	0,56	
Agregado miúdo/graúdo	%	45	36	
Materiais	Água	kg/m ³	145	145
	Cimento	kg/m ³	260	260
	Filer Calcário	kg/m ³	150	150
	Areia	kg/m ³	769	609
	Agregado graúdo	kg/m ³	965	1121
Superplastificante	(C+F)x%	1,5	1,9	

2.3.2 Ponte Ritto, Japão

A Ponte Ritto foi construída em pré-moldado para a *New Meishin Expressway* no Japão conforme Ouchi M. et al, (2003). Com o pilar mais alto de 65 metros de altura, foi especificado para a obra de concreto de alta resistência com 50 MPa e armaduras de 685 MPa, onde também foi levado em consideração a resistência a abalos sísmicos. Portanto, com a armação bastante densa o concreto auto-adensável foi indicado devido à excelente trabalhabilidade para a construção do pilar.

Os requerimentos do CAA estão apresentados conforme tabela 2.7, de acordo com as recomendações do JSCE – Japan Society of Civil Engineers – e *Japan Highway Public Corporation* (JH) e na tabela 2.8 estão as dosagens e os resultados obtidos.

Tabela 2.7- Recomendações do JSCE e JH.

Ensaio	Unidade	Especificação
Concreto fresco		
Espalhamento (slump flow)	mm	600 a 650
Tempo de espalhamento T500	segundos	3 a 15
Caixa U	mm	Mínimo 300
Funil V	segundos	8 a 15
Ar incorporado	%	4,5
Quantidade de íons cloreto	kg/m ³	Máximo 0.3
Concreto endurecido		
Resistência à compressão	MPa	50,0

Tabela 2.8 - Dosagem de materiais secos para 1m³ de concreto (kg/m³) e resultados obtidos:

Dosagem de concreto					
Cimento	Areia	Brita 0 (13mm)	Brita 01 (20mm)	Água	Aditivo
470	868	336	505	155	6,11
Ensaio realizado					
Espalhamento	T500	Caixa U	Funil V	Ar incorporado	Resistência à compressão
650 mm	6,1 segundos	338 mm	11,8 segundos	4,3%	74,0 MPa*

* resistência à compressão aos 28 dias.

O espalhamento especificado no começo da obra foi de 600 ± 50mm. Entretanto no sétimo segmento o espalhamento foi revisado e modificado para 650 ± 50 mm devido a diminuição da fluidez na saída da tubulação após passar pelo bombeamento.

2.3.3 Viaduto Higashi-Oozu, Japão.

Os pré-moldados protendidos em vigas tipo I foram projetados para concreto convencional com abatimento de 80 mm. Entretanto, foi verificado que este concreto convencional não conseguiria o acabamento esperado devido às dimensões da viga dificultando a vibração do concreto. E complementando, o problema de ruído para a vizinhança da obra devido ao vibrador, o concreto auto-adensável foi escolhido para a fabricação das vigas.

A tabela 2.9 apresenta os resultados do controle de qualidade do concreto auto-adensável. Resultados no estado fresco e resistência a compressão, onde todos o resultados atenderam as a especificações:

Tabela 2.9 – Resultados do controle de qualidade.

	Concreto fresco			Resistência à compressão (MPa)			
	Espalhamento (mm)	Funil V (s)	Ar incorporado (%)	protensão	01 dia	7 dias	28 dias
Valores especificados	650	12	2,0	> 30 MPa		> 50 MPa	-
n° de testes	39	39	39	39	19	35	34
Média	665	12,1	1,8	41,2	39,7	62,4	71,0
Valor máximo	695	14,0	2,5	54,2	44,5	69,5	80,5
Valor mínimo	620	9,0	1,2	33,5	33,5	58,0	64,9
Desvio padrão	20	1,5	0,3	5,5	2,7	3,0	4,7

Para o concreto foi decidida a adição de 20% de cinza volante levando em consideração as propriedades do concreto, localização da fábrica e custo do concreto, conforme a dosagem apresentada na tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Dosagem de CAA utilizado no Viaduto Higashi-Oozu.

Relação a/agl. (%)	Adição (%)	Unidade de pesagem (kg/m ³)					
		Água	Cimento	Cinza volante	Areia	Brita	Aditivo SP * (%)
30,5	20	175	457	118	840	744	1,0

* o aditivo foi calculado sobre o consumo de aglomerante.

A tabela 2.11 apresenta o custo comparativo entre o concreto convencional e o concreto auto-adensável. O custo do material aumentou 4,0%, a mão de obra diminuiu 33% e o total do custo diminuiu aproximadamente 7,0%. Esta é mais uma das razões da utilização da cinza volante devido ao baixo custo e poder utilizar concreto auto-adensável em concretos protendidos.

Tabela 2.11- Comparativo de custo entre o CAA e concreto convencional.

Material	Concreto convencional	Concreto auto-adensável
	100	104,1
Mão de obra	100	67,2
Total	100	92,5

Entretanto, em muitos casos, o concreto auto-adensável ainda é tratado com um concreto especial, porque nem sempre se alcança o custo x benefício ideal, e a dificuldade no controle de qualidade, apesar do concreto auto-adensável apresentar muitas vantagens para os pré-moldados. Para o avanço e a expansão desta tecnologia ainda é necessário verificar outros valores como o custo do ciclo de vida e o meio ambiente.

2.3.4 Projeto Sodra Lanken, Suíça.

O projeto Sodra Lanken (SL) se trata de uma obra de infra-estrutura na Suíça (Osterberg T. et al 2003), estimado em 8 milhões de USD. A obra utilizou aproximadamente 225.000 m³ de concreto. Neste projeto o concreto auto-adensável foi utilizado em paredes de 5 metros de altura, 9 a 16 metros de comprimento e 0,80 metros de largura e nos arcos dos túneis. A dosagem utilizada está apresentada na tabela 2.12.

Tabela 2.12-Consumo de material seco para 01 m³ de concreto.

Cimento (kg)	Filer calcáreo (kg)	Areia (kg)	Brita (8 a 16 mm) (kg)	Água (kg)
440	160	880	720	167

As resistências à compressão obtidas foram entre 70 a 80 MPa medidos em cubos, o espalhamento entre 720 a 770 mm sendo o objetivo de 740 mm e o ar incorporado variou de 4 a 7%. Desta obra foi possível analisar vários aspectos do concreto auto-adensável:

- produção do concreto auto-adensável;
- transporte do concreto;

- sistema de fôrma;
- lançamento na obra;
- acabamento da estrutura e cura;
- juntas frias.

Neste trabalho não foi analisado o custo x benefício desta tecnologia. Certamente por se tratar de túneis teria que ser comparado não somente com o concreto convencional, mas também com o concreto projetado que geralmente são os mais utilizados para túneis.

O CAA conforme estudado neste capítulo, se trata de uma realidade com a utilização crescente em vários países. Entretanto, o Japão é o único país que tem apresentado os volumes utilizados nos últimos anos. No Brasil, este controle no CAA assim como nos demais tipos de concreto não são acompanhados por nenhuma instituição, sendo que através destes números poderíamos analisar melhor as tendências de mercado e as vantagens do uso de novas tecnologias.

Os materiais de composição do CAA não têm se diferenciado do concreto convencional. A diferença está na dosagem de cada material, onde o CAA exige um teor de finos e argamassa superior ao do concreto convencional e um aditivo superplastificante com maior poder de plastificar o concreto, utilizando-se o consumo de água normalmente praticado em concreto convencional. Quanto à qualidade dos materiais, o CAA é mais susceptível às variações do índice de forma do agregado graúdo, granulometria e teor de material pulverulento.

As características no estado endurecido, geralmente têm se apresentado similar ou superior ao concreto convencional. Não deixando dúvidas de que se trata de um avanço na tecnologia do concreto alcançando o objetivo principal do surgimento deste concreto que é a durabilidade, tenacidade e outras características físicas.

2.4 METODOLOGIA DE ENSAIO PARA CARACTERIZAR O CAA

A avaliação da trabalhabilidade sempre foi uma questão muito discutida no concreto convencional, e no CAA não é diferente. Apesar de o CAA ter sido desenvolvido no Japão, outros países já utilizavam o concreto de alta trabalhabilidade e adaptaram seus ensaios com os equipamentos em uso. O ensaio para avaliação do CAA difere do concreto convencional, onde todos os ensaios que utilizam alguma vibração ou compactação descaracterizam os resultados, e no CAA é necessário a verificação de outros aspectos que não são necessários no ensaio do concreto convencional, como a capacidade de auto-nivelamento, fluir entre os obstáculos com o peso próprio, velocidade da fluidez e o preenchimento das formas sem aprisionar bolhas de ar. Alguns destes parâmetros são expressos em número e outros são avaliações subjetivas. As metodologias e os equipamentos mais utilizados no mundo estão descritos a seguir.

2.4.1 Determinação da Consistência pelo Abatimento de Tronco de Cone – NBR NM 67/98

A avaliação do concreto pelo cone de Abrams conforme número da norma citada, embora seja utilizado somente para concretos de consistências mensuráveis através do abatimento, se torna importante no CAA quando é necessário o abatimento inicial do concreto como controle antes de torná-lo auto-adensável.

O ensaio de abatimento mede a diferença de altura do concreto fresco, na forma de um tronco de cone, antes e depois do molde ser removido NBR NM 67/98.

Conforme analisa Bartos (1981), esse ensaio de abatimento não detecta diferenças na trabalhabilidade de concretos fluidos e é mais comumente utilizado para determinar a consistência da mistura antes da adição do superplastificante e na especificação de limites para esse tipo de concreto.

A figura 2.9, apresenta um concreto com consistência de concreto convencional medindo o abatimento do tronco de cone.



Figura 2.9 - Ensaio de abatimento do tronco de cone.
Fonte: MC Bauchemie Brasil

2.4.2 Determinação da trabalhabilidade do CAA pelo espalhamento.

Este ensaio segue um procedimento similar ao ensaio de avaliação da consistência do concreto conforme NBR NM 67/98 utilizado em concreto convencional, com algumas mudanças nas dimensões da chapa de base, e no preenchimento do cone com o concreto que é executado em apenas uma camada sem a utilização do soquete para a compactação, medindo-se os seguintes itens quando o cone é removido:

- tempo necessário para espalhar 500 mm de diâmetro (T_{500});
- final do espalhamento;

- aspecto do concreto espalhado, apesar de ser subjetivo é um dado muito importante para definição da dosagem do CAA.

A figura 2.10 apresenta um concreto auto-adensável em ensaio, medindo o tempo e o diâmetro do espalhamento.



Figura 2.10-Ensaio de espalhamento.
Fonte: MC Bauchemie Brasil

Em estudos realizados no Japão pelo *BRI - Building Research International*, do Ministério da Construção Civil, foi utilizado para avaliar o CAA a mesma metodologia de ensaio do espalhamento do cone de concreto, porém de nominado por JIS A 1101 (*Japan Industrial Standard*), verificando velocidade de espalhamento T_{500} , assim como o formato do concreto após o espalhamento total, classificando o aspecto final do concreto conforme segue:

- formato e distribuição de agregado/argamassa homogêneo e ideal, sem exsudação.
- formato e distribuição de agregado/argamassa homogêneo e ideal, porém com pouca exsudação.
- formato e distribuição de agregado/argamassa homogêneo e ideal, porém com alta exsudação.
- formato irregular, apresentando exsudação e segregação.
- formato e distribuição de agregado/argamassa homogêneo e ideal, porém com excesso de coesão.

O ensaio de espalhamento pode ser realizado por apenas uma pessoa quando o objetivo for determinar apenas o diâmetro do espalhamento. Quando for necessário determinar o tempo para o concreto alcançar o espalhamento de 500 mm (T_{500}) é recomendável que seja realizado com duas pessoas. O equipamento é composto por uma base quadrada com dimensões de 1000mm x 1000mm, que não absorva água e nem provoque atrito com o concreto, normalmente metálico e por um tronco de cone também normalmente metálico. A base deve ter a marcação do centro, do diâmetro de 200 mm para colocação do cone e do diâmetro de 500mm para servir de referência na tomada do tempo T_{500} . O cone deve ter 300 mm de altura, diâmetro interno menor que 100 mm e diâmetro maior que 200 mm. Outros instrumentos necessários para o teste são uma espátula, uma concha, uma trena para medir o espalhamento do concreto e um cronômetro para a tomada do tempo. Primeiramente todos os equipamentos devem ser umedecidos para evitar que absorva a água de amassamento do concreto e principalmente a base, pois a falta de umidade na superfície de ensaio da base altera o índice de atrito e prejudica os resultados do ensaio. Após colocar a placa sobre o chão firme e nivelado, e o tronco no centro da base, segurando-o firmemente sobre o círculo de 200 mm. Aproximadamente seis litros de concreto serão necessários para o ensaio e esta amostra deve ser coletada de acordo com a ABNT, NBR NM 33(1998) – Amostragem de concreto fresco.

Com a concha côncava, prende-se o cone com o concreto sem utilizar o soquete, apenas em uma camada e com a espátula remove-se o excesso do topo do cone. É recomendado também qualquer excesso de concreto na placa e então se ergue verticalmente o cone e permite-se que o concreto flua livremente, medindo o T_{500} e depois que o concreto estiver estabilizado sem nenhum movimento medir o diâmetro do espalhamento em duas direções perpendiculares. A média destas medidas é o valor do espalhamento, também conhecido como “flow”. Dentro do aspecto subjetivo do ensaio é importante a análise do formato, presença de exsudação e ou segregação.

Ramachandram (1981) estudou concretos de alta trabalhabilidade analisando a área ocupada pela mistura após a desmoldagem a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone, provando ser esta medida um bom indicador da trabalhabilidade dos concretos fluidos.

Chiara (2000) conclui que a caracterização do concreto medindo o espalhamento não é o suficiente para determinar se o concreto é auto-adensável.

Na tabela 2.13, estão citados os limites mínimo e máximo para um concreto ser considerado auto-adensável quanto ao espalhamento e tempo de espalhamento T_{500} , segundo diversos autores. Observa-se que estes valores variam consideravelmente. Espalhamentos abaixo do limite inferior ou superior indicam que o concreto deve ser reavaliado quanto aos materiais que o compõe.

Tabela 2.13-Limites de resultados para o espalhamento, segundo diversas referências, conforme Tutikian (2004).

Referências	Espalhamento (mm)		Tempo T_{500} (s)	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo
EFNARC (2002)	650	800	2	5
Gomes (2002)	600	700	4	10
Gomes et al. (2003a)	600	750	3	7
Araújo et al (2003)	650	800	2	5
Rigueira Vitor et al (2003)	600	800	3	6
Barbosa ET al (2002)	550	700	-	-
Peterssen (1999)	650	725	3	7
Tviksta (2000)	600	-	3	7
Coppola (2000)	600	750	5	12
Palma (2001)	650	750	3	6

2.4.3 Ensaio de escoamento

Com o objetivo de avaliar a trabalhabilidade de concretos fluidos, Bartos (1981) desenvolveu um equipamento específico para essa finalidade. Esse equipamento consiste em um tubo vertical de aço ajustado a um orifício permutável na sua extremidade inferior,

correspondendo ao aperfeiçoamento de uma primeira versão, apresentada por esse mesmo autor em 1978. O princípio do ensaio baseia-se no tempo necessário para que certo volume de concreto escoe pelo tubo de aço, de modo padronizado. Esse ensaio foi desenvolvido especificamente como um método para avaliar rapidamente concretos fluidos principalmente concretos submersos em canteiro de obras. Tempos de escoamento inferiores a 5 segundos para o volume de 7,5 litros indicam misturas fluidas com trabalhabilidade adequada. Esse limite foi observado para concretos nos quais se utilizaram agregados com dimensão máxima característica de 20mm.

De acordo com Bartos (1992), o ensaio tem capacidade de distinguir misturas fluidas entre si e de detectar a susceptibilidade à segregação ou exsudação. Também são destacados aspectos quanto à simplicidade e à praticidade do ensaio. Este equipamento vem sendo utilizado em estudos para concretos submersos com grande coesão, por Bartos e Tamimi (1992) conforme figura 2.11 e conhecido como *Orimet test*.

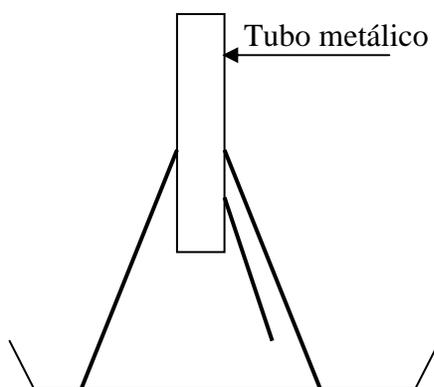


Fig. 2.11 Método de ensaio *Orimet test*

2.4.4 Ensaio de Fluidez pelo Método Funil - V

Este método é similar ao ensaio de fluidez do graute com cone, conforme figura 2.12, onde um volume de concreto é colocado e é permitido fluir para fora do funil. O tempo total de escoamento é registrado. Este ensaio fornece medidas relativas da viscosidade plástica da mistura; para misturas similares, o tempo de escoamento maior corresponde a uma mistura de alta

viscosidade plástica. Este ensaio também mede a capacidade do concreto de deformar e fluir através de espaços estreitos. Este método ajuda a caracterizar a viscosidade e a capacidade da mistura de se deformar e inferir quanto à estabilidade estática.

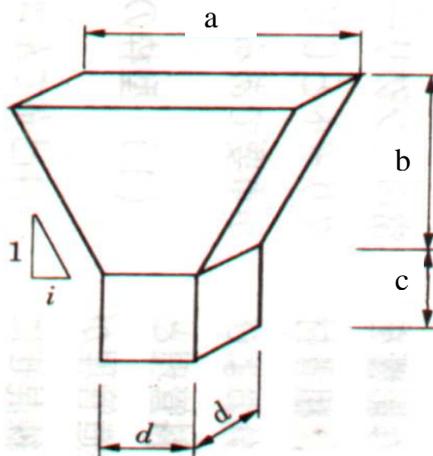


Figura 2.12 - Método Funil-V

Tutikian (2004) verificou uma grande variação nas dimensões utilizadas no funil V por algumas instituições e pesquisadores conforme tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Dimensões encontradas do funil-V, conforme Tutikian (2004).

Referências	Tempo		Dimensões			
	mínimo	máximo	A	b	c	d
EFNARC (2000)	6	12	490	425	150	65
FURNAS (2004c)	-	-	515	450	150	65
Gomes (2002)	10	15	515	450	150	65 ou 75
Gomes et al (2003a)	7	13	515	450	150	65
Araújo et al (2003)	6	12	-	-	-	-
Noor e Uomoto (1999)	9,5	9,5	490	425	150	70
Petersen (1998 e 1999)	5	15	550	450	120	75
Coppola (2000)	-	-	500	425	150	65

2.4.5 Ensaio de Fluidez pelo Método da Caixa "U"

A caixa em forma de U é dividida em dois compartimentos, separados por uma porta corrediça na parte inferior, conforme figura 2.13. Um dos lados é preenchido com concreto, e em seguida a porta corrediça inferior é aberta, permitindo que o concreto escoe para o compartimento vazio, com o peso próprio. O concreto poderá fluir sem obstáculos (Rank03), com obstáculos de barras abertamente separados (Rank2) e/ou através de obstáculos de barras separados com pequenos espaços (Rank1) (JSCE, 1998). A altura alcançada pelo concreto é medida. Este ensaio mede a capacidade de preenchimento da mistura através de seções limitadas, verificando o auto-nivelamento da mistura em zonas confinadas de pequenas distâncias de espalhamento horizontal, como no caso das colunas e/ou pilares. Pode analisar, também, se o concreto preenche a caixa U sem deixar agregados segregados no primeiro compartimento, assim como a estabilidade do concreto qualitativamente. Este método ajuda a caracterizar o nível de fluidez e estabilidade dinâmica da mistura.

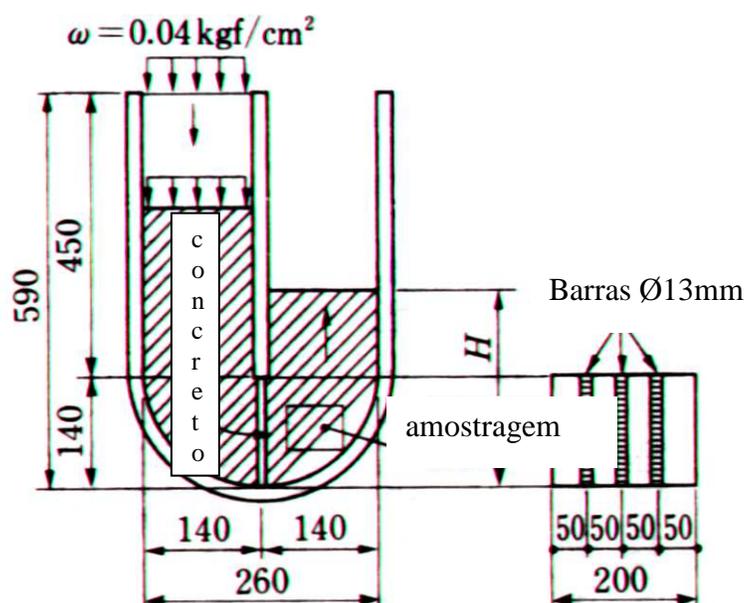


Fig.2.13-Método da Caixa "U".

Chiara (2000) concluiu que a caracterização do concreto medindo o espalhamento não é o suficiente para determinar se o concreto é auto-adensável. E baseado nos resultados obtidos a viscosidade plástica e tensão de escoamento não estão correlacionado com o teste do funil-V e da caixa “U”.

As dimensões encontradas por Tutikian (2004) entre várias bibliografias estão na tabela.2.15.

Tabela 2.15- Dimensões da caixa “U” em utilização, conforme Tutikian (2004).

Referência	R1-R2 (mm)		Dimensões (mm)			
	mínimo	máximo	a	b	C	d
EFNARC (2002)	0	30	200	590	140	140
Furnas (2004f)	-	-	200	680	190	140
Gomes (2002)	0	80	200	680	190	140
Araújo et al (2003)	0	30	-	-	-	-
Noor e Uomoto (1999)	0	24,2	200	680	190	140
Shindoh e Matsuoka (2003)	0	80	200	680	190	140
Coppola (2000)	90%	100%	200	680	190	140

2.4.6 Ensaio de Fluidez pelo Método da Caixa "L".

A caixa em forma de L está equipada com uma porta corrediça que separa a seção vertical da horizontal. A parte vertical da caixa é preenchida com concreto e quando a porta é aberta, o concreto flui com seu peso próprio na parte horizontal, conforme figura 2.14. Barras de aço podem ser colocadas junto á porta corrediça e o concreto deverá fluir através destes obstáculos. São verificadas três medidas: a distância da fluidez, a altura crescente a partir do topo da caixa (H_2) e a altura do concreto resultante depois de escoado (H_1). A razão de H_2/H_1 determina a capacidade de fluidez horizontal e de auto nivelamento da mistura, em uma área confinada através de obstáculos. Este método pode ser útil para medir a capacidade de uma mistura fluir a longas distâncias horizontais e em uma área confinada como uma parede ou em

peças de seções duplo T pré-moldadas. Este método ajuda a caracterizar o nível de fluidez e a estabilidade dinâmica da mistura. Tutikian (2004) verificou que neste ensaio as dimensões utilizadas entre os pesquisadores são iguais na sua grande maioria conforme tabela 2.16.

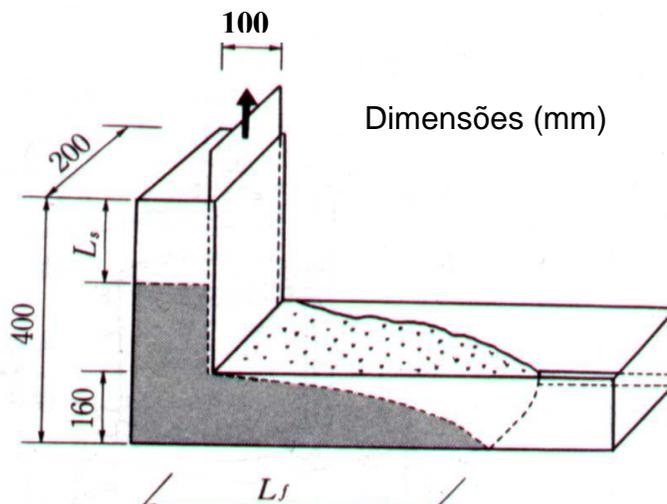


Figura 2.14- Método da caixa "L"

Tabela 2.16 – Dimensões da caixa “L” em utilização, conforme Tutikian (2004).

Referência	medidas			Dimensões (mm)				
	h_2/h_1	T_{20} (s)	T_{40} (s)	a	b	C	d	E
EFNARC (2002)	0,80	-	-	100	200	600	800	150
Furnas (2004d)	-	-	-	100	200	600	800	150
Gomes (2002)	0,80	<1	<2	100	200	600	800	150
Gomes et al. (2003)	0,80	0,5-1,5	2-3	100	200	600	800	150
Araújo et al. (2003)	0,80	-	-	-	-	-	-	-
Rigueira Victor et al.	0,80	<1,50	<3,5	-	-	-	-	-
Peterssen (1998 e 1999)	0,80	-	-	100	200	600	800	150
Barbosa et al. (2002)	-	-	-	100		600	800	150
Tviksta (2000)	0,85	-	-	100	200	600	800	150
Coppola (2000)	0,90	-	-	120	300	600	780	200
Palma (2001)	0,80	-	-	-	-	-	-	-

2.4.7 Método *FILL BOX TEST*

Segundo Tutikian, este equipamento é utilizado por EFNARC (2002), Furnas (2004b) e Gomes (2002), e é conhecido por fill box, método *Kajima* ou *vessel test*. Este equipamento mede a capacidade do concreto passar coeso, sem segregar por obstáculos como armaduras e eletrodutos. O aparato, ilustrado na figura 2.15, consiste em uma caixa transparente de 50 cm de comprimento, por 30 cm de altura e 30 cm de largura, com 35 barras de PVC de 20 mm de diâmetro espaçadas 5 cm de eixo a eixo, distribuídas ao longo da caixa. Insere-se no topo do aparelho uma barra de 100 mm de diâmetro com um funil de 200 mm de diâmetro, que será a entrada da amostra de concreto, de aproximadamente 45 litros e coletada de acordo com a NBR NM 33/98. A altura do material nas duas extremidades do equipamento é h_1 e h_2 , e a capacidade de preenchimento “F” do concreto é calculado de acordo com a equação 2.4.

$$F = 100x (h_1+h_2) / (2xh_1)$$

equação 2.4

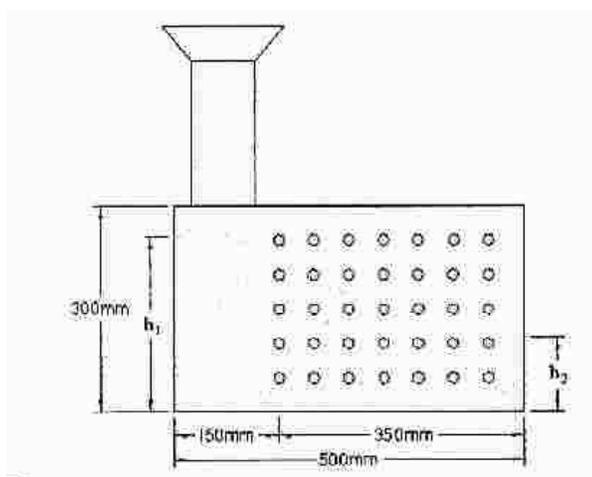


Figura 2.15 Método *Fill box test*

Para a realização deste ensaio são necessários os equipamentos com as medidas já determinadas, com material transparente e que não absorva (indevidamente) a água do concreto, uma concha côncava com capacidade de 1,5 litros a 2 litros de material e uma trena. Apenas um operador é suficiente. Primeiramente, deve-se colocar o equipamento em um solo firme e nivelado, para depois umedecer suas paredes sem que algum excesso de água permaneça.

Preencher o *fill box* com a amostra de concreto, cuidando para que seja derramado uma concha cônica a cada 5 segundos, e até que a mistura envolva a última barra de PVC. Medir duas alturas em cada face com a trena e a média aritmética destas duas será o h_1 e o h_2 e, então, calcular “F”. Todo o ensaio deve ser executado em menos de oito minutos (TUTIKIAN B.F., 2004).

Caso a capacidade de preenchimento de mistura seja inferior a 90% significa que o concreto deve ser ajustado para que alcance tal exigência, devendo ser fluidificado mantendo a coesão. Durante o procedimento, é importante a observação de ocorrência ou não de segregação, pois o concreto deve estar coeso ao passar pelas barras de aço, ou seja, se a argamassa chegar na extremidade da caixa oposta ao local de sua colocação, antes do agregado graúdo, significa que a mistura está segregando e alguma correção é necessária.

Para a mistura ser considerada auto-adensável, “F” deve estar situada entre 90% e 100%, por ser uma unanimidade entre outros autores, com mostra a tabela 2.17.

Tabela 2.17-Dimensões do *Fill Box*, conforme TUTIKIAN (2004).

Referência	F (%)		Dimensões (mm)					
	Mínimo	máximo	a	b	c	d	e	f
EFENARC (2002)	90	100	200	500	300	500	50	300
Furnas (2004b)	-	-	200	500	300	500	50	300
Gomes (2002)	-	-	-	-	300	500	50	-
Araújo et al. (2003)	90	100	-	-	-	-	-	-
Palma (2001)	-	100	-	500	-	-	50	-

2.4.8 Método *U-shaped pipe test*

Resistência a segregação significa que a distribuição dos agregados graúdos deve ser bem distribuída em todos os lugares e níveis. Ou seja, o concreto não pode segregar nem horizontal e nem verticalmente, por isso é necessário que exista um método rápido e simples para o teste da coesão de mistura (BUI et al., 2002, p. 1498).

Este procedimento foi totalmente desenvolvido por Gomes (2002), e serve para mensurar a segregação de um concreto auto-adensável. Existem outros métodos para analisar a resistência a segregação, com o BUI et al. (2002), o de Lowke et al (2003, p. 356), o proposto pela GTM (EFNARC, 2002, p. 16) e o de Khyayat e Guizani (Gomes, 2002,p.16), mas todos estes ou exigem muito tempo e esforço ou são imprecisos. Uma das vantagens deste equipamento, é que necessita de poucos recursos para construí-lo, é fácil de manejar e limpar, assim como o procedimento é simples. Mas apenas concretos fluidos podem ter sua segregação testada e o tempo de duração depende do início de pega de cada aglomerante. O *U-shaped pipe* é composto por três tubos de PVC de diâmetro interno de 156 mm, conforme a figura 2.16. O primeiro e o terceiro tubo tem 570 mm de comprimento, enquanto o segundo mede 800 mm, e todos são serrados ao meio e presos com braçadeiras metálicas, para que possam ser abertos sem danificar o concreto que está no interior. Cerca de 32 litros da mistura, coletadas de acordo com a NBR NM 33/98 são necessárias para a execução do teste, que nada mais é que uma comparação entre três corpos de prova retirados de três locais diferentes do “U”. (TUTIKIAN B. F., 2004)

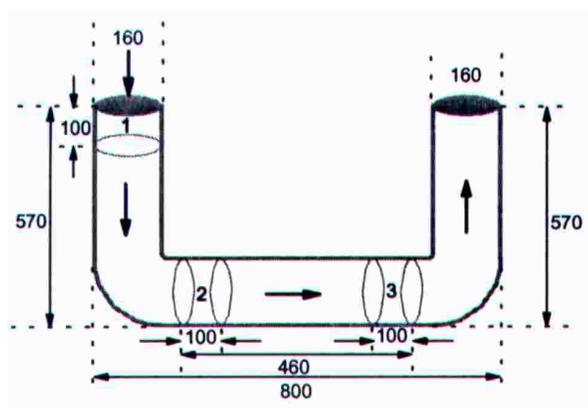


Figura 2.16 – *U Shaped pipe Test*

Para a execução deste teste são necessários pelo menos dois operadores, o equipamento de PVC, uma base de madeira para firmar os tubos, uma trena, uma pá côncava, uma serra, uma balança e uma peneira de 5 mm. Deve-se colocar o concreto no topo do primeiro tubo, que irá cair verticalmente, para, após, percorrer horizontalmente o segundo tubo, para alcançar o terceiro e subir verticalmente até o topo. Acredita-se que este caminho é representativo das condições reais que podem ocorrer em uma obra convencional. Após a colocação do material no interior do aparato, espera-se cerca de três horas, que é o tempo do concreto obter certa resistência para não se desmanchar, mas sem ocorrer a pega total, e coloca-se o equipamento na horizontal, para separar as duas partes do tubo. Então, extrai-se as três amostras para que ocorra a separação dos constituintes e se obtenha o agregado graúdo limpo. Estes devem ter sua superfície seca com papel toalha, para que sua massa seja determinada. A massa da amostra 1 é a referência, que será dividida pelas massas 2 e 3, e a menor relação será a quantificação da segregação (RS), calculada conforme a equação 2.5.

$$RS = P1/P2 \text{ ou } P1/P3 \quad \text{equação 2.5}$$

Se a relação RS for menor que 90%, demonstra que o concreto está segregando, ou seja, é necessário que se adicione materiais finos ou aditivo modificador de viscosidade para dar uma maior coesão à mistura. Após a extração dos exemplares, pode-se deixar o restante do concreto endurecer, para que se possam dividir os pedaços ao meio e analisar visualmente a segregação, pois um bom CAA partido ao meio deve ter os agregados graúdos distribuídos uniformemente.

2.4.9 Ensaio de trabalhabilidade pela Norma DIN 1045-2 - *DAfStb Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie) 11/2003.*

Visando a necessidade de praticidade no ensaio em campo, este método consiste em medir a fluidez do concreto, agregando à metodologia NBR NM 67/98, um acessório em forma de grade e o tronco de cone invertido, conforme figura 2.17, dependendo da dimensão do agregado, o número das barras ($\varnothing 18\text{mm}$) na grade poderá variar, conforme especificado na tabela

2.18. Depois de obtido o diâmetro dos espalhamentos pelos métodos sem a grade e com a grade, a diferença entre os espalhamentos medidos deverá ser inferior a 50 mm. Caso contrário o concreto será considerado inadequado para a aplicação. Neste trabalho será tratado como método SVB- Richtlinie.

Tabela 2.18 - Características da grade conforme o agregado.

Alternativa	Diâmetro máximo do agregado graúdo (mm)	Número de barras na grade (unitário)
1	8,0 a 11,4 mm	22 barras
2	16,0 a 22,0mm	16 barras
3	32mm	10 barras

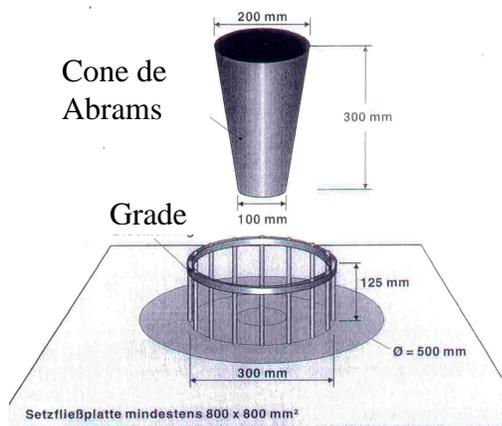


Figura 2.17 – Método *SVB-Richtlinie*

2.4.10 Ensaio de fluidez do concreto no misturador.

Este ensaio foi desenvolvido por Ouchi et. al (2003) visa avaliar o CAA durante a concretagem. Os métodos citados até o momento são necessários para verificar e caracterizar a trabalhabilidade do concreto no laboratório, assim como na obra para a aceitação ou não do concreto no início da descarga. O método desenvolvido por Ouchi et. al (2003) se trata de um equipamento que se instala entre a calha de saída do concreto e o cocho da bomba. Este equipamento é dotado de uma grade que verifica a fluidez do CAA durante a descarga do concreto. No momento em que o concreto não fluir entre as barras será considerado impróprio para o uso como CAA. A figura 2.18 e a figura 2.19 apresentam os detalhes do equipamento.

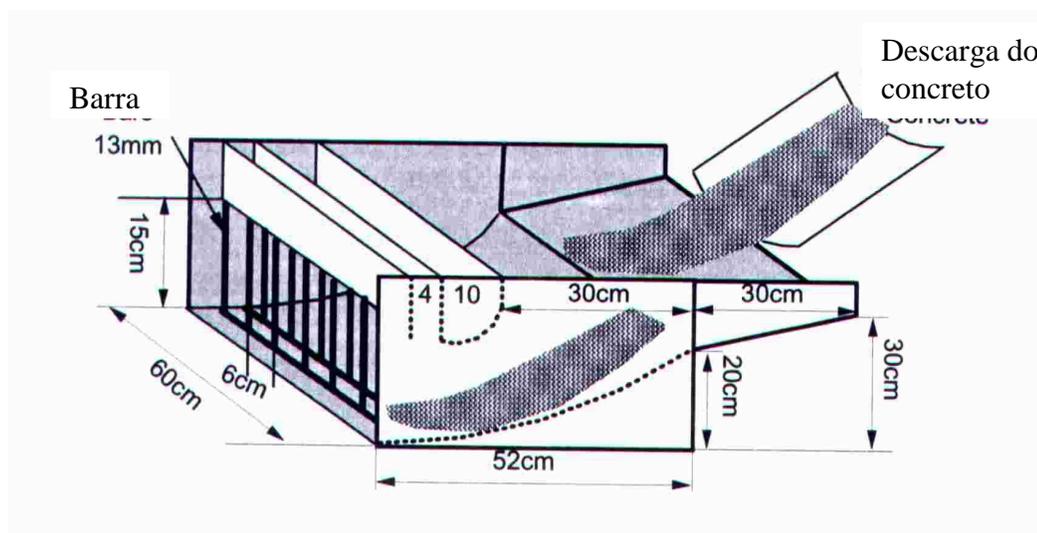


Figura 2.18- Croqui do equipamento de verificação da fluidez para descarga do CAA em campo.



Figura 2.19- Foto do equipamento verificando a fluidez do CAA para descarga em campo.

3.PROGRAMA EXPERIMENTAL

O estudo experimental do concreto auto-adensável foi realizado no laboratório da MC Bauchemie Brasil e LA Falcão Bauer, e o trabalho de campo na central de concreto Concrebase. Sendo avaliado pelo ensaio de determinação do espalhamento pelo cone de Abrams e a confrontação das metodologias para verificar habilidade de passar por obstáculos pelos métodos da caixa “L” e pela norma DIN 1045 -2 *DAfStb- Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)*.

3.1 EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO

Neste item estão apresentadas as variáveis focalizadas no estudo experimental de laboratório que influenciam na capacidade do concreto auto-adensável fluir entre obstáculos, ou seja, os materiais utilizados, com as justificativas para sua escolha, assim como as características dos equipamentos de ensaio.

Para a realização das misturas, foram adotados procedimentos para determinação da composição das dosagens, métodos de homogeneização do concreto e métodos de avaliação do concreto auto-adensável.

3.1.1 Variáveis do estudo

Parâmetros fixados

O plano experimental teve como parâmetros fixados:

Temperatura: A temperatura dos ensaios foi mantida constante no laboratório MC Bauchemie Brasil, climatizado entre (23 ± 2) °C e os materiais foram mantidos neste ambiente para estabilização da temperatura por um período não inferior a 48 horas. Este controle foi necessário devido à grande influência da temperatura nas propriedades reológicas, conforme apresentado no capítulo 2.

Água potável: A água utilizada nas misturas foi fornecida pela SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, no entanto esta foi mantida em reservatórios dentro do laboratório climatizado mantendo sua temperatura constante em todas as misturas.

Procedimento de mistura: Foi utilizado um procedimento de mistura único para todos os concretos com tempo de mistura acompanhados por cronômetro para evitar variação do desempenho do aditivo superplastificante com o tempo de mistura.

Variáveis independentes

Cimento: Foi utilizado o cimento tipo CP III 40 RS , por se tratar do cimento mais utilizado no momento (junho/2004) pelas centrais de concreto na região da cidade de São Paulo.

Relação água/cimento: Foram utilizadas três relações água/cimento, sendo 0,45; 0,50 e 0,65. A definição das três relações água /cimento teve como objetivo observar o universo do concreto auto-adensável com dosagens ricas, médias e pobres.

Natureza do aditivo: Foram utilizados três aditivos do mercado, sendo eles um plastificante de pega normal à base de lignossulfonato, um superplastificante a base de éter-plicarboxilato e um anti-segregante a base de celulose.

Agregados: Foram utilizados três tipos de agregado miúdo e dois tipos de agregado graúdo. Sendo para o agregado miúdo a areia natural de rio, areia de cava (areia de quartzo) e areia artificial de pedra britada. Para o agregado graúdo a brita 01 e brita 0.

Teor de aditivo: Foram utilizados teores de aditivos sugeridos pelo fabricante, sem a preocupação em buscar o teor de saturação.

Tabela 3.1 Resumo das variáveis independentes utilizadas no estudo.

CIMENTO	RELAÇÃO A/C	AGREGADO MIÚDO COMBINAÇÃO	AGREGADO GRAÚDO COMBINAÇÃO	ADITIVO*
CP III 40 RS	0,45 0,50 0,65	AREIA : NATURAL CAVA ARTIFICIAL	BRITA 01 BRITA 0	PLASTIFICANTE SUPERPLASTIFICANTE ANTISEGREGANTE

* A quantidade de teores utilizados nas misturas variou de acordo com a necessidade para alcançar a trabalhabilidade estimada.

Variáveis dependentes

As variáveis dependentes medidas para todos os concretos foram:

Diâmetro de espalhamento: determinado através do cone de Abrams, medindo-se o diâmetro após o espalhamento.

Tempo de espalhamento T_{500} : determinado através do cone de Abrams, medindo-se o diâmetro após o espalhamento.

Diâmetro de espalhamento com grade: determinado pelo método *SVB-Richtlinie*.

Tempo de fluidez: determinado pelo tempo necessário para fluir por 20 cm (T20) e 40 cm (T40) na caixa “L”.

Grau de nivelamento: determinado pela relação medida da altura do concreto na saída da comporta (h1) e a altura medida no final do percurso (h2) da caixa “L”.

3.1.2 Materiais utilizados para o concreto

Cimento

Foi definido para o estudo o cimento portland CP III, classe 40 de acordo com a NBR5735 Cimento de Auto-Forno, visto que atualmente se trata do tipo mais utilizado pelas empresas de serviço de concreto na cidade de São Paulo. A análise físico – química do cimento está apresentada na tabela 3.2.

Tabela - 3.2- Análise físico – química do cimento.

Constituinte	Valores obtidos
Perda ao Fogo	1,49 %
Dióxido de Silício total SiO_2 (NBR 5742)	25,78 %
Óxido de Alumínio Al_2O_3 (NBR 5742)	6,78 %
Óxido de Ferro Fe_2O_3 (NBR 5742)	1,89 %
Óxido de Cálcio total CaO (NBR 5742)	52,16 %
Óxido de Magnésio MgO(NBR 5742)	3,40 %
Anidrido Sulfúrico SO_3 (NBR 5742)	2,27 %
Óxido de Sódio Na_2O_3 (NBR 5742)	0,17 %
Óxido de Potássio K_2O (NBR 5742)	0,73 %
Resíduo Insolúvel (NBR 5744)	0,94%

Constituinte	Valores obtidos
Massa específica	2,98 g/cm ³
Blaine	4100 cm ² /g
Água consumida	30 %
Tempo de pega	Início: 03:45h fim: 05:15h

Agregados

Como agregado miúdo foram utilizados as areias: artificial de origem granítica britada, quartzosa extraída de cavas através de retrolavagem e extraída de leito de rio. Devido a grande preocupação com o meio ambiente está cada vez mais difícil a extração e utilização de areias naturais originárias dos leitos dos rios e com tendências para utilização de areias provenientes de outra origem. Para cada tipo de areia foram verificadas as características do concreto auto-adensável assim como algumas combinações entre elas.

Os agregados miúdos foram analisados quanto ao módulo de finura, teor de argila, material pulverulento e massa específica. As características físicas das areias estão apresentadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 Características físicas das areias.

Material/ Ensaio	Modulo de finura	Teor de argila	Material Pulverulento	Massa Específica
Areia de Rio	2,10	0,1%	2,1%	2,59
Areia de Quartzo	1,90	0,06%	0,8%	2,64
Areia Artificial	2,83	-	2,6%	2,66

Para o agregado graúdo foram utilizados agregados de origem granítica com dimensões máximas características de 19 mm e 9,5 mm. Estes agregados são classificados pela NBR 7211 como, brita 1 e brita 0. As características físicas dos agregados estão apresentadas na tabela 3.4.

Com o objetivo de obter a mistura que fornecesse maior massa unitária no estado compactado, foram testadas várias misturas de agregados contendo diferentes teores de cada fração. A metodologia utilizada foi a norma ABNT, NBR 7810: 1983 para a determinação da mistura entre as duas faixas granulométricas de pedras britadas. A melhor compactação para concreto com diâmetro máximo de 19 mm ocorreu para 45% de brita 0 e 55% de brita 01.

Tabela 3.4 Características físicas dos agregados graúdo.

Material/ Ensaio	Modulo de finura	Material Pulverulento	Massa Específica
Brita 0	5,62	0,8%	2,70
Brita 01	6,81	0,5%	2,71

Fíler Calcário

O fíler calcário foi utilizado somente no concreto auto-adensável com a finalidade de aumentar a coesão e evitar a segregação. O material é um fino que decanta nos tanques das instalações de lavagem de brita nas pedreiras, contém uma mistura de filer e areia. O material é retirado operando-se em tanques alternados: um em processo de decantação e outro em processo de extração. O filer uma vez separado da areia pela peneira 0,075 ou malha # 200, tem superfície específica da ordem de 10 a 28 m²/N (1000 a 2800 m²/kg).

Aditivos

Foi utilizado aditivos a base de lignossulfonatos para os concretos normais e a base de éter-policarboxilato para os auto-adensáveis. A proporção dos aditivos foi definida conforme recomendações do fabricante na tabela 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 – Proporção dos aditivos.

Aditivo 01	Plastificante à base de lignosulfonato	0,6 % sobre o peso do cimento
Aditivo 02	Superplastificante à base de éter- policarboxilato	0,5 ~ 2,0%
Aditivo 03	Anti-segregante	0,03 ~0,1%

Tabela 3.6 - Ensaios físicos dos aditivos:

Aditivo	Ensaio	*
Plastificante	Ph	7,0
	Teor de sólido	34,0
	densidade	1,20
Superplastificante	Ph	4,0
	Teor de sólido (%)	35,0
	densidade	1,06

* Valores fornecidos pelo fabricante.

3.1.3 Características dos concretos

As características dos concretos convencional e CAA foram definidas para a mesma relação água/cimento, possibilitando traçar as curvas de Abrams e verificar a variação no módulo de deformação e absorção. O espalhamento de 700 ± 50 mm foi definido baseado nas referências mais utilizadas em bibliografias estudadas. As características do concreto e a programação dos ensaios estão nas tabelas 3.7. e 3.8.

Tabela 3.7 – Características dos concretos.

Relação a/c	0,45; 0,50; 0,65	
Ar incorporado	2,5±0,5%	
Trabalhabilidade	Cone de abrams	120±20mm
	Espalhamento	700±50 mm e T ₅₀₀
	<i>SVB-Richtlinie</i>	Espalhamento 700 ±50 mm
	Caixa "L"	H1/H2
Resistência à Compressão axial	07 e 28 dias	
Absorção de água	28 dias	
Módulo de deformação Tipo I	28 dias	

Tabela 3.8 - Programação de ensaios.

Ensaio em Laboratório	a/c=0,40	a/c=0,50	a/c=0,65	a/c=0,65
Cone de abrams	x	x	x	x
"Espalhamento"	x	x	x	-
SVB Richtlinie	x	x	x	-
Caixa "L"	x	x	x	-
Ar incorporado	x	x	x	x
Compressão axial	x	x	x	x

3.1.4 Metodologia de Avaliação de Desempenho em Laboratório.

As características de cada concreto no estado fresco foram avaliadas em aspecto visual e métodos de ensaio de testes de abatimento do tronco de cone ABNT, NBR NM 67 (1998),

espalhamento com e sem a grade (método *SVB-Richtlinie*), teor de ar incorporado ABNT, NBR NM 47 (1998), fluidez em caixa L e moldagem e cura dos corpos-de-prova com dimensões de 100x200 mm – ABNT, NBR 5738 (2003). Para verificação do desempenho no estado endurecido foram realizados ensaios de resistência à compressão ABNT, NBR 5739 (1994), módulo de elasticidade do concreto pelo método tangente tipo I – ABNT NBR 8522 (2003), determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica ABNT, NBR 9778 (1994).

Os ensaios no estado fresco foram realizados nas dependências do laboratório de concreto da MC-Bauchemie Brasil, e os ensaios no estado endurecido no laboratório de materiais da L.A.Falcão Bauer. Os métodos dos ensaios para avaliação da trabalhabilidade do concreto convencional e CAA utilizados já foram descritos nos itens 2.4.1, 2.4.2, 2.4.6 e 2.4.9.

3.2 EXPERIMENTAL EM CAMPO

Com o objetivo de levar este estudo mais próximo da realidade foram concretados uma viga e um pilar com dimensões reais em concreto auto-adensável. Os seguintes parâmetros foram avaliados: diâmetro do espalhamento pelo cone de Abrams e *SVB-Richtlinie*, tempo de espalhamento T_{500} , a capacidade de fluir entre barras na caixa “L”, resistência a compressão e massa específica do concreto.

Todo o processo de pesagem, homogeneização e avaliação do concreto foi realizado nas dependência da central de concreto Concrebase localizada na cidade de Salto, assim como a concretagem do pilar e viga também. Os métodos dos ensaios para avaliação da trabalhabilidade do concreto convencional e CAA utilizados já foram descritos nos itens 2.4.2, 2.4.6 e 2.4.9.

A concretagem da viga teve como objetivo verificar o desempenho da fluidez do concreto auto-adensável em preencher a fôrma, assim como analisar as facilidades e dificuldades de manuseio deste concreto. As armaduras tiveram papel importante como barreiras durante a concretagem. O pilar foi concretado de uma vez, sem o auxílio de janelas intermediárias e

tremonhas, tendo a finalidade de verificar a coesão do concreto e a ocorrência ou não da segregação por impacto na base do pilar.

Os testes em campo foram realizados somente em concreto auto-adensável, onde foram montadas as fôrmas da viga e do pilar em tamanho real em madeira resinada reforçadas com gravatas de madeira bruta a cada 25,0 cm e cobrimento de 3,0 cm, conforme figura 3.1 e 3.2. As dimensões das fôrmas e armaduras foram definidas baseando-se em dimensões normalmente encontradas em estruturas de edificações.

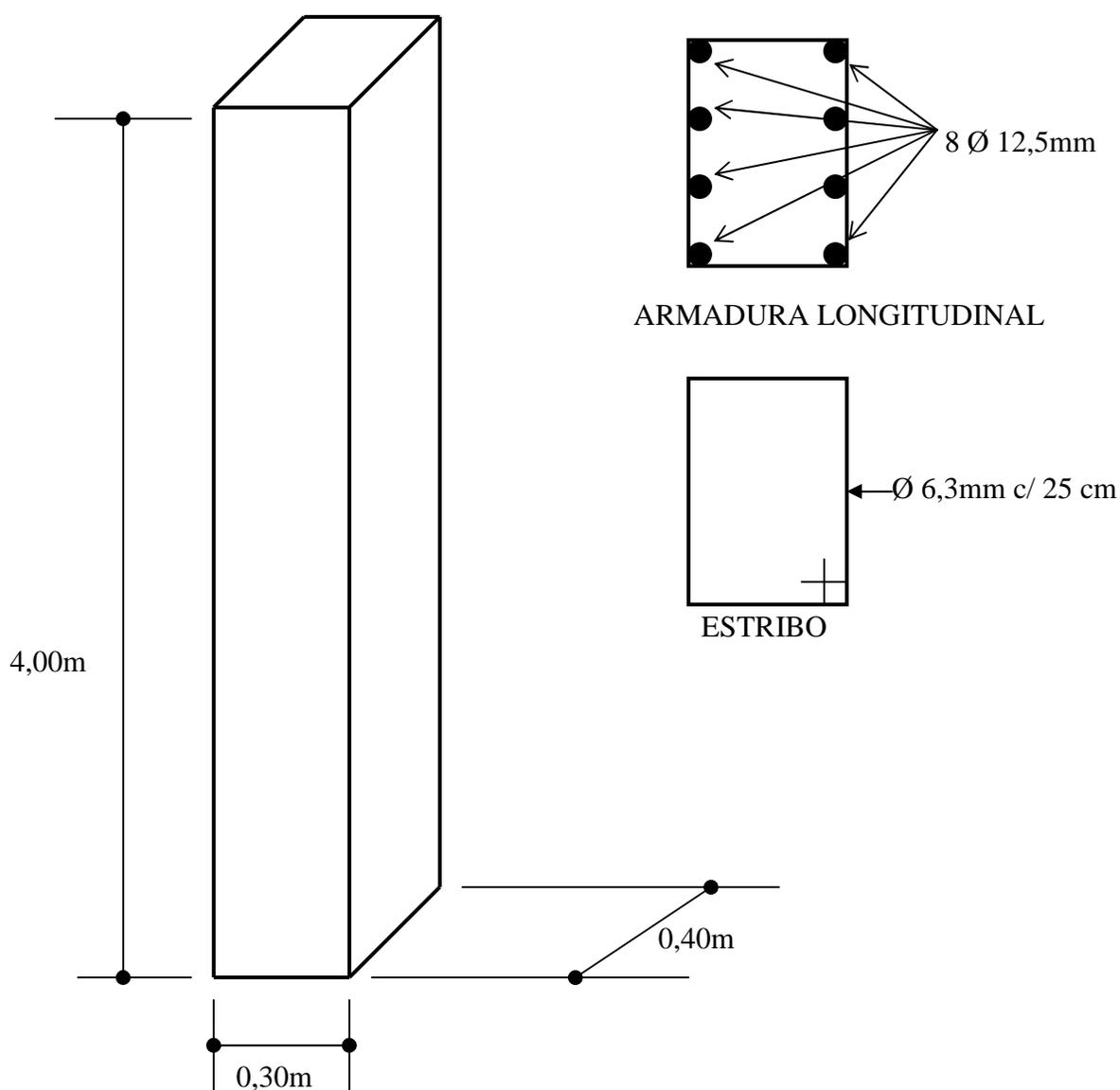
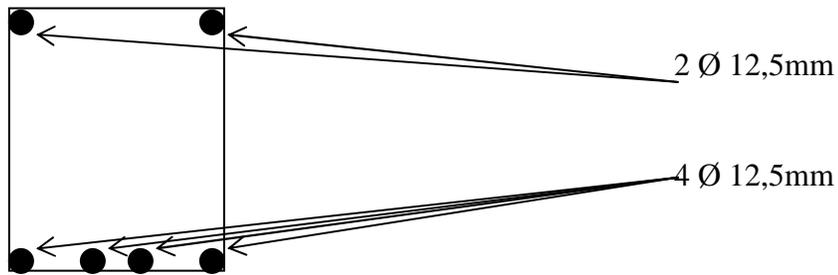
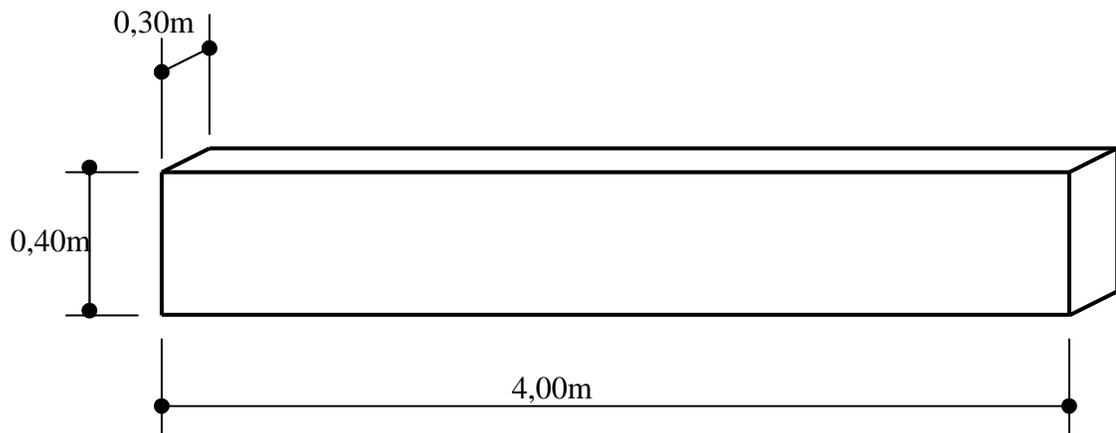
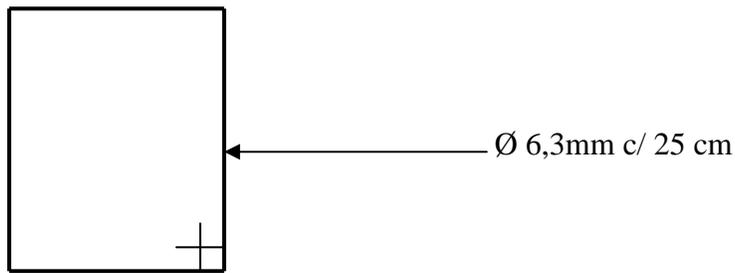


Figura 3.1 - Croqui da fôrma e armadura do pilar.



ARMADURA LONGITUDINAL



ESTRIBO

Figura 3.2 - Croqui da fôrma e armadura da viga – 0,30x0,40x4,00m

A verificação quanto à ocorrência da segregação na base do pilar foi feita através de extrações realizadas no topo e na base do pilar, comparando os testemunhos no aspecto visual, massa específica e índice de vazios conforme norma da ABNT, NBR 9778 (2005) Concreto –

Determinação da Absorção de Água por Imersão, Índice de Vazios e Massa Específica. O local da extração dos testemunhos foi definido conforme a figura 3.3.

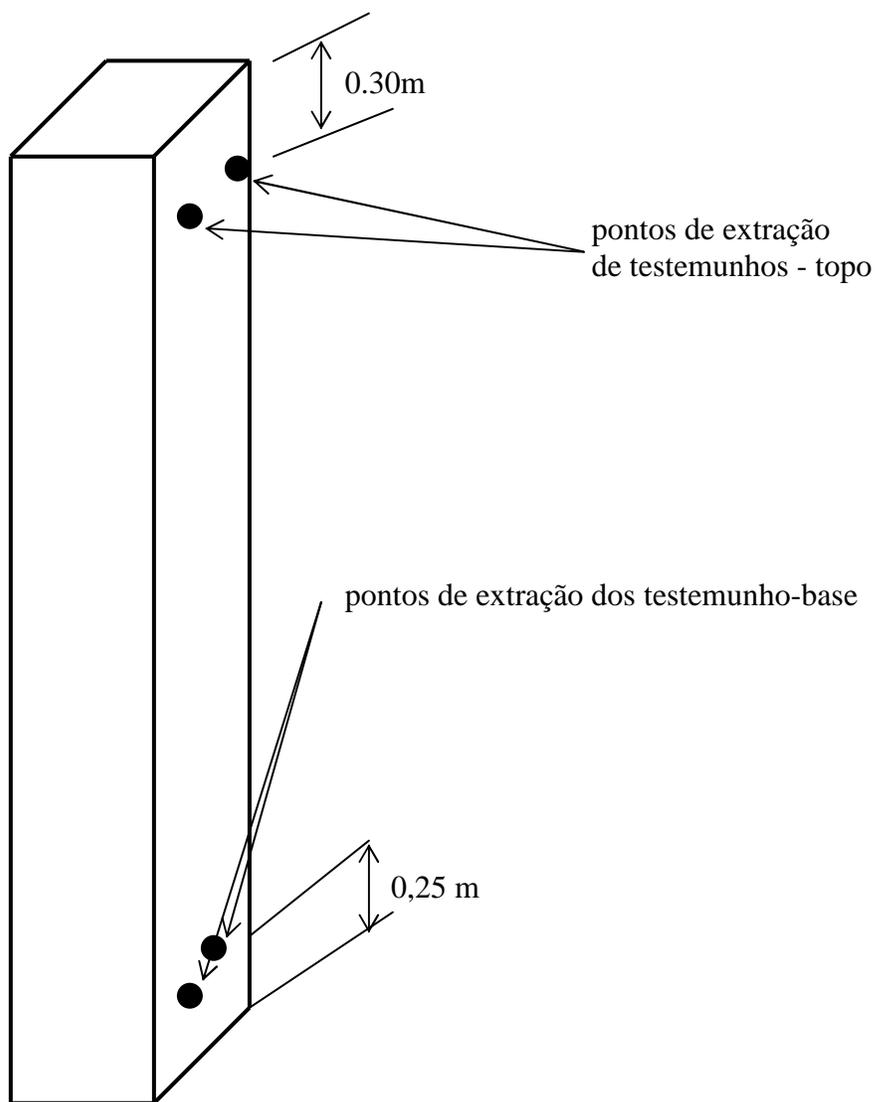


Figura 3.3 - Croqui dos pontos de Extração dos testemunhos do pilar.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO

4.1.1 Composição dos traços:

As dosagens de concreto foram definidas e ajustadas em laboratório conforme as dosagens unitárias apresentadas na tabela 4.1. No total foram verificados 13 traços, sendo 03 traços de concreto convencional e 10 traços de CAA. Nos traços de CAA foram verificados o traço 08 ao 13, todos com o mesmo material modificando apenas o tipo da areia e variando a proporção dos aditivos conforme foi necessário para se alcançar alta trabalhabilidade conforme a tabela 4.2.

Tabela 4.1- Dosagem unitária do concreto.

Nº traço	Traço unitário
Traço 01	1,00: 1,072: 1,072: 0,789: 1,836: 0,450
Traço 02	1,000: 1,239: 1,239: 0,874: 2,039: 0,500
Traço 03	1,000: 1,740: 1,740: 1,135: 2,649: 0,650
Traço 04	1,000: 0,100: 1,308: ,872: 1,223: 1,223: 0,450
Traço 05	1,000: 0,100: 1,519: 1,013: 1,358: 1,358: 0,500
Traço 06	1,000: 0,100: 2,151: 1,434: 1,765: 1,765: 0,650
Traço 07	1,000: 1,475: 0,995: 1,108: 1,351: 0,500
Traço 08	1,000: 1,332: 0,898: 1,051: 1,282: 0,500
Traço 09	1,000: 2,220: 1,051: 1,282: 0,500
Traço 10	1,000: 2,314: 1,051: 1,282: 0,500
Traço 11	1,000: 1,388: 0,898 :1,051: 1,282: 0,500

Nº traço	Traço unitário
Traço 12	1,000: 1,434: 0,928 :1,026: 1,231: 0,500
Traço 13	1,000: 1,434: 0,928 :1,026: 1,231: 0,500

Tabela 4.2 – Característica das Dosagens Verificadas.

Nº do Traço	Cimento	Relação a/c	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Aditivo	Abatimento e espalhamento Esperado
01	389	0,45	Areia de Cava Areia Artificial	Brita 0 Brita 01	P (0,6%)	120±20mm
02	350	0,50	Areia de Cava Areia Artificial	Brita 0 Brita 01	P (0,6%)	120+20mm
03	269	0,65	Areia de Cava Areia Artificial	Brita 0 Brita 01	P (0,6%)	120±20mm
04	389	0,45	Areia de Cava Areia Artificial	Brita 0 Brita 01	SP (0,6%)	700±50mm
05	350	0,50	Areia de Cava Areia Artificial	Brita 0 Brita 01	SP (0,6%)	700±50mm
06	269	0,65	Areia de Cava Areia Artificial	Brita 0 Brita 01	SP (0,6%)	700±50mm
07	370	0,50	Areia de Rio Areia de Cava	Brita 0 Brita 01	P (0,6%) SP (2,0%)	700±50mm
08	390	0,50	Areia de Rio Areia de Cava	Brita 0 Brita 01	P (0,6%) SP (1,7%)	700±50mm
09	390	0,50	Areia de Rio	Brita 0 Brita 01	SP (3,0%)	700±50mm
10	390	0,50	Areia Artificial	Brita 0 Brita 01	SP (0,6%)	700±50mm
11	390	0,50	Areia Artificial Areia de Cava	Brita 0 Brita 01	SP (0,65%)	700±50mm

Nº do Traço	Cimento	Relação a/c	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Aditivo	Abatimento e espalhamento Esperado
12	390	0,50	Areia Artificial Areia de Cava	Brita 0 Brita 01	SP (0,75%)	700±50mm
13	390	0,50	Areia Artificial Areia de Cava	Brita 0 Brita 01	SP (1,0%) AS(0,05%)	700±50mm

4.1.3 Resultados obtidos no estado fresco:

Os resultados obtidos nos concretos frescos estão mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 Resultados do concreto no estado fresco.

Traço	Abatimento (mm)	Espalhamento (mm)	T500mm (seg.)	SVB-Richtlinie	Caixa "L" (seg)	Caixa "L" h2/h1	Ar incorporado (%)
01	125	-	-	-	-	-	1,9
02	110	-	-	-	-	-	2,0
03	140	-	-	-	-	-	2,5
04	250	600x590	2,40	580x580	11,97	0,88	3,1
05	255	630x630	3,90	570x570	12,0	0,67	3,5
06	250	620x620	1,71	450x460	*	*	3,8
07	250	690x690	6,41	650x690	10,0	0,84	3,8
08	250	690x690	7,50	680x670	8,0	0,92	2,0
09	250	690x740	16,0	645x645	45,0	0,80	1,0
10	250	490x500	9,66	450x450	*	*	1,5
11	250	700x680	4,8	710x600	15	0,78	2,9
12	250	700x730	3,0	700x550	12	0,77	2,7

Traço	Abatimento (mm)	Espalhamento (mm)	T500mm (seg.)	SVB-Richtlinie	Caixa "L" (seg)	Caixa "L" h2/h1	Ar incorporado (%)
13	250	610x620	15	620x570	25	0,74	5,2

*não foram possíveis de determinar devido ao travamento dos agregados nas barras.

O teor de argamassa nos concretos auto-adensáveis foi maior do que nos concretos convencionais, visto a necessidade dos agregados graúdos fluírem incorporados à argamassa. Os teores de argamassa ficaram na faixa de 0,54 e 0,58 nos concretos convencionais para os concretos auto-adensáveis.

Os traços 07 e 08 tiveram o melhor desempenho na fluidez medido nos três métodos, coincidindo quanto ao item dos agregados não travarem nas barras dos equipamentos de ensaio e os traços 09,11 e 12 apesar de apresentarem resultados numéricos satisfatórios para o ensaio SVB-Richtlinie, ± 50 mm em relação ao espalhamento sem grade, sob o aspecto visual apresentou concentração de material na parte interna na grade.

Para os traços 06 e 10 não foi possível obter resultados pelo ensaio de *SVB-Richtlinie* e pela caixa L devido ao travamento entre os agregados ocasionado pelas barras de bloqueio.

Nas figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 são apresentados os ensaios realizados em laboratório.



Figura 4.1 – Ensaio de abatimento em concreto convencional.
Fonte: MC Bauchemie Brasil
Traço – 02

No ensaio de abatimento do traço de concreto convencional conforme figura 4.1, foi verificado o abatimento conforme NBR NM 67/98, o formato do tronco de cone e a coesão do concreto. O concreto se apresenta coeso, aspecto bom e com argamassa suficiente para o preenchimento dos espaços entre os agregados graúdos.



Figura 4.2 – Ensaio de Espalhamento em concreto auto-adensável.

Fonte: MC Bauchemie Brasil

Traço – 07

Na figura 4.2 é verificado o diâmetro do espalhamento e o tempo de espalhamento T_{500} do CAA. Este concreto se apresenta com bom aspecto, sem segregação e uma coesão suficiente trazendo o agregado graúdo até a borda do espalhamento.



Figura 4.3– Ensaio de Espalhamento com grade – *SVB-Richtlinie*.

Fonte: MC Bauchemie Brasil

Traço – 08

Na figura 4.3 o CAA é avaliado pelo método *SVB-Richtlinie*, onde é medido o diâmetro do espalhamento final. O concreto apresenta um aspecto coeso, sem segregação e com grande habilidade para vencer obstáculos.



Figura 4.4– Ensaio de Espalhamento com grade – *SVB-Richtlinie*.

Fonte: MC Bauchemie Brasil

Traço – 06

Na figura 4.4 o CAA é avaliado pelo método *SVB-Richtlinie*, onde o concreto apresenta baixa coesão, aspecto empedrado, segregação e sem habilidade para vencer obstáculos formando uma concentração de material no centro da grade.



Figura 4.5 – Ensaio de fluidez com caixa “L”.

Fonte: MC Bauchemie Brasil

Traço – 08

Na figura 4.5 o CAA é avaliado pelo método da Caixa L, onde o concreto apresenta boa coesão, aspecto bom, baixa segregação, porém sem habilidade suficiente para vencer obstáculos formando uma concentração de concreto na grade.



Figura 4.6 – Ensaio de fluidez com caixa “L”.

Fonte: MC Bauchemie Brasil

Traço – 09

Na figura 4.6 é possível avaliar o detalhe do travamento do concreto na grade da caixa L. O concreto apresenta pouca coesão, alta segregação e sem habilidade suficiente para vencer obstáculos formando uma concentração de concreto na grade.

Ar incorporado

Em todos os traços de concreto auto-adensável, o ar incorporado foi maior do que no concreto convencional conforme gráfico 4.1. Coincidentemente quanto menor a quantidade de finos maior foi a incorporação de ar no concreto auto-adensável.

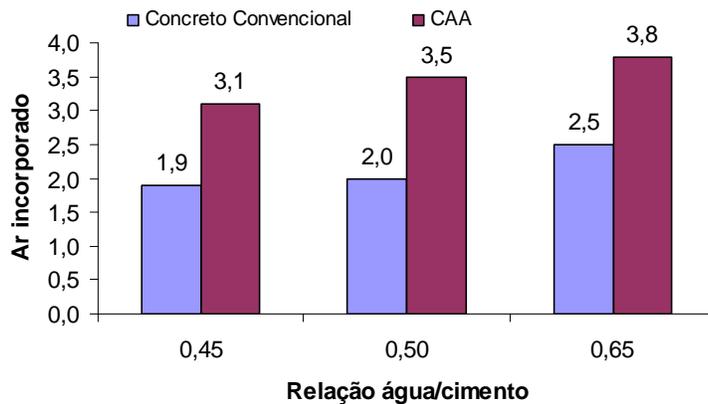


Gráfico 4.1 Comparativo de ar incorporado do Concreto convencional e CAA

4.1.4 Resultados Obtidos no Concreto Endurecido.

Os ensaios de módulo de deformação, índice de vazios, absorção e massa específica real foram realizados nos traços 01 à 06 por serem de comparação direta. Os demais traços foram moldados para ensaio de compressão axial. Os resultados obtidos no concreto endurecido estão apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados obtidos do concreto no estado endurecido em laboratório:

Traço	Ensaio Físicos					
	Resistência à Compressão (MPa)		Módulo de deformação (GPa) 28 dias	Índice de Vazios (%)	Absorção (%)	Massa Específica Real (g/cm ³)
	07 dias	28 dias				
01	39,3	51,0	39,6	10,6	4,5	2,60
02	32,0	44,9	38,0	10,8	4,6	2,61
03	24,1	35,0	38,3	11,9	5,1	2,62
04	37,4	49,7	37,0	10,8	4,7	2,57

Traço	Ensaio Físicos					
	Resistência à Compressão (MPa)		Módulo de deformação (GPa) 28 dias	Índice de Vazios (%)	Absorção (%)	Massa Específica Real (g/cm ³)
	07 dias	28 dias				
05	31,1	43,2	36,9	10,9	4,9	2,57
06	23,6	32,8	36,9	11,5	5,9	2,56
07	31,8	40,0	-	-	-	-
08	38,8	48,6	-	-	-	-
09	33,3	42,6	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	39,9	48,7	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-
13	29,6	38,3	-	-	-	-

4.2.2 Resistência à Compressão

A resistência à compressão do concreto auto-adensável foi sensivelmente menor devido a maior porcentagem de ar incorporado em relação ao concreto convencional. Os resultados obtidos nos traços de comparação entre o concreto convencional e o CAA estão na curva de Abrams conforme gráficos 4.2. Conforme a curva de Abrams existe uma relação exponencial entre a relação água/cimento e a resistência à compressão axial também no CAA.

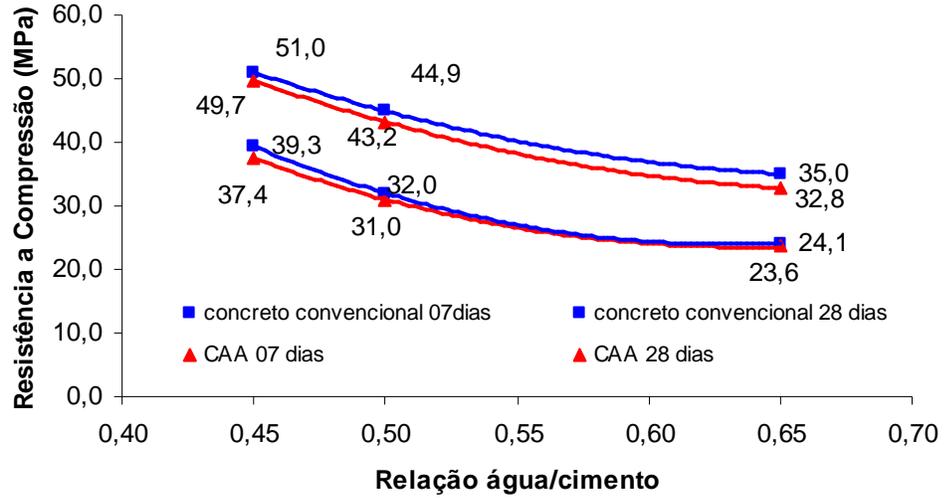


Gráfico 4.2 Curva de Abrams do Concreto convencional e CAA.

Através do gráfico 4.3 verifica-se que o concreto auto-adensável apresenta crescimento na resistência à compressão axial similar aos concretos convencionais para 07 dias e 28 dias.

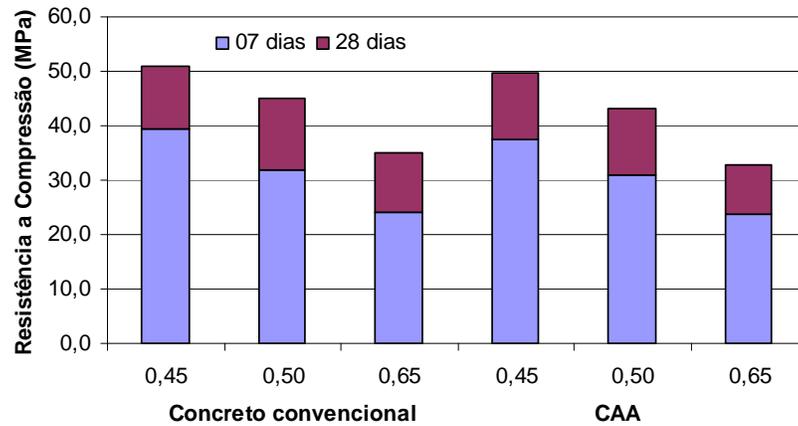


Gráfico 4.3 Evolução da Resistência a Compressão.

4.2.3 Módulo de Deformação

O módulo de deformação está relacionado a muitas variáveis, entre elas, à origem da rocha utilizada como agregado, teor de argamassa, teor de ar incorporado, índice de forma, tipo de cimento, pacote granulométrico e a relação interface pasta/agregado. Entre os concretos comparados, as variáveis que maior tiveram influência foram o teor de argamassa e o ar incorporado. Os resultados podem ser verificados conforme o gráfico 4.4.

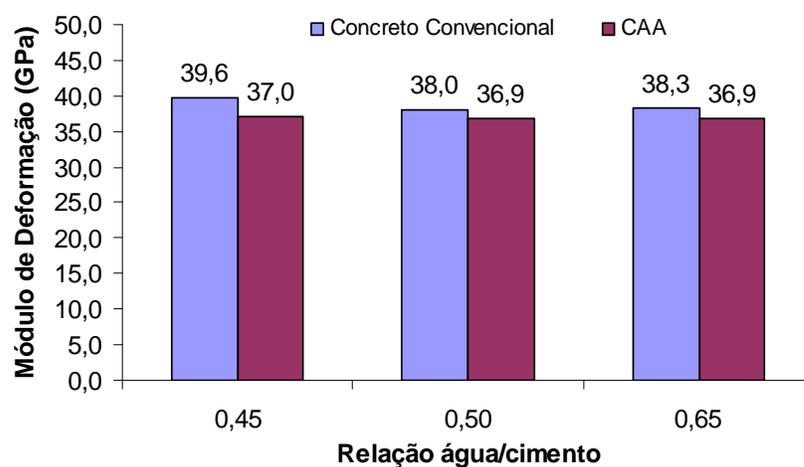


Gráfico 4.4 Módulo de Deformação do Concreto convencional e CAA.

4.2.4 Absorção

Estes ensaios têm como objetivo a verificação quanto a durabilidade do concreto. Comparativamente não foi observada nenhuma anomalia quanto aos resultados obtidos nos ensaios conforme o gráfico 4.5.

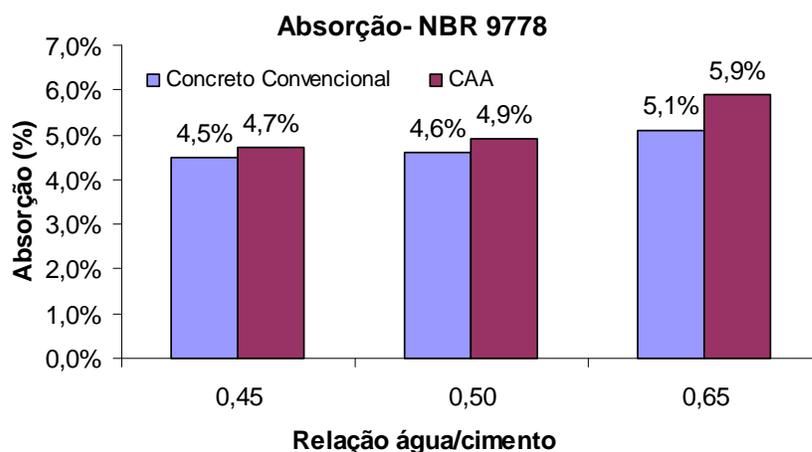


Gráfico 4.5 Absorção do Concreto Convencional e CAA.

Os resultados de absorção normalmente apresentam indícios quanto à durabilidade do concreto. Neste caso os resultados obtidos de absorção foram sempre maiores para o CAA. Porém, a durabilidade deve ser vista de uma forma global, onde um dos fatores preponderantes é o manuseio do concreto no campo e neste caso trata de um CAA, onde a compactação ocorre sem a necessidade de vibração por aparelhagem ou da qualificação da mão de obra.

4.3 RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS EM CAMPO

A dosagem utilizada no CAA em campo está na tabela 4.5. O concreto dosado na central dosadora e homogeneizado no caminhão misturador apresentou aspecto melhor no teor de argamassa, coesão e homogeneidade do que os obtidos em laboratório num misturador de eixo inclinável.

Tabela 4.5 - Dosagem de Concreto para 1 m³ :

Material	Traço kg/m ³	Traço Unitário
Cimento	300	1,000
Filler	30	0,100
Areia 1	487	1,475

Material	Traço kg/m ³	Traço Unitário
Areia 2	487	1,475
Brita 0	476	1,442
Brita 01	476	1,442
Água	175	0,530
Aditivo 1	-	-
Aditivo 2	1,500	0,50% spa*
Teor de argamassa	0,578	-

*sobre o peso do aglomerante.

A trabalhabilidade do concreto auto-adensável confeccionado em caminhão betoneira foi verificado pelos ensaios de espalhamento, SVB Richtlinie e caixa L, conforme figuras 4.7 e 4.9.



Figura 4.7 – Ensaio em campo de espalhamento do CAA (650 x640) mm.
Fonte: MC Bauchemie Brasil / Concrebase

Na figura 4.7 é verificado o diâmetro do espalhamento e o tempo de espalhamento T_{500} do CAA em campo. Este concreto se apresenta com bom aspecto, sem segregação e uma coesão suficiente trazendo o agregado graúdo até a borda do espalhamento. A presença de calda de

cimento verificado no canto esquerdo superior é referente à água existente na chapa metálica antes do ensaio.



Figura 4.8 – Ensaio de fluidez pelo método *SVB Richtlinie* (650 x 630) mm.
Fonte: MC Bauchemie Brasil / Concrebase

Na figura 4.8 o CAA é avaliado pelo método *SVB-Richtlinie*, onde é medido o diâmetro do espalhamento final. O concreto apresenta um aspecto coeso, sem segregação, alta exsudação e com grande habilidade para vencer obstáculos.



Figura 4.9 – Ensaio de fluidez com a caixa L em campo.
Fonte: MC Bauchemie Brasil / Concrebase.

A figura 4.9 apresenta o detalhe do preenchimento do compartimento vertical com o concreto auto-adensável.

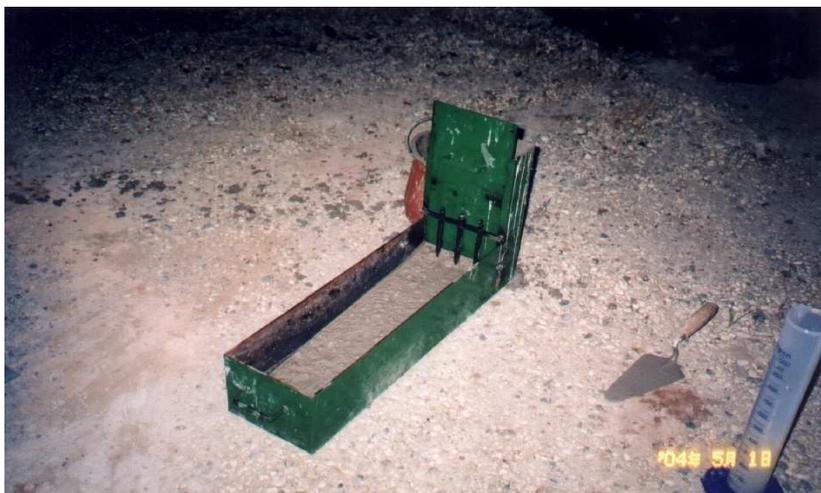


Figura 4.10 – Ensaio de fluidez com a caixa “L” em campo.
 Fonte: MC Bauchemie Brasil / Concrebase

Na figura 4.10 o CAA é avaliado pelo método da Caixa L, onde o concreto apresenta alta coesão, aspecto bom, baixa segregação e com habilidade suficiente para vencer obstáculos sem formar a concentração de concreto na grade.

Os resultados obtidos em campo nos ensaios realizados em CAA no estado fresco estão apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados obtidos no concreto fresco

Ensaio	Resultados
Abatimento Cone de Abrams	250 mm
Espalhamento “flow”	650 mm x 640 mm
Método alemão “SBV-Richtlinie”	650 mm x 630 mm
Caixa "L" h1/h2	0,88
Ar incorporado	2,1%

4.3.1 Concretagem do Pilar Armado.

A concretagem deu-se início com o pilar, lançando o concreto a 4,00 m de altura da base, com a armadura posicionada para a verificação da ocorrência ou não da segregação, conforme figura 4.11. Esta concretagem foi repetida, devido ao colapso ocorrido na fôrma durante a concretagem. O colapso da fôrma ocorreu na base do pilar, onde os reforços com gravatas de madeira não resistiram às forças laterais devido às fissuras ocasionadas com os pregos.



Figura 4.11 – Concretagem do pilar.
Fonte: MC Bauchemie Brasil / Concrebase

Os resultados obtidos nos corpos-de-prova moldados em campo e nos testemunhos extraídos estão apresentados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resultados obtidos no concreto endurecido em campo:

Compressão axial 28 dias	35,1/35,6 MPa	
Módulo de deformação – tangente inicial	41,9 / 42,7 / 42,1 GPa	
Lançamento em "queda livre" de 4,00 m	Topo	Base
* Absorção	4,5 %	4,8%
*Índice de vazios	10,7 %	11,4%
* Massa específica	2,63 g/cm ³	2,65 g/cm ³

* resultados obtidos dos corpos-de-prova extraídos.

Para o concreto feito em campo, os resultados de incorporação de ar não se repetiram aos encontrados em laboratório, apresentando valores similares àquelas dos concretos convencionais em laboratório. Os resultados obtidos dos testemunhos extraídos da base e do topo do pilar apresentaram valores similares.

Do ponto de vista técnico, a concretagem de grandes alturas com concretos convencionais é condenável, porém conforme resultados obtidos em pilar armado e concretado a 4,00m de altura, o CAA nos mostra que a coesão, o teor de argamassa, a fluidez e a estabilidade garantiu a homogeneidade do concreto na estrutura. As figuras 4.12 e 4.13 são referentes aos corpos-de-prova extraídos da base e do topo do pilar. Resultados de ensaios de massa específica e uma sob análise visual do testemunho extraído, demonstram a similaridade na distribuição dos agregados graúdos.

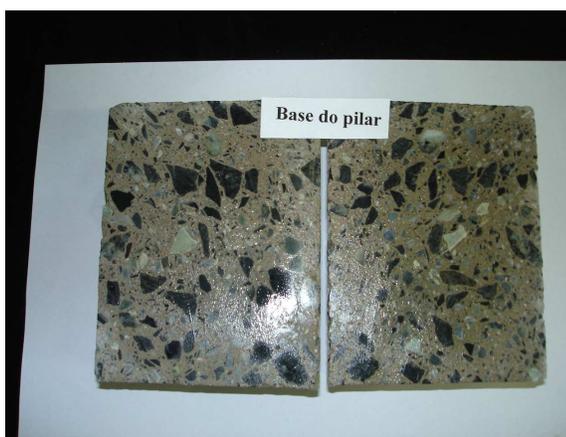


Figura 4.12 – Testemunho extraído da base do pilar.
Fonte: MC Bauchemie Brasil / Concrebase

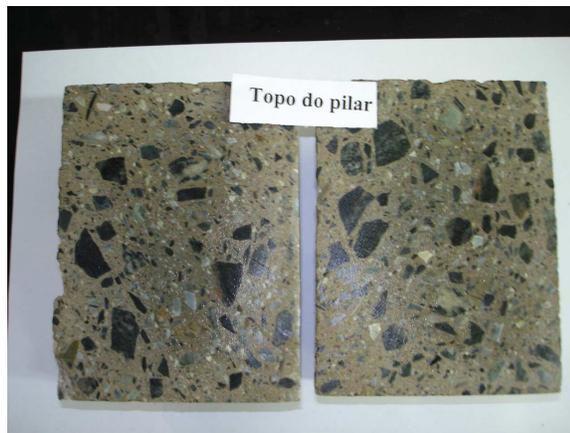


Figura 4.13 – Testemunho extraído do topo do pilar.
Fonte: MC Bauchemie Brasil / Concrebase

4.3.2 Concretagem da Viga Armada.

A concretagem da viga foi iniciada em uma das extremidades conforme figura 4.14, evitando a existência de duas frentes de concretagem. Durante a concretagem foram verificados a necessidade de um critério de velocidade de descarregamento, e o treinamento do operador do caminhão misturador.

Devido ao excesso de concreto descarregado no primeiro instante, ocorreu o “efeito parede”, onde a fluidez do concreto não foi compatível com o volume colocado e provocou a paralisação do fluxo e a necessidade um novo recomeço de concretagem. Para a continuidade do concretagem foi necessária a intervenção para vencer a inércia do “efeito parede”.



Figura 4.14 – Concretagem da Viga (0,30x0,40x4,00)m.
Fonte: MC Bauchemie Brasil / Concrebase

A viga após decimbrada conforme figura 4.15 apresentou preenchimento completo da fôrma com algumas bolhas de ar nas superfícies laterais, porém sem nenhuma segregação ou formação de “ninho de pedra”. No local onde ocorreu a primeira paralisação, ficaram marcas inclinadas indicando o sentido do fluxo do concreto.



Figura 4.15 – Viga concretada após decimbramento.
Fonte: MC Bauchemie Brasil / Concrebase

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO

Dos ensaios realizados em laboratório do CAA foram verificados que:

- os resultados obtidos pelo método de ensaio *SVB-Richtlinie* são compatíveis aos da caixa L, onde as situações de bloqueio verificados nos ensaios coincidiram em ambos os métodos;
- o método de ensaio *SVB-Richtlinie* apresentou maior facilidade de manuseio e de fácil limpeza para a análise do concreto, possibilitando a rapidez na repetição dos ensaios. Quanto ao método da caixa L, apesar da sua eficiência, o peso do equipamento dificulta o manuseio e o processo de limpeza dificultou a seqüência de ensaios.
- a areia artificial utilizada neste experimento prejudicou a fluidez devido às arestas vivas resultando num concreto áspero;
- na condição de concreto endurecido o CAA apresenta comportamento de resistência à compressão e módulo de deformação similar ao concreto convencional, assim como as características quanto à absorção e índice de vazios.

5.2 EXPERIMENTAL EM CAMPO

Dos ensaios realizados em campo do CAA foram verificados que:

- o aspecto do CAA reproduzido em caminhão misturador foi melhor do que o produzido em laboratório, apresentando um aspecto mais argamassado;
- os corpos-de-prova extraídos da base e do topo do pilar apresentam-se similares quanto ao aspecto visual. Nos resultados de ensaios físicos de absorção, índice de vazios e massa específica também apresentou resultados similares, demonstrando que não houve separação dos materiais pelo impacto quando lançados a 4,00 m de altura;
- para a concretagem da viga foi verificado que a velocidade de descarga tem que ser compatível com a capacidade de fluidez do concreto na fôrma para evitar o “efeito parede” e a perda de concreto por extravasamento;
- a concretagem deve ocorrer de forma contínua, pois para vencer a inércia após uma interrupção é necessário o auxílio de uma pequena vibração. Portanto, na obra sempre é recomendável a participação de um auxiliar para a concretagem;
- a fôrma para o CAA deverá ser estanque devido à possibilidade de fuga de finos, assim como as gravatas deverão ser mais reforçadas devido às pressões laterais serem maiores do que nos concretos convencionais.

5.3 COMENTÁRIOS

A experiência do trabalho em campo mostra a necessidade de conhecer melhor os esforços que ocorrem nas fôrmas, principalmente quando se trata peças estruturais de grandes volumes e alturas. Os materiais de confecção destas fôrmas, a estanqueidade para impedir a fuga de finos, e a qualidade da superfície foram os pontos importantes para o CAA.

A definição da dosagem do concreto inicialmente no laboratório é fundamental porém neste trabalho foi verificado visualmente que é possível que o concreto confeccionado em caminhão misturador trabalhe com teor de argamassa um pouco inferior ao definido em laboratório e as propriedades do concreto como o ar incorporado podem mudar, desta forma possibilitando a diminuição do consumo de água ou de cimento e tornando o concreto mais econômico.

O preenchimento do pilar e da viga foi realizado apenas com o operador do caminhão e um funcionário da central de concreto. Demonstrando a versatilidade do concreto auto-adensável em relação aos convencionais onde certamente seriam necessárias mais pessoas. Quanto ao fator econômico é necessário avaliar a utilização em escala industrial e contínua, devido ao custo do concreto ser normalmente mais alto do que os convencionais. Para países onde a mão de obra é cara, a utilização do concreto auto-adensável é facilmente justificada. No Brasil, como citado acima, é importante analisar as vantagens e desvantagens em longo prazo.

Devido à mão-de-obra ser de baixo custo no Brasil comparado aos países desenvolvidos, o custo final (insumos+mão-de-obra) do metro cúbico do CAA não justifica economicamente a substituição do concreto convencional. No entanto pode ser uma solução técnica dependendo da necessidade da obra.

Quando se trata de estruturas em concreto com grandes volumes a serem concretados de uma única vez, é recomendável a verificação dos benefícios que o CAA pode trazer com relação ao tempo de concretagem, qualidade de concretagem, diminuição dos riscos de acidentes e melhoria na utilização dos recursos humanos da obra.

A utilização do CAA em fábricas de pré-moldado pode ajudar a otimizar o espaço físico das instalações, assim como a dos recursos humanos, podendo-se trabalhar com a mesma equipe, mesmo em épocas de baixa produção.

Com o objetivo de obter uma dosagem de CAA econômico é necessária a utilização de agregados mais nobres, ou melhor, mais selecionados que os materiais dos concretos

convencionais. Principalmente no que se refere à forma do agregado, distribuição granulométrica onde o esqueleto granular é muito importante tanto no agregado graúdo como no miúdo.

Para a continuidade do processo ao estímulo da utilização da tecnologia do CAA é de suma importância à aplicação prática a longo prazo para analisar os reais benefícios como: velocidade de concretagem, aumento na produção, diminuição de ruído e acidentes de trabalho, desvio padrão e qualidade de acabamento das peças.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. Pini, São Paulo, 2000.
2. AIGNESBERGER, A.; KERN, A. Use of Melamine – Based Superplasticizer as a Water Reducer. Developments in the Use of the Superplasticizers. Publication SP-68-4 American Concrete Institute, 1981.p.61-79.
3. ALCANTARA, Marcos A.M.; LORRAIN, Michel S.; BARBOSA, Mônica P. Avaliação da Influência da Posição da Armadura no Desenvolvimento das Tensões de Aderência na Interface entre o Concreto Auto-Adensável e a Armadura. 46º Congresso Brasileiro do Concreto-ISBN: 85-98576-02-6. IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto Volume V – Pré-Fabricados em Concreto-Trabalho CB 0165, 2004, p.76-90.
4. ALCANTARA, Marcos A.M., et al. Concreto Auto-Adensável com Adição de Fibras metálicas- Parâmetros de Dosagem e Características no Estado Fresco e Endurecido. 46º Congresso Brasileiro do Concreto-ISBN: 85-98576-02-6. IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto Volume V – Construções em Concreto-Trabalho CB 0401, 2004, p.498-511.
5. ALVES, R. A. R. Contribuição ao Estudo dos Aditivos Superfluidificantes em Concreto Fluido. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1984.
6. ALVES, E.F.R. Estudo de Concreto Subaquático. Furnas Centrais Elétricas S.A.. 42º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2002.
7. ARAUJO, Jussara Limeira, et al. Concreto Auto-Adensável com Materiais Locais no Nordeste Brasileiro. 45º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2003.
8. ARBELÁEZ, Jaramillo C.A. et al. Avaliação do Comportamento da Aderência de Armaduras ativas em Concretos Auto-Adensáveis. 45º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2003.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. Aditivos para Concreto de Cimento Portland. Especificação .NBR - 17693. Rio de Janeiro: 1992.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados-Amostragem Método de Ensaio. NBR NM 26. Rio de Janeiro: 2001b.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado em Estado Solto-Determinação da Massa Unitária. Método de Ensaio. NBR 7251. Rio de Janeiro: 1982.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados-Determinação do Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis. Método de Ensaio. NBR 7218. Rio de Janeiro: 1987.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação de Impurezas Orgânicas Húmicas em Agregado Miúdo. Método de Ensaio. NBR 7220. Rio de Janeiro: 1987.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação de Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo. Método de Ensaio NBR NM 53. Rio de Janeiro: 2003b.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio de Frasco de Chapman. Método de Ensaio. NBR NM 52. Rio de Janeiro: 2003a.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação de Absorção de Água em Agregados Miúdos. Método de Ensaio. NBR 9777. Rio de Janeiro: 1987.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Método de Ensaio. NBR NM 248. Rio de Janeiro: 2003c.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo. Método de Ensaio. NBR 9937. Rio de Janeiro: 1987.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados em Estado Compactado Seco – Determinação da Massa Unitária. Método de Ensaio. NBR 7810. Rio de Janeiro: 1983.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para Concreto. NBR 7211. Rio de Janeiro: 1983.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland Composto. Especificação. NBR 11578. Rio de Janeiro: 1991.

22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland Composto. Especificação. NBR EB 2138. Rio de Janeiro: 1991.
23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland Comum. NBR EB- 1. Rio de Janeiro: 1991.
24. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland: Determinação de Perda ao Fogo. NBR NM 23. Rio de Janeiro: 1989.
25. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland: Determinação de Resíduo Insolúvel. NBR 5744. Rio de Janeiro: 1989.
26. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland: Determinação de Anidro Sulfúrico (SO₃). NBR 5745. Rio de Janeiro:1989.
27. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland: Determinação de Óxido de Sódio e Óxido de Potássio por Fotometria de Chama. NBR 5747. Rio de Janeiro: 1989.
28. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland: Determinação da Resistência á Compressão. NBR 7215. Rio de Janeiro:1996.
29. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland: Determinação dos Tempos de Pega. NBR 11581. Rio de Janeiro: 1991.
30. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland: Determinação de Massa Específica. NBR NM 23. Rio de Janeiro: 1998.
31. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland: Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método Blaine). NBR NM 0076. Rio de Janeiro: 1998.
32. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Amostragem de Concreto Fresco. Método de Ensaio. NBR NM 33. Rio de Janeiro: 1984.
33. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama – Tensão- Deformação. Método de Ensaio. NBR 8522. Rio de Janeiro: 1984.
34. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos. Método de Ensaio. NBR 5736. Rio de Janeiro: 1994a.
35. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação da Absorção de Água por Imersão, Índice de vazios e Massa Específica. NBR 9778. Rio de Janeiro: 2005.

36. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Controle Tecnológico de Materiais Componentes do Concreto. NBR 12654. Rio de Janeiro: 1992.
37. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Método de Ensaio. NBR NM 67. Rio de Janeiro: 1998b.
38. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação do Teor de Ar em Concreto Fresco pelo Método Pressiométrico. Método de Ensaio. NBR NM 47. Rio de Janeiro: 1998.
39. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto. Procedimento. NBR 5738. Rio de Janeiro: 1994.
40. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Preparação de Concreto em Laboratório. Procedimento. NBR 1221. Rio de Janeiro: 1993.
41. BANFILL, P.F.G. Rheology of Fresh Cement and Concrete. Proceedings of the International Conference organized by the British Society of Rheology, University of Liverpool, UK. March 16-29 1990.
42. BARBOSA, Mônica P. et al. Concreto Auto-Adensável: Avaliação da Aderência Aço-Concreto Através dos Ensaios de Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial das Barras de Aço. 46º Congresso Brasileiro do Concreto-ISBN: 85-98576-02-6. IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto Volume II – Construções em Concreto-Trabalho CB 0167, 2004, p.484-497.
43. BARBOSA, Mônica P. et al. A influência da Adição de Finos Basálticos nas Características Reológicas e Mecânicas dos Concretos Auto-Adensáveis. 46º Congresso Brasileiro do Concreto-ISBN: 85-98576-02-6. IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto Volume II – Construções em Concreto-Trabalho CB 0162, 2004, p.7-22.
44. BARTOS, P. J. M. Fresh Concrete Properties and Testes. Elsevier Science and Publications, Amsterdam, New York, 1992.
45. BARTOS, P. J. M, TAMIMI, A. , “Investigation on Underwater Concrete Admixtures Using Orimet Test. ” Proceedings of the International Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore , p. 11-18, 1992.
46. BARTOS, P.J.M. Special Concretes – Workability and Mixing. Proceedings of the International RILEM Workshop organized by RILEM Technical Committee TC 145, Workability of Special Concrete Mixes, in collaboration with RILEM Technical Committee TC 150, Efficiency of Concrete Mixers, and held at the University of Paisley, Scotland. 1993

47. BARTOS, P.J.M. Special Concretes – Very Highly Workable, flowing Concrete. Proceedings of the International RILEM Workshop organized by RILEM Technical Committee TC 145, Workability of Special Concrete Mixes, in collaboration with RILEM Technical Committee TC 150, Efficiency of Concrete Mixers, and held at the University of Paisley, Scotland. 1993.
48. BARTOS P.J.M. Assessment of Properties of Underwater Concrete by The Oriment Test. Proceedings of the International RILEM Workshop organized by RILEM Technical Committee TC 145, Workability of Special Concrete Mixes, in collaboration with RILEM Technical Committee TC 150, Efficiency of Concrete Mixers, and held at the University of Paisley, Scotland. 1993. p 191-21.
49. BARTOS, P.J. M. Orifice Rheometer as a Test for Flowing Concrete. In: CANMET/ACI International Conference on the Use of Supeplasticizers in Concrete, 2., Ottawa, 1981. Proceedings. Detroit, ACI, 1981.p.467-82 (SP 68).
50. BAUER, Roberto José F., et al. Concreto Fluido de Alto Desempenho para Aplicação em Elementos Pré-moldados. 39º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, 1997.
51. BAUER, Roberto José. F. Adensamento e Cura do Concreto- apostila do Curso Tecnologia do Concreto e Aço (SENAI), 1999.
52. BOSTRÖM, Lars. Polypropylene Fibres Improve the Fire Resistance of Self-Compacting Concrete. In: BrandPosten N° 27 December 2002.
53. BROOKS, J.J.; WAINWRIGHT, P. J.; NEVILLE A. M. Time – Dependent Behavior of High- Early- Strength Concrete Containing a Super-plasticizer. Developments in the Use of the Superplasticizers. Publication SP-68-5 American Concrete Institute. 1981.p.81-99.
54. BUI, V. K.; MONTEGOMERY, D.; HINCZAK, I.; TURNER, K. Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete. In: Cemente and Concrete Rsearch, n32, p. 1489-1496, 2002.
55. CHIARA, F.Ferraris. et al. Workability of Self-Compacting Concrete. The Economical Solution for Durable Bridges and Transportation Structures, International Symposium on High Performance Concrete. Proceedings. PCI/FHWA/FIB.September 25-27,2000. Orlando, Florida, 2000. p.398-407.
56. CHIARA, F.Ferraris; NICOS, S. Martys. Realing Fresh Concrete Viscosity Measurements from Different Rheometers. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol. 108, Number 3, May-June 2003.p.229-234.
57. COSTENARO, F. L., Utilização de Cinzas de Casca de Arroz em Concreto, Dissertação de Mestrado, USP-São Carlos, 2001.
58. DACZKO, Joseph A.; CONSTANTINER, Daniel. Rheodynamic Concrete. 43º Congresso Brasileiro do Concreto-IBRACON-Instituto Brasileiro de Concreto,2001. 253p.

59. DEHN, Frank; HOLSCHEMACHER, Klaus; WEIBE, Dirk. Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour. Leipzig Annual Civil Engineering Report n° 5. 2000.
[http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/lacer/lacer/lacer 05/105_15 pdf.](http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/lacer/lacer/lacer%2005/105_15.pdf)
60. DIETZ, Jörg; MA, Jianxin. Preliminary Examinations for the Production of Self-Compacting Concrete Using Lignite Fly Ash. Univesitat Leipzig; Leipzig Annual Civil Engineering Report n° 5, 2000.
[http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer05/105_16 pdf.](http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer05/105_16.pdf)
61. DIN 1045 -2 DAfStb- Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), 2003.
62. DINIZ, Flávio E. G.; BRAGA, Antônio C. F.; BARBOSA, Normando P. Materiais Locais e Resíduos Industriais em Pasta de Cimento para Concretos Auto-Adensáveis. 46° Congresso Brasileiro do Concreto-ISBN: 85-98576-02-6. IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto Volume V – Construções em Concreto-Trabalho CB 0374, 2004, p.1230-1244.
63. DUMENT, T. B. A Evolução do Concreto: Uma Viagem no Tempo. 42° Congresso Brasileiro do Concreto, 2000.
64. GAY, Matthias. Admixture For HPC. International Conference on Durability of HPC and Final Workshop of CONLIFE, 2004.p.53-62.
65. GIAMUSSO, S. E. Preparo do Concreto. ABCP – Associação brasileira de Cimento Portland, 2° edição, 1983.
66. GIOVANETTI, E.; Princípios Básicos de Concreto Fluído; Ibracon, Pini, São Paulo, 1989.
67. GOMES, Paulo C. C. Optimizatiom and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete. Tese de Doutorado da Universidade Politécnica de Catalunia. Escola Técnica Superior de Engenharia de Camins, Canals I Port de Barcelona, 2002.
68. GOMES, Paulo C. C., et al. Concreto Auto-Adensável Um Aliado do Desenvolvimento Sustentável do Concreto. 45° Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2002.
69. GROTH, Patrik. Steel Fibre Reinforced SCC.Final report of Task 6.Brite EuRAm Proposal No BE 96-3801, 2000.
70. GRÜNEWALD, Steffen. Performance-Based Design of Self-Compacting Fibre Reinforced Concrete. Tese de Doutorado da Univesidade Técnica de Delft, 2004.

71. HAYAKAWA, Masahiro; MATSUOKA Y.;SHINDO, T. Development and Application of Super-workable Concrete, Special Concretes – Very Highly Workable, flowing Concrete. Proceedings of the International RILEM Workshop organized by RILEM Technical Committee TC 145, Workability of Special Concrete Mixes, in collaboration with RILEM Technical Committee TC 150, Efficiency of Concrete Mixers, and held at the University of Paisley, Scotland, 1993. p. 183-200.
72. HISAKAZU, Oishi. Desenvolvimento do concreto de elevado Desempenho. Ministério da construção Civil, 1997
73. HOBBS, D. W. Workability and Water Demand. Proceedings of the International RILEM Workshop organized by RILEM Technical Committee TC 145, Workability of Special Concrete Mixes, in collaboration with RILEM Technical Committee TC 150, Efficiency of Concrete Mixers, and held at the University of Paisley, Scotland. 1993.p. 55-65.
74. HOLSCHEMACHER, Klaus; KLUG, Yvette. A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC, Lacer n° 7, 2002.
75. INSTITUTO JAPONÊS DE CONCRETO – State-of- the- Art Report on High- Strength Concrete. Comissão de Estudo de Tecnologia do Concreto, 1991.
76. JOHANSEN, Kåre; HAMMER, Tor Arne. Drying Shrinkage of “Norwegian”Self-Compacting Concrete. SINTEF Civil and Environmental Engineering, 7465 Tondheim Norway.
<http://www.itn.is/ncr/publications/doc-27-4.pdf>.
77. JOSEPH, A. D.; CONSTANTINER, D.Rheodynamic Concrete - 43 ° Congresso Brasileiro de Concreto-IBRACON, 2001.
78. JSCE - Japan Standard Concrete Especification, 1999.
79. KASSAI, Y.; IKEDA S. Procedimento de Ensaio de Concreto, 1993.
80. KAWASSE, K. Pontos Essenciais da Tecnologia do Concreto – Instituto Japonês de Concreto. Comissão de Estudo de Tecnologia do Concreto, 1996.
81. KHAYAT, K.H. Use of Viscosity – Modifying Admixture to Reduce Top – Bar Effect of Anchored Bars Cast with Fluid Concrete. ACI- American Concrete Institute Material Jornals, Title n° 95-m16./ March-April 1998.
82. LARRARD, F; et al. A New Rheometer for Soft-to-Fluid Fresh Concrete. ACI - American Concrete Institute Material Jornals, Title n° 94-m27./ May-June 1997.p.234-243.

83. LEGRAND, C. Workability and Rheology. Proceedings of the International RILEM Workshop organized by RILEM Technical Committee TC 145, Workability of Special Concrete Mixes, in collaboration with RILEM Technical Committee TC 150, Efficiency of Concrete Mixers, and held at the University of Paisley, Scotland. 1993. p.51-54.
84. LOWKE, D.; WIEGRINK, K. H.; SCHIESSL, P. A simple and significant segregation test for SCC. In 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Islândia, p.356-366, 2003.
85. MA, Jianxin; Dietz, Jörg. Ultra High Performance Self-Compacting Concrete. Instituto für Massivbau und Baustofftechnologie Universität Leipzig, 2002.
http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer07/I07_06.pdf.
86. MALHOTRA V.M.; Developments in the Use of the Superplasticizers. Publication SP-68 American Concrete Institute ACI, 1981.
87. MEHTA, P. K.; Monteiro P. J.M.; Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais. 1^a Edição, 1994.
88. MEHTA, P. K.; Advancements in Concrete Technology, Publisher Concrete International, 1999. p. 69 – 76.
89. MONTE, Renata. Avaliação de Metodologias de Ensaio Destinadas à Verificação da Eficiência de Aditivos Superplastificantes em Pastas de Cimento Portland. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.
90. MUROTA, Tatsuyo; AOYAM, Hiroyuki.; Desenvolvimento do Novo Projeto de Concreto Armado, Vol.32, Nº 10, 1994.
91. NAN SU, Symposium FF on Materials Science of High-Performance Concrete, Boston, Massachusetts, ETATS-UNIS, 2001. vol 31, n 12, p. 1799-1807.
92. NASCIMENTO, J.F.F. Concretagem Submersa de 2º Estágio das Guias dos Stop – Logs na UHE Porto Colômbia. 43º Congresso Brasileiro de Concreto. IBRACON.
93. NEVILLE, Adam M. Propriedades do Concreto. 2ª Edição, 1997.
94. NMAI, Charles; BRAD, Violetta. The Use of Flowing Concrete in Congested Areas. ACI - American Concrete Institute Material Journals, September 1996.p.53-57.
95. NOGUCHI, Tafumi ; TOMOSAWA, Fuminiro. Toward Mix Design for Rheology of Self-Compacting Concrete.
http://bme.tu-tokyo.ac.jp/bmd/papers/bmd_concrete/oh_SCC_1999_mix_proportion.pdf
96. NOGUCHI, Tafumi ; OH, S.G; TOMOSAWA, Fuminiro. Rheological Approach to Passing Ability between Reinforcing Bars of Self-compacting Concrete.
http://bme.tu-tokyo.ac.jp/bmd/papers/bmd_concrete/oh_SCC_1999_passability.pdf

97. NOGATAKI, Shigueyoshi. Concreto de Elevado Desempenho, 1997.
98. OKAMURA, Hajime; OUCHI, Masahiro. Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, Nº 1,5-15 April/ Copyright © 2003 Japan Concrete Institute.p.5-14.
99. OUCHI, Massahiro; et al. Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and The United States. 2003 p.01-20.
100. ÖRJAN, Petersson. Preliminary Mix Design. Final Report of Task 1. Brite EuroRam Proposal No BE96-3801. Swedish Cement and Concrete Research institute, 1998.
101. PEINADO, M. P. Hormigón Vibrado y Hormigones Especiales. Monografías CEAC sobre construcción y arquitectura. 4ª Edição, 1965
102. PEÑA, BERNARDO.R. Consideraciones para el Diseño y Colocación del Hormigón Autocompactante; Revista BIT junio 2001,p. 14.
103. PERSSON, B. Self Consolidating Concrete, SCC, for Submerged Repair of Water Power Dams and Harbours. International Conference on Durability of HPC and Final Workshop of CONLIFE, 2004.
104. PETRUCCI, Eladio. G. R. Concreto de Cimento Pórtland. 11ª Edição, 1987.
105. PROSKE, Tilo; GRAUBNER Carl-Alexander. Self-Compacting Concrete- Pressure on Formwork And Ability To Deaerate. Darmstadt Concrete 17 (2002). <http://www.darmstadt-concrete.de/2002/deaerate.html>.
106. RAMACHANDRAM, V. S. Effects of Retarders/Water Reducers on Slump Lossin Superplasticized Concrete. In: CANMET/ACI International Conference on tehe Use of Superplasticizers in Concrete, 2. Ottawa, 1981. Proceedings. Detroit, ACI, 1981a.p.393-407 (SP68)
107. RIXOM, R.; MAILVAGANAM, N. Chemical Admixtures for Concrete. 3ª Edição, 1999.
108. SAKAI, Etsuo; YAMADA, Kazuo; OHTA, Akira. Molecular Structure and Dispersion - Adsorption Mechanisms of Comb – Type Superplasticizers Used in Japan. Japan Concrete Institute.Jornal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, nº 1, 16-25, April 2003, p. 16-25.
109. SENA, A.M. Avaliação do Comportamento Mecânico dos Concretos Auto- densáveis em Relação aos Concretos Convencionais. Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia Civil da Universidade de Goiás, 2002.

110. SEDRAN, T. Rheology. Final Report of Task 3. Brite EuRam Proposal No BE 96-3801, 2000.
111. SOBRAL, H. S. Propriedades do Concreto Endurecido. ABCP- Associação Brasileira de Cimento Portland, 3º edição, 1961.
112. SOBRAL, H.S. Reologia e Trabalhabilidade dos Concretos. São Paulo, ABCP, 1984.
113. SONEBI, M. et al. Properties of Hardened Concrete. Final Report Task 4. Brite EuRam Proposal No BE 96-3801, 2000.
114. TATTERSAL, G.M.; BANFILL, P. F. G.; The Rheology of Fresh Concrete, Pitman, Boston, 1983.
115. THE EUROPEAN GUIDELINES FOR SELF-COMPACTING CONCRETE. Specification, Production and Use, 2005.
<http://www.efca.info> or www.efnarc.org
116. TOKUDA H., Shoya M.;KAWAKAMI, M.; KAGAYA M. Aplicação de Superplasticizer to Reduce Drying Shrinkage and Thermal Cracking of Concrete. Developments in the Use of the Superplasticizers. Publication SP-68-6 American Concrete Institute. 1981 .
117. TUTIKIAN, Bernardo Fonseca, Método para Dosagem de Concretos Auto-Adensáveis. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
118. TUTIKIAN, Bernardo Fonseca, et al. Comparação da Curva de Dosagem, Resistência à Tração, Consumo de Materiais e Custo dos Concretos Auto-Adensáveis com Metacaulim e Filer Calcáreo. 46º Congresso Brasileiro do Concreto-ISBN: 85-98576-02-6. IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto Volume V – Construções em Concreto-Trabalho CB 0390, 2004, p.431-442.
119. VICTOR, Rigueira J. W., et al. Utilização de Modelos de Ensaio Reduzidos para a Caracterização dos Concretos Auto-Adensáveis. 45º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2002.
120. WEITH, Frank; Nuevos Hormigones. Desafío para el Encofrado. Cemento Hormigón nº 858 Enero 2004.p.34-39.
121. YURIGI, Massahiro; GORO, Sakai. A Proven QA System for Flowable Concrete. ACI -American Concrete Institute; Material Journals, October 1998, p. 14.