

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS
AUTO-ADENSÁVEIS REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO

Ederli Marangon

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.

Prof. Luiz Fernando Lomba Rosa, D.Sc.

Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, Dr.Ing

Prof. Luis Marcelo Marques Tavares, Ph. D.

Prof. Khosrow Ghavami, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MARANGON, EDERLI

Desenvolvimento e Caracterização de Concretos
Auto-Adensáveis Reforçados com Fibras de Aço.
[Rio de Janeiro] 2006.

XVII, 128p. 29,1 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Civil, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Dosagem de Concreto
2. Concreto Auto-Adensável
3. Concreto Reforçado com Fibras
4. Propriedades Mecânicas

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Agradecimentos

A Deus, que apesar de minha fé vacilante, acredita muito em mim e me ajudou a vencer mais esta etapa da vida.

Aos meus pais Pedro e Ironita, que têm a simplicidade como maior virtude, pela dedicação, amizade, amor, carinho e ainda pela graça de existirem como base principal de minha vida.

À minha irmã Maiara, pelo encorajamento, carinho e favor, não medindo esforços para me auxiliar no decorrer deste trabalho.

Aos meus tios, Irineu e André, que mesmo estando longe sempre incentivaram e apoiaram não medindo esforços para me auxiliar no decorrer deste trabalho.

A todos os meus familiares, que sempre demonstraram muito carinho e atenção.

Aos meus orientadores Romildo e Luis Fernando. Diferentes personalidades que possuem em comum o entusiasmo e a crença na inovação. Vocês acreditaram que eu fosse capaz de realizar esta dissertação. Aqui está a prova de minha competência. Ao professor Dudu, pela atenção e ajuda durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos pessoais Ivar, Elizandro, Roges, Maiquidieli, Maiqueli, Juliana, Viviane, Lucas, Leandro, Claudia, Luis Eduardo que mesmo distantes, sempre me deram incentivo nas horas de maiores dificuldades.

Ao amigo João de Almeida pelo acolhimento, amizade, atenção e colaboração desde o início do mestrado, que Deus te abençoe.

Aos amigos que me ajudaram, tanto nas disciplinas como nos ensaios com muita disposição Reila, Flávio Silva e Eugênia.

Ao meu amigo e compadre Sidiclei Formagini pela convivência, ajuda, atenção e troca de experiências durante todo o trabalho.

Aos amigos de apartamento Ricardo, Lisiane e Willian pelo convívio e apoio nas horas de maiores dificuldades.

Aos amigos que aqui fiz, que serão lembrados sempre com muito carinho em especial Joatan e Mauricio, pela convivência, ajuda, atenção e troca de experiências durante todo o trabalho; de modo também singular a Euler, Alex Mota, Sérgio, Fábio, Laurindo, Walber, Iuri, Guilherme George, Helano, Roberta, Luciana, Vivian, Miguel, Wendel, Emerson, Gadéa, Marcos Silvos, Jeanine, Thiago, Alex Leandro, Thais, Lívia, por toda atenção e colaboração.

Aos técnicos do laboratório de estruturas da COPPE/UFRJ, em especial, Santiago, Flávio Sarquis, Ailton, Júlio, Arnaldo, Manuel, Clodoaldo, Flávio e Bruna, pelo auxílio nos trabalhos realizados.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS
AUTO-ADENSÁVEIS REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO

Ederli Marangon

Maio/2006

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Luiz Fernando Lomba Rosa

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho são produzidos e caracterizados concretos auto-adensáveis fibrosos (CAAF) reforçados com frações volumétricas de fibras de aço variando de 1,0 a 2 %. Diferentemente do concreto fibroso convencional (FRC) o CAAF possui capacidade de fluir sob ação de seu peso próprio, preenchendo completamente as formas atingindo boa compactação mesmo na presença de densa armadura. Para a obtenção do CAAF dosou-se, inicialmente, uma matriz auto adensável, utilizando-se o método do empacotamento compressível desenvolvido na França pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussees. Para que fosse possível se adicionar fibras de aço com comprimento de 35 mm, relação de aspecto de 65 e configuração geométrica com ganchos em suas extremidades ao concreto, foi reduzida a quantidade de agregados graúdos que o constituíam. A tensão de escoamento e a viscosidade plástica da matriz auto-adensável foram determinadas utilizando o reômetro BTRHEOM. Ensaio de fluidez na caixa “L”, no funil “V” e no tubo “U”, além de ensaios de espalhamento no cone de Abrams foram realizados para determinar a trabalhabilidade dos concretos fibrosos auto-adensáveis, e os resultados obtidos mostram que os concretos possuem grande capacidade de fluidez. Ensaio mecânicos foram realizados para o levantamento das leis constitutivas dos CAAF sob esforços de compressão, flexão e cisalhamento, e os resultados obtidos apresentaram características de endurecimento com acréscimo da sua capacidade de absorver energia. Por fim realizou-se uma análise micro-estrutural dos CAAF para observar a interface fibra-matriz, além de imagens de raios-X para observar a distribuição das fibras na matriz auto-adensável. Os resultados obtidos da microestrutura apresentaram uma boa interface entre a fibra e a matriz, e uma distribuição homogênea das fibras nas imagens de raios-X.

Abstract of the Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF SELF-COMPACTING
CONCRETES REINFORCED WITH STEEL FIBERS

Ederli Marangon

May/2006

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Luiz Fernando Lomba Rosa

Department: Civil Engineering

In this work, Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete (FRSCC) with high steel fiber volume fraction and high mechanical resistance were developed and characterized. The FRSCC presents the ability of flowing under its own weight, completely filling the formworks and achieving a good compaction even in the presence of high reinforcement ratios. To obtain the FRSCC it was initially developed a self compacting matrix using the Compressible Packing Model which was developed in France at the Laboratoire Central des Ponts et Chaussees. In order to facilitate the addition of the steel fibers, that presented hooked end, length of 35 mm and aspect ratio of 65, the quantity of coarse aggregates was reduced. To determine the yield stress and the plastic viscosity of the self-compacting matrix, the rheological behavior of the studied concretes was determined using the BTRHEOM. The workability of the FRSCC was determined through the following tests: slump flow, inverted Abrams cone, V-funnel and U-tube. Their results indicated that the concrete presented a high flow capacity. Mechanical tests were realized to establish the constitutive laws of the FRSCC under compression, bending and direct shear loads. The obtained results indicated a hardening behavior with an increase in the energy absorption capacity. The FRSCC microstructure was investigated by Scanning Electron Microscopy (SEM) with the aim of observing its fiber-matrix interface and the fiber distribution in the self-compacting matrix was determined by X-ray images. The results obtained from the microstructure observations showed a good fiber-matrix interface and a homogeneous fiber distribution were observed through the x-ray images.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
Agradecimentos.....	iii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Importância e objetivos da pesquisa	1
1.2 Estrutura da dissertação.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Concreto Auto-Adensável.....	4
2.2.1 Materiais.....	5
2.2.1.1 Adições	7
2.2.1.1.1 Fíler Calcário.....	9
2.2.1.1.2 Cinza Volante.....	10
2.2.1.1.3 Sílica Ativa.....	10
2.2.1.2 Aditivos	11
2.2.1.2.1 Superplastificantes.....	11
2.2.1.2.2 Promotores de Viscosidade.....	13
2.2.2 Propriedades do CAA.....	14
2.2.3 Métodos de Avaliação do Comportamento Reológico do CAA no Estado Fresco	15
2.2.3.1 Resistência à Segregação.....	19
2.3 Concreto Auto-Adensável Fibroso	20
2.3.1 Resistência à Compressão e à Tração CAAF	27
2.3.2 Resistência ao Cisalhamento	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	31
3.1 Caracterização dos Materiais.....	31
3.1.1 Agregados e Fíler.....	31
3.1.1.1 Massa Específica dos Agregados e Fíler	32

3.1.1.2	Compacidade dos Materiais com Dimensões Superiores a 100 μm	33
3.1.1.3	Compacidade dos Materiais com Dimensões Inferiores a 100 μm	35
3.1.2	Aglomerantes	36
3.1.2.1	Massa Específica dos Aglomerantes	38
3.1.2.2	Compacidade dos Aglomerantes.....	39
3.1.3	Superplastificante.....	39
3.1.4	Fibras.....	42
3.2	Dosagem pelo Método do Empacotamento Compressível	43
3.2.1	Procedimentos de Dosagem Utilizando o BetonlabPro2	44
3.2.1.1	Dosagem	48
3.3	Concretos produzidos.....	49
3.3.1	Mistura 01.....	50
3.3.2	Mistura 02.....	52
3.3.3	Mistura 03.....	53
3.3.4	Mistura 04.....	56
3.3.5	Mistura 05.....	58
3.4	Produção dos Concretos	60
3.4.1	Processo de mistura.....	60
3.4.2	Concretos Produzidos para Caracterização (C0, C1,0, C1,5 e C2,0)..	62
3.5	Métodos Experimentais para Caracterização dos Concretos	63
3.5.1	Estado Plástico.....	64
3.5.1.1	Reologia Utilizando o Reômetro BTRHEOM.....	64
3.5.1.2	Abatimento e Espalhamento	66
3.5.1.3	Fluidez na Caixa “L”	68
3.5.1.4	Fluidez no Funil “V”	69
3.5.1.5	Auto-Nivelamento e Potencial de Segregação no Tubo “U” ...	70
3.5.1.6	Teor de Ar Aprisionado.....	72
3.6	Estado Endurecido	73

	3.6.1 Resistência à Compressão, Resistência à Flexão e Resistência ao Cisalhamento	
	
	73	
	3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	76
	3.8 Raios-X.....	76
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	78
	4.1 Propriedades do CAAF no estado fresco	78
	4.1.1 Comportamento Reológico da Matriz Auto-Adensável.....	78
	4.1.2 Abatimento e espalhamento.....	79
	4.1.3 Escoamento na Caixa “L”	80
	4.1.4 Fluidez no Funil “V”	81
	4.1.5 Auto-Nivelamento e Resistência à Segregação no Ensaio do Tubo “U”	82
	4.1.6 Teor de Ar Aprisionado.....	85
	4.2 Propriedades Mecânicas	85
	4.2.1 Resistência à Compressão	85
	4.2.2 Resistência à Flexão	88
	4.2.3 Resistência ao Cisalhamento	94
	4.2.4 Análise Microestrutural.....	98
	4.2.5 Dispersão das Fibras Utilizando Imagens de Raios-X.....	101
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	107
	5.1 Sugestões para trabalhos futuros	109
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Curva granulométrica dos agregados e fíler.	32
Figura 3.2 – Procedimento do ensaio de vibração e compressão.	34
Figura 3.3 – Ensaio de demanda d’água.	36
Figura 3.4 – Curvas granulométricas da sílica ativa; cinza volante; cimento CP III 40.	37
Figura 3.5 – Ensaio de compatibilidade e pnto de saturação.	40
Figura 3.6 – Ponto de saturação do superplastificante com os materiais finos.	41
Figura 3.7 – Ponto de saturação de misturas com dispersante (Binárias e ternárias).	42
Figura 3.8 – Fibras utilizadas.	43
Figura 3.9 – Definição das características dos materiais.	46
Figura 3.10 - Etapas realizadas na criação do banco de constituintes e calibração dos parâmetros.....	47
Figura 3.11 - Etapas realizadas para a obtenção da dosagem do concreto.	49
Figura 3.12 – Análise do concreto no estado fresco da mistura 01.	52
Figura 3.13 – Análise do concreto no estado fresco da mistura 02.	53
Figura 3.14 - Efeito de perturbação exercido pelas fibras.	54
Figura 3.15 – Análise do concreto no estado fresco da mistura 03.	56
Figura 3.16 – Análise do concreto no estado fresco da mistura 04.	57
Figura 3.17 – Análise do concreto no estado fresco da mistura 05.	59
Figura 3.18– Misturador Planetário CIBI.	60
Figura 3.19– Seqüência de produção.	62
Figura 3.20 – Reômetro BTRHEOM [40].	65
Figura 3.21 – Medida do Abatimento e Espalhamento pelo método “ <i>slump test</i> ”	67
Figura 3.22 – Medida do espalhamento do cone invertido.	68
Figura 3.23 – Caixa de acrílico em forma de “L” e a configuração do espaçamento entre barras.	69
Figura 3.24 – Funil em forma de “V” (dimensões em mm).....	70
Figura 3.25 – Tubo em forma de “U” (dimensões em mm).....	71
Figura 3.26 – Posição de onde foram retiradas as amostras carotadas do Tubo “U”.	72
Figura 3.27 – Aparelho para medir o teor de ar aprisionado e incorporado no concreto.	73

Figura 3.28 – Instrumentação dos corpos-de-prova para ensaios de resistência à compressão e resistência à flexão.....	74
Figura 3.29 – Instrumentação do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento.	75
Figura 3.30 – Dimensões do setup utilizado para o ensaio de cisalhamento.	75
Figura 3.31 – Posições das amostras retiradas para ensaio de raios-X.....	77
Figura 4.1 – Relação entre o torque e a velocidade de rotação da matriz C0	78
Figura 4.2– Amostras depois de submetida ao ensaio de abatimento e espalhamento...	80
Figura 4.3 – Visualização da distribuição dos ingredientes da mistura e retenção de água.	80
Figura 4.4 – Configuração final do concreto após o termino do lançamento do concreto no Tubo “U”	83
Figura 4.5– Preenchimento dos espaços do Tubo “U”.	84
Figura 4.6 – Curva tensão x deformação média à compressão dos concretos aos 28 dias (C0; C1,0; C1,5; C2,0).	86
Figura 4.7 – Modo de fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de compressão uniaxial.	88
Figura 4.8 – Curva Carga x Deslocamento média à flexão dos concretos aos 28 dias (C0; C1,0; C1,5; C2,0).	89
Figura 4.9 – Curva carga por deslocamento da norma ASTM C1018 (1994) [81].	91
Figura 4.10 – Modo de fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de flexão em quatro pontos.....	93
Figura 4.11 – Modo de fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de flexão em quatro pontos.....	94
Figura 4.12 – Curva Carga x Deslocamento típicas de resistência ao cisalhamento após 90 dias (C0; C1,0; C1,5; C2,0).	95
Figura 4.13 - Tensão de cisalhamento como função da fração volumétrica de fibras....	96
Figura 4.14 – Modo de Fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de cisalhamento.	97
Figura 4.15 – Modo de Fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de cisalhamento.	98
Figura 4.16 – Análise de micrografia de amostras de concreto original.....	99
Figura 4.17 – Análise de micrografia de amostras de concreto na zona de fratura.....	100

Figura 4.18 – Imagens de raios-X mostrando a distribuição das fibras do concreto com 2 % de fibras vista nos diferentes planos.....	102
Figura 4.19 – Imagens de raios-X mostrando a distribuição das fibras do concreto com 1,5 % de fibras vista nos diferentes planos.....	103
Figura 4.20 – Imagens de raios-X mostrando a distribuição das fibras do concreto com 1,0 % de fibras vista nos diferentes planos.....	104
Figura 4.21 – Imagens de raios-x mostrando a distribuição das fibras do concreto.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1– Diâmetro dos agregados (D80 e D50).	32
Tabela 3.2 – Massa específica dos agregados e fíler.	33
Tabela 3.3 – Compacidade do agregado miúdo (Areia).	34
Tabela 3.4 – Compacidade do agregado graúdo (Brita)	35
Tabela 3.5 - Compacidade da sílica 325 (K = 6,7).	36
Tabela 3.6 – Diâmetro dos aglomerantes (D80 e D50).	37
Tabela 3.7 – Análise química dos materiais cimentíceos em estudo.....	38
Tabela 3.8 – Valores de massa específica dos aglomerantes.	38
Tabela 3.9 – Compacidade dos materiais com dimensões inferiores a 100 µm (K = 6,7).	39
Tabela 3.10- Propriedades típicas da microfibras mineral (volastonita).	43
Tabela 3.11- Características das fibras de aço.....	43
Tabela 3.12 - Propriedades utilizadas no Programa BetonlabPro2.	45
Tabela 3.13 – Especificações das propriedades do CAA no estado fresco.....	50
Tabela 3.14 – Misturas produzidas para obtenção da caracterização mecânica.....	50
Tabela 3.15 - Composição do concreto da mistura 01.....	51
Tabela 3.16 – Frações volumétricas dos materiais constituintes da mistura 01.....	51
Tabela 3.17- Composição do concreto da mistura 02.....	53
Tabela 3.18- Composição do concreto da mistura 03.....	55
Tabela 3.19 - Composição do concreto da mistura 04.....	57
Tabela 3.20 - Composição do concreto da mistura 05.....	58
Tabela 3.21 – Frações volumétricas dos materiais constituintes da mistura 05.....	58
Tabela 3.22 - Composição dos concretos C0, C1,0, C1,5 e C2,0.....	63
Tabela 4.1 – Resultados do abatimento, espalhamento do tronco de cone e espalhamento do tronco de cone invertido.	79
Tabela 4.2 – Resultados do ensaio da caixa “L”.	81
Tabela 4.3 – Resultado do tempo de fluidez do funil “V”.	82
Tabela 4.4 – Valores médios dos índices físicos de todas as amostras carotadas do tubo “U”.	85
Tabela 4.5 – Resultado do ensaio do teor de ar.	85

Tabela 4.6 – Valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, deformação axial e coeficiente de Poisson.	86
Tabela 4.7 – Resultados experimentais médios dos ensaios de resistência à flexão e deformação.	89
Tabela 4.8 – Índices de tenacidade calculados de acordo com a norma ASTM C 1018.92	
Tabela 4.9 – Índices de tenacidade calculados de acordo com a norma Belga.	93
Tabela 4.10 – Resultados experimentais de resistência ao cisalhamento.	96

LISTA DE SÍMBOLO E ABREVEATURAS

Símbolos latinos

a	Parâmetro numérico.
A	Parâmetro numérico.
A1	Classe de agregados miúdo com diâmetro superior a 0,850 mm.
A2	Classe de agregados miúdo com diâmetro inferior a 0,850 mm.
A3	Classe total de agregados miúdo.
AEA	Aditivo incorporador de ar.
a/c	Relação água/cimento.
a/cv	Relação água/cinza volante.
a/mc	Relação água/materiais cimentíceos.
a/mp	Relação água/materiais em pó.
a/sa	Relação água/sílica ativa.
a/s ₃₂₅	Relação água/sílica 325.
b	Parâmetro numérico.
B1	Classe de agregados graúdo com diâmetro superior a 4,8 mm.
B2	Classe de agregados graúdo com diâmetro inferior a 4,8 mm.
B3	Classe total de agregados graúdo.
C	Compacidade real.
CAA	Concreto auto-adensável.
CAAF	Concreto auto-adensável fibroso.
C0	Concreto sem fibras.
C1,0	Concreto com 1 % de fibras.
C1,5	Concreto com 1,5 % de fibras.
C2,0	Concreto com 2,0 % de fibras.
CV	Coefficiente de variação.
DMA	Diâmetro máximo do agregado.
DP	Desvio padrão.
E _i	Módulo de elasticidade do concreto.
f _c	Resistência a compressão.
f _{c7}	Resistência à compressão aos 7 dias de idade.
f _{c28}	Resistência à compressão aos 28 dias de idade.
f _{t28}	Resistência à tração aos 28 dias de idade.
G1	Porcentagem de agregado graúdo.
H ₁	Maior altura da camada de material depositada na caixa em forma de “L”.
H ₂	Menor altura da camada de material depositada na caixa em forma de “L”.
h	Altura final da camada do material compactado, altura dos elementos prismáticos.
h	Altura da amostra.

$I_5, I_{10}, I_{20}, I_{30}$	Índices de tenacidade.
K	Índice de compactação para a mistura.
K'	Índice de Colocabilidade.
l/d	Relação de aspecto.
MEC	Método de Empacotamento Compressível.
MEV	Microscopia eletrônica de varredura.
N	Velocidade de rotação.
P	Parâmetros calibração dos coeficientes pozolânicos.
P*	Índice de tenacidade (norma Belga).
PA	Poliacrilato.
Q	Parâmetros calibração dos coeficientes pozolânicos.
R_1	Raio interno do reômetro.
R_2	Raio externo do reômetro.
rpm	Rotações por minuto.
rps	Rotações por segundo.
S	Prevenção à segregação.
SP	Superplastificante.
S_1	Porcentagem de areia classe 1.
S_2	Porcentagem de areia classe 2.
T	Temperatura da sala.
V_{agregado}	Volume de agregados graúdo.
vf	Volume de fibras.
VMA	Agente modificador de viscosidade.
$V_{\text{sólidos}}$	Volume de sólidos.

Símbolos Gregos

δ	Deslocamento.
δ_{cr}	Deflexão de primeira fissura.
δ_u	Deflexão da carga máxima.
ε	Deformação.
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação imposta.
$\dot{\gamma}_{\text{max}}$	Gradiente (taxa) de deformação.
μ	Viscosidade plástica.
μ'	Viscosidade plástica equivalente.
ν	Coefficiente de Poisson.
σ	Tensão.

σ_{cr}	Tensão ou resistência de primeira fissura.
σ_u	Resistência à flexão e ao cisalhamento pós-fissuração ou módulo de ruptura pós-fissuração.
Γ	Torque.
Γ_0	Parâmetro numérico.
τ	Tensão cisalhante aplicada.
τ_0	Tensão inicial de escoamento.
τ'_0	Parâmetro característico do material.
τ_{C0}	Tensão de cisalhamento da mistura C0.
τ_{Ci}	Tensão de cisalhamento da mistura i (sendo i=1,0;1,5;2,0).
τ_u	Tensão de cisalhamento última.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância e objetivos da pesquisa

O concreto auto-adensável (CAA) é um novo tipo de concreto que apresenta alta fluidez e coesividade, sendo capaz de preencher completamente as formas, atingindo compactação total, mesmo na presença de densa armadura. O concreto obtido é denso, homogêneo e tem as mesmas propriedades de engenharia do concreto convencional. O CAA diminui o tempo de construção, mão-de-obra, necessidade de equipamentos no canteiro de obras, exposição dos trabalhadores a ruídos e vibrações, além de possibilitar a obtenção de superfícies com melhor acabamento. A adição de reforço fibroso aumenta os benefícios técnicos do concreto auto-adensável pois proporciona incremento na sua tenacidade, resistência à flexão, impacto, cisalhamento e durabilidade.

Um dos problemas comumente relacionado com o uso de fibras no concreto convencional é a redução na sua trabalhabilidade, especialmente quando altas frações volumétricas são utilizadas como reforço. Primeiramente, é difícil dispersar no concreto normal um grande volume de fibras, devido ao agrupamento de fibras e conseqüente formação de novelos. Adicionalmente, tanto o processo de vibração interna quanto a externa dos concretos com fibras podem influenciar a qualidade do produto final no estado endurecido. A vibração interna não é recomendada porque esse método de consolidação produz alinhamento preferencial e distribuição não uniforme das fibras. A vibração externa também pode conduzir a uma orientação preferencial das fibras. Se o tempo de vibração utilizado no processo de consolidação for muito curto, apenas um

pequeno alinhamento é observado. No entanto, para misturas que necessitem de um maior tempo de vibração para que ocorra uma boa consolidação, uma forte orientação das fibras pode ser observada.

Desenvolver um concreto com fibras capaz de ser lançado, compactado e que preencha todos os espaços das formas por si só em estruturas densamente armadas é de grande importância, devido a uma maior eficiência na concretagem, possibilitando produzir elementos estruturais mais compactos, redução do custo energético, benefícios tecnológicos e ambientais. Uma vez que se adicionarmos fibras ao concreto, ela pode possibilitar a redução da densidade de armadura principal, ou simplesmente a utilização das mesmas como reforço secundário melhorando assim a adesão da armadura contínua e a matriz.

Devido a esses fatores, a produção de concreto auto-adensável fibroso pode ser bastante vantajosa se adicionarmos altas frações volumétricas de fibras. Dando a alta trabalhabilidade da matriz de concreto um eficiente processo de dispersão das fibras pode ser observado. Assim, a ausência de vibração no CAAF poderá gerar elementos estruturais com fibras distribuídas homogênea e randomicamente. A boa dispersão das fibras é um importante fator para que o concreto apresente boas propriedades mecânicas. Porém, a aplicação do CAAF ainda não é muito difundida, especialmente devido à carência de informações relativas à sua dosagem e a sua caracterização no estado plástico.

A obtenção de um concreto auto-adensável fibroso exige uma dosagem correta e a realização de ensaios de caracterização que possibilitem avaliar a sua estabilidade, ou seja, avaliar sua resistência à segregação, exsudação e capacidade de fluir. Ainda que os componentes deste concreto sejam os mesmos que os de um concreto convencional, as proporções utilizadas em sua dosagem são distintas, principalmente no que se refere ao conteúdo de finos, imprescindíveis para evitar os riscos de segregação e exsudação. As influências das adições de finos (inertes ou ativos) ou dos aditivos empregados nas misturas devem ser analisadas, considerando suas inter-relações e as variações decorrentes dos materiais utilizados. Na dosagem de CAA, o volume de agregado graúdo é reduzido quando comparado com o do concreto convencional. No CAAF, há

uma redução ainda maior no volume de agregado graúdo para compensar a introdução das fibras de aço.

No presente trabalho, apresenta-se a metodologia seguida para dosar concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de volastonita e altas frações volumétricas de fibras de aço ($v_f = 1,0 \%$, $1,5 \%$ e $2,0 \%$), assim como o levantamento das leis constitutivas dos mesmos sob esforços de compressão, flexão e cisalhamento. Ensaio reológicos, utilizando o BTRHEOM, foram utilizados para determinar a tensão de escoamento e a viscosidade plástica da matriz auto-adensável. Ensaio de fluidez na caixa “L”, no funil “V” e no tubo “U”, além de ensaios de espalhamento no cone de Abrams foram realizados para determinar a trabalhabilidade dos concretos fibrosos auto-adensáveis. Por fim realizou-se uma análise micro-estrutural dos CAAF para observar a interface fibra-matriz, além de se obterem imagens de raios-X para observar a distribuição das fibras na matriz auto-adensável.

1.2 Estrutura da dissertação

Este trabalho é composto de seis capítulos, descritos a seguir:

Capítulo 1 – Introdução ao trabalho, ressaltando a importância e o objetivo da pesquisa e mostrando a estrutura da tese.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica sobre os concretos auto-adensáveis fibrosos e procedimentos para avaliação do concreto no estado fresco e endurecido.

Capítulo 3 – Materiais e métodos experimentais. Esse capítulo apresenta a caracterização dos materiais, método de dosagem, ajustes de dosagem e produção de CAA e CAAF e a metodologia experimental adotada na realização dos ensaios.

Capítulo 4 – Apresentação e análise dos resultados.

Capítulo 5 - Conclusões gerais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 6 – Referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

Anexo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Para que se tenha um maior conhecimento a cerca de um concreto auto-adensável fibroso, é importante que se tenham informações detalhadas de como dosar e produzir um concreto auto-adensável. Nesse sentido, antes da revisão bibliográfica sobre CAAF, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre CAA. Assim, no item 2.2 são descritos os materiais utilizados na dosagem de CAA, considerações de dosagem, propriedades reológicas e ensaios para caracterização do material. Em seguida, será apresentado o estado da arte do CAAF.

2.2 Concreto Auto-Adensável

Com a crescente utilização do concreto no campo, observou-se uma grande deficiência na concretagem das estruturas, trazendo problemas que afetam a durabilidade e reduzem a qualidade das construções. O CAA foi desenvolvido em 1988 com o objetivo de eliminar essas deficiências de concretagem. Originalmente desenvolvido no Japão, o CAA tem provado ser benéfico economicamente por vários fatores: construção rápida, mão-de-obra reduzida, superfícies com melhor acabamento, facilidade de lançamento, grande facilidade de fluir em espaços estreitos, melhora na durabilidade e ausência de vibração. O CAA é considerado por alguns autores [1] como o mais revolucionário desenvolvimento da construção de estruturas em concreto das últimas décadas.

De acordo com Nedhi et al. [2] e Walaraven [3], os CAA eliminam a necessidade de compactação e vibração durante o lançamento, sendo muito utilizados em locais de difícil acesso de equipamentos e em elementos estruturais com alta densidade de armadura. O CAA também diminui o tempo de construção, elimina ruídos oriundos de vibração e proporciona alta qualidade nas superfícies de acabamento. As misturas auto-adensáveis geram concretos com melhor homogeneidade no estado endurecido.

O CAA deve garantir sua capacidade de deformação proporcionada por sua fluidez e viscosidade. A viscosidade deve ser suficiente para que não ocorra a separação do esqueleto granular (cimento, fílers e agregados) da mistura durante a produção, transporte e lançamento do concreto, evitando assim a ocorrência de segregação [4]. A exsudação é outro fator importante que deve ser controlado no CAA, a fim de evitar a subida de água para a superfície do concreto recém lançado [5]. Segundo Khayat [6] a exsudação pode provocar o desenvolvimento de fissuras, especialmente sobre armaduras, devido à restrição imposta por elas à acomodação do concreto plástico.

2.2.1 Materiais

O CAA é bastante suscetível em suas propriedades no estado fresco, e algumas características dos materiais constituintes como, por exemplo, tamanho, textura e distribuição granulométrica dos agregados, são importantes para a garantia da fluidez desejada da mistura. É indispensável na produção de CAA o uso de aditivos químicos, a fim de que se obtenham as características esperadas do concreto no estado fresco ([7], [8]).

Todos os tipos de cimento empregados na produção de concretos convencionais podem ser utilizados na produção de CAA. Variações no tipo de cimento, mesmo sendo do mesmo fabricante, afetam diretamente as propriedades do concreto auto-adensável, podendo não desenvolver uma interação satisfatória de compatibilidade com os aditivos químicos [9]. Devem-se destacar como duas das principais características do cimento a sua finura e a sua capacidade de absorver o dispersante. Com cimentos mais finos, tem-se maior superfície específica, o que proporciona menor tensão de escoamento e maior viscosidade da mistura, decorrente do aumento da quantidade de partículas em contato

com a água, diminuindo a distância entre os grãos e aumentando a frequência de colisão entre eles [10].

Conforme descrito nas especificações do EFNARC [1], todos os tipos de agregados graúdos e miúdos utilizados em concretos convencionais são adequados para o emprego em CAA. O volume de agregados ocupa 70 % do volume de concreto, sendo dominante nas propriedades do concreto não somente pela qualidade, mas também pela quantidade. Portanto a qualidade e graduação dos agregados têm grande influência na qualidade do concreto [11].

Todas as areias industrializadas ou naturais usadas em concreto convencional podem ser usadas no CAA. Podem ser usados silícios ou areias calcárias. Partículas menores que 0,125 mm são consideradas como pó e são muito importante para a reologia do concreto auto-adensável [1]. Porém as areias artificiais, obtidas por britagem, são as menos indicadas por apresentarem elevada superfície específica e aspereza superficial, demandando maior consumo de água e aditivos superplastificantes para se conseguir a fluidez necessária. Já os agregados naturais possuem uma forma mais arredondada, o que é preferível na produção desses concretos. Uma curva granulométrica contínua, onde os grãos menores dos agregados preenchem os espaços deixados pelos grãos maiores, proporciona melhor resistência à segregação para os CAA ([5], [9], [12]).

Os agregados graúdos de forma regular, de qualquer natureza, são os mais indicados na produção de concreto auto-adensável. Agregados com elevadas superfícies específicas, lamelares e com textura áspera, devem ser empregados em granulometria mais fina e contínua para que seja menor o efeito de redução na fluidez da mistura. O CAA pode ser produzido com agregados graúdos com dimensões de até 20 mm, porém, quanto maior for a dimensão do agregado, maior deverá ser a viscosidade da pasta para evitar a segregação. Além disso, quanto maior for a dimensão do agregado, maior será a ocorrência de bloqueamento em passagens estreitas. Agregados com diâmetro máximo de até 10 mm são os mais utilizados na produção do CAA, por resultar em uma composição mais econômica, e um melhor desempenho das propriedades reológicas ([5], [9], [12]).

2.2.1.1 Adições

Devido às exigências de reologia especiais do CAA no estado fresco, adições minerais inertes e reativas são usadas comumente para melhorar e manter a trabalhabilidade, regulando o conteúdo de cimento e reduzindo o calor de hidratação.

As adições podem ser classificadas em tipo I e tipo II, de acordo com sua reatividade. As adições inertes são classificadas de tipo I e promovem uma ação física, aumentando a compacidade da mistura. Essas adições do tipo I são representadas pelos fílers calcários e quartzos moídos, entre outros. As adições reativas são classificadas como de tipo II e são representadas pela cinza volante, cinza de casca de arroz, metacaulin, escória de alto forno e o fumo de sílica (microsílica) [1]. As adições do tipo II contribuem para a formação de hidratos sendo empregadas em substituição ao cimento em teores de até cerca de 30 %. De acordo com a literatura, muitas vezes as adições do tipo I e II são utilizadas em conjunto [12].

O uso das adições no CAA é muito importante para aumentar a estabilidade e fluidez do concreto, reduzindo o contato de fricção entre os agregados e aumentando a viscosidade e a resistência à segregação pela formação de uma granulometria contínua em que todos os vazios deixados pelos agregados maiores ficam preenchidos. A incorporação de um ou mais materiais finos de diferentes morfologias e distribuição granulométrica melhora a coesividade, o auto-adensamento e a estabilidade do CAA [13]. Sonebi et al. [13] citam que a incorporação de finos diminui a quantidade de superplastificante necessária para obter a mesma fluidez que os concretos produzidos somente com cimento. O uso de materiais finos como cinza volante, escória de alto forno ou fíler de pedra calcária aumenta a distribuição granulométrica e o empacotamento das partículas, assegurando maior coesão [14].

As adições minerais utilizadas em concretos de cimento Portland causam mudanças consideráveis na estrutura da pasta de cimento. Dentre estas mudanças pode-se citar o aumento da viscosidade da pasta de cimento devido à redução do fluxo interno de líquidos da mesma. No caso específico do CAA, este aumento de coesão facilita a mobilidade das partículas no estado fresco. Isto faz com que as partículas de agregado graúdo se movimentem com mais facilidade, e fiquem estáveis na pasta de cimento devido ao aumento nas forças de atração das partículas de menor dimensão na pasta,

proporcionando ao concreto uma melhor capacidade de escoamento e mantendo sua composição uniforme [15].

A eficiência das adições depende da granulometria, forma, textura superficial, área superficial e da reatividade das partículas. As partículas rugosas, angulares e alongadas exigem maior quantidade de pasta que as partículas lisas para não exercerem influência nas propriedades do concreto fresco [16]. Com a nova geração de superplastificantes e as diversas adições minerais, não é mais requerida a incorporação de agentes modificadores de viscosidade no concreto [17].

As adições minerais contribuem para a obtenção das condições mais favoráveis de fluidez do concreto fresco e também para a formação do esqueleto granular, de modo que as propriedades mecânicas para o concreto auto-adensável tendem a ser favoráveis. Cabe ressaltar que os finos utilizados no concreto, que substituem uma parte do cimento, apresentam geralmente menor calor de hidratação, contribuindo para a diminuição do calor de hidratação em grandes massas de concreto [18].

Dentre os benefícios que a utilização de adições minerais gera, destacam-se os benefícios ambientais pela substituição parcial do cimento, diminuindo a emissão de CO₂ na atmosfera gerada pela produção do clínquer, benefícios ambientais devido ao fato de as adições serem constituídas geralmente por resíduos industriais que não são lançados no meio ambiente e melhora das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, sendo o primeiro conseguido em termos de fluidez, resistência à segregação e exsudação, e o segundo consistindo em aumento de resistência e durabilidade devido ao refinamento de poros [1].

Segundo Sahmaran et al. [19], a argamassa é a base para que se obtenha um CAA com boa trabalhabilidade. Entre os aditivos minerais, a cinza volante e o pó de pedra calcária mostraram-se mais eficientes em termos de trabalhabilidade das misturas. Isso mostra que a finura da adição mineral não é o único parâmetro que deve ser levado em conta para a melhora da trabalhabilidade, mas também a área superficial, a forma e a textura das partículas são importantes para as características de auto-adensamento da mistura. Ambos os aditivos químicos e adições minerais afetam adversamente as argamassas [19].

O uso de aditivos minerais reduz o custo do CAA, associado com o uso de aditivos químicos e de altos volumes de cimento Portland. As adições minerais substituem parte do cimento Portland. Além disso, as adições minerais asseguram a melhora do desempenho do CAA ao longo do tempo [19].

As adições minerais mais utilizadas em CAA são descritas a seguir.

2.2.1.1.1 Fíler Calcário

Os materiais em pó mais utilizados na produção de CAA são: pó de pedra; pó constituído por partículas finamente moídas, de natureza calcária; dolomita ou granito. Estas partículas possuem dimensões em torno de 0,125 mm. O fíler calcário proporciona um efeito físico e um efeito químico à mistura. O efeito físico ocorre devido à sua finura, preenchendo todos os espaços vazios existentes entre as partículas maiores da mistura. O efeito químico ocorre pelo fato de o material não ser verdadeiramente inerte, funcionando como agente de nucleação para a formação de monocarboaluminatos de cálcio, com propriedades aglutinantes, mas são de menor intensidade que o C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Outro efeito químico produzido pelo fíler calcário é de acelerar a hidratação dos minerais do clínquer, especialmente o C_3S , contribuindo para o aumento da resistência do concreto ([9], [20], [21]).

A partícula de fíler calcário podem afetar a fluidez do concreto, como também diminuir o tempo de pega. Geralmente esse efeito ocorre quando se empregam elevados teores de aditivos superplastificantes ([9], [22]). Em um estudo realizado por Esping [23], foi demonstrado que, mantendo-se constante o teor de água das misturas, quanto mais fino for o fíler, maior o teor de dispersante que deve ser empregado para que sejam obtidas as mesmas características de deformabilidade. Essas mesmas observações foram feitas por Melo e Repette [24].

O fíler calcário deve ter finura igual ou menor que a do cimento, porém, quando o diâmetro médio das partículas é muito pequeno, menor do que 1 μm , pode acarretar aumento expressivo da tensão de escoamento do concreto [25]. Segundo Sonebi *et al.* [13] a utilização de fíler calcário em grandes quantidades pode diminuir a ocorrência de exsudação e segregação.

2.2.1.1.2 Cinza Volante

A cinza volante é um material inorgânico, com boas propriedades pozolânicas, que pode ser acrescentado ao CAA para melhorar suas propriedades tanto no estado fresco quanto no endurecido. As características físicas referentes à distribuição granulométrica, forma, finura, densidade e composição química da cinza exercem influências nas propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Sua forma quase esférica proporciona a rolagem dos agregados, diminuindo o atrito interno entre eles e destes com as partículas de cimento, resultando em maior fluidez e viscosidade, e reduzindo o consumo de superplastificante [9]. A finura adequada da cinza volante para ser empregada no CAA está entre 500 e 600 m²/kg ([9], [26]).

Segundo Xie *et al.* [26], a cinza volante melhora a viscosidade do concreto fresco, sem prejudicar a trabalhabilidade e fluidez do concreto.

2.2.1.1.3 Sílica Ativa

O uso da sílica ativa em CAA é mais comum em concretos de elevada resistência à compressão. Quando empregada em teores de 2 a 8% em relação à massa de cimento, promove o aumento da resistência à segregação, porém deve-se esperar uma maior demanda por aditivo superplastificante e um aumento da tensão de escoamento do concreto [9]. A sílica ativa é caracterizada por sua estrutura amorfa, com forma semelhante à esférica, com diâmetros variando entre 0,1 µm até 2 µm, ou seja, partículas cerca de 100 vezes menores que as do cimento. O teor de SiO₂ (dióxido de silício) varia entre 85 e 90 % da massa específica ([12], [27]). A adição de sílica ativa ao concreto resulta em uma melhoria na reologia e nas propriedades no estado fresco, como também nas propriedades mecânicas e físicas, aumentando a durabilidade do concreto [1]. Os benefícios da sílica ativa são descritos por Gobbi e Amaral [15] de maneira simplificada como:

- Efeito microfíler: as partículas de sílica preenchem os espaços entre os grãos de cimento, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como ponto de nucleação.

- Efeito pozolânico: as partículas de sílica reagem com hidróxido de cálcio. Os produtos desta reação se assemelham aos produtos resultantes da hidratação do cimento.

2.2.1.2 Aditivos

Os aditivos denominados de superplastificantes ou dispersantes são um componente essencial para a produção do CAA, para promover a trabalhabilidade necessária. Esse aditivo é o responsável pela elevada fluidez da mistura devido à sua capacidade de redução de água, o que o torna adequado para concretos aplicados em áreas com pequena acessibilidade ou com alta densidade de armadura, além de ser capaz de aumentar a bombeabilidade do concreto [28]. Os dispersantes são compostos orgânicos que possuem a propriedade de aumentar a fluidez da mistura composta por materiais cimentícios mantendo constante o consumo de água ou, de forma equivalente, permitem a redução da quantidade de água mantendo constante a fluidez da mistura ([29], [30]). Outros tipos de aditivos podem ser incorporados quando necessário, como por exemplo agentes que modificam a viscosidade (tipo VMA), aditivos incorporadores de ar (tipo AEA), retardadores ou aceleradores de pega, entre outros, conforme a necessidade do produto final. Os aditivos promotores de viscosidade são constituídos basicamente de polímeros solúveis em água ([1], [4]).

2.2.1.2.1 Superplastificantes

O tempo durante o qual o CAA mantém suas propriedades reológicas desejadas é muito importante para obter bons resultados no lançamento do concreto. Este tempo pode ser ajustado escolhendo o tipo certo de superplastificante (dispersante) ou combinado com retardadores. Os diferentes aditivos têm efeitos diferentes, e eles podem ser usados de acordo com o tipo de cimento e o tempo de transporte para o lançamento do CAA [31].

A escolha de um bom e eficiente superplastificante é de fundamental importância para a eficiência na dispersão das partículas de cimento dentro da mistura, na redução da quantidade de água de mistura e no controle da reologia de um traço com relação água/material cimentante muito baixa, durante a primeira hora após o contato entre o cimento e a água. A incompatibilidade entre cimento e aditivo pode ocorrer,

mesmo que estes produtos satisfaçam às suas exigências normativas. Devido às suas diferenças químicas e físicas, ao entrarem em contato esses produtos podem desenvolver comportamentos reológicos distintos que conduzem à perda de trabalhabilidade do concreto [32].

Os aditivos superplastificantes são usados para impedir a floculação das partículas de cimento. Quando misturados cimento e água, os grãos de cimento tendem a se tornar uma estrutura floculada que aprisiona parte da água adicionada. Os superplastificantes atuam basicamente na defloculação e dispersão das partículas de cimento, garantindo desta forma um melhor aproveitamento da água ([27], [18]).

Diversos fatores podem influenciar no desempenho dos superplastificantes, como a finura e a composição química do cimento, o modo de imersão na mistura e a composição química do próprio aditivo. O uso do superplastificante resulta na modificação de várias características da pasta de cimento, incluindo a porosidade e sua distribuição, a taxa de hidratação, a morfologia dos hidratos, o desenvolvimento da resistência, a fluidez e perda de fluidez com o tempo, o tempo de pega, a retração, a segregação e a exsudação entre outras. Para que esses efeitos sejam minimizados, é importante verificar a compatibilidade entre o cimento e os aditivos usados, de modo que não haja perdas de fluidez [28]. Existe um teor máximo de aditivo capaz de promover aumento de fluidez, que é denominado de ponto de saturação, e pode ser definido a partir de ensaios em pastas e argamassas.

Os superplastificantes de grande eficiência, dentre os quais se destacam os de base policarboxilato, são os mais empregados e indicados para o CAA promovendo a redução de água da mistura em no mínimo 20 %. Aditivos à base de ácidos sulfonados naftaleno formaldeído e melamina formaldeído promovem dispersão das partículas finas principalmente por meio de repulsão eletrostática. Como efeito, causam a diminuição da tensão superficial do meio aquoso do concreto, tornando assim a mistura instável e aumentando a segregação devido à diminuição da viscosidade da pasta. Os aditivos à base de policarboxilato promovem a dispersão das partículas por meio da atuação conjunta de repulsão eletrostática e dos efeitos de repulsão estérica, e, diferentemente da ação dos aditivos citados anteriormente, não causam uma diminuição expressiva da viscosidade da pasta, tornando a mistura menos sensível à segregação ([9], [10], [28]).

Segundo Hwang et al. [33], em misturas com mesma relação água/materiais em pó, os aditivos à base de naftaleno apresentaram maior consumo que os policarboxilatos, para garantir os mesmo níveis de fluidez da mistura. Entretanto, vários autores usam aditivos à base de naftaleno ([4], [7], [8]). É de grande importância a compatibilização do aditivo com os materiais finos, havendo a necessidade de se manter a fluidez do CAA por um tempo que não comprometa o lançamento da mistura [9].

2.2.1.2.2 Promotores de Viscosidade

Os aditivos promotores de viscosidade são empregados para melhorar a resistência à segregação do CAA. São produtos cujas cadeias poliméricas adsorvem água e se entrelaçam, formando grandes reticulados flexíveis responsáveis pelo aumento da retenção de água. Sua ação se dá pela formação de uma rede que sustenta os agregados. Produtos à base de sílica precipitada também podem ser empregados na composição de aditivos promotores de viscosidade. Esses produtos diminuem a exsudação e aumentam a viscosidade da pasta, evitando assim a segregação dos agregados. Os promotores de viscosidade são eficientes para suprir a falta de finos, e são uma alternativa valiosa para a correção da composição cujos suprimentos de materiais constituídos é muito variável. O desempenho dos aditivos está diretamente ligado com a compatibilidade entre eles e o cimento, bem como a seqüência de adição e a forma de mistura do CAA ([9], [10]).

A utilização de aditivos promotores de viscosidade pode gerar no concreto um comportamento pseudoplástico, que corresponde à redução da viscosidade em função do aumento da taxa de cisalhamento aplicada. Este efeito pode facilitar a utilização do CAA, pois, como o lançamento do concreto nas formas ocorre sob elevadas taxas de cisalhamento, a viscosidade diminui, facilitando esta operação. Por outro lado, após a aplicação a viscosidade aumenta e garante ao concreto a capacidade de reter água e manter a sustentabilidade das partículas (Khayat et al., 1999, apud [31]). A incorporação de agentes modificadores de viscosidade é uma técnica que pode ser usada de maneira a obter uma massa coesa. Esses agentes modificadores de viscosidade aumentam a viscosidade da fase aquosa, melhorando a capacidade da pasta em suspender partículas sólidas [34].

2.2.2 Propriedades do CAA

Um aspecto específico do CAA é a grande capacidade de fluir sob seu peso próprio e ocupar completamente todos os espaços dentro de uma forma sem qualquer tipo de vibração, além de fluir por pequenas aberturas, como entre uma armadura densa, sem segregação, exsudação ou bloqueamento, mantendo sua homogeneidade. Uma medida da facilidade com a qual o concreto fresco pode ser lançado e compactado é uma complexa combinação dos aspectos de fluidez, coesividade, transportabilidade, compatibilidade e viscosidade. A viscosidade e a coesão do concreto são características importantes para evitar a segregação e exsudação da mistura. A resistência de segregação é alcançada reduzindo a relação água/materiais cimentícios e aumentando a coesividade da pasta ([1], [4], [25], [34], [35]).

O CAA pode fluir entre um reforço denso sem apresentar segregação ou bloqueamento. Estes concretos podem ser usados em uma variedade de aplicações, desde concretos de baixa resistência até concreto massa. Isso se torna possível devido a uma combinação de superplastificantes (SP) com uma grande quantidade de materiais finos (usualmente entre 500 – 600 kg/m³), de forma que a relação água/materiais em pó seja suficientemente viscosa para manter o agregado em sua tendência natural ao submergir na mistura fluida [25].

É importante manter uma viscosidade adequada para obter estabilidade suficiente do CAA. Se a viscosidade do concreto for muito alta, há um risco de se bloquearem as passagens estreitas pelas quais o concreto fresco deve atravessar. Por outro lado, se a viscosidade for muito baixa a estabilidade não pode ser mantida, o que conduz à exsudação e segregação [35]. Tais complicações requerem que se realizem ajustes nos materiais da mistura, controlando o volume de agregado graúdo, graduação do tamanho das partículas, relação água/material cimentante, usando aditivos químicos e adições minerais [2].

As limitações dos agregados graúdos são justificadas, em princípio, pelo fato de a frequência de colisões e de contato entre as partículas aumentar à medida que a distância relativa entre as partículas diminui. Deste modo, as tensões internas aumentam quando o concreto é submetido à deformação, particularmente na proximidade de obstáculos. A energia requerida para fazer o concreto fluir é consumida pelo aumento da

tensão interna, resultando no bloqueio das partículas de agregados, e a limitação do volume de agregados abaixo do nível normal torna-se efetivamente favorável à minimização desse tipo de bloqueio [36].

Segundo Mehta e Monteiro [12], a estabilidade do concreto depende da retenção da água (oposto à exsudação) e do agregado envolvido na massa do concreto fresco (oposto à segregação), o que é obtido pela presença de finos constituindo uma ligação do esqueleto granular. Atribui-se esse fato à finura das partículas que segmentam os canais de fluxo de água e aumentam o contato sólido-sólido, tornando a mistura mais coesa e adequada para concreto projetado e operações de bombeamento. Os componentes líquidos do concreto (água e SP) têm uma tendência de diminuir a viscosidade no estado fresco a diferentes magnitudes, havendo assim uma necessidade de se manter uma viscosidade adequada, mas garantindo alta fluidez e estabilidade do concreto. São dois os modos de aumentar a viscosidade do concreto: aumentar o conteúdo de materiais em pó ou utilizar aditivos químicos [1].

2.2.3 Métodos de Avaliação do Comportamento Reológico do CAA no Estado Fresco

A reologia é a ciência da fluidez e deformação do material quando submetidos a uma determinada tensão ou solicitação mecânica, e deve ser uma ferramenta apropriada para descrever trabalhabilidade e mobilidade de materiais à base de cimento, como pastas de cimento, argamassas e concretos. A teoria de reologia é utilizada para avaliar materiais à base de cimento no estado fresco. Em muitos casos, tem-se a dificuldade de aplicação de testes de reologia e as técnicas usadas são questionáveis [37]. Alguns tipos de fluidos exigem uma aplicação de uma tensão mínima de cisalhamento para que o seu escoamento se inicie. Quando submetidos a valores de tensão inferiores à tensão de cisalhamento mínima, tais fluidos se comportam como sólidos elásticos rígidos [38]. O comportamento reológico do CAA para fins tecnológicos pode ser determinado por meio da tensão de escoamento (τ_0) e da viscosidade plástica (μ). Em termos práticos, a tensão de escoamento traduz a força que necessita ser aplicada ao concreto para que ele entre em movimento, ou seja, passe a escoar. Por outro lado, a viscosidade plástica expressa a resistência do concreto para continuar escoando sob ação de determinada força ([9], [38]).

Para determinar os parâmetros tensão de escoamento e viscosidade plástica dos concretos, destaca-se o emprego de reômetros que possibilitam a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e da viscosidade plástica sob diferentes taxas de deformação. Diversas equações de estado reológicos já foram propostas com o objetivo de descrever o comportamento de fluidos. Os fluidos considerados mais simples são descritos pelo modelo de *Bingham*. No entanto, os concretos podem possuir um comportamento reológico mais complexo do que o modelo de *Bingham*. Em virtude disso, outras equações são propostas, destacando-se entre eles o modelo de *Herschel-Bulkley* ([36], [39], [40]).

Entretanto, o uso de reômetros ainda é limitado. Por um lado há uma escassez de equipamentos nos centros de pesquisas, e por outro não existe um aparelho padronizado. Apesar dessas dificuldades e limitações, o conhecimento da tensão de escoamento e da viscosidade plástica, ou mesmo de parâmetros a elas relacionáveis, é um avanço considerável para o entendimento do comportamento do concreto no estado fresco e deve ser obtido sempre que possível. De forma geral, o CAA tem menor tensão de escoamento e maior viscosidade plástica do que os concretos convencionais considerados de alta capacidade de escoamento. No entanto, ressalta-se que a exclusiva determinação dos parâmetros reológicos não é suficiente para expressar a adequação do CAA, já que não representam o comportamento do concreto quanto à capacidade de passar por restrições e de resistir à segregação. [9].

Não se dispondo de um reômetro, utilizam-se métodos mais simples. Os métodos mais utilizados para a avaliação do comportamento reológico no estado fresco do CAA diferem dos métodos utilizados para o concreto convencional. Os métodos de avaliação consistem em determinar as propriedades, como fluidez por seu peso próprio e capacidade de preencher espaços, entre outras. Em muitos casos, estes ensaios devem ser realizados em conjunto para que se tenha uma análise completa do comportamento do concreto, como a tensão de cisalhamento e a viscosidade plástica. Entretanto, a trabalhabilidade do CAA pode ser verificada por vários métodos, ainda não normalizados, mas largamente utilizados em laboratórios. Dentre os métodos de ensaio, os que mais se destacam são apresentados a seguir:

Espalhamento (*slump flow*): o cone de ABRANS é um equipamento utilizado para avaliar as propriedades do concreto no estado fresco, verificando sua capacidade de preenchimento ou deformabilidade sob ação de seu peso próprio. Hodgson apud [31] apresenta algumas informações complementares que podem ser obtidas, de forma a ampliar a avaliação do CAA.

- Análise da distribuição do agregado graúdo, verificando se há concentração de partículas no centro do espalhamento;
- Análise da segregação e exsudação, verificando a presença de uma fina camada de pasta ou água de exsudação ao redor da região de espalhamento;
- Análise da forma assumida pelo concreto durante o espalhamento, verificando se o diâmetro do concreto espalhado possui uma circunferência regular.

Anel japonês: este ensaio, também conhecido como J-ring, pode ser utilizado em conjunto com o espalhamento ou o Orimet, acrescentado a estes a avaliação da resistência ao bloqueio. O equipamento consiste de um anel transversal circular de 300 mm de diâmetro, com barras verticais espaçadas de acordo com o desempenho requerido para o concreto. Após o escoamento do concreto através do cone de ABRAMS ou do Orimet, avalia-se a diferença de altura entre a porção da mistura que permaneceu no interior do anel e a parcela que se espalhou para o exterior do anel passando pela obstrução. A faixa de resultados para avaliação do CAA no anel japonês requer que a diferença entre as alturas medidas dentro e fora do anel seja menor que 10 mm [1].

Orimet: este aparato consiste em um tubo com um formato cônico na parte inferior, e é empregado para se medir a facilidade de fluidez do concreto, estando também relacionado com a viscosidade. Uma vantagem deste ensaio é a facilidade de execução. O procedimento de ensaio consiste no preenchimento do tubo com o CAA, medindo-se o tempo gasto para o seu escoamento completo [1]. Uma vantagem deste ensaio no que se refere à reologia está no fluxo uniforme promovido por ele, ou seja, o concreto se movimenta da mesma maneira durante todo o ensaio [41]. Segundo a

EFNARC [1] o tempo que deve ser gasto para o escoamento completo do concreto no Orimet deve variar entre 0 e 5 segundos.

Funil “V”: o ensaio do funil “V” consiste no seu preenchimento com CAA, medindo-se o tempo gasto para o escoamento completo do concreto. O funil tem como objetivo avaliar a capacidade do concreto de passar por seções estreitas, sendo também indicada a viscosidade da mistura [35]. Segundo a EFNARC [1] o tempo gasto para o escoamento completo do concreto no funil deve estar no intervalo de 6 a 12 segundos.

Caixa “L”: neste ensaio, determina-se a capacidade de o CAA escoar e passar por restrições, simulando as armaduras, bem como a sua deformabilidade, resistência ao bloqueio e resistência à segregação ([9], [31]). O ensaio consiste em um equipamento em forma de “L” sendo preenchido com concreto na parte vertical, permitindo a passagem do material para a parte horizontal após passar por restrições verticais impostas. O resultado é obtido a partir da relação das medidas entre as alturas obtidas: H_1 na parte vertical do formato “L” e H_2 no final da parte horizontal. A relação H_2/H_1 , segundo a EFNARC [1], deve ser maior ou igual a 0,8 para que o concreto seja considerado auto-adensável.

Caixa “U”: o ensaio da caixa também possibilita a avaliação da habilidade de preenchimento do CAA, além de dar indicativos sobre a viscosidade. No entanto, se comparado com a caixa “L”, é menos sensível para avaliar a capacidade do concreto em resistir ao bloqueio ([31], [42]). O ensaio consiste em um equipamento com dois compartimentos com formato “U”, onde um dos compartimentos é preenchido com o concreto e isolado por uma comporta. A comporta é aberta e o concreto passa por obstáculos similares à armadura. O resultado é obtido medindo-se a altura atingida pela mistura no segundo compartimento. Segundo Nunes [10] a altura a ser atingida pelo material no segundo compartimento deve ser igual a 300 mm.

Tubo “U”: o tubo permite avaliar a capacidade de auto nivelamento e a capacidade de preenchimento do concreto, ocupando todos os espaços sem deixar vazios ou criar ninhos de agregados e fibras. Ensaio da resistência à segregação desenvolvido pela Universidad Politécnica de Catalunya utilizando o Tubo “U” consiste em lançar o concreto somente por um dos lados da boca do tubo até o máximo preenchimento conseguido na outra extremidade. Deixa-se o concreto em repouso entre

3 e 6 horas, abre-se o tubo e cortam-se amostras de 10 cm de espessura em seções distintas. Então, por lavagem das amostras de concreto em uma peneira de malha fina, o agregado graúdo é retido. Determina-se o volume de agregado graúdo para cada seção, sendo que a relação entre as seções deve ser igual ou maior do que 0,90 [43].

Existem vários padrões internacionais de uso dos equipamentos com diferentes tamanhos, forma e espaçamento entre barras. Porém as proporções de misturas, as propriedades de fluidez desejadas e o tamanho das partículas dos agregados são dependentes do espaçamento entre as barras. Desta maneira, a padronização destes equipamentos deve ser realizada ([42], [43]). Neste texto, as verificações realizadas nos equipamentos se referem aos padrões da EFNARC [1]. Em relação aos equipamentos utilizados nesta pesquisa, encontram-se maiores detalhes nos itens 3.4.1 e 3.5, que incluem procedimentos de ensaios, dimensões dos aparatos, e alguns valores admissíveis que constam na literatura para os ensaio do CAAF.

2.2.3.1 Resistência à Segregação

A segregação do concreto no estado fresco é caracterizada pela falta de homogeneidade na distribuição dos seus materiais constituintes. O concreto pode não exibir uma tendência para a segregação sob determinadas condições de movimento, mas segregar quando sujeito a outras condições, como por exemplo ao passar por seções com elevada densidade de armadura [10]. O CAAF não deve apresentar nenhum dos tipos de segregação seguintes, tanto em repouso como em movimento:

- exsudação;
- segregação da pasta, agregados e fibras;
- segregação do agregado graúdo e fibras originando o bloqueio;
- não-uniformidade da distribuição dos poros de ar.

Para evitar a exsudação (segregação entre sólidos e água) é essencial reduzir a quantidade de água livre na composição. Isto se consegue reduzindo-se o conteúdo em água e a razão água/finos. É possível, também, utilizar materiais finos com elevada superfície específica, aumentando assim a quantidade de água adsorvida à superfície das

partículas dos finos. Obviamente, a resistência à segregação entre a água e os sólidos pode ser melhorada pela introdução de um agente de viscosidade. Os outros tipos de segregação podem ser solucionados através de uma pasta capaz de transportar as partículas dos agregados e o ar, evitando um deslocamento diferenciado entre fases. Isto se consegue à custa de uma força de interação entre as fases elevadas, para a qual contribuem o atrito e a coesão [10].

Para a avaliação da segregação no estado fresco, determina-se basicamente o teor de agregado graúdo pela lavagem e peneiramento de porções de concreto, coletadas após o repouso do material por um determinado período de tempo. Não há nenhum método de ensaio consolidado, uma vez que várias são as propostas para a forma de coleta, para o volume e altura das peças de onde se faz a coleta e para o tempo em repouso do concreto, fatores estes que afetam os resultados da determinação. Como é necessário manter o concreto em repouso por vários minutos antes da coleta da amostra (sugere-se que as determinações devam ser feitas após 15 ou 120 minutos de repouso), e o procedimento de determinação do teor de agregado também requer vários minutos, a taxa de segregação não é um parâmetro usado para controle de recepção do concreto, mas sim para a dosagem feita em laboratório [9]. Neste trabalho propõe-se a avaliação da resistência à segregação do concreto por medidas dos índices físicos obtidos de amostras retiradas do tubo “U” em diferentes posições, conforme apresentado no item 3.5.1.5.

2.3 Concreto Auto-Adensável Fibroso

O CAAF oferece vários benefícios econômicos e técnicos. A utilização de fibras de aço como reforço no concreto proporciona o controle de micro e macro-fissuração, aumentando a resistência à compressão, fadiga, impacto e abrasão, além de incremento na tenacidade. Estas melhorias dependem do tipo de fibra, comprimento, diâmetro, forma, fração volumétrica e arranjo espacial. Porém, a trabalhabilidade é uma propriedade afetada pelo uso de fibra, sendo a redução da trabalhabilidade diretamente proporcional à fração volumétrica de fibras utilizada [44]. Um dos fatores mais importantes para a produção de CAAF é a dificuldade de adensamento dos concretos [45]. A trabalhabilidade do concreto auto-adensável fibroso é determinada pela

dosagem de superplastificante e pela relação água/materiais em pó. O concreto auto-adensável reforçado com fibras é também sensível ao tipo e volume de fibras, e às propriedades dos agregados, entre outros. O CAAF deve possuir características de grande importância como alta trabalhabilidade, alta resistência à compressão, flexão, tração e durabilidade [46].

O concreto auto-adensável fibroso adquire propriedades de resistência favoráveis, possibilitando assim diminuir a quantidade de armadura convencional de uma estrutura, apresenta facilidade de lançamento e boas propriedades reológicas. Essas propriedades de resistência e reologia que a adição de fibras confere ao concreto auto-adensável podem ser extremamente benéficas para a construção civil .

Grünewald e Walraven [47] verificaram a influência de fibras em matrizes auto-adensáveis com diferentes relações de agregado miúdo/agregado graúdo. Quatro tipos de fibras de aço foram utilizados com diferentes comprimentos e relação de aspecto: 30 mm e 45, 40 mm e 65, 30 mm e 80 e 60 mm e 80, respectivamente. Os volumes de fibras de aço variaram entre 40 e 160 kg/m³ e todas as fibras possuíam ganchos em suas extremidades. Baseados nos experimentos, notaram que as fibras afetam as características do CAA no estado fresco, e a intensidade da influência depende da composição da mistura. A trabalhabilidade foi mantida até um conteúdo máximo de 140 kg/m³ de fibras para a menor relação de aspecto. Ao aumentar-se a relação de aspecto das fibras, o volume máximo de fibras foi reduzido para 60 kg/m³.

Várias misturas de CAAF foram produzidas por Nehdi e Ladanchuk [2] a partir de uma única mistura de CAA de referência, com o propósito de avaliar a fluidez e as propriedades mecânicas dos CAAF. Foram utilizadas fibras com diferentes geometrias (ondulada e com pontas achatadas) e comprimentos de 30 a 50 mm. Primeiramente foram produzidas misturas com cada tipo de fibra separadamente e em seguida produzidas misturas otimizadas (hibridização) com até quatro tipos diferentes de fibras na mesma mistura, totalizando um volume variando entre 0,5 a 1,0 %. Na avaliação da trabalhabilidade do concreto pelo espalhamento do cone de ABRANS, foi observado que a adição de fibras de aço diminuiu a trabalhabilidade e a fluidez da mistura, mas os valores de espalhamento ficaram dentro da faixa especificada para o CAA com frações volumétricas de fibras de até 1,0 %. Porém, para a combinação de macro fibras de aço (30 e 50 mm), essa redução da trabalhabilidade foi minimizada. Nos ensaios com a

caixa “L”, somente três misturas com 0,5% de fibras de aço hibridizadas apresentaram bons resultados de fluidez, estando na faixa de valores aceitáveis para um CAA.

Sahmaran et al. [45] estudaram a influência das fibras nas propriedades reológicas dos concreto e obtiveram dados satisfatórios de auto-compactação do concreto com a inclusão de 60 kg/m³ de fibras. As matrizes estudadas por eles continham dois tipos de fibras, com 30 e 6 mm de comprimento, e relação de aspecto 55 e 37,5, respectivamente, sendo que a primeira possuía geometria com ganchos em suas extremidades e a segunda era lisa e reta. Todas as misturas tinham a mesma quantidade de fibras, variando somente a proporção entre os dois tipos de fibras. Todas as misturas obtiveram boa fluidez. No ensaio “*slump flow*”, as misturas apresentaram uma variação do espalhamento entre 615 e 745 mm, sendo a última medida a da matriz de referência. Os tempos de escoamento do funil “V” encontrados para as misturas variaram entre 9,2 e 17,6 segundos, sendo que, de acordo com a EFNARC [1], para CAA o tempo de fluidez da mistura deve estar entre 6 e 12 segundos. Para manter o alto nível de trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras, é necessário aumentar a quantidade de pasta da mistura, proporcionando melhor dispersão de fibras. Aumentar o conteúdo de cimento e aumentar o conteúdo de agregado miúdo e/ou adições minerais são alternativas para a solução deste problema. O grau de decréscimo da trabalhabilidade da mistura depende do tipo e volume de fibras usadas na matriz e das propriedades constituintes da matriz [45].

O volume de agregado graúdo empregado na mistura influencia na trabalhabilidade do concreto. Um volume maior de fibras pode ser adicionado na mistura, tanto quanto maior for o volume de agregados finos. Baron apud Grunewald [48] presumiam que a maioria dos concretos trabalháveis eram obtidos com a otimização do esqueleto granular. A otimização da proporção de agregado graúdo independe do volume e das propriedades da pasta no CAAF. Substitui-se agregado graúdo por agregado miúdo por tentativa e erro, obtendo-se o volume final de agregado graúdo na mistura que apresente a maior trabalhabilidade. Esta relação depende do tipo e do volume de fibras. Por fim ajustam-se a água, o cimento e o superplastificante para atingir o desempenho e a trabalhabilidade desejados.

Grunnewald e Walravem [48] estudaram a influência da adição de fibras no estado fresco do concreto de duas matrizes de CAA, sendo que uma possuía um teor de materiais em pó 6 % superior ao da outra. Nas duas matrizes adicionaram-se fibras de aço com diferentes relações de aspecto e comprimentos (45/30, 50/50, 65/40 e 80/60 respectivamente), com frações de fibras variando entre 40 a 120 kg/m³. Uma técnica utilizada para tentar manter a trabalhabilidade da mistura de CAAF foi substituir o volume adicionado de fibras pelo volume de agregado graúdo. Os resultados encontrados mostram que o CAAF tem fluidez diferente do CAA. O volume máximo de fibras adicionado na mistura que apresentou auto-compactação foi de 100 kg/m³ de fibras de menor comprimento (45/30). Para todas as outras misturas com fibras de comprimentos superiores, o volume de fibras adicionadas para obter os parâmetros de CAA foi menor que 80 kg/m³. Porém, mesmo obtendo parâmetros condizentes com as de um CAA, observaram qualitativamente que as misturas apresentaram uma distribuição não homogênea dos ingredientes em toda a massa de concreto quando submetidas ao ensaio do *slump flow*. Essa observação foi verificada devido à formação de uma estrutura de fibras e agregados graúdos, impedindo o espalhamento e fluidez da mistura sob seu peso próprio. No ensaio do *slump flow* foi detectado o agrupamento de agregado graúdo, sendo que quanto mais fibras eram adicionadas menor era a fluidez da mistura. No ensaio para determinar o risco de bloqueamento, houve a necessidade de aumentar o espaço livre entre barras de acordo com o aumento da quantidade de fibras adicionada à mistura.

Alcantara et al.[18] observaram que, conservando-se a mesma composição da mistura e aumentando-se o teor de fibras, houve uma diminuição nos diâmetros máximos do ensaio de espalhamento. Quanto mais fibras eram adicionadas, maiores diferenças eram verificadas na formação do círculo de espalhamento, passando a superfície, que antes era circular, a apresentar uma forma elíptica. Quando aumentado o teor de fibras, notou-se a tendência de formação de grandes concentrações de fibras no interior da superfície de espalhamento do concreto. Outro fator estudado foi a relação fíler/cimento, variando-a em torno de 0,63. A diminuição da relação fíler/cimento pode implicar em reduções nas condições de escoamento do concreto quando aumentado o teor de fibras da mistura. Conforme se aumentava o teor de fibras, era necessário aumentar a massa do superplastificante com relação à massa de cimento, de forma a se obterem misturas com relativa fluidez. As fibras utilizadas na análise possuíam seção

retangular de 1,6 x 0,03 mm e comprimento de 30 mm, sendo que os teores variaram entre 2 e 20 kg de fibras para cada metro cúbico de concreto e todas as misturas estudadas apresentaram comportamento relógico de concretos auto-adensáveis [18].

Oliveira et al. [36] adicionaram fibras de dois comprimentos, 30 e 60 mm, e relação de aspecto 0,5 e 0,8, respectivamente, com teores em volume de 0,5, 1,0, 1,5 %, e avaliaram as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Durante a adequação da mistura com fibras de aço foi constatado que as fibras modificam substancialmente a fluidez. Não obstante, a produção do CAAF torna-se simples e possível pela otimização do teor de argamassa, que aumenta à medida que mais fibras são adicionadas à mistura. Na análise, verificou-se pela linha de tendência que a relação de aspecto da fibra, para um mesmo volume, não requereu um acréscimo significativo de argamassa. Porém constatou-se que o aumento do volume de fibras requer um acréscimo considerável no teor de argamassa. Assim, a procura do teor ótimo de argamassa no CAAF é uma etapa importante a ser considerada no estudo de dosagem. No estudo foi possível obter concretos auto-adensáveis com volume de fibras de 1,5 %.

Quando aumenta-se o volume de fibras do CAAF, e havendo um teor de argamassa adequado para evitar segregação, há um acréscimo do peso próprio da mistura, o que contribui para o aumento do diâmetro de espalhamento do concreto medido pelo *slump flow*. O tempo de fluidez medido no funil “V” tende a aumentar quando o volume de fibras é aumentado, embora seja possível especular que, pelo efeito da gravidade, o tempo de fluidez diminui. A verificação da tendência de bloqueio pela caixa “L” foi realizada somente com uma barra e nenhuma das misturas estudadas apresentou bloqueio, sendo o valor da relação H_2/H_1 superior a 0,80. Um teor ótimo de fibras e agregados deve ser obtido experimentalmente, sendo que esses materiais necessitam de um teor de argamassa mínimo para assegurar o envolvimento das partículas e fornecer capacidade de enchimento ao concreto. Observações qualitativas indicaram que quando se emprega um teor adequado de argamassa no concreto, mesmo para volumes de 1,5 % de fibras, obtém-se auto-compactação e estas se distribuem homogeneamente, sem sofrer segregação [36].

Sahmaran e Yaman [49] avaliaram o efeito da adição de 60 kg/m³ de fibras no concreto analisando as propriedades do estado fresco e endurecido com substituição de

cimento por 50 % em volume de cinza volante. A trabalhabilidade foi estudada através de duas matrizes de referência sem fibras, uma produzida somente com cimento e a outra substituindo-se 50 % do cimento por cinza volante. A mistura com substituição melhorou significativamente a trabalhabilidade do concreto conforme apresentado no ensaio de *slump flow*. Foi observado um espalhamento de 690 mm para a mistura com substituição, o que representa um aumento de 23 % em relação à mistura de cimento. Quando adicionados altos volumes de cinza volante, notou-se uma diminuição da demanda de água. Dois tipos de fibras foram usados, denominados SF1 e SF2, com comprimento e relação de aspectos de 30 mm e 50 e de 6 mm e 37,5, respectivamente. A adição de fibras afetou as propriedades do concreto no estado fresco. A adição de fibras SF1 não afetou a proporção de água para a mesma trabalhabilidade da mistura. Porém a adição de fibras SF2 tornou necessária a redução da quantidade de água da mistura para que não houvesse segregação. Essa observação pode ser explicada pelo fato de as fibras SF2 apresentarem superfícies totalmente lisas, e pelo seu comprimento ser pequeno quando comparado com o das fibras SF1. As fibras SF2 possuem um menor potencial em reduzir o movimento dos ingredientes do concreto, em especial os agregados. Sahmaran e Yaman [49] concluíram que a geometria das fibras afeta as propriedades das misturas de CAA não somente no estado endurecido, mas também no estado fresco. Entretanto, obtiveram, nos ensaios experimentais com a adição de 60 kg/m³ de fibras, resultados dentro do especificado para um CAA.

Corinaldesi e Moriconi [50] produziram um concreto com 0,6 % de fibras de aço de comprimento e diâmetro de 11 e 0,4 mm, respectivamente. A mistura demonstrou ser auto-adensável com uma boa distribuição dos ingredientes em todo o diâmetro do espalhamento. O concreto deformou-se sob seu peso próprio alcançando valores condizentes com os de um CAA com alta viscosidade. Quando realizados ensaios na caixa “L”, o desempenho do concreto foi satisfatório, porém não apresentou um excelente resultado em termos de mobilidade em seções estreitas.

Ambroise et al. [51] estudaram o comportamento de CAAF com a adição de três diferentes comprimentos de fibras (35, 40 e 50 mm) em três diferentes frações volumétricas (60, 80, 100 kg/m³). Os resultados obtidos para as misturas produzidas mostram que o concreto mostrou-se satisfatório, apresentando-se auto-adensável para todos os comprimentos e para o volume de 100 kg/m³ de fibras. Para o volume de fibras

de 100 kg/m^3 , a principal dificuldade encontrada foi em evitar a separação entre a argamassa, os agregados graúdos e as fibras. A solução encontrada foi aumentar o conteúdo de materiais finos à medida que o volume de fibras era aumentado.

Barragán et al. [52] adicionaram fibras de comprimento 30 mm, e relação de aspecto 50, com três teores (20, 40 e 60 kg/m^3), e avaliaram as propriedades do CAAF no estado fresco. Os resultados obtidos mostram que o CAAF apresentou parâmetros adequados até a dosagem de 40 kg/m^3 de fibras. As medidas de fluidez foram adequadas para os ensaios de *slump flow* e funil “V”.

Velasco et al. [53] estudaram duas matrizes auto-adensáveis com diferentes proporções de adições minerais de cinza volante e sílica ativa. Nessas matrizes foram adicionadas fibras de aço com relação de aspecto igual a 65 e comprimentos de 35 e 13 mm, de forma geométrica com ganchos em suas extremidades e lisas. Os volumes de fibras adicionados nas matrizes foram de 1,5 e 2,0 %, sendo que uma das misturas foi hibridizada com o conteúdo de 1,5 % de fibras de comprimento 35 mm e 0,5 % de fibras com 13 mm. Foi observado que a adição de fibras afetou a trabalhabilidade do concreto entre 78 a 94 % quando medido o abatimento. Isso indica que as matrizes auto-adensáveis, ao sofrerem adição de fibras, não apresentaram características de um CAAF. A mistura que menos sofreu redução da trabalhabilidade foi o compósito com a hibridização das fibras, com uma diminuição de 62 % do abatimento. Quando comparadas as misturas com fibras de 35 mm e a mistura com hibridização, esta última teve a trabalhabilidade menos alterada, o que pode ser explicado por uma restrição maior no fluxo do material provocado pela ancoragem das fibras de 35 mm. A mistura que apresentou melhor comportamento reológico foi a que continha cinza volante. Isto deve-se ao formato esférico e à textura vítrea das partículas de cinza volante, que favorece o melhor escoamento entre grãos e, conseqüentemente, de toda a mistura.

Entre os estudos citados acima, outros autores também constataram que as fibras provocam a diminuição da trabalhabilidade do CAA, e que esse efeito é uma função da quantidade de argamassa ou materiais finos constituintes da mistura, responsável pelo envolvimento e lubrificação das fibras. Os estudos foram realizados com um volume máximo de fibras de 60 kg/m^3 e verificou-se que o desempenho do concreto foi

satisfatório, não apresentando segregação e com valores condizentes de um CAA ([54], [55]).

2.3.1 Resistência à Compressão e à Tração CAAF

O comportamento do CAAF no estado endurecido quando submetido a esforços de compressão e tração é similar aos dos concretos convencionais fibrosos. Por ter menor teor de agregado graúdo, o módulo de elasticidade tenderia a ser menor que o do concreto convencional fibroso de mesma resistência à compressão, mas essa diferença depende do nível de resistência do concreto e da sua composição, de forma que não é possível fazer uma conclusão generalizada a respeito dessa propriedade. Quando comparadas as resistências à compressão do CAAF e do concreto normal, com similar relação água/cimento ou água/materiais em pó, e dependendo do tipo de fíler utilizado, o CAAF terá uma resistência à compressão ligeiramente superior, devido à melhora na interface entre os agregados, matriz e fibras ([56], [57], [58]).

O CAAF melhora as propriedades e características mecânicas no estado endurecido. O concreto é um material frágil quando submetido à tração, sendo que esse comportamento pode ser melhorado pela adição de fibras descontínuas orientadas randomicamente, prevenindo ou inibindo a propagação de fissuras. As características e o desempenho do concreto auto-adensável com fibras variam, dependendo das propriedades do concreto e das características das fibras. A eficiência do reforço está relacionada com a otimização da fração volumétrica, geometria, orientação e a distribuição das fibras [45]. Tanto a ductilidade, resistência à flexão, compressão e tração apresentam benefícios em um CAAF com proporções otimizadas. [18]. Oliveira et al. [36] constataram que a contribuição de 0,5 % de fibras de aço adicionado ao CAAF poder ser considerada como uma contribuição equivalente de uma determinada área de armadura passiva.

Segundo Grünewald [54] o efeito no processo de lançamento pode interferir na orientação e distribuição das fibras. As fibras tendem a ficar orientadas na direção perpendicular à direção do fluxo de lançamento do concreto. Para o mesmo volume de fibras, fibras alinhadas no plano considerado são mais efetivas no desempenho mecânico que fibras distribuídas randomicamente. Entretanto, o CAAF com fibras

distribuídas randomicamente é mais efetivo no que tange à obtenção de elementos estruturais submetidos a diferentes esforços.

2.3.2 Resistência ao Cisalhamento

O concreto é conhecido como um material frágil e com ruptura súbita. Usualmente, na produção das estruturas de concreto, barras de aço dispostas transversalmente (estribos) são utilizadas como reforço ao cisalhamento. Basicamente, a resistência às tensões cisalhantes é realizada de dois modos: uma, referente ao concreto e à armadura longitudinal e a outra, referente à armadura transversal. Até o presente momento não há informações sobre o comportamento de CAAF submetidos a cargas de cisalhamento. A seguir são apresentados estudos realizados para um melhor entendimento do comportamento ao cisalhamento de concretos reforçados com fibras.

Existem evidências consideráveis de que as fibras de aço são particularmente eficazes em proporcionar reforço contra as tensões cisalhantes em concreto armado convencional. São várias as razões para isto: a distribuição randômica das fibras proporciona espaçamentos muito mais próximos que as barras e estribos convencionais; a primeira fissura e as resistências à tração e flexão últimas são aumentadas pela adição de fibras e conseqüentemente a resistência friccional-cortante também é aumentada ([44], [59]). Segundo Balaguru e Shah [60], as fibras interceptam e costuram as fissuras em todas as direções, e este processo não somente aumenta a capacidade de resistência ao cisalhamento como também melhora substancialmente a resistência pós-pico e a ductilidade.

A adição de fibras auxilia na conversão de características frágeis em características dúcteis. O principal papel das fibras é resistir à formação e desenvolvimento das fissuras, por providenciar uma força de ligação entre estas [61]. O desenvolvimento da fissuração em materiais cimentícios é de extrema importância do ponto de vista da durabilidade e das condições de serviço de uma estrutura. Uma importante investigação em termos do número e tamanho das fissuras de materiais cimentícios e convencionais pode ser fundamental para sua utilização [62].

Geralmente os esforços cisalhantes desenvolvidos em estruturas convencionais apresentam valores entre 2 e 5 MPa. Tem sido sugerido por certos autores que as fibras

podem substituir a armadura transversal na sua totalidade, ou em parte, desde que se mantenha a mesma eficiência do compósito em resistir aos esforços de cisalhamento que as armaduras dispostas transversalmente [44].

Segundo Bentur e Mindess [44], com a adição do volume de fibra entre 0,50 % e 1,00 % em misturas de concreto, o ganho de resistência ao cisalhamento em relação ao concreto convencional pode chegar a 30 % no pós-pico. Estudos desenvolvidos por Naaman [61] indicam que as resistências ao cisalhamento dos concretos, utilizando frações volumétricas de fibras maiores que 2 %, podem atingir 38 MPa. Segundo Mirsayah e Banthia [59] as fibras são muito efetivas no reforço ao cisalhamento de concretos, aumentando sua resistência em aproximadamente 80 %. Segundo Khaloo e Kim [63], o ganho de resistência ao cisalhamento aumenta de acordo com o aumento da resistência da matriz. Esses níveis de aumento de resistências são atribuídos à melhora da aderência entre a fibra e a matriz.

Mirsayah e Banthia [59] descrevem ensaios de resistência ao cisalhamento baseados na norma japonesa JSCE-SF6 (*Method of test for shear strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC)*). O procedimento de ensaio é apresentado no item 3.6.1. Dois tipos de fibras de aço, uma com geometria ondulada e outra com suas pontas achatadas em quantidades variando entre 20 a 160 kg/m³, foram adicionados à mistura. Ambas as fibras proporcionaram aumento na resistência ao cisalhamento, e este aumento foi crescente de acordo com o aumento da quantidade de fibras. As fibras com pontas achatadas foram as que mais proporcionaram o aumento na resistência ao cisalhamento. O aumento da resistência ao cisalhamento foi de 88 % em relação à mistura de referência. O concreto reforçado com fibras de geometria corrugada apresentou um aumento de 52 % na resistência ao cisalhamento em relação à mistura de referência.

Deve ser enfatizado que os resultados obtidos em concretos fibrosos devem ser tratados com cuidado, uma vez que o aumento na resistência ao cisalhamento ainda não está suficientemente bem quantificado para as aplicações práticas de projeto. Fibras jamais deverão substituir completamente a armadura transversal, mas elas podem muito bem ser usadas mais efetivamente em combinação com a armadura transversal. Segundo Buitelar [64], a aplicação de concretos fibrosos em conjunto com reforços contínuos

pode proporcionar excelentes resultados. A aderência das armaduras contínuas aumenta com a presença do reforço fibroso, viabilizando a elevação das tensões de projeto dessas armaduras.

As resistências à compressão, à tração e ao cisalhamento dos materiais cimentícios reforçados com fibras são de grande interesse para aplicações em novas construções. Em combinação com o reforço principal, podem-se procurar novas formas estruturais, e talvez aumentar vãos, ou outras possibilidades. Portanto, há uma necessidade de desenvolvimento de ensaios padrões capazes de racionalizar as medidas das propriedades dos concretos reforçados com fibras, gerando uma base de dados de resistência ao cisalhamento compreensível e, finalmente, o desenvolvimento apropriado e relevante de uma norma com previsões que exemplifiquem as propriedades dos concretos fibrosos no que se refere à resistência ao cisalhamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta a caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos, a dosagem desses concretos, e os métodos experimentais utilizados no estudo.

3.1 Caracterização dos Materiais

3.1.1 Agregados e Fíler

A Figura 3.1 mostra as curvas de distribuição granulométrica do agregado graúdo, agregado miúdo e do fíler denominado sílica 325 utilizados na preparação dos concretos. A distribuição granulométrica dos agregados foi determinada por peneiramento de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 7217 [65]. A distribuição granulométrica da sílica 325 foi determinada por granulometria a laser, utilizando-se o equipamento Malvern disponível no laboratório de cimentação do CENPES/Petrobrás. Em geral se utiliza como parâmetro característico o tamanho de partículas abaixo do qual se situam 80 % da massa do material (D80). Além do D80, foi utilizado, ainda, o valor D50 que se refere aos tamanhos de partículas abaixo dos quais se encontram 50 % da massa do material para o agregado miúdo.

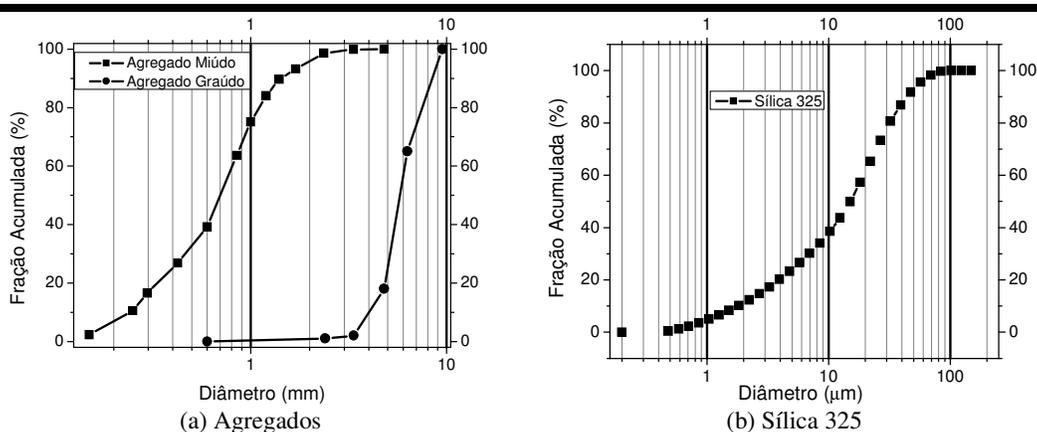


Figura 3.1 – Curva granulométrica dos agregados e fíler.

De acordo com a Figura 3.1, os diâmetros máximos dos agregados graúdo e miúdo são 9,5 mm e 2,4 mm respectivamente. O módulo de finura do agregado miúdo é de 2,59 mm e a absorção de água de 0,96 %. A absorção de água do agregado graúdo é de 0,94 %.

Os valores dos parâmetros D80 e D50 dos agregados e fíler utilizados no estudo são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1– Diâmetro dos agregados (D80 e D50).

Diâmetro	Agregado Miúdo (mm)	Agregado Graúdo (mm)	Sílica 325 (µm)
D80	1,10	4,80	30,83
D50	0,70	5,77	15,26

3.1.1.1 Massa Específica dos Agregados e Fíler

A massa específica dos agregados miúdo e graúdo utilizados foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos pelas normas NM 52 [66] e NM 53 [67], respectivamente. A massa específica da sílica 325 foi determinada por meio do frasco de *Le Chatelier* de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NM 23 [68]. A Tabela 3.2 apresenta os valores das massas específicas dos agregados e da sílica 325.

Tabela 3.2 – Massa específica dos agregados e filler.

Material	Massa Específica (g/cm ³)
Agregado Miúdo	2,61
Agregado Graúdo	2,64
Sílica 325	2,68

3.1.1.2 Compacidade dos Materiais com Dimensões Superiores a 100 μm

A compacidade experimental das partículas maiores que 100 μm foi determinada usando-se o protocolo de empacotamento proposto por De Larrard [25], que utiliza energia de prensagem e vibração (índice $K=9$). A Figura 3.2 ilustra os procedimentos do ensaio para a obtenção da compacidade experimental do material e mais detalhes podem ser obtidos no trabalho de Silva [69].

Segundo a preposição de De Larrard [25] o ensaio é realizado em diversos mono-tamanhos que são obtidos utilizando os grãos compreendidos entre as peneiras da série normal. Resultados obtidos por Silva [69] indicam, no contexto, que a compacidade de cada classe mono-tamanho da areia apresenta variação máxima de 5 % no seu valor. Assim, foi estabelecido no presente estudo o seguinte procedimento para a determinação da compacidade do agregado miúdo: (i) A1 - com diâmetro superior a 0,850 mm; (ii) A2 - com diâmetro inferior a 0,850 mm; (iii) A3 - a classe da areia como um todo. Os valores experimentais da compacidade são apresentados na Tabela 3.3. Também é apresentada a altura final de cada camada compactada (h).



(a) Introdução do material no cilindro.



(b) Posição do pistão que exerce a compressão.



(c) Leitura da altura da amostra após a vibração.



(d) Aspecto da amostra após o ensaio

Figura 3.2 – Procedimento do ensaio de vibração e compressão.

Tabela 3.3 – Compacidade do agregado miúdo (Areia).

Parâmetros	A1	A2	A3
Camada Compactada – h (mm)	93,95	89,10	85,10
Compacidade Real – C (K = 9)	0,595	0,627	0,657

Como pode ser observado na Tabela 3.3, a diferença entre os valores de compacidade experimental de A1 e A2 é cerca de 5 %. Valores típicos encontrados de mono-tamanhos para a compacidade do agregado miúdo por Silva [69] acima da peneira 0,850 mm variaram de 0,572 a 0,604. Nota-se então que o valor encontrado no presente estudo, 0,595, está compreendido no intervalo apresentado. Os valores típicos de mono-

tamanhos, da compactidade experimental encontrados por Silva [69], que compreendem grãos de diâmetros inferiores à peneira de 0,850 mm variaram entre 0,584 a 0,626. Para o presente estudo, o valor obtido para os grãos de tamanho inferior a 0,850 mm no ensaio experimental está no intervalo apresentado. A compactidade da areia como um todo apresentou um resultado de 5 % maior que as classe individuais. Isso prova que quanto mais uniforme a distribuição da curva granulométrica do material, melhor é o preenchimento dos vazios deixados pelos grãos de diâmetros superiores.

Os resultados apresentados na Tabela 3.4 foram obtidos a partir da curva granulométrica apresentada na Figura 3.1. Com a finalidade de permitir uma caracterização, segundo o quadro do método de empacotamento compressível (MEC), das diversas classes granulares dos agregados graúdos, estes foram divididos em classes consideradas como mono-tamanhos. A classe B1 representa partículas de diâmetro superior a 4,8 mm, a classe B2 representa as partículas de diâmetro inferior a 4,8 mm, e a classe B3 representa a classe de agregados como um todo.

Tabela 3.4 – Compactidade do agregado graúdo (Brita)

Parâmetros	B1	B2	B3
Camada Compactada – h (mm)	257,85	249,45	253,60
Compactidade Real – C (K = 9)	0,542	0,560	0,551

De acordo com a Tabela 3.4 nota-se uma pequena variação da compactidade das classes divididas (B1 e B2) sendo a diferença entre elas de cerca de 3 %. A variação da classe total da brita foi inferior a 2 % em relação às classes B1 e B2. Essa variação pode ser esperada quando o material apresentar uma curva granulométrica íngreme, com pouca variação dos diâmetros das partículas, sendo praticamente um material mono-tamanho.

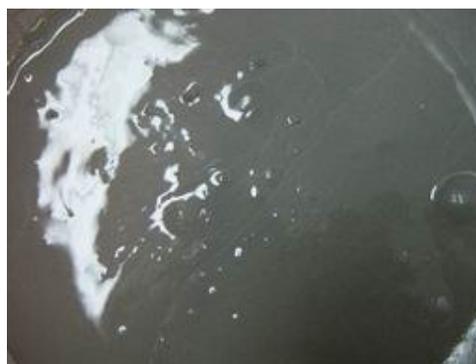
3.1.1.3 Compactidade dos Materiais com Dimensões Inferiores a 100 μm

A compactidade real (C) dos materiais com dimensões inferiores a 100 μm está apresentada na Tabela 3.9. A compactidade, com e sem dispersante, desses materiais foi determinada pelo método de demanda d'água proposto por De Larrard [25]. O ensaio tem por objetivo obter uma pasta com o máximo empacotamento das partículas, proporcionado pela adição progressiva de água na mistura até atingir a condição de

pasta saturada. O ensaio de demanda d'água é realizado em um misturador de 2 litros de capacidade. A Figura 3.3 mostra o misturador utilizado no ensaio e a configuração final da amostra saturada, e o estado de demanda d'água. Mais detalhes podem ser obtidos em Formagini [30].



(a) Misturador.



(b) Estado de demanda d'água.

Figura 3.3 – Ensaio de demanda d'água.

A Tabela 3.5 apresenta a compacidade experimental da sílica 325. Os valores encontrados indicam que o uso de dispersante aumenta em cerca de 5,5 % a compacidade do material. O teor de superplastificante utilizado é referente ao ponto de saturação.

Tabela 3.5 - Compacidade da sílica 325 (K = 6,7).

Material	Sem Superplastificante		Com Superplastificante	
	Compacidade (C)		Teor de SP %	Compacidade (C)
Sílica 325	0,55		0,8	0,58

3.1.2 Aglomerantes

As distribuições granulométricas do cimento CP III 40 e da cinza volante foram determinadas por granulometria a laser, utilizando-se o equipamento Malvern do laboratório de cimentação do CENPES/Petrobrás. A distribuição granulométrica da sílica ativa foi determinada no laboratório do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral - UFRJ), utilizando-se sedigrafia, uma técnica que se baseia na velocidade de sedimentação de partículas. As curvas granulométricas da sílica ativa, cinza volante e cimento CP III 40 são mostradas na Figura 3.4.

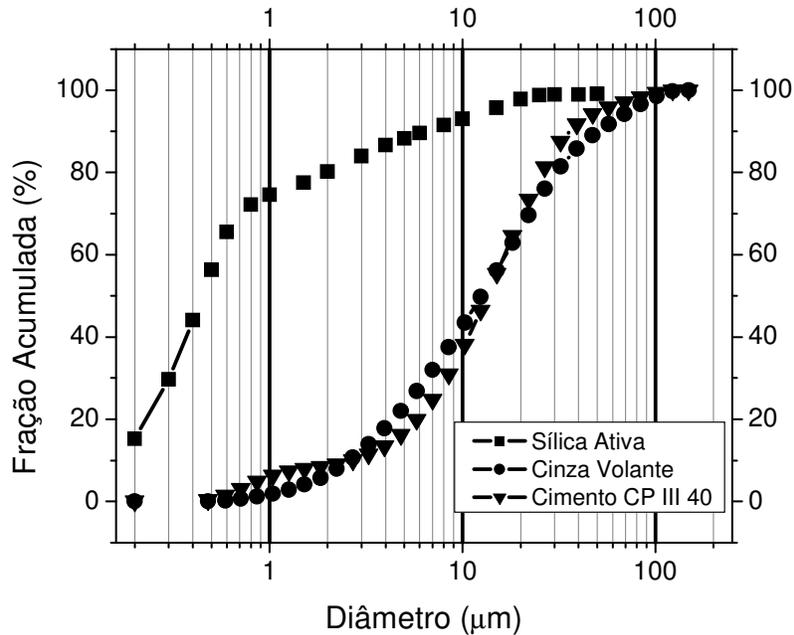


Figura 3.4 – Curvas granulométricas da sílica ativa; cinza volante; cimento CP III 40.

Como pode ser visto na Figura 3.4, a cinza volante e o cimento CP III 40 possuem praticamente a mesma distribuição granulométrica. A sílica ativa possui diâmetros menores que os dos materiais citados, preenchendo os espaços vazios deixados entre eles.

Os valores dos diâmetros referentes aos aglomerantes D80 e D50 utilizados no estudo são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Diâmetro dos aglomerantes (D80 e D50).

Diâmetro	Cimento (μm)	Cinza Volante (μm)	Sílica Ativa (μm)
D80	26,71	29,87	1,96
D50	13,54	12,17	0,42

Do ponto de vista da composição o cimento CP III 40 é composto por 39% de clínquer, 52% de escória, 5% de calcita e 4% de gesso, que é composto por gipsita e bassanita, na proporção de aproximadamente 1:1. A composição química do cimento foi fornecida pelo fabricante e a composição química da sílica ativa foi determinada no CENPES/Petrobrás, por meio de análises semi-quantitativas utilizando a técnica de espectrometria de fluorescência de raios X, em um equipamento Philips, modelo PW

2400, com tubo de 3 kW e alvo de ródio (Rh). As composições químicas dos materiais cimentícios são apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Análise química dos materiais cimentícios em estudo.

Constituintes	CP III 40 (%)	Sílica Ativa (%)
Óxido de ferro III (Fe ₂ O ₃)	2,62	0,70
Óxido de Cálcio (CaO)	52,14	1,10
Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,51	0,44
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	7,50	0,10
Óxido de Silício (SiO ₂)	24,94	91,00
Óxido de Fósforo V (P ₂ O ₅)	0,00	0,10
Óxido de Magnésio (MgO)	5,34	1,50
Óxido de Sódio (NaO ₂)	0,09	0,39
Óxido de Titânio II (TiO ₂)	---	0,00
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	2,57	---
Anidrido Carbônico (CO ₂)	1,51	---
Cal Livre	0,91	---
Enxofre (S)	0,34	---
Teor de Perda ao Fogo	2,63	---

Fonte: Cimento CPIII 40 – Cimento Votoram S.A.

3.1.2.1 Massa Específica dos Aglomerantes

Os valores de massa específica dos aglomerantes utilizados foram determinados por meio do frasco de *Le Chatelier* de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NM 23 [68]. Esses valores são apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Valores de massa específica dos aglomerantes.

Material	Massa Específica (g/cm ³)
Cimento CP III 40	3,14
Cinza Volante	2,35
Sílica Ativa	2,28

A superfície específica da sílica ativa foi obtida através de ensaios pelo método de BET realizados no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da USP. Nesses ensaios, foi utilizado um equipamento Gemini 2375 V.5,0 e o gás nitrogênio a uma temperatura de 77°K. A área específica medida da sílica foi de 10×10^3 m²/kg.

3.1.2.2 Compacidade dos Aglomerantes

Os resultados apresentados na Tabela 3.9 mostram a compacidade real (C) dos aglomerantes com e sem superplastificante. Observa-se que a compacidade aumenta quando se utiliza superplastificante no ensaio. Para o cimento CP III 40, a adição de 0,3 % de superplastificante aumenta a compacidade do cimento em cerca de 15 %. A cinza volante com dispersante apresentou uma compacidade 9 % superior à da cinza volante sem dispersante. Deve-se notar que com adição de superplastificante, as compacidades do cimento e da cinza volante, que eram diferentes (0,56 e 0,53, respectivamente) tornam-se iguais. Para a sílica ativa, mesmo com um alto teor de dispersante, 4 %, a compacidade aumentou apenas de 0,40 para 0,42, ou seja, um acréscimo de 5 %.

Tabela 3.9 – Compacidade dos materiais com dimensões inferiores a 100 μm (K = 6,7).

Material	Sem Superplastificante	Com Superplastificante	
	Compacidade (C)	Teor de SP %	Compacidade (C)
Cimento CP III 40	0,53	0,3	0,61
Cinza Volante	0,56	0,3	0,61
Sílica Ativa	0,40	4,0	0,42

3.1.3 Superplastificante

Foi utilizado um dispersante do tipo PA (Poliacrilato, Glenium 51) [70] com teor de sólidos de 32,5 %, massa específica de 1,2 kg/m³ e pH 6,2. O método utilizado para avaliar a compatibilidade e o ponto de saturação do dispersante sobre as partículas finas foi o ensaio de fluidez de pastas através do uso do funil de Marsh, utilizado por Aïtcin [27]. O método consiste em medir o tempo que 1 litro de pasta leva para fluir através do funil com diâmetro pré-determinado, que no presente estudo foi de 5 mm. As medições do tempo de escoamento são feitas em intervalos de tempo pré-estabelecidos, de modo a verificar variações no tempo de fluxo de pastas, conforme apresentado por Velasco [32]. A Figura 3.5 ilustra os equipamentos de ensaio utilizados. Mais detalhes podem ser obtidos em Formagini [30].



(a) Misturador tipo industrial.

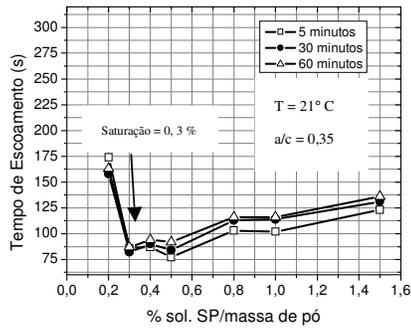


(b) Funil de Marsh e Proveta de 1 litro.

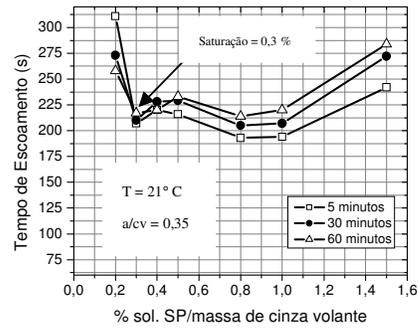
Figura 3.5 – Ensaio de compatibilidade e ponto de saturação.

As pastas de cimento e cinza volante foram produzidas com uma relação água/cimento constante de 0,35. O ensaio para avaliar o tempo de escoamento de pastas produzidas com sílica ativa foi realizado com uma relação água/sílica ativa de 1,10. A Figura 3.6 mostra os gráficos tempo de fluxo *versus* teor de dispersante dos ensaios de compatibilidade executados em pastas de cimento, cinza volante e sílica ativa.

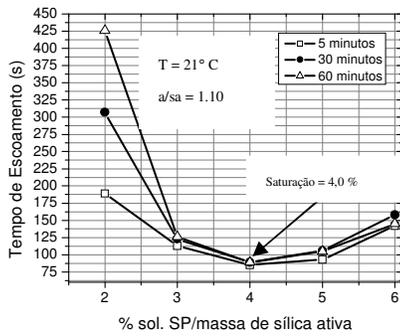
Como pode ser observado na Figura 3.6, as pastas de cimento e cinza volante obtiveram o mesmo ponto de saturação a um teor de 0,3 % de dispersante para a mesma relação água/material cimentante. Porém, o tempo de escoamento da mistura de cinza volante é 24 % maior que o do cimento CP III 40. Os resultados da sílica ativa (Figura 3.6- c) mostram que o dispersante é compatível e eficiente para dispersar as partículas de sílica ativa a um teor de superplastificante de 4 %. Esse elevado teor de saturação da sílica ativa em relação ao cimento e à cinza volante é atribuído à elevada área superficial da sílica ($10 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$), tornando assim necessário uma maior quantidade de dispersante para envolver toda a superfície das partículas. A Figura 3.6- d mostra as curvas da sílica 325, com ponto de saturação de 0,8 %.



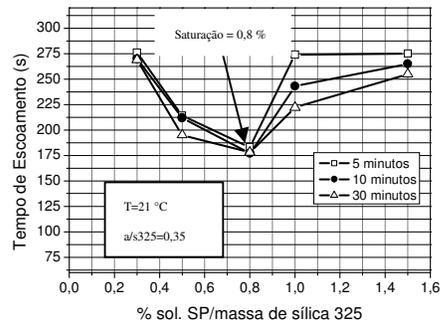
(a) Cimento CP III 40.



(b) Cinza volante.



(c) Sílica ativa.

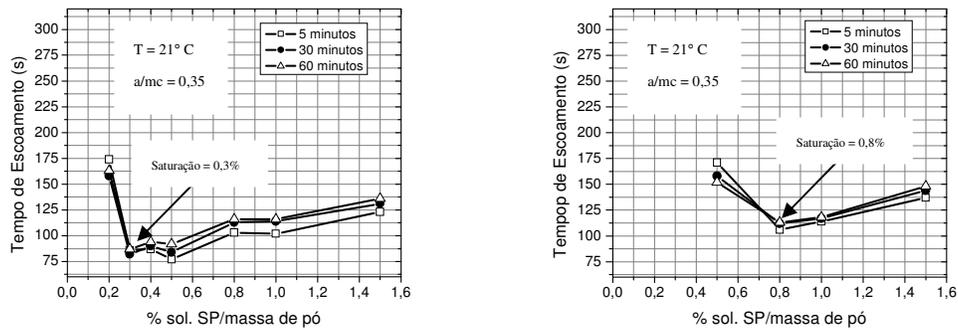


(d) Sílica 325.

Figura 3.6 – Ponto de saturação do superplastificante com os materiais finos.

Nota: a/c, relação água/cimento; a/cv, água/cinza volante; a/sa, relação água/sílica ativa; a/s₃₂₅ relação água/sílica 325.

Quando adições minerais são utilizadas em conjunto com o cimento Portland, ocorre uma mudança no ponto de saturação das pastas individuais como já obtido por De Larrard e Rixon ([25], [30]). Como se pretende utilizar, no presente estudo, uma blenda de materiais cimentícios, foram realizados ensaios de compatibilidade e ponto de saturação de blends binários (90 % cimento e 10 % sílica ativa) e ternários (70 % cimento, 10 % sílica ativa e 20 % cinza volante) com o superplastificante utilizado, do tipo poliácrlato. Os resultados estão apresentados na Figura 3.7.



(a) 90% cimento + 10 % sílica ativa.

(b) 70 % cimento + 20 % cinza volante + 10 sílica ativa.

Figura 3.7 – Ponto de saturação de misturas com dispersante (Binárias e ternárias).

Nota: a/mc, água material cimentíceos.

Os resultados obtidos indicam que quando 10 % de cimento foram substituídos por sílica ativa, não houve alteração do ponto de saturação e do tempo de escoamento (Figura 3.7-a). Quando substituiu-se cimento por 20 % de cinza volante e 10 % de sílica ativa, o teor de superplastificante necessário para se atingir o ponto de saturação da mistura aumentou de 0,3 % para 0,8 %, quando comparado à mistura cimento mais sílica ativa ou cimento puro. O tempo de escoamento que era de cerca de 80 segundos, aumentou para 100 segundos no ponto de saturação.

3.1.4 Fibras

Para a produção dos CAAF foram utilizadas dois tipos de fibras: microfibras mineral (volastonita) e fibra de aço. Foram utilizadas as microfibras minerais de volastonita JG, que são comercializadas com a marca Energyarc. As propriedades típicas da volastonita são apresentadas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10- Propriedades típicas da microfibras mineral (volastonita).

Especificação	Volastonita
Dimensão Transversal	5 μm – 100 μm
Dimensão Longitudinal	50 μm – 2 mm
Massa Específica (g/cm^3)	2,9
pH (10 % diluída)	9,90
Coefficiente de Expansão Térmica ($\text{mm}/\text{mm}/\text{c}$)	$6,5 \times 10^{-6}$
Ponto de Fusão	1540
Relação de Aspecto (l/d)	3 a 20
Módulo de Elasticidade (GPa)	120

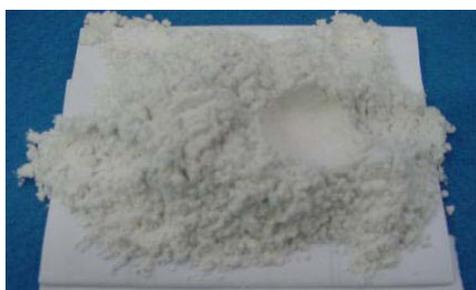
Fonte: Nyco Minerals Inc (USA) [72].

A fibra de aço utilizada no estudo foi a Dramix 65/35, com comprimento de 35 mm e diâmetro de 0,54 mm, com ganchos em suas extremidades. As fibras são comercializadas no Brasil pela Belgo Mineira. As propriedades das fibras de aço são apresentadas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11- Características das fibras de aço.

Especificação	DRAMIX RC 65/35
Comprimento (mm)	35
Diâmetro (mm)	0,55
Relação de Aspecto (l/d)	64
Peso Específico (g/cm^3)	785
Módulo de Elasticidade (GPa)	200
Resistência à Tração (MPa)	1150

A Figura 3.8 mostra as fibras utilizadas no presente trabalho.



(a) Microfibras mineral (volastonita).



(b) Fibras de aço (DRAMIX 65/35).

Figura 3.8 – Fibras utilizadas.

3.2 Dosagem pelo Método do Empacotamento Compressível

A dosagem para a obtenção da matriz de concreto auto-adensável foi realizada seguindo o conceito do método do empacotamento compressível (MEC) utilizado

recentemente no Brasil, de forma pioneira, para dosagem de concretos normais e concretos de alto desempenho (Silva [69]) e de concreto de altíssimo desempenho (Formagini [30]). Neste trabalho, a dosagem do concreto foi realizada através do programa computacional BetonlabPro2 [71]. O BetonlabPro2 permite a simulação de diferentes composições para a seleção adequada dos materiais de forma a que se obtenham as propriedades requeridas do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Os detalhes do MEC podem ser obtidos nos trabalhos de De Larrard [25], Silva [69] e Formagini [30].

3.2.1 Procedimentos de Dosagem Utilizando o BetonlabPro2

Os procedimentos para a otimização de concretos utilizando o BetonlabPro2 são realizados em três etapas. Primeiramente faz-se a elaboração de um banco de dados com as propriedades dos materiais. A segunda etapa consiste na otimização do esqueleto granular dos agregados. Por fim, realiza-se a otimização da pasta da mistura com base nas propriedades desejadas para o concreto. Mais detalhes referentes à dosagem utilizando o programa BetonlabPro2 podem ser encontrados nos trabalhos de Silva [69] e Cordeiro [73].

Esses procedimentos para a dosagem e otimização de um concreto utilizando o BetonlabPro2 são descritos nesse item. A Figura 3.9 mostra a seqüência utilizada para o preenchimento do banco de constituintes, seqüência essa que se refere à primeira etapa. A ordem de grandeza das propriedades e parâmetros dos materiais pode ser obtida no trabalho de Sedran *et al.* [71].

Primeiramente, deve-se criar um arquivo para armazenar o banco de constituintes (Figura 3.9 - a), como agregados, aglomerante, fílers e superplastificantes. Para cada tipo de constituinte, com exceção do superplastificante, deve-se determinar o número de classes com seus respectivos diâmetros. Essa divisão pode ser feita em no máximo quatro classes (limite do programa) (Figura 3.9 - b). A seguir Tabela 3.12 apresenta as propriedades necessárias para cada material.

Tabela 3.12 - Propriedades utilizadas no Programa BetonlabPro2.

Propriedades	Agregados	Sílica 325	Cimento Portland	Cinza Volante	Sílica Ativa	SP
Massa Específica	x	x	x	x	x	x
Granulometria	x	x	x	x	x	---
Compacidade	x	x	x	x	x	---
Módulo de Elasticidade	x	---	---	---	---	---
Porosidade e Absorção d'água	x	---	---	---	---	---
Composição de Bogue	---	---	x	---	---	---
Resistencia à Compressão	x	---	x	---	---	---
Dosagem de Saturação	---	x	x	x	x	---
Parâmetros P e Q	x	---	---	---	---	---
Coefficientes Pozolanicos	---	---	x	x	x	---
Teor de Sólidos	---	---	---	---	---	x

Ao se gerar a curva granulométrica, é necessário verificar se as peneiras utilizadas experimentalmente são as mesmas peneiras do programa BetonlabPro2. Caso as peneiras não sejam as mesmas, interpola-se a granulometria obtida no ensaio experimental para ajustar a granulometria de acordo com as peneiras do programa.

Para os materiais aglomerantes e fílers, as seqüências (Figura 3.9 - c, Figura 3.10 - a e Figura 3.10 - b) são as mesmas dos agregados, havendo diferença somente nas propriedades físicas e mecânicas. Para o cimento deve-se informar a resistência à compressão conforme a NBR 7215 [74]. Além dessas propriedades, a massa específica, a capacidade térmica e as composições químicas são necessárias. Para o dispersante, as informações necessárias são a massa específica e o teor de sólidos (Figura 3.10 - c).

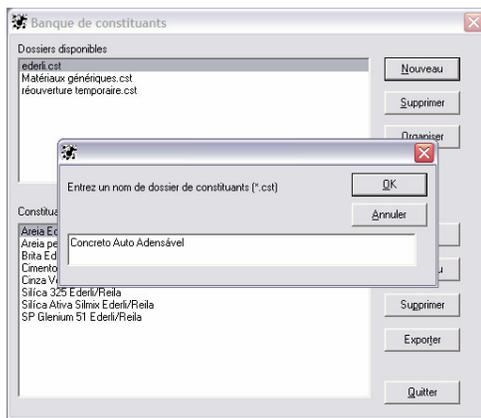
Os parâmetros P e Q são definidos por De Larrard como necessários para a estimativa da influência da aderência dos grãos à pasta de cimento (P) e da resistência intrínseca do agregado (Q). Os parâmetros p e q são constantes obtidas de acordo com o tipo do agregado graúdo, fornecidos pelas expressões:

$$p = \frac{1}{f_{cm} \left(\frac{1}{f_c} - \frac{1}{2,14 f_{c_g}} \right)}$$

e

$$q = \frac{P}{2,14 f_{c_g}}$$

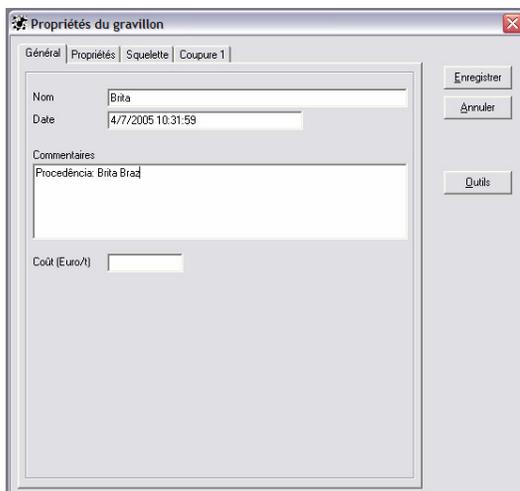
onde f_{c_g} é a resistência à compressão do agregado. Os parâmetros p e q são determinados indiretamente através do ensaio de resistência à compressão de dois tipos de concretos: um com baixa resistência e outro com alta resistência.



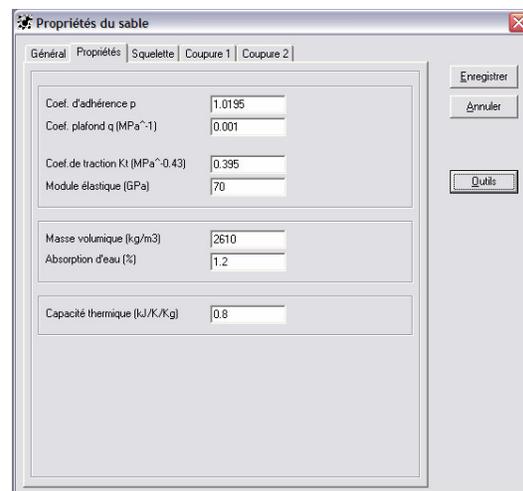
(a) Arquivo de constituintes.



(b) Banco de constituintes e número de classes.



(c) Procedência e comentários.

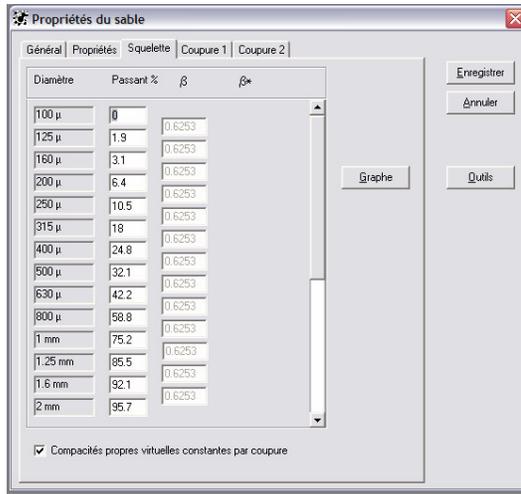


(d) Propriedades físicas e mecânicas.

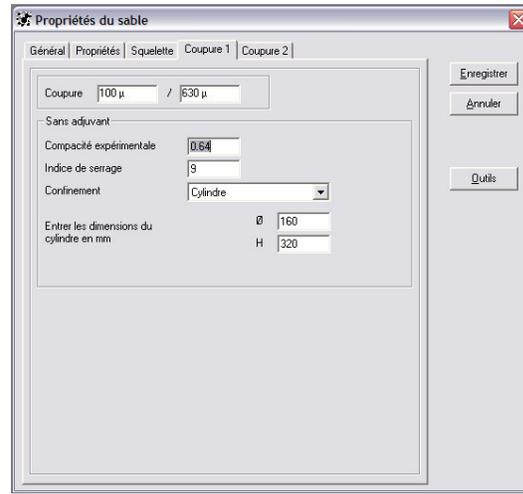
Figura 3.9 – Definição das características dos materiais.

Os parâmetros P , Q e os coeficientes pozolânicos são calibrados com o auxílio do BetonlabPro2. Para a calibração desses parâmetros é necessário que se tenham caracterizadas as propriedades mecânicas de duas misturas produzidas com os materiais

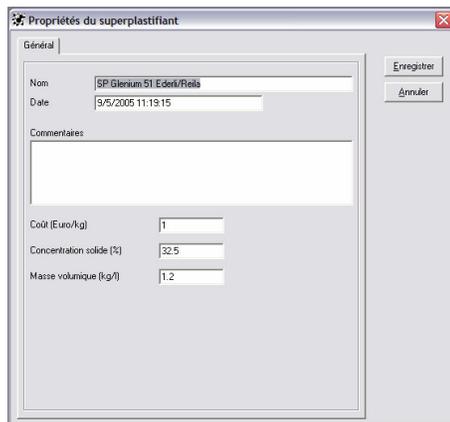
que serão usados na dosagem, sendo utilizadas também as quantidades das misturas e as resistências à compressão aos 7 e 28 dias (Figura 3.10 - d).



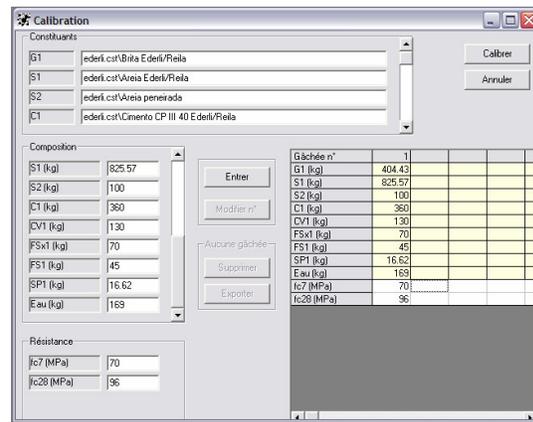
(a) Curva granulométrica.



(b) Compacidade da classe.



(c) Propriedades do dispersante.



(d) Calibração dos parâmetros P e Q, e dos coeficientes pozolônicos.

Figura 3.10 - Etapas realizadas na criação do banco de constituintes e calibração dos parâmetros.

Antes de se iniciar a simulação da dosagem é necessário selecionar os materiais que serão utilizados, que se encontram no arquivo com os constituintes. A Figura 3.11 mostra a seqüência para a seleção dos materiais e a dosagem do concreto.

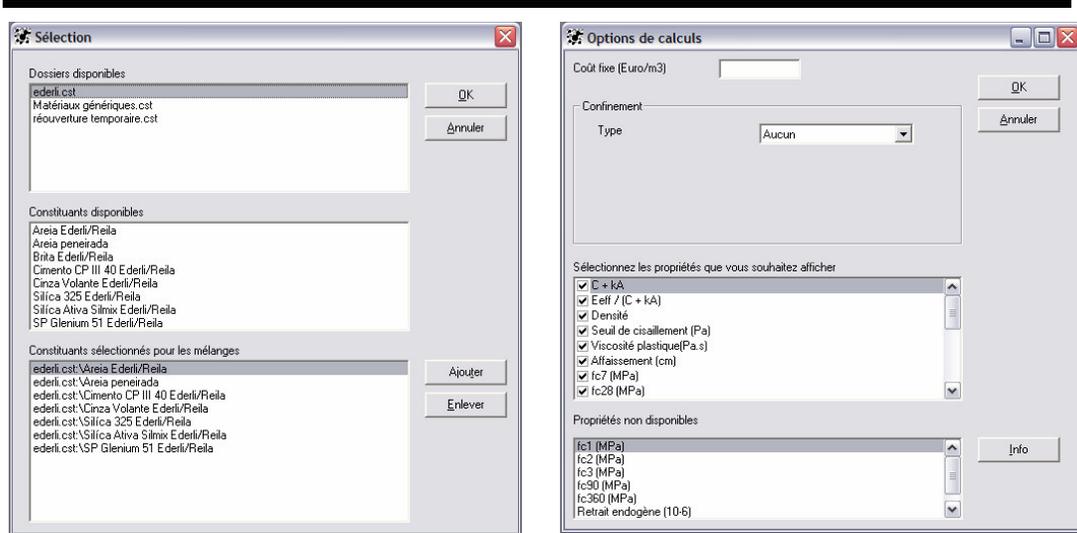
Na barra de ferramentas encontra-se o ícone “seleção” que abrirá uma janela na qual estão os arquivos disponíveis contendo os materiais caracterizados (Figura 3.11 - a). Após a seleção dos materiais, retorna-se à barra de ferramentas onde se encontra o ícone “cálculo” que abrirá uma janela com opções desejadas para a dosagem, onde estão

os parâmetros que deverão ser encontrados no arquivo de saída, tais como abatimento, tensão de cisalhamento, viscosidade plástica, resistência à compressão do concreto aos 7 e 28 dias, entre outros (Figura 3.11 - b).

3.2.1.1 Dosagem

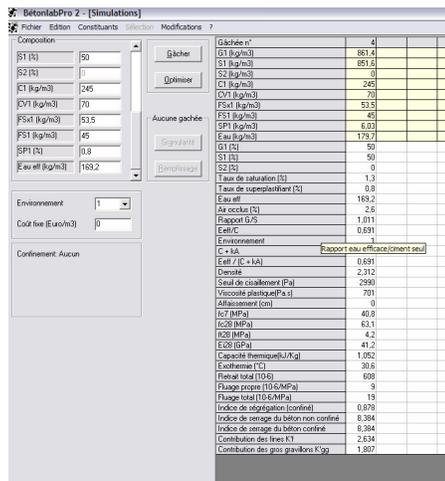
Após a seleção dos materiais inicia-se a simulação de dosagem do concreto. De uma das dosagens realizadas para a calibração dos parâmetros P e Q obtém-se a primeira composição do concreto (Figura 3.11 c). Inicia-se a dosagem com a otimização da composição dos materiais sólidos (agregados), fixando o teor de pasta do concreto e calculando-se o esqueleto granulométrico dos agregados, procurando minimizar o índice de colocabilidade $K' \leq 7$ [25]. O índice de colocabilidade corresponde ao empacotamento máximo que pode ser obtido com a mistura granular fornecida, mantendo certa facilidade de lançamento e adensamento. Esse procedimento refere-se a segunda etapa da dosagem.

Depois de definido o esqueleto granulométrico dos agregados, realiza-se o último procedimento da dosagem: procuram-se obter os parâmetros do concreto, tais como resistência e propriedades reológicas otimizando o teor de pasta e fixando os percentuais dos agregados obtidos anteriormente (etapa dois) (Figura 3.11 - d).

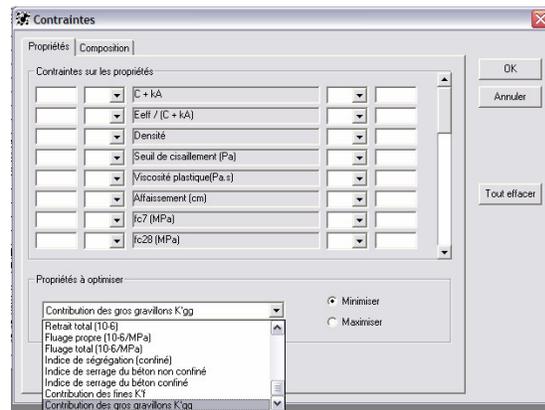


(a) Seleção dos constituintes.

(b) Seleção dos dados de saída.



(c) Primeira composição da mistura.



(d) Parâmetros especificados.

Figura 3.11 - Etapas realizadas para a obtenção da dosagem do concreto.

3.3 Concretos produzidos

Neste estudo, para a dosagem de um CAA alguns parâmetros foram levados em conta para garantir boas propriedades reológicas e alta fluidez. A Tabela 3.13 apresenta algumas especificações das propriedades do CAA no estado fresco estabelecidas por De Larrard [25]. A resistência à compressão requerida é de 80 MPa aos 28 dias de cura úmida.

Tabela 3.13 – Especificações das propriedades do CAA no estado fresco.

Critérios	Valor
Prevenção à segregação (estabilidade geral)	$S \leq 0,8$
Tensão de Escoamento	$\tau_0 \leq 500 \text{ Pa}$
Viscosidade Plástica	$200 \leq \mu \leq 300 \text{ P.s}$
Índice de Compactação (K')	≤ 7

Para utilizar o BetonlabPro2, é necessário caracterizar todos os materiais (conforme apresentado no item 3.1) e produzir duas misturas de concreto com os materiais que serão utilizados na dosagem. Das duas misturas produzidas devem-se obter por ensaios mecânicos as resistências à compressão aos 7 e 28 dias. As resistências são necessárias para a calibração dos parâmetros chamados P e Q, e para calibrar os coeficientes pozolânicos das adições minerais (sílica ativa e cinza volante). A Tabela 3.14 apresenta as quantidades utilizadas e as resistências obtidas das misturas produzidas para a calibração dos parâmetros do programa.

Tabela 3.14 – Misturas produzidas para obtenção da caracterização mecânica.

Materiais (kg/m ³)	Mistura A	Mistura B
Cimento	315,0	245,0
Sílica Ativa	35,0	35,0
Cinza Volante	0,0	70,0
Areia	850,0	850,0
Brita	850,0	850,0
Superplastificante	16,1	8,6
Água	164,1	169,2
F _{c7}	39,7	49,7
F _{c28}	56,0	64,0

Os parâmetros reológicos de um CAA, além do especificado, devem apresentar as seguintes características: apresentar abatimento igual ou superior a 250 mm e espalhamento igual ou maior que 600 mm. Após as considerações anteriores dosou-se um CAA, obtendo-se a mistura 01.

3.3.1 Mistura 01

A primeira mistura, denominada 01, foi dosada pelo programa BetonlabPro2 otimizando as partículas granulares. A Tabela 3.15 apresenta a composição da mistura 01.

Tabela 3.15 - Composição do concreto da mistura 01.

Composição	
Agregado Graúdo (G1) (kg/m ³)	777,50
Agregado Miúdo (S1) (kg/m ³)	760,60
Sílica 325 (kg/m ³)	53,50
Cimento (kg/m ³)	360,00
Cinza Volante (kg/m ³)	108,00
Sílica Ativa (kg/m ³)	45,00
Superplastificante (kg/m ³)	12,04
Água (kg/m ³)	200,20
G1 (%)	49,98
S1 (%)	50,02
Taxa de Saturação (%)	1,01
Teor de superplastificante (%)	1,09
Água Efetiva	195,30
Ar incorporado (%)	1,40
Relação G1/S1	1,02
Água efetiva/cimento	0,542

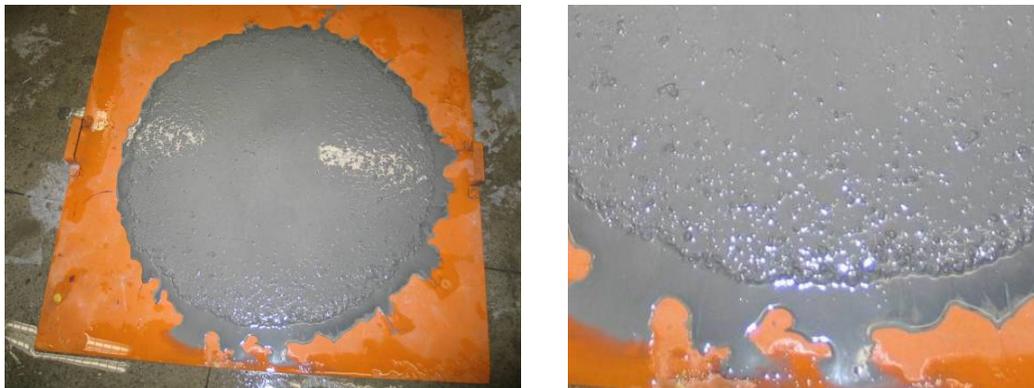
Segundo Okamura *et al.* [75], as frações volumétricas para os materiais utilizados na produção de um concreto auto-adensável possuem as seguintes ordens de grandeza: o volume de agregado graúdo é cerca de 30 % do volume total de sólidos; o agregado miúdo constitui cerca de 40 % do volume total de argamassa e a relação água/material cimentante, em volume, varia de 0,9 a 1. A título comparativo, os valores obtidos para a mistura 01 em estudo estão apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 – Frações volumétricas dos materiais constituintes da mistura 01.

$V_{\text{aggráudo}}/V_{\text{sólidos}}$ (%)	35,487
Água/Material Cimentante	1,148
Areia na Argamassa (%)	40,963

Na otimização da mistura 01, tendo como base a mistura B (Tabela 3.14), foi retirada a micro fibra mineral volastonita e inserido à mistura um quartzo moído, denominado de sílica 325. Durante a simulação, as propriedades do concreto referentes ao estado fresco, encontram-se de acordo com os parâmetros sugeridos segundo De Larrard [25] (Tabela 3.13). A resistência à compressão obtida na simulação atendeu ao especificado (80 MPa).

A mistura 01 obteve parâmetros reológicos segundo as medidas de espalhamento e adensamento condizentes com os valores de um CAA. Porém, apresentou exsudação e segregação devido ao excesso de água, como pode ser visualizado na Figura 3.12.



(a) Espalhamento.

(b) Exsudação.

Figura 3.12 – Análise do concreto no estado fresco da mistura 01.

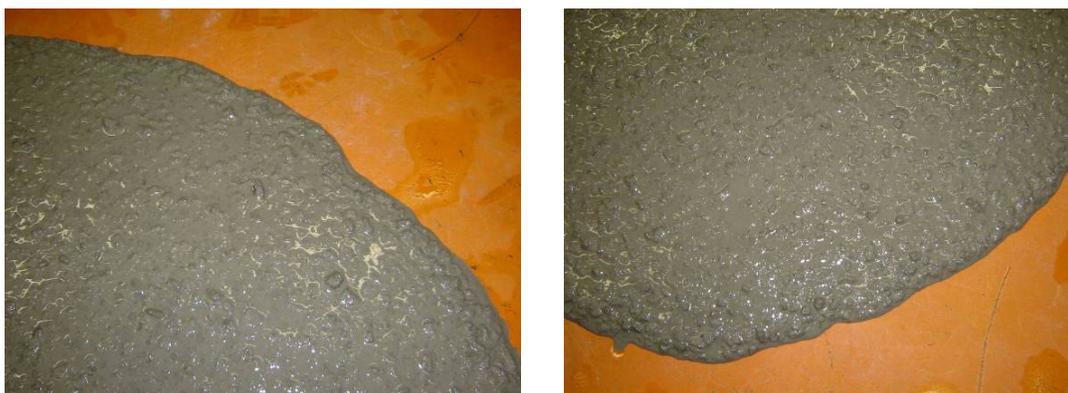
3.3.2 Mistura 02

Para reduzir a exsudação e segregação causadas pelo excesso de água, sem qualquer mudança na composição granular, a relação água/cimento foi alterada, passando de 0,56 para 0,50, resultando na mistura 02. Ajustou-se também o teor do superplastificante, que foi reduzido de 1,09 para 0,8 % em relação à massa de cimento. As composições utilizadas na mistura estão apresentadas na Tabela 3.17.

Esse concreto obteve parâmetros reológicos condizentes com os valores de um concreto auto-adensável. Como pode ser visto na Figura 3.13, a mistura apresentou-se bastante coesa, sem exsudação e segregação. Após o ensaio de espalhamento do cone invertido, observou-se que a pasta e os agregados estavam distribuídos de maneira bem uniforme. O valor de espalhamento do cone invertido encontrado experimentalmente foi de 750 mm. O resultado médio de resistência à compressão de três amostras ensaiadas da mistura 02 aos 28 dias de cura em câmara úmida foi de 80,12 MPa.

Tabela 3.17- Composição do concreto da mistura 02

Composição	
Agregado Graúdo (G1) (kg/m ³)	777,50
Agregado Miúdo (S1) (kg/m ³)	760,60
Sílica 325 (kg/m ³)	53,50
Cimento (kg/m ³)	360,00
Cinza Volante (kg/m ³)	108,00
Sílica Ativa (kg/m ³)	45,00
Superplastificante (kg/m ³)	8,86
Água (kg/m ³)	174,01
G1 (%)	49,98
S1 (%)	50,02
Taxa de Saturação (%)	1,01
Teor de superplastificante (%)	0,80
Água Efetiva	166,60
Ar incorporado (%)	1,80
Relação G1/S1	1,011
Água efetiva/cimento	0,463



Visualização da mistura após o ensaio de espalhamento do cone invertido.

Figura 3.13 – Análise do concreto no estado fresco da mistura 02.

3.3.3 Mistura 03

Assumindo-se que a situação mais difícil seria a dosagem e obtenção do CAAF com 2 % de fibras, mudanças na mistura 03 foram realizadas. A mistura 03 é semelhante à mistura 02, com exceção da inclusão de 2%, em volume, de fibras de aço Dramix 65/35, produzindo assim um CAAF. Com o objetivo de minimizar o efeito de perturbação da fibra sobre o arranjo dos grãos na mistura, a quantidade de agregado

graúdo utilizada na mistura 03 foi reduzida. Essa consideração da inclusão das fibras implicaria em um mesmo efeito de perturbação desenvolvido pelo agregado graúdo.

A inclusão de fibras rígidas ao concreto exerce um efeito de perturbação, afastando os grãos dos agregados, enquanto que as fibras flexíveis se deformam contornando os grãos. O efeito da adição das fibras é abordado por De Larrard [25] de modo similar ao efeito de parede produzido pela fôrma sobre os agregados. A diferença entre os dois casos encontra-se na curvatura da superfície e na dimensão da fibra, que é muito inferior à dimensão máxima do agregado (DMA). Entretanto, se as fibras forem curtas o suficiente, não perturbarão significativamente o empacotamento dos grãos, podendo se ajustar nos vazios dos grãos maiores. A adição de fibras longas causa um maior efeito de perturbação no empacotamento dos grãos. O efeito da perturbação de fibras rígidas e flexíveis no empacotamento é esquematizado na Figura 3.14. Nota-se que as fibras rígidas (Figura 3.14-a) permanecem com sua configuração original, perturbando o empacotamento dos grãos ao seu redor. Isso não acontece com as fibras flexíveis, que se moldam entre os contornos dos agregados, não perturbando o empacotamento (Figura 3.14-b).

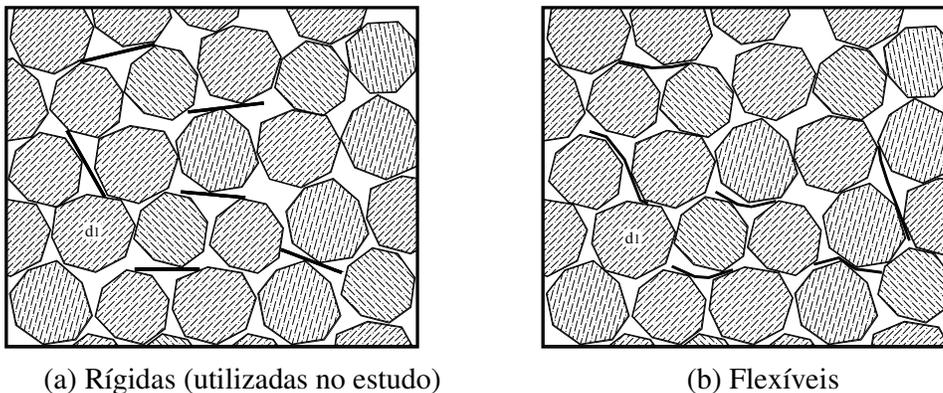


Figura 3.14 - Efeito de perturbação exercido pelas fibras.

As composições utilizadas na mistura estão apresentadas na Tabela 3.18.

Tabela 3.18- Composição do concreto da mistura 03

Composição	
Agregado Graúdo (G1) (kg/m ³)	621,50
Agregado Miúdo (S1) (kg/m ³)	760,60
Sílica 325 (kg/m ³)	53,50
Cimento (kg/m ³)	360,00
Cinza Volante (kg/m ³)	108,00
Sílica Ativa (kg/m ³)	45,00
Superplastificante (kg/m ³)	8,86
Água (kg/m ³)	174,01
Fibra de aço (kg/m ³)	156,00
G1 (%)	44,97
S1 (%)	55,03
Taxa de Saturação (%)	1,01
Teor de superplastificante (%)	0,80
Água Efetiva	166,60
Ar incorporado (%)	2,20
Relação G1/S1	0,827
Água efetiva/cimento	0,463

Esse concreto não apresentou parâmetros reológicos condizentes com os valores de um CAA. A perturbação que a adição de fibras exerce sobre CAA é maior que a quantidade de agregados substituídos em volume. Como pode ser visto na Figura 3.15, a adição de fibras modificou as propriedades reológicas do concreto, quando comparadas à mistura 02. O ensaio de cone invertido não foi concluído devido ao bloqueio parcial na saída do cone. A mistura não era coesa o suficiente para carrear as fibras, apresentando segregação e aglomeração das fibras com os agregados no centro da área de espalhamento. Conforme pode ser visto na Figura 3.15- c, não há uma distribuição uniforme das fibras na mistura.

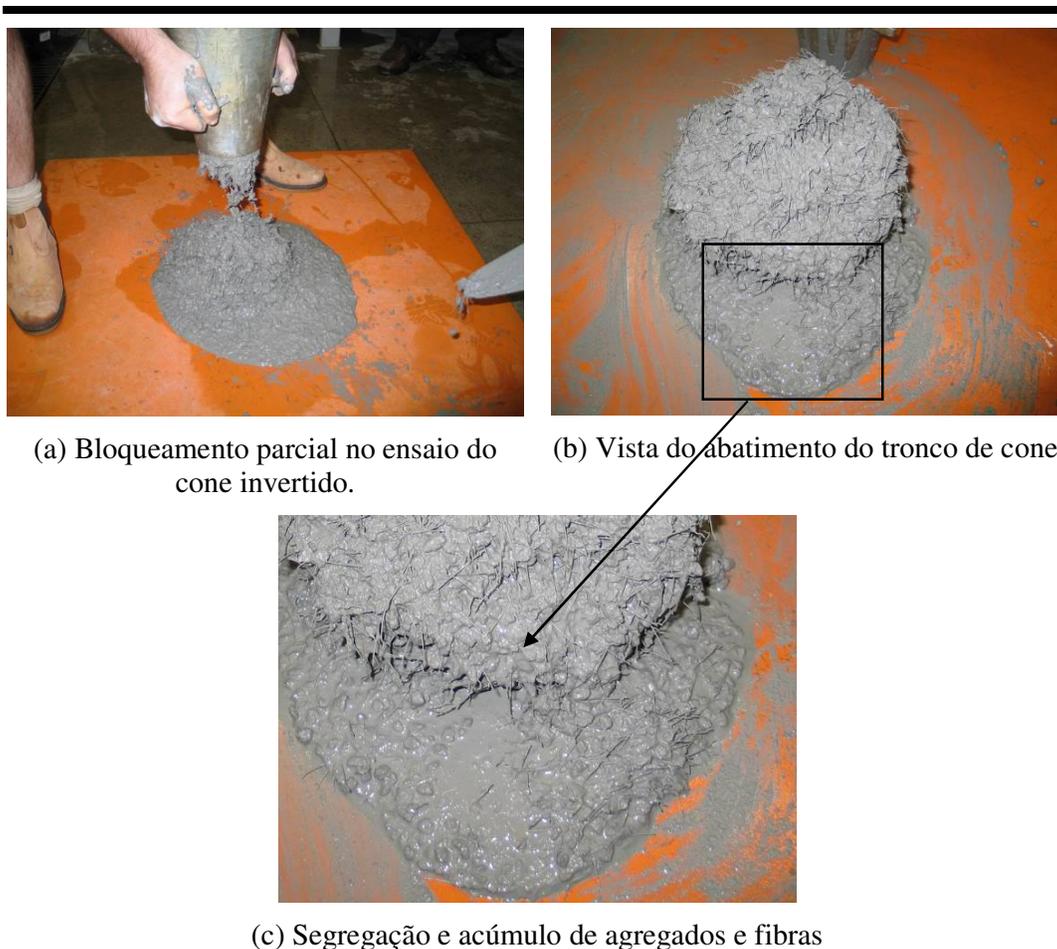


Figura 3.15 – Análise do concreto no estado fresco da mistura 03.

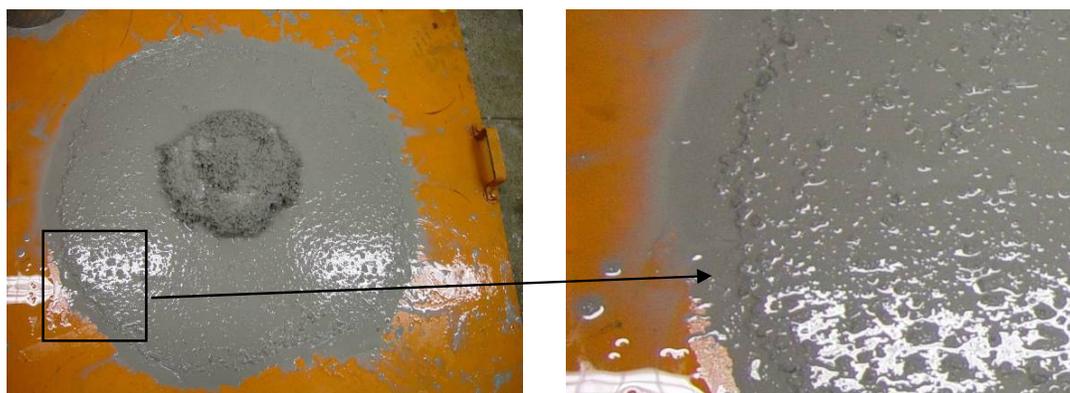
3.3.4 Mistura 04

Devido às observações feitas na mistura 03, verificou-se a falta de materiais finos. Foram então acrescentados 30 kg/m^3 de cimento, 12 kg/m^3 de cinza volante, cerca de 100 kg/m^3 de areia (S1) e o teor de sólidos de superplastificante aumentou, passando de 0,8 % para 1,3 % em relação à massa de cimento, tendo como base a mistura 03. O volume de agregado graúdo utilizado na mistura 04 foi corrigido em função dos acréscimos, resultando nos valores apresentados na Tabela 3.19.

Tabela 3.19 - Composição do concreto da mistura 04.

Composição	
Agregado Graúdo (G1) (kg/m ³)	540,93
Agregado Miúdo (S1) (kg/m ³)	850,6
Sílica 325 (kg/m ³)	53,50
Cimento (kg/m ³)	390,00
Cinza Volante (kg/m ³)	120,00
Sílica Ativa (kg/m ³)	45,00
Superplastificante (kg/m ³)	15,60
Água (kg/m ³)	195,00
Fibra de aço (kg/m ³)	156,00
G1 (%)	44,00
S1 (%)	56,00
Taxa de Saturação (%)	0,96
Teor de superplastificante (%)	1,30
Água Efetiva	192,40
Ar incorporado (%)	1,90
Relação G1/S1	0,795
Água efetiva/cimento	0,493

Na Figura 3.16- b observa-se que a mistura ainda não está homogênea e coesa o suficiente. O bloqueamento da mistura na saída do cone invertido não foi observado. Nota-se nitidamente a segregação da pasta ainda presente e a aglomeração de fibras no centro da área de espalhamento, entretanto menor que a observada na mistura 03. Porém, a mistura apresentou exsudação, conforme pode ser observado na Figura 3.16- c. A mistura não apresentou-se coesa o suficiente para que carregasse as fibras e agregados em toda a área do círculo de espalhamento da mistura.



(a) Aglomeração de agregados e fibras e segregação.

(b) Exsudação.

Figura 3.16 – Análise do concreto no estado fresco da mistura 04.

3.3.5 Mistura 05

Para conferir coesividade à mistura, acrescentaram-se 100 kg/m³ de areia fina (S2), de granulometria inferior a 0,850 mm e uma fração volumétrica de 2,59% de micro-fibra mineral (volastonita). Além disso, o consumo de cinza volante aumentou de 120 kg/m³ para 130 kg/m³ e a sílica 325 aumentou de 53,5 kg/m³ para 70,0 kg/m³. A quantidade de cimento foi reduzida de 390 kg/m³ para 360 kg/m³. Com o aumento no consumo destes materiais finos, houve a necessidade de ajustar a mistura reduzindo o consumo de agregado miúdo (S1) e agregado graúdo (G1). As quantidades utilizadas na dosagem estão apresentadas na Tabela 3.20.

Tabela 3.20 - Composição do concreto da mistura 05.

Composição	
Agregado Graúdo (G1) (kg/m ³)	440,80
Agregado Miúdo (S1) (kg/m ³)	830,06
Agregado Miúdo (S2) (kg/m ³)	100,00
Sílica 325 (kg/m ³)	70,00
Cimento (kg/m ³)	360,00
Cinza Volante (kg/m ³)	130,00
Sílica Ativa (kg/m ³)	45,00
Volastonita (kg/m ³)	75,00
Superplastificante (kg/m ³)	16,62
Água (kg/m ³)	169,00
Fibra de aço (kg/m ³)	156,00
G1 (%)	32,13
S1 (%)	60,50
S2 (%)	7,37
Taxa de Saturação (%)	1,06
Teor de superplastificante (%)	1,50
Água Efetiva	165,7
Ar incorporado (%)	3,9
Relação G1/S1	0,479
Água efetiva/cimento	0,460

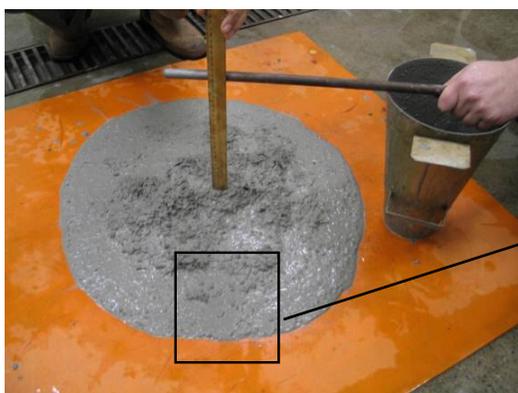
A Tabela 3.21 apresentada a relação das frações volumétricas da mistura 05.

Tabela 3.21 – Frações volumétricas dos materiais constituintes da mistura 05.

$V_{\text{agregado}}/V_{\text{sólidos}}$	19,38
Água/Material Cimentante	0,912
Areia na Argamassa	43,61

De acordo com a Tabela 3.21 a pode ser observado que para o CAAF a relação entre o volume de agregado graúdo e o volume de sólidos diminuiu em torno de 64 % do valor referente ao CAA. Já com relação às outras comparações volumétricas não houve alterações significativas do CAA para o CAAF.

Esse concreto obteve propriedades no estado fresco condizentes com os valores de um CAA. Como pode ser observado na Figura 3.17, a mistura apresentou-se bastante coesa, sem exsudação e segregação. O ensaio de espalhamento do cone invertido mostrou que a pasta, agregados e fibras estão distribuídas de maneira bem uniforme.



(a) Ensaio de abatimento e espalhamento.



(b) Distribuição homogênea, sem exsudação ou segregação.



(c) Ensaio de espalhamento do cone invertido.



(d) Distribuição homogênea, sem exsudação ou segregação.

Figura 3.17 – Análise do concreto no estado fresco da mistura 05.

3.4 Produção dos Concretos

3.4.1 Processo de mistura.

Na produção do concreto auto-adensável foi utilizado o misturador do tipo planetário mostrado na Figura 3.18. Este tipo de misturador foi utilizado com sucesso na produção de concretos de alto desempenho e concretos fibrosos de altíssimo desempenho produzidos com pós-reativos [30].



(a) Misturador planetário.

(b) Sistema de pás de misturas.

Figura 3.18– Misturador Planetário CIBI.

A seqüência de produção adotada foi:

- a) Umidecimento do misturador com água, retirando-se o excesso com um pano.
- b) Lançamento dos materiais secos agregado miúdo e agregado graúdo no misturador. Os materiais eram misturados por 60 segundos para homogeneização.
- c) Em seguida, foram adicionados os materiais cimentíceos e a micro-fibra mineral volastonita e misturados por mais 60 segundos para a devida homogeneização.
- d) Após a mistura dos materiais secos, adicionaram-se cerca de 80 % da água de mistura.
- e) Em seguida adicionou-se todo o superplastificante.
- f) Após a adição do dispersante adicionou-se o restante da água.

g) Concluída a adição de todos os materiais secos e os líquidos (água e dispersante), o tempo de mistura foi de 8 minutos, para que houvesse a total ação do superplastificante na mistura.

h) Quando produzidos os CAAF, as fibras eram adicionadas ao final dos 8 minutos e misturados por mais 4 minutos.

A Figura 3.19 mostra a seqüência de produção utilizada no estudo.



3.4.2 Concretos Produzidos para Caracterização (C0, C1,0, C1,5 e C2,0)

O concreto C0 foi obtido tendo como base a mistura 05, sendo as fibras de aço substituídas por um volume equivalente de agregado graúdo. De acordo com os procedimentos experimentais das dosagens realizadas no item 3.3, o teor de

superplastificante foi reduzido para evitar o risco de segregação e exsudação do concreto C0. Na produção do concreto C1,0, foi adicionado um volume de 1 % de fibras de aço, sendo retirado um volume equivalente de agregado graúdo, tendo como referência o concreto C0. O teor de superplastificante aumentou de 1,0 % para 1,2 %. Na produção do concreto C1,5 foi adicionado um volume de 1,5 % de fibras de aço em substituição a um volume equivalente de agregado graúdo, sendo o concreto C0 a referência. O superplastificante adicionado à mistura aumentou de 1,0% para 1,5%. Para a produção do concreto C2,0 foi adicionado um volume de 2,0 % de fibras de aço em substituição a um volume equivalente de agregado graúdo, em relação ao concreto C0. O teor de sólidos de superplastificante adicionado à mistura aumentou de 1,0% para 1,5%. A Tabela 3.22 apresenta o traço para as misturas C0, C1,0, C1,5 e C2,0.

Tabela 3.22 - Composição dos concretos C0, C1,0, C1,5 e C2,0.

Composição	C0	C1,0	C1,5	C2,0
Agregado Graúdo (G1) (kg/m ³)	539,60	466,50	454,00	440,80
Agregado Miúdo (S1) (kg/m ³)	830,06	830,06	830,06	830,06
Agregado Miúdo (S2) (kg/m ³)	100,00	100,00	100,00	100,00
Sílica 325 (kg/m ³)	70,00	70,00	70,00	70,00
Cimento (kg/m ³)	360,00	360,00	360,00	360,00
Cinza Volante (kg/m ³)	130,00	130,00	130,00	130,00
Sílica Ativa (kg/m ³)	45,00	45,00	45,00	45,00
Volastonita (kg/m ³)	75,00	75,00	75,00	75,00
Superplastificante (kg/m ³)	11,08	11,08	16,62	16,62
Água (kg/m ³)	172,00	172,00	169,00	169,00
Fibra de aço (kg/m ³)	0,00	78,00	117,00	156,00
G1 (%)	34,84	33,38	32,77	32,13
S1 (%)	58,08	59,39	59,92	60,50
S2 (%)	7,08	7,23	7,31	7,37
Taxa de Saturação (%)	1,06	1,06	1,06	1,06
Teor de superplastificante (%)	1,00	1,20	1,50	1,70
Água Efetiva	165,70	165,70	165,70	165,7
Ar incorporado (%)	2,90	3,5	3,80	3,9
Relação G1/S1	0,650	0,562	0,546	0,479
Água efetiva/cimento	0,460	0,460	0,460	0,460

3.5 Métodos Experimentais para Caracterização dos Concretos

Este capítulo apresenta a caracterização do concreto no estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco os ensaios realizados foram: BTRHEOM: foi utilizado

somente para a caracterização da matriz. O abatimento, espalhamento (“slump test” e cone invertido de ABRAMS), adensamento (caixa “L”), fluidez (funil “V”), capacidade de autonivelamento (tubo “U”) e quantidade de ar incorporado foram realizados para todos os concretos (C0, C1,0, C1,5 e C2,0). No estado endurecido foram realizados os seguintes ensaios: avaliação da segregação da mistura pelo ensaio de massa específica, resistência à compressão, resistência à flexão, resistência ao cisalhamento, microscopia eletrônica de varredura e imagens de raios-X. As caracterizações experimentais foram realizadas para as misturas C0; C1,0; C1,5 e C2,0.

3.5.1 Estado Plástico

3.5.1.1 Reologia Utilizando o Reômetro BTRHEOM

O BTRHEOM é um reômetro de pratos paralelos para concretos com abatimento superior a 100 mm, e com diâmetro máximo de agregado de 25 mm. Velocidades de rotação são impostas ao concreto e o torque gerado pela resistência ao cisalhamento é medido. O ensaio no BTRHEOM consiste, basicamente, de uma série de valores de torque medidos para diferentes velocidades de rotação pré-estabelecidas. O equipamento utiliza uma amostra de aproximadamente 7 litros de concreto fresco, com a forma de um cilindro vazado, que é rotacionado em torno do seu eixo vertical (Figura 3.20-a). Tal rotação se dá através de um sistema de pás que é ligado a um motor localizado sob o recipiente que acondiciona a amostra (Figura 3.20-b). Detalhes sobre o funcionamento do reômetro podem ser encontrados no trabalho de De Larrard et al. [39].

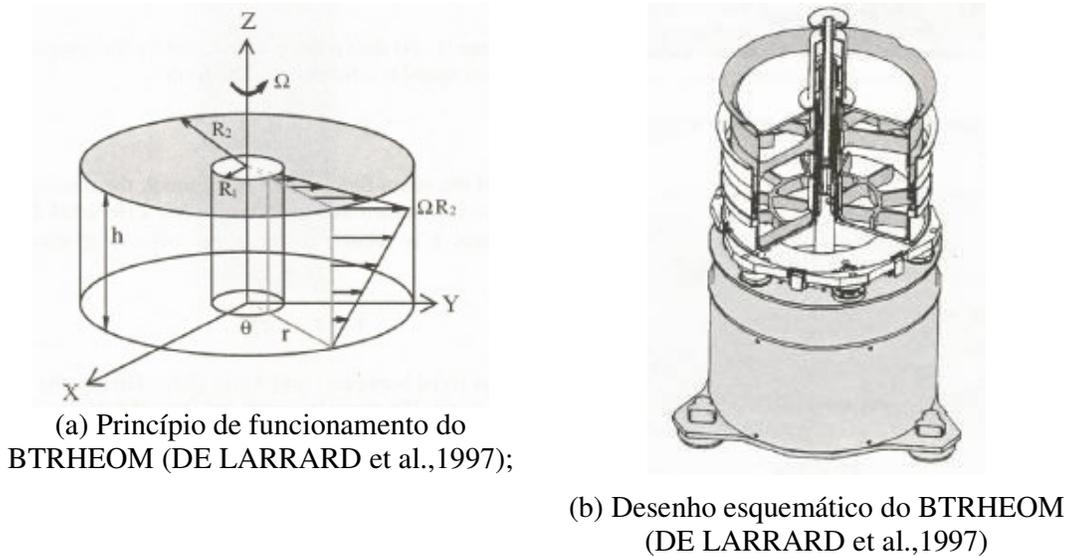


Figura 3.20 – Reômetro BTRHEOM [39].

O ensaio realizado através do reômetro BTRHEOM fornece uma série de pares de medidas de torque (Γ) e velocidade de rotação (N). A relação entre torque e velocidade de rotação é uma função da forma apresentada na equação Eq. 1.

$$\Gamma = \Gamma_0 + AN^b \quad \text{Eq. 1}$$

onde Γ_0 , A e b são parâmetros numéricos, determinados por ajuste dos dados experimentais, que são correlacionados com o comportamento do material.

Para cada ensaio do reômetro realiza-se previamente uma regressão linear ($b=1$) de modo a determinar os parâmetros da lei de *Bingham*, isto é, a tensão cisalhante (τ_0) e a viscosidade plástica (μ) de acordo com o procedimento dado por De Larrard et al. [39] e Hu e De Larrard [40]. A Eq. 2 descreve a lei de *Bingham*, onde τ é a tensão de

cisalhamento e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação de cisalhamento imposta à amostra.

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad \text{Eq. 2}$$

Uma análise de regressão não linear dos dados experimentais pode ser realizada, obtendo-se assim os parâmetros numéricos Γ_0 , A e b da Eq. 1. Estes parâmetros foram então relacionados com o modelo de *Herschel-Bulkley* para concreto fresco de acordo com o trabalho de De Larrard et al. [76]. A Eq. 3 descreve o modelo de *Herschel-*

Bulkley, onde τ_0' , a e b são novos parâmetros característicos do material que descrevem o comportamento do concreto fresco.

$$\tau = \tau_0' + a \dot{\gamma}^b \quad \text{Eq. 3}$$

Para correlacionar os parâmetros do material τ_0' e “a” do modelo *Herschel-Bulkley* com os parâmetros numéricos Γ_0 , A e b , são utilizadas as expressões deduzidas por De Larrard et al. [76], apresentadas nas equações 4 e 5.

$$\tau_0' = \frac{3}{2\pi(R_2^3 - R_1^3)} \Gamma_0 \quad \text{Eq. 4}$$

$$a = 0,9 \frac{(b+3)}{(2\pi)^{b+1}} \frac{h^b}{(R_2^{b+3} - R_1^{b+3})} A \quad \text{Eq. 5}$$

onde R_1 e R_2 são os raios interior e exterior da amostra de concreto fresco no reômetro (20 mm e 120 mm, respectivamente), e h é a altura da amostra (100 mm).

De modo a manter uma correspondência entre o modelo *Herschel-Bulkley* e o modelo de *Bingham*, determina-se uma viscosidade plástica equivalente utilizando os parâmetros a e b , através da Eq. 6, conforme apresentada por De Larrard et al. [76].

$$\mu' = \frac{3a}{b+2} \dot{\gamma}_{\max}^{b-1} \quad \text{Eq. 6}$$

onde $\dot{\gamma}_{\max}$ representa a máxima taxa de deformação utilizada durante o ensaio ($\dot{\gamma}_{\max} = 6 \text{ s}^{-1}$).

3.5.1.2 Abatimento e Espalhamento

O ensaio de abatimento (*slump test*) é o mais comumente usado e o método mais fácil de avaliar as propriedades do concreto no estado fresco, tanto no laboratório quanto no campo.

O ensaio de abatimento e espalhamento vem sendo utilizado em concretos auto-adensáveis, por ser adequado a trabalhabilidade alta ou muito alta. O ensaio consiste em medir o espalhamento máximo da circunferência formada pelo concreto em duas

direções, sendo que a média destes valores representa o valor final. Esse ensaio é apropriado para concretos que apresentam um espalhamento maior que 400 mm. Para os estudos realizados neste trabalho, mediu-se o abatimento e em seguida o espalhamento da mistura. A Figura 3.21 mostra a medida do abatimento e espalhamento de uma mistura.



(a) Medida do Abatimento.

(b) Medida do espalhamento.

Figura 3.21 – Medida do Abatimento e Espalhamento pelo método “*slump test*”.

Outra maneira de avaliar a capacidade de fluidez do concreto é através do tronco de cone invertido, medindo o espalhamento do concreto. O aparato utilizado para o ensaio é o cone de Abrams, posicionado invertido sobre uma base metálica conforme mostra a Figura 3.22.



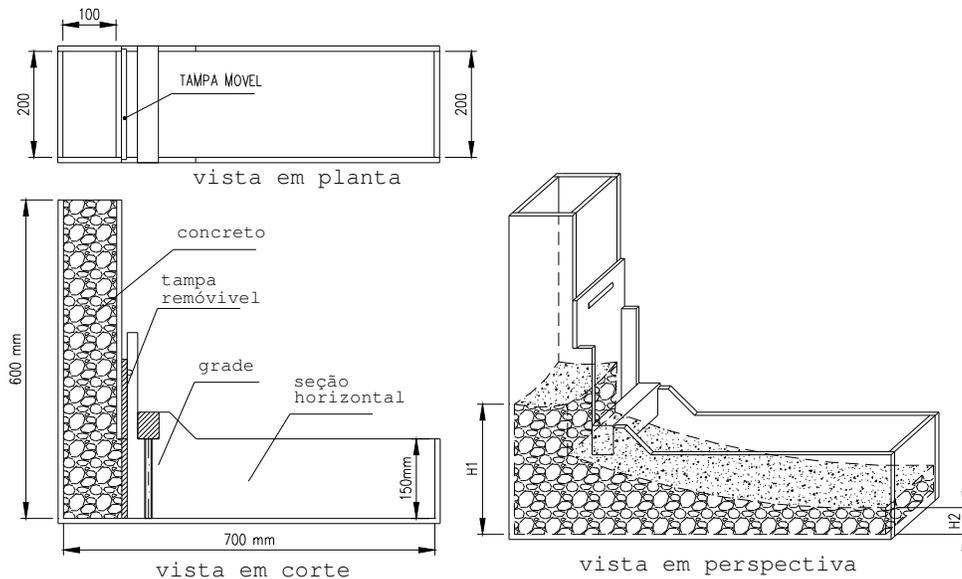
(a) Visualização do início de ensaio.

(b) Medida do espalhamento.

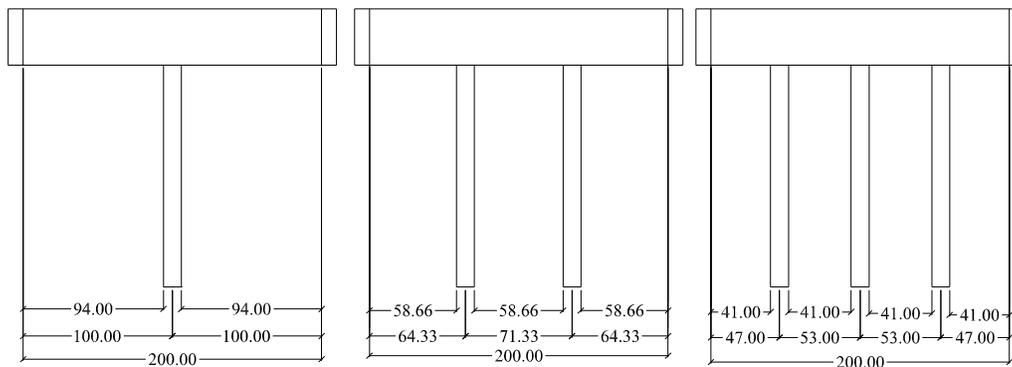
Figura 3.22 – Medida do espalhamento do cone invertido.

3.5.1.3 Fluidez na Caixa “L”

O aparato de ensaio consiste em uma caixa de seção retangular na forma de “L”, com seção horizontal e vertical separadas por uma tampa removível. Na frente da tampa, são posicionadas barras de aço vertical com a finalidade de restringir o fluxo do concreto após a sua abertura. A seção das barras pode ser de diferentes diâmetros, espaçadas com diferentes intervalos, fornecidos de acordo com considerações de lançamento e fluxo entre as armaduras de elementos estruturais. Para os ensaios realizados neste estudo o diâmetro das barras utilizado foi de 12 mm. O espaçamento apropriado é de três vezes o diâmetro máximo do agregado ou da fibra. A Figura 3.23 mostra o aparato em “L” (a) e a configuração de barras utilizadas no estudo (b).



(a) Dimensões da caixa “L”.



(b) Configuração das barras utilizadas (I, II, III).

Figura 3.23 – Caixa de acrílico em forma de “L” e a configuração do espaçamento entre barras.

3.5.1.4 Fluidez no Funil “V”

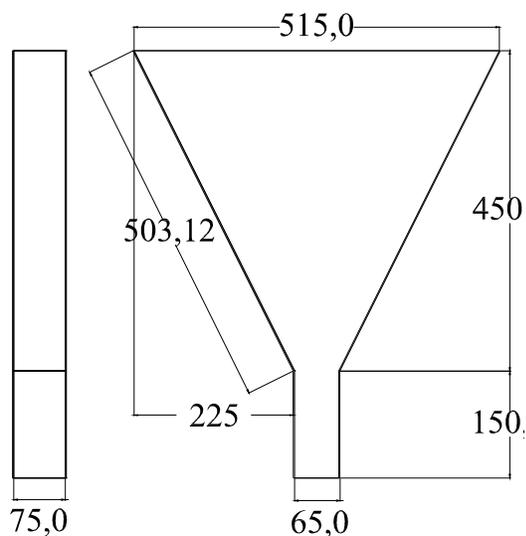
O teste do funil “V” é utilizado para caracterizar a viscosidade e capacidade de fluidez de concretos auto-adensáveis. O aparato de ensaio consiste em um funil de seção retangular em forma de “V”, com abertura inferior de 6,5 x 7,5 cm conforme mostra a Figura 3.24.

Este ensaio mede a facilidade de o concreto fluir: valor baixo do tempo de escoamento indica grande fluidez; valor alto do tempo de escoamento indica baixa fluidez; entupimento da abertura inferior indica dificuldades de lançar e adensar o

concreto. O tempo de fluxo do concreto e a ocorrência ou não de bloqueio são avaliados.



(b) Funil “V”.

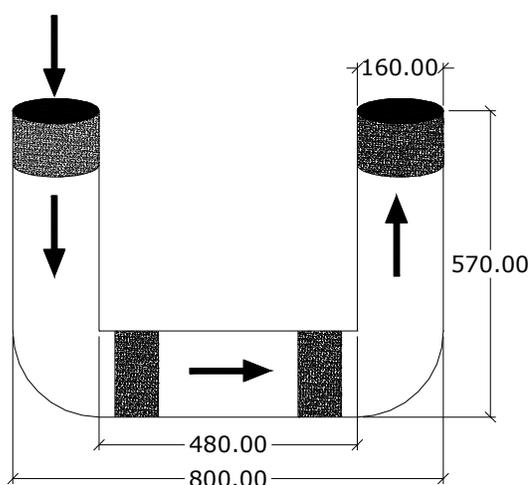


(a) Dimensões Funil “V”.

Figura 3.24 – Funil em forma de “V” (dimensões em mm).

3.5.1.5 Auto-Nivelamento e Potencial de Segregação no Tubo “U”

O aparato em forma de “U” é utilizado para caracterizar a prevenção de segregação, autonivelamento e capacidade de ocupar todos os espaços sem que haja aglomeração de fibras ou espaços não preenchidos. O ensaio consiste em lançar o concreto por uma das extremidades do tubo e medir a altura do preenchimento na outra extremidade. O aparato “U” possui dimensões conforme ilustra a Figura 3.25. O aparato ficou na posição vertical (Figura 3.25-b) durante 24 horas após o lançamento do concreto até sua desmoldagem.



(a) Dimensões do tubo “U”.



(b) Ensaio do Tubo “U”.

Figura 3.25 – Tubo em forma de “U” (dimensões em mm).

O potencial de segregação do concreto foi investigado no estado endurecido onde foram realizados ensaios para determinar as propriedades físicas dos concretos avaliando a absorção de água por imersão, índices de vazios e massa específica aparente de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 9778 [79]. As amostras foram obtidas a partir de carotagem. As amostras carotadas do tubo “U” possuíam dimensões de 150 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Essas amostras foram divididas em 4 partes iguais com dimensões de 25 mm de altura por 50 mm de diâmetro, sendo descartadas as partes extremas das amostras. As 4 amostras retiradas do tubo representam a mesma seção no tubo “U”. As amostras foram carotadas em diferentes posições no tubo conforme apresenta a Figura 3.26.

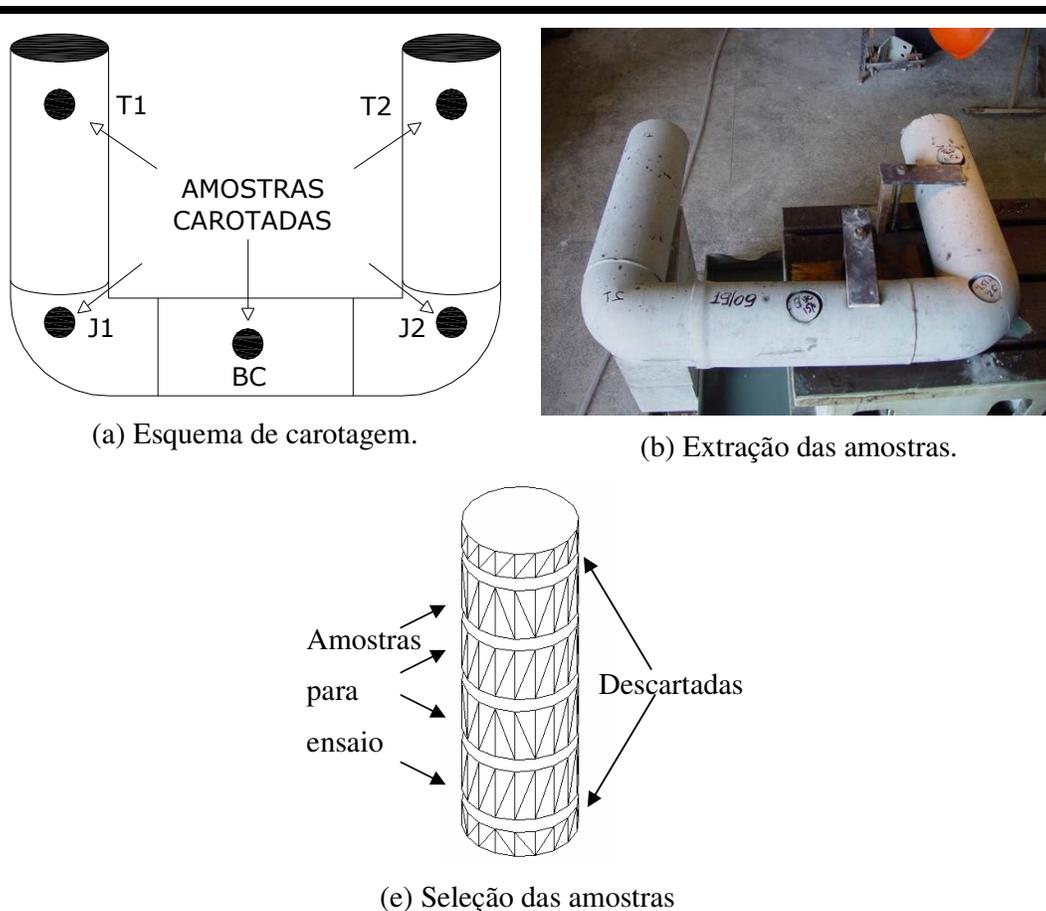


Figura 3.26 – Posição de onde foram retiradas as amostras carotadas do Tubo “U”.

3.5.1.6 Teor de Ar Aprisionado

A incorporação de ar melhora consideravelmente a trabalhabilidade do concreto de alto desempenho. Em muitos casos, um teor de 3 a 4 % de ar aprisionado ou incorporado pode melhorar as condições de lançamento e o acabamento final do concreto [27].

O ar aprisionado ou incorporado no concreto pode variar de 0,6 a 5,0 % sob condições normais (sem adição de agentes incorporadores de ar) [78], um valor recomendado está entre 4 e 7 %. A recomendação da EFNARC [1] indica que um teor usual é de 2 %. Sua presença é indesejável e inevitável quando observado em relação às propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido. Assim, a quantidade de ar incorporado à mistura deverá ser a menor possível para não comprometer a resistência à compressão e a durabilidade do concreto. Levando em consideração a melhora da

trabalhabilidade do concreto com ar incorporado ou aprisionado, no desenvolvimento do concreto auto-adensável, essa técnica pode ser benéfica, desde que não altere as propriedades mecânicas e físicas para as quais o concreto foi dosado. A Figura 3.27 mostra o aparelho que mede a quantidade de ar aprisionado e incorporado no concreto de acordo com a NBRNM47 [77].



Figura 3.27 – Aparelho para medir o teor de ar aprisionado e incorporado no concreto.

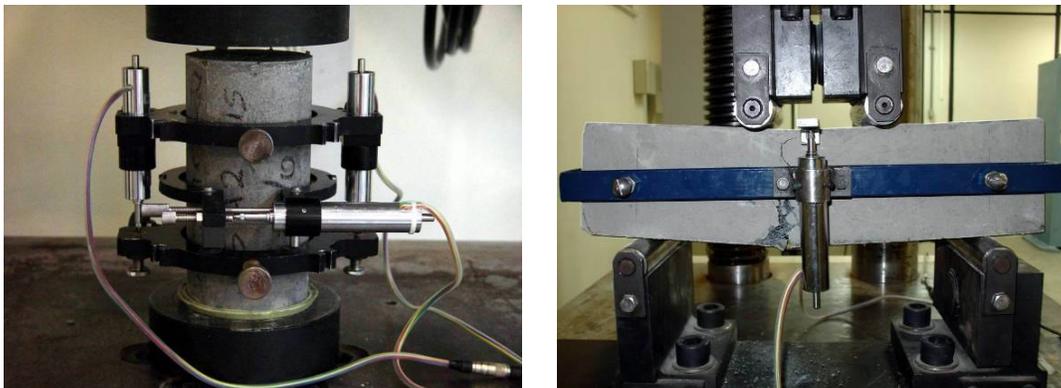
3.6 Estado Endurecido

3.6.1 Resistência à Compressão, Resistência à Flexão e Resistência ao Cisalhamento

Os ensaios de resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos foram determinados seguindo-se a prescrição da NBR 5739 [80], utilizando corpos-de-prova cilíndricos.

O ensaio de resistência à compressão uniaxial dos concretos foi realizado em uma máquina Shimadzu com capacidade de carga de 1000 kN, servo-controlada, com controle de deformação axial a uma taxa de 0,01 mm/min. A deformação axial do corpo de prova foi registrada a partir da média fornecida por dois LVDT's, acoplados por anéis metálicos posicionados na região central do corpo de prova. As deformações e o carregamento aplicado foram registrados por um sistema de aquisição de dados “ADS 2000”, de 16 bits, da marca Lynx. Este equipamento também foi usado no ensaio de resistência à flexão, servo-controlada, com o controle de deslocamento do travessão a uma taxa de 0,5 mm/min. As amostras prismáticas utilizadas para o ensaio de flexão

têm dimensões 100x100x400 mm. As instrumentações dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistência à compressão e resistência à flexão são mostradas na Figura 3.28- a e b, respectivamente.



(a) Instrumentação do corpo-de-prova para ensaio de Resistência à Compressão.

(b) Instrumentação do corpo-de-prova para ensaio de Resistência à Flexão.

Figura 3.28 – Instrumentação dos corpos-de-prova para ensaios de resistência à compressão e resistência à flexão.

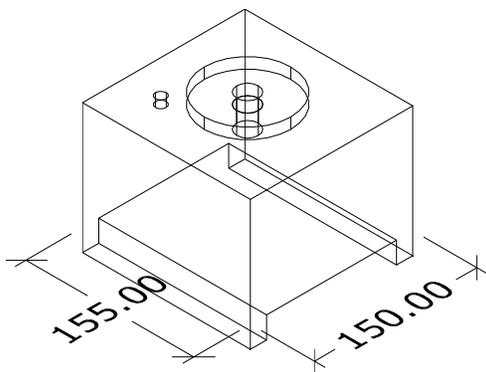
Os ensaios de resistência ao cisalhamento foram determinados segundo a proposta de Mirsayah e Banthia [59], que basearam-se na norma japonesa JSCE-SF6. O ensaio para caracterizar a resistência ao cisalhamento dos concretos foi realizado na máquina Shimadzu. Para que o ensaio fosse realizado nesta máquina, foram produzidas peças para submeter a amostra ao corte com as dimensões conforme mostra a Figura 3.30. Para se realizar medida de deslocamento, foram acopladas na mesa da máquina duas bases magnéticas com dois LVDT's e ambos os lados da amostra. Foram fixadas no centro do corpo de prova duas guias de aço onde eram apoiados os LVDT's e registrado o deslocamento da amostra. A configuração da medida do deslocamento pode ser vista na Figura 3.29. A velocidade de ensaio foi realizada pelo controle da subida do travessão a uma taxa de velocidade de 0,1 mm/min.

As amostras utilizadas para o ensaio de resistência ao cisalhamento são de dimensões de 100X100X400 mm. Para evitar a dispersão dos resultados foram induzidos entalhes ao redor de todas as amostras nas extremidades onde se apóiam as duas faces conforme pode ser visto na Figura 3.29. Esse entalhe foi produzido com a ajuda de uma serra de mármore com uma rotação do disco de 13 mil rpm. O diâmetro do disco diamantado de 110 mm e a espessura de 2 mm, com profundidade máxima de corte de 34 mm. A profundidade de corte do entalhe foi de 10 mm com uma variação da

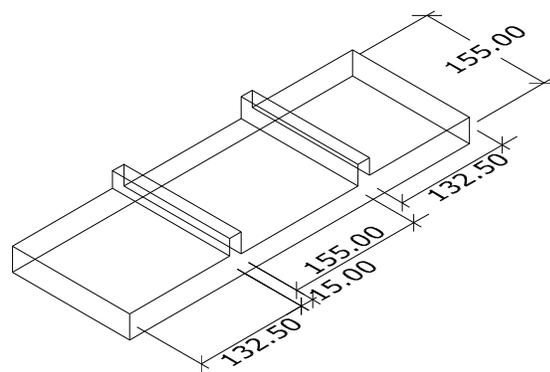
profundidade menor que 8 % para menos. A espessura média do entalhe foi de 2,4 mm com variação menor que 5 % para mais ou para menos.



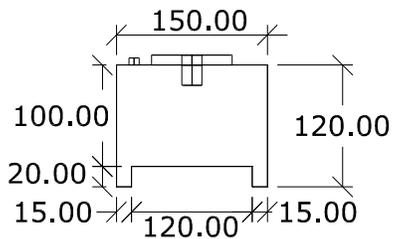
Figura 3.29 – Instrumentação do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento.



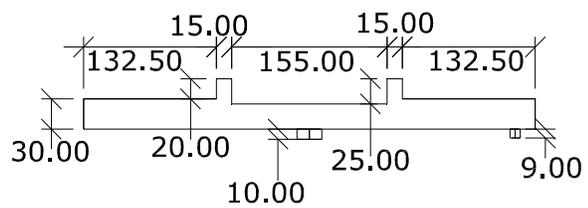
(a) Dimensões da parte superior (3D).



(b) Dimensões da parte inferior (3D).



(c) Dimensões da peça superior (vista frontal).



(d) Dimensões da peça inferior (vista frontal).

Figura 3.30 – Dimensões do setup utilizado para o ensaio de cisalhamento.

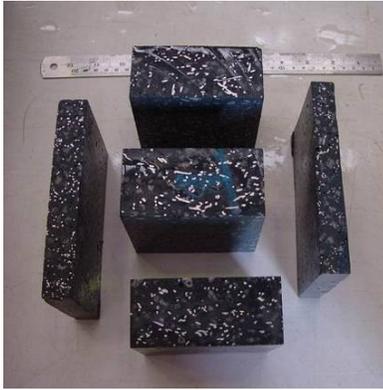
3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a análise da microestrutura dos concretos, foi utilizada microscopia eletrônica de varredura (MEV), com imagem de elétrons retro-espalhados e de elétrons secundários. Nas análises de MEV foi utilizado o modelo JEOL JSM-6460, pertencente ao Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFRJ. Voltagens de 15 e 20 kV foram utilizados no presente estudo.

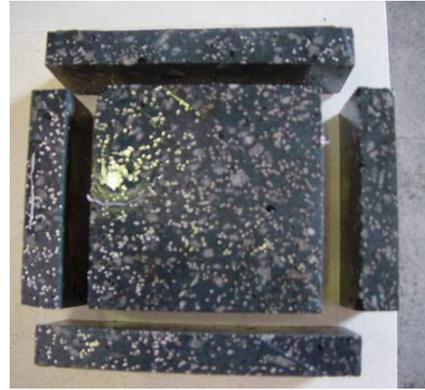
As amostras analisadas foram obtidas a partir dos concretos, utilizando-se para isso uma serra diamantada. A regularização da superfície foi realizada utilizando-se uma seqüência de lixas diamantadas, com granulometria de 400, 200, 100, 75, e 50 μm . Para a amostra metalizada foi utilizado o ouro. Na análise da zona de fratura utilizou-se baixo vácuo e as amostras não foram metalizadas.

3.8 Raios-X

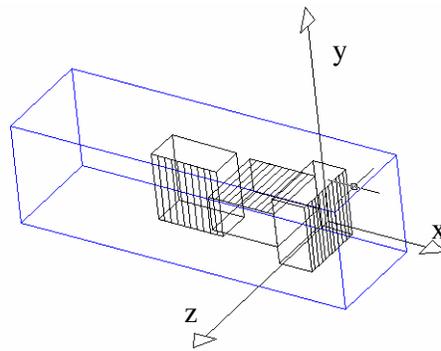
No ensaio de raios-X foi utilizado o equipamento modelo ANDREX LSG 419, pertencente ao IME (Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro), de tensão 200 kVp, com incidência do raios-x na amostra de 3 minutos a um frequência de 8 mA. As amostras foram retiradas de vigas com dimensões de 150x150x500 mm. As dimensões das amostras para o raios-X são de 100x100x50 mm. As posições em que as amostras foram tiradas das vigas são mostradas na Figura 3.31- c. As faces marcadas representam a direção na qual foi incidido o raios-X e representam as direções X, Y e Z. As amostras foram cortadas com auxílio de uma serra diamantada, descartando-se as faces externas conforme mostra a Figura 3.31- a e b.



(a) Amostra retirada perpendicular ao eixo da viga.



(b) Amostra retirada transversalmente ao eixo da viga.



(c) Posições retiradas na viga.

Figura 3.31 – Posições das amostras retiradas para ensaio de raios-X

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Propriedades do CAAF no estado fresco

4.1.1 Comportamento Reológico da Matriz Auto-Adensável

A Figura 4.1 apresenta o gráfico torque x velocidade de rotação obtida através do BTRHEOM para a matriz C0, juntamente com a regressão linear calculada através do modelo de Bingham. Pode ser observado que o ajuste foi realizado de maneira eficaz para o modelo utilizado. Através da reta apresentada na Figura 4.1 foram calculados a viscosidade plástica e a tensão de escoamento da matriz C0 pelo modelo citado.

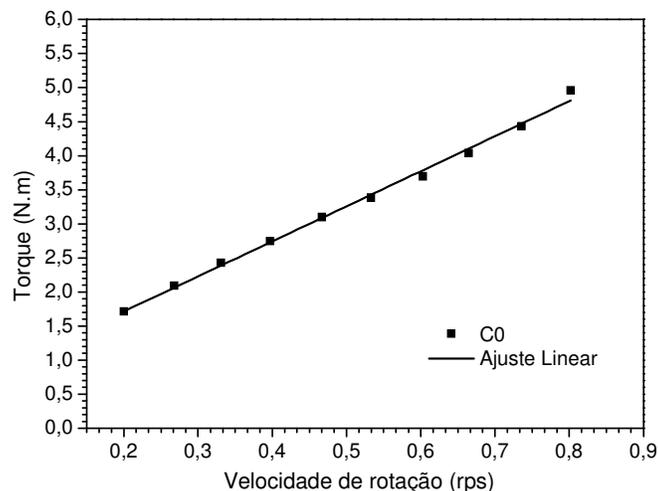


Figura 4.1 – Relação entre o torque e a velocidade de rotação da matriz C0

Os resultados obtidos para o comportamento reológico da matriz são condizentes com um CAA. Estes resultados estão de acordo com os parâmetros de CAA sugeridos por De Larrad [25], entre 200 e 300 Pa.s para a viscosidade plástica e menor que 500 Pa

para a tensão de escoamento. Os valores encontrados para a tensão de escoamento e a viscosidade plástica foram de , respectivamente, 191 Pa e 227 Pa.s.

4.1.2 Abatimento e espalhamento

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do abatimento do tronco de cone e do espalhamento para os concretos produzidos. O diâmetro médio de espalhamento para cada concreto, é determinado também através do ensaio de tronco de cone invertido de Abrans, e é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados do abatimento, espalhamento do tronco de cone e espalhamento do tronco de cone invertido.

Misturas	Abatimento (mm)	Espalhamento tronco de cone (mm).	Espalhamento do tronco de cone invertido (mm)
C0	280	755	765
C1,0	280	690	685
C1,5	265	650	650
C2,0	250	550	550

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4.1, os resultados obtidos encontram-se na faixa dos valores característicos de concretos auto-adensáveis (> 550 mm), conforme [2]. A adição de altas frações volumétricas de fibras ($\geq 1,5\%$) causou a diminuição do abatimento e do espalhamento da mistura de referência. Com 1,5 % de fibras houve uma redução de 5 % no abatimento e cerca de 14 a 15 % no espalhamento. Com 2 % de fibras, o abatimento diminuiu em torno de 10 % em relação à mistura C0. O espalhamento obteve uma variação mais significativa: para a mistura com maior teor de fibras, ele foi reduzido em cerca de 28 %.

A Figura 4.2 mostra a configuração final do ensaio de espalhamento de todos os concretos produzidos. Nota-se que até o volume de 1,5 % de fibras as misturas apresentaram boa retenção de água, sem exsudação e homogeneidade, com todos os ingredientes, inclusive as fibras, uniformemente distribuídas na massa de material espalhada. No concreto com 2 % de fibras, mesmo ocorrendo um espalhamento condizente com um CAA, ocorreu concentração das fibras e dos agregados graúdos na parte central do círculo de espalhamento, ou seja, o concreto não mostrou-se homogêneo. Ressalta-se, no entanto, que as fibras também se apresentam distribuídas ao longo de toda a área de espalhamento (Tabela 4.2).

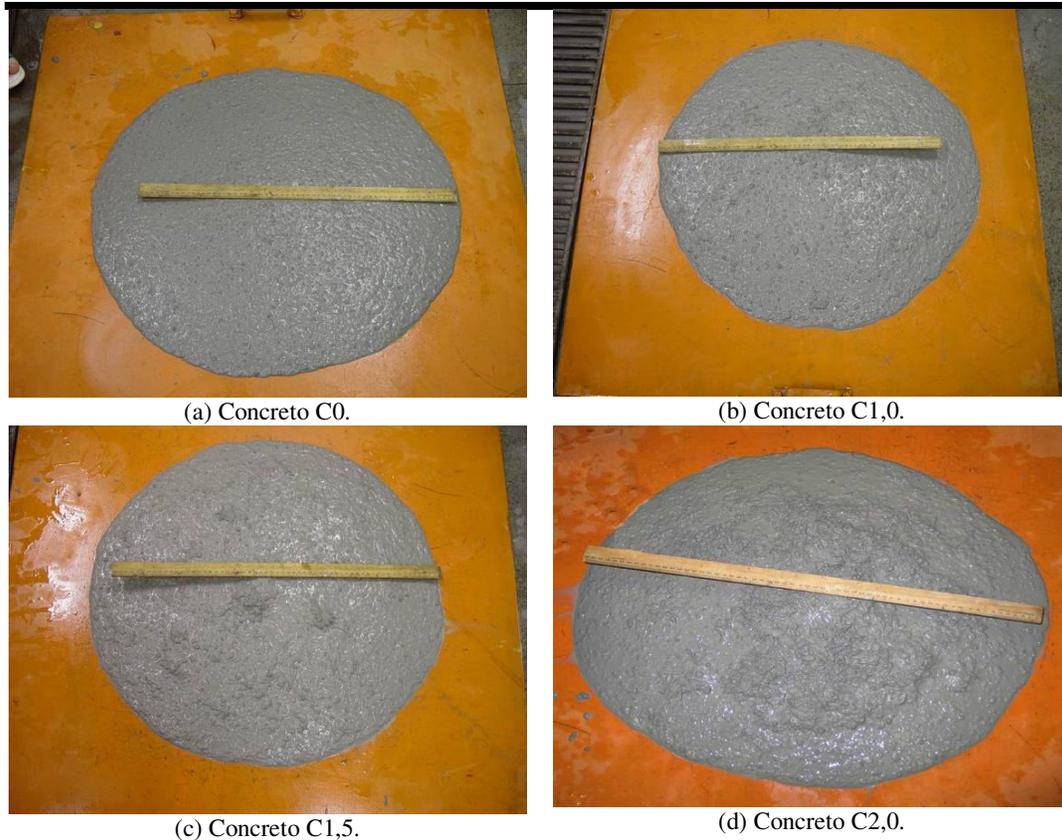


Figura 4.2– Amostras depois de submetida ao ensaio de abatimento e espalhamento.



Figura 4.3 – Visualização da distribuição dos ingredientes da mistura e retenção de água.

4.1.3 Escoamento na Caixa “L”

Os resultados experimentais do ensaio utilizando a caixa “L” são apresentados na Tabela 4.2. Para concretos auto-adensáveis, exige-se uma relação H_2/H_1 maior ou

igual a 0,8. Os resultados obtidos para o ensaio realizado sem barras indicam que todas as misturas possuem características de concretos auto-adensáveis, já que a relação H_1/H_2 varia de 0,85 a 1,0. Quando barras de aço foram colocadas como obstáculos ao fluxo dos concretos estudados, observou-se que a mistura C0, por não conter fibras, apresentou relação H_2/H_1 igual a 1,0 para todas as configurações de espaçamento entre barras estudadas. A mistura C1,0 mostrou-se auto-adensável para configurações utilizando até duas barras como anteparo. A mesma mistura sofreu bloqueio ao ser ensaiada com configuração utilizando três barras. A mistura C1,5 mostrou-se auto-adensável, com relação H_2/H_1 maior que 0,8, para a configuração com uma barra. Para a configuração utilizando duas barras, a mistura apresentou uma relação H_2/H_1 igual a 0,70. Esse valor é menor que o valor mínimo que se exige de uma mistura auto-adensável normal. Entretanto, segundo Nehdi [2], o valor mínimo aceitável para um CAAF é de 0,70. Essa mesma mistura C1,5 foi bloqueada ao ser ensaiada com configuração utilizando três barras de anteparo. A mistura C2,0, para todas as configurações contendo barras, mostrou-se não auto-adensável.

Tabela 4.2 – Resultados do ensaio da caixa “L”.

Misturas	Relação H_2/H_1			
	Sem barras	I barra	II barras	III barras
C0	1,00	1,00	1,00	1,00
C1,0	1,00	1,00	0,87	bloqueada
C1,5	0,95	0,91	0,70	bloqueada
C2,0	0,85	0,20	bloqueada	bloqueada

4.1.4 Fluidez no Funil “V”

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados do tempo de fluidez do funil “V” para as quatro misturas produzidas. Nota-se que com a adição de fibras o tempo de fluidez do concreto foi aumentando suavemente, sendo que para o concreto C2,0 houve bloqueamento na saída do funil. A fluidez do concreto através do funil “V” não depende somente da viscosidade do material, mas também da relação entre a dimensão máxima do agregado graúdo e a dimensão da abertura inferior do funil. Em todos os ensaios notou-se boa fluidez dos concretos, excetuando-se a mistura C2,0.

Tabela 4.3 – Resultado do tempo de fluidez do funil “V”.

Mistura	Tempo de fluidez (s)
C0	24
C1,0	25
C1,5	31
C2,0	Bloqueada

4.1.5 Auto-Nivelamento e Resistência à Segregação no Ensaio do Tubo “U”

Os ensaios no tubo “U” foram realizados para verificar tanto a capacidade de auto-nivelamento das misturas quanto o seu potencial de resistência à segregação.

Os concretos no estado fresco apresentaram-se fluidos o suficiente para que, quando lançados no tubo, preenchessem totalmente sua circunferência sem deixarem vazios. Para as misturas C1,0 e C1,5, obteve-se uma relação de auto-nivelamento (H_2/H_1) igual a 1,00. Para as misturas C0 e C2,0 essa relação foi de 0,95 e de 0,92, respectivamente. As alturas H_2 e H_1 para os concretos produzidos podem ser observadas na Figura 4.4, que mostra a posição final após o lançamento das misturas no tubo “U”.

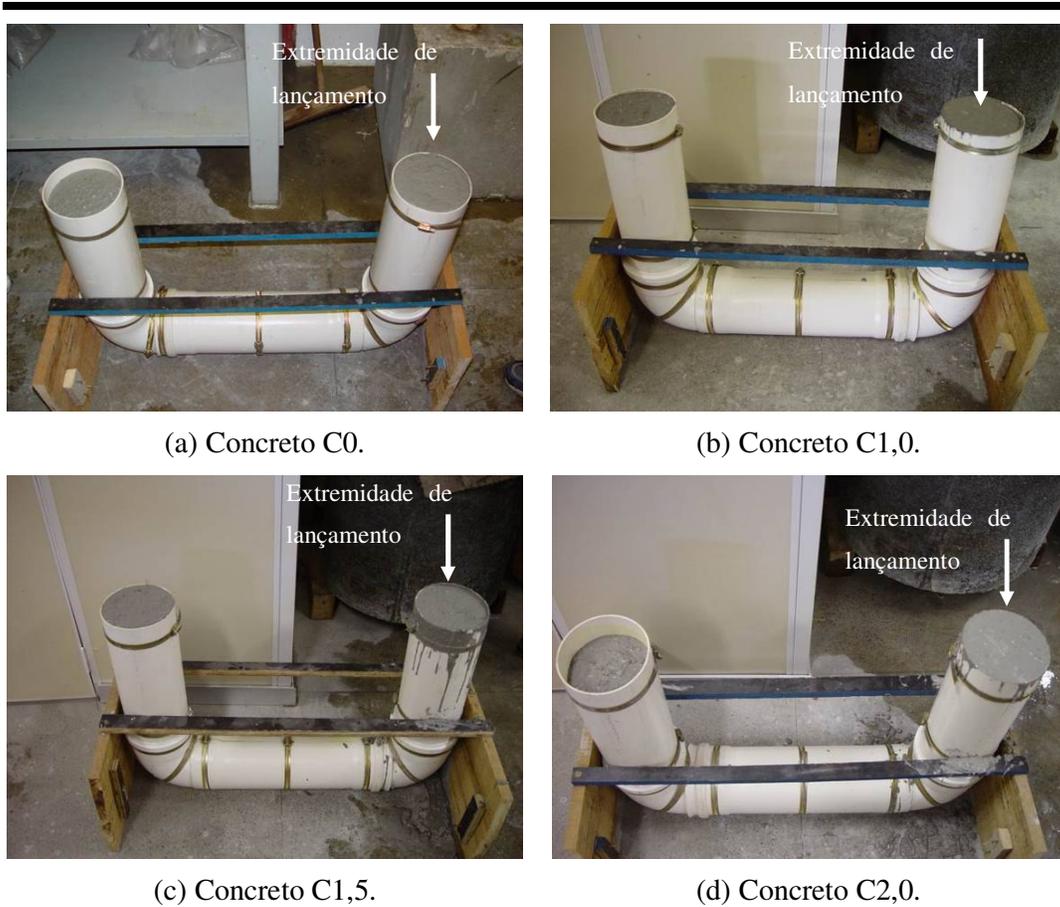
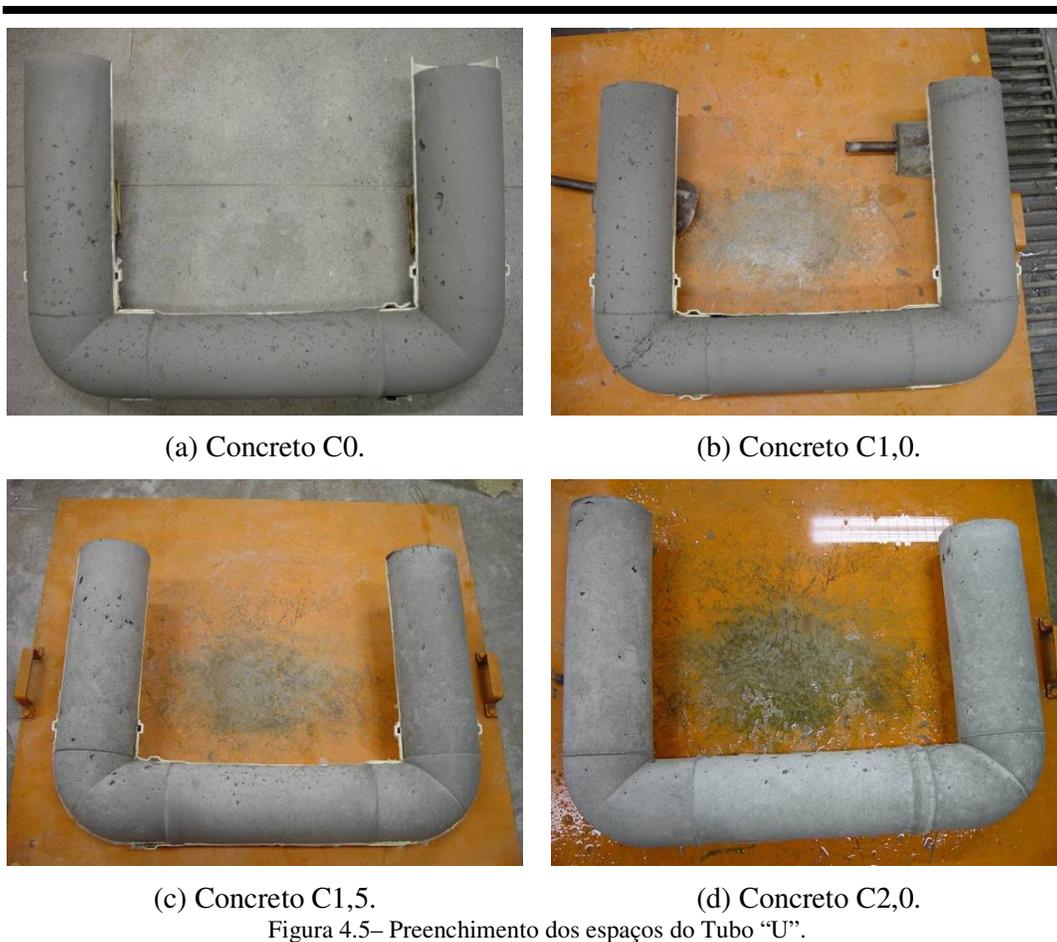


Figura 4.4 – Configuração final do concreto após o término do lançamento do concreto no Tubo “U”.

A Figura 4.5 mostra o concreto após a retirada do molde de PVC (24 horas após a moldagem). Nota-se que o concreto preencheu todos os espaços do tubo.



Os resultados experimentais referentes à absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente são apresentados na Tabela 4.4, para todas as amostras retiradas do tubo “U”. Os resultados são, portanto, a média de 20 amostras ensaiadas. Para cada mistura, foram calculados o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados, valores esses apresentados na Tabela 4.4. Para todos os índices físicos calculados, os valores de coeficiente de variação obtidos foram bastante baixos, indicando que os concretos apresentaram grande homogeneidade. Isso indica que a mistura, no estado fresco, não apresentou segregação.

Ao se adicionar 1 % de fibras ao concreto, ele apresentou maior absorção de água e maior índice de vazios, para as amostras retiradas do tubo. Ao aumentar-se esse teor de fibras, as amostras apresentaram a tendência de redução em sua absorção de água e em seu índice de vazios. A mistura com 1 % de fibras apresentou a maior

quantidade de ar incorporado, resultando em um maior índice de vazios e maior absorção de água. À medida que se aumentava o teor de fibras, a massa específica aparente também sofria aumento.

Tabela 4.4 – Valores médios dos índices físicos de todas as amostras carotadas do tubo “U”.

Mistura	Absorção de Água (%)			Índice de Vazios (%)			Massa Especifica Aparente (g/cm ³)		
	Média	DP.	CV.	Média	DP.	CV.	Média	DP.	CV.
C0	3,81	0,04	1,07	8,48	0,09	1,09	2,22	0,00	0,19
C1,0	4,30	0,12	2,85	9,51	0,24	2,57	2,21	0,01	0,24
C1,5	3,99	0,03	0,69	9,01	0,03	0,34	2,26	0,01	0,28
C2,0	3,57	0,01	0,38	8,24	0,04	0,54	2,31	0,02	0,93

4.1.6 Teor de Ar Aprisionado

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados obtidos para a quantidade de ar aprisionado no concreto. Os valores obtidos situaram-se entre 3 e 6 %, estando dentro da faixa recomendada na literatura [78]. Ao contrário do que se esperava, com o aumento do volume de fibras de 1,0 para 1,5 % e de 1,5 para 2,0 % o ar aprisionado foi reduzido.

Tabela 4.5 – Resultado do ensaio do teor de ar.

Mistura	Ar aprisionado (%)
C0	4,0
C1,0	6,0
C1,5	5,0
C2,0	3,0

4.2 Propriedades Mecânicas

4.2.1 Resistência à Compressão

As curvas médias de tensão x deformação para os concretos estudados são apresentadas na Figura 4.6.

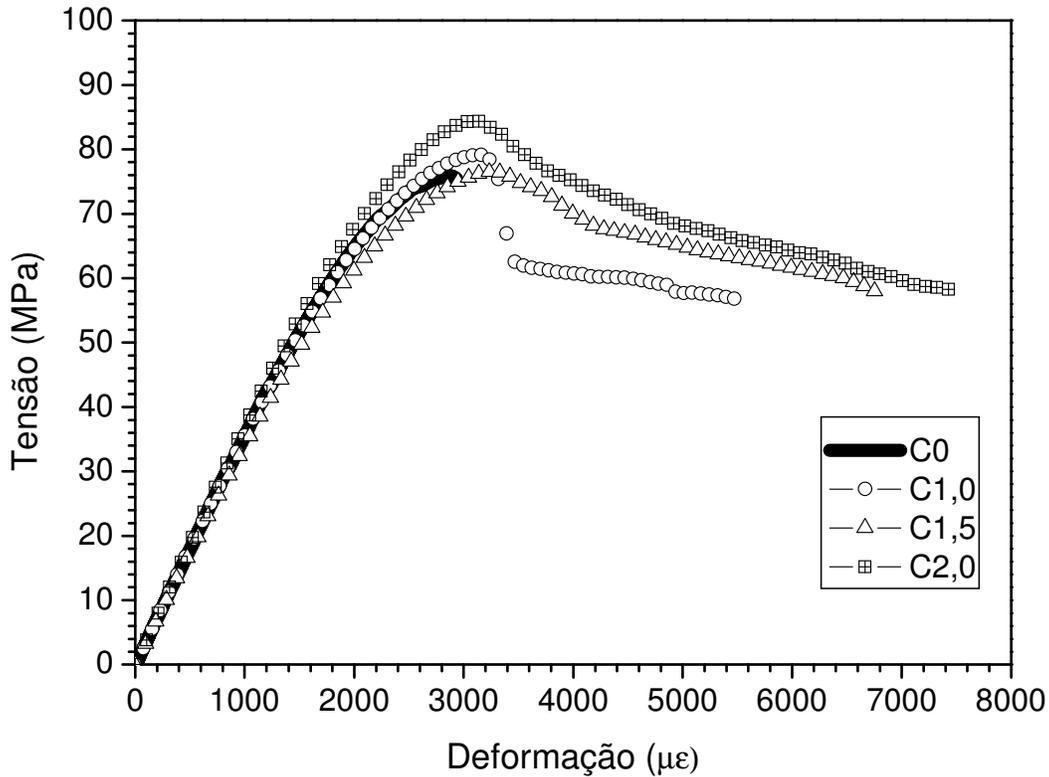


Figura 4.6 – Curva tensão x deformação média à compressão dos concretos aos 28 dias (C0; C1,0; C1,5; C2,0).

A Tabela 4.6 apresenta os valores médios de resistência à compressão (f_c), módulo de elasticidade (E), deformação axial de pico (ϵ_a) e coeficiente de Poisson com seus respectivos coeficientes de variação (CV), obtidos através do ensaio de três corpos-de-prova cilíndricos ($d= 100$ mm; $h= 200$ mm) para cada mistura.

Tabela 4.6 – Valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, deformação axial e coeficiente de Poisson.

Misturas	Resistência à Compressão (MPa)		Deformação Axial na Tensão de Pico ($\mu\epsilon$)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Coeficiente de Poisson	
	f_c	CV	ϵ	CV	E	CV	ν	CV.
C0	75,93	0,68	2866	0,72	35,78	4,79	0,20	1,31
C1,0	78,35	1,50	3128	1,22	34,74	5,58	0,20	7,79
C1,5	77,17	1,70	3268	1,53	34,37	1,20	0,19	7,77
C2,0	85,36	0,05	3096	0,10	37,57	4,33	0,20	2,63

Nota-se na Tabela 4.6 que a resistência à compressão média obtida experimentalmente manteve-se ligeiramente inferior (cerca de 5 %) à resistência à compressão da matriz especificada na dosagem da mistura, que foi de 80 MPa.

De acordo com a Tabela 4.6 e a Figura 4.6, observa-se que o concreto C2,0 apresentou melhor desempenho quando submetido a esforços de compressão, em comparação com as outras misturas. Aos 28 dias de idades a resistência à compressão média da mistura C2,0 foi 12 % maior do que o valor da mistura de referência C0. As misturas C1,0 e C1,5 apresentaram, respectivamente, resistência à compressão 3,2 % e 1,6 % maiores do que a resistência à compressão da mistura C0.

Quanto ao módulo de elasticidade, também não houve uma variação considerável ao se adicionar fibras, sendo a variação máxima de 5 % para a mistura C2,0. Os coeficientes de Poisson mantiveram-se aproximadamente iguais para todas as misturas.

A deformação axial de pico obteve uma máxima deformação de 12 % ao se acrescentar fibras na mistura. Quanto mais fibras eram adicionadas, mais suave foi o decréscimo da resistência pós-pico. Isso significa um aumento na capacidade de absorção de energia do material.

Todos os coeficientes de variação calculados foram bastante baixos, o que mostra a consistência dos ensaios experimentais.

A Figura 4.7 mostra o modo de fratura de corpos-de-prova submetidos a ensaio de compressão uniaxial. Os concretos fibrosos (Figura 4.7- b, c e d) apresentaram a formação de várias fissuras, o que comprova a eficácia da ação das fibras em resistir aos esforços após a fissuração da matriz, resultando em um aumento da tenacidade e da resistência última do concreto. Para o concreto C0, observou-se uma ruptura frágil.



(a) Amostras ensaiadas à compressão (C0).



(b) Amostras ensaiadas à compressão (C1,0).



(c) Amostras ensaiadas à compressão (C1,5).



(d) Amostras ensaiadas à compressão (C2,0).

Figura 4.7 – Modo de fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de compressão uniaxial.

4.2.2 Resistência à Flexão

As curvas médias de carga x deslocamento do ensaio experimental de resistência à flexão para os concretos estudados são apresentadas na Figura 4.8. A adição de fibras fez com que o comportamento do concreto, que era frágil, passasse a ser dúctil. Observa-se claramente que as fibras, além de aumentarem significativamente a tensão última dos concretos, proporcionaram a eles maior tenacidade.

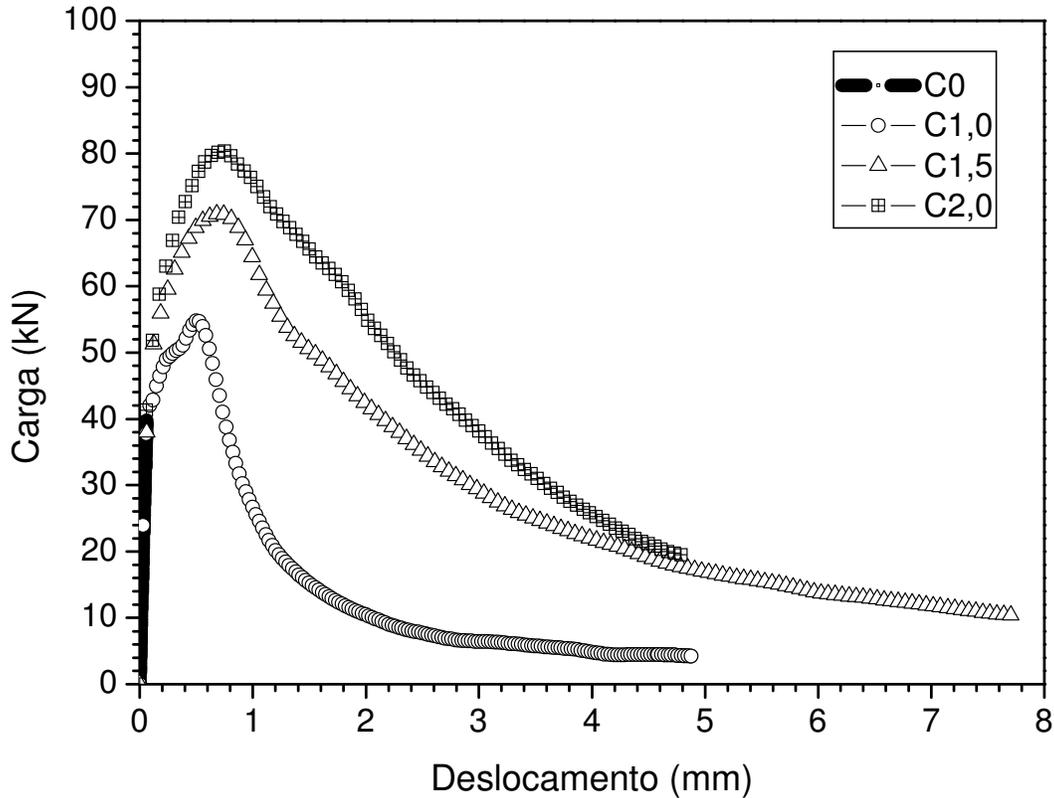


Figura 4.8 – Curva Carga x Deslocamento média à flexão dos concretos aos 28 dias (C0; C1,0; C1,5; C2,0).

A Tabela 4.7 apresenta os resultados experimentais médios com seus respectivos coeficientes de variação, de resistência à flexão de primeira fissura (σ_{cr}) e de máxima resistência pós-fissura (σ_u), assim como de deflexão de primeira fissura (δ_{cr}) e de deflexão na tensão de pico (δ_u).

Tabela 4.7 – Resultados experimentais médios dos ensaios de resistência à flexão e deformação.

Misturas	Tensão de Primeira Fissura				Máxima Tensão Pós Fissuração		
	σ_{cr} (MPa)	CV (%)	δ_{cr} (mm)	CV (%)	σ_u (MPa)	CV (%)	δ_u (mm)
C0	11,42	4,76	0,06	0,21	11,42	4,76	0,06
C1,0	11,87	0,32	0,06	1,44	17,61	0,30	0,50
C1,5	12,62	1,10	0,07	0,98	21,45	5,11	0,63
C2,0	13,07	1,60	0,06	1,61	24,38	6,65	0,77

Analisando-se a Tabela 4.7, percebe-se que a tensão de primeira fissura foi aumentando suavemente conforme o volume de fibras era aumentado, enquanto o deslocamento de primeira fissura manteve-se constante. O máximo acréscimo da tensão de primeira fissura foi de 14 % em relação à mistura C0. No que diz respeito à máxima

tensão pós-fissuração, a adição de fibras foi extremamente benéfica. Em relação à máxima tensão pós-fissuração da mistura C0, os aumentos percentuais obtidos para as outras misturas foram: 54 % para a mistura C1,0, 88 % para a mistura C1,5 e 113 % para a mistura C2,0. O deslocamento correspondente à máxima tensão pós-fissuração também sofreu um aumento considerável com o aumento do volume de fibras adicionadas à mistura. Para a mistura C0, o deslocamento pós-fissura foi de 0,060 mm, enquanto que para a mistura com maior teor de fibra, C2,0, foi de 0,765 mm. Estes resultados ilustram a contribuição importante que as fibras de aço conferem aos concretos auto-adensáveis obtidos neste trabalho. Os coeficientes de variação dos parâmetros da Tabela 4.7 são baixos, o que indica a boa repetibilidade dos resultados.

A tenacidade é definida como a capacidade de absorção de energia do material. Existem diferentes metodologias para se calcular a tenacidade de um concreto. Nesse trabalho, utilizaram-se dois métodos de cálculo para o índice de tenacidade, um de acordo com a ASTM C1018 e o outro de acordo com a NBN B15-238.

Segundo a ASTM C1018, o índice de tenacidade é obtido dividindo-se a área total sob a curva carga-deslocamento até um determinado valor de deslocamento pela área sob a mesma curva até o ponto em que se dá a primeira fissura, referente ao trecho linear (elástico). Utilizam-se como pontos de delimitação das áreas valores múltiplos da deformação relativa ao surgimento da primeira fissura. Assim, por exemplo, o índice I_5 se refere à relação entre as áreas OACD e OAB, onde o ponto D corresponde a um deslocamento igual a 3 vezes o deslocamento que ocorre na primeira fissura (Figura 4.9, traçada para um material elasto-plástico ideal) [81]. Os índices I_{10} , I_{20} e I_{30} referem-se respectivamente a 5,5, 10,5 e 15,5 vezes o deslocamento da primeira fissura.

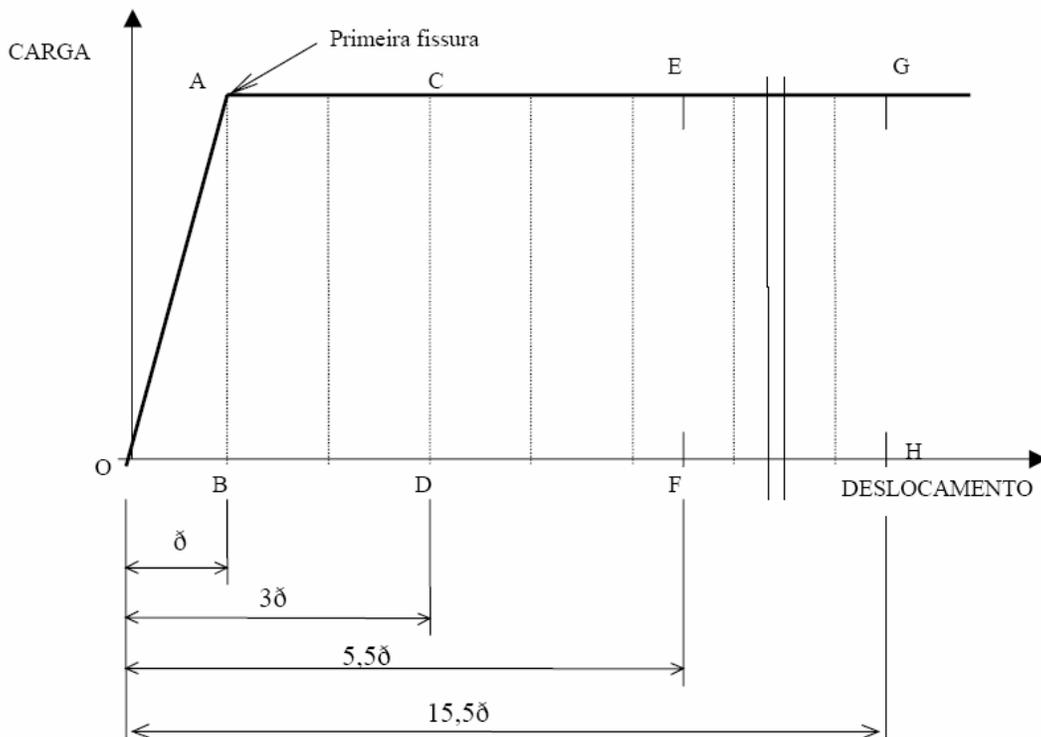


Figura 4.9 – Curva carga por deslocamento da norma ASTM C1018 (1994) [81].

A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos para os índices de tenacidade calculados de acordo com a norma ASTM C1018. Pode-se notar que os índices I_{20} e I_{30} , e, em menor grau, I_5 e I_{10} , indicam um aumento na capacidade de absorver energia dos concretos com o aumento do volume de fibras. Por exemplo, aumentos de cerca de 25 % e 27 % foram observados em I_{20} e I_{30} quando a fração volumétrica de fibras aumentou de 1,0 % para 1,5 %. Aumentos de 32 % e 49 % foram observados nos mesmos índices quando a fração volumétrica aumentou de 1,0 % para 2,0 %. A capacidade de I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} de também indicarem a forma da curva carga-deflexão e, portanto, o comportamento do material, pode ser vista comparando-se os seus valores com os níveis elasto-plásticos de referência. De acordo com a ASTM C 1018, variar o comportamento de um material de elástico para elasto-plástico corresponde a variar I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} de, respectivamente, 1 para 5, 1 para 10, 1 para 20 e 1 para 30. Se o material tem um comportamento elasto-plástico com endurecimento (“work hardening”), os valores dos índices serão maiores que 5, 10, 20 e 30. Os resultados obtidos para as misturas C1,0, C1,5 e C2,0 mostram que os índices da ASTM levaram a uma boa

condição da forma da curva carga-deflexão apresentada na Figura 4.8. para as misturas estudadas os índices tornaram-se gradualmente mais altos que os níveis de referência indicando um endurecimento (“strain hardening”) do material até uma deflexão de cerca de 1,0 mm. Os índices não foram capazes de indicar o subsequente amolecimento (“strain softening”) das misturas estudadas

Tabela 4.8 – Índices de tenacidade calculados de acordo com a norma ASTM C 1018.

Misturas	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	I ₃₀
C1,0	4,92	10,59	23,22	33,48
C1,5	5,70	12,80	28,92	42,55
C2,0	5,82	13,28	30,76	49,99

A norma Belga NBN B15-238 propõe outro método de cálculo de tenacidade. Segundo essa norma, a tenacidade, é dada pelas relações entre cargas $P^* = P_n / P_f$, onde P_f é o valor referente à carga de primeira fissura e P_n são as cargas referentes a determinados valores de deslocamento, sendo no presente estudo $n = 0,125; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0$ e 4,5 mm.

Os índices de tenacidade calculados segundo a norma Belga são apresentados na Tabela 4.9, e demonstram adequadamente o comportamento elasto-plástico com endurecimento dos concretos estudados. Esses índices também se mostram eficientes para indicarem os amolecimentos subsequentes observados nas curvas carga-deflexão (ver Figura 4.8).

Para a mistura C1,0, por exemplo, os índices indicam um comportamento elasto-plástico com endurecimento até uma deflexão de cerca de 0,75 mm. O índice da relação entre cargas P^* calculado para deflexão de 1,0 mm foi capaz de identificar a ocorrência do amolecimento (“strain softening”) da curva carga x deflexão.

Para as misturas C1,5 e C2,0 os valores máximos de P^* também ocorrem para uma deflexão de 0,75 mm. Deve-se notar, no entanto, que valores de P^* inferiores a 1,0 só são observados para a mistura C1,5 quando a deflexão é de 3 mm. Para a mistura C2,0, a relação entre cargas P^* calculada para a mesma deflexão ainda é de 1,0.

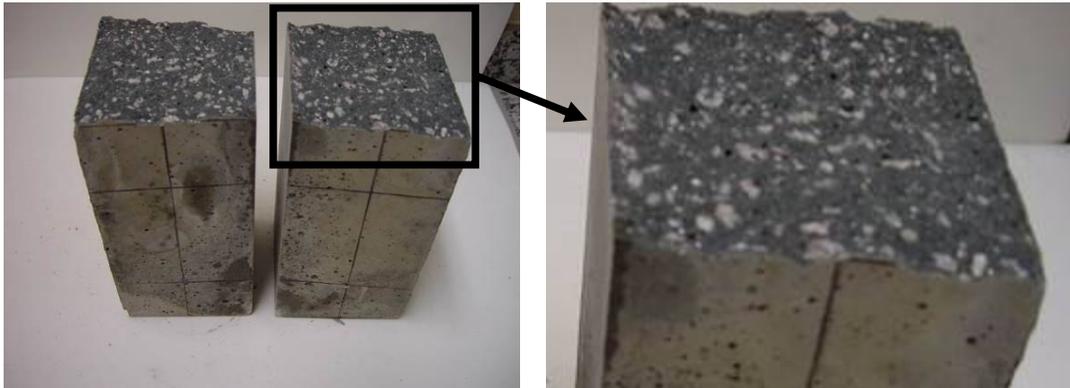
Os índices P^* obtidos para a mistura C2,0 têm valores consideravelmente mais altos, para todas as deflexões referentes as quais eles foram calculados, indicando o

efeito benéfico do uso de elevadas frações volumétricas de reforço na capacidade de absorver energia do material.

Tabela 4.9 – Índices de tenacidade calculados de acordo com a norma Belga.

Misturas	Índices de Tenacidade Calculados de Acordo com a NBN B15-238							
	Relações entre Cargas P*							
	0,125 mm	0,25 mm	0,75 mm	1,0 mm	1,5 mm	2 mm	3 mm	4,5 mm
C1,0	1,17	1,34	1,53	0,78	0,44	0,30	0,18	0,11
C1,5	1,35	1,57	1,81	1,67	1,32	1,11	0,76	0,48
C2,0	1,42	1,70	2,01	1,99	1,72	1,45	1,00	0,55

A Figura 4.10 e a Figura 4.11, mostram o modo de fratura dos corpos-de-prova submetidos à flexão em quatro pontos.



(a) Amostra ensaiada à flexão (C0).

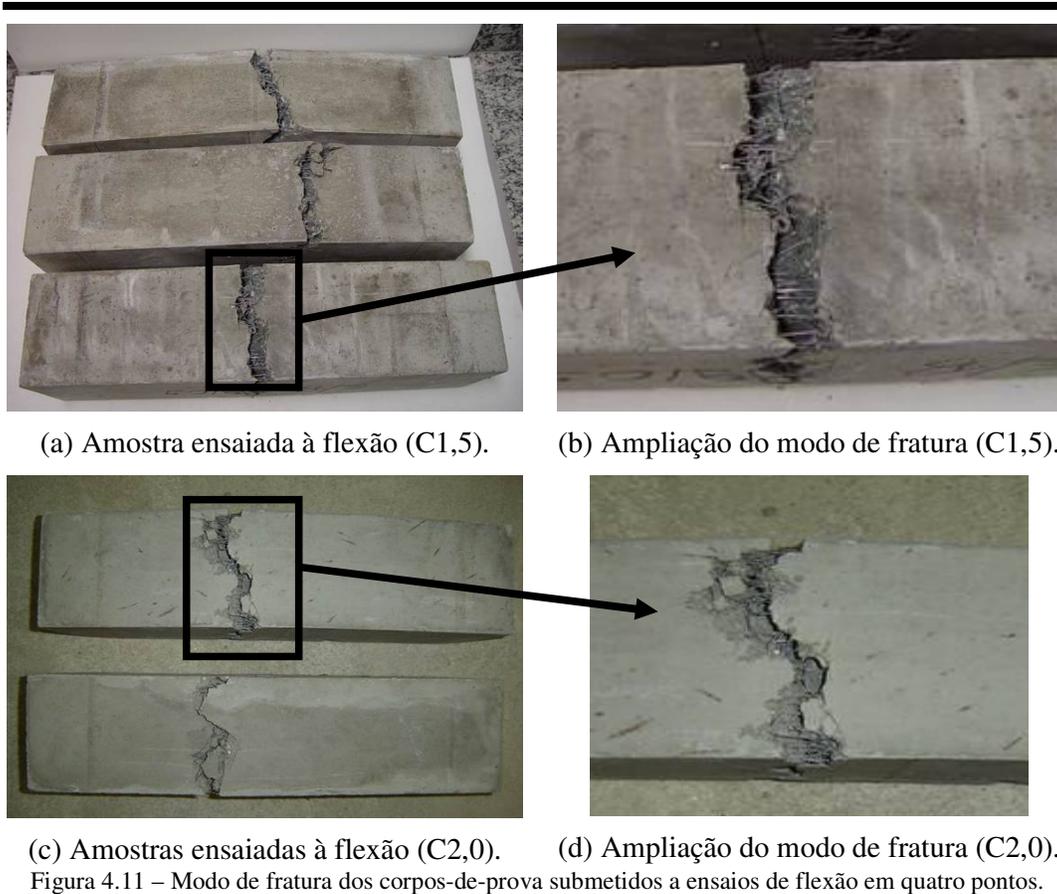
(b) Ampliação do modo fratura (C0).



(c) Amostras ensaiadas à flexão (C1,0).

(d) Ampliação do modo de fratura (C1,0).

Figura 4.10 – Modo de fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de flexão em quatro pontos.



Nota-se na Figura 4.10 e na Figura 4.12 a formação de uma fissura no terço central, a qual teve sua abertura restringida pelas fibras, nos concretos C1,0, C1,5 e C2,0. De forma diferente, a matriz C0 apresentou uma ruptura brusca, tendo o prisma se dividido em duas partes.

4.2.3 Resistência ao Cisalhamento

A Figura 4.12 mostra as curvas típicas de carga x deslocamento dos concretos produzidos quando submetidos ao ensaio de resistência ao cisalhamento.

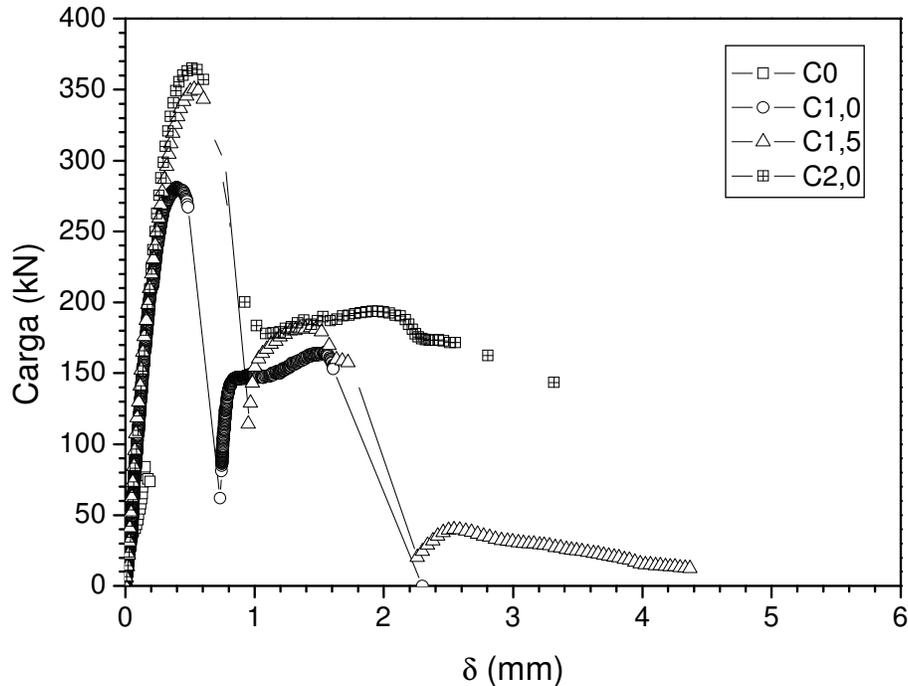


Figura 4.12 – Curva Carga x Deslocamento típicas de resistência ao cisalhamento após 90 dias (C0; C1,0; C1,5; C2,0).

A Tabela 4.10 apresenta os resultados experimentais médios de carregamento de pico para cada tipo de concreto ensaiado à resistência ao cisalhamento, com seus respectivos coeficientes de variação. As tensões últimas de cisalhamento são também apresentadas na tabela, assim como os respectivos deslocamentos e relações das tensões últimas de cisalhamento das diferentes frações volumétricas em relação à da matriz. A tensão última de ruptura ao cisalhamento foi calculada a partir dos valores de carregamento assumindo uma resposta elástica do material.

Conforme apresentado na Tabela 4.10, nota-se um aumento da tensão de cisalhamento com o aumento da fração volumétrica de fibras. Quando comparado o concreto fibroso com a matriz de referência, observa-se um aumento da tensão de cisalhamento de 3,79; 4,38 e 4,82 vezes para frações volumétricas de fibras de 1; 1,5 e 2 %, respectivamente. Isso demonstra que a adição de 1,0 % de fibras já promove considerável aumento na resistência ao cisalhamento da matriz. O uso de frações maiores embora não cause alteração significativa nessa resistência, causa o aumento da tensão pós-pico e da tenacidade ao cisalhamento do material. Por exemplo, a máxima carga pós-pico da mistura C2,0 é cerca de 2,66 vezes maior que a carga de pico da matriz (C0). Nota-se também que apenas para elevadas deflexões, cerca de 2 mm para a

mistura C2,0 e 1,5 mm para C1,0 e C1,5, começa a ocorrer a redução da máxima carga pós-pico dos concretos fibrosos.

Tabela 4.10 – Resultados experimentais de resistência ao cisalhamento.

Misturas	Resistência ao Cisalhamento			
	Carga kN - CV	τ_u - CV	δ_u - CV	τ_{ci}/τ_{c0}
C0	78,73 – 7,35	5,54 – 3,36	0,21 – 5,20	1,0
C1,0	295,50 – 10,56	21,39 – 10,40	0,33 – 6,30	3,79
C1,5	341,83 – 8,15	24,75 – 14,66	0,43 – 4,19	4,38
C2,0	364,40 – 2,47	27,23 – 8,81	0,49 – 3,79	4,82

A Figura 4.13 mostra a relação entre a tensão de cisalhamento e o volume de fibras do concreto. Usando a regressão não-linear, a tensão de cisalhamento última do concreto pode ser expressa como função da fração volumétrica de fibras, conforme a equação:

$$\tau_u = 30,59 - (25,04 * 0,37^{V_f})$$

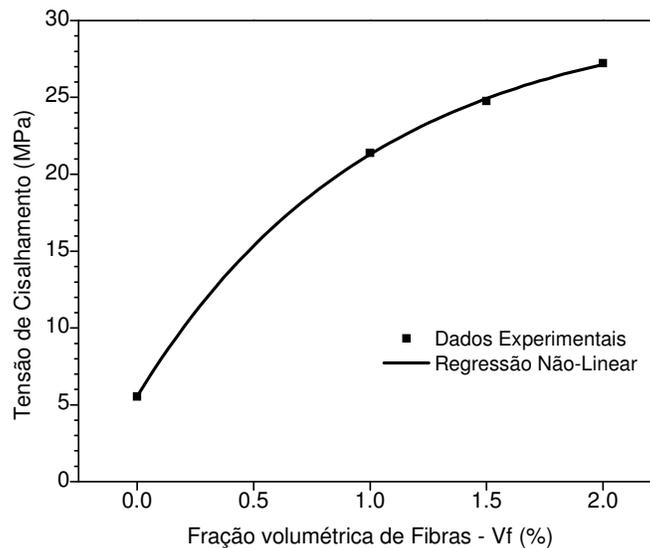
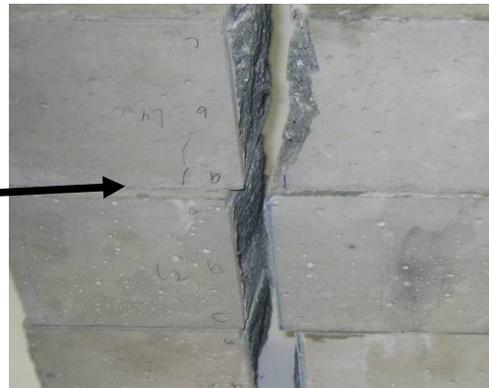


Figura 4.13 - Tensão de cisalhamento como função da fração volumétrica de fibras.

A Figura 4.14 e a Figura 4.15 mostram o modo de fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de cisalhamento. Nota-se na Figura 4.14 - a que as seções submetidas ao corte cisalhante da matriz C0 foram separadas quando rompidas, dividindo os prismas em partes. Já para os concretos com fibras (Figura 4.14 - c e Figura 4.15 - a e c), nas seções submetidas ao cisalhamento a abertura das fissuras foi restringida pelas fibras, que “costuraram” as partes do concreto, impedindo-as de se separarem completamente.



(a) Amostras ensaiadas ao cisalhamento C0.



(b) Ampliação da zona fraturada C0.



(c) Amostras ensaiadas ao cisalhamento C1,0.



(d) Ampliação da zona fraturada C1,0.

Figura 4.14 – Modo de Fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de cisalhamento.

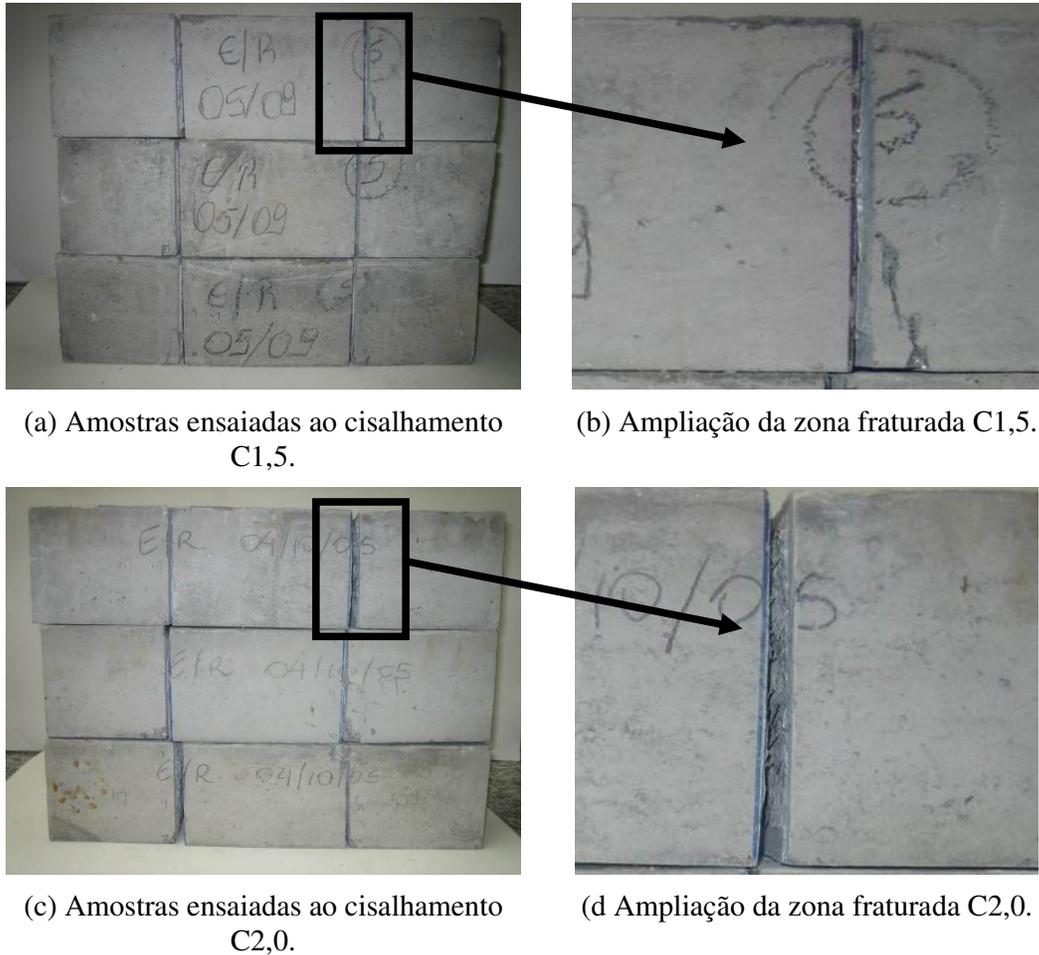


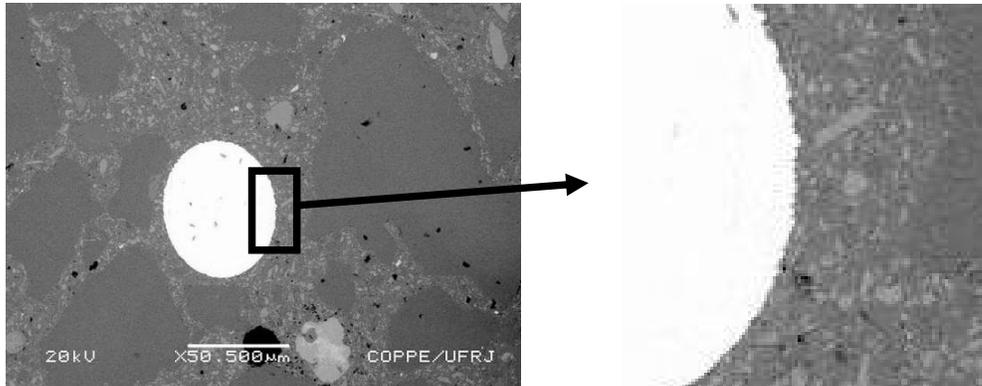
Figura 4.15 – Modo de Fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de cisalhamento.

4.2.4 Análise Microestrutural

A Figura 4.16 mostra a análise da micro-estrutura de interface dos concretos fibrosos. A amostra da Figura 4.16- a foi ensaiada em baixo vácuo sem metalização e a amostra da Figura 4.16 – b foi ensaiada em alto vácuo com metalização a ouro.

Na Figura 4.16- a e b nota-se uma boa aderência na interface fibra-matriz, o que demonstra uma boa homogeneidade e baixa porosidade da mistura. Uma boa aderência fibra-matriz proporciona um aumento na capacidade de resistência do concreto resultando em um comportamento de múltipla fissuração, o que pode ser observado na Figura 4.17 - a e b. Nota-se também a perda de aderência da fibra com a matriz (Figura 4.17 - a), e fissuras perpendiculares às fibras (Figura 4.16- d). Esse comportamento

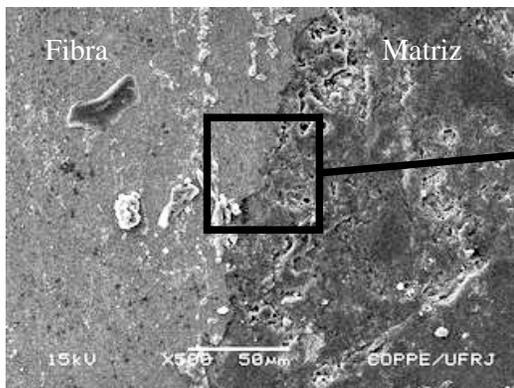
mostra que a fibra proporciona uma ligação entre diferentes partes da matriz após a formação de fissuras, transferindo as tensões pela aderência e resistência da fibra, até que uma delas seja solicitada até sua carga crítica.



(a) Vista da interface entre a seção transversal da fibra e a matriz.



(b) Ampliação da interface.

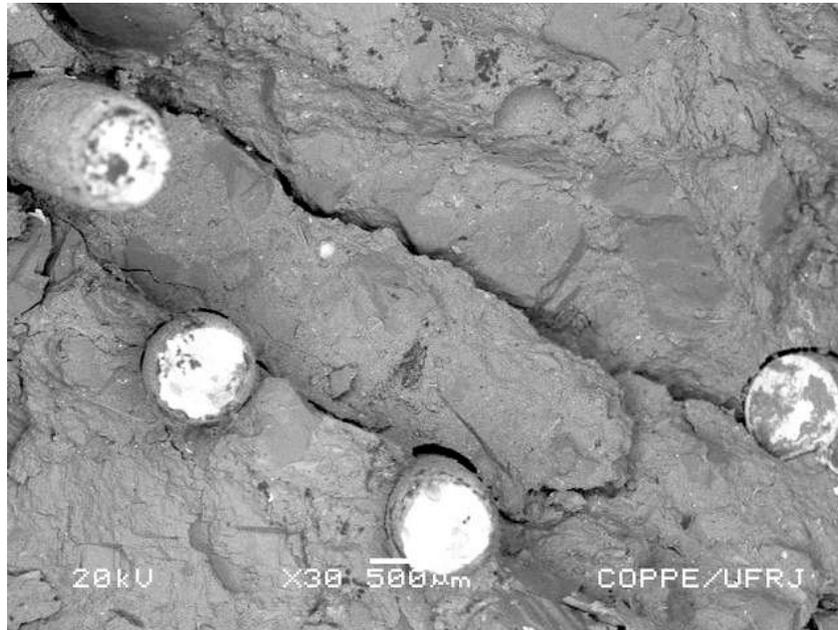


(c) Vista da interface lateral da fibra e o concreto.



(d) Ampliação da interface

Figura 4.16 – Análise de micrografia de amostras de concreto original.



(a) Vista 1 da superfície de fratura do concreto.



(d) Vista 2 da superfície de fratura do concreto

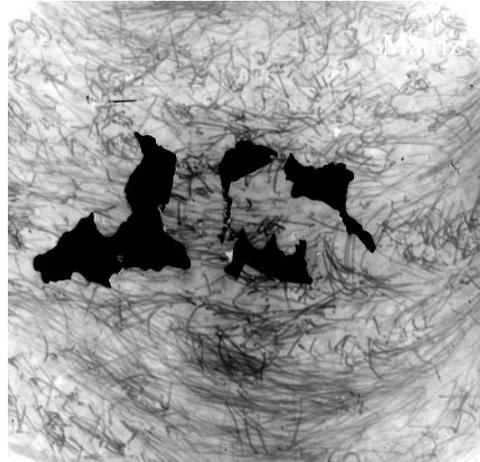
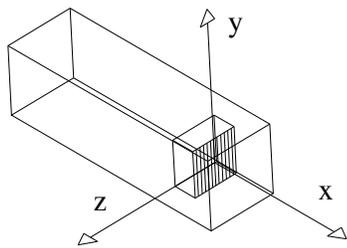
Figura 4.17 – Análise de micrografia de amostras de concreto na zona de fratura.

Nota: A – Fibra; B – Microfissuração da matriz.

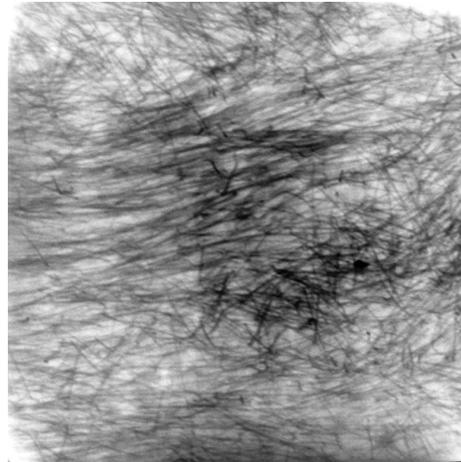
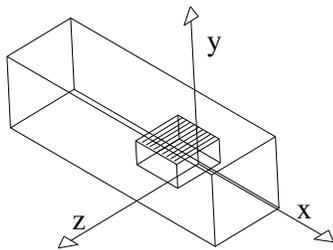
4.2.5 Dispersão das Fibras Utilizando Imagens de Raios-X

A Figura 4.18 mostra imagens de raios-X da distribuição de fibras do concreto com 2 % de fibras visto nos eixos x, y e z. Pode ser observado que a distribuição de fibras se deu de forma uniforme para as três direções. Para os concretos reforçados com 1,0 e 1,5 % de fibras foi observado o mesmo comportamento. As imagens de raios-X dos concretos C1,0 e C1,5 encontram-se na Figura 4.19 e Figura 4.20, respectivamente. As manchas pretas encontradas nas imagens de raios-X surgiram devido ao armazenamento de todas as imagens juntas, o que proporcionou a colagem das imagens. Devido a esse problema, as manchas foram formadas ao tentar-se desprender uma imagem da outra.

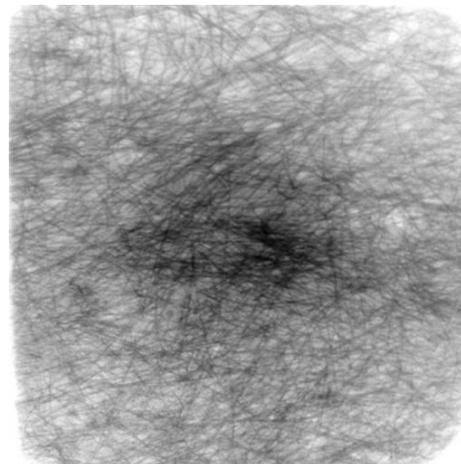
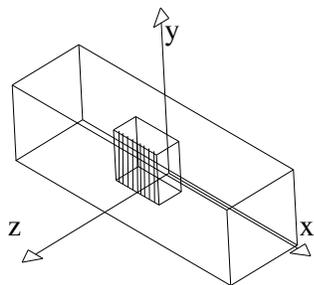
Como caráter comparativo são apresentadas na Figura 4.21 imagens de raios-X (Bentur e Mindess [44]) obtidas de seções similares às mostradas no presente trabalho, porém, de concreto convencional fibroso.



(a) Vista do eixo x.

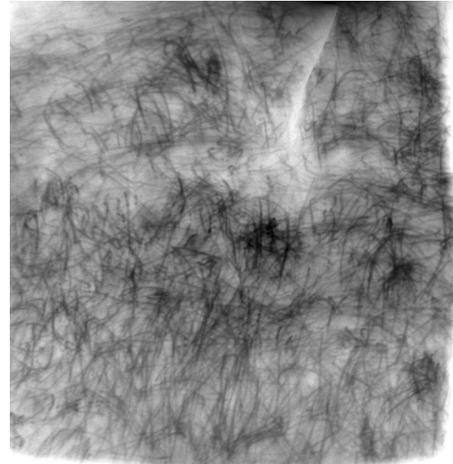
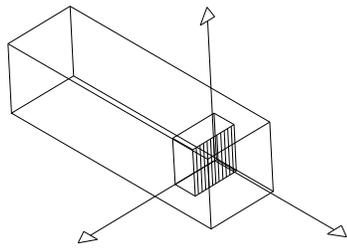


(b) Vista do eixo y.

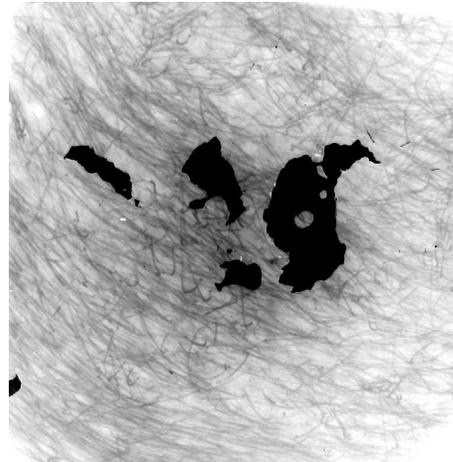
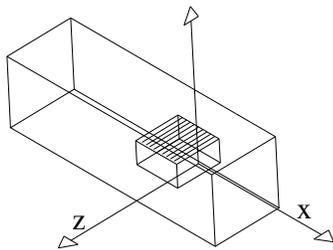


(c) Vista do eixo z.

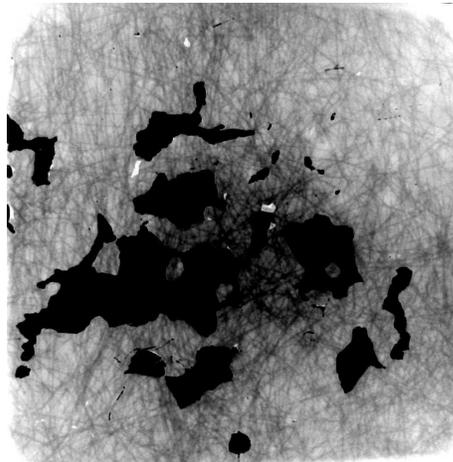
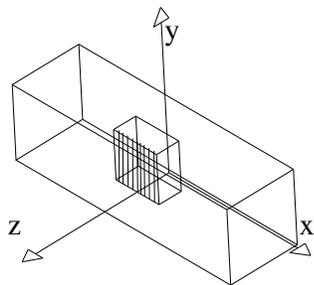
Figura 4.18 – Imagens de raios-X mostrando a distribuição das fibras do concreto com 2 % de fibras vista nos diferentes planos.



(a) Vista do eixo x.

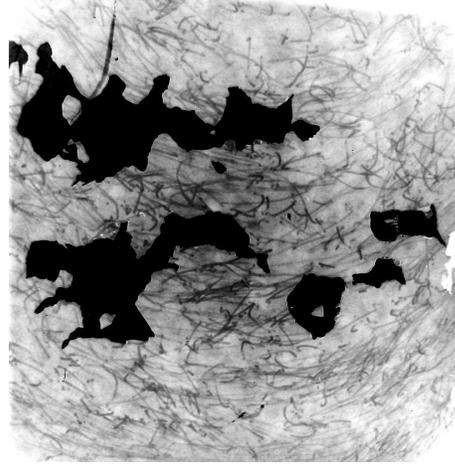
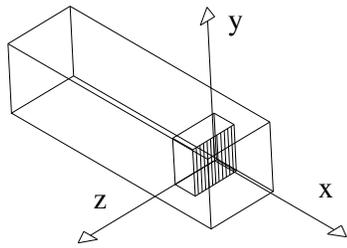


(b) Vista do eixo y.

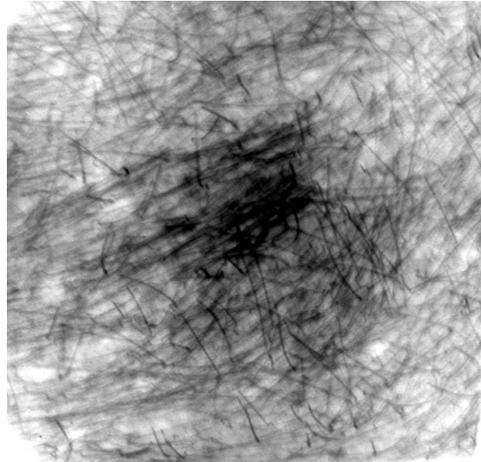
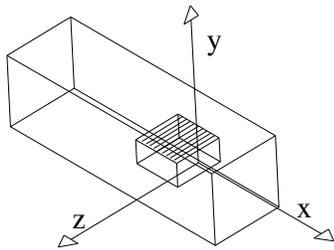


(c) Vista do eixo z.

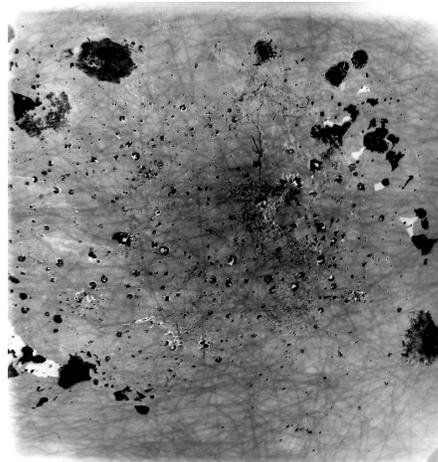
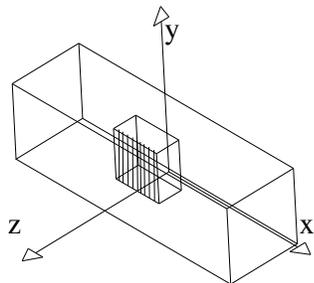
Figura 4.19 – Imagens de raios-X mostrando a distribuição das fibras do concreto com 1,5 % de fibras vista nos diferentes planos.



(a) Vista do eixo x.

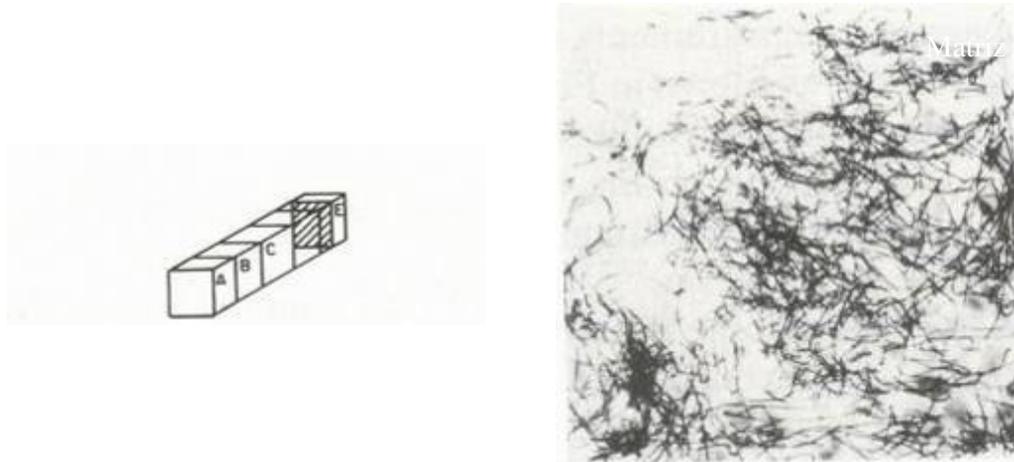


(b) Vista do eixo y.

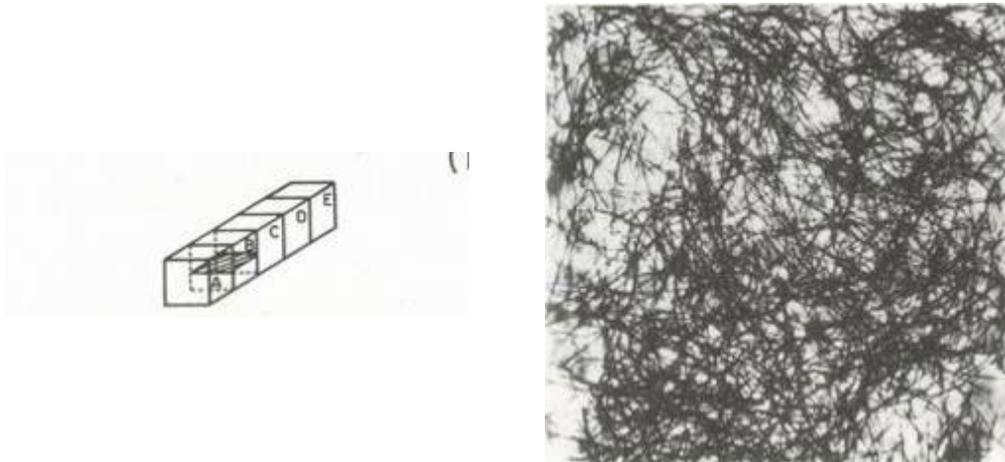


(c) Vista do eixo z.

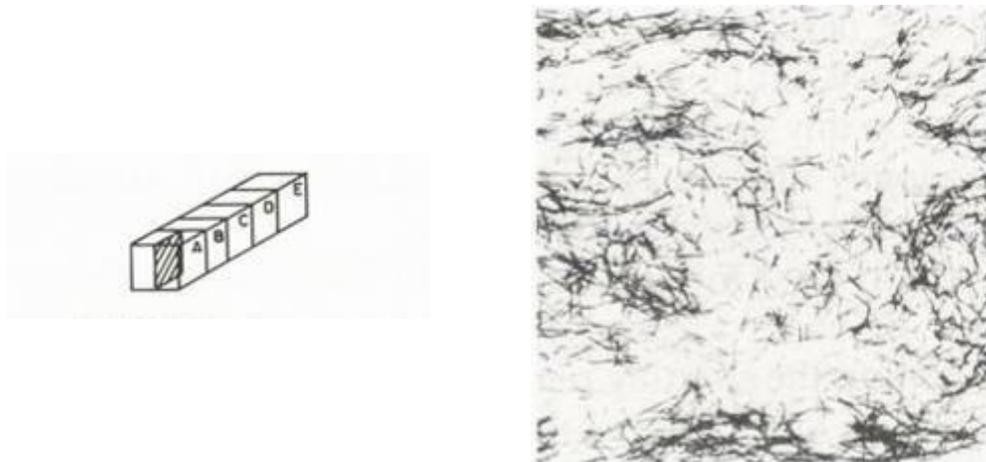
Figura 4.20 – Imagens de raios-X mostrando a distribuição das fibras do concreto com 1,0 % de fibras vista nos diferentes planos.



(a) Vista do eixo x.



(b) Vista do eixo y.



(c) Vista do eixo z.

Figura 4.21 – Imagens de raios-x mostrando a distribuição das fibras do concreto.

As imagens apresentadas na Figura 4.18 indicam que as fibras apresentam uma distribuição uniforme na matriz, devido ao fato de não se necessitar de nenhum tipo de adensamento. Já para o concreto convencional reforçado com fibra (ver Figura 4.21), a necessidade da vibração mecânica para o adensamento faz com que ocorra uma maior distribuição das fibras sendo esta uniforme na seção perpendicular ao lançamento do concreto.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesse trabalho, procurou-se obter um concreto auto-adensável fibroso com características reológicas no estado fresco e propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, sendo a resistência à compressão desejada de cerca de 80 MPa.

Para atingir tal objetivo, utilizou-se o programa comercial BetonlabPro2 [71] que realiza a dosagem do concreto a partir de valores determinados pelo usuário. Diversos concretos foram preparados até que se obtivesse um concreto com as características desejadas. Obtida a matriz de referência, foram acrescentados três teores de fibra de aço com comprimento de 35 mm, relação de aspecto 65 e configuração geométrica com ganchos em suas extremidades. Os teores utilizados foram 1,0 %, 1,5 % e 2,0 %, todos referentes ao volume de concreto.

Os resultados obtidos do comportamento reológico das matrizes são condizentes com os parâmetros especificados para o CAA. O resultado obtido pelo reômetro, mostrou que a matriz C0 apresentou valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica característicos de um CAA. No que se refere aos valores de abatimento e espalhamento, estes foram maiores ou iguais a 250 mm e 550 mm, respectivamente, atendendo às especificações exigidas para um CAA. No ensaio da caixa “L”, os resultados obtidos demonstram que as misturas possuem características de concretos auto-adensáveis, já que a relação H_2/H_1 foi maior que 0,70. Entretanto com aumento da quantidade de fibras, observou-se que o espaçamento entre barras teve que ser aumentado para que o concreto fluísse sem ser bloqueado. Em relação ao ensaio do escoamento no funil “V”, com exceção da mistura com 2 % de fibras, as demais apresentaram boa fluidez. No tubo “U”, os concretos apresentaram grande fluidez,

sendo o suficiente para que fossem lançados no tubo, preenchendo todos os espaços do mesmo sem deixarem vazios. Os resultados de índices físicos não apresentaram variação significativa, o que representa uma grande homogeneidade do material, comprovando a ausência de segregação no estado fresco.

De acordo com os ensaios de compressão sob deformação axial controlada, verificou-se que a adição das fibras de aço promoveu ductilidade ao concreto. A resistência à compressão manteve-se dentro da faixa desejada, próxima de 80 MPa, não sendo afetada pelo aumento da adição de fibras. Os módulos de elasticidade dos concretos apresentaram uma média de 35,61 GPa com uma variação inferior a 0,05 % nos resultados. O coeficiente de Poisson mantiveram-se contantes à um valor de 0,20.

No comportamento à flexão dos concretos concluiu-se que a adição de fibras não influenciou de maneira significativa na carga de primeira fissura, determinada apenas pela matriz. A adição de fibras de aço aumentou significativamente a tensão última em relação à tensão correspondente à formação da primeira fissura, sendo que para 2 % de fibras o aumento foi de 113 %. Após a fissuração, os concretos apresentaram um aumento de 1,5 a 2,1 vezes a sua resistência última. Os resultados obtidos mostraram que a adição de fibras aumenta significativamente a tenacidade do concreto. Aumentos de 32 % e 49 % foram observados nos mesmo índices de tenacidade quando a fração volumétrica aumentou de 1,0 % para 2,0 %.

A resistência ao cisalhamento dos concretos foi fortemente afetada pela adição de fibras devido ao aumento significativo na tensão última em relação ao concreto de referência sem fibras. As resistências últimas ao cisalhamento dos concretos com fibras foram de 3,8 a 4,8 vezes a resistência última ao cisalhamento da matriz de referência.

Na análise micro-estrutural, conclui-se que há uma boa aderência entre a matriz e as fibras. A distribuição das fibras no CAAF mostrou-se uniforme nos planos estudados e em todas as direções observadas nas imagens de raios-X. O concreto auto-adensável fibroso, por não necessitar de vibração, proporciona uma melhor dispersão das fibras do que os concretos fibrosos normais.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Outros estudos devem ser conduzidos para avaliar o comportamento de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço para que possam ser utilizados como elementos construtivos confiáveis. Entre alguns itens que são indispensáveis em pesquisas futuras podem-se citar os seguintes:

- Avaliar o efeito da adição de fibras com diferentes comprimentos, geometrias e relações de aspecto nas propriedades reológicas do concreto no estado fresco e endurecido.

- Estudar a reologia dos concretos fibrosos utilizando o BTRHEOM para caracterizar os parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade plástica.

- Verificar a influência das fibras e adições minerais nas propriedades térmicas dos concretos, levando em consideração a elevação do calor adiabático, assim como a difusividade térmica.

- Avaliar a durabilidade em condições de meios agressivos, entre eles ataques por sulfatos, íons cloretos, permeabilidade a gás e resistência ao desgaste.

- Avaliar o comportamento sob cargas constantes ao longo do tempo dos CAAF através de ensaios de fluência na compressão, tração e flexão.

- Estudo da influência da adição de fibras nos concretos auto-adensáveis em relação à retração autógena e à retração por secagem.

- Dosar, produzir e caracterizar concretos auto-adensáveis fibrosos de baixo impacto ambiental, utilizando materiais recicláveis e/ou resíduos industriais e agrícolas.

- Realizar estudos de modelagem numérica para os concretos auto-adensáveis fibrosos, ajustando-os em um modelo constitutivo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Applications to reproduce all or part of this document should be made to EFNARC at the address shown on the title page. Reino Unido 2002. (www.efnarc.org)
- [2] NEHDI, M.; LADANCHUK, J. D. Fiber synergy un Fiber-Reinforced Self-Consolidating. ACI – Materials Journal/November-December 2004. 101-M57. Pg. 508-517.
- [3] WALRAVEN, J. Structural Aspects of Self-Compacting Concrete. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 15-22.
- [4] KHAYAT, K. H. Optimization and Performance of air-entrained, self-consolidating Concrete. ACI Materials Journal/September-October 2000, p. 596-605.
- [5] NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.
- [6] KHAYAT, K. H. Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete. ACI Materials Journal/May-June 1999, p. 346-353.
- [7] BUI, V. K.; AKKAYA, Y.; SHAH, S. Rheologia Model for Self-Consolidating Concrete. ACI Materials Journal/November/December 2002, p. 549-559.
- [8] SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete. ACI Materials Journal/November-December, 2001, p. 429-439.

- [9] REPETTE, W. L. Concretos de Última Geração: Presente e Futuro. In: CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações / ed. G. C. Isaia. Vol. 2. São Paulo: IBRACON, 2005.
- [10] NUNES, S. C. B. Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Setembro, 2001. 198 p.
- [11] CHEN, Y. Y.; TSAI, C. T.; HWANG, C. L. The Study on Mixture Proportion of Gap Gradation of Aggregate for SCC. In: RILEM - Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 533-539.
- [12] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. Concreto – Estrutura, propriedades e materiais. 1ª ed. São Paulo. PINI, 1994.
- [13] SONEBI, M.; BAHADORI-JAHROMI, A.; BARTOS, P. J. M. Development and Optimization of Medium Strength Self-Compacting Concrete by Pulverized Fly Ash. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 514-524.
- [14] KHAYAT, K. H.; GUIZANI, Z. Use of Viscosity-Modifying Admixture to Reduce Top-Bar Effect Stability of Fluid Concrete. ACI – Materials Journal/July-August 1997, Pg. 332-340.
- [15] GOBBI, T. L.; AMARAL, C. K. Concreto Auto-Adensável de Alto Desempenho – Benefícios Proporcionados pela Adição de Microsílica. 47º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON/2005). v. V – Inovações Tecnológicas para o Concreto – Trabalho 47CBC0488 – p. V410-425.
- [16] SHEINN, A. M. M.; HO, D. W. S.; TAM, C. T. Effect of Particles on Paste Rheology of SCC. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 232-239.
- [17] FELEKOGLU B.; YARDIMCI, M. Y.; BARADAN, B. A Comparative Study on the Use of Mineral and Chemical Types of Viscosity Enhancers in Self-Compacting Concrete. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 446-456.

- [18] ALCANTARA, M. A. M.; MOURET, M.; PONS, G.; GRANJU, J. L. Concreto Auto-Adensável com adição de Fibras Metálicas-Parâmetros de Dosagem e Características no Estado Fresco e Endurecido. 46º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON/2004). v. II – Construções em Concreto – Trabalho CBC0401 – p. II498-II511.
- [19] SAHMARAM, M.; CHRISTIANTO, H. A.; YAMAN I. O. The Effect of Chemical Admixtures and Mineral Additives on the Properties of Self-Compacting Mortars. Cement & Concrete Composites. December 2006. In Press.
- [20] BOSILJKOV, V. B. SCC Mixes with Poorly Graded Aggregate and High Volume of Limestone Filler. Cement and Concrete Research/2003. v. 33. p. 1279-1286.
- [21] POPPE, A. M.; SCHUTTER, G. Effect of Limestone Filler on the cement hydration in Self-Compacting concrete. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 558-566.
- [22] BUSTNES, H. M. Characterization of Filler. In: RILEM - Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 540-550.
- [23] ESPING, O. Methods for Characterization of Fillers and Fines for Self-Compacting concrete. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 208-219.
- [24] MELO, K. A.; REPETTE, W. L. Influência do Teor de Finos nas Propriedades do Concreto Auto-Adensável com adição de fíler Calcário. 47º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON/2005). v. V – Inovações Tecnológicas para o Concreto – Trabalho 47CBC0343 – p. V945-956.
- [25] DE LARRARD, F. Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999, 421 pages.
- [26] XIE, Y.; LIU, B.; YIN, J.; ZHOU, S. Optimum Mix Parameters of High-Strength Self-Compacting Concrete with Ultrapulverized Fly Ash. Cement and Concrete Research, Mar. 2002, v. 32, p. 477-480.
- [27] AİTCIN, P. C. Concreto de Alto Desempenho. Editora Pini, São Paulo, 2000, 669 pag.

- [28] RONCERO, J. Effect of Superplasticizers on the Behavior os Concrete in the Fresh and Hardened States: Implications for high performance concretes. 2000. 189 p. Tese – Escola Tècnica Superior D’Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalúnia, Catalúnia.
- [29] RIXON, R. And MAILV. N., Chemical Admixture for Concrete. 3rd ed., E & FN Spon, London, 1999.
- [30] FORMIGINI, S. Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho. Tese de doutorado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005, 284 pg.
- [31] MELO, K. A., Contribuição à Dosagem de Concreto Auto-Adensável com Adição de Fíler Calcário. Dissertação de Mestrado, PPGEC/Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2005.
- [32] VELASCO, R. V., Concreto de Alto Desempenho Reforçado com Fibras de Polipropileno e Sisal Submetido a Altas temperaturas. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- [33] HWANG, S. -D.; MAYEN-REYNA, D.; BONNEAU, O.; KHAYAT, K. H. Performance of Self-Consolidating Concrete Made with Various Admixture Combinations. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 467-478.
- [34] KHAYAT, K. H. Use of Viscosity-Modifying Admixture to Reduce Top-Bar Effect of Anchored Bars Cast with Fluid Concrete. ACI Materials Journal/March-April, p. 158-167.
- [35] SUGAMATA, T.; EDAMATSU, Y.; OUCHI, M. A Study of Particle Dispersing Retention Effect of Polycarboxylate-based superplasticizers. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: august 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 420-431.
- [36] OLIVEIRA L. A. P.; RAMOS, M.; GOMES, J. P. C. Dosagem de Concreto Auto-Adensável Reforçados com Fibras de Aço. 47º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON/2005). v. V – Inovações Tecnológicas para o Concreto – Trabalho 47CBC0044 – p. V568-581.

- [37] WALLEVIK, O. H. Rheology – A Scientific Approach to Develop Self-Compacting Concrete. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: august 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 23-31.
- [38] OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI R. G.; PADOLFELLI, V. C.; Dispersão e Empacotamento de Partículas. 2 ed. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 224 p.
- [39] DE LARRARD, F.; HU, C.; SEDRAN, T.; SZITKAR, J. C.; JOLY, M.; CLAUX, F.; DERKX, F. A New Rheometer for Soft-to Fluid Fresh Concrete. ACI Materials Journal/1997. v. 94. No. 3, p. 81-90.
- [40] HU, C.; DE LARRARD, F. The Rheology of Fresh High-Performance Concrete. Cement and Concrete Research/1996. Materials and Structures. v. 26. p. 283-294.
- [41] NIELSSON, I.; WALLEVIK, O. H. Rheological Evaluation of Some Empirical Test Methods – Preliminary Results. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 59-68.
- [42] DACZKO, J. A. A Comparison of Passing Ability Test Methods for Self-Consolidating Concrete. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 335-344.
- [43] GETTU, R.; ÂNGULO, L. Estado del Arte del Hormigón Autocompactable y su Caracterización. Universitat Politècnica de Catalunya. Informe C4745/1 Barcelona, abril de 2003. 64 p.
- [44] BENTUR, A.; MINDESS, S. Fiber Reinforced Cementitious Composites. London and New York: Elsevier Science Publishers Ltda., 1990.
- [45] SAHMARAN, M.; YURTSEVEN, A.; YAMAN, I. O. Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self- Compacting Concrete. Building and Environment/2005, v. 40, p. 1672-1677.
- [46] DING, Y.; THOMASETH, D.; NIEDEREGGER, C.; THOMAS, A.; LUKAS, W. The Investigation on The Workability and Flexural Toughness of Fiber Cocktail Reinforced Self-Compacting High Performance Concrete. In: RILEN Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (FRC). BEFIB 2004, 20-22 September 2004, Varenna, Italy.

- [47] GRÜNEWALD, S.; WALRAVEM, J. C. Rheological Measurements on Self-Compacting Fibre Reinforced Concrete. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 49-58.
- [48] GRÜNEWALD, S.; WALRAVEM, J. C. Parameter-Study on the Influence of steel Fibers and Coarse Aggregate Content on the Fresh Properties of Self-Compacting concrete. *Cement and Concrete Research*/2001, v. 31, p. 1793-1798.
- [49] SAHMARAM, M.; YAMAN I. O. Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete with a High-Volume Coarse Fly Ash. *Construction and Building Materials* June 2005. In Press.
- [50] CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Durable Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete. *Cement and Concrete Research*/2004. v. 34. p. 294-254.
- [51] AMBROISE, S.; ROLS, S.; PERA, J. Properties of Self-Levelling Concrete Reinforced by Steel Fibres. In: RILEM – Third International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC3): May 16 – 19/1999, Ed. REINHARDT H. W.; NAAMAM, A. E. p. 9-17.
- [52] BARRAGÁN, B.; ZERBINO, R.; GETTU, R.; SORIANO, M.; CRUZ, C.; GIACCIO, G.; BRAVO, M. Development and Application of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete. In: RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC) – BEFIB 2004: September 20 – 22/2004, Verenna, Italy. 10 pg.
- [53] VELASCO, R. V.; CORDEIRO, G.C.; SILVOSO, M. M.; TOLEDO, R. D.; FAIRBAIN, E. M. R. Comportamento Reológico e Mecânico de Concretos Auto-Adensáveis Reforçados com Elevadas Frações Volumétricas de Fibras de Aço. 47º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON/2005). v. V – Inovações Tecnológicas para o Concreto – Trabalho 47CBC0412 – p. V382-395.
- [54] GRÜNEWALD, S.; WALRAVEN, J. C.; OBLADEN, B. ZEGWAARD, J. W.; LANGBROEK, M. NEMEGEER, D. Tunnel Segments of Self-Compacting Steel Fibre Reinforced Concrete. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: august 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 715-724.
- [55] HWANG, C. L.; TSAI, C. T.; LIU, H. T. The Design and Application of Steel-Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete. In: RILEM Symposium on Self-

compacting Concrete: 17 - 20 august 2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 753-762.

[56] THE EUROPEAN GUIDELINES FOR SELF-COMPACTING CONCRETE. Specification, Production and Use. May/2005. 68 pg. (www.efca.info).

[57] KLUG, Y.; HOLSCHEMACHER, K. Comparison of the Hardened Properties of Self-Compacting and Normal Vibrate Concrete. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: 17 - 20 august 2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 596-605.

[58] HEIRMAN, G.; VANDEWALLE L. The Influence of Fillers on the Properties of Self-Compacting Concrete in Fresh and Hardened State. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: 17 - 20 august 2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON, I. p. 606-618.

[59] MIRSAYAH, A.; BANTHIA, N. Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete. ACI Materials Journal. September-October 2002. Pg. 473-479.

[60] BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw Hill Book Co. New York/1992. 530 pg.

[61] NAAMAN, A. E. Sifcon: Tailored Properties For Structural Performance. Departamen of Civil Engeneering, University of Michigan, Ann Arbor, USA. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites – HPRFCC, 1992. p. 18-36.

[62] VICTOR C. L.; MISHRA D. K.; NAAMAN A. E.; WIGHT J. K.; LAFAVE J. M.; HWAI-CHUNG W. & INADA Y. On the Shear Behavior of Engineered Cementitious Composites. Advanced Cement Based Materials 1993, 1, 142—149.

[63] KHALOO A. R.; KIM, N. Influence of Concrete and Fiber Characteristics on Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Under Direct Shear. ACI – Materials Journal/November-December 1997, Pg. 592-601.

[64] BUITELAR, P. Ultra High Performance Concrete: Developments and Applications During 25 Years. Plenary Session International Symposium on UHPC. Kassel, Germany, 2004.

[65] NBR 7217, Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. ABNT. Agosto, 1987.

- [66] NBR NM 52, Agregado miúdo - Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente. ABNT. Julho, 2003.
- [67] NBR NM 53, Agregado graúdo - Determinação de Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água. ABNT. Julho, 2003.
- [68] NBR NM 23, Cimento Portland e Outros Materiais em Pó - Determinação de Massa Específica. ABNT. Março, 2001.
- [69] SILVA, A. S. M. da, Dosagem de Concreto Pelos Métodos de Empacotamento Compressível e Aïtcin-Faury Modificado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março, 2004.
- [70] MBT Brasil – Manual técnico. Edição 2002. www.mbtbrasil.com.br.
- [71] SEDRAN, T.; DE LARRARD, F. BétonlabPro2, Logiciel de formulation des béton, version 2.0 exécutable sous Windows, logiciel et notice, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2000.
- [72] SILVA, W. J., Uso das Fibras de Wollastonita como Reforço em Pastas de Cimento Portland. Trabalho da Disciplina de Materiais Compósitos.- Professor Romildo D. T. Filho. PEC/LABEST, COPPE/UFRJ, 2º trimestre de 1999, 22p.
- [73]CORDEIRO, G. C. Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-de-Açúcar e da Casca de Arroz como aditivos Minerais em Concreto. Tese de doutorado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006, 445 pg.
- [74] NBR 7215, Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão. ABNT. Dezembro, 1996.
- [75] OKAMURA, H.; QZAWA, K. Self-compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Techniques 2003: pg. 5-15.
- [76] DE LARRARD, F.; FERRARIS, C. F.; SEDRAN, T. Fresh Concrete: A Herschel-Bulkley Material, Materials and Structures/1998, v. 31, p. 494-498.
- [77] NBRNM47, Concreto fresco - Determinação do teor de ar pelo método pressométrico. ABNT. Dezembro, 2002.
- [78] SEDRAN, T.; de LARRARD, F. Optimization of Self Compacting Concrete thanks Packing Model. Ist. International RILEN Symposium on Self-Compacting Concrete. 13-14 September 1999. Ed. SKARENDAHL, Å. PETERSSON, Ö. p. 321-332.

[79] NBR 9778, Argamassas e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Imersão – Índice de Vazios e Massa Específica. ABNT. Março, 1987.

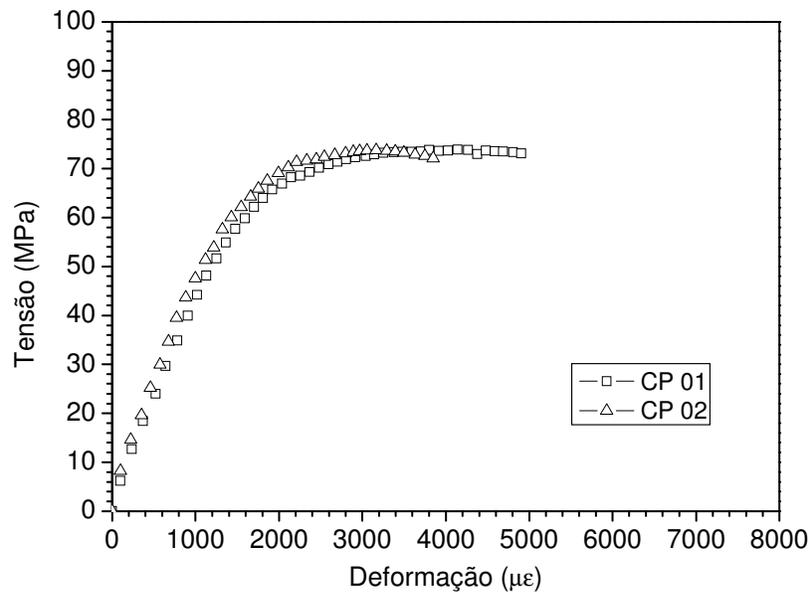
[80] NBR 5739, Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos. ABNT, 1994.

[81] FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Fibras de Aço. ISSN 0103-9830 BT/PCC/260. PCC-USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/2000.

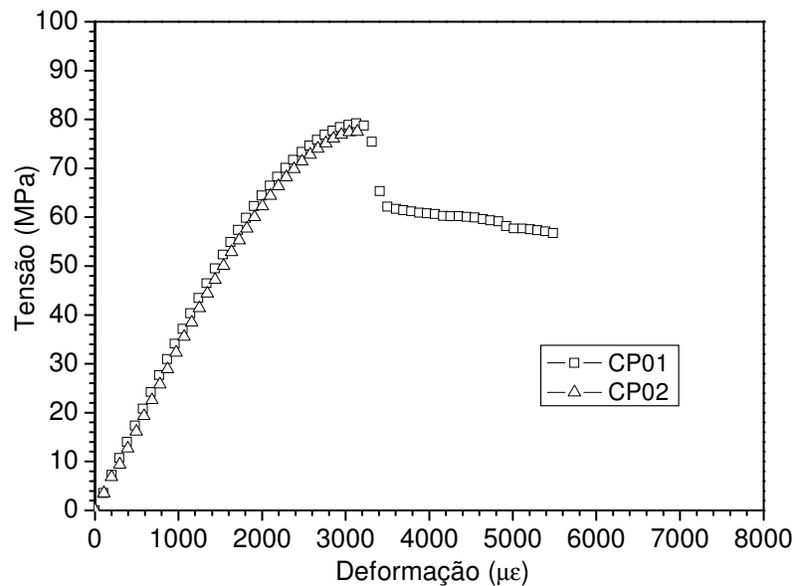
ANEXO

Neste anexo são mostrados os gráficos contendo todas as curvas individuais dos concretos produzidos (C0; C1,0; C1,5 e C2,0) obtidos dos resultados experimentais nos ensaios mecânicos, de Resistência a Compressão, Resistência à Flexão e Resistência ao Cisalhamento.

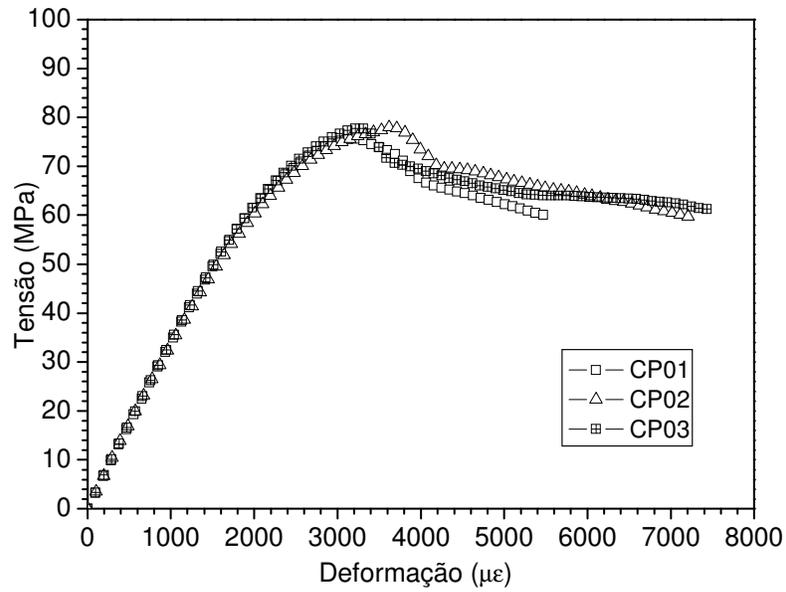
1 - Resistência à Compressão



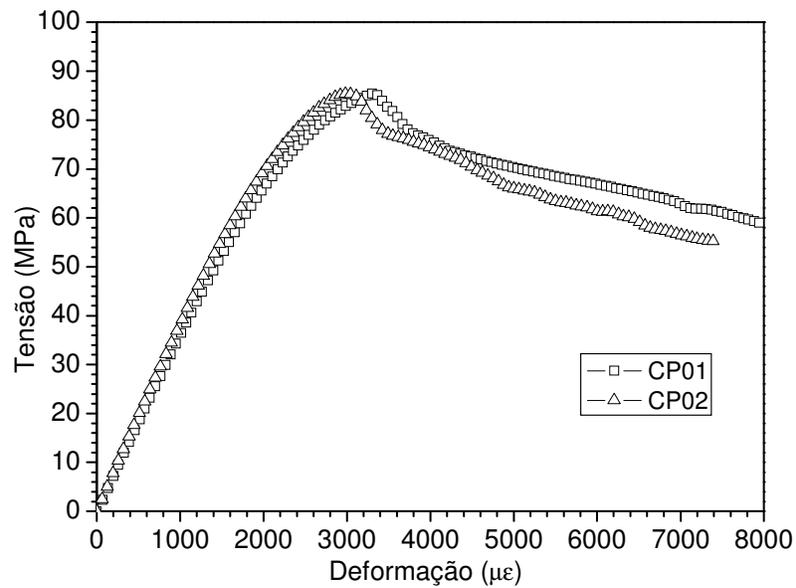
Curva Tensão x Deformação de amostras ensaiadas à Compressão da mistura C0.



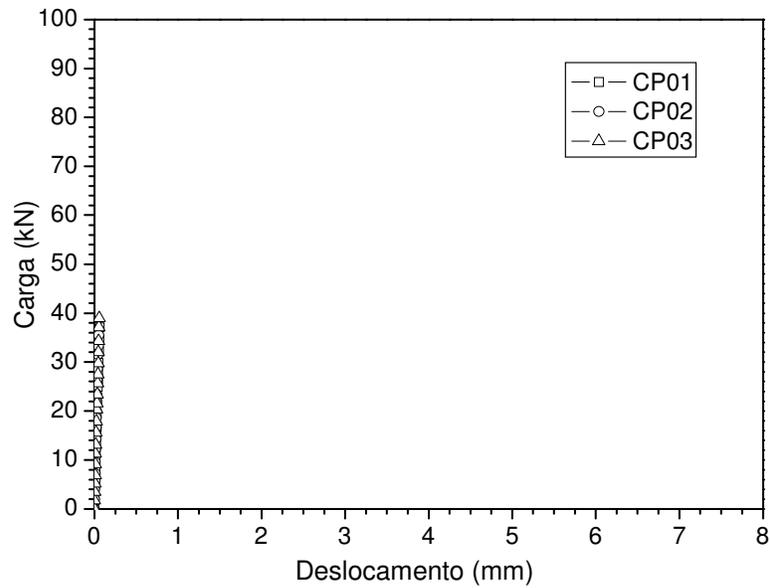
Curva Tensão x Deformação de amostras ensaiadas à Compressão da mistura C1,0.



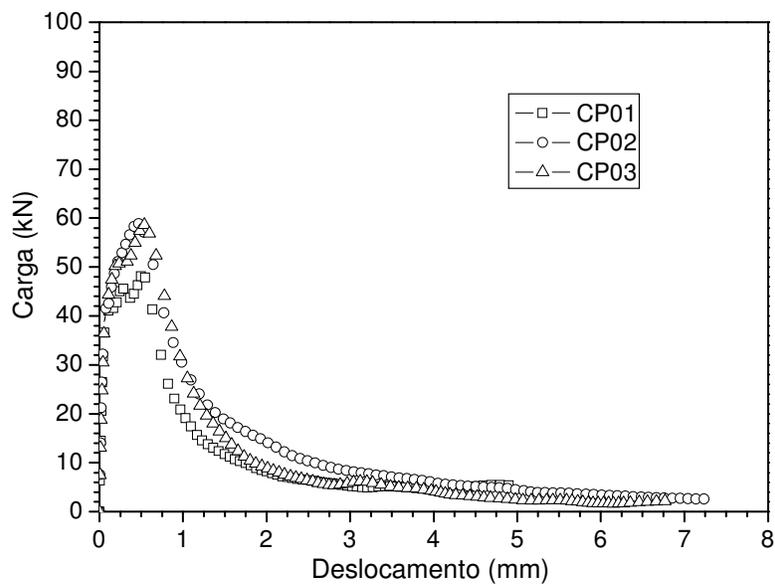
Curva Tensão x Deformação de amostras ensaiadas à Compressão da mistura C1,5.



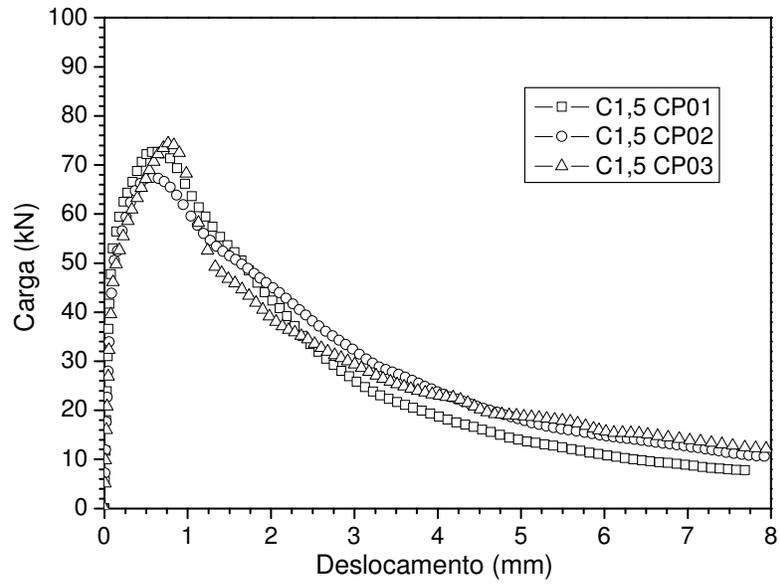
Curva Tensão x Deformação de amostras ensaiadas à Compressão da mistura C2,0.

2 - Resistência à Flexão

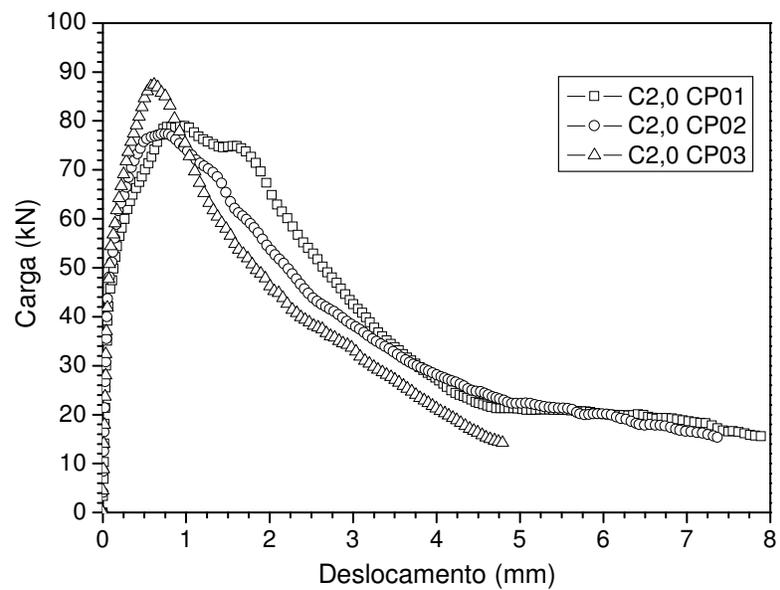
Curva Carga x Deslocamento de amostras ensaiadas à flexão da mistura C0.



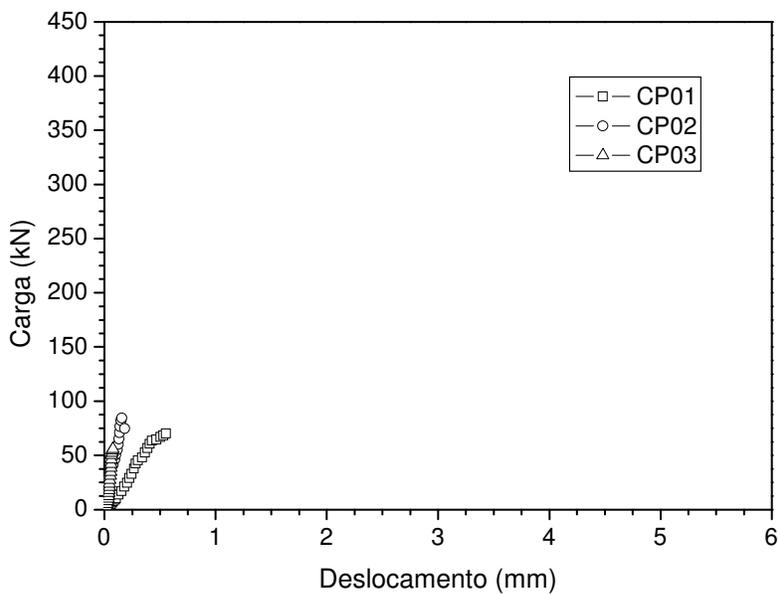
Curva Carga x Deslocamento de amostras ensaiadas à flexão da mistura C1,0.



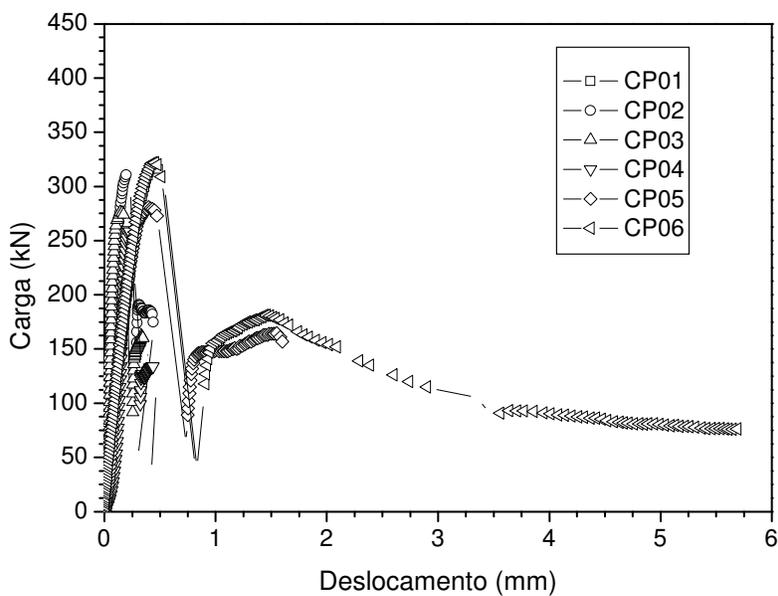
Curva Carga x Deslocamento de amostras ensaiadas à flexão da mistura C1,5.



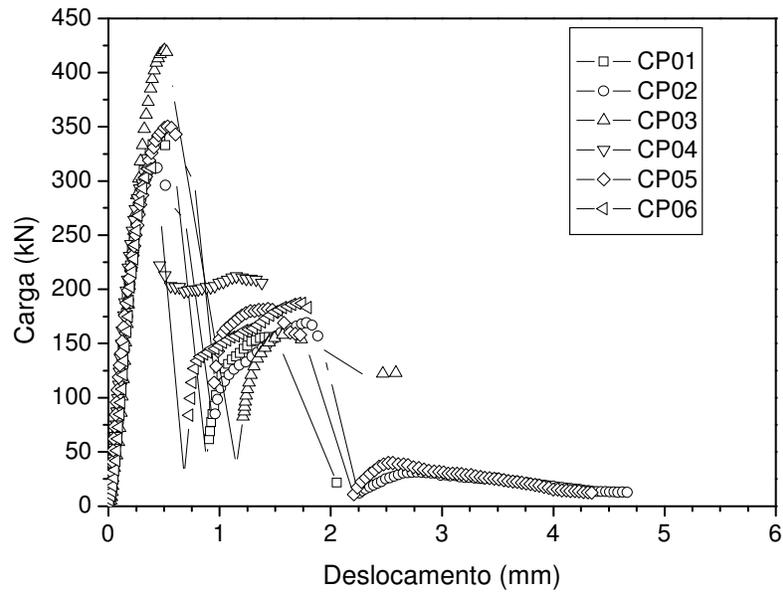
Curva Carga x Deslocamento de amostras ensaiadas à flexão da mistura C2,0.

1 - Resistência ao Cisalhamento

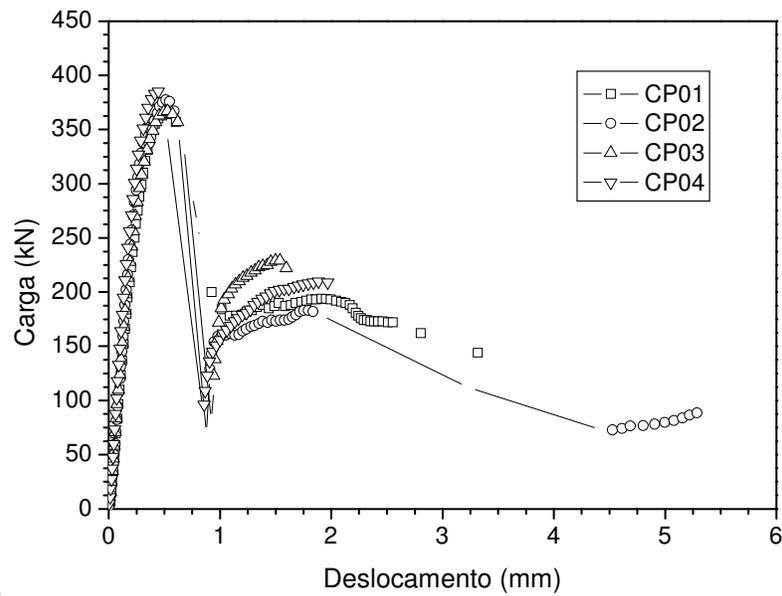
Curva Carga x Deslocamento de amostras ensaiadas ao cisalhamento da mistura C0.



Curva Carga x Deslocamento de amostras ensaiadas ao cisalhamento da mistura C1,0.



Curva Carga x Deslocamento de amostras ensaiadas ao cisalhamento da mistura C1,5.



Curva Carga x Deslocamento de amostras ensaiadas ao cisalhamento da mistura C2,0.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)