

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS CONTENDO SEIXO DE RIO E FIBRAS DE
AÇO

Marco Antônio da Silva

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro

Julho de 2015

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS CONTENDO SEIXO DE RIO E FIBRAS DE
AÇO

Marco Antônio da Silva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Profa. Michèle Shubert Pfeil, D.Sc.

Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.

Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbain, Dr. Ing.

Prof. Ronaldo Carvalho Battista, Ph.D.

Prof. Pierre Rossi, Ph.D.

Prof. Paulo Roberto Lopes Lima, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2015

Silva, Marco Antônio da

Desenvolvimento e Caracterização Experimental de
Concretos Autoadensáveis contendo seixo de rio e fibras de
aço/Marco Antônio da Silva – Rio de Janeiro
UFRJ/COPPE, 2015.

XXX, 243 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Romildo Dias Toledo Filho

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Civil, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 232-243.

1. Agregados. 2. Seixo de rio. 3. CAA. I. Pfeil, Michèle
Schubert, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais Leni e Silvio, por todo amor e carinho, obrigado por existirem em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, obrigado pela minha existência nesse mundo.

Aos meus pais Leni e Silvio, que estão sempre ao meu lado, pela dedicação, amizade, amor e carinho para comigo.

Aos meus irmãos Márcio, Marcelo, Adriano, Fernanda, Simone e Renata pela união e amizade que sempre tivemos um pelo outro.

A minha esposa Fabíola pelo amor e cumplicidade não medindo esforços para me auxiliar no decorrer deste trabalho.

Ao Luiz Fernando Reis, meu tio e companheiro de pós-graduação, obrigado pela amizade durante o tempo que moramos juntos.

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

Ao amigos Eliane Rodrigues e Luzivaldo pela por sempre estarem prontos a ajudar.

A Sati, Molly e Kimi por estarem sempre ao meu lado.

Aos meus orientadores Profa. Michèle Schubert Pfeil, e Prof. Romildo Dias Toledo Filho, pelos ensinamentos, dedicação, atenção e ajuda durante o desenvolvimento do trabalho, muito obrigado.

Aos Professores Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, Ronaldo Carvalho Battista, Pierre Rossi e Paulo Roberto Lopes Lima pela disponibilidade e contribuições à tese.

Ao Carlos Rossigali, Alex Jr., Maria Rita e Ederli Marangon, pelo companherismo e amizade durante o curso.

Ao Marcos Martinez Silvano e Reila Velasco pelo auxílio, sugestões e amizade durante minha pesquisa.

Ao Guilherme Cordeiro, Flávio Silva, Vivian Karla, Janine Domingos pelo incentivo e sugestões durante a pesquisa.

Aos Professores Verginia Reis Crispim, do Programa de Engenharia Nuclear e Francisco Fernando Lamego Simões Filho do IEN pelo auxílio e apoio nos experimentos.

Aos Professores Ricardo Tadeu Lopes Inaya Correa Barbosa Lima, do Programa de Engenharia Nuclear – LIN – COPPE/UFRJ pelo auxílio e apoio nos experimentos.

A Alessandra de Castro Machado do Programa de Engenharia Nuclear – LIN – COPPE/UFRJ, pelo auxílio nos experimentos e ajuda quando precisei.

Aos Professores Francisco dos Santos Rocha, Estevão Vicente Cavalcanti Monteiro de Paula, Claudete Catanhede do Nascimento e Narciso da Silva Cardoso pela amizade e incentivo na cidade de Manaus.

À Sandra e Luzidelle pela amizade e profissionalismo no auxílio desse trabalho no LABEST – COPPE/UFRJ.

A toda equipe de colaboradores e amigos do LABEST – COPPE/UFRJ: Júlio, Anísio, Arnaldo, Manuel, Adailton, Flávio, Clodoaldo, Santiago, Flávio Sarquis, Alessandro, Rodrigo, Renan, Rosangela, Márcio, Hidekel, Eduardo, Josimar e Paulinho.

Aos amigos que aqui fiz durante a estadia na COPPE: João, Ana Paula, Shirley, Luciane Farias, Camila, Otávio, Samantha, Thiago, Saulo, Fabrício, Tina, Adriana, Yemce, Andrielli, Iolanda, Dimas, Edgar, Marco Pepe, Rodolfo Giacomim, Mayara e Caroline e pela amizade, sugestões e auxílio quando precisei.

Ao Laboratório de Estruturas e Materiais Fernando L. L. B. Carneiro, LABEST – COPPE/UFRJ pelo desenvolvimento da pesquisa.

Ao Jurandy Moreira Aires, pelo apoio e amizade.

Aos professores, técnicos administrativos e funcionários terceirizados do IFAM – *Campus* – Coari, muito obrigado pela amizade.

Ao Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM pela liberação ,
apoio e incentivo à qualificação.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

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

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS CONTENDO SEIXO DE RIO E FIBRAS DE
AÇO

Marco Antônio da Silva

Julho/2015

Orientadores: Michèle Shurbet Pfeil

Romildo Dias de Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

O objetivo deste estudo é avaliar as propriedades reológicas, mecânicas, estruturais e de durabilidade dos concretos autoadensáveis produzidos com seixo de rio. Foram utilizados dois tipos de seixos rolados e um agregado granítico britado (referência) nas misturas e fibras de aço de 35mm de comprimento e em frações volumétricas de 0,5% , 0,75% e 1,0% como elemento de reforço. As matrizes apresentaram tensão de escoamento e viscosidade plástica compatíveis com concreto autoadensável, com uma melhor reologia sendo observada para as misturas contendo seixo rolado. A tensão de ruptura e deformação de pico em compressão do concreto contendo agregado britado é maior do que os correspondentes valores das misturas contendo seixo rolado. Por outro lado observou-se um aumento no módulo de elasticidade do concreto contendo seixo rolado. A adição do reforço fibroso aumentou significativamente a tenacidade das misturas, principalmente para as frações volumétricas mais altas. Os resultados dos ensaios de arrancamento e de tirantes indicam que a aderência barra de aço ao concreto não é afetada pela presença do seixo rolado. A adição do reforço fibroso controla o processo de abertura de fissura e conduz a um maior número de fissuras nos ensaios de arrancamento e de tirantes, principalmente em frações volumétricas mais elevadas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF THE SELF-COMPACTING CONCRETE CONTAINING RIVER PEBBLE AND STEEL FIBERS

Marco Antônio da Silva

July/2015

Advisors: Michèle Shubert Pfeil

Romildo Dias de Toledo Filho

Department: Civil Engineering

The aim of the present work is the assessment of the rheological, mechanical, structural and durability properties of self-compacting concrete (C60) produced with river gravels. Two types of river gravels and one crushed granite aggregate (reference) were used in the mixtures and 35mm length steel fibers were added to these mixtures as reinforcing element in volumetric fractions equal 0,5% , 0,75% and 1,0%. The matrices presented yield stress and plastic viscosity consistent with self-compacting concrete, the best rheological characteristics being observed for the mixtures containing river gravels as compared to the one with crushed granite. The ultimate compression stress and associated peak deformation of the mixture containing crushed granite is greater than those of the river gravels mixtures. On the other hand higher elastic modulus was obtained for the concrete with river gravels. Steel fiber reinforcement significantly increased the mixtures toughness, especially for the higher volume fractions. Results from pull-out tests and stiffening tests indicate that the adherence between the steel bar and the concrete is not affected by the presence of the river gravels and that the fiber reinforcement controls crack width yielding to a great number of cracks; this effect is more pronounced for higher volume fractions.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE TABELAS	XXIV
LISTA DE SÍMBOLOS	XXVIII
INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo geral	3
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Resumo dos capítulos	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
1.5 AGREGADOS	5
1.6 CONCRETO AUTOADENSÁVEL - CAA	9
1.7 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	15
1.8 EFEITOS DAS CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	17
1.9 ADERÊNCIA ENTRE O AÇO E O CONCRETO	22
CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	27
1.10 Cimento, cinza volante e sílica ativa	27
1.10.1.1 Comportamento à compressão do cimento.....	28
1.10.1.2 Massa específica do cimento, cinza volante e sílica ativa.....	29
1.10.1.3 Análises químicas do cimento, cinza volante e sílica ativa.....	29
1.10.1.4 Características granulométricas do cimento, cinza volante e sílica ativa.....	32
1.11 Agregados	33
1.11.1 Agregado miúdo	33
1.11.1.1 Características granulométricas	34
1.11.1.2 Análises químicas	35
1.11.2 Agregado graúdo	36
1.11.2.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	37
1.11.2.2 Características granulométricas e físicas	40
1.11.2.3 Características petrográficas.....	41
1.11.2.4 Análises químicas	46
1.11.2.5 Abrasão “Los Angeles”	48

1.11.3 Caracterização dos agregados graúdos utilizando o Aggregate Imaging System (AIMS).....	49
1.12 Compacidade experimental dos materiais cimentícios.....	66
1.13 Compacidade experimental dos agregados	70
1.14 Compatibilidade e dosagem de saturação do superplastificante com os materiais cimentícios	72
1.15 Agente modificador de viscosidade	76
1.16 Fibras de aço	77
1.17 Barras de aço.....	78
1.18 Água	82
PRODUÇÃO DE MATRIZES E MÉTODOS DE ENSAIO	83
1.19 Programa Experimental.....	83
1.20 Desenvolvimento das Matrizes Autoadensáveis com Brita Granítica e Seixo de Rio	86
1.20.1 Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).....	86
1.20.2 Procedimentos de dosagem utilizando o BétonlabPro 3	86
1.20.3 Definição das matrizes desenvolvidas	91
1.20.4 Produção das matrizes, moldagem e cura dos corpos de prova.....	93
1.20.5 Ensaio reológico	97
1.20.5.1 Determinação do espalhamento e escoamento	97
1.20.5.2 Tempo de escoamento (T_{500})	99
1.20.5.3 Determinação da habilidade passante (Método do anel J)	100
1.20.5.4 Determinação da habilidade passante. Método da caixa L.....	101
1.20.5.5 Determinação da viscosidade (Método do funil V).....	103
1.20.5.6 Resistência à segregação através da coluna de segregação	104
1.20.5.7 Determinação do teor de ar aprisionado	105
1.20.5.8 Comportamento reológico utilizando reômetro BTRHEOM	106
1.20.6 Ensaio mecânico.....	107
1.20.6.1 Comportamento à compressão.....	107
1.20.6.2 Comportamento à tração na flexão	109
1.20.6.3 Comportamento à tração direta.....	111
1.20.6.4 Comportamento à tração por compressão diametral	113

1.20.6.5 Comportamento da aderência das fibras de aço através do ensaio de arrancamento.	113
1.20.7 Ensaio mecânico.....	115
1.20.7.1 Comportamento da aderência da barra de aço-concreto através dos ensaios de arrancamento.	115
1.20.7.2 Comportamento à tração de tirantes de concreto armado (tension stiffening) à tração direta.	120
1.20.8 Ensaio de Variação Dimensional	128
1.20.8.1 Retração por secagem.....	128
1.20.8.2 Fluência na compressão.....	131
1.20.9 Comportamento físico	135
1.20.9.1 Absorção de água por imersão	135
1.20.9.2 Absorção de água por capilaridade.....	135
1.20.9.3 Penetração acelerada de íons cloreto	136
1.20.9.4 Avaliação estatística dos resultados	139
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	140
1.21 PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS CAA'S E CAAFA'S.....	140
1.21.1 Abatimento, espalhamento, espalhamento no cone de Abrams invertido, tempo de escoamento e ar incorporado	140
1.21.2 Anel J, caixa L, funil V e coluna de segregação.....	145
1.21.3 Comportamento reológico das matrizes utilizando reômetro BTRHEOM	149
1.22 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CAA'S E CAAFA'S	153
1.22.1 Comportamento à compressão das matrizes.....	153
1.22.2 Comportamento à compressão dos concretos fibrosos.....	156
1.22.3 Comportamento à flexão das matrizes de referência.....	161
1.22.3.1 Comportamento à flexão dos matrizes fibrosas.....	164
1.22.4 Comportamento à tração das matrizes de referência	171
1.22.5 Comportamento à tração das matrizes fibrosas	173
1.22.6 Tração por compressão diametral.....	180
1.22.7 Arrancamento de fibras de aço	182
1.23 PROPRIEDADES ESTRUTURAIS	184

1.23.1 Comportamento da aderência da barra de aço ao concreto através dos ensaios de arrancamento.....	184
1.23.1.1 Matrizes de referência	184
1.23.1.2 Matrizes com adição de fibras de aço.....	188
1.23.2 Comportamento da aderência da barra de aço ao concreto através dos ensaios de tirantes.	196
1.23.2.1 Matrizes de referência	196
1.23.2.2 Matrizes com adição de fibras de aço.....	204
1.23.3 Absorção Total, índice de vazios e Massa Específica.	216
1.23.4 Absorção de água por capilaridade.....	218
1.23.5	219
1.23.6 Penetração acelerada de íons cloreto	219
1.23.7 Retração por secagem.....	219
1.23.8 Fluência na compressão.....	223
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	228
1.24 CONCLUSÕES.....	228
1.25 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	231
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	232

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução da produção de agregados no Brasil (ANEPAC, 2012)	6
Figura 2.2 – Extração de seixo no Amazonas	8
Figura 2.3 – Trajetórias das tensões principais entre a barra e o concreto (LEONHARDT e MONNING,1979)	23
Figura 2.4 – Distribuição das microfissurações (FUSCO, 2005).	24
Figura 3.1– Materiais finos.	27
Figura 3.2 – Evolução da resistência à compressão do cimento até 90 dias de cura.....	28
Figura 3.3 – Picnômetro a gás Accu Pyc 1340 (Micromeritics)	29
Figura 3.4 – Difrátogramas	31
Figura 3.5 – Equipamentos para análise granulométrica.	32
Figura 3.6 – Curvas granulométricas do cimento, cinza volante e sílica ativa.....	33
Figura 3.7 – Agregado miúdo.....	34
Figura 3.8 – Curva granulométrica do agregado miúdo.	35
Figura 3.9 – Difrátogramas da areia.	36
Figura 3.10 – Agregado graúdo.	37
Figura 3.11 – Amostras de agregado graúdo para ensaio do módulo de elasticidade.	38
Figura 3.12 – Amostras para ensaio de compressão: (a) , (b) brita, (c) e (d) seixo de rio.....	39
Figura 3.13 – Curva tensão x deformação das rochas.....	39
Figura 3.14 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	40
Figura 3.15 – Microscópio petrográfico ZEISS Axioplan e câmera Axiocam ICC 3.	42
Figura 3.16 – Fotomicrografia em luz polarizada de amostras de dois matacões de rocha granítica.....	42

Figura 3.17 – Fotomicrografia em luz polarizada de amostras de cinco tipos deferentes de grãos de seixo rolado (SP).	44
Figura 3.18 – Fotomicrografia em luz polarizada de amostras de cinco tipos deferentes de grãos de seixo rolado (SJ).	45
Figura 3.19 – Difractogramas dos agregados graúdos.	47
Figura 3.20 – Ensaio de abrasão (a) equipamento “Los Angeles”	48
Figura 3.21– Equipamento AIMS.	50
Figura 3.22 – Agregados analisadas no equipamento AIMS.	50
Figura 3.23 – (a) areia (b) software de aquisição de dados.	51
Figura 3.24 – Escalas de Forma (2D) para o agregado miúdo.	52
Figura 3.25 – Escalas de angularidades para o agregado miúdo e graúdo.	53
Figura 3.26 – Escalas de textura para o agregado graúdo.	55
Figura 3.27 – Curvas de distribuição dos índices de forma (2D) e angularidade do agregado miúdo.	58
Figura 3.28 – Imagens de angularidade do agregado miúdo.	59
Figura 3.29 – Curvas de distribuição do índice de angularidade dos agregados graúdos.	60
Figura 3.30 – Imagens de angularidade dos agregados graúdos.	62
Figura 3.31 – Curvas de distribuição do índice de texturas dos agregados graúdos.	63
Figura 3.32 – Imagens de textura dos agregado graúdos.	64
Figura 3.33 – Curvas de distribuição do índice de esfericidade dos agregados graúdos.	65
Figura 3.34 – Equipamentos utilizados no ensaio de demanda de água:(a) balança com precisão de 0,01g e pissete, (b) misturador capacidade de 5 litros	67
Figura 3.35 – Fases do ensaio de demanda de água : (a) mistura seca, (b) formação de grânulos, (c) pasta se dividindo em três partes, (d) ponto de demanda de água.	68

Figura 3.36 – Ensaio de compactação e vibração (a) cilindro com o material (b) cilindro o material e pistão fixados sobre a mesa vibratória; (c) cilindro com o material após compactação e vibração e (d) catetômetro para as leituras das posições inicial e final do pistão.	71
Figura 3.37 – Glenium 51	73
Figura 3.38 – Equipamentos para a determinação da compatibilidade entre do cimento e superplastificante e do ponto de saturação:(a) misturador, (b) funil de Marsh e proveta graduada e cronometro.....	74
Figura 3.39 – Ponto de saturação das pastas.....	75
Figura 3.40 – Modificador de viscosidade Rheomac UW 410.	76
Figura 3.41 – Fibras de aço Dramix RC 65/35 BN.....	77
Figura 3.42 – μ CT's-3D.....	79
Figura 3.43 – Ensaio da barra de aço CA 50 de 12,5mm	80
Figura 3.44 – Curva típica tensão x deformação do aço de 12,5mm.....	81
Figura 3.45 – Ensaio da barra de aço CA 50 de 20mm	81
Figura 3.46 – Curva típica tensão x deformação do aço de 20 mm.....	82
Figura 4.1 – Ensaios realizados para avaliação dos concretos autoadensáveis com fibras de aço (CAAFA'S).	85
Figura 4.2 – Características dos materiais.....	89
Figura 4.3 – Criação do banco de constituintes e calibração dos parâmetros.....	90
Figura 4.4 – Etapas realizadas para a obtenção da dosagem do concreto	91
Figura 4.5 – Definição das matrizes	92
Figura 4.6 – Sequencia de mistura dos constituintes das matrizes autoadensáveis	95
Figura 4.7 – Continuação da sequência de mistura das matrizes autoadensáveis.....	96
Figura 4.8 – Tronco de cone metálico utilizado no ensaio de espalhamento.....	98

Figura 4.9 – Anel J.....	101
Figura 4.10 – Caixa L.....	102
Figura 4.11 – Funil V.....	103
Figura 4.12 – Coluna de segregação	104
Figura 4.13 – Pressômetro	105
Figura 4.14 – Reômetro BTRHEOM.....	106
Figura 4.15 – (a) Instrumentação do corpo de prova, (b) corpo de prova na máquina de ensaios Shimadzu	108
Figura 4.16 – (a) Instrumentação do corpo de prova, (b) posição do corpo de prova na máquina de ensaios	109
Figura 4.17 – Índices de tenacidade, indicados em curva carga x deslocamento, de acordo com a norma ASTM C1018 (1994)	111
Figura 4.18 – (a) Instrumentação do corpo de prova, (b) posição do corpo de prova na máquina de ensaios	112
Figura 4.19 – (a) Corpo de prova, (b) posição do corpo e prova na máquina de ensaios.....	113
Figura 4.20 – (a) Dispositivo para ensaio, (b) posição do corpo e prova na máquina de ensaio	114
Figura 4.21 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova para o ensaio de arrancamento de fibras de aço.	115
Figura 4.22 – Formas do modelo de arrancamento com barras.....	116
Figura 4.23 – Dispositivo e instrumentação do modelo de arrancamento.....	116
Figura 4.24 – Produção dos concretos para moldagem para os ensaios estruturais.....	117
Figura 4.25 – Procedimento de moldagem dos prismas.	118
Figura 4.26 – (a) Geometria do tirante usado no ensaio de tração, (b) Localização dos extensômetros na armadura.....	121

Figura 4.27 – (a) Instrumentação do corpo de prova, (b) posição do corpo e prova na máquina de ensaios.....	122
Figura 4.28 – Detalhe das barras e moldes dos tirantes.....	123
Figura 4.29 – Moldagem dos tirantes.....	124
Figura 4.30 – Desmoldagem dos tirantes.....	125
Figura 4.31 – Metodologia de análise do espaçamento de fissura.....	126
Figura 4.32 – Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de retração por secagem.....	129
Figura 4.33 – Ensaio de retração por secagem.....	130
Figura 4.34 – Moldagem dos corpos de prova para fluência à compressão.....	131
Figura 4.35 – Etapas de selagem dos corpos de prova para o ensaio de fluência à compressão.....	132
Figura 4.36 – Dispositivos de leitura para o ensaio de fluência á compressão.....	133
Figura 4.37 – Ensaio de fluência na compressão.....	134
Figura 4.38 – Ensaio de absorção de água por imersão.....	135
Figura 4.39 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	136
Figura 4.40 – Ensaio de penetração acelerada de íons cloreto.....	138
Figura 5.1 – Valores de abatimento para as matrizes estudadas.....	141
Figura 5.2 – Valores de espalhamento do tronco de cone para as matrizes estudadas.....	142
Figura 5.3 – Resultados dos ensaios no tronco de cone invertido.....	142
Figura 5.4 – Resultados dos ensaios para (t_{500}).....	143
Figura 5.5 – Resultados dos ensaios no pressômetro.....	143
Figura 5.6 – Relação abatimento, espalhamento <i>versus</i> índice de reforço.....	144
Figura 5.7 – Resultados dos ensaios no anel J.....	146
Figura 5.8 – Resultados dos ensaios na caixa L.....	146

Figura 5.9 – Resultados dos ensaios no funil V	147
Figura 5.10 – Resultados dos ensaios na coluna de segregação.....	147
Figura 5.11 – Relação entre a razão H2/H1 <i>versus</i> índice de reforço	148
Figura 5.12 – Relação entre tempo de fluidez <i>versus</i> índice de reforço.....	149
Figura 5.13 – Relação entre torque e velocidade de rotação das matrizes autoadensáveis de referência.....	150
Figura 5.14 – Relação entre torque e velocidade de rotação das matrizes autoadensáveis com inclusão de 0,50% de fibras de aço	150
Figura 5.15 – Relação entre torque e velocidade de rotação das matrizes autoadensáveis com inclusão de 0,75% de fibras de aço	151
Figura 5.16 – Relação entre torque e velocidade de rotação das matrizes autoadensáveis com inclusão de 1,0% de fibras de aço	151
Figura 5.17 – Relação entre tensão de escoamento, viscosidade plástica e índice do reforço	152
Figura 5.18 – Curvas típicas, tensão <i>versus</i> deformação, obtidas em ensaios de compressão aos 28 dias de matrizes de referências.....	153
Figura 5.19 – Valores de resistência à compressão, deformação axial e módulo de elasticidade das matrizes de referência.....	154
Figura 5.20 – Modo de fratura no ensaio de compressão das matrizes de referência	155
Figura 5.21 – Linha de ruptura dos corpos de prova submetidos a ensaios de compressão....	156
Figura 5.22 – Curvas típicas, tensão <i>versus</i> deformação, obtidas em ensaios de compressão das matrizes com fibras de aço aos 28 dias nas frações: 0,50%,0,75%,1,0%	157
Figura 5.23 – Valores de resistência à compressão, deformação axial e módulo de elasticidade das matrizes contendo fibras de aço nas frações: 0,50%,0,75%,1,0%	159
Figura 5.24 – Modo de fratura no ensaio de compressão da matriz MBG com fibras de aço...	160
Figura 5.25 – Modo de fratura no ensaio de compressão da matriz MSP com fibras de aço ...	160
Figura 5.26 – Modo de fratura no ensaio de compressão da matriz MSJ com fibras de aço....	161

Figura 5.27 – Curvas típicas, carga <i>versus</i> deslocamento, obtidas em ensaios de flexão das matrizes de referência.....	162
Figura 5.28 – Valores de resistência à flexão e deformação de ruptura para as matrizes de referência.....	163
Figura 5.29 – Modo de fratura no ensaio de flexão das matrizes de referência	164
Figura 5.30 – Curvas típicas, carga <i>versus</i> deslocamento, obtidas em ensaios de flexão das matrizes com fibras de aço aos 28 dias nas frações: 0,50%,0,75%,1,0%	165
Figura 5.31 – Valores de resistência de primeira fissura, deformação de primeira fissura, resistência á ruptura e deformação das matrizes contendo fibras de aço nas frações : 0,50%,0,75%,1,0%	167
Figura 5.32 – Valores para o índice de tenacidade matrizes contendo volumes de fibras de aço nas frações : 0,50%,0,75%,1,0% de acordo com a norma ASTM C1018	168
Figura 5.33 – Modo de fratura no ensaio de flexão da matriz MBG com de fibras de aço	169
Figura 5.34 – Modo de fratura no ensaio de flexão da matriz MSP com de fibras de aço	170
Figura 5.35 – Modo de fratura no ensaio de flexão da matriz MSJ com de fibras de aço	170
Figura 5.36 – Curvas típicas, tensão <i>versus</i> deformação, obtidas em ensaios de tração direta das matrizes de referência aos 28 dias.....	171
Figura 5.37 – Força de ruptura, tensão de ruptura e deformação na ruptura para matrizes de referência.....	172
Figura 5.38 – Modo de fratura no ensaio de tração direta das matrizes de referência	173
Figura 5.39 – Curvas típicas, tensão <i>versus</i> deformação e tensão <i>versus</i> abertura de fissura, MBG, obtidas em ensaio de tração direta das matrizes com fibras de aço aos 28 dias.....	174
Figura 5.40 – Curvas típicas, tensão <i>versus</i> deformação e tensão <i>versus</i> abertura de fissura, MSP, obtidas em ensaio de tração direta das matrizes com fibras de aço aos 28 dias	175
Figura 5.41 – Curvas típicas, tensão <i>versus</i> deformação e tensão <i>versus</i> abertura de fissura, MSJ, obtidas em ensaio de tração direta das matrizes com fibras de aço aos 28 dias	176
Figura 5.42 – Valores, resistência à tração direta e deformação na ruptura para matrizes contendo fibras de aço nas frações : 0,50%,0,75%,1,0%.	178

Figura 5.43 – Modo de fratura no ensaio de tração direta da matriz MBG com fibras de aço .	179
Figura 5.44 – Modo de fratura no ensaio de tração direta da matriz MSP com fibras de aço..	179
Figura 5.45 – Modo de fratura no ensaio de tração direta da matriz MSJ com fibras de aço ..	180
Figura 5.46 – Evolução da resistência à tração por compressão diametral para as matrizes de referência.....	181
Figura 5.47 – Modo de fratura no ensaio de tração por compressão diametral das matrizes de referência.....	181
Figura 5.48 – Curvas, força <i>versus</i> deslizamento, obtidas em ensaio de resistência ao arrancamento de fibras de aço aos 28 dias em matrizes de referência	182
Figura 5.49 – Ensaio de arrancamento de fibras de aço.....	183
Figura 5.50 – Força última, tensão última e tensão média nos ensaios de arrancamento	187
Figura 5.51 – Curvas típicas, força <i>versus</i> deslizamento, obtidas no ensaio de arrancamento de barras de aço das matrizes aos 28 dias.....	187
Figura 5.52 – Amostra do processo de fissuração das matrizes sem fibras	188
Figura 5.53 – Força última, tensão última e tensão média para as barra de 12,5mm	190
Figura 5.54 – Curvas típicas, força <i>versus</i> deslizamento, obtidas no ensaio de arrancamento de barras de aço de 12,5mm das matrizes com fibras de aço aos 28 dias	191
Figura 5.55 – Força última, tensão última e tensão média para as barra de 20mm.....	193
Figura 5.56 – Curvas típicas, força <i>versus</i> deslizamento, obtidas no ensaio de arrancamento de barras de aço de 20mm das matrizes com fibras de aço aos 28 dias	193
Figura 5.57 – Amostra do processo de fissuração para barras de 12,5mm.....	194
Figura 5.58 – Amostra do processo de fissuração para barras de 20mm	195
Figura 5.59 – Curvas típicas, força <i>versus</i> deformação obtidas no ensaio tração de tirantes das matrizes de referência aos 28 dias	199
Figura 5.60 – Amostra do processo de fissuração dos tirantes de concreto sem fibras (exemplo: MBG) no ensaio de tração axial	199

Figura 5.61 – Amostra do processo de fissuração no corpo de prova de tirantes com matriz de referência sob esforços de tração, com marcação da ordem das fissuras.....	200
Figura 5.62 – Evolução do espaçamento médio entre fissuras para o ensaio de tração em tirantes de concreto	202
Figura 5.63 – Evolução da abertura de fissura média para o ensaio de tração em tirantes de concreto	203
Figura 5.64 – Curvas típicas, típicas, força <i>versus</i> deformação obtidas no ensaio tração de tirantes das matrizes com fibras de aço frações: de 0,50% e 1,0% aos 28 dias	206
Figura 5.65 – Amostra do processo de fissuração dos tirantes de matrizes com fibras (exemplo: MSJ50) no ensaio de tração axial	207
Figura 5.66 – Amostra do processo de fissuração no corpo de prova de tirantes com matrizes com fibras (0,5%) sob esforços de tração, com marcação da ordem das fissuras	208
Figura 5.67 – Amostra do processo de fissuração dos tirantes de matrizes com fibras (exemplo: MSP100) no ensaio de tração axial	209
Figura 5.68 – Amostra do processo de fissuração no corpo de prova de tirantes com matrizes com fibras (1%) sob esforços de tração, com marcação da ordem das fissuras.....	210
Figura 5.69 – Evolução do espaçamento médio entre fissuras para o ensaio de tração em tirantes de concreto para volume de 0,50%.....	211
Figura 5.70 – Evolução do espaçamento médio entre fissuras para o ensaio de tração em tirantes de concreto para volumes de 1%.....	213
Figura 5.71 – Evolução do espaçamento médio entre fissuras para o ensaio de tração em tirantes de concreto	214
Figura 5.72 – Evolução do espaçamento médio entre fissuras para o ensaio de tração em tirantes de concreto	215
Figura 5.73 – Valores para absorção total para matrizes de referência.	216
Figura 5.74 – Valores para índice de vazios total para matrizes de referência.	217
Figura 5.75 – Valores para massa específica para matrizes de referência.....	217
Figura 5.76 – Valores para absorbitividade para matrizes de referência	218

Figura 5.77 – Valores para penetração por íons cloreto para matrizes de referência.....	219
Figura 5.78 – Retração por secagem com o tempo	220
Figura 5.79 – Retração por secagem das matrizes de referência.....	221
Figura 5.80 – Variação de massa de água com o tempo	222
Figura 5.81 – Relação entre a retração por secagem e a variação de massa de água.....	223
Figura 5.82 – Fluência básica na compressão: com fase elástica (coluna 1); sem fase elástica (coluna 2).....	224
Figura 5.83 – Fluência básica na compressão	226
Figura 5.84 – Fluência básica na compressão das matrizes: média e desvio	227

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Ensaio de aderência	26
Tabela 3.1 – Resistência à compressão do cimento	28
Tabela 3.2 – Valor da massa específica do cimento, cinza e sílica.	29
Tabela 3.3 – Composição química do cimento, cinza volante e sílica ativa.....	30
Tabela 3.4 – Valores de D50 e D80 dos materiais cimentícios e do solo.	33
Tabela 3.5 – Características granulométricas e físicas da areia quartzosa.	34
Tabela 3.6 – Composição química da areia.	35
Tabela 3.7 – Características mecânicas do agregado graúdo.....	40
Tabela 3.8 – Características granulométricas e físicas do agregado graúdo.	41
Tabela 3.9 – Composição química do cimento, cinza volante e sílica ativa.....	46
Tabela 3.10 – Ensaio de Abrasão “Los Angeles” para os agregados graúdos.....	49
Tabela 3.11 – Limites dos parâmetros analisados no AIMS.....	56
Tabela 3.12 – Limites de classificação dos agregados AI Rousan (2004)	57
Tabela 3.13 – Valores do índice de forma e angularidade do agregado miúdo	58
Tabela 3.14 – Parâmetros de análise do índice de angularidade dos agregados graúdos.....	61
Tabela 3.15 – Parâmetros de análise do índice de textura dos agregados graúdos	65
Tabela 3.16 – Parâmetros de análise do índice de esfericidade dos agregados graúdos	66
Tabela 3.17 – Compacidade experimental dos materiais finos	70
Tabela 3.18 – Compacidade experimental dos agregados.....	72
Tabela 3.19 – Aditivo super plastificante.....	73
Tabela 3.20 – Materiais, fator água/material e ponto de saturação	76
Tabela 3.21 – Aditivo modificador de viscosidade	77

Tabela 3.22 – Fibras de aço	78
Tabela 3.23 – Características geométricas das barras de aço de 12,5mm e 20mm	80
Tabela 3.24 – Propriedades mecânicas do aço 12,5mm	81
Tabela 3.25 – Propriedades mecânicas do aço 20mm.....	82
Tabela 4.1 – Propriedades utilizadas no programa BétonlabPro 3®	87
Tabela 4.2 – Composição das matrizes estudadas	93
Tabela 4.3 – Classes de espalhamento	98
Tabela 4.4 – Classes de viscosidade aparente t500 (sob fluxo livre)	100
Tabela 4.5 – Classes de habilidade passante pelo anel J (fluxo livre).....	101
Tabela 4.6 – Classes de habilidade passante caixa L (fluxo confinado)	102
Tabela 4.7 – Classes de viscosidade aparente pelo funil V (fluxo confinado)	103
Tabela 4.8 – Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação	104
Tabela 5.1 – Valores para os ensaios de abatimento, espalhamento do tronco de cone,	140
espalhamento do tronco de cone invertido, e ar aprisionado	140
Tabela 5.2 – Valores para os ensaios de anel J, caixa L funil V e coluna de segregação, das misturas realizadas.....	145
Tabela 5.3 – Resultados de tensão de escoamento e viscosidade plástica das matrizes	152
Tabela 5.4 – Resultados (média e coeficiente de variação) da resistência á compressão aos 28 dias, deformação axial e módulo de elasticidade das matrizes de referência	154
Tabela 5.5 – Resultados (média e coeficiente de variação) da resistência á compressão aos 28 dias, deformação axial e módulo de elasticidade das matrizes com fibras de aço	158
Tabela 5.6 – Resultados (média e coeficiente de variação) da resistência á flexão e deslocamento aos 28 dias na ruptura das matrizes de referência	162

Tabela 5.7 – Resultados (média e coeficiente de variação), da resistência á flexão e deslocamento na flexão aos 28 dias, para a primeira fissura e ruptura de matrizes contendo volumes de fibras de aço nas frações : 0,50%,0,75%,1,0%	166
Tabela 5.8 – Resultados (média e coeficiente de variação), da resistência e deformação na tração direta aos 28 dias, para as matrizes de referência.....	172
Tabela 5.9 – Resultados (média e coeficiente de variação), da resistência e deformação na tração direta aos 28 dias, para as matrizes contendo volumes de fibras de aço nas frações: 0,50%,0,75%,1,0%	177
Tabela 5.10 – Resultados (média e coeficiente de variação) da evolução da resistência á tração por compressão para as matrizes de referência	180
Tabela 5.11 – Valores médios e coeficientes de variação da força <i>versus</i> deslizamento até a ruptura nos ensaios de arrancamento das fibras de aço.....	183
Tabela 5.12 – Valores médios da força e deslizamento até a ruptura nos ensaios de arrancamento das matrizes sem fibras em barras de 12,5mm e 20mm	185
Tabela 5.13 – Valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento das matrizes sem fibras em barras de 12,5mm	186
Tabela 5.14 – Valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento para matrizes sem fibras em barras de 20mm	186
Tabela 5.15 – Valores médios da força e deslizamento até a ruptura nos ensaios de arrancamento das matrizes com fibras de aço em barras de 12,5mm	189
Tabela 5.16 – Valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento para matrizes com fibras de aço em barras de 12,5mm	190
Tabela 5.17 – Valores médios da força e deslizamento até a ruptura nos ensaios de arrancamento das matrizes em barras de 20mm	191
Tabela 5.18 – Valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento para matrizes com fibras de aço e barra de 20mm.....	192
Tabela 5.19 – Valores médios das propriedades dos ensaios nos tirantes até o surgimento da primeira fissura.....	196
Tabela 5.20 – Valores médios das propriedades dos ensaios nos tirantes após a múltipla fissuração	197

Tabela 5.21 – Valores do módulos de elasticidade teóricos e experimental para os compósitos na fase elástica inicial	197
Tabela 5.22 – Coeficiente de conformação superficial calculado pela NBR 7477.....	201
Tabela 5.23 – Valores médios das propriedades dos ensaios nos tirantes após a múltipla fissuração	204
Tabela 5.23 – Valores médios das propriedades dos ensaios nos tirantes após a múltipla fissuração	205
Tabela 5.24 – Valores do módulos de elasticidade teóricos para os compósitos na fase elástica inicial	205
Tabela 5.25 – Coeficiente de conformação superficial calculado pela NBR 7477, pela Equação (5.1).....	212
Tabela 5.26 – Parâmetros de absorvidade das matrizes de referência.....	216
Tabela 5.27 – Parâmetros de absorvidade das matrizes de referência.....	219
Tabela 5.28 – Valores da deformação por secagem das matrizes	221
Tabela 5.29 – Valores de módulo de elasticidade (carregamento e descarregamento), e de fluência específica (carregamento), na compressão	225

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
ACI	Instituto Americano do concreto
AIMS	Aggregate Imaging System
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
ANOVA	Análise de variância
ARI RS	Alta resistência Inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
BG	Brita de granito
C60	Concreto com resistência de 60 MPa
CAA	Concreto autoadensável
CAAFA	Concreto autoadensável com fibras de aço
CAD	Concreto auto desempenho
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CC	Concreto convencional
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia
CP	Cimento Portland
CRF	Concreto reforçado com fibras
CRFA	Concreto reforçado com fibras de aço
CRF-UAP	Concretos fibrosos de ultra alta performance
CV	Coefficiente de variação
DNPN	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difratogramas de Raios-X
EFERNAC	Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete
FRX	Fluorescência de raio-X
GPa	Giga Pascal
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
LABEST	Laboratório de Estruturas
LCPC	Laboratório Central de Pontes e Rodovias
MEC	Método do Empacotamento Compressível
MPa	Mega Pascal
PIB	Produto Interno Bruto

RILEM-CEB-FIP	International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures
RS	Resistência ao sulfato
SJ	Seixo proveniente do rio Japurá no estado do Amazonas
SP	Seixo proveniente do rio Paraná entre os estados de São Paulo com Mato Grosso do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
μ CT	Micro Tomografia Computadorizada
β	Ângulo de inclinação do eixo da nervura transversal em relação ao eixo da barra
η	Coefficiente de conformação superficial
Γ_0	Parâmetro numérico. Tensão
ε_a	Deformação axial de pico na compressão
δ_{fa_rup}	Deslizamento até a ruptura para o arrancamento de fibras de aço
ε_t	Deformação na tração direta
δ_u	Deslizamento até a ruptura para o arrancamento de barra de aço no concreto
μ	Viscosidade Plástica
A	Parâmetro numérico
a_t	Altura das nervuras transversais
B	Parâmetro numérico.
b_t	Largura das nervuras transversais
D_{50}	Diâmetro abaixo do qual se situam 50 por cento em peso das partículas
D_{80}	Diâmetro abaixo do qual se situam 80 por cento em peso das partículas
$D_{m\acute{a}x}$	Diâmetro máximo
E	Módulo de elasticidade na compressão
E_c	Módulo de elasticidade do compósito
E_{f_28}	Módulo de elasticidade na fluência aos 28 dias
E_{f_92}	Módulo de elasticidade na fluência aos 92 dias
e_t	Espaçamento entre as nervuras transversais
f_{bd}	Resistência de aderência
f_c	Resistência de à compressão
$f_{f_1}^a$	Resistência á flexão de primeira fissura
f_{f_rup}	Resistência á flexão até a ruptura
f_{fa_rup}	Força máxima até a ruptura para o arrancamento de fibras de aço
f_{st}	Força de ruptura do aço
f_t	Resistência na tração direta

F_u	Força até a ruptura para o arrancamento de barra de aço no concreto
f_y	Força de escoamento do aço
K	Índice de compactação
N	Velocidade de rotação
P	Aderência dos grãos à pasta de cimento
Q	Resistência intrínseca do agregado
Q	Carga elétrica
S	Prevenção à segregação
W	Perda de massa
Γ	Torque
ϵ_f	Deformação na fluência
τ_0	Tensão de escoamento inicial
τ_m	Tensão de aderência média para o arrancamento de barra de aço no concreto
τ_u	Tensão de aderência última para o arrancamento de barra de aço no concreto
$\delta_{f_1}^a$	Deslocamento à flexão de primeira fissura
$\delta_{f_{rup}}$	Deslocamento à flexão até a ruptura
τ_0	Tensão de Escoamento

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Um avanço considerável tem sido notado na indústria do concreto no decorrer dos últimos anos, principalmente devido ao surgimento de novos aditivos químicos, minerais e aos diversos tipos de reforços fibrosos. Tais avanços permitiram o surgimento, dentre outros, do concreto de alto desempenho (CAD), do concreto autoadensável (CAA), do concreto reforçado com fibras (CRF) e dos concretos fibrosos de ultra-alta performance (CRF-UAP). Esses desenvolvimentos estão permitindo que concretos sejam projetados para atender às necessidades específicas de cada projeto estrutural otimizando-se a construção e a operação (vida útil) das obras de infraestrutura.

Dentre os constituintes do concreto dois deles merece atenção especial: cimento e o agregados. Esses constituintes compõem a maior fração volumétrica do concreto e são responsáveis pela alta emissão de CO₂ e consumo de matérias primas do concreto. Na presente tese de doutorado a ênfase se dará no uso de um tipo de agregado natural encontrado em leitos de rios, o seixo rolado, em substituição ao agregado britado proveniente do desmonte de rochas. A região Amazônica é constituída geomorfologicamente, em sua grande parte, por sedimentos não consolidados das bacias dos rios Solimões e Amazonas. Essa característica geológica leva a uma escassez do agregado graúdo proveniente de britagem de rocha, insumo indispensável na construção civil. Isso possibilitou o seixo de rolado ser competitivo em comparação com o agregado britado proveniente de rochas de arenito existentes na região. Em consequência disso, o seixo extraído do leito dos supriu a deficiência de agregados na região. Devido às particularidades da região Amazônica, os locais de extração de seixo rolado encontram-se a longas distâncias do centro consumidor, encarecendo o material em consequência dos custos de extração e transporte. Mesmo com essas adversidades, o seixo de rio é bastante utilizado, em Manaus e nos interiores da Amazônia em concretos asfálticos e concretos de cimento Portland de resistência e consistência normal.

Este trabalho visa contribuir com o aumento do conhecimento sobre a utilização dos seixos rolados como agregados para produção de concretos autoadensáveis de alta resistência (classe de resistência C60) com foco na avaliação das suas propriedades nas escalas material e estrutural. Na dosagem dos concretos foi utilizado o modelo de empacotamento compressível (MEC) e fibras de aço de 35mm de comprimento e em frações volumétricas de 0,5% , 0,75% e 1,0% foram utilizadas como elemento de reforço visando o desenvolvimento de compósitos cimentícios autoadensáveis de alta performance para uso estrutural.

As propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas desse tipo de agregado foram determinadas visando a dosagem científica de concretos autoadensáveis. Em seguida foram produzidos os concretos e determinadas as suas propriedades reológicas, mecânicas, de durabilidade e as suas deformações diferidas. A aderência barra de aço-concreto foi determinada através da realização de ensaios de arrancamento de corpos de prova prismáticos e em tirantes de concreto. Espera-se com esse estudo contribuir para uma mudança de cultura no meio técnico amazônico e de outras regiões onde esses agregados sejam disponíveis, através da demonstração das potencialidades do concreto autoadensável fibroso contendo seixo de rio como agregado graúdo.

1.2 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar as propriedades materiais e estruturais de concretos autoadensáveis de alta resistência utilizando como agregado graúdo o seixo de rio e utilizando fibras de aço nas frações de 0,50%, 0,75% e 1,0% como elemento de reforço.

1.3 Objetivos específicos

- Avaliar as características dos agregados naturais através de métodos de ensaio da Norma Brasileira e outros necessários à dosagem científica dos mesmos;
- Dosar os concretos com base no Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) considerando as propriedades e características dos materiais constituintes;
- Avaliar a influência do tipo de agregado e do teor de fibras nas propriedades reológicas do concreto: tensão cisalhante, viscosidade plástica, abatimento, espalhamento, espalhamento utilizando o cone invertido, caixa L, funil V, anel J, coluna de segregação e teor de ar aprisionado;
- Avaliar a influência do tipo de agregado e do teor de fibras de aço nas propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido: resistência à compressão, módulo de elasticidade, deformação correspondente à tensão de ruptura, resistência à tração direta e resistência à flexão em quatro pontos;
- Avaliar aderência da fibra de aço-concreto através da realização de ensaios de arrancamento de fibras de aço;
- Avaliar a influência do tipo de agregado e do teor de fibras na aderência barra de aço-concreto através da realização de ensaios de arrancamento;
- Avaliar a influência do tipo de agregado e do teor de fibras na aderência barra de aço-concreto através da realização de ensaios em tirantes;

- Avaliar influência do tipo de agregado na fluência na compressão e a influência do tipo de agregado e do teor de fibras na retração por secagem das misturas contendo seixo rolado.
- Avaliar a influência do tipo de agregado na durabilidade dos concretos através de ensaios de penetração acelerada de íons cloreto e difusão iônica dos cloretos, absorção por imersão, absorção por capilaridade.

1.4 Resumo dos capítulos

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre os fatores relevantes que motivaram a pesquisa ressaltando a importância do tema e são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica referente aos agregados, concretos autoadensáveis (CAA) e concretos autoadensáveis com fibras de aço (CAAF), assim como os procedimentos para avaliação do concreto no estado fresco e endurecido.

O Capítulo 3 apresenta a caracterização e descrição dos procedimentos de preparação dos materiais.

O Capítulo 4 estabelece a metodologia dos ensaios reológicos, mecânicos, estruturais e de durabilidade assim como os procedimentos de produção dos CAA'S e CAAF'S.

O Capítulo 5 analisa e discute os resultados dos ensaios reológicos, mecânicos, estruturais e de durabilidade dos CAA'S e CAAF'S.

As conclusões gerais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros são relatados no Capítulo 6.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.5 AGREGADOS

O Agregado é definido com sendo um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto. O agregado natural é o material pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, podendo ser submetido à lavagem ou britagem. O pedregulho ou cascalho é descrito como agregado graúdo que pode ser utilizado em concreto tal qual é encontrado na natureza, sem qualquer tratamento que não seja lavagem e seleção (NBR 9935, 2011).

As rochas e cascalhos, são considerados abundantes e são explorados para obtenção de agregados em quase todos os países. Segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPAC), o consumo de brita e cascalho está dividido em 32% para concreteiras, 24% construtoras, 14% pré-fabricados, 10% revendedores/lojas, 9% pavimentadoras/usinas de asfalto, 7% órgãos públicos e 4% outros (DNPM, 2014).

A demanda de agregados para a construção civil, elevou-se de 460 milhões de toneladas em 1997 para 673 milhões de toneladas em 2011, correspondendo a um crescimento de 46,2% ou a taxa composta de crescimento anual (CAGR – *Compound Annual Growth Rate*) de 2,8% a.a. No período de 2001 a 2011, o crescimento da demanda foi de 92,3% e um CAGR de 6,8% a.a., representando um grande aumento de consumo desse material. Foi realizada uma correlação da evolução da demanda por cimento e do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e projetou-se o crescimento no período 2012 a 2022, partindo-se de uma estimativa de demanda de 696 milhões de toneladas em 2012 e atingindo-se o valor de 1,12 bilhão de toneladas em 10 anos.

O indicador BRASIL para o consumo de agregados em 2011 foi de 3,50 t/habitante. O consumo per capita brasileiro evoluiu de 3,3 toneladas de agregados por habitante/ano em 2010 para 3,5 t/hab. em 2011, com incremento de 6%. Comparativamente aos países desenvolvidos, o Brasil ainda está muito distante do valor médio histórico de 6 a 7

toneladas por habitante/ano (por exemplo, Estados Unidos). O consumo de agregados no Brasil, no ano de 2011 foi de 673.741.863,00, a região norte obteve um consumo para o mesmo ano de 45.999.319,00 (6,83%), o estado do Amazonas o consumo foi de 10.511,744,00 toneladas. Já a produção de agregados no ano de 2002 foi de 273 milhões de toneladas, estima-se uma projeção para o ano de 2022 de 807 milhões de toneladas. A Figura 2.1 apresenta a curva de evolução da produção e projeções evolução de agregados, no período de 2002 a 2022 (IBRAM,2012).

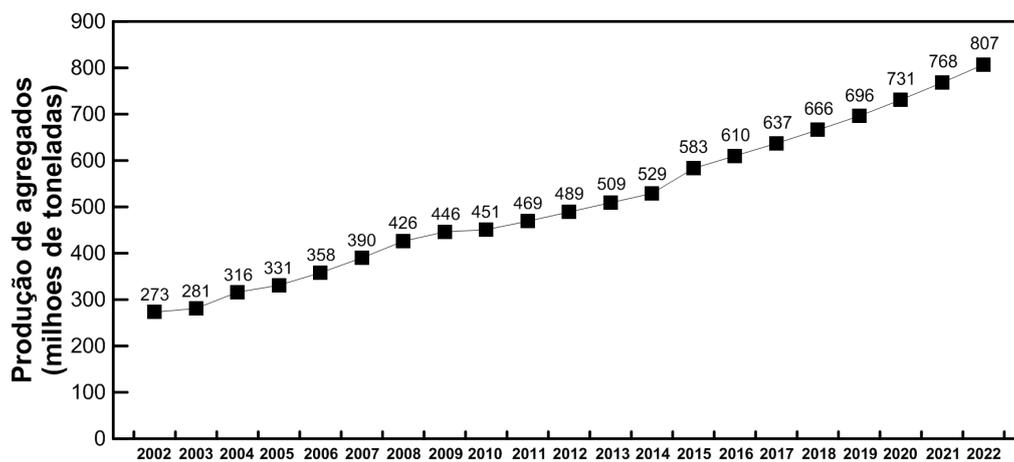


Figura 2.1 – Evolução da produção de agregados no Brasil (ANEPAC, 2012)

A dispersão geográfica é uma das características dos agregados utilizados na construção civil, a distância em que o produto se encontra do mercado consumidor, tem impacto direto no custo final do concreto produzido. A britagem de rochas apresenta-se como alternativa regional apenas onde o produto encontra-se em grandes volumes. As grandes distâncias e os custos de transporte inviabilizam o comércio entre estados onde há escassez desse produto. Isso faz com que regiões Norte e Nordeste, mas principalmente a região Norte, onde os volumes de produção de pedra britada não são significativos procurem alternativas utilizando o seixo rolado como agregado em substituição à pedra britada o que é economicamente importante no setor da construção civil do estado.

As bacias intracratônicas fanerozóicas do Brasil estão situadas no interior continental da Plataforma Sul-Americana, região de história geológica longa e complexa, onde se depositaram espessas sequências de rochas sedimentares paleozoicas e mesozoicas, algumas com intenso magmatismo básico e alcalino associado (ALMEIDA *et al.*, 2000). Essas rochas sedimentares afloram em área superior a 3.500.000 km², remanescente de superfície primitivamente muito maior, cujos sítios deposicionais foram condicionados por estruturas herdadas do Ciclo Brasileiro-Pan-Africano (MILANI e THOMAZ FILHO, 2000). As rochas sedimentares da Bacia do Amazonas, que possuem 515.000 km² de área, estão em onlap sobre as rochas pré-cambrianas dos escudos das Guianas a norte e Brasil Central a sul. Seu limite ocidental é com a Bacia Solimões (Alto de Purus) e o oriental, com o rifte mesozoico de Marajó, é a ombreira do rifte, denominada de “Arco de Gurupá”. A espessura total das rochas sedimentares que a preenchem atinge 5.000 m (CUNHA *et al.*, 1994).

Dessa forma, grande parte do estado do Amazonas, não apresentam maciços rochosos para britagem. Nessas áreas, utiliza-se agregados naturais como seixo de rio (seixo rolado), como alternativa à pedra britada para na construção civil. No passado, o agregado graúdo empregado em obras no Amazonas era obtido por processo mecânico, utilizando o arenito, rocha de cor avermelhada, para obtenção da pedra britada. Esse agregado foi muito usado em obras na capital Manaus e no interior do estado. Principalmente devido ao crescimento da demanda, o emprego da pedra britada de arenito gerou um aumento da degradação ambiental nas proximidades da cidade de Manaus. Em função dessa agressão, as jazidas passaram a ficar mais afastadas do centro consumidor. No mercado da construção civil, a pedra britada teve seu valor aumentado consideravelmente, o que elevou o custo do concreto no estado. O leito dos rios amazônicos ofereceram uma alternativa para a exploração do agregado chamado “seixo rolado”, abundante em algumas regiões do Brasil. Em comparação à extração da pedra britada, a do seixo rolado ainda é menos dispendioso e constitui-se, na atualidade, o material utilizado na maioria dos concretos na região, a despeito de causar também degradação no leito de rios. O seixo rolado é formado por fragmentos de minerais e/ou de rochas preexistentes oriundos do desgaste da rocha sedimentar, pela ação do

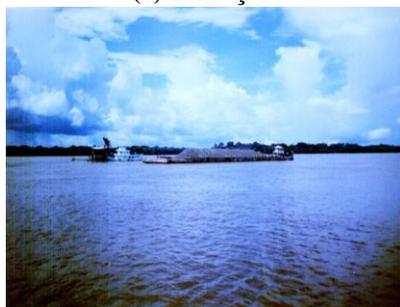
intemperismo e depositados no leito dos rios dando origem aos depósitos de seixo que por atrito podem ter formas mais angulares ou arredondadas. Estes agregados naturais são disponíveis no mercado da construção civil em Manaus provenientes dos rios localizados nas proximidades dos municípios, tais como: Japurá, Novo Aripuanã, São Sebastião do Uatumã. O processo de extração do seixo rolado, inicia-se com a aspersão do material no leito dos rios através de tubos conectados a uma draga fixa em uma balsa (Figura 2.3 (a)). Uma outra balsa é utilizada para estocar e transportar o material do local de extração até Manaus por via fluvial, onde são estocados e revendidos. A Figura 2.3 (b) ilustra o carregamento de uma balsa com seixo rolado. O transporte é realizado através dos rios (Figura 2.3 (c)). Após o descarregamento do material no depósito seu transporte é realizado até o mercado consumidor (Figura 2.3 (d)), Não há qualquer outro tipo de beneficiamento do material como por exemplo: separação do seixo em diferentes granulometrias nem remoção do material fino (areia). O seixo rolado em Manaus é classificado apenas como fino (areão), médio e grosso .



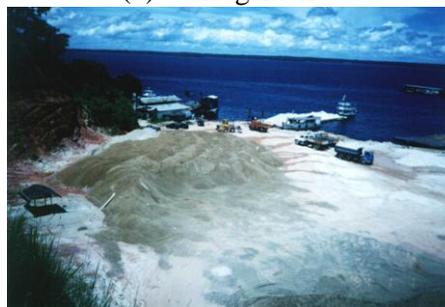
(a) Extração



(b) Carregamento



(c) Transporte



(d) Depósito em Manaus

Figura 2.2 – Extração de seixo no Amazonas

1.6 CONCRETO AUTOADENSÁVEL - CAA

Com a finalidade de garantir uma maior homogeneidade e melhoria na durabilidade das estruturas nas obras japonesas, sem a influência dos fatores de adensamento, foi proposto em 1986 o concreto autoadensável (CAA). De acordo com Sedran e De Larrard (2000), Okamura e sua equipe realizou na Universidade de Tóquio o desenvolvimento do CAA. Empregando materiais da região, tiveram seus primeiros resultados em 1988. A princípio este tipo de concreto foi chamado de “concreto autoadensável de elevado desempenho” e somente depois, foi chamado simplesmente de “concreto autoadensável”. O concreto autoadensável em seu estado fresco tem a capacidade de preencher as formas e envolver as barras das armaduras, demonstrando excelente deformabilidade, e sem perda da homogeneidade.

O CAA é um concreto de alta fluidez elevada e viscosidade plástica estável, pode ser lançado facilmente sem necessidade de vibração ou outros procedimentos de compactação, permanecendo homogêneo, coeso e com elevada resistência à segregação (OKAMURA, 1997; SU *et al.*, 2001). A resistência à segregação é uma propriedade que caracteriza a capacidade do concreto em se manter uniforme durante o seu transporte, lançamento e adensamento e os mecanismos que governam essa propriedade são a coesão e a viscosidade (FERRARIS *et al.*, 2001). Entretanto o CAA exige mais cuidado em sua produção quando comparado ao concreto convencional devido ao fato de ser muito sensível às variações das características dos constituintes e procedimentos de produção, conforme aponta (DE LARRARD 1999).

Para que um concreto ser considerado autoadensável, deve apresentar três propriedades fundamentais: fluidez, coesão ou habilidade passante e resistência à segregação (EFERNAC, 2002). Para que o CAA tenha as características descritas acima, é necessário que as propriedades reológicas confirmem-lhe trabalhabilidade adequada devido à ausência de qualquer energia de vibração mecânica ou manual durante a concretagem. As principais características do CAA no estado fresco são a deformabilidade, a viscosidade e a coesão.

A capacidade do concreto de fluir através da fôrma, pela ação de seu peso próprio é definida como deformabilidade que é a distribuição uniforme dos constituintes internos do concreto, garantindo a homogeneidade da mistura está associada à tensão de escoamento do concreto. Quanto menor o valor da tensão, maior será a facilidade do CAA em deslocar-se. Uma deformabilidade será considerada suficiente quando o concreto compactar-se somente com o seu peso próprio, sem a necessidade de vibração (OKAMURA *et al.*, 2003). Uma forma de aumentar a deformabilidade e a redução do atrito interno entre as partículas é adicionando finos à mistura, ou com uma composição granulométrica contínua.

A deformabilidade do concreto é diretamente relacionada com a da pasta de cimento. Desta forma, o fator água/cimento é importante, pois influencia diretamente na trabalhabilidade da pasta. Sendo assim, a utilização de agentes redutores de água possibilita o aumento da deformabilidade da pasta, devido à redução do atrito interno entre as partículas sólidas, aumentando a fluidez.

A reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação dos fluidos, sendo estes definidos como substâncias que se deformam continuamente quando submetidas a uma tensão de cisalhamento, não importando quão pequena possa ser essa tensão. Ela refere-se à relação entre a tensão, a deformação, a taxa de deformação e o tempo (BANFILL, 2003).

A reologia tem por finalidade prever a força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento em um corpo ou, reciprocamente, prever a deformação ou o escoamento resultante da aplicação de um dado sistema de forças em um corpo (MANRICH e PESSAN, 1987).

O comportamento do CAA pode ser descrito com base na reologia das suspensões de partículas dependente das relações entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, a fim de se obter como resultado, a tensão de escoamento e viscosidade plástica (DE LARRARD *et al.*, 1997).

Os principais mecanismos que governam a reologia são o atrito entre as partículas e a quantidade de água livre que depende da tensão superficial e da dispersão das partículas. O uso de superplastificante pode alterar a dispersão das partículas finas e a tensão superficial no CAA e os agentes de viscosidade melhoram a viscosidade plástica (KHAYAT e TANGTERMSIRIKUL, 2000).

Na reologia, as propriedades mecânicas dos materiais são descritas em termos de contribuições elásticas, viscosas e inerciais (VAN WAZER *et al.*, 1966). A deformação elástica é expressa como uma deformação relativa. A deformação viscosa é expressa como taxa de cisalhamento e corresponde à mudança na velocidade do escoamento com uma distância medida em determinados ângulos em relação à direção do fluxo.

O CAA apresenta dois parâmetros reológicos para sua caracterização: a tensão de escoamento inicial (τ_0) e a viscosidade (μ). A tensão de escoamento consiste na tensão de cisalhamento mínima necessária para que o escoamento se inicie e está relacionado ao estado de floculação ou dispersão das partículas. A viscosidade plástica está relacionada ao gradiente de velocidade gerado pela aplicação da tensão de cisalhamento, resultando na relação entre esta última e a taxa de escoamento, sendo indicativo da estabilidade da mistura.

Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor a tensão necessária para submetê-lo a uma dada taxa de cisalhamento constante (FERRARIS, 1999; BANFILL, 2003). Os fluidos podem ser classificados de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento (FOX e McDONALD, 1998). Assim, a caracterização reológica dos fluidos envolve a determinação da taxa de cisalhamento do material com o tempo. A taxa de cisalhamento é representada por um ponto acima de $\dot{\gamma}$ e indica que a taxa de cisalhamento é derivada do tempo da deformação causada pela ação da tensão de cisalhamento sobre a lâmina de um líquido (SCHRAMM, 2006).

Existem dois modelos matemáticos utilizados para representar a reologia do concreto: Herschel-Bulkley e de Bingham. Persson (2001) iniciou uma série de estudos experimentais e numéricos das propriedades mecânicas do CAA, com adição de fíler de quartzo, comparando-as com as propriedades correspondentes do concreto convencional.

De acordo com Barros *et al.* (2006), são necessários cuidados suplementares durante o processo de cura do CAA, para evitarem-se fissuras por retração plástica, principalmente em elementos estruturais susceptíveis a este tipo de fenômeno.

Zhu *et al.* (2001) estudaram os parâmetros de uniformidade do CAA com relação ao concreto convencional (CC) em elementos estruturais tais como vigas e pilares. O estudo demonstrou que o CAA promove uma qualidade muito superior ao concreto convencional vibrado, fazendo com que as propriedades no local de lançamento do concreto permaneçam iguais às do concreto comum.

DOMONE (2007) fez uma comparação e análise de mais de 70 estudos sobre as propriedades mecânicas do CAA, como resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade, energia de fratura, aderência das barras de aço e propriedades estruturais em obras. O estudo observou uma dispersão significativa entre os resultados obtidos por diferentes autores que foi associada à diversidade de materiais utilizados, às dosagens e aos procedimentos de ensaios. A resistência à compressão também foi fortemente influenciada pelo tipo e quantidade de adição mineral utilizada assim como pelo fator água/aglomerante. A razão entre a resistência à tração e à compressão do CAA é equivalente à do concreto convencional. Porém o autor, observou que o módulo de elasticidade do CAA foi aproximadamente 40% menor do que o módulo dos concretos convencionais, considerando-se concretos com resistências à compressão próximas a 20 MPa. Entretanto essa diferença foi de apenas 5% entre os módulos de elasticidade dos concretos de alta resistência (90 a 100 MPa) e os CAA de alta resistência.

No que diz respeito ao processo de fratura no CAA, em comparação ao concreto convencional, apresentou resultados conflitantes. Em alguns estudos foram observados valores de energia de fratura e processo de amolecimento similar entre o CAA e o concreto convencional para resistências equivalentes. A aderência das barras de aço da armadura ativa e passiva no CAA apresentou um comportamento similar ao do concreto convencional equivalente. A variação das propriedades dos elementos estruturais do CAA em obras mostrou resultados semelhantes aos dos concretos convencionais, entretanto, a performance do CAA em termos de trabalhabilidade foi melhor.

No reforço em estruturas, estudos indicam que o CAA apresenta boa funcionalidade para aplicação nesse tipo de obra, principalmente devido à utilização de diâmetros máximos de agregados menores do que os usados nos concretos convencionais. Além disto, a elevada viscosidade e a densa microestrutura garantem uma distribuição adequada dos agregados e boa aderência ao concreto existente, conforme observado nos trabalhos de (OMAR *et al.*,2005).

Com relação à aderência entre o CAA e a armadura passiva, Barros *et al.*, (2006) afirmaram que o CAA apresenta maior aderência às armaduras do que os concretos convencionais de mesmo fator água/cimento. Segundo os autores, isto ocorre devido à microestrutura e interface entre o agregado e a pasta dos CAA serem mais densas do que aquelas observadas nos concretos convencionais.

Almeida filho (2006) fez um estudo teórico e experimental sobre a aderência entre o aço e o concreto através de ensaios carregamentos monotônicos de flexão em vigas e de arrancamento seguindo o modelo padrão RILEM-CEB-FIP (1973), obteve como resultado um comportamento similar entre os CAA e os concretos convencionais de referência, tanto nos modelos de viga quanto nos de arrancamento.

Isa *et al.* (2004) avaliaram o comportamento aderente de barras de aço nervuradas nos CAA de alta resistência e nos concretos de alta resistência. A aderência entre as barras de aço e o concreto foi determinada por meio de ensaios de flexão com carregamento monotônico de curta duração, em vigas de concreto. Os resultados

indicaram que os CAA de alta resistência possuem o mesmo comportamento aderente dos concretos de alta resistência.

As principais propriedades de durabilidade do concreto podem ser associadas à penetração de cloretos; à resistência ao fogo; à resistência ao gelo; aos sais presentes na água e à resistência ao sulfato (PERSSON, 2003).

O CAA possui uma maior resistência à penetração de cloretos e gases do que o concreto convencional, devido à maior densidade de sua microestrutura. O tipo de adição mineral utilizada no CAA pode influenciar a durabilidade deste tipo de concreto, pois alguns minerais reagem quimicamente e com mais intensidade na presença de cloretos ou sulfatos. As partículas de pó de pedra são muito mais sensíveis ao ataque de sulfatos do que as outras adições (BARROS *et al.*, 2006).

Segundo Persson (2003) uma grande quantidade de fíler, do tipo pó de pedra, pode aumentar a carbonatação, reduzindo as propriedades de durabilidade do CAA em comparação ao concreto convencional. Notou-se que os danos sofridos nos CAA e no concreto convencional aumentaram continuamente com a idade de modo equivalente, com exceção dos concretos com pó de pedra, que apresentaram danos mais severos.

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou a NBR 15823 em 2010 trata sobre o concreto autoadensável, foi dividida em seis partes seguir:

- 15823-1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco;
- 15823-2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams;
- 15823-3: Determinação da habilidade passante – Método do rim;
- 15823-4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L;
- 15823-5: Determinação da viscosidade – Método do funil V ;

- 15823-6: Determinação da resistência à segregação;

1.7 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

O principal papel das fibras no CRFA é agir como ponte de transferência de tensões através das fissuras, (BENTUR e MINDES, 2007). Uma vez ocorrida a ruptura na matriz de concreto, as fibras atuam como pontes e sofrem um processo de arrancamento com taxa extra de energia para deformação e ruptura do compósito. Isso proporciona uma maior tenacidade. Por outro lado para que a fibra de aço promova o aumento da tenacidade do compósito é necessário que haja interação com a matriz, e essa transferência de tensões se processe entre a matriz e as fibras.

Barros (2000), relata que o CRFA apresenta vantagens econômicas e técnicas sobre o reforço convencional com barras de aço. As vantagens econômicas advêm da supressão da mão de obra necessária à confecção e montagem das armaduras convencionais e no menor tempo de execução da estrutura. Quanto às vantagens técnicas, Barros salienta que as fibras conferem ao concreto: capacidade de absorção de energia, ductilidade, melhorias no controle da fissuração e benefícios à resistência às ações dinâmicas, de fadiga e de impacto. A atenção especial deve ser dada ao processo de preparo do CRFA para que seja evitada a aglomeração das fibras ou formação dos “ouriços”, o que comprometerá a trabalhabilidade da mistura, a durabilidade e o desempenho mecânico do concreto.

De acordo com Barros (2000) e Marangon (2006), a aglomeração das fibras está relacionada à porcentagem e ao fator de forma das fibras, à porcentagem e ao tamanho dos agregados, à composição granulométrica da mistura, à relação água/cimento e ao método de preparo da mistura. O fator de forma, ou esbeltez, da fibra representa a razão entre o comprimento e o diâmetro da mesma, l_f/d_f .

Quanto maiores o fator de forma e a porcentagem de fibras, maior será a tendência para a aglomeração das mesmas. Por isso se recomenda lançar as fibras em taxas controladas

junto com os agregados, homogeneizando a mistura antes do lançamento do cimento (FIGUEIREDO, 2000).

Segundo Barros (1995), caso se pretenda aumentar a porcentagem de fibras sem comprometer a trabalhabilidade da mistura, será necessário utilizar composições de granulometria mais fina. O uso de aditivos superplastificantes permite diminuir a porcentagem de água e, conseqüentemente, aumentar a resistência do compósito, sem prejuízo à trabalhabilidade da mistura.

Para Figueiredo (2000), uma alternativa para minimizar o impacto na trabalhabilidade é a utilização das fibras coladas o que permite uma melhor homogeneização do compósito. A resistência, deformação e o modo de ruptura dos compósitos reforçados com fibras estão fortemente influenciados pela ligação entre a fibra e a pasta de cimento, sendo esta última, dependente da microestrutura da interface. Quando se introduzem fibras no concreto estado fresco, ocorre uma perturbação na distribuição dos agregados graúdos e agregados miúdos, acarretando uma maior concentração de pasta de cimento em redor das fibras de modo a preencher os espaços criados pelo efeito de parede (DUPONT, 2003).

A melhoria da ligação entre fibra e matriz circundante, anteriormente referida como dependente em grande parte da zona de transição (ZTI), pode ser alcançada através de duas formas: atuando sobre a seção, forma e superfície da fibra ou, pelo contrário, modificando a matriz cimentícia, alcançando-se melhorias na ordem dos 100% (IGARASHI *et al.*, 1996; NAAMAN *et al.*, 1991).

Segundo Bentur e Mindess (2007), quando se trata de fissura na matriz, são identificados três trechos distintos: trecho livre de tração, onde a matriz se encontra fissurada e as fibras rompidas ou arrancadas da matriz; trecho de “costura” das fissuras pelas fibras, no qual a tensão é transferida da matriz para as fibras por atrito; e trecho de microfissuração da matriz, mas com suficiente continuidade e ancoragem dos agregados, para que ocorra transferência de tensão pela própria matriz.

De acordo com este mecanismo, pode-se concluir que, quanto maiores as fibras, maior a possibilidade de que as mesmas tenham comprimentos de ancoragem suficientes de cada lado da fissura. A eficiência da interação fibra-matriz é determinada pelo processo de arrancamento das fibras.

O mecanismo de arrancamento das fibras de aço tem sido um aspecto intensamente investigado, visto que este processo determina o comportamento do compósito após sua fissuração. A interação fibra-matriz pode ser melhorada em nível micro estrutural através da adição de fumo de sílica, escórias de alto forno ou mesmo alterando o conteúdo em agregado miúdo contribuindo desta forma para o agrupamento entre as diversas granulometrias e inclusões, isto é, contribuindo para a compacidade da mistura (CHAN e CHU, 2004).

A adição de microssílica ou outro micro-filler contribui para o aumento da aderência e resistência ao arrancamento da fibra (*pullout*), consistindo num mecanismo de reforço interfacial (CHAN E CHU, 2002). Adições de sílica de fumo até 15% podem melhorar a adesão entre as fibras e a pasta de cimento, mesmo que a tenacidade geral do compósito possa não mostrar um desempenho correspondente (RAMACHANDRAN *et.al.*, 1995).

1.8 EFEITOS DAS CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

O uso dos agregados nos concretos tem como finalidade, minimizar o custo e proporcionar vantagens técnicas em relação à pasta de cimento. Agregados com características indesejáveis podem produzir um concreto com pouca resistência mecânica, comprometendo a sua durabilidade e o seu desempenho estrutural (NEVILLE, 1997).

Na confecção do concreto de cimento Portland, para uso geral, são necessários quatro componentes típicos: agregado graúdo, agregado miúdo, cimento e água. O agregado geralmente ocupa um volume entre 60 a 70% do total do concreto produzido, desse

modo, suas características podem afetar em grande parte as propriedades físicas e mecânicas do concreto.

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento depende da textura superficial do agregado que refere-se ao grau de rugosidade ou de irregularidade das superfícies de suas partículas. Para uma dada trabalhabilidade, partículas lisas requerem menos água na mistura e, portanto menos material cimentício para um determinado fator água - cimento. Entretanto, essas partículas têm menor área superficial do que as partículas mais rugosas, para aderir à pasta de cimento (ACI - E1-07, 2007).

De acordo com Gullerrud e Cramer (2002) alguns estudos mostram que o enfraquecimento da aderência na interface permite o surgimento de microfissurações que se propagam sob baixas tensões; outros estudos defendem que o nível de tensão da região microfissurada não afeta a resistência última do concreto. Verificando que enfraquecimento da zona de contato matriz-agregado afeta significativamente a durabilidade do concreto, Lo e Cui (2003), estudaram o comportamento da zona de contato entre concretos leves e concretos normais. Em sua pesquisa, os autores mencionam a existência do “efeito parede” que ocorre apenas nos concretos comuns.

A aderência entre os agregados e a pasta de cimento é um importante fator da resistência do concreto, em especial da resistência à flexão, mas a natureza da aderência ainda não foi totalmente compreendida. Ela ocorre em parte, pelo intertravamento dos agregados e da pasta de cimento hidratada devido a rugosidade dos agregados. Uma superfície mais rugosa como a das partículas britadas, resulta em maior aderência devido ao intertravamento mecânico. Uma maior aderência também é frequentemente obtida com partículas mais macias, porosas e mineralogicamente mais heterogêneas. Em geral a textura com características que não possibilitam penetração de partículas na superfície não resulta em boa aderência (NEVILLE, 2015).

Segundo LEGG (1998), para o agregado graúdo, a forma e a textura, aparentemente, não são tão importantes quanto a forma e a textura do agregado miúdo. Metha e

Monteiro (2008) salientam que a forma e textura superficial são características externas do agregado e influenciam mais nas propriedades do concreto no estado fresco do que no estado endurecido.

A forma e a textura afetam a demanda por areia uma vez que partículas alongadas, angulares e irregulares apresentam vazios entre si e exigem mais areia para preencher os espaços vazios e fornecer um concreto mais trabalhável e aumentando a demanda por água. Quanto à forma as partículas dos agregados geralmente podem ser classificadas em um dos dois tipos: arredondado ou angular. Agregados naturais, que são tipicamente encontrados no litoral ou nos leitos dos rios, apresentam textura mais suave e forma mais arredondada devido ao intemperismo. Agregados britados são mais angulares e tem uma textura da superficial mais áspera.

Quanto mais ásperas e angulosas as partículas, mais pasta será exigida para produzir misturas de mesma trabalhabilidade, aumentando o custo do concreto. Este maior volume de pasta é necessário tanto para envolver a maior área específica dos grãos como para compensar dificuldades no rolamento dessas partículas (WEIDMANN, 2008).

Partículas alongadas, lamelares ou discoides, produzem concretos ásperos e por isso devem ser evitadas ou limitadas a no máximo 15% da massa total de agregados. Os agregados graúdos com formas lamelares normalmente se acomodam em uma direção preferencial, alinhando-se e podendo criar planos de fraqueza (MEHTA e MONTEIRO, 2008; WEIDMANN, 2008).

Agregados com formas mais equidimensionais são preferíveis, pois as partículas que se distanciam desse formato têm maior área superficial, o que poderá causar tensões de flexão na partícula, rompendo-a com pequenos carregamentos.

Rochas britadas apresentam uma textura rugosa e, dependendo do tipo de rocha e da escolha do britador, as britas podem conter uma proporção considerável de partículas chatas ou alongadas, as quais afetam negativamente muitas propriedades do concreto. Isso ocorre porque partículas chatas e alongadas têm uma tendência maior de

acumular água, tornando a zona de transição mais porosa e propensa à fissuração. A textura superficial é baseada em uma avaliação visual e depende da dureza, granulação e características dos poros da rocha-mãe (NEVILLE, 1997).

Mehta e Monteiro (2008) citam evidências de que, pelo menos nas primeiras idades, a resistência do concreto, em particular a resistência à flexão, pode ser afetada pela textura superficial do agregado e que texturas mais ásperas favorecem a formação de uma aderência mecânica forte entre a pasta de cimento e o agregado.

Os agregados graúdos, com suas características mineralógicas determinam a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto de alto desempenho (CAD). Dependendo do tipo de agregado é possível produzir concretos com maiores resistências e módulos de elasticidade. (AITICIN 2000). Agregados com módulo de elasticidade mais elevado que a matriz de cimento provoca uma concentração de tensão e microfissuras na zona de transição reduzindo a resistência à compressão (BAALBAKI et al., 1993).

Para concretos usuais, a tensão de ruptura da rocha que constitui o agregado deve ter valor entre 60 MPa a 70 MPa. Porém em concretos de alto desempenho recomenda-se a utilização de agregados oriundos de rochas com resistências de ruptura superiores a 150 MPa.

Giacco *et al.* (1992) produziram concretos com três tipos diferentes de agregados, basalto, granito e calcário, sendo que os concretos apresentaram resistência à compressão de 92MPa, 80MPa e 62MPa, respectivamente, mantendo-se uma relação água/aglomerante constante e igual a 0,3 mais 2,5% de superplastificante. Nesse estudo os autores concluíram que o uso de agregados de maior dureza não necessariamente implica em menor resistência: a resistência da ligação matriz/agregado ou pasta/agregado torna-se mais importante na resistência à tração na flexão do que na resistência à compressão.

A maioria das rochas de boa qualidade usadas como agregado para concretos apresentam valores de absorção muito baixos na ordem 1%, nas mais porosas esse valor é maior que 3% (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Com relação ao diâmetro máximo ($D_{m\acute{a}x}$), a utilização de agregados de menor $D_{m\acute{a}x}$ em CAD, por ser menos provável resultarem em falhas ou fissuras na microestrutura dos agregados de menores dimensões durante o processo de britagem, apresenta-se como uma concordância (AITCIN e NEVILLE 1995). A eliminação de defeitos internos do agregado, tais como poros grandes, microfissuras e inclusões de minerais moles se dá com o processo de redução, visto que partículas menores do agregado graúdo são geralmente mais resistentes do que as maiores (MEHTA e AITCIN, 1990a).

Com o aumento da $D_{m\acute{a}x}$ do agregado, a zona de transição do concreto torna-se maior e mais heterogênea, tornando-o mais suscetível à fissuração quando submetida às tensões de tração. Quanto maior o agregado e mais elevada a proporção de partículas chatas e alongadas, maior será a tendência da água se acumular próxima à sua superfície, o que enfraquece a zona de transição (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A distribuição granulométrica dos agregados tem influência direta na quantidade de água necessária à aquisição da relação água/cimento desejada, afetando, por conseguinte, a trabalhabilidade do concreto. Agregados bem graduados, sem carências ou excessos de qualquer fração, permitem a utilização de maior quantidade desse material em um dado volume de concreto, resultando numa mistura de maior densidade, estabilidade volumétrica e resistência. Com o melhor empacotamento dos grãos, as partículas menores completam os espaços encontrados entre as partículas maiores, resultando na redução do número de vazios na mistura. Deste modo, o consumo de cimento para uma determinada trabalhabilidade será menor, diminuindo o custo do concreto (MEHTA, 1996).

Em se tratando de concretos de alto desempenho, é de fundamental importância que a qualidade do agregado passe por um controle mais rígido em relação à granulometria, dimensão máxima e mineralogia. Considerando que a principal preocupação é manter a

demanda de água tão baixa quanto possível, faz-se necessária a utilização somente de agregados graúdos bem graduados (MEHTA e AITCIN, 1990a; AITCIN, 2000).

Ocorre uma redução de cerca de 15% na resistência à compressão ao se utilizar um agregado arredondado e liso (seixo natural de rio), se comparados a agregados britados (GIACCIO e ZERBINO, 1996). O uso de concretos com agregados britados geralmente apresentam maiores módulos de elasticidade, resistência à tração na flexão e resistência à tração direta, atributos estes que recebem influência da aderência entre o agregado e a pasta, assim como a rugosidade e angulosidade das partículas (ALMEIDA, 1990).

1.9 ADERÊNCIA ENTRE O AÇO E O CONCRETO

O princípio básico do concreto armado é que o aço resista à tração enquanto o concreto resiste à compressão. Para isso, é necessário que haja uma transferência de esforços de um para o outro, o que é possível devido à aderência. Os mecanismos que regem a aderência entre o aço e o concreto são de grande interesse dos pesquisadores devido à grande dificuldade teórica e experimental no estudo desse fenômeno.

De acordo com Ducatti (1993), o modelo do comportamento da aderência entre o concreto e o aço é representado pela relação entre a tensão de aderência e o deslizamento, onde a tensão de aderência corresponde à tensão de cisalhamento na interface entre a barra e o concreto e o deslizamento é o deslocamento relativo entre a armadura e o concreto ocorrido pela diferença entre as deformações específicas do aço e do concreto.

O comportamento entre a barra e o concreto é de suma importância na capacidade de carga e de serviço das peças de concreto armado e indispensável para o cálculo de ancoragens e das emendas por transpasse das barras da armadura, cálculo das deflexões considerando o efeito de enrijecimento por tração e para o controle da fissuração e armadura mínima (TASSIOS, 1979; DUCATI, 1993).

De acordo com Tassios (1979) a ligação entre o aço e o concreto é expressa pela relação entre tensão de aderência *versus* deslizamento. A aderência varia em função da

adesão, resistência ao cisalhamento entre o concreto e o aço, o atrito e a interação entre os materiais (BANGASH, 1989).

A solidariedade entre a armadura e o concreto é garantida pela existência da aderência entre esses dois materiais, a aderência é composta de diversas parcelas decorrentes de diferentes fenômenos que intervêm na ligação entre os dois materiais (FUSCO, 1995).

Segundo Leonhardt e Monnig (1979), a tensão de aderência ocasiona tensões principais de tração e compressão no concreto com direções como mostrado na Figura 2.3.

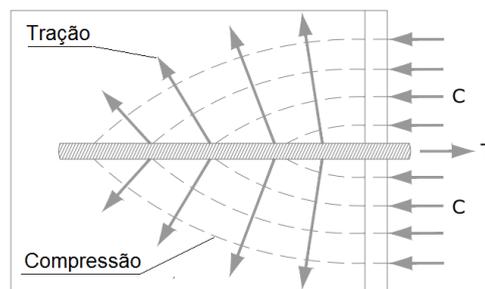


Figura 2.3 – Trajetórias das tensões principais entre a barra e o concreto (LEONHARDT e MONNING, 1979)

Os principais modos de ruptura da aderência entre o aço e o concreto são por ruptura por aderência mecânica com deslizamento da barra e a ruptura por fendilhamento do concreto, aderência química.

A ruptura por deslizamento da barra de aço ocorre quando a ligação entre concreto e as nervuras da barra são rompidos, acarretando o deslizamento da barra de aço com ruptura dúctil. Esse deslizamento acontece quando o cobrimento de concreto é suficiente para resistir às tensões radiais ou quando existe armadura transversal suficiente para impedir ou retardar a propagação da fissuração por fendilhamento. No caso de barras nervuradas, esta aderência é a principal responsável pela ancoragem da barra ao concreto (ALMEIDA FILHO, 2006).

A ruptura por fendilhamento se processa pela ruptura do concreto devido ao aumento das tensões acima da capacidade resistente da peça originando fissuração intensa na

direção transversal e longitudinal. Este tipo de ruptura ocorre quando o confinamento não é suficiente para garantir o arrancamento da barra.

Existe uma intensa microfissuração no concreto na região que envolve a armadura, culminando numa perda de aderência, quando da existência de tensões transversais de tração. Estes esforços provocam efeitos de fendilhamento do concreto ao longo de toda região da armadura envolvida pelo concreto. Sem contar o fato de que a barra na região de ancoragem está sujeita à microfissuração (Figura 2.4), na sua extremidade também existe uma concentração de tensões que podem acarretar numa ruptura localizada. Sendo assim, no intuito de combater ou pelo menos reduzir os efeitos desses esforços, é que são colocadas as armaduras transversais ao longo da peça de concreto (FUSCO, 2005).

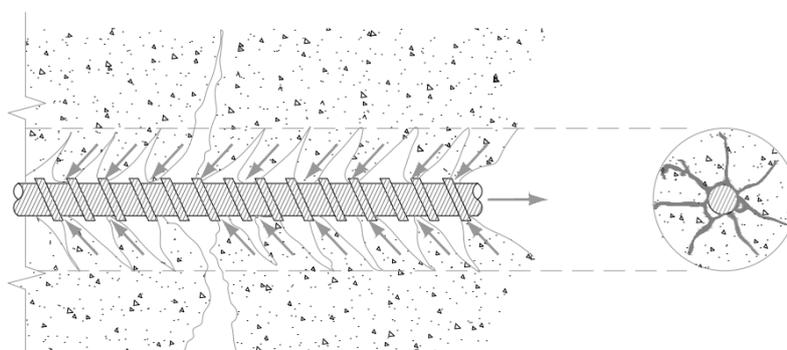


Figura 2.4 – Distribuição das microfissurações (FUSCO, 2005).

Nas barras lisas, a ruptura ocorre pelo arrancamento do concreto e a aderência é atribuída principalmente à adesão química entre a matriz e a barra. Quando ocorre o rompimento da adesão química entre os materiais, surge uma resistência ao deslizamento por causa do atrito. A aderência química apresenta valores baixos, da ordem de 0,5 a 1,0 N/mm², que são facilmente ultrapassados por um pequeno deslocamento entre o aço e o concreto (ELIGEHAUSEN *et al.*, 1983). A resistência então se extingue e ocorre um fendilhamento, não generalizado, mas a armadura é arrancada do interior da massa de concreto. Quando esta resistência se esgota, o fendilhamento não é total, mas a barra é arrancada, deixando atrás de si um orifício quase intacto dentro do concreto (GOTO, 1971). Uma barra lisa pode apresentar

aderência mecânica, em função da rugosidade superficial, devido à corrosão e ao processo de fabricação, gerando um denteamento da superfície (LEONHARDT e MONNIG,1977).

O tipo e estado superficial das barras, a sua distribuição nas formas, a resistência do concreto, o adensamento próximo à região de localização das barras, a qualidade da matriz, as características gerais do agregado incorporado na mistura, como por exemplo, a sua resistência mecânica, o tipo e a granulometria, interferem significativamente no desempenho do conjunto. Além do comprimento de aderência, cuja função é transferir dos esforços entre o aço e concreto.

Ducatti (1993) constatou que a resistência de aderência se reduz com o aumento do diâmetro da barra. A justificativa está ligada à espessura da zona de transição, que é mais grossa nas barras de grande diâmetro. Isto porque o diâmetro da armadura se torna maior na região das nervuras, culminando num maior acúmulo de água e promovendo conseqüentemente, aumento desta zona de transição. Ocorre então um enfraquecimento da ligação entre a pasta e a armadura, tornando-a mais porosa e susceptível ao esmagamento por compressão nas nervuras.

A tensão de aderência pode ser estudada por meio de três modelos de corpos de prova concreto: viga à flexão, prisma tracionado axialmente e, arrancamento (MACGREGOR, 1992).

Segundo o autor, em uma viga fissurada submetida à flexão, há a variação de tensão no concreto e na armadura, ao longo da viga. Nos pontos de fissura, o valor da tensão na armadura não é constante devido à variação do momento fletor, além disso, existe a variação da tensão na armadura ao longo de toda a viga.

Em prismas tracionados axialmente, a tensão média de aderência é nula, pois não há variação de tensão na armadura de um ponto de fissura em relação a outro. Há variação da tensão apenas entre as fissuras. Goto (1971) estudou prismas de concreto tracionados axialmente e a formação das fissuras ao seu redor.

O ensaio de arrancamento padrão, tem sido o mais utilizado no estudo da aderência desde antes da década de 50, pois fornece bons resultados quando se quer avaliar parâmetros distintos que influenciam na aderência. É um ensaio de simples execução, fornece uma leitura direta da tensão de aderência. Não apresenta resultados representativos para elementos de concreto armado, como por exemplo, as vigas, pois tem o inconveniente do concreto ficar comprimido, não havendo fissuração. Existe também um confinamento da armadura devido ao cobrimento exagerado de concreto, onde há um impedimento da expansão transversal do corpo de prova, devido ao atrito com a placa de apoio da máquina de ensaio (MAGREGOR, 1992).

O deslocamento entre o aço e o concreto, assim como as tensões de aderência podem ser estimados por meio de ensaios de arrancamento e consistem na extração das barras de aço embutidas em corpos-de-prova de concreto. Esses ensaios permitem verificar a influência de fatores, como, por exemplo, resistência à compressão do concreto, diâmetro da barra, qualidade da matriz, adições minerais, velocidade de carregamento dentre outros, no mecanismo da aderência abaixo os ensaios para a aderência entre aço e concreto estão discriminados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Ensaios de aderência

Ensaio de Arrancamento com Anel Circunferencial ou Ring Pull-Out	França, (2004)
Ensaio de viga (Beam test)	RILEM-CEB-FIP-RC 5(1978)
Ensaio de arrancamento (Pull out test)	RILEM-CEB-FIB RC6 (1983)
Ensaio de extremo de viga (Beam end test)	Ribeiro (1985); França, (2004);
Ensaio de conformação superficial	NBR 7477 (1982)
Ensaio de quatro barras	Barbosa (2001)

CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

1.10 Cimento, cinza volante e sílica ativa

Os materiais finos utilizados nessa pesquisa estão mostrados na Figura 3.1. O cimento utilizado foi o Portland composto CP V-ARI-RS, fabricado pela Lafarge. Este cimento caracteriza-se por possuir escória, tornando-o mais impermeável e resistente a ataque de sulfatos na armadura do concreto, principalmente quando este encontra-se em meios agressivos. O seu baixo calor de hidratação contribui para evitar perda prematura de água no concreto e reduz o efeito de expansibilidade, minimizando o risco de fissuras. A composição do cimento, informada pelo fabricante, foi de 72% de clínquer, 19,5% de escoria; 4,9% de filer e 3,6% de gesso.

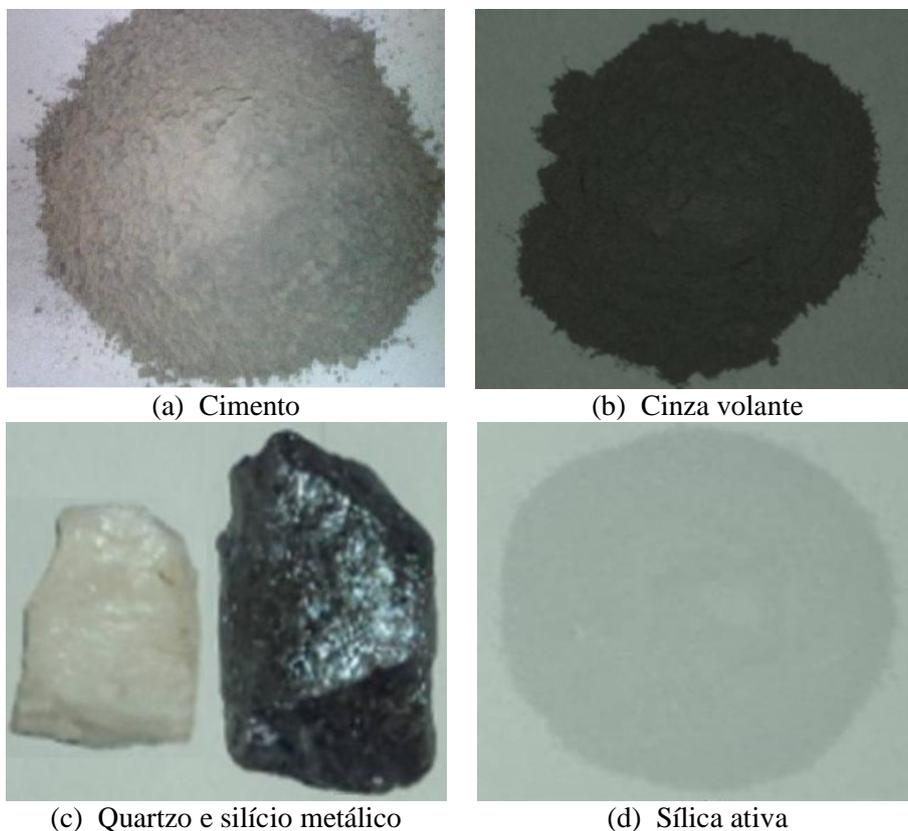


Figura 3.1– Materiais finos.

A cinza volante empregada foi do tipo *fly ash* classe C , obtida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas e fornecida pela Poso Fly . A sílica ativa empregada é um produto decorrente do processo de fabricação do silício metálico (Figura 3.1 (c)) ou

do ferro silício, de onde é gerado o gás SiO, que ao sair do forno elétrico oxida-se, formando o SiO₂, sendo então captado por filtros armazenadas em silos para a sua comercialização. Neste trabalho foi utilizada a sílica ativa Silmix, granular e não densificada, produzida comercialmente e fornecida pela Dow Corning Metais do Pará.

1.10.1.1 Comportamento à compressão do cimento

A resistência à compressão, determinada de acordo com a NBR7215, (1996), é o valor resultante da média de quatro determinações. Observa-se que a resistência alcançada aos 28 dias de cura foi de 50,08 MPa conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resistência à compressão do cimento

	Dias	CPV- ARI RS	CV
Resistência à compressão (MPa)	1	15,16	3,72
	3	25,08	1,48
	7	35,28	2,87
	28	50,08	0,68
	90	55,83	2,64

A evolução da resistência à compressão no tempo pode ser verificado na Figura 3.2.

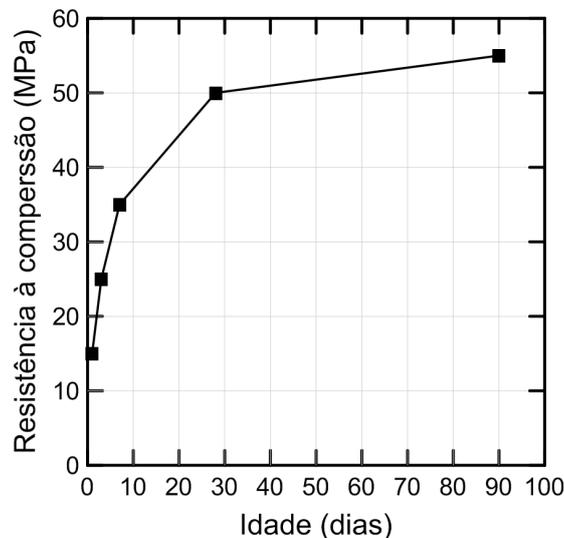


Figura 3.2 – Evolução da resistência à compressão do cimento até 90 dias de cura.

1.10.1.2 Massa específica do cimento, cinza volante e sílica ativa

A massa específica foi determinada através de um picnômetro a gás (hélio), marca Micromeritics, modelo AccuPyc 1340, Figura 3.3. O método de picnometria a gás consiste na determinação do volume de uma massa conhecida de amostra através da variação de pressão do gás em um volume calibrado.



Figura 3.3 – Picnômetro a gás Accu Pyc 1340 (Micromeritics)

As amostras foram previamente secas em estufa até a constância de massa. Os valores de massa específica são apresentados na Tabela 3.2, e correspondem à média de 5 determinações.

Tabela 3.2 – Valor da massa específica do cimento, cinza e sílica.

Material	Massa específica (g/cm ³)
Cimento	3,11
Cinza	2,39
Sílica	2,29

1.10.1.3 Análises químicas do cimento, cinza volante e sílica ativa

As composições químicas do cimento, cinza e sílica ativa foram preparadas em prensa automática VANEON (molde de 20 mm, P = 20ton e t = 30s), utilizando como aglomerante WAX na proporção de 1:0,25 (4 g de amostra e 1g de WAX), exceto para o

preparo da amostra sílica ativa, no qual foi utilizado o aglomerante Ácido Bórico na proporção de 1:1 (1g de amostra e 1g de H₃BO₃). Os resultados semiquantitativos estão expressos em %, calculados como óxidos e normalizados a 100%, conforme Tabela 3.3.

Os teores foram determinados por análise semiquantitativa (*standardless*) em espectrômetro por fluorescência de raio-X - (WDS), modelo AXIOS (Panalytical). A determinação de P.P.C. das amostras foi realizada em Mufla colocada a 1000°C por 3 horas; após resfriamento as amostras foram pesadas para verificar a perda por calcinação. O ensaio de composição química, foi realizado no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) da UFRJ e o ensaio de massa específica foi realizado no Laboratório de Técnicas Analíticas do LABEST - COPPE/UFRJ.

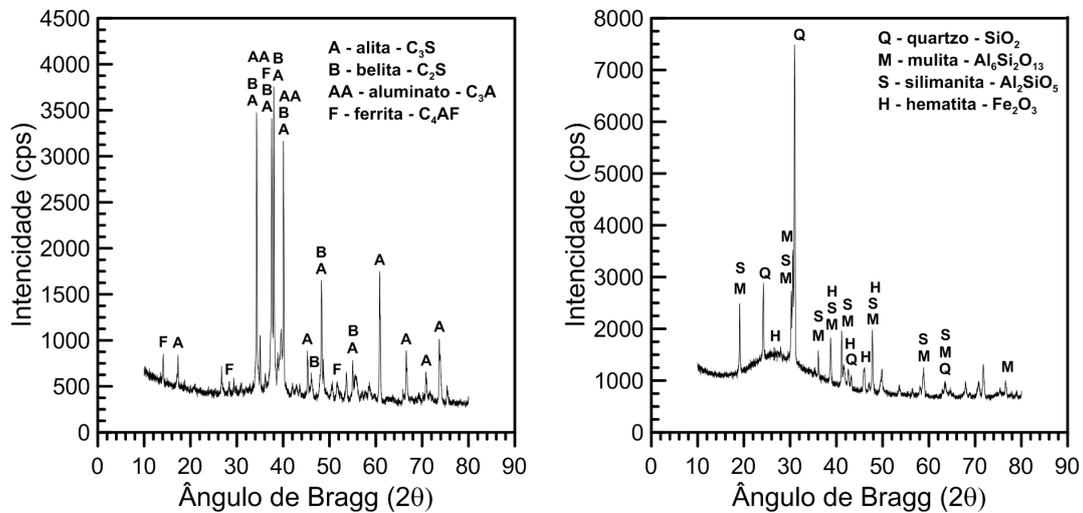
Tabela 3.3 – Composição química do cimento, cinza volante e sílica ativa.

Constituinte	Concentração (%)		
	Cimento	Cinza	Sílica ativa
Na ₂ O	0,37	0,55	0,34
MgO	2,2	0,79	0,58
Al ₂ O ₃	5,2	27,8	0,12
SiO ₂	19,7	58,3	95,1
P ₂ O ₅	0,13	0,1	0,06
SO ₃	3,7	0,54	0,08
K ₂ O	0,3	3,2	0,44
CaO	61,6	1,7	0,34
TiO ₂	0,35	1,3	ND
MnO	0,23	0,03	0,01
Fe ₂ O ₃	3,3	4,5	0,06
P.P.C*	2,71	0,97	2,75

*PPC. Perda por calcinação.

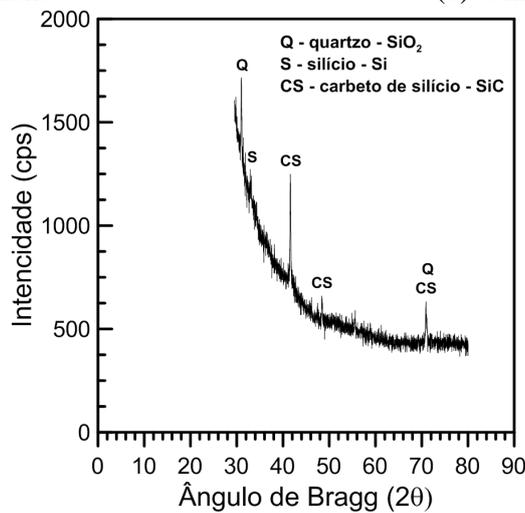
Os difratogramas de Raios-X (DRX) das fases cristalinas das amostras dos materiais cimentícios, foram obtidos pelo método do pó, foram coletados em um equipamento Bruker-D4 Endeavor, nas seguintes condições de operação: radiação Co K α (35 kV/40 mA); velocidade angular das varredura do goniômetro de 0,02⁰ (2 θ) por passo com tempo de contagem de 1 segundo por passo e coletados com ângulos de Bragg que variaram de 5 a 80° (2 θ) com detector sensível à posição LynxEye. As interpretações qualitativas de espectro foram efetuadas por comparação com padrões contidos no

banco de dados PDF02 (ICDD, 2006) em software Bruker Diffrac^{Plus}. Os difratogramas obtidos, encontram-se na Figura 3.4.



(a) Cimento

(b) Cinza volante



(c) Sílica ativa

Figura 0.4 – Difratogramas

A Figura 3.4 (a) demonstra que, para o cimento, as fases cristalinas predominantes são a alita (C₃S) e a belita (C₂S), observadas em maiores proporções que os outros minerais. Para a cinza volante a Figura 3.4 (b) mostra maiores presenças dos minerais quartzo, mulita e silimatita. Com relação a sílica ativa (Figura 3.4 (d)) pode ser observada a presença de quartzo e carbeto de silício como principal mineral.

Nos difratogramas da cinza volante (Figura 3.4 (b)) observa-se o desvio dos ângulos de Bragg (2θ) de 20° e 40° indicando a presença de minerais amorfos tais como a sílica e a alumina. Já para a sílica ativa, (Figura 3.4 (c)) o desvio da linearidade foi desde os ângulos de Bragg (2θ) de 30° até 60° indicando que a mesma é altamente amorfa.

1.10.1.4 Características granulométricas do cimento, cinza volante e sílica ativa

As análises granulométricas do cimento e da cinza volante foram obtidas com o auxílio de um granulômetro a laser (Figura 3.5a), marca Malvern, modelo Mastersizer 2600, com capacidade para medir partículas entre $0,02$ e $2000 \mu\text{m}$. A amostra de cimento foi dispersa em álcool etílico e as demais em água deionizada. Os ensaios de caracterização granulométricas da sílica foram realizados em um sedígrafo SediGraf III da *Micromeritics* (Figura 0.5b) e foram realizadas no Laboratório de Técnicas Analíticas do LABEST - COPPE/UFRJ.



(a) Granulometro a laser



(b) Sedígrafo

Figura 3.5 – Equipamentos para análise granulométrica.

As curvas granulométricas do cimento, cinza volante e sílica ativa estão representadas na Figura 0.6. Vê-se nesta figura que a cinza volante apresentou distribuição granulométrica mais acentuada em relação ao cimento. A sílica ativa apresentou uma curva granulométrica de menor inclinação com distribuição granulométrica mais uniforme.

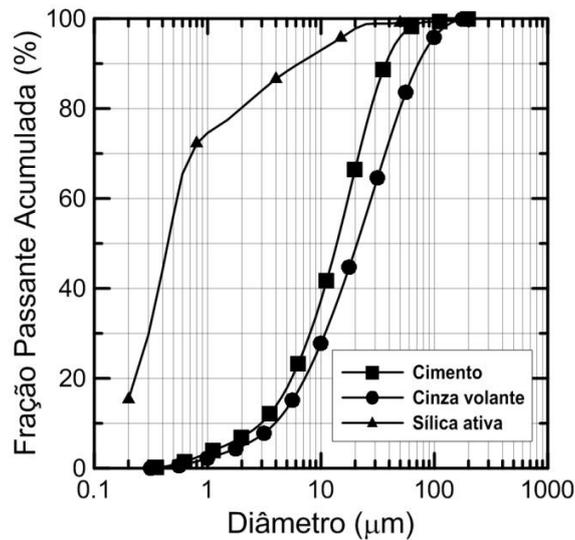


Figura 0.6 – Curvas granulométricas do cimento, cinza volante e sílica ativa.

A partir das curvas apresentadas na Figura 3.6 foram obtidos os valores de D_{10} , D_{50} e D_{90} , mostrados na Tabela 3.4 onde “ D_x ” representa o diâmetro abaixo do qual se situam X% em peso das partículas.

Tabela 3.4 – Valores de D_{50} e D_{80} dos materiais cimentícios e do solo.

D_x	Cimento	Cinza volante	Sílica ativa
D_{50} (μm)	28,18	50,11	1,96
D_{80} (μm)	14,12	22,38	0,42

1.11 Agregados

1.11.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo selecionado provém de uma areia quartzosa lavada (Figura 3.7) retirada do rio Guandu, disponível comercialmente no mercado do Rio de Janeiro. O processo de extração de areia, por dragagem, se dá através da retirada das camadas sedimentares superficiais e por se tratar de uma bacia sedimentar quaternária, a baixada de Sepetiba possui características sedimentológicas excelentes para extração de areia.

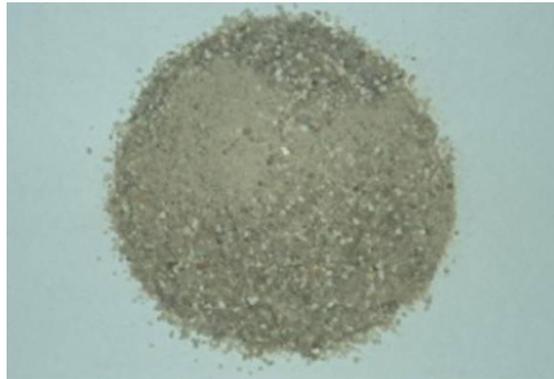


Figura 3.7 – Agregado miúdo.

1.11.1.1 Características granulométricas

A distribuição granulométrica da areia foi determinada por peneiramento de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 248 (2003). Foram calculados com base na curva granulométrica os valores de D80 e D50 que são, respectivamente, as dimensões abaixo das quais se encontram 80% e 50 % das partículas da massa do material. As características granulométricas e físicas encontram-se na Tabela 3.5 e a curva granulométrica da areia pode ser observada na Figura 3.8.

Tabela 3.5 – Características granulométricas e físicas da areia quartzosa.

Características granulométricas	
Dimensão máxima (mm)	2,36
Módulo de finura	2,18
Classificação	Média
D50 (mm)	0,6
D80 (mm)	1,18
Características físicas	
Massa específica (g/cm ³)	2,67
Absorção de água (%)	0,99
Material pulverulento (%)	0,5
Torrões de argila (%)	isento

Pela Tabela 3.5, o agregado miúdo foi classificado como areia média, sendo o seu módulo de finura de 2,18 e sua dimensão máxima de 2,36 mm. O teor de materiais pulverulentos (0,5%) ficou dentro dos limites estabelecidos pela norma. No concreto autoadensável, devido à adição de sílica ativa e cinza volante, o teor de finos eleva-se e

a utilização de uma areia mais grossa permite obter uma menor superfície específica ajudando a diminuir o consumo de água da mistura.

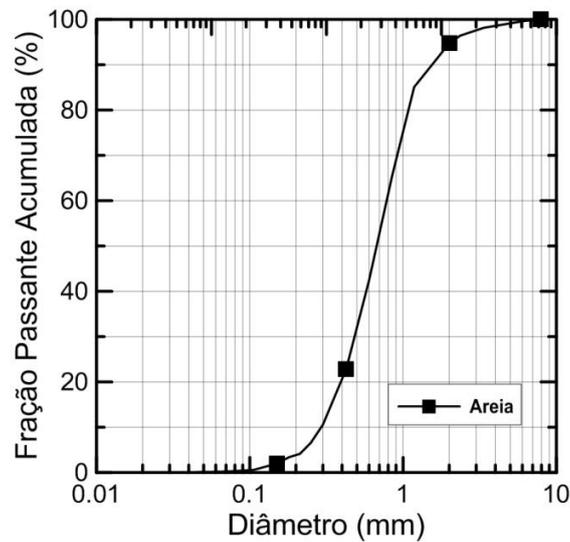


Figura 3.8 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

1.11.1.2 Análises químicas

As análises de fluorescência de raio-X (FRX) para a areia foram realizadas sob os mesmos procedimentos descritos no item 3.1 (cimento cinza volante e sílica ativa). Os resultados estão apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Composição química da areia.

Constituinte	Concentração (%)
	Areia
Na ₂ O	0,47
Al ₂ O ₃	10,7
SiO ₂	80,8
K ₂ O	6,4
TiO ₂	0,13
Fe ₂ O ₃	0,43
BaO	0,73
P.P.C.	0,73

*PPC. Perda por calcinação.

Na Tabela 3.6 vê-se que o dióxido de silício apresentou o teor mais significativo (80,8%) dentre os constituintes presentes. Observa-se também a presença de outros

dois constituintes mais significativos como o de alumina (10,70%) e óxido de potássio (6,4%). Os difratogramas de Raios-X (DRX) das fases cristalinas da amostra de areia estão apresentados na Figura 3.9. Em relação a areia, observa-se a presença de quartzo como mineral principal além de presenças de outros minerais como a microdina e caolinita.

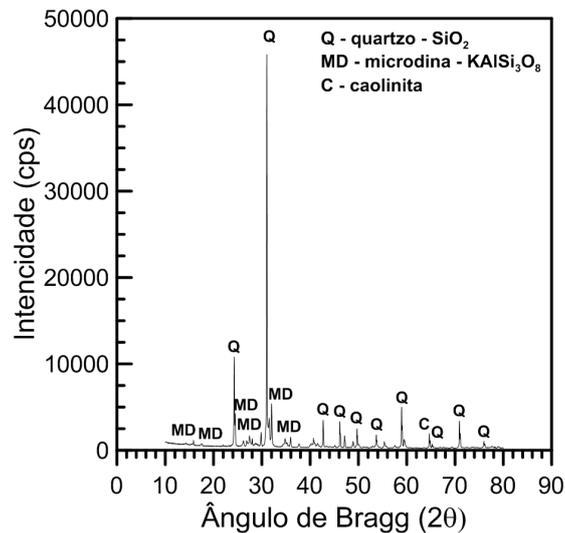
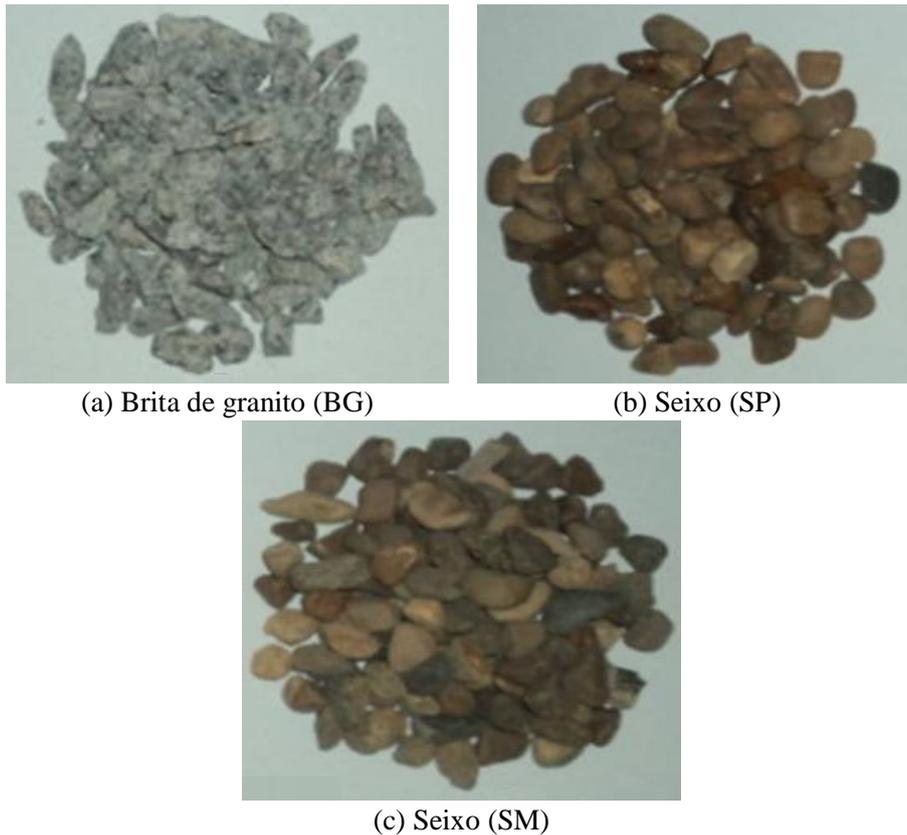


Figura 3.9 – Difratogramas da areia.

1.11.2 Agregado graúdo

Foram utilizados três tipos de agregados graúdos agregados com dimensão máxima de 13,2 mm, coletados de acordo com o procedimento da NBR NM26 (2001):

- uma rocha britada (BG) (Figura 3.10 (a)) cujo tipo litológico é o granito, proveniente de uma pedreira do município do Rio de Janeiro e
- dois seixos de rio com litologia quartzo sendo um proveniente do rio Paraná (SP) na divisa dos estados de São Paulo com Mato grosso do Sul (Figura 3.10 (b)) e outro proveniente do rio Japurá no estado do Amazonas (SJ) (Figura 3.10 (c)).



(a) Brita de granito (BG)

(b) Seixo (SP)

(c) Seixo (SM)

Figura 3.10 – Agregado graúdo.

1.11.2.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade da brita e do seixo de rio, foram obtidos a partir de três ensaios. O matacão da rocha de granito (Figura 3.11(a)) foi coletado na mesma pedreira de onde veio o material britado. Foram coletados dois matacões em locais distantes um do outro tomando-se o cuidado de observar nos matacões se havia a presença de pontos de fratura que pudessem comprometer a retirada dos testemunhos para os testes.

Para os seixos rolados (Figura 3.11(d)), apenas do material proveniente do rio Paraná (divisa do Mato grosso do sul com São Paulo) foi possível extrair testemunhos, pois apesar de alguns matacões de maior dimensão estarem presentes no material comprado, estes eram muito menores do que o matacão da rocha granítica. As amostras foram carotadas (Figura 3.11(b) e (e)), e retirados os corpos de prova para os ensaios (Figura 3.11 (c),(f),(g),(h) e (i)).



Figura 3.11 – Amostras de agregado graúdo para ensaio do módulo de elasticidade.

Após as amostras terem sido extraídas, foram cortadas e usinadas até que se obtivessem os diâmetros e alturas de 25 x 50mm respectivamente (Figura 3.12 (a) e (c)). Para o ensaio de compressão, foram utilizados extensômetros modelo KFG-5-120-C1-11 da marca KYOWA com fator de sensibilidade igual a 2,00 e comprimento de 5mm destinados à instrumentação dos corpos de prova das rochas de granito e seixo de rio. Após a instrumentação, as amostras foram ensaiadas (Figura 3.12(b) e (d)).

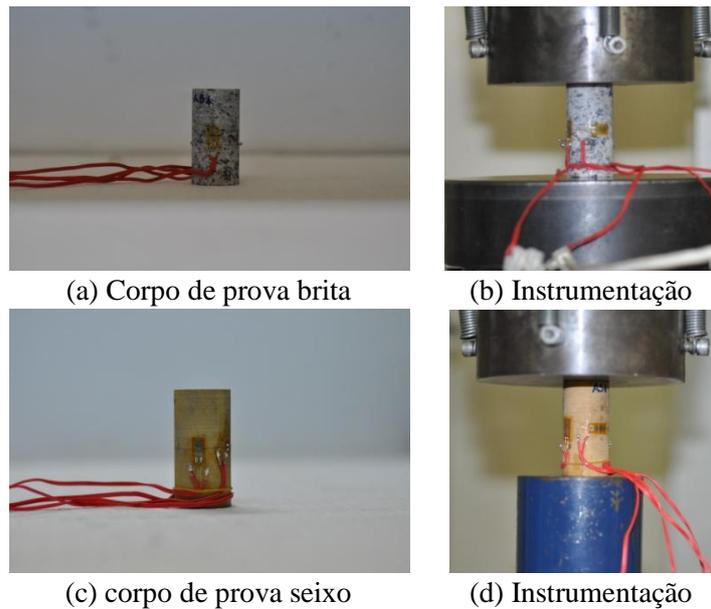


Figura 3.12 – Amostras para ensaio de compressão: (a) , (b) brita, (c) e (d) seixo de rio.

As curvas tensão x deformação podem ser visualizadas nas Figuras 3.13(a) e (b) respectivamente para o granito e o seixo de rio. O comportamento do granito se mostrou bastante uniforme. Já os valores de resistência dos corpos de prova de seixo rolado tiveram grande dispersão como se pode observar na Fig. 3.13(b). Por outro lado nota-se nesta figura que o módulo de elasticidade manteve-se aproximadamente constante.

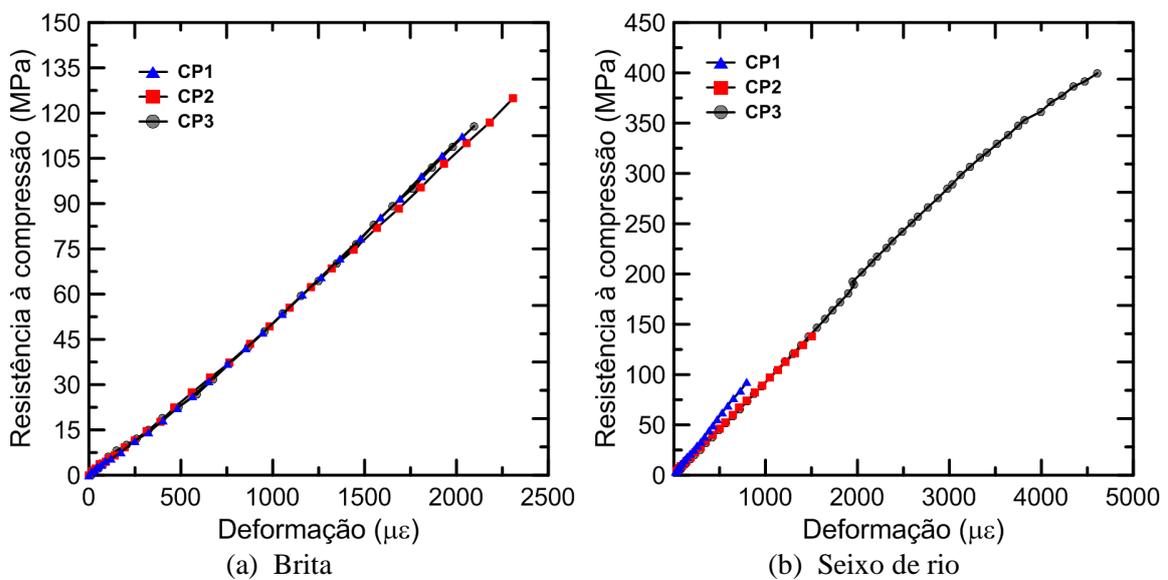


Figura 3.13 – Curva tensão x deformação das rochas.

Os resultados para a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 3.7. Estes valores referem-se à média de três determinações obtidas de corpos de prova ensaiados até a ruptura. Devido à dispersão dos resultados o valor da resistência à compressão do seixo rolado não pode ser considerado representativo.

Tabela 3.7 – Características mecânicas do agregado graúdo.

Características mecânicas	Brita	Seixo - SP	Seixo - SJ
Resistência à compressão (MPa)	124,96	298,37	
Módulo de elasticidade (GPa)	61,94	100,08	

1.11.2.2 Características granulométricas e físicas

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos (Figura 3.14), foi determinada por peneiramento de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma NBR NM 248 (2003). Assim como para o agregado miúdo, foram calculados com base na curva granulométrica os valores de D80 e D50.

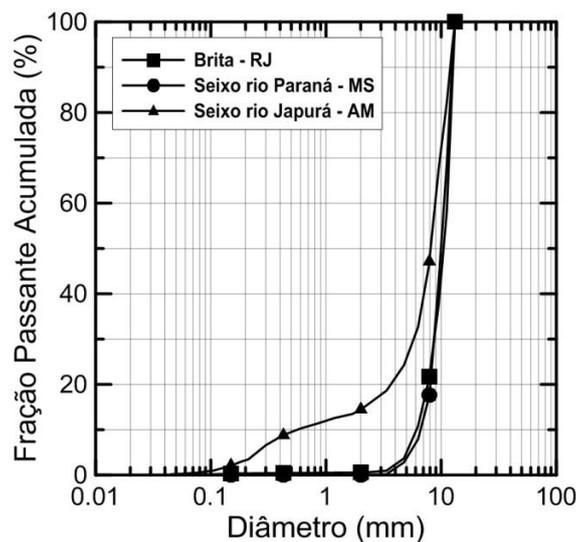


Figura 3.14 – Curva granulométrica do agregado graúdo.

As características granulométricas e físicas estão apresentadas na Tabela 3.8. A massa específica foi obtida de acordo com os procedimentos da NBR NM 53 (2003).

Tabela 3.8 – Características granulométricas e físicas do agregado graúdo.

Características granulométricas	Brita	Seixo - SP	Seixo - SJ
Dimensão máxima (mm)	13,20	13,20	13,20
Módulo de finura	6,56	6,55	5,61
D50 (mm)	11,2	11,2	8,0
D80 (mm)	12,5	12,5	11,2
Características físicas	Brita	Seixo - SP	Seixo - SJ
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,61	2,62
Absorção de água (%)	0,74	0,12	0,14
Material pulverulento (%)	0,8	0,10	2,0

1.11.2.3 Características petrográficas

A Petrografia tem por objeto a descrição das rochas e a análise das suas características estruturais, mineralógicas e químicas. A análise petrográfica dos agregados foi executada através do exame macroscópico de amostra in natura, segundo a NBR 15845 (2010). O exame microscópico das lâminas delgadas consistiu na descrição dos minerais e suas inter-relações (arranjo textural), com a observação do estado microfissural e grau de alteração das rochas e de seus constituintes minerais, além da classificação formal da rocha. As fotomicrografias (Figura, 3.15(a)) foram realizadas sob luz polarizada em microscópio petrográfico marca ZEISS Axioplan com objetiva de 2,5mm e diâmetro do retículo de 10mm (Figura 3.15(b)). As imagens foram obtidas através de uma câmera AxioAcam ICC 3 (Figura 3.15(c)). As análises petrográficas foram realizadas no laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da Universidade Federal de do Rio de Janeiro.

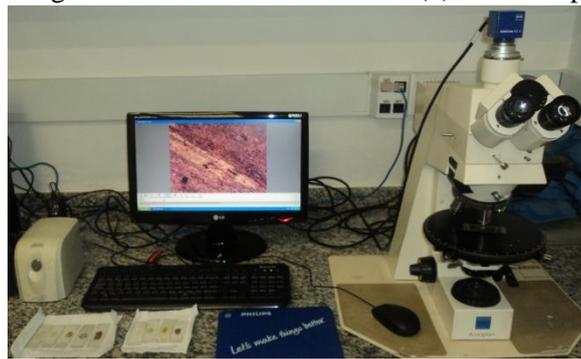
A brita foi analisada como uma rocha isotrópica mesocrática (com minerais claros e escuros), de granulometria média. Em sua composição destacam-se feldspatos, quartzo e mica (biotita), concentrando-se em aglomerados dispersos aleatoriamente. Nenhum sinal de deformação ou alteração mineralógica definida a olho nu foi observado.



(a) Fotomicrografia



(b) Microscópio petrográfico



(c) Câmera AxioAcam ICC 3

Figura 3.15 – Microscópio petrográfico ZEISS Axioplan e câmera Axioacam ICC 3.

Em lâmina (Figura 3.16), a rocha apresentou textura fanerítica (é possível visualizar os cristais a olho nu), com granulomeria equigranular (homogênea) predominante, com minerais subédricos (cristais com poucas faces bem definidas) a anédricos (cristais sem faces definidas) e índice de cor de cerca de 12% .

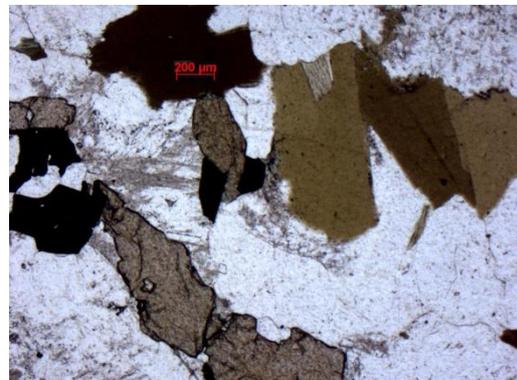
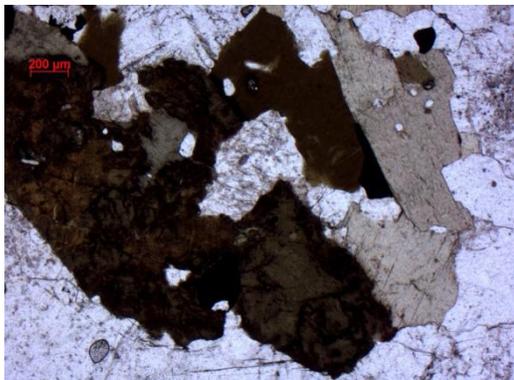


Figura 3.16 – Fotomicrografia em luz polarizada de amostras de dois matacões de rocha granítica.

A mineralogia essencial é formada por microclina, plagioclásio e quartzo, tendo como minerais máficos biotita, titanita, minerais opacos, e apatita e zircão como minerais acessórios.

Os feldspatos apresentam por vez núcleos com sinais de alteração para sericita (mica branca) e rara calcita nas bordas, assim como a biotita por vezes está alterada para clorita. Esses minerais secundários são de origem de alteração hidrotermal, provavelmente ocorrendo nas fases finais de solidificação da rocha ou em evento metamórfico de baixo grau, posterior à solidificação da rocha. A rocha foi classificada como: Biotita-Titanita Granito.

A petrografia dos seixos obtidos do rio Paraná (SP) e rio Japurá (SJ) mostrou evidências de grãos microcristalinos formados basicamente por quartzo. Todas as amostras apresentaram incrustação reduzida de material carbonático em matriz ferruginosa recristalizada.

As amostras de rocha do seixo proveniente do rio Paraná estão descritas a seguir. A fotomicrografia da rocha da figura 3.17 (a)) traz evidência de quartzo puro recristalizado em subgrãos com processo de recuperação metamórfica. Já a amostra da Figura 3.17 (b)) apresenta concreções de quartzo preenchido por incrustações de carbonato.

A amostra de rocha apresentada na Figura 3.17 (c)) mostrou concreções de carbonato irregular em processo de transformação para mica (muscovita), com microcristais de crescimento radial. Nota-se fotomicrografia da Figura 3.17 (d)) observou-se concreções de quartzo e carbonato em matriz ferruginosa concentrada em níveis. A lâmina da Figura 3.17 (e)) apresentou concreções ferruginosas formadas por grãos individualizados de quartzito.

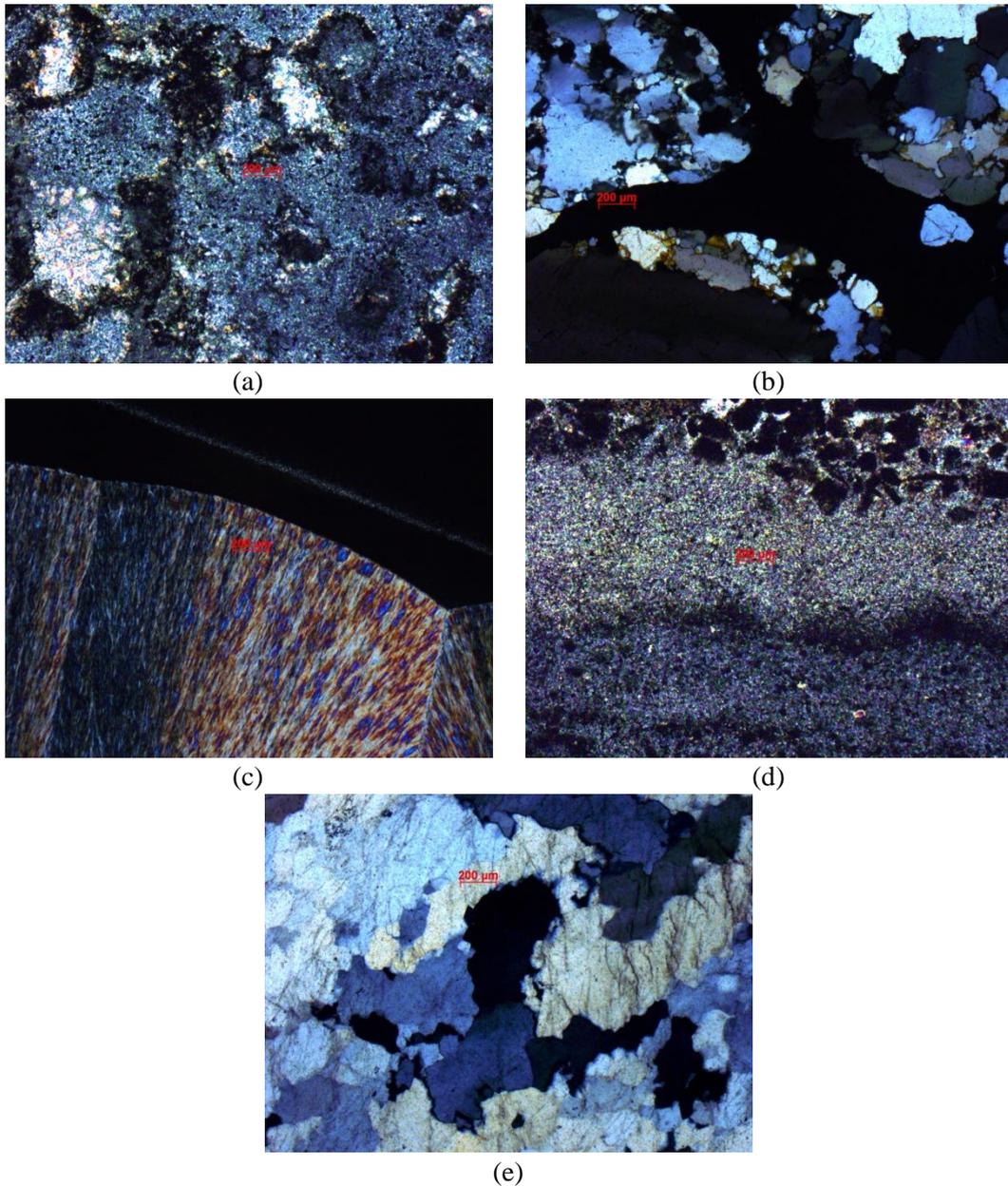


Figura 3.17 – Fotomicrografia em luz polarizada de amostras de cinco tipos diferentes de grãos de seixo rolado (SP).

As fotomicrografias mostradas na figura 3.18 (a), (b) e (e)) apresentaram concreções de quartzo e carbonato em matriz ferruginosa. Já na lâmina da rocha da Figura 3.18 (c)), foi observado concreções de ferro recortados por inúmeros microveios de quartzo em subgrãos em processo de recuperação metamórfica. Para a amostra da rocha da Figura

3.18 (d) verificou a presença de monocristais de quartzo puro recristalizado com subgrãos em processo de metamorfismo de recuperação.

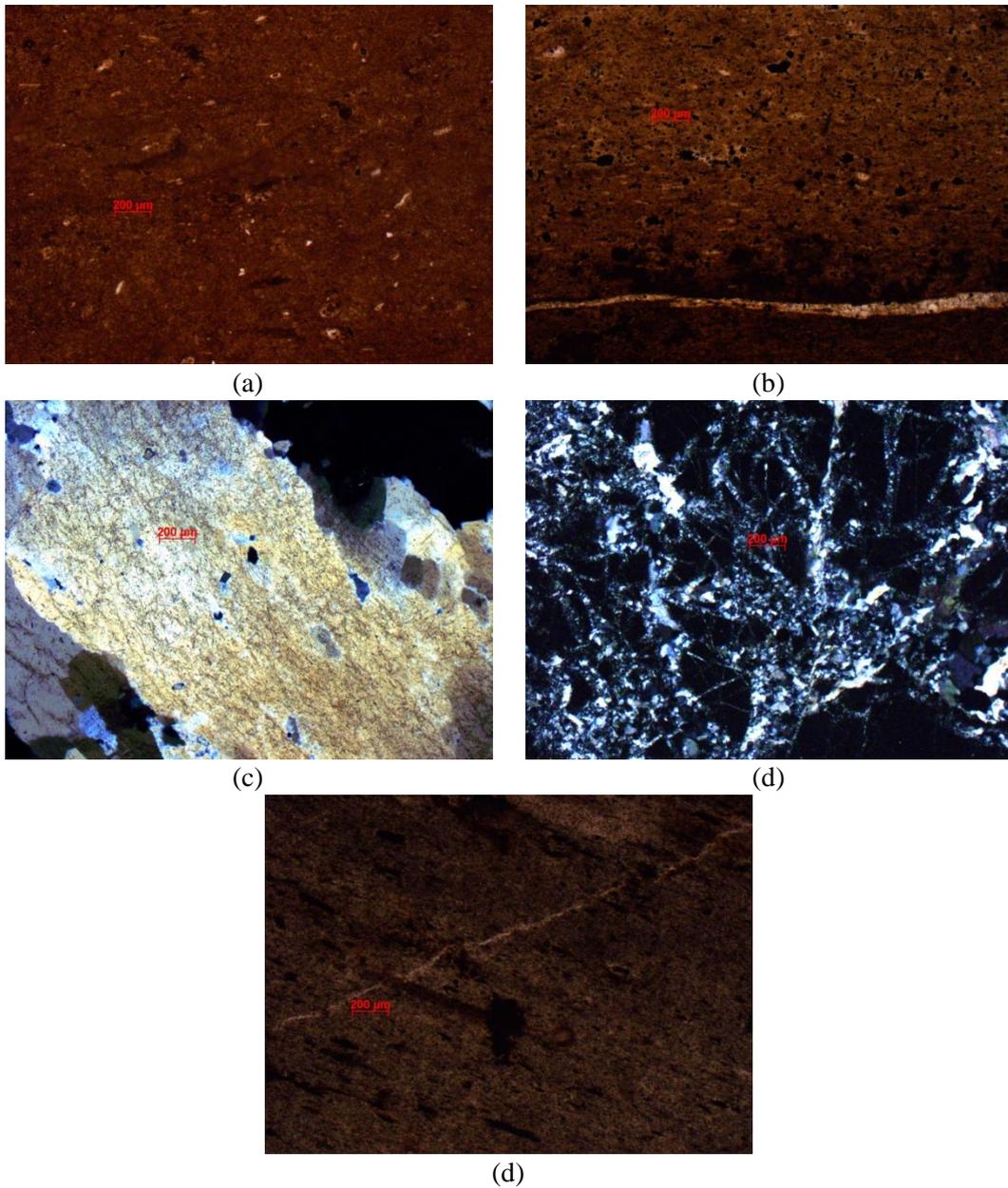


Figura 3.18 – Fotomicrografia em luz polarizada de amostras de cinco tipos diferentes de grãos de seixo rolado (SJ).

1.11.2.4 Análises químicas

As análises de fluorescência de raio-X (FRX) para os agregados graúdos, foram realizadas sob os mesmos procedimentos descritos no item 3.1. Os resultados encontram-se descritos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Composição química do cimento, cinza volante e sílica ativa.

Constituinte	Concentração (%)		
	Brita	Seixo - SP	Seixo - SJ
Na ₂ O	3,40	0,28	0,11
MgO	0,67	0,24	0,05
Al ₂ O ₃	16,0	2,20	2,00
SiO ₂	61,7	91,30	94,3
P ₂ O ₅	0,95	0,12	0,09
SO ₃	0,12	0,02	0,04
K ₂ O	5,10	0,33	0,18
CaO	5,30	0,60	0,12
TiO ₂	0,68	0,17	0,05
MnO	0,06	0,04	0,01
Fe ₂ O ₃	3,60	3,60	1,90
P.P.C*	1,78	0,99	1,02

*PPC. Perda por calcinação.

Segundo a Tabela 3.9, o constituinte com maior valor de concentração para a brita foi o dióxido de silício (61,70%). Para os seixos de rio SP e SJ, os valores desses constituintes foram respectivamente de 91,30 e 94,30%. Os outros minerais mais significativos para a brita foram a alumina (16%), óxido de potássio (5,10%), óxido de cálcio (5,3%) e óxido de ferro (3,60%).

Para o seixo – SP e seixo – SJ, as maiores concentrações foram respectivamente a alumina (2,20% e 2,0%) e óxido de ferro (3,60% e 1,90%). Com relação à perda por calcinação, os valores para os três agregados variaram de 0,99% a 1,78% com a brita apresentando o dobro do valor dos seixos. Os difratogramas de Raios-X (DRX) das fases cristalinas das amostras de agregado graúdo são mostrados na Figura 3.19.

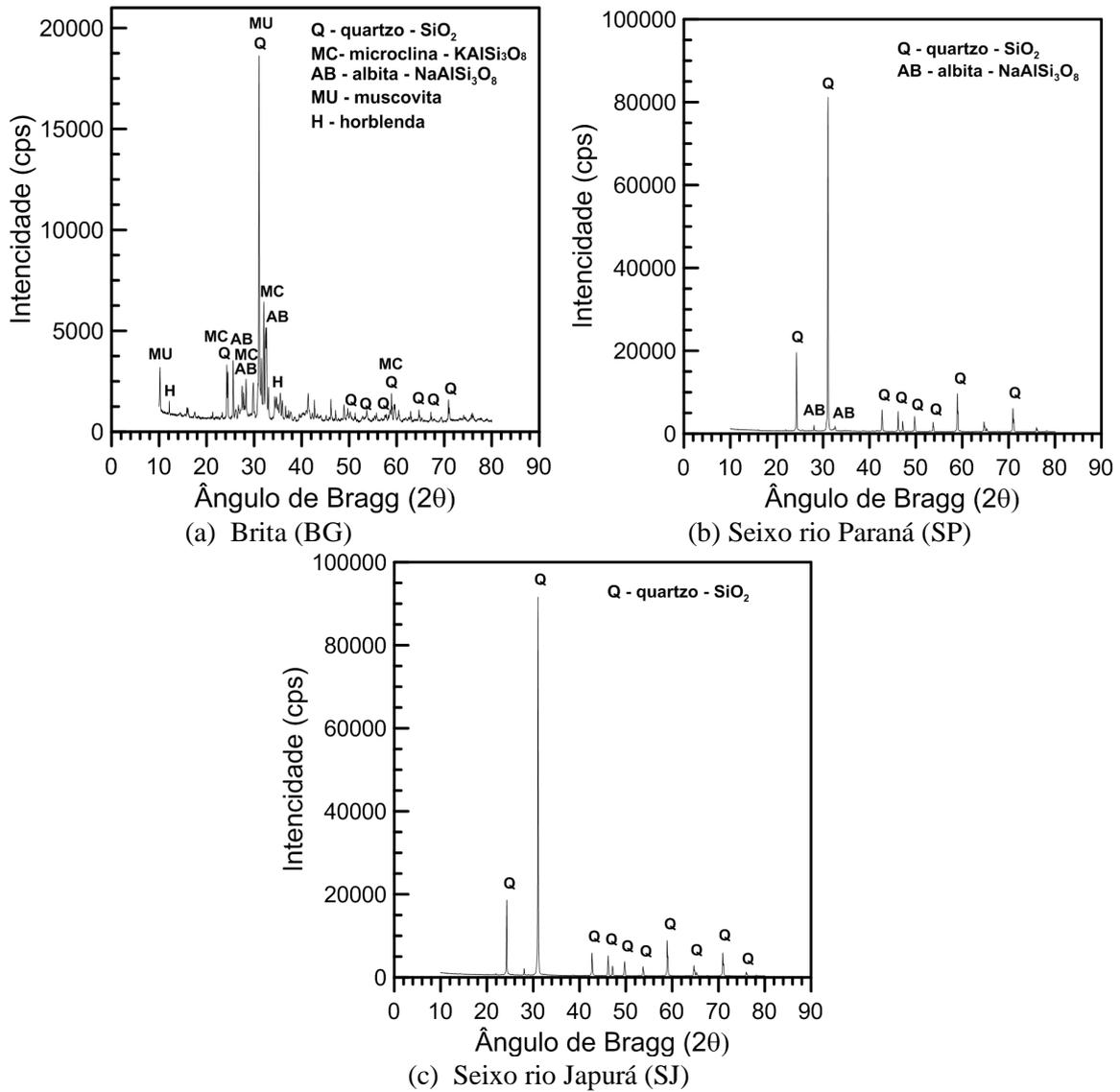


Figura 0.19 – Difratoformas dos agregados gráudos.

Na Figura 3.19 (a), referente à brita granítica, observa-se que os minerais predominantes são o quartzo, muscovita e microclina. O difratograma mostra um leve desvio nos ângulos de Bragg (2θ) de 10° e 20° indicando a presença de minerais amorfos. Para o seixo oriundo do rio Paraná (SP, Figura 3.19 (b)), observa-se a predominância do mineral quartzo com traços muito reduzidos do mineral albita. Já para o seixo oriundo do rio Japurá (SJ, Figura 3.19 (c)), o difratograma mostra que é composto exclusivamente do mineral quartzo.

1.11.2.5 Abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão “Los Angeles” mede o desgaste de um agregado por abrasão através do impacto entre agregados e esferas de aço (diâmetro de 48 mm) padronizadas que giram num tambor, com velocidade controlada de 30 a 33 rpm. Após o término do ensaio, o agregado é peneirado e pesado. O ensaio de abrasão “Los Angeles” é padronizado pela norma ABNT NBR NM51, 2001. O desgaste é convencionalmente expresso em porcentagem do material que passa após o ensaio pela peneira de malha quadradas de 1,68 mm conforme Equação 3.1.

$$P = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad \text{Equação (3.1)}$$

onde:

P= perda por abrasão;

m_0 = massa da amostra seca;

m_1 = massa de material retido na peneira (1,68 mm de malha) após ensaio.



Figura 0.20 – Ensaio de abrasão (a) equipamento “Los Angeles”

O ensaio de abrasão (Figura 3.20) foi executado no Laboratório de Geotecnia do COPPE/UFRJ. Foram são utilizadas 8 esferas de aço como carga abrasiva para amostra com graduação “C”. O material para cada agregado foi de 5.000 g \pm 10 g de amostra

sendo 2.500 g passante na peneira 9,5mm e retida na 6,3mm e 2.500 g entre as peneiras de 6,3mm e retido na peneira 4.8mm.

A massas correspondentes às frações das amostras de agregado graúdo foram inseridas na máquina “Los Angeles”, juntamente com a carga abrasiva (composta por oito esferas de aço) perfazendo uma carga total de 3330g. A máquina foi fechada e submetida a um ciclo de 500 revoluções do tambor. A Tabela 3.10 mostra os resultados obtidos para os agregados analisados.

Tabela 3.10 – Ensaio de Abrasão “Los Angeles” para os agregados graúdos

“ Abrasão Los Angeles”	Valores (%)		
	Brita	Seixo - SP	Seixo - SJ
Média	36,43	22,83	23,70
C.V. (%)	3	6	7

1.11.3 Caracterização dos agregados graúdos utilizando o Aggregate Imaging System (AIMS)

O AIMS (Figura 3.21(a)) é um sistema de medição de imagens de agregados. O equipamento é automatizado e utiliza um sistema de digitalização e processamento digital de imagem para analisar as características de forma tridimensional, angularidade, textura, esfericidade, planicidade, alongamento e a relação entre a planicidade e alongamento dos agregados graúdos, assim como a forma bidimensional e angularidade de finos. Em 2003, Masad e seus colaboradores da Universidade do Texas projetaram o sistema para capturar imagens com diferentes resoluções, campos de visão e esquemas de iluminação (Figura 3.21 (b)).

O equipamento de ensaio é um sistema integrado, composto por hardware de aquisição de imagem e um software para executar o sistema e analisar os dados. Para a análise no AIMS, considera-se para agregados graúdos apenas as frações retidas nas peneiras de malha 25,4 (1"); 19,0 (3/4"); 12,5 (1/2"); 9,5 (3/8") e 4,75mm (#4). Após o posicionamento de cada grão na bandeja (Figura 3.22 (a),(b),(c)), as portas do compartimento lateral do equipamento são fechadas para dar início ao ensaio.

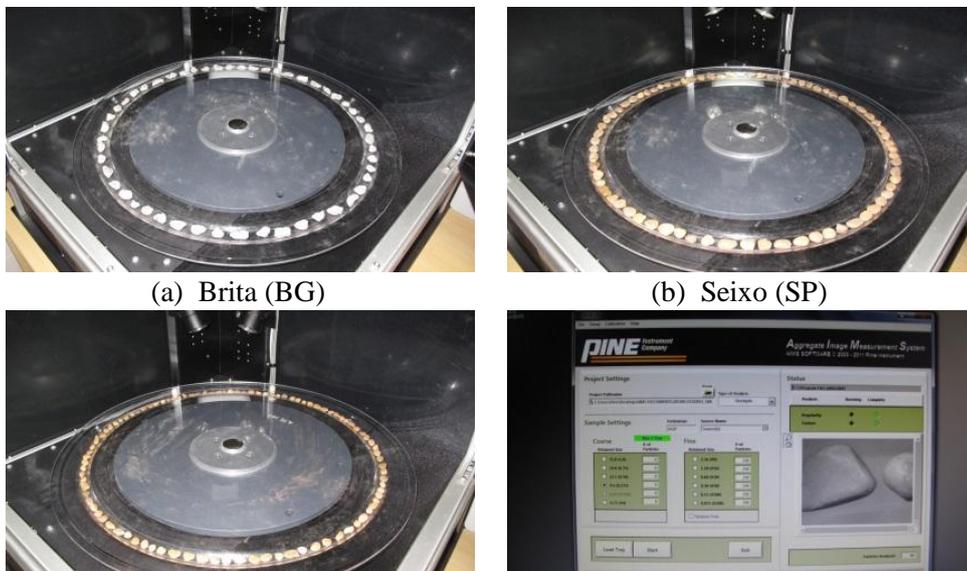


(a) Equipamento

(b) Câmeras de alta resolução

Figura 3.21– Equipamento AIMS.

A bandeja começa a girar com os agregados dentro do equipamento e a imagem de cada partícula é capturada. Em seguida, a bandeja gira novamente para que a altura dos agregados seja obtida e, assim, todas as dimensões, incluindo a profundidade sejam mensuradas.



(a) Brita (BG)

(b) Seixo (SP)

(c) Seixo (SJ)

(d) Software de aquisição de imagens

Figura 3.22 – Agregados analisadas no equipamento AIMS.

Uma terceira digitalização é feita para que os níveis de textura sejam obtidos. Esas três verificações são necessárias para uma análise completa de forma dos agregados graúdos (angularidade, textura, e as dimensões das partículas). Após as digitalizações terem sido concluídas, o equipamento retorna a bandeja para sua posição inicial, e o software (Figura 3.22 (c)) exporta todos os dados para Microsoft Excel. O sistema fornece as seguintes medidas para partículas de agregado graúdo:

- Índice de angularidade: 1 a 10000;
- Índice de textura: 0 a 1000;
- Índice de esfericidade: 0 a 1;
- Planicidade, alongamento, plano e alongado e plano ou alongado.

Para a análise do agregado miúdo (ou seja, passante na peneira 4,75mm (#4) e retido na peneira de abertura de 0,075mm - N° 200), consideram-se as frações retidas nas peneiras de malha 2,36 (#8), 1,18 (16), 0,60 (#30), 0,30 (#50), 0,15 (#100) e 0,075mm (#200) e 50 gramas de agregado para cada fração. A amostra é espalhada uniformemente em torno da calha bandeja opaca (não transparente) (Figura 3.23(a)), e a iluminação é realizada na parte superior do aparelho. O equipamento avalia as imagens de maneira que as partículas dos agregados miúdos que estejam em contato não sejam analisadas e não afetem, assim, o resultado (Figura 3.23b)). Nessa análise, apenas uma verificação é necessária. O sistema fornece as seguintes medidas de partículas do agregado miúdo:

- Índice de angularidade: 1 a 10000;
- Índice de forma 2D: 0 a 20.



(a) Areia



(b) Software de aquisição de imagens

Figura 3.23 – (a) areia (b) software de aquisição de dados.

A análise da Forma 2D aplica-se somente aos agregados miúdos e quantifica a forma relativa de imagens bidimensionais de partículas do agregado. O índice Forma 2D é

expresso pela Equação 3.2 e tem uma escala relativa de 0 a 20 (Figura 3.24). Como comparação, um círculo perfeito tem o valor de forma 2D igual a zero.

$$2D = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[\frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad \text{Equação (3.2)}$$

onde:

R_{θ} – raio da partícula do raio de θ ;

$\Delta\theta$ – diferença incremental no ângulo.

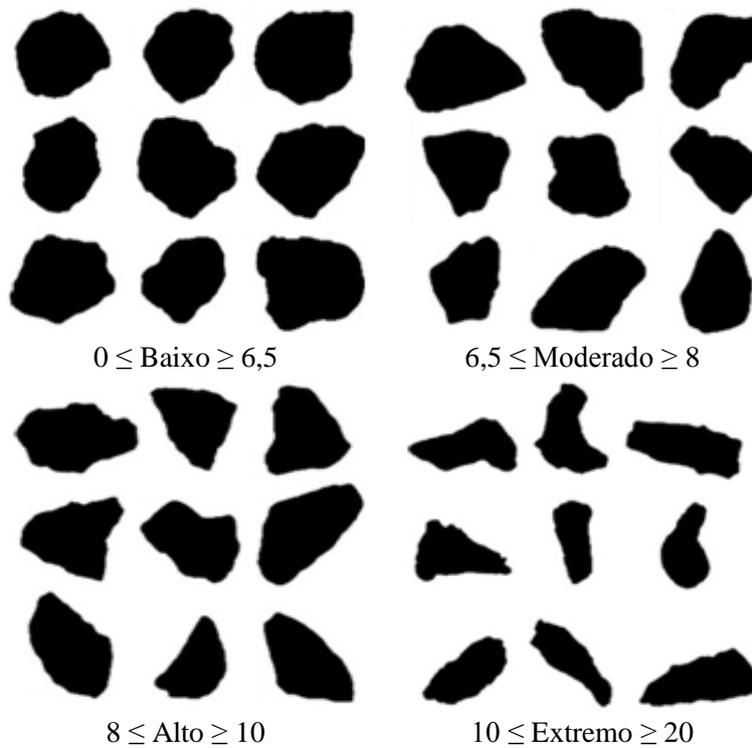


Figura 3.24 – Escalas de Forma (2D) para o agregado miúdo.

O Gradiente de Angularidade (GA) aplica-se a ambos os tamanhos dos agregados miúdos e graúdos e descreve as variações no contorno da partícula que influenciam a forma geral. Quantifica mudanças ao longo de um limite de partícula com valores mais elevados indicando um gradiente de forma angular. Apresenta escala que varia de 0 a 10000 (Figura 3.25), com um círculo perfeito tendo um valor próximo de zero. A análise do Gradiente de Angularidade é feita medindo a variação do gradiente ao redor das partículas e está relacionado com a agudez nos cantos nas imagens bidimensionais das partículas de agregado. O método do gradiente começa pelo cálculo da inclinação dos vetores de gradiente em pontos de contorno das partículas a partir do eixo x (eixo horizontal de uma imagem).

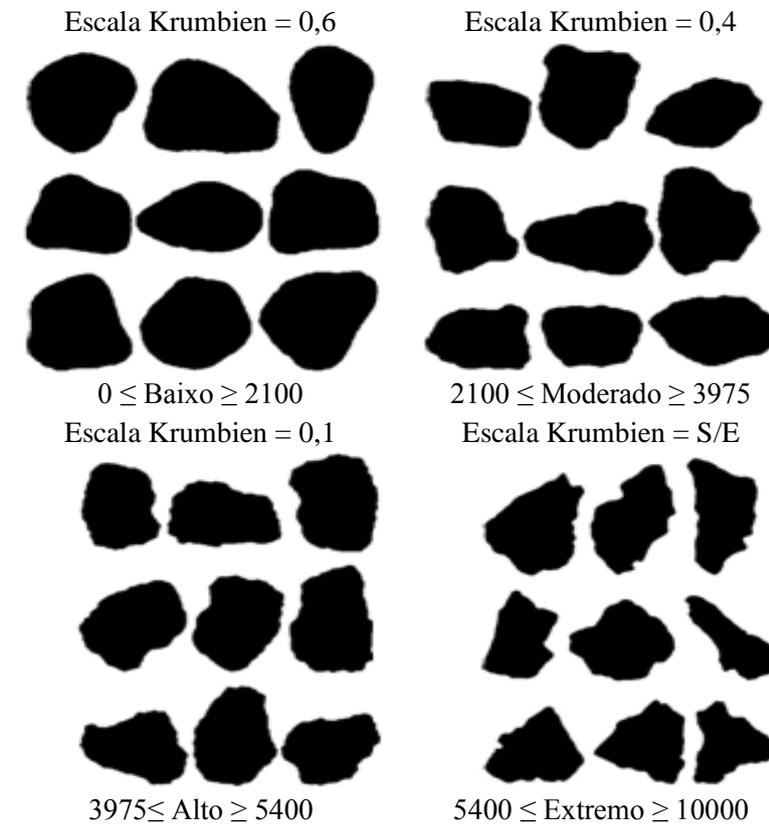


Figura 3.25 – Escalas de angularidades para o agregado miúdo e graúdo.

A mudança média na inclinação do gradiente dos vetores de gradiente é tomado como uma indicação de angularidade como mostrado na Equação 3.3.

$$GA = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad \text{Equação (3.3)}$$

onde:

θ – ângulo de orientação dos pontos na borda da partícula;

n – número total de pontos na borda da partícula;

i – indica um ponto na borda da partícula.

O índice de textura (TX) descreve as variações de suavidade ou rugosidade da superfície das partículas dos agregados (Figura 3.26) e aplica-se apenas aos agregados graúdos. Esta análise é realizada usando o método de Wavelets. O método caracteriza a superfície da partícula usando os parâmetros estatísticos de média aritmética e desvio padrão calculados a partir de valores de *pixels* gerando os detalhes de textura nas direções horizontais, verticais e diagonais em três imagens separadas e obtido para um determinado nível de decomposição. O índice de textura tem uma escala que varia de 0 a 1000, aproximando-se de zero o índice de textura de uma superfície lisa e polida. O índice de textura é expresso matematicamente pela equação 3.4.

$$TX = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N \left(D_{i,j}(x,y) \right)^2 \quad \text{Equação (3.4)}$$

onde:

D – função de decomposição;

n – nível em que a imagem foi decomposta;

N – total do numero de coeficientes na imagem;

i – três direções da textura na imagem;

j – Índice de Wavelet;

x, y – localização dos coeficientes na transformada no domínio.

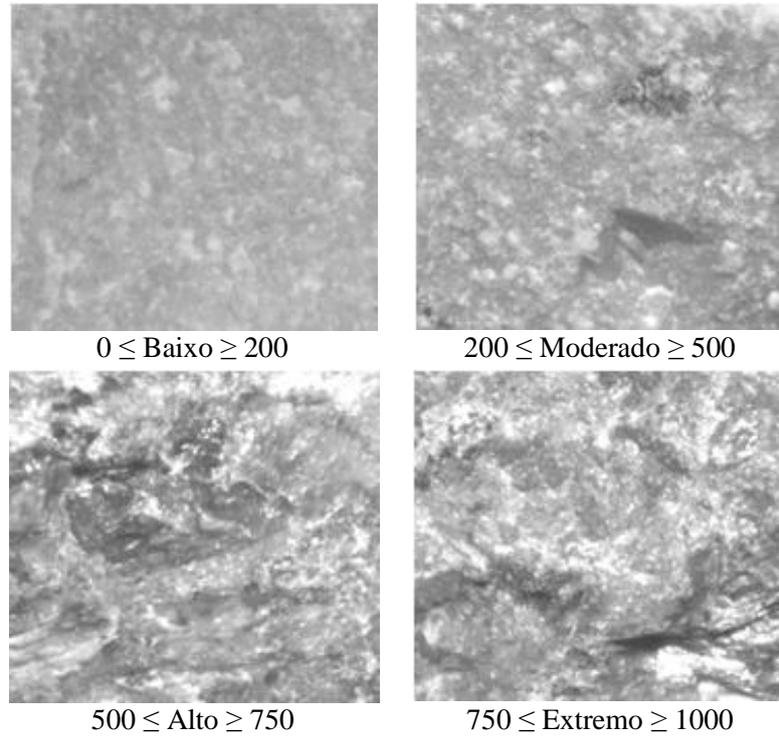


Figura 3.26 – Escalas de textura para o agregado graúdo.

O índice de esfericidade (SP) aplica-se a agregados graúdos e descreve a forma tridimensional da partícula. A esfericidade tem uma escala que varia de 0 a 1 com o valor de esfericidade de 1 (um) indicando que a partícula tem dimensões iguais (cúbicas). O índice de esfericidade é descrito na Equação 3.5.

$$SP = \sqrt[3]{\frac{d_S d_I}{d_L^2}} \quad \text{Equação (3.5)}$$

onde

d_s – função de decomposição;

d_l – nível em que a imagem foi decomposta;

d_L – total do numero de coeficientes na imagem;

A Tabela 3.11 apresenta os valores limite dos parâmetros Forma 2D, índices de angularidade, esfericidade e textura para as diversas categorias.

Tabela 3.11 – Limites dos parâmetros analisados no AIMS.

Análises			
Forma 2D			
Baixo	Moderado	Alto	Extremo
6,5	8	10,75	20
Angularidade			
Baixo	Moderado	Alto	Extremo
2100	3975	5400	10000
Esfericidade			
Baixo	Moderado	Alto	Extremo
0,5	0,6	0,8	1
Textura			
Baixo	Moderado	Alto	Extremo
200	500	750	1000

Al Rousan (2004) estudou as características de forma, de angularidade e de textura de vários agregados com diferentes mineralogias e tamanhos e desenvolveu uma metodologia de classificação dos agregados de acordo com os parâmetros de sua pesquisa. Ele avaliou treze tipos de agregados graúdos e cinco tipos de agregados miúdos e aplicou o método estatístico dos clusters, ou agrupamentos, durante as análises de cada propriedade obtida através do AIMS para a determinação dos limites de classificação dos agregados analisados, esses limites estão apresentados na Tabela 3.12.

Para as análises digitais, os agregados miúdos foram fracionados e separados por tamanho retido nas malhas de peneiras utilizadas pelo AIMS e, em seguida, foram lavados e secos em estufa $100 \pm 2C^0$. Posteriormente foram ensacados nas frações retidas nas peneiras #2,36; #1,18; #0,600; #0,300; #0,150; #0,075.

Tabela 3.12 – Limites de classificação dos agregados Al Rousan (2004)

Propriedade	Valores limites/classificação				
Forma 2D	< 6,5	6,5 - 8,0	8,0 - 10,5	>10,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Esfericidade	< 0,6	0,6 - 0,7	0,7 - 0,8	> 0,8	-
	Achatado/alongado	Baixa esfericidade	Moderada esfericidade	Alta esfericidade	-
Angularidade	< 2100	2100 - 4000	4000 - 5400	> 5400	-
	Arredondado	Subarredondado	subangular	Angular	-
Textura superficial	< 165	165 - 275	275 - 350	350 - 460	> 460
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Moderada rugosidade	alta rugosidade

A forma 2D representada na Figura de 3.27 (a) aplica-se apenas às frações de agregados miúdos. Esta propriedade está relacionada com a proximidade das partículas à forma de um círculo: quanto mais próximo o valor estiver de 0 mais circular será a partícula e quanto mais próximo for o valor de 20 mais alongada será a mesma. O agregado miúdo (areia de rio) analisado possui curvas praticamente sobrepostas umas às outras. No entanto, percebe-se que, para os grãos retidos na peneira #2,36, uma porcentagem de seus grãos apresenta valores mais baixos de forma 2D. Isto é evidenciado quando percebe-se um leve deslocamento da porção superior da curva dessa peneira para a esquerda.

Os resultados das distribuições cumulativas para o índice de angularidade dos agregados miúdos encontram-se na (Figura 3.27 (b)). Nota-se que as curvas de distribuição para índice de angularidade encontram-se mais acentuadas indicando maior variabilidade desse índice entre os grãos. As curvas para as peneiras #1,18, #0,600, #0,300 mostraram-se muito próximas, já as curvas referentes às peneiras #0,075, #0,150 e #2,36 encontram-se mais deslocadas para a esquerda, indicando que esses agregados possuem um valor de angularidade mais baixo se comparados com o das outras frações.

O índice de forma 2D variou de 6,90 a 8,20 respectivamente para o material retido nas peneiras #2,36 e #0,075. A média (Tabela 3.13), para todas as peneiras foi de 7,25. O agregado miúdo foi classificado com a forma moderada e pelo critério de Al Rousan (2004), como sendo semicircular.

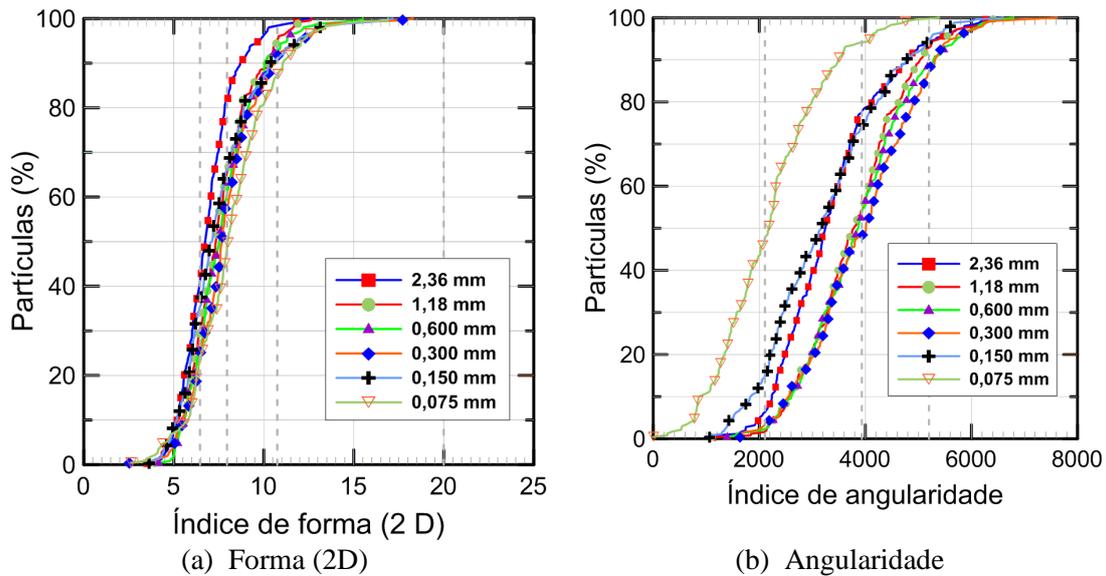


Figura 3.27 – Curvas de distribuição dos índices de forma (2D) e angularidade do agregado miúdo.

O valor do índice de angularidade média para o agregado miúdo, (Tabela 3.13) foi de 3410,87, indicando que suas partículas têm angularidade moderada e segundo AL ROUSAN (2004) são classificadas como sub arredondadas, com o índice variando de 3370,7 (# 2,36mm) a 2198,5 (# 0,075mm).

Tabela 3.13 – Valores do índice de forma e angularidade do agregado miúdo

Índices	Média	Desvio padrão	CV (%)
Forma 2D	7.65	1.97	26
Angularidade	3410.87	1027.62	31

Observa-se na Tabela 3.13 que o coeficiente de variação (CV) para os dois índices foi alto, indicando uma heterogeneidade dos grãos da amostra. Foram utilizados para a análise em média 250 partículas de agregados miúdos por fração de agregado retida em cada uma das peneiras para ensaio. A Figura 3.28 apresenta as imagens obtidas dos os agregados miúdos para cada fração anualizada.

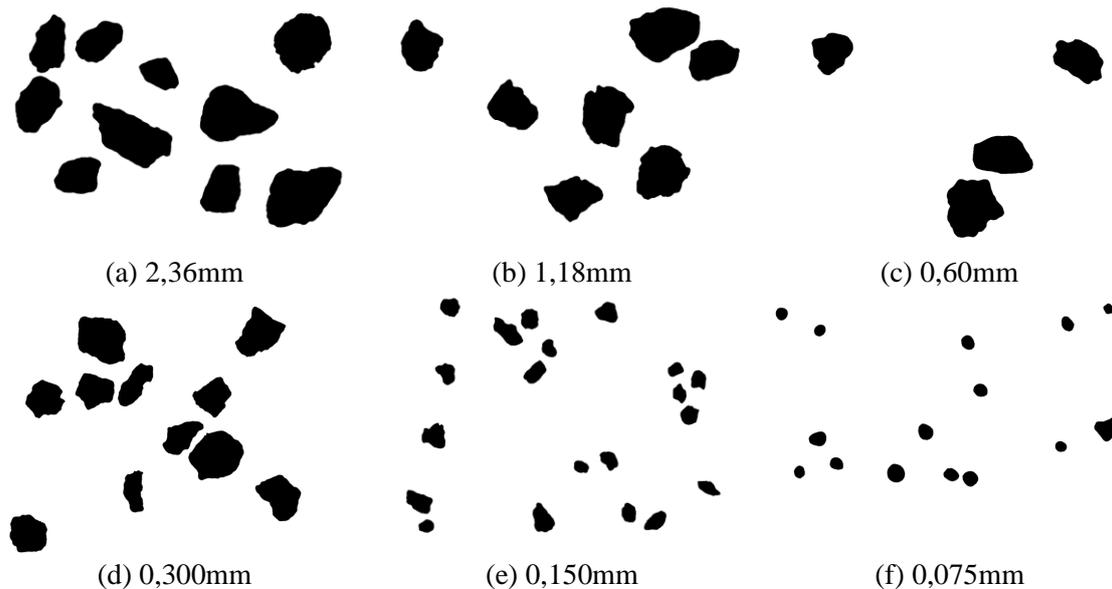


Figura 3.28 – Imagens de angularidade do agregado miúdo.

Para as análises no AIMS os agregados graúdos foram fracionados e separados por tamanho retido nas malhas das peneiras utilizadas pelo AIMS. Logo após, foram lavados e secos em estufa $100 \pm 2C^0$. Posteriormente, foram ensacados nas frações retidas nas malhas #12,5; #9,5 e #4,75.

Para esse estudo, limitou-se o diâmetro máximo do agregado graúdo em 13,2mm; esse valor deveu-se à limitação do comprimento da fibra (35mm) que deve ser igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado, de modo que a fibra possa atuar de maneira eficiente como ponte de transferência de tensões através das fissuras. As curvas de distribuição do índice de angularidade para o agregado graúdo estão mostradas na Figura 3.29. Os resultados dos agregados indicam uma diferença nas distribuições cumulativas quando se comparam os três agregados graúdos entre si.

As curvas referentes aos agregados seixo SP (Figura 3.29 (b)) e SJ (Figura 3.29 (c)) estão mais deslocadas para a esquerda, indicando que esses agregados possuem um menor valor de angularidade quando comparados com o agregado brita (figura 3.29 (a)). A brita apresenta maior uniformidade para o índice de angularidade entre as peneiras analisadas.

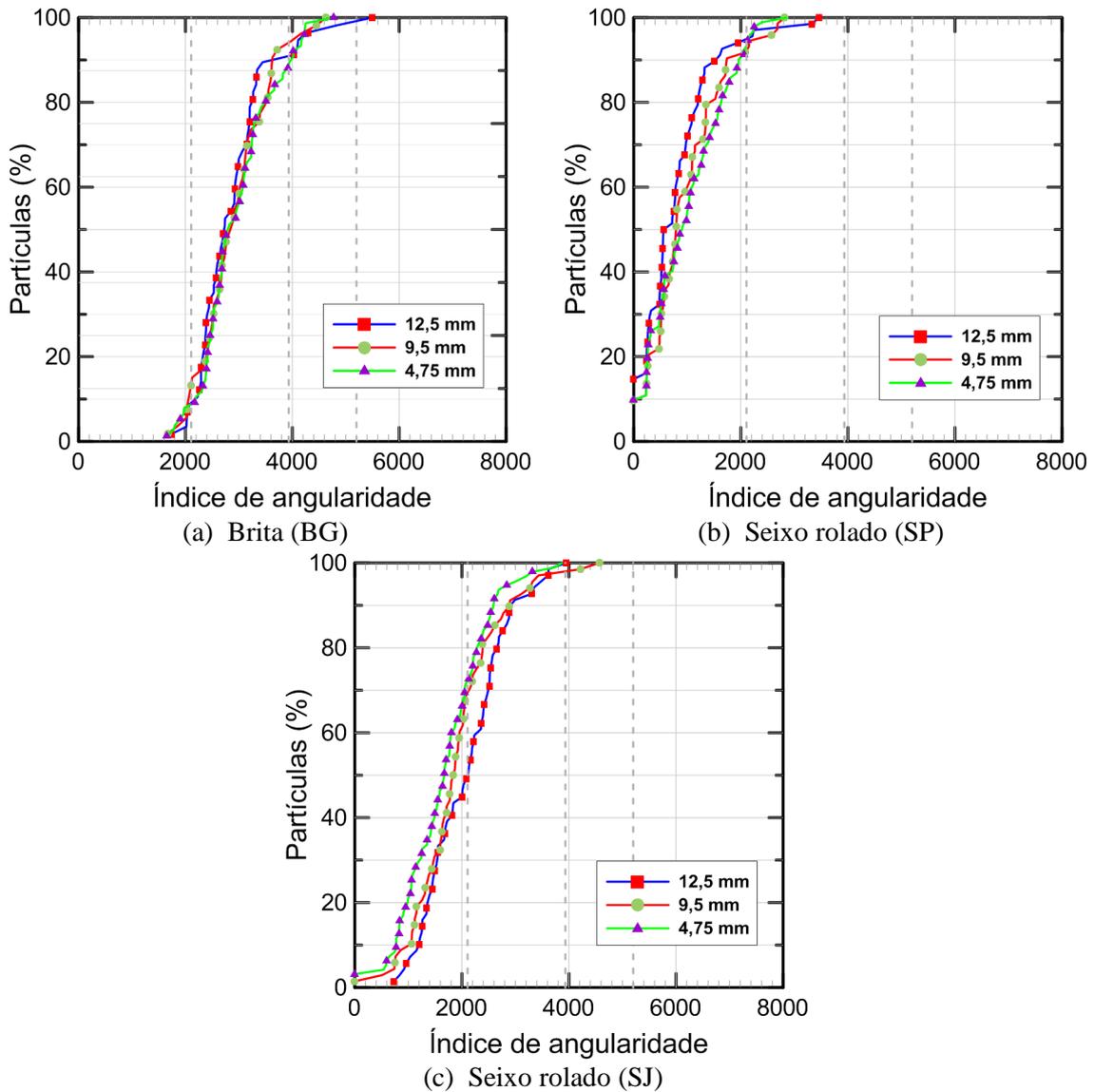


Figura 3.29 – Curvas de distribuição do índice de angularidade dos agregados graúdos.

Quando se compara o seixo SP em relação ao seixo SJ, nota-se que o primeiro apresenta curvas de distribuição mais deslocadas para a esquerda, indicando partículas menos angulosas do que para o seixo SJ, porém ambos permanecem dentro de um mesmo índice de angularidade. Observa-se que as partículas retidas na #12,5 para os dois seixos investigados apresentam distintos comportamentos em relação às partículas retidas nas outras duas peneiras. As curvas referentes à peneira #12,5 para o seixo SP estão localizadas à esquerda das outras duas enquanto para o seixo SJ ela está à direita das outras, indicando uma tendência de partículas mais angulosas. Esse fato

pode ser observado de forma inversa para a peneira #4,75. Observa-se também que aproximadamente 80% das partículas do seixo SP encontra-se abaixo de 2000, isso confirma que esse agregado tem menor angularidade do que o seixo SJ.

A Tabela 3.14 apresenta os parâmetros estatísticos do índice de angularidade para cada tipo de agregado graúdo analisado. A brita foi classificada como subarredondada e os dois seixos como arredondado (AL ROUSAN (2004)). Ressalta-se no entanto, que os valores dos CV's encontrados para os três agregados, foram elevados, para a brita (23%) e principalmente para o seixo SJ (41%) e SP (77%), isso indica heterogeneidade das amostras. Por outro lado, deve-se salientar que foram utilizados para a análise 100 partículas de agregados graúdos por fração de agregado retida em cada uma das peneiras para o ensaio.

Tabela 3.14 – Parâmetros de análise do índice de angularidade dos agregados graúdos

Angularidade	Valores		
	Brita	Seixo - SP	Seixo - SJ
Média	2919.30	905.37	1888.60
Desvio padrão	669.60	694.10	769.10
C.V.(%)	23	77	41

A Figura 3.30 mostra as imagens obtidas dos agregados graúdos para cada fração analisada.

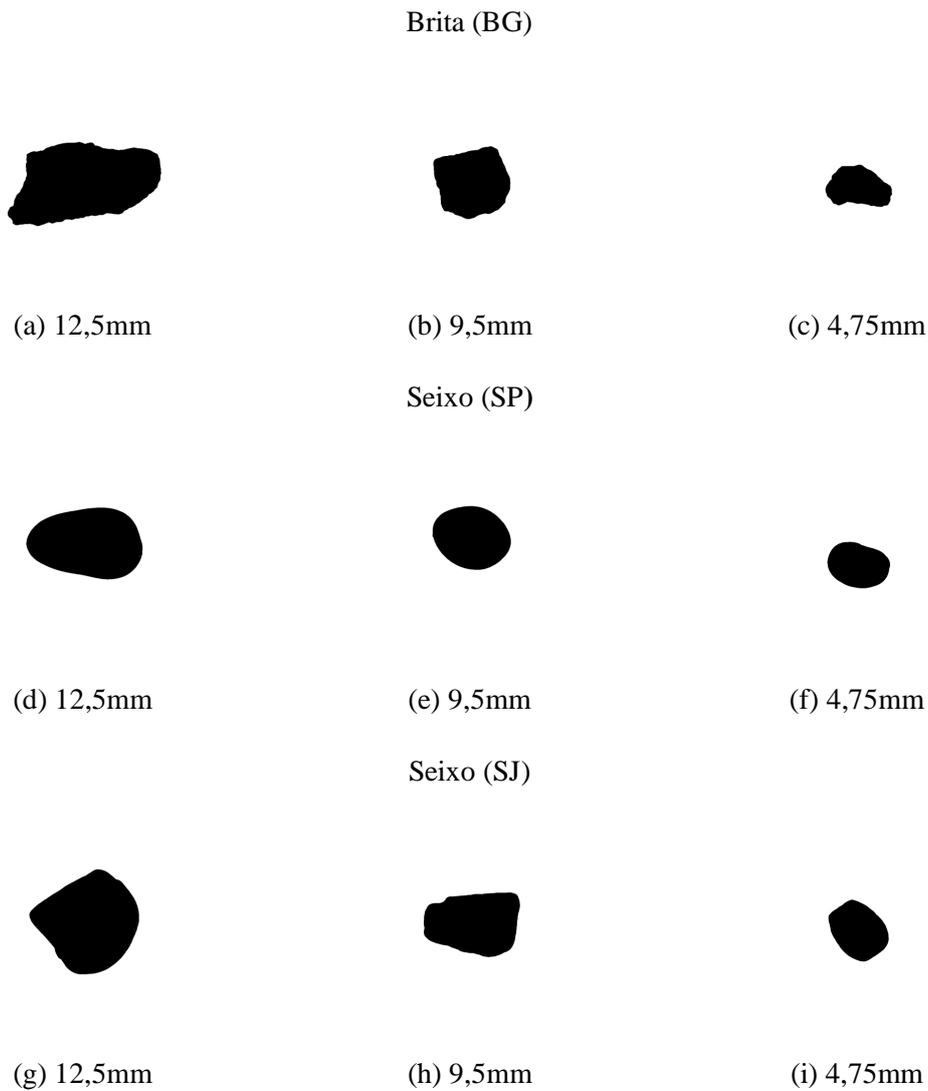


Figura 3.30 – Imagens de angularidade dos agregados graúdos.

Foram obtidos gráficos com as distribuições de valores cumulativos para os parâmetros de textura superficial referentes aos agregados graúdos (Figura 3.31). Pode-se concluir que a brita (Figura 3.31 (a)) se comportou diferentemente dos dois seixos com relação à textura superficial. Isso já era esperado, uma vez que os agregados provêm de fontes de extração completamente distintos. A brita apresenta maior distanciamento entre suas curvas de distribuição, principalmente na peneira #12,5 com deslocamento para a esquerda bem maior que as duas outras curvas desse agregado. Isso indica que para essa granulometria, suas partículas apresentam índice de textura bem menor. Nota-se também que para a peneira #12,5 do seixo de rio SJ (Figura 3.31 (c)) houve um leve

distanciamento em relação às outras duas curvas, com praticamente 85% de suas partículas acumuladas com índice menor que 200. Quando se compara o seixo SP (Figura 3.31 (b)) em relação ao seixo SJ, nota-se que o primeiro apresenta curvas de distribuição mais uniformes que o segundo.

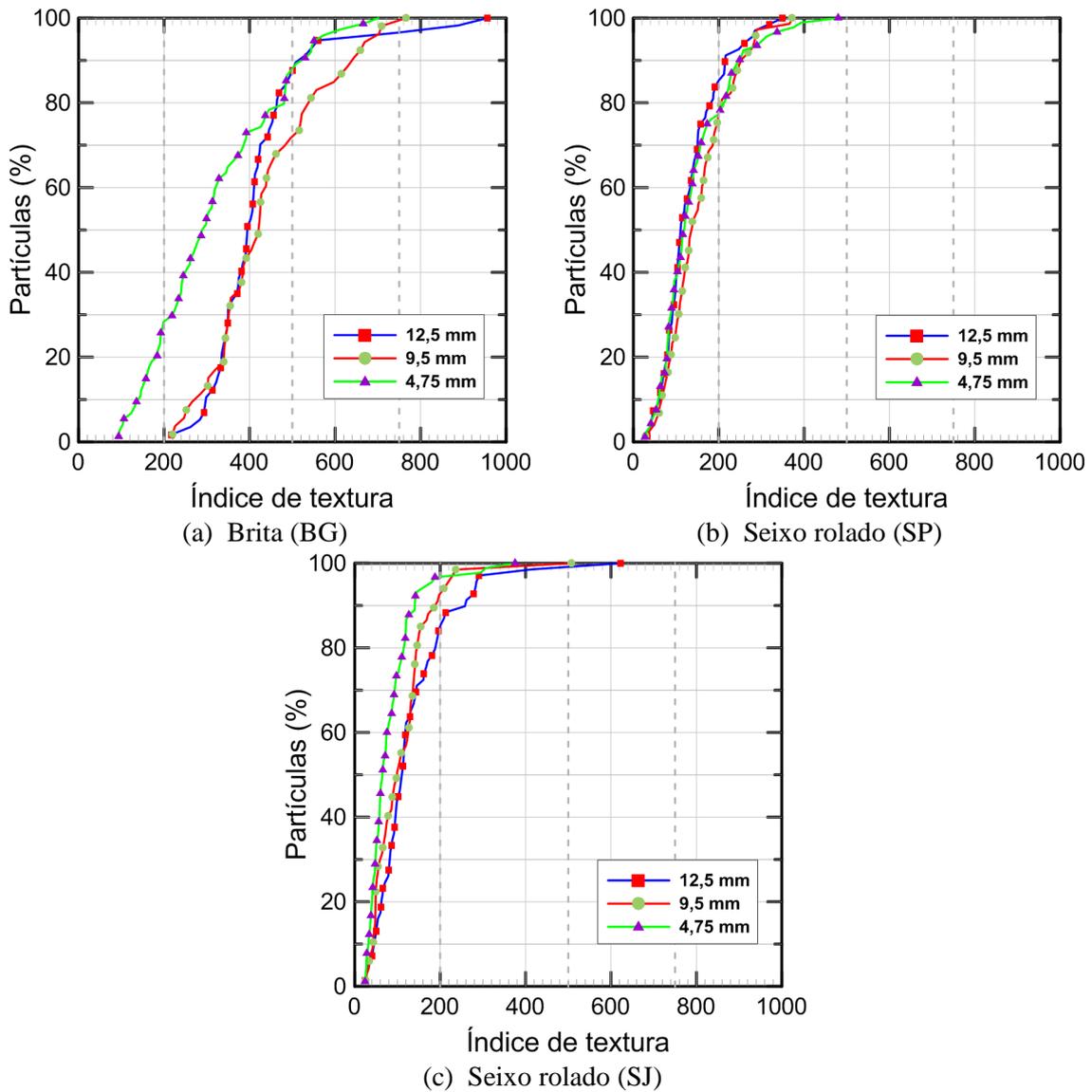


Figura 3.31 – Curvas de distribuição do índice de texturas dos agregados graúdos.

A Figura 3.32 mostra as imagens de textura obtidas dos agregados graúdos para cada fração analisada.

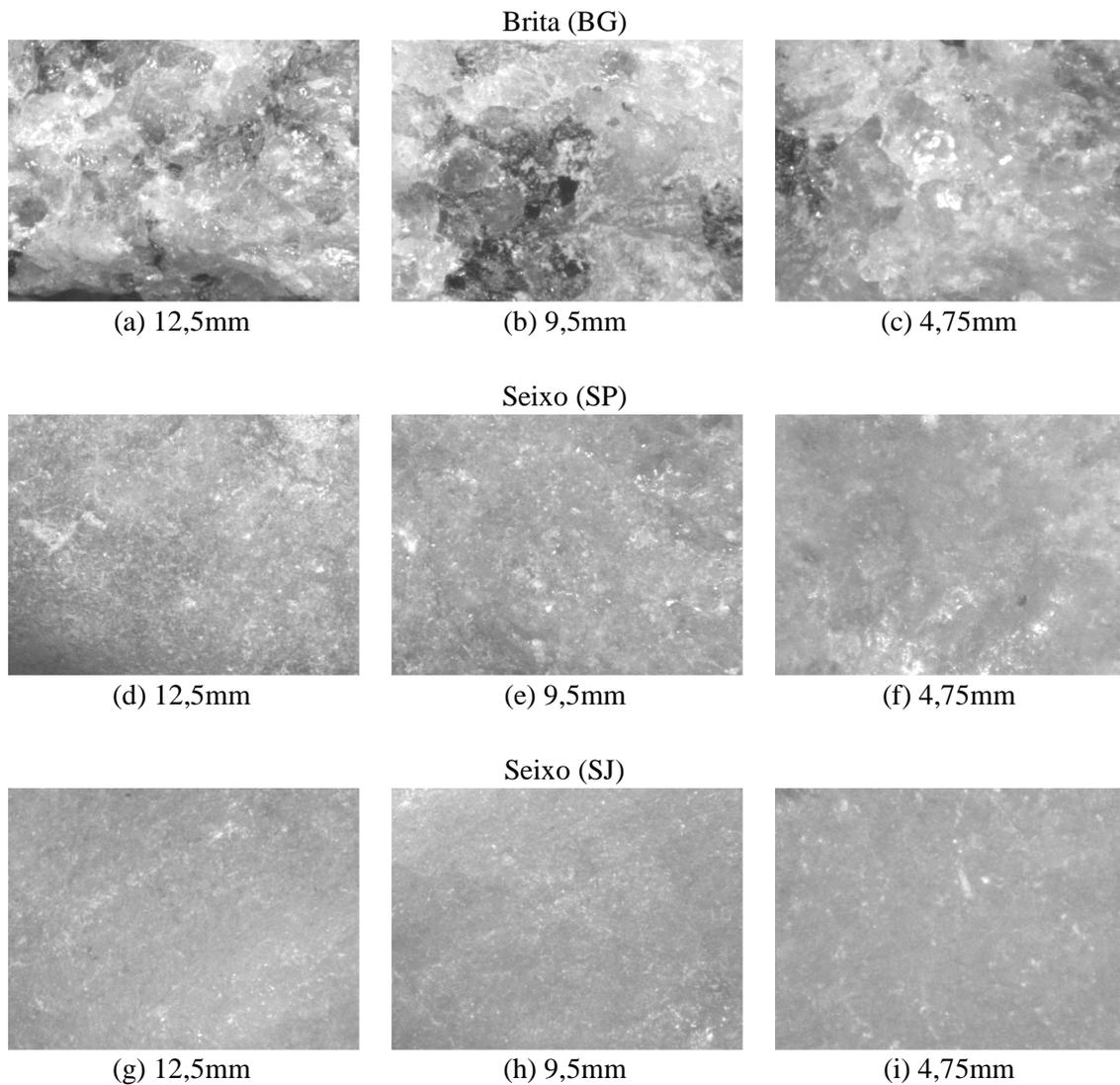


Figura 3.32 – Imagens de textura dos agregado graúdos.

O valor médio do índice de textura para todos os tamanhos das partículas (Tabela 3.15), classifica a brita como de textura moderada baixa rugosidade. Já para os dois seixos de rio a classificação é de baixa textura ou polido (AL ROUSAN, 2004). Os valores dos CV's encontrados para os três agregados foram bastante elevados, sendo iguais a 37% para a brita, 53% para o seixo SJ e 70% para o seixo SP, indicando grande heterogeneidade na textura das amostras.

Tabela 3.15 – Parâmetros de análise do índice de textura dos agregados graúdos

Textura	Valores		
	Brita	Seixo - SP	Seixo - SJ
Média	391.47	142.70	109.17
Desvio padrão	135.30	75.57	75.90
C.V.(%)	37	53	70

Com relação a esfericidade (Figura 3.33), quanto mais se aproximar de 1,0 o valor da esfericidade, mais próximo do formato de uma esfera será o agregado.

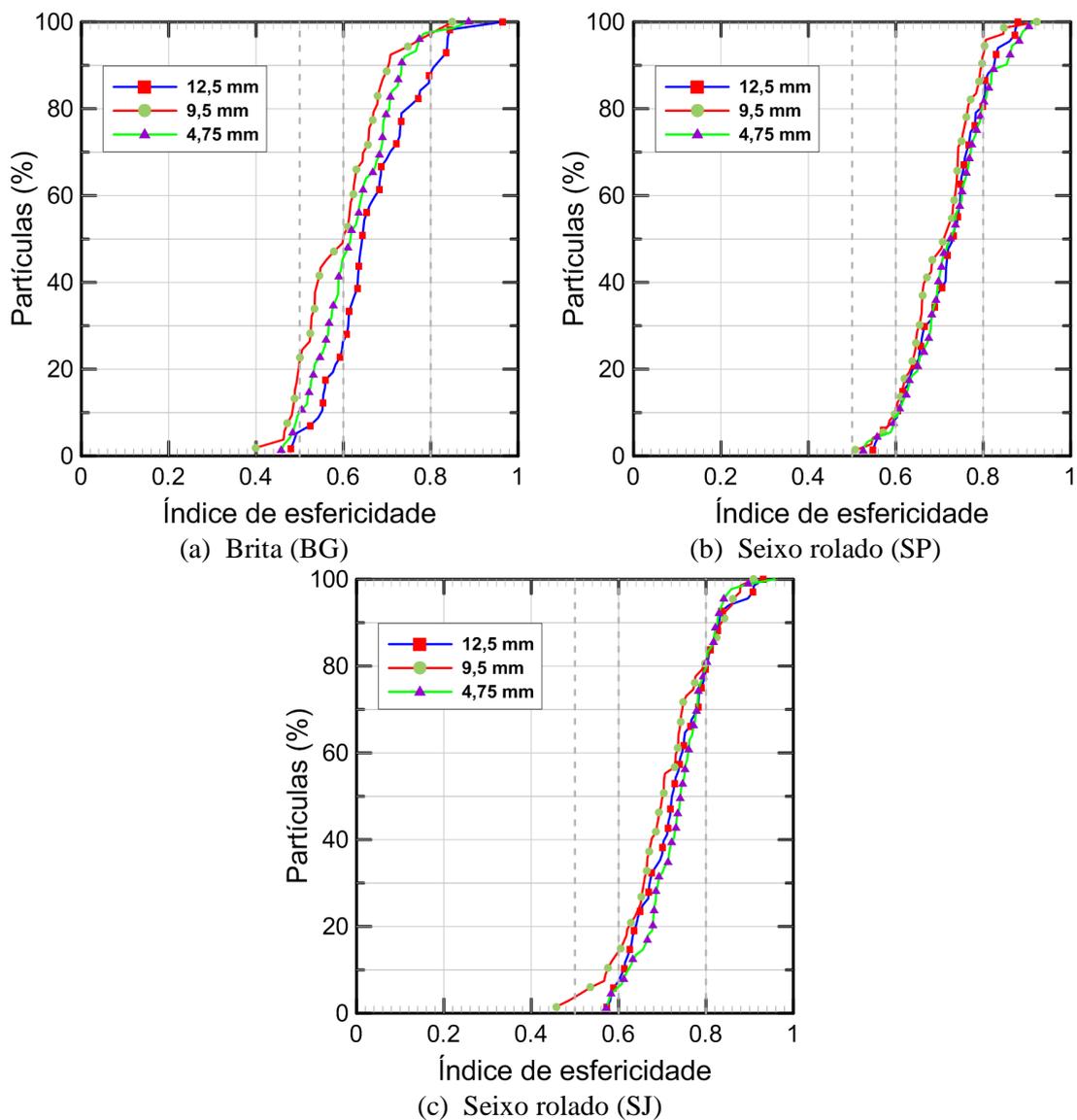


Figura 3.33 – Curvas de distribuição do índice de esfericidade dos agregados graúdos.

A brita (Figura 3.33 (a)) apresentou curvas mais afastadas umas das outras quando comparadas com as curvas dos dois seixos de rio, indicando que cada fração de agregado brita se comporta de maneira diferente para este parâmetro principalmente na peneira #12,5. Para o seixo SP, (Figura 3.33 (a)), e SJ (Figura 3.33 (b)), as curvas se apresentam mais juntas indicando uma maior uniformidade entre os grãos com relação à esfericidade. Percebe-se portanto, que a brita apresenta suas curvas de distribuição mais afastadas para a esquerda indicando ser menos esférica do que os dois tipos de seixos.

O índice de esfericidade foi de 0,63, e 0,72 e 0,73 respectivamente para a brita, seixo SP e SJ (Tabela 3.16). Os três agregados foram classificados com esfericidade alta. Os valores dos CV's encontrados para os três agregados, foram baixos (16%) e principalmente para o seixo SJ (10%) e SP (12%), indicando que as amostras são homogêneas em relação ao índice de esfericidade.

Tabela 3.16 – Parâmetros de análise do índice de esfericidade dos agregados graúdos

Esfericidade	Valores		
	Brita	Seixo - SP	Seixo - SJ
Média	0.63	0.72	0.73
Desvio padrão	0.10	0.08	0.09
C.V.	16	10	12

1.12 Compacidade experimental dos materiais cimentícios

O ensaio de compacidade experimental para materiais aglomerantes, realizado através do método de demanda d'água (protocolo K= 6,5), foi proposto por De Larrard (1999), e tem a finalidade de se obter o máximo de empacotamento de pastas com partículas de diâmetros inferiores a 100 µm adicionando água até atingir o ponto de saturação da mistura. Para a realização do ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos: balança com precisão de 0,01 g, pissete, (Figura 3.34 (a)), misturador com capacidade de 5 litros (Figura 3.34 (b)), espátula.

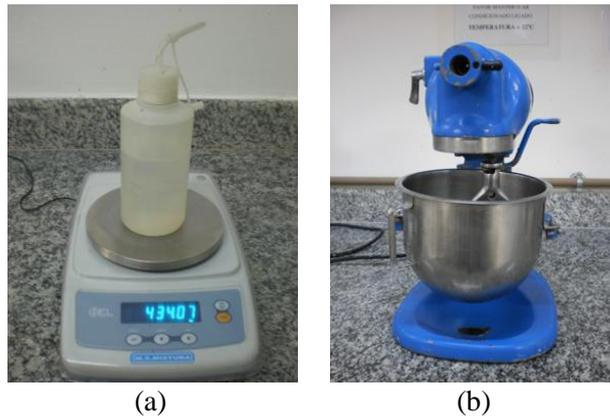


Figura 0.34 – Equipamentos utilizados no ensaio de demanda de água:(a) balança com precisão de 0,01g e pissete, (b) misturador capacidade de 5 litros .

O ensaio consiste em adicionar água à mistura de forma progressiva, até que o material em forma de pó passe para um estado de pasta. A transição das duas fases ocorre quando a quantidade de água adicionada proporciona o umedecimento de todos os grãos existentes na pasta sem contudo ultrapassar o ponto de saturação da mistura. Durante a realização do ensaio, observam-se quatro fases distintas:

- na primeira fase (Figura 3.35 (a)) observa-se que a mistura ainda está seca e que apresenta elevado índice de vazios;
- a segunda fase (Figura 3.35 (b)) caracteriza-se por apresentar a mistura já na forma de pasta, porém os grãos encontram-se parcialmente envolvidos pela água e a mistura ainda apresenta vazios entre as partículas de material da pasta.
- na terceira fase (Figura 3.35 (c)) a pasta apresenta-se saturada e as partículas encontram-se preenchidas por água;
- a quarta fase (Figura 3.35 (d)) caracteriza-se por requerer um acréscimo de água apenas para que a mistura ultrapasse o ponto de saturação obtendo maior fluidez na mistura. Quando esse estágio é atingido, chega-se ao “ponto de demanda de água”.

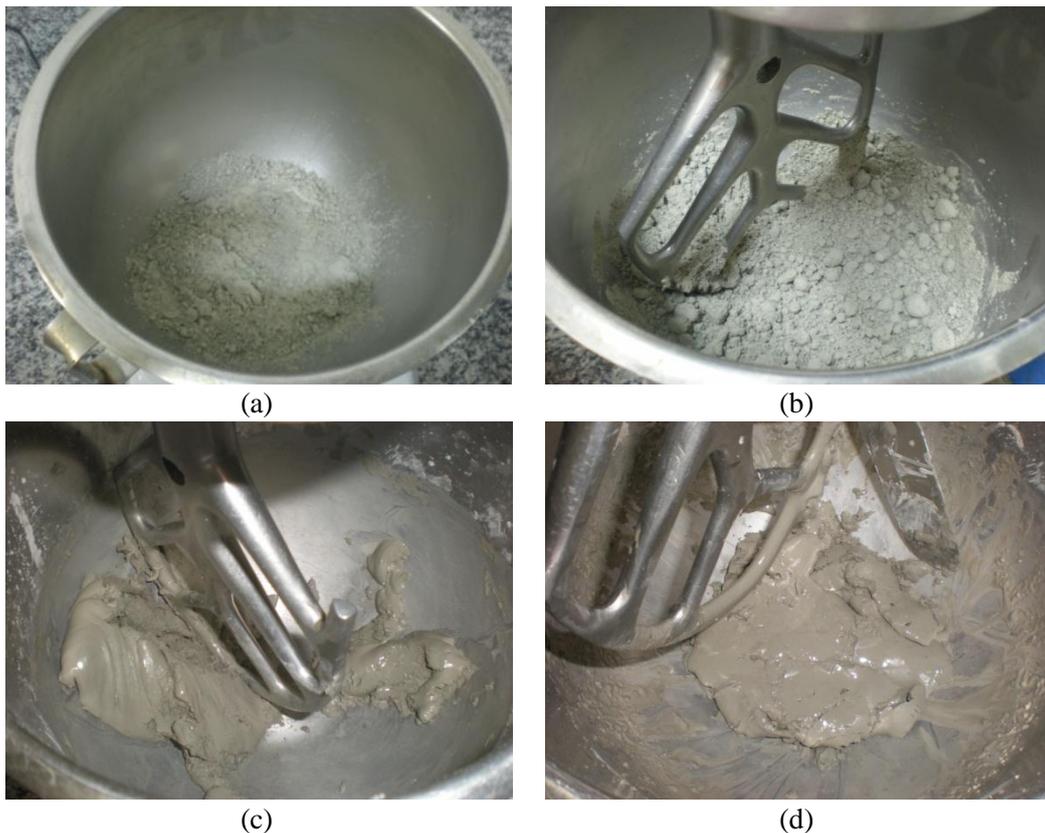


Figura 0.35 – Fases do ensaio de demanda de água : (a) mistura seca, (b) formação de grânulos, (c) pasta se dividindo em três partes, (d) ponto de demanda de água.

O ensaio de demanda d'água foi realizado para o cimento, cinza volante e sílica ativa, com e sem superplastificante (SP). Os resultados de compactidade experimental foram obtidos a partir da média de três determinações e com um tempo de ensaio de 10 minutos. As etapas de ensaio são as seguintes:

- inicia-se com a introdução da água na pissete e pesagem de 350 g de material para o ensaio e o superplastificante. Quando se usa superplastificante, a quantidade de água contida no mesmo é descontada da água total do ensaio;
- introdução do material pesado na cuba do misturador e o superplastificante;
- liga-se o misturador e inicia-se o procedimento de adição de água, sempre pesando a pissete após cada adição;

- no momento em que a mistura formar grânulos, aumenta-se a velocidade do misturador e observa se o material está aderido na parede do misturador; em caso positivo, desliga-se o misturador e remove-se o material com a espátula longa. Após a remoção, liga-se o misturador e prossegue-se com o ensaio;
- adiciona-se água e observa-se o comportamento da pasta. Se o material formar três partes de pasta dentro da cuba, deve-se reduzir a adição de água ao mínimo e as pesagens devem tornar-se mais intensas.
- quando for verificado que as três partes tendem a se juntar novamente, desliga-se o misturador e faz-se uma ranhura até o fundo da pasta dividindo-a ao meio. Logo após, verifica se a ranhura se fecha com uma leve batida nas paredes da cuba;
- se a ranhura fechar, a quantidade de água adicionada à mistura é o ponto de demanda de água, e seu empacotamento máximo foi atingido.

O cálculo da compacidade experimental C é realizado através da Equação 3.6

$$C = \frac{1}{1 + \gamma \cdot \frac{m_a}{m_m}} \quad \text{Equação (3.6)}$$

onde:

m_a – massa de água utilizada até ponto de demanda de água (g);

m_m – massa de material (350g);

γ – massa específica do material (g/cm^3).

A Tabela 3.17 apresenta os valores de compacidade experimental obtidos para os materiais dos materiais finos.

Tabela 0.17 – Compacidade experimental dos materiais finos

Material	Sem SP	Com SP	
	Compacidade (C)	Teor de SP*	Compacidade (C)
Cimento	0,536	0,2	0,604
Cinza volante	0,555	0,8	0,411
Sílica ativa	0,404	3,0	0,602

*Porcentagem de sólidos de SP/massa de material

1.13 Compacidade experimental dos agregados

Para a realização do ensaio de compacidade experimental (Figura 3.36), protocolo K=9 (compressão com vibração), é necessário separar amostras de material em diferentes classes granulométricas. Para o agregado miúdo foram necessários 3kg de material e para o agregado graúdo 7,5kg. O ensaio foi proposto por DE LARRARD (1999) e implementado no LABEST-COPPE/UFRJ e adaptado do estudo de dosagens realizado por SILVA (2004). O ensaio utiliza uma mesa vibratória com velocidade de vibração e 3.900 a 4.800 vibrações/min, um catetômetro, com luneta de precisão de 0,1 mm, cilindro metálico de 160 mm de diâmetro e altura de 320 mm e um pistão maciço com peso de 200 N. O material é adicionado no interior do cilindro metálico, (Figuras 3.38(a)), sobre o material coloca-se o pistão maciço, (Figuras 3.36(b)), logo após, aplica-se uma pressão constante de 10 kPA e vibração por um tempo de três minutos(Figuras 3.36(c)). Logo após mede-se a altura final da camada de material compactado utilizado o catetômetro (Figuras 3.36(d)).

A Equação 3.7 permite calcular o valor da compacidade dos materiais granulares.

$$C = \frac{4m_s}{A_c \cdot h_c \cdot \gamma} \quad \text{Equação (3.7)}$$

onde:

m_s – massa do material seco;

A_c – área da seção transversal do cilindro;

h_c – altura do cilindro.

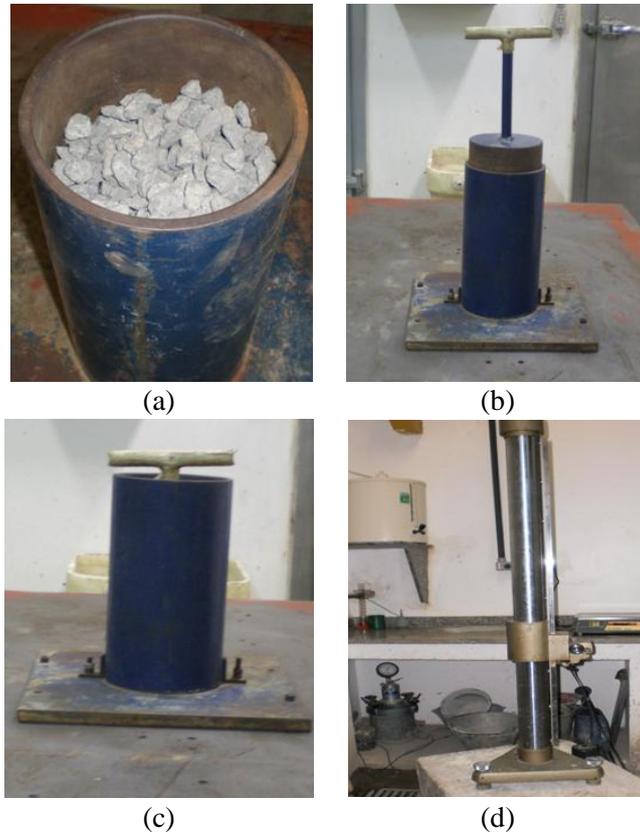


Figura 3.36 – Ensaio de compactação e vibração (a) cilindro com o material (b) cilindro o material e pistão fixados sobre a mesa vibratória; (c) cilindro com o material após compactação e vibração e (d) catetômetro para as leituras das posições inicial e final do pistão.

A Tabela 3.18 apresenta os valores de compactação experimental obtidos para os agregados.

A variação da compactação aumenta entre as classes de um mesmo tamanho: $G_1-G_2 = 0,7 \%$, $G_2-G_3 = 1,2\%$ e $G_3-G_4 = 2,7\%$. Estes valores estão de acordo com a variação máxima proposta para a areia por SILVA (2004) que é de 5%. Entre as classes de G_1-G_4 , maior e menor de mesmo tamanho, a variação maior foi de 3,8%, ainda assim, dentro da variação máxima. A partir da classe G_2 a compactação diminuiu, indicando

melhor compactidade e conseqüentemente menor teor de vazios entre os grãos para a classe G₄.

Tabela 0.18 – Compactidade experimental dos agregados

Agregado	Fração	Compactidade (C)
Areia	4,8 > A ₁ > 1,18	0,604
	1,18 > A ₂ > 0,600	0,608
	0,600 > A ₃ > 0,300	0,597
	0,300 > A ₄	0,581
Brita	13,2 > B ₁ > 9,5	0,552
	9,5 > B ₂ > 12,5	0,577
	6,3 > B ₃ > 9,5	0,587
	6,3 > B ₄ > 4,8	0,591
Seixo - SP	13,2 > SP ₁ > 9,5	0,659
	9,5 > SP ₂ > 12,5	0,668
	6,3 > SP ₃ > 9,5	0,657
	6,3 > SP ₄ > 4,8	0,666
Seixo - SJ	13,2 > SJ ₁ > 9,5	0,636
	9,5 > SJ ₂ > 12,5	0,651
	6,3 > SJ ₃ > 9,5	0,652
	6,3 > SJ ₄ > 4,8	0,680

A variação dos valores entre classes para a brita foi: B₁-B₂ = 4,3%; B₂-B₃ = 0,6% e B₃-B₄ = 2,7%. Para os valores do agregado de seixo do rio Paraná (SP₁-SP₂ = 1,3%; SP₂-SP₃ = 1,6% e SP₃-SP₄ = 1,6%), praticamente não houve variação entre as classes.

Para o agregado seixo (SM) os valores foram: SJ₁-SJ₂ = 2,3%; SJ₂-SJ₃ = 0,2% e SJ₃-SJ₄ = 4,1%, com variação maior entre as classes SJ₃-SJ₄. O valor de B₁-B₂ = 4,3% e SJ₃-SJ₄ = 4,1%, demonstra que nessas classes, a variação dos diâmetros das partículas é menor. Os dois seixos apresentaram melhores compactidades que a brita.

1.14 Compatibilidade e dosagem de saturação do superplastificante com os materiais cimentícios

Utilizou-se nessa pesquisa o superplastificante Glênium 51 (Figura 3.37), fabricado pela Basf. A atuação desse dispersante resulta de efeitos combinados de repulsão

eletrostática e repulsão estérica. Esse tipo de produto, por apresentar moléculas de cadeias longas, faz com que a camada adsorvida às superfícies das partículas de cimento forme uma barreira estérica, impedindo sua aproximação. De acordo com recomendações do fabricante, o superplastificante deve ser adicionado logo após a homogeneização da mistura dos sólidos com água. A Tabela 3.19 apresenta as principais características desse superplastificante.



Figura 3.37 – Glenium 51

Tabela 3.19 – Aditivo super plastificante

Característica	Glenium 51	Limites*
Função	Aditivo superplastificante de terceira geração para concreto.	-
Base química	Éter policarboxílico.	-
Aparência	Líquido Branco turvo	-
pH	6,7	5 - 7
Densidade	1,09 g/cm ³	1,067 - 1,107
Sólidos	de 30,99%	28,5 - 31,5
Viscosidade	-	< 150cps

*Fonte: www.basf.com.br

A dosagem ou teor de superplastificante designa a relação entre a porcentagem de sólidos do superplastificante e a massa de cimento (Aïtcin, 2000). O método visa determinar a compatibilidade e o ponto de saturação do superplastificante com os materiais cimentícios. O ensaio consiste em medir o intervalo de tempo necessário para que 1 litro de pasta escoe através de um funil padronizado com diâmetro de 5mm, em intervalos de tempos pré-determinados de 10, 30 e 60 minutos. As curvas são obtidas variando-se a dosagem do superplastificante com o tempo medido. Considera-se “ponto de saturação” o ponto a partir do qual o superplastificante não produz mais efeitos na

pasta analisada; assim que as curvas converjam para esse ponto é determinada a dosagem de saturação. Acima dessa dosagem o superplastificante não afeta positivamente a reologia da pasta. Inicia-se o ensaio com um fator água/cimento de 0,35 e teor de superplastificante de 2%, para a determinação da primeira curva (10 minutos). Se após o escoamento o tempo estiver entre 60 e 90 segundos, a relação água/cimento é adotada e prossegue-se o ensaio para a determinação dos outros tempos pré-estabelecidos. Os equipamentos necessários para o ensaio foram: balança de precisão de (0,1 g), misturador industrial com capacidade de 2 litros, funil de Marsh com diâmetro de 5 mm, proveta graduada com capacidade de 1 litro, béquer com capacidade de 2 litros, cronômetro. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cimentação do LABEST/COPPE/UFRJ, em ambiente com temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$. Foram produzidas pastas de cimento e cinza volante com relação água/aglomerante de 0,35 e para a sílica usou-se uma relação água/sílica de 1,10.



Figura 3.38 – Equipamentos para a determinação da compatibilidade entre do cimento e superplastificante e do ponto de saturação:(a) misturador, (b) funil de Marsh e proveta graduada e cronometro.

O cimento, a água e o superplastificante foram pesados; utilizou-se 1,8 kg de cimento para produzir um litro de pasta. No copo do misturador foram adicionados a água e o superplastificante; o misturador foi ligado e o cronômetro foi acionado. Em seguida o cimento foi introduzido no copo do misturador por um período não superior a 1 minuto e trinta segundos e a mistura da pasta prosseguiu por um período de tempo de 7 minutos. Logo após o término da mistura, a pasta foi vertida no funil de Marsh e os tempos (10,30,60 minutos) foram medidos (Figuras 3.38 (a) e (b)). Entre os intervalos de

tempo, a pasta permaneceu dentro de um béquer coberta por um pano umedecido e antes das medições a pasta foi agitada durante 30 segundos no misturador (Figura 3.38 (a)).

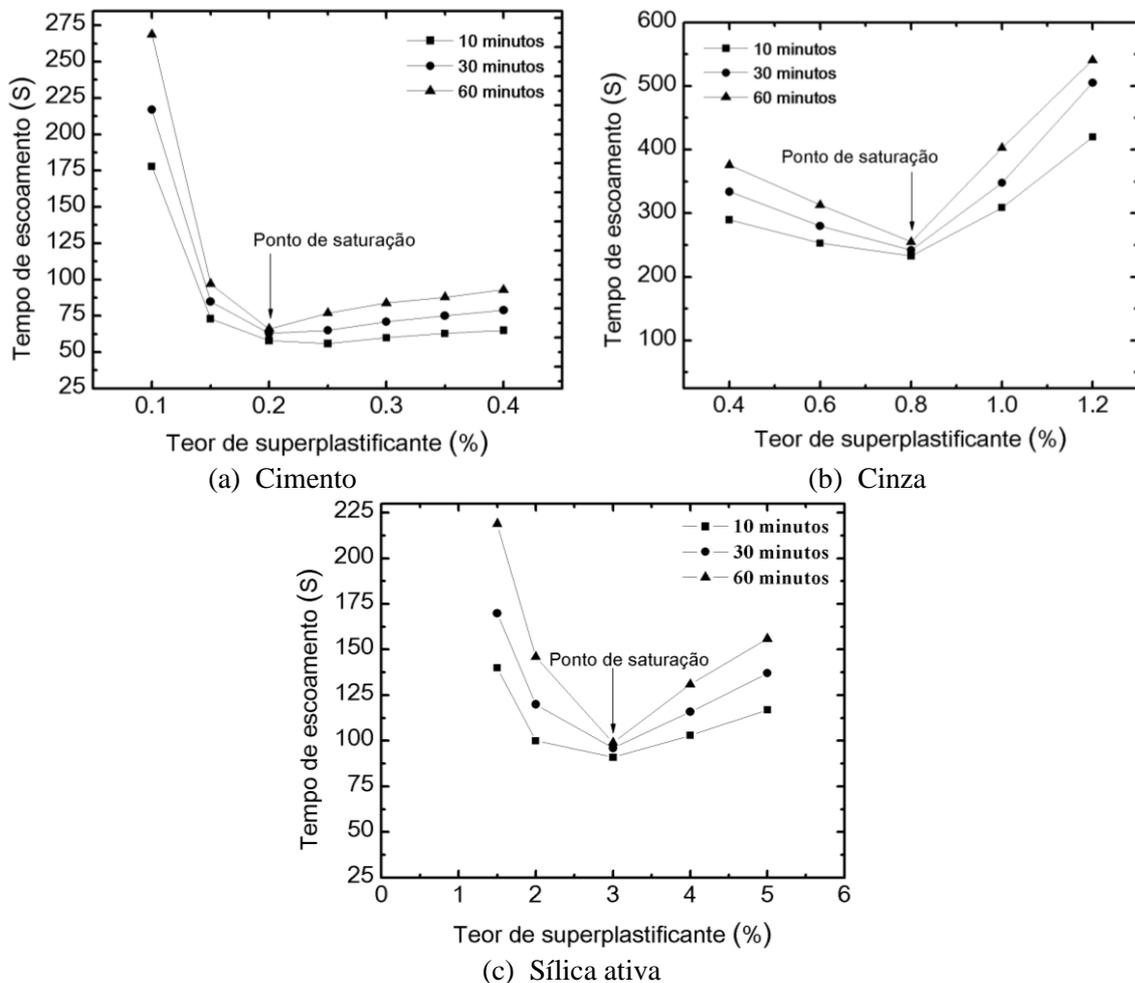


Figura 3.39 – Ponto de saturação das pastas

Foram confeccionadas pastas para cada material, cada uma com seu correspondente fator água/material. Para a cinza volante e sílica ativa, o fator água/ material teve de ser ajustado para 0,42 e 1,19 respectivamente. Isso se deve ao fato de que com fator água/material menores, o tempo de escoamento na primeira leitura de 10 minutos, foi superior a 90 segundos. A Figura 3.39 apresenta os gráficos de compatibilidade e ponto de saturação com o superplastificante Glênium 51. No escoamento das pastas observa-se que a compatibilidade e o ponto de saturação foram atendidos.

Observa-se que o cimento apresentou ponto de saturação de 0,2% ; este valor é inferior aos resultados obtidos por Velasco (2008) e Marangon (2011) de 0,3%. Já a cinza volante apresentou convergência do ponto de saturação em 0,8%, consistente com valor obtido por Silva (2012) de 0,8%. Os resultados obtidos para a pasta de sílica ativa, mostra compatibilidade do superplastificante e ponto de saturação em 3%. Esse valor é inferior ao resultado obtido por Velasco (2008) e Marangon (2011) com ponto de saturação de 4%. Este aumento no valor para a sílica ativa é atribuído à sua elevada área superficial o que torna necessário aumentar quantidade de superplastificante para a convergência do ponto de saturação. A Tabela 3.20 mostra o resumo dos resultados obtidos nos ensaios das pastas.

Tabela 3.20 – Materiais, fator água/material e ponto de saturação

Materiais	Fator água/material	Ponto de saturação
Cimento V - ARI - RS	0,35	0,2
Cinza volante	0,42	0,8
Sílica ativa	1,10	3,0

1.15 Agente modificador de viscosidade

O modificador de viscosidade utilizado foi o Rheomac UW 410 (Figura 3.40), produto em pó, baseado em polímeros de celulose de alto peso molecular, que foi adicionado à mistura úmida durante a produção dos concretos auto-adensáveis. O produto foi utilizado para evitar a exsudação, segregação e manter a coesividade dos concretos. A Tabela 3.21 mostra o resumo das especificações segundo o fabricante.

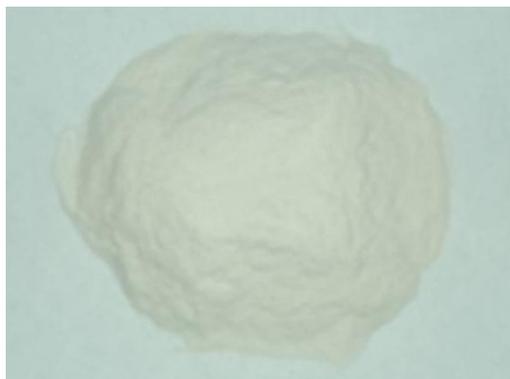


Figura 3.40 – Modificador de viscosidade Rheomac UW 410.

Tabela 3.21 – Aditivo modificador de viscosidade

Característica	Rheomac UW 410	Limites*
Função	Aditivo anti-segragante para concreto (anti-wash out)	-
Base química	Polímeros de alto peso molecular	-
Aparência	Pó branco	-
Retenção de Finos	Sem material retido	-
Massa Específica Real	g/cm ³	0,678 - 0,718
Massa específica Aparente	g/cm ³	0,548 - 0,588

*Fonte: www.basf.com.br

1.16 Fibras de aço

A fibra (Figura 3.41) selecionada foi a RC 65/35 BN, com as seguintes características: resistência a tração mínima de 1.150 N/mm², 14.500 fibras/kg, fator de forma 64, comprimento 35 mm e diâmetro de 0,55 mm. A letra R indica dupla ancoragem nas extremidades. A letra C se refere à colagem das fibras que comercializadas na forma de pentes. O primeiro número indica a classe e o segundo o comprimento da fibra. A letra B indica aço claro, sem revestimento, enquanto a letra N significa que o aço tem baixo teor de carbono. A fibra de aço foi escolhida levando-se em consideração os seguintes fatores: comprimento, fator de forma (l/d), teor de fibras incorporado no compósito e diâmetro máximo do agregado constituinte na matriz no concreto. Estes são fatores que mais influenciam na determinação do incremento de desempenho dos concretos produzidos. As fibras de aço Dramix, fabricadas pela Belgo Bekaert Arames e disponíveis no mercado brasileiro, foram utilizadas nesta pesquisa. A Tabela 3.22 apresenta as propriedades da fibra de aço utilizada.



Figura 3.41 – Fibras de aço Dramix RC 65/35 BN

Tabela 3.22 – Fibras de aço

Propriedades	Valores - Dramix RC 65/35		
	Dramix	Velasco (2008)	Marangon (2011)
Comprimento (mm)*	35	35	35
Diâmetro (mm)*	0,55	0,54	0,54
Relação de aspecto*	64	65	65
Resistência à tração (Mpa)	1150	1150	1342
Módulo de elasticidade (Gpa)	200	200	202

*Fonte: <http://www.arcelor.com/br/belgo/>

1.17 Barras de aço

As barras de aço utilizadas foram do tipo CA-50, com diâmetro de 12,5mm e 20 mm com três amostras para diâmetro. As μ CT's-3D (Figura 3.42) foram feitas em um sistema de microtomografia de alta energia (Skyscan/Bruker, model 1173). O sistema foi calibrado para operar com 80 kV de energia e corrente de 100 μ A. O scanner foi feito com a amostra rotacionada de 360° ao longo do seu eixo z, a cada passo de 0.30°. Após o processo de aquisição, as projeções foram reconstruídas utilizando o programa Nrecon[®] SkyScan - versão 1.6.4.1 (2011) e InstaRecon - versão 1.3.5.0 (2011) cujo algoritmo esta baseado nos trabalhos de FELDKAMP (1984).

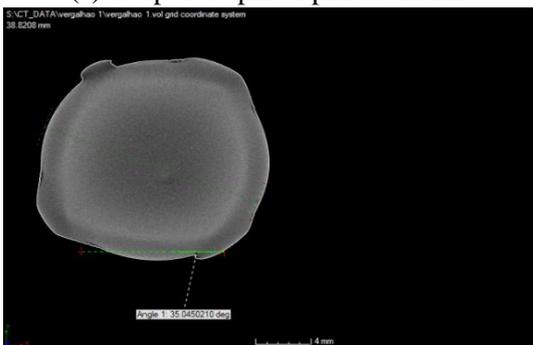
O software de reconstrução utilizado permite a escolha de vários parâmetros de modo a criar uma imagem de melhor qualidade. O resultado obtido são slices reconstruídos. Estes slices fornecem a visualização da amostra tanto em 2D, quanto em 3D e podem ser processados digitalmente.



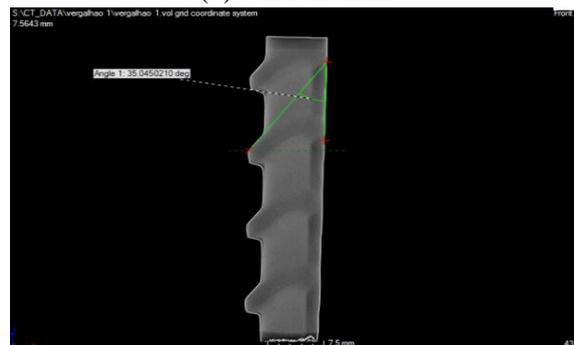
(a) Corpos de prova para o ensaio



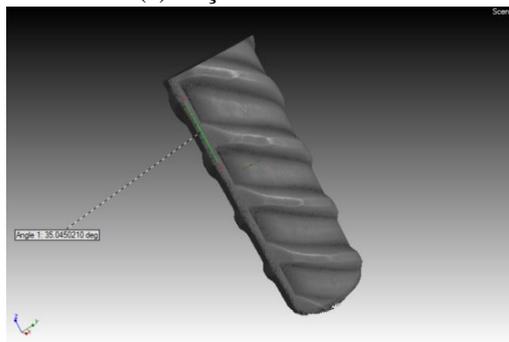
(b) Vista frontal



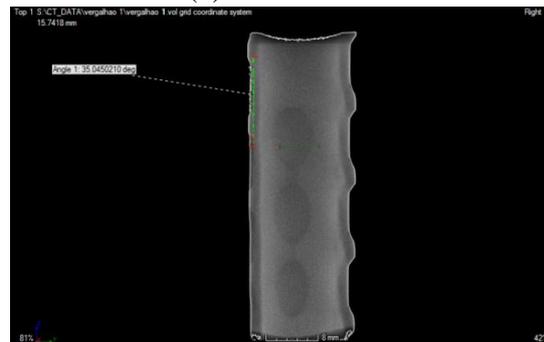
(c) Seção transversal



(d) Vista lateral



(e) Vista lateral



(f) Seção longitudinal

Figura 3.42 – μ CT's-3D.

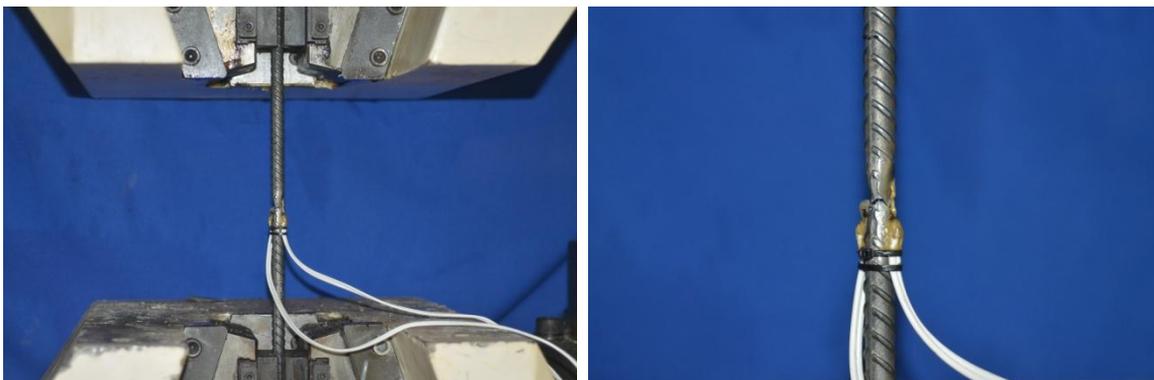
Os valores apresentados na Tabela 3.23 representa a média das características geométricas das barras de aço de 12,5mm e 20mm, onde e_t é o espaçamento entre as nervuras transversais, b_t a largura das nervuras transversais, a_t a largura das nervuras transversais, β o ângulo de inclinação do eixo da nervura transversal em relação ao eixo da barra.

Tabela 3.23 – Características geométricas das barras de aço de 12,5mm e 20mm

Diâmetro (mm)		Massa (g)	Comprimento (mm)	Massa linear (kg/m)	Massa linear				Seção (mm ²)
Nominal	Medido				e_t (mm)	b_t (mm)	a_t (mm)	β	
12,5	12,63	579,00	611,21	0,965	8,59	2,44	0,77	56,40	125,28
20,0	20,20	1506,79	611,21	2465,30	12,7	3,22	1,71	57,91	320,47

Os ensaios das barras de aço foram realizados em uma máquina Shimadzu (Figura 3.43 (a) e (b)) e (Figura 3.45 (a) e (b)) com capacidade de carga de 1000 kN, servo-controlada, controle de deformação axial com velocidade prescrita pela norma seguindo a NBR ISO 6892 (2002).

A medida da deformação dos corpos-de-prova foi obtida tomando-se o valor médio fornecido por dois strain-gages colados sobre as barras. Foi utilizado o sistema de aquisição de dados “ADS 2000”, de 16 bits, da marca Lynx para a aquisição das deformações e carregamentos aplicados nas barras.



(a) Posicionamento da barra na máquina

(b) Barra rompida

Figura 3.43 – Ensaio da barra de aço CA 50 de 12,5mm

O ensaio de tração das barra de aço de 12,5mm foi executado tomando-se três amostras barras de aço para a determinação das características mecânicas. A tensão média para o início de escoamento foi de 535,22MPa e para a ruptura 631,25MPa, o módulo de elasticidade foi de 209,67 GPa. As demais características mecânicas estão descritas na Tabela 3.24.

Tabela 3.24 – Propriedades mecânicas do aço 12,5mm

Diâmetro (mm)	Escoamento f_y	Ruptura f_{st}	Módulo de elasticidade GPa	f_{st} / f_y	Alongamento pós-ruptura (mm)		
	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)			Inicial	Final	%
12,5mm	535,22	631,25	209,67	1,18	300	324,32	8,11

A figura 3.44 mostra a curva tenso *versus* deformação do aço de 12,5mm.

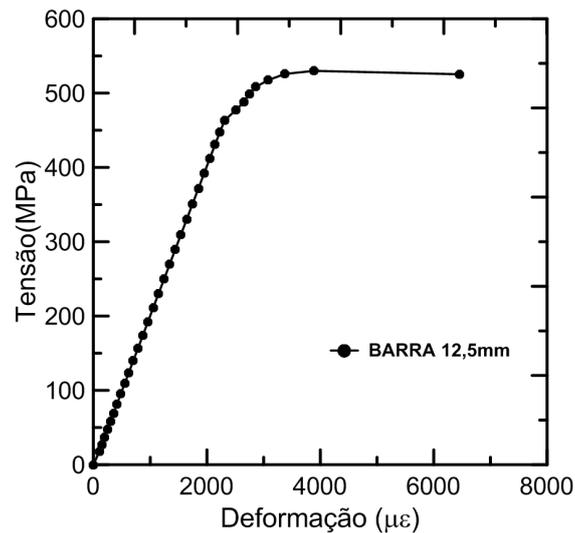
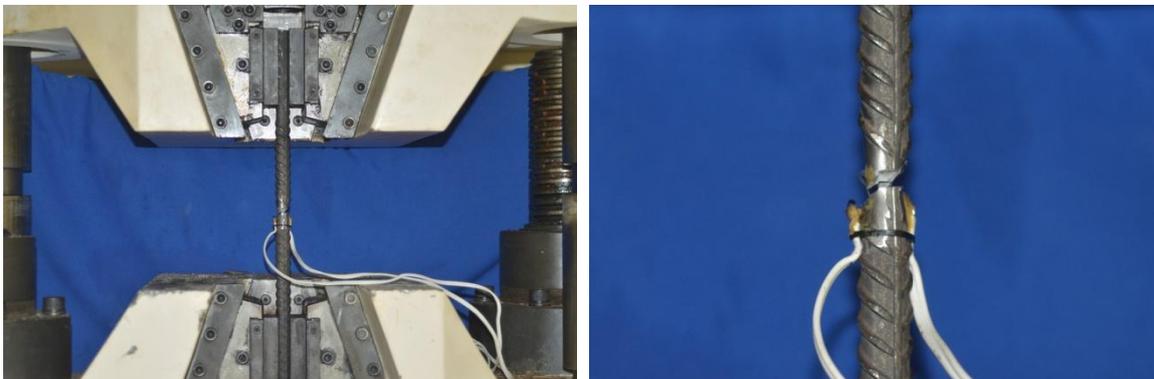


Figura 3.44 – Curva típica tensão x deformação do aço de 12,5mm

Da mesma forma que o ensaio de tração do aço de 12,5mm, o ensaio de tração do aço de 20mm foi executado tomando-se três amostras barras de aço CA-50 com diâmetro nominal de 20 mm para a determinação das características mecânicas.



(a) Posicionamento da barra na máquina

(b) Barra rompida

Figura 3.45 – Ensaio da barra de aço CA 50 de 20mm

A tensão média para o início de escoamento foi de 554,64MPa e para a ruptura 662,34MPa, o módulo de elasticidade foi de 210,38 GPa. As demais características mecânicas estão descritas na Tabela 3.25. A Figura 3.46 mostra o comportamento do aço no ensaio de resistência à tração.

Tabela 3.25 – Propriedades mecânicas do aço 20mm

Diâmetro (mm)	Escoamento f_y	Ruptura f_{st}	Módulo de elasticidade GPa	f_{st}/f_y	Alongamento pós-ruptura (mm)		
	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)			Inicial	Final	%
12,5mm	535,22	631,25	209,67	1,18	300	324,32	8,13
20,0mm	554,64	662,34	210,38	1,20	300	325,24	8,42

A figura 3.46 mostra a curva tenso *versus* deformação do aço de 12,5mm.

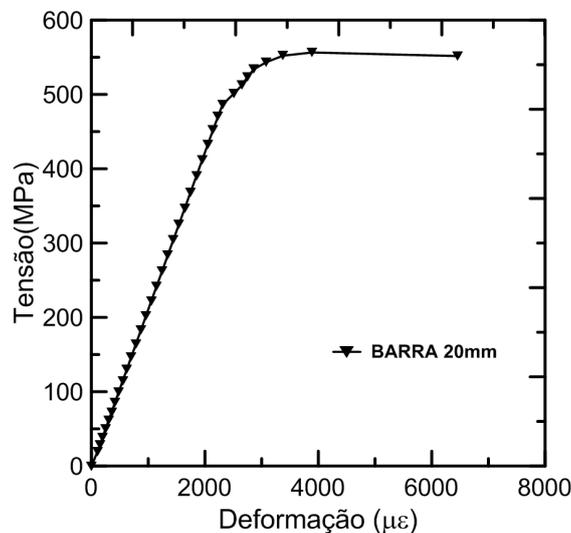


Figura 3.46 – Curva típica tensão x deformação do aço de 20 mm

1.18 Água

A água de amassamento para concretos deve ser isenta de substâncias danosas em teores acima dos estabelecidos por norma, para não influenciarem nas propriedades do concreto. A queda de resistência, a alteração do tempo de pega, a ocorrência da eflorescência, o aparecimento de manchas e a corrosão da armadura são os efeitos adversos citados como os mais significativos. A água utilizada nas misturas no programa experimental foi água potável da concessionária local.

PRODUÇÃO DE MATRIZES E MÉTODOS DE ENSAIO

1.19 Programa Experimental

Como já mencionado anteriormente, o programa experimental deste trabalho foi idealizado com vistas à obtenção de concretos reforçados com fibras de aço a partir de três matrizes de concreto autoadensável: uma utilizando-se como agregado graúdo brita granítica e outras duas utilizando-se seixos de rio.

O desenvolvimento de uma matriz autoadensável é complexo e envolve muitas variáveis agindo no compósito. As propriedades reológicas do concreto no estado fresco são importantes principalmente para caracterizar a etapa de lançamento do material.

Segundo Okamura e Ouchi (2003), para se ter um concreto autoadensável é necessário alcançar alta deformabilidade da pasta ou da argamassa, e resistência à segregação entre o agregado graúdo e a argamassa quando o concreto flui através da abertura da malha de uma armadura. A adição de superplastificante tem efeitos positivos (redução do fator água/cimento e aumento da trabalhabilidade) e negativos (retardar o tempo de pega do cimento) nas propriedades da mistura. A adição de finos melhora a trabalhabilidade e o empacotamento das partículas facilitando a rolagem entre as mesmas. No entanto a adição de finos eleva a superfície específica, acarretando aumento do fator água/cimento, para uma determinada consistência (Mehta e Monteiro, 2008).

Por se tratar de um conjunto de variáveis complexas é necessária a utilização de métodos científicos para o desenvolvimento dessas matrizes de modo a alcançar propriedades reológicas, mecânicas e estruturais, compatíveis com a aplicação pretendida. Nessa pesquisa, utilizou-se um método de dosagem baseado no “Modelo de Empacotamento Compressível (MEC)”, desenvolvido por De Larrard (1999) e Sedran (1999) no Laboratório Central de Pontes e Rodovias (LCPC) – França.

A Fig. 4.1 resume os ensaios realizados para avaliação experimental dos concretos. A avaliação do comportamento reológico foi realizada por meio dos ensaios do espalhamento do tronco de cone, anel J, caixa L, Funil V e reômetro BTRHEOM.

O comportamento mecânico foi avaliado em termos de compressão axial e tração em três condições: em flexão, tração direta e em compressão diametral. Do ensaio de flexão obteve-se a avaliação de tenacidade dos concretos.

As variações dimensionais relacionadas a retração por secagem e fluência na compressão foram também estimadas. Para finalizar a caracterização dos concretos tem-se alguns ensaios para determinação de propriedades físicas relacionadas à durabilidade dos concretos. Em termos de comportamento visando a aplicação a estruturas de concreto armado ou protendido foram realizados ensaio de tração para determinação da rigidez de tirante armado (*tension stiffening*).

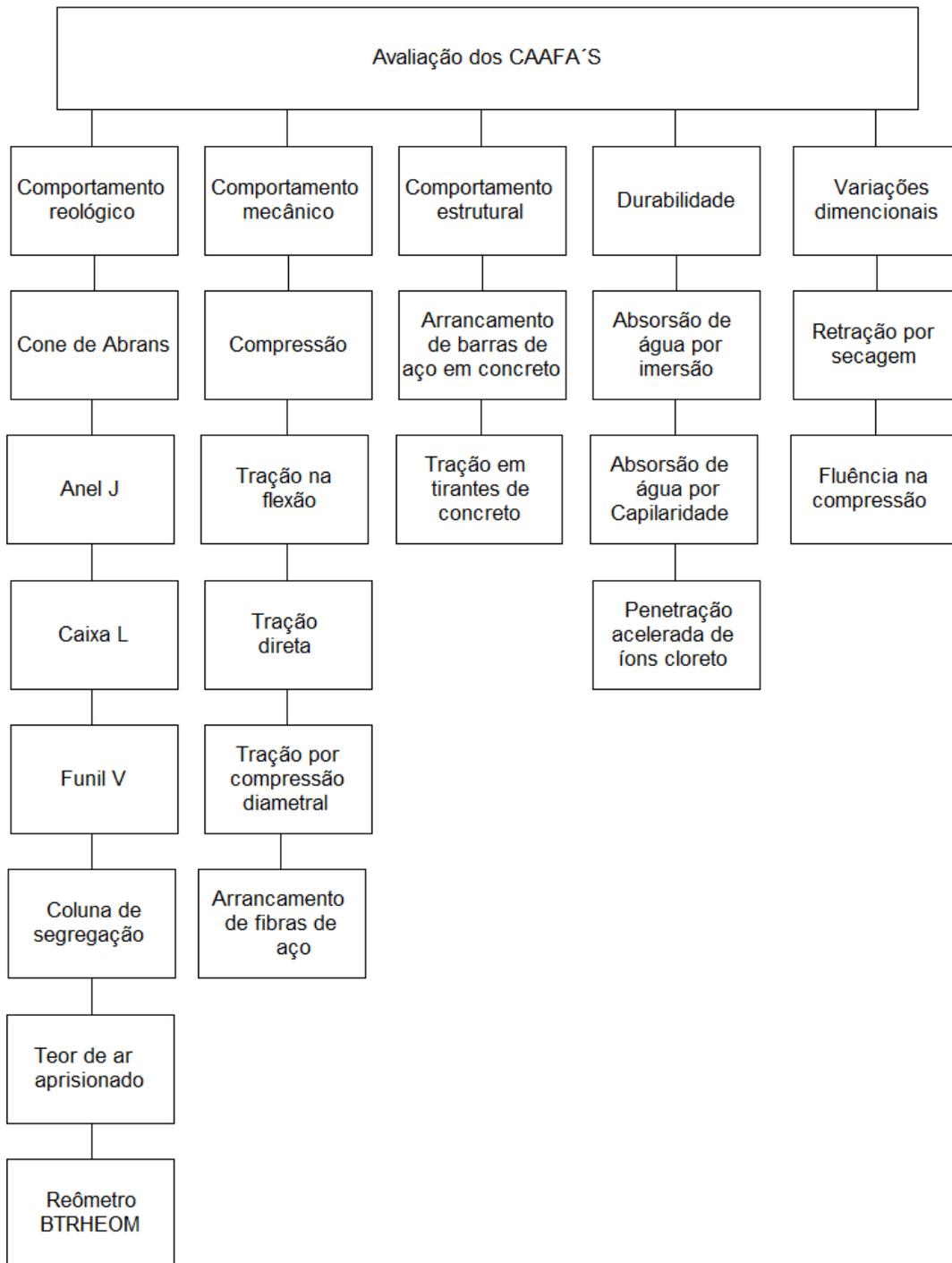


Figura 4.1 – Ensaio realizados para avaliação dos concretos autoadensáveis com fibras de aço (CAAFA'S).

1.20 Desenvolvimento das Matrizes Autoadensáveis com Brita Granítica e Seixo de Rio

1.20.1 Modelo de Empacotamento Compressível (MEC)

A eficiência do MEC já foi testada em diversos tipos de concretos: com resistência normal; de alto desempenho; com pós reativos e autoadensável. O método, tem como base o modelo de empacotamento de partículas utilizado na otimização de misturas granulares. O método tem como objetivos a obtenção da máxima compactidade entre os constituintes da mistura e mínima porosidade com redução da quantidade de pasta e ligante.

A dosagem é realizada a partir da otimização das frações volumétricas dos constituintes. A COPPE através do laboratório de estruturas LABEST foi pioneira no estudo de dosagens de concretos através do MEC, (Velasco, (2002), Silva, (2004), Formagini (2005), Marangon, (2006), Velasco, (2008), Silvoso, (2008), Marangon (2011). A implementação do MEC é realizada através do programa computacional BétonlabPro 2 e mais recentemente BétonlabPro 3. Uma descrição mais detalhada do MEC pode ser obtida nos trabalhos de De Larrard (1999), Sedran (1999), Silva (2004) e Formagini (2005).

1.20.2 Procedimentos de dosagem utilizando o BétonlabPro 3

O processo de otimização de matrizes pelo BétonlabPro 3 segue três etapas. Na primeira etapa, elabora-se um banco de dados com as propriedades dos materiais. A segunda etapa consiste na otimização do esqueleto granular dos agregados. Na terceira etapa é realizada a otimização da pasta da mistura com base nas propriedades desejadas para o concreto. Após a caracterização dos materiais constituintes, cria-se um banco de dados com as propriedades indicadas na Tabela 4.1. A inserção dos dados no programa é feita a partir das janelas ilustradas na Fig. 4.2.

Tabela 4.1 – Propriedades utilizadas no programa BétonlabPro 3®

Propriedades	Agregados	Cimento Portland	Sílica ativa	Cinza volante	Superplastificante
Massa específica	•	•	•	•	•
Granulometria	•	•	•	•	–
Compacidade	•	•	•	•	–
Módulo de elasticidade	•	–	–	–	–
Porosidade e Absorção d'água	•	–	–	–	–
Composição de Bogue	–	•	–	–	–
Resistência á compressão	•	•	–	–	–
Dosagem de saturação	–	•	•	•	–
Parâmetros p e q	•	–	–	–	–
Coefficientes pozolanicos	–	•	•	•	–
Teor de sólidos	–	–	–	–	•

Quando os dados referentes à granulometria são inseridos no programa, gera-se uma curva granulométrica; o programa faz a interpolação internamente quando não se tem uma peneira equivalente à do BétonlabPro 3. Ao inserir os dados no programa indica-se, para cada constituinte, o número de classes e diâmetros dos materiais, com exceção do superplastificante. O programa limita em quatro o número de classes para os materiais. Segundo De Larrard (1999), o parâmetro p estima a influência da aderência dos grãos à pasta de cimento e o parâmetro q é a resistência intrínseca do agregado. Os parâmetros p e q são constantes obtidas de acordo com o tipo do agregado graúdo, as e obtidos através das equações:

$$p = \frac{1}{f_{cm} \left(\frac{1}{f_c} - \frac{1}{2,14 f_{c_g}} \right)} \quad \text{Equação (4.1)}$$

O parâmetro q é a resistência intrínseca do agregado (Equação 4.2).

$$q = \frac{p}{2,14 f_{c_g}} \quad \text{Equação (4.2)}$$

Os parâmetros p e q são constantes obtidas de acordo com o tipo do agregado graúdo, as e obtidos através das equações:

Sendo:

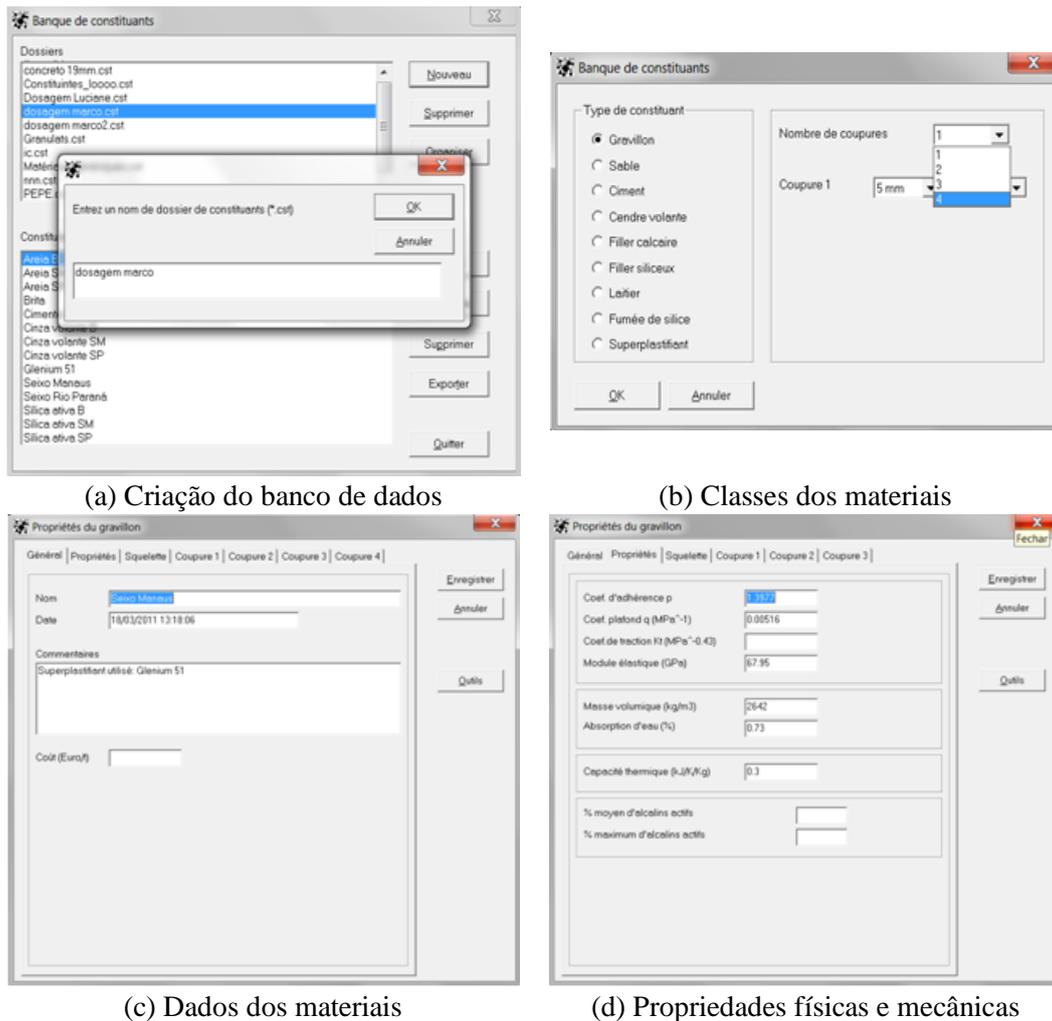
f_{cg} = resistência à compressão do agregado;

f_c = resistência à compressão do concreto ;

f_{cm} = resistência média à compressão do concreto.

A calibração dos parâmetros p e q e dos coeficientes pozolânicos é realizados internamente pelo programa. Para isto é necessário caracterizar as propriedades mecânicas através do ensaio de resistência à compressão de dois tipos de concretos produzidos com os materiais que serão usados na dosagem: um com baixa resistência e outro com alta resistência, sendo suas respectivas composições e resistências à compressão aos 7 e 28 dias informadas ao programa BétonlabPro 3 (Fig. 4.3)

Ao iniciar a simulação da dosagem, é necessário selecionar os materiais que serão utilizados, os quais encontram-se em um arquivo no banco de constituintes. A Figura 4.4 apresenta a sequência de seleção dos materiais e a dosagem do concreto. Na aba superior do programa encontram-se os ícones para cada parâmetro da simulação. A palheta *seleção* abrirá a janela onde os arquivos cadastrados estão disponíveis para serem acessados com os dados dos materiais já inseridos (Figura 4.4(a)). Na palheta *cálculo*, abre-se uma janela com opções para a dosagem, onde estão os parâmetros que deverão ser encontrados no arquivo de saída (Figura 4.4(b)).



(a) Criação do banco de dados

(b) Classes dos materiais

(c) Dados dos materiais

(d) Propriedades físicas e mecânicas

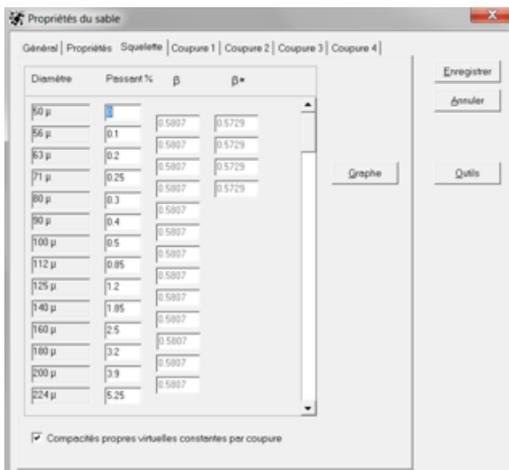
Figura 4.2 – Características dos materiais.

A primeira simulação de dosagem é realizada com os dados das dosagens realizadas para a calibração dos parâmetros p e q obtendo-se a primeira composição do concreto (Figura 4.4 (c)). Modificam-se ou mantem os parâmetros e 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; o objetivo é tentar obter o máximo de empacotamento possível dos grãos.

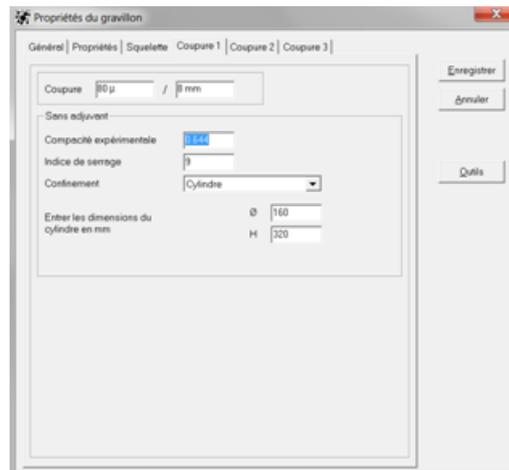
Uma vez definido o esqueleto granulométrico dos agregados, os parâmetros dos concretos tais como a resistência e as propriedades reológicas são obtidos otimizando ou fixando o teor de pasta e fixando os percentuais dos agregados (Figura 4.4 (d)). Na

pesquisa para a simulação das matrizes dos CAA's, objetivou-se atingir determinados parâmetros para garantir as propriedades reológicas típicas de um CAA:

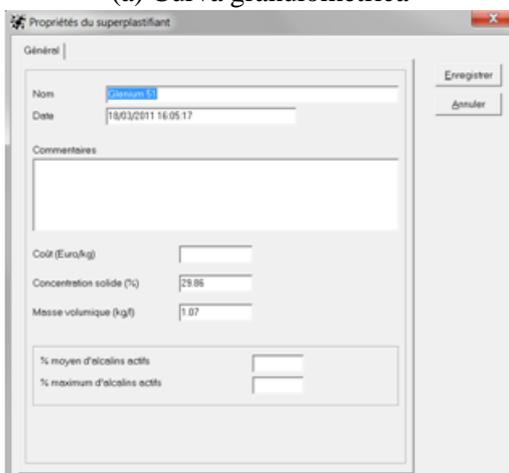
- Prevenção à segregação: $S < 0,8$,
- Tensão de Escoamento: $\tau_0 < 500$ Pa,
- Viscosidade Plástica: $200 < \mu < 300$ P.s,
- Índice de Compactação (K') (7).



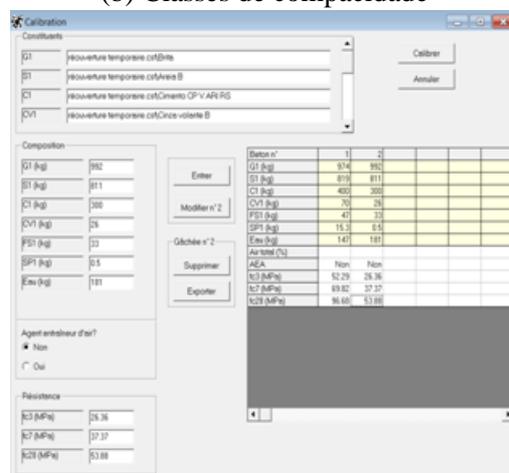
(a) Curva granulométrica



(b) Classes de compacité

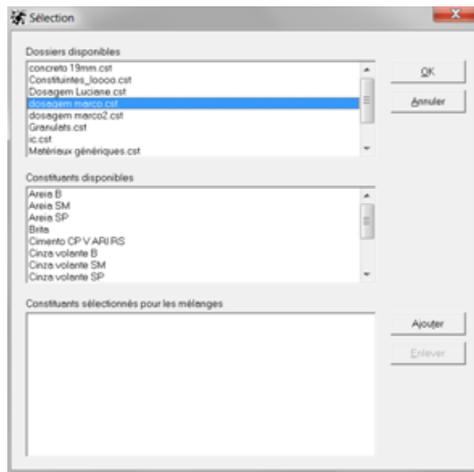


(c) Propriedades do dispersante



(d) Calibração dos parâmetros p e q e dos coeficientes pozolônicos.

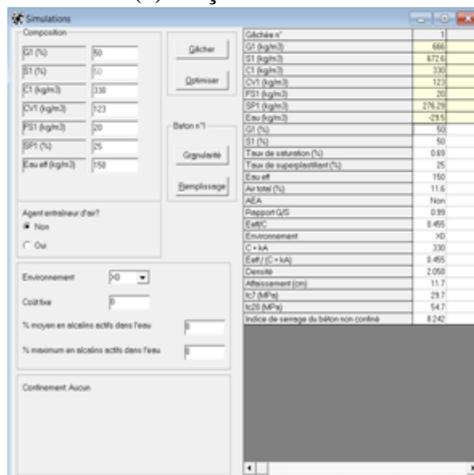
Figura 4.3 – Criação do banco de constituintes e calibração dos parâmetros.



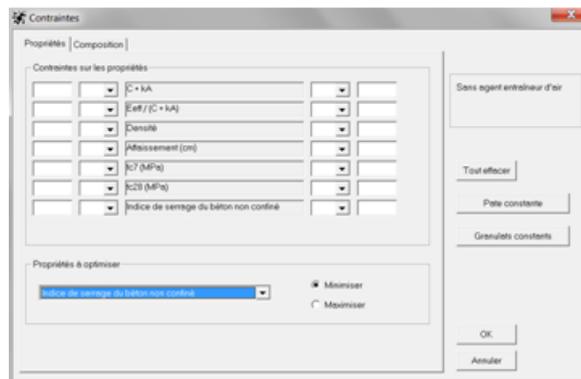
(a) eleição dos constituintes



(b) Seleção dos dados de saída



(c) Primeira composição da mistura



(d) Especificação dos parâmetros

Figura 4.4 – Etapas realizadas para a obtenção da dosagem do concreto

1.20.3 Definição das matrizes desenvolvidas

O estudo experimental foi proposto com a finalidade de produzir inicialmente, matrizes de concretos autoadensáveis contendo seixo de rio como agregado graúdo. A partir da matriz de referência, foram incorporadas baixas frações volumétricas de fibras de aço de comprimento e relação de aspectos pré-definidos. Foi avaliado o efeito do tipo de agregado e das frações volumétricas das fibras nas propriedades reológicas e mecânicas dos concretos. Portanto, foram produzidas doze matrizes com os três tipos de agregados graúdos, sendo três matrizes de referência, variando apenas o tipo de agregado graúdo, e nove matrizes, variando o agregado e as frações volumétricas de 0,5%, 0,50, 0,75%, 1% fibras de aço. Todos os três tipos de agregado graúdo utilizados nas matrizes

tiveram seu diâmetro máximo fixados em 13,2 mm. Foi utilizado apenas um tipo de reforço fibroso com 35mm de comprimento e relação de aspecto igual a 65 Assim, as matrizes foram classificadas da seguinte forma:

- matrizes de referência, MBG, MSP, MSJ (ver a Fig. 4.5): respectivamente matrizes contendo brita de granito, seixo do rio Paraná (divisa com São Paulo e Mato Grosso do Sul) e seixo do rio Juruá (Amazonas).

Dessa forma, a classificação para as matrizes utilizadas neste trabalho, referente à inclusão de fibras de aço no concreto, em diferentes frações volumétricas (0,5%; 0,75% e 1,0%) segue a mesma denominação:

- MBG50; MBG75; MBG100 (matriz contendo brita com adição de 0,5%; 0,75% e 1,0% de fibras de aço);
- MSP50; MSP75; MSP100 (matriz contendo seixo do rio Paraná com adição de 0,5%; 0,75% e 1,0% de fibras de aço);
- MSJ50,MSJ75, MSJ100 (matriz contendo seixo do rio Japurá com adição de 0,5%; 0,75% e 1,0% de fibras de aço).

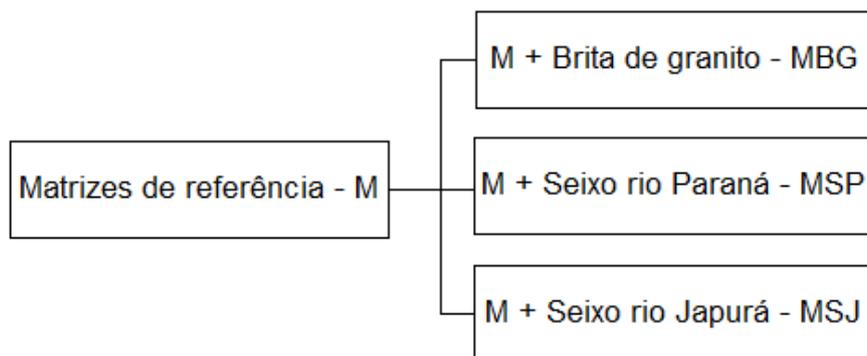


Figura 4.5 – Definição das matrizes

A relação água/cimento para todas as misturas foi mantida constante em 0,52 e o teor de superplastificante foi alterado conforme a reológica de cada matriz. A Tabela 4.2 apresenta as misturas produzidas no programa experimental.

Tabela 4.2 – Composição das matrizes estudadas

Composição	MGB	MGB 50	MGB 75	MGB 100	MSP	MSP 50	MSP 75	MSP 100	MSJ	MSJ 50	MSJ 75	MSJ 100
Agregado												
Graúdo (G1) (kg/m ³)	572,7	559,5	552,9	546,3	572,7	559,5	552,9	546,3	572,7	559,5	552,9	546,3
Agregado												
Miúdo (S1) (kg/m ³)	1011,3	1011,3	1011,3	1011,3	1011,3	1011,3	1011,3	1011,3	1011,3	1011,3	1011,3	1011,3
Cimento (kg/m ³)	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0
Cinza Volante (kg/m ³)	154,0	154,0	154,0	154,0	154,0	154,0	154,0	154,0	154,0	154,0	154,0	154,0
Sílica Ativa (kg/m ³)	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6
Superplastifi- cante (kg/m ³)	27,6	28,7	33,0	40,5	27,6	28,7	33,0	40,5	27,6	28,7	33,0	40,5
Modificador de												
Viscosidade (kg/m ³)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Água (kg/m ³)	154	152	149	145	154	152	149	145	154	152	149	145
Fibra de aço (kg/m ³)	0	39	58,5	78	0	39	58,5	78	0	39	58,5	78
Índice de Reforço	0	32,5	48,7	65	0	32,5	48,7	65	0	32,5	48,75	65
G1 (%)	35,6	35,8	35,6	35,3	35,6	35,8	35,7	35,3	35,6	35,8	35,6	35,3
S1 (%)	64,4	64,2	64,4	64,7	64,4	64,2	64,4	64,7	64,4	64,2	64,4	64,7
Teor de superplastifi- cante (%)	2,4	2,7	3,1	3,8	2,4	2,7	3,1	3,8	2,4	2,7	3,1	3,8
Relação G/S	0,570	0,553	0,547	0,540	0,570	0,553	0,547	0,540	0,570	0,553	0,547	0,540
Água/cimento	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52

1.20.4 Produção das matrizes, moldagem e cura dos corpos de prova

As matrizes foram produzidas no laboratório de concretagem do LABEST, sob as mesmas condições de temperatura e umidade, de forma a evitar a interferência destes fatores nos resultados dos concretos. As misturas dos concretos do experimento foram realizadas em misturador de eixo vertical planetário marca CIBI. A ordem de colocação dos materiais no misturador assim como o tempo de mistura foi constante para todas as misturas na sequência a seguir:

- umedecimento do misturador com água, retirando-se o excesso com um pano, para evitar que a água da mistura fosse absorvida pelas paredes internas, anteriormente secas (Figura 4.6(a)),
- lançamento dos agregados miúdos e agregados graúdos secos no misturador (Figura 4.6(b)),
- mistura dos agregados por 60 segundos para homogeneização, adição dos materiais cimentícios (Figura 4.6(c)),
- Mistura dos materiais cimentícios por mais 60 segundos, dição de 80 % da água de mistura, adição de todo o superplastificante (Figura 4.6(d)),
- adição do restante da água, homogeneização da mistura (Figura 4.7(a)),
- parada de 1minuto para procedimento de raspagem de fundo do misturador (Figura 4.7(b)).

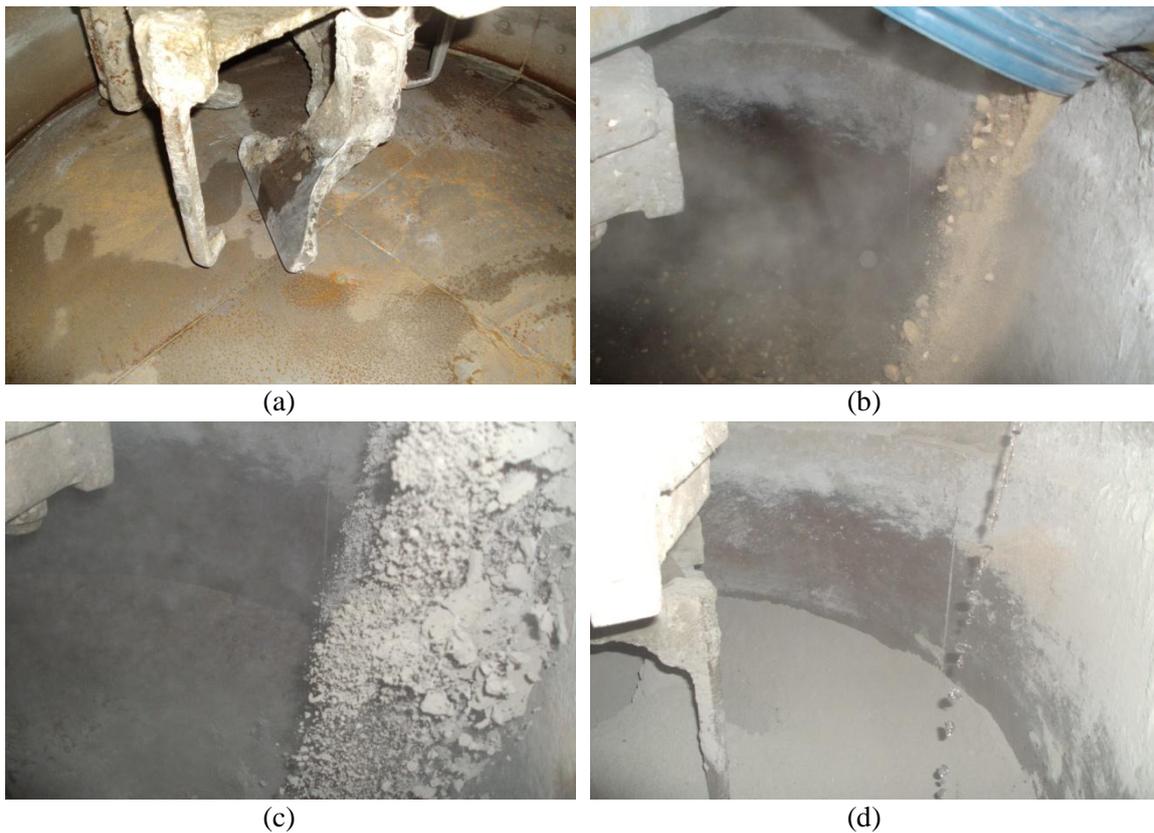


Figura 4.6 – Sequencia de mistura dos constituintes das matrizes autoadensáveis

Após a adição de todos os materiais secos e os líquidos (água e dispersante), o tempo de mistura foi de 8 minutos. Para garantir a total ação do superplastificante na mistura foi realizado o controle de temperatura de todas as misturas dosadas (Figura 4.7(c)). A Figura 4.7(d) mostra a matriz pronta para enchimento dos corpos de provas.

Para a produção dos CAAFA'S, as fibras foram adicionadas ao final dos 8 minutos e misturados por mais 4 minutos totalizando 12 minutos.

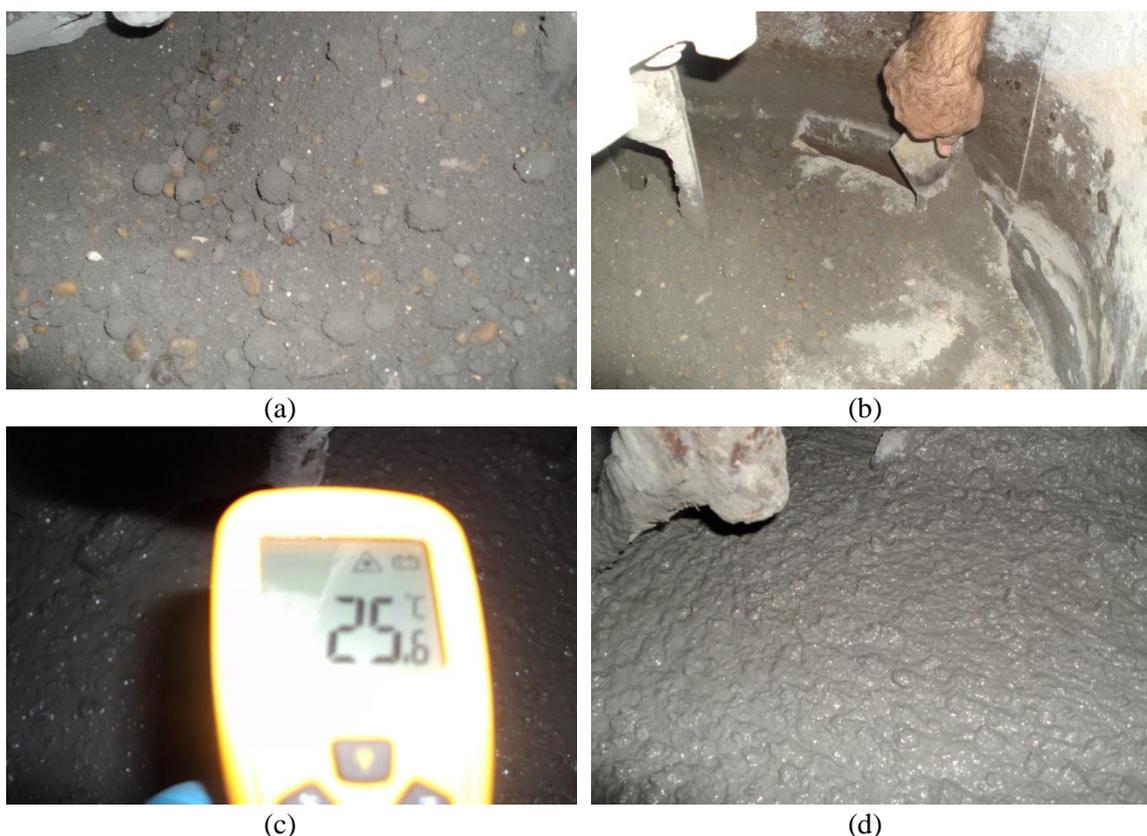


Figura 4.7 – Continuação da sequência de mistura das matrizes autoadensáveis

Encerrado o período de mistura foram realizados os ensaios reológicos. Foram confeccionados 32 litros de concreto para os ensaios reológico e 80 litros para os ensaios mecânicos para cada mistura. Foram moldados 20 corpos-de-prova de 100 mm x 200 mm para resistência à compressão (3, 7, 14 e 28 dias), 8 corpos-de-prova para resistência à tração por compressão diametral (3, 7, 14, e 28 dias), 4 vigas de 100 mm x 100 mm x 400 mm para os ensaios de tração na flexão, 3 vigas de 100 mm x 100 mm x 400 mm para os ensaios de tração direta. Após a moldagem, os mesmos foram cobertos, evitando assim a perda de água do concreto, e mantidos no ambiente de laboratório por aproximadamente 48 horas. Após as 48 horas, os corpos-de-prova foram retirados das fôrmas e colocados em câmara úmida com umidade relativa superior a 95% e temperatura de $(22 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ até a data de ruptura, sendo retirados apenas uma hora antes do ensaio. Os corpos-de-prova para o ensaio de compressão tiveram seus topos retificados com torno mecânico adaptado. Este procedimento foi adotado para evitar a

dispersão nos resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova capeados com enxofre, principalmente na idade de 28 dias.

1.20.5 Ensaios reológicos

A NBR15823-1 (2010) estabelece os requisitos para classificação, controle e aceitação do concreto autoadensável no estado fresco. Esta norma classifica o concreto autoadensável no estado fresco em função de sua autoadensibilidade e estabelece as diretrizes para a realização do controle por ensaios e para a aceitação do concreto autoadensável no estado fresco massa específica normal, compreendida no intervalo entre 2.000 kg/m^3 e 2.800 kg/m^3 dos grupos I e II de resistência, conforme classificação da NBR 8953.

1.20.5.1 Determinação do espalhamento e escoamento

O ensaio de espalhamento e do tempo de escoamento pelo método do cone de Abrams é prescrito pela NBR15823-2 (2010) e utilizado na rotina dos laboratórios de concreto devido à sua facilidade de execução. É uma ferramenta confiável no controle da qualidade do concreto, pois permite verificar variações na composição da mistura em estudo, através de análise visual a partir de uma dosagem pré-definida. Possibilita também uma avaliação visual da ocorrência de segregação.

Os equipamentos utilizados são: um tronco de cone metálico (Figura 4.8) aberto em ambas as extremidades de 300 mm de altura, 200 mm de diâmetro inferior e 100 mm de diâmetro superior, apoiado sobre uma placa metálica de 500 mm x 500 mm. O posicionamento do operador deve ser sobre os apoios laterais fixados ao molde metálico. Enche-se o cone sem compactação, levanta-se o cone e o concreto irá fluir livremente. Logo após, determina-se a média de dois diâmetros perpendiculares referente ao círculo formado. Já o espalhamento é medido pelo diâmetro máximo atingido pela circunferência formada pelo fluxo do concreto em duas direções. A média desses valores representa o espalhamento (em mm) da mistura. O tempo de escoamento (t_{500}) é o intervalo de tempo, em segundos, entre o início e o final do escoamento do

concreto, a partir do diâmetro do molde (200 mm) até a marca circular de 500 mm da placa de base. O concreto com maior viscosidade demandará maior tempo para atingir o mesmo espalhamento.

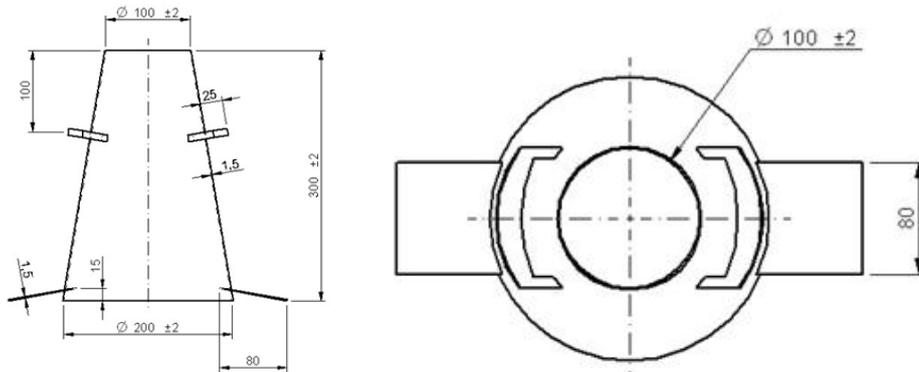


Figura 4.8 – Tronco de cone metálico utilizado no ensaio de espalhamento

A Tabela 4.3 apresenta as classes definidas em função da dimensão do espalhamento.

Tabela 4.3 – Classes de espalhamento

Classe	Espalhamento (mm)	Método de ensaio
SF1	550 a 650	
SF2	660 a 750	ABNT NBR 15823 – 2
SF3	760 a 850	

A aplicação dos concretos de classe SF1, SF2 e SF3 prescritos na NBR 15823-2 (2010) são utilizados onde exigem bombeamento, aplicação em estruturas que exigem um curto espalhamento horizontal do CAA e aplicação em estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. Os concretos de classe SF2 são adequados para a maioria das aplicações correntes e os concretos SF3 são aplicados em estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de dimensões menores que 12,5mm.

1.20.5.2 Tempo de escoamento (T_{500})

Segundo Takada (2004), o tempo de escoamento T_{500} é frequentemente usado para avaliar a viscosidade de concretos muito fluidos. O tempo de escoamento é útil para a avaliação da viscosidade da mistura. Entretanto, este ensaio é também relacionado ao valor do espalhamento (capacidade de deformação). Por exemplo, um espalhamento maior tende a resultar em tempo de escoamento menor mesmo se a viscosidade da mistura for constante. Ou seja, este ensaio não pode estimar a viscosidade da mistura independentemente da capacidade potencial de deformação.

A determinação da viscosidade do concreto é importante quando for requerido um bom acabamento superficial ou quando a densidade de armadura for expressiva. O CAA com baixa viscosidade apresenta um rápido espalhamento, porém, de curta duração. Por sua vez, o CAA com alta viscosidade pode continuar a se mover de forma lenta e progressiva por um tempo mais prolongado. A viscosidade pode ser avaliada igualmente pela medida do T_{500} (durante o ensaio de espalhamento) ou pelo tempo medido no ensaio do funil-V (ambos mostrados na (NBR 15823-2, 2010). O procedimento para o ensaio de tempo de escoamento e os equipamentos utilizados são os mesmos do ensaio de espalhamento.

A alteração para a realização deste ensaio é a marcação de um círculo de 500mm de diâmetro centrado na base e um cronômetro. O teste é realizado simultaneamente com o espalhamento. O cronômetro é acionado assim que o cone é erguido verticalmente. O resultado do ensaio (T_{500}) é o intervalo de tempo, em segundos, entre o início e o final do escoamento do concreto, a partir do diâmetro do molde (200mm) até a marca circular de diâmetro 500mm da placa de base. De acordo com a NBR 15823-2 (2010), o concreto pode ser classificado em dois grupos para este ensaio, que são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Classes de viscosidade aparente t_{500} (sob fluxo livre)

Classe	t_{500} (s)	Método de ensaio
VS1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
VS2	> 2	

Os concretos referentes a classe VS1 são adequados para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos e para concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. Os concretos de classe VS2 são adequados para a maioria das aplicações correntes, apresentam efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as formas e melhor resistência à segregação (NBR 15823-2:2010). De acordo com a EFNARC (2005) e a NBR 15823-1 (2010) os concretos de classe VS1 exigem maior controle da exsudação e da segregação. Já os concretos de classe VS2, podem apresentar efeitos negativos, com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.

1.20.5.3 Determinação da habilidade passante (Método do anel J)

A NBR 15823-3/2010 normatiza o método de ensaio para a determinação da habilidade passante do concreto autoadensável, em fluxo livre pelo anel J (Figura 4.9). Consiste em um anel metálico, com 300 mm de diâmetro e 120 mm de altura, constituído verticalmente por barras de aço de 10 mm de diâmetro a aproximadamente 48 mm de espaçamento.

Antes de começar o ensaio, o molde e a placa de base devem ser limpos e umedecidos e o anel J posicionado sobre a placa, verificando as marcas de referência. Deve-se posicionar o molde sobre a placa de base, centrando-o na marcação circular de diâmetro 100 mm. Assim, o molde será preenchido de forma contínua e uniforme com a amostra em tempo não superior a 2 min após sua coleta tomando o cuidado para não adensar o concreto. O ensaio consiste em medir o diâmetro final (d_f), atingido pela massa de concreto em duas medidas (mm) realizadas em direções perpendiculares; o resultado é a diferença entre o diâmetro médio do espalhamento obtido no ensaio sem o anel J e

com o anel J. Deve ser verificado se houve obstrução na passagem do concreto entre as barras do anel J .

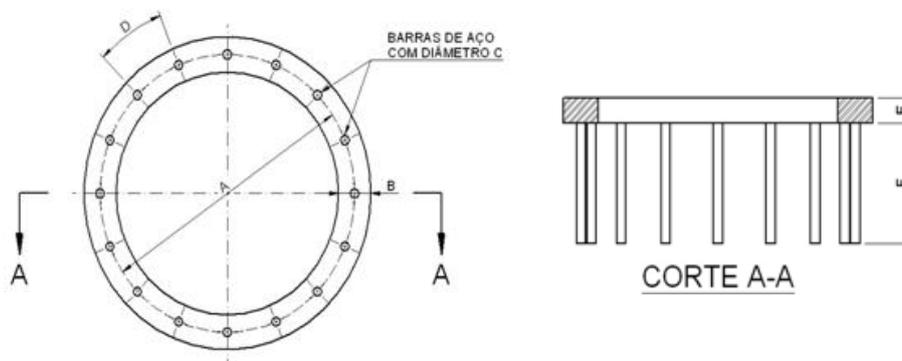


Figura 4.9 – Anel J

A Tabela 4.5 apresenta as classes de habilidade passante pelo anel J de acordo com a NBR 1582.

Tabela 4.5 – Classes de habilidade passante pelo anel J (fluxo livre)

Classe	Anel J (mm)	Método de ensaio
PJ1	25 a 50 (16 barras)	ABNT NBR 1582 – 3
PJ2	0 a 25 (16 barras)	

1.20.5.4 Determinação da habilidade passante. Método da caixa L

A NBR 15823-4/2010 normatiza o ensaio para a determinação da habilidade passante do concreto autoadensável, em fluxo livre pelo método da caixa L.

A aparelhagem (Figura 4.10) consiste em uma caixa de seção retangular com perfil em forma de L, constituída de um perfil de chapa metálica vertical e outro horizontal com espessura mínima de 1,5 mm separadas por uma tampa removível e grade constituída de três barras de aço de 12,5 mm com a função de simular as armações de aço em uma forma. A caixa deve ser preenchida com a amostra de concreto em tempo não superior a 2 minutos após sua coleta tomando o cuidado para não adensar o concreto.

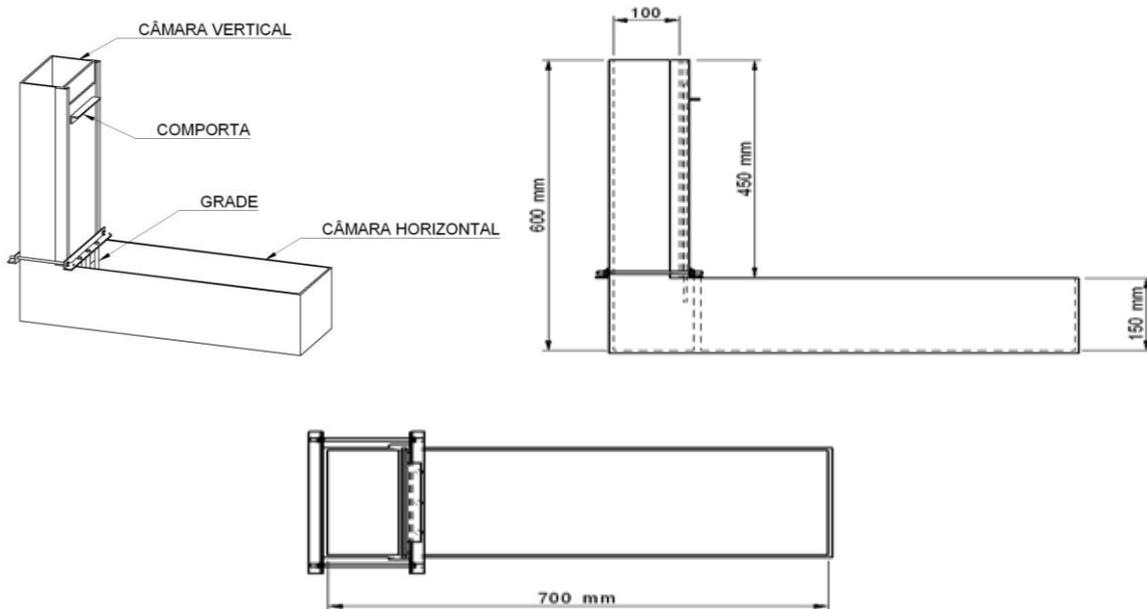


Figura 4.10 – Caixa L

Após o preenchimento da caixa, em um intervalo de tempo não superior a 1 minuto, abre-se a tampa removível de forma rápida permitindo o escoamento do concreto para a câmara horizontal. Terminado o fluxo do material, medem-se as alturas H1 (na seção vertical) e H2 (na seção horizontal) e calcula-se a razão entre a H1 e H2, assim como o tempo que o concreto levou para escoar completamente na caixa.

Tabela 4.6 mostra a classificação da mistura em função da razão H2/H1 de acordo com a NBR1582.

Tabela 4.6 – Classes de habilidade passante caixa L (fluxo confinado)

Classe	Caixa L (H2/H1)	Método de ensaio
PL1	$\geq 0,80$ (duas barras)	ABNT NBR 1582 -4
PL2	$\geq 0,80$ (três barras)	

1.20.5.5 Determinação da viscosidade (Método do funil V)

O ensaio de viscosidade pelo Método do funil “V” é prescrito pela NBR15823-5 (2010) e utilizado para caracterizar a viscosidade e a capacidade de fluidez de concretos autoadensáveis.

O equipamento consiste em um funil de seção retangular no formato de “V”, com abertura na parte inferior de 6,5 x 7,5 cm (Figura 4.11). O funil V deve ser preenchido totalmente sem adensamento e sem interrupção em tempo não superior a 5 minutos após sua coleta. A abertura da comporta deve ser efetuada em um tempo não superior a 30 segundos após o final de seu preenchimento. Em alguns casos especiais, após solicitação expressa, pode ser efetuada o tempo de escoamento do concreto (T_{5min}). O resultado do ensaio é o tempo de escoamento completo do concreto (t_{30s}), (t_{5min}).

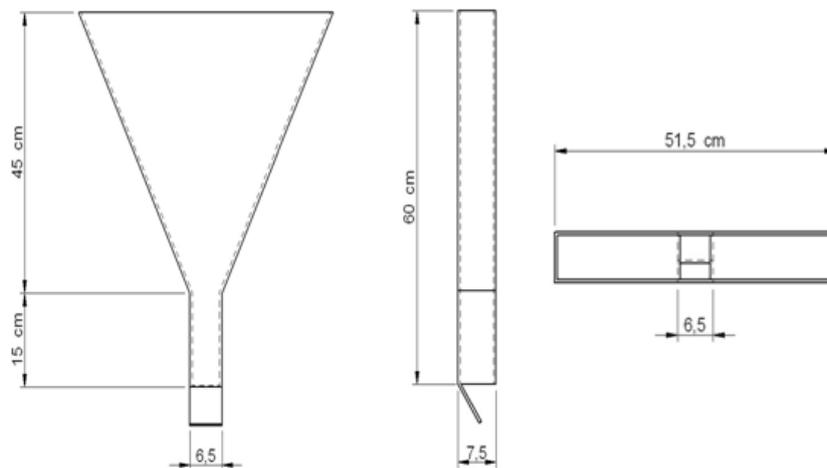


Figura 4.11 – Funil V

A Tabela 4.7 mostra a classificação de viscosidade aparente segundo o tempo de escoamento do concreto.

Tabela 4.7 – Classes de viscosidade aparente pelo funil V (fluxo confinado)

Classe	Funil V t(s)	Método de ensaio
VF 1	< 9	ABNT NBR 15823 - 5
VF 2	9 a 25	

1.20.5.6 Resistência à segregação através da coluna de segregação

O ensaio de resistência à segregação é regido pela norma NBR15823-6 (2010). A aparelhagem constitui-se de um tubo de PVC de 20 cm de diâmetro com 66 cm de altura, dividido em três partes. O topo e a base possuem uma altura de 16,5 cm e a parte central tem 33 cm. As seções são unidas por fita ou grampos (Figura 4.12). O conjunto deve ser apoiado em uma base que garanta o esquadro. As amostras no topo e na base são coletadas 20 minutos após a concretagem, e são lavadas em uma peneira de 4,8 mm, ficando o agregado graúdo retido. A resistência à segregação é definida pela diferença percentual entre a quantidade de agregado graúdo retirada da base (*mb*) e do topo (*mt*) da coluna de segregação.

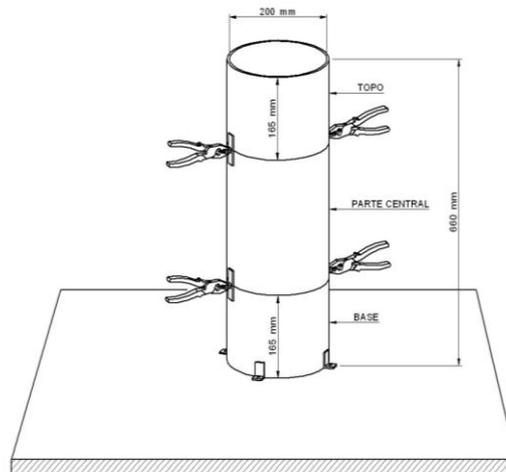


Figura 4.12 – Coluna de segregação

A Tabela 4.8 apresenta as classes de resistência à segregação de acordo com o resultado ensaio.

Tabela 4.8 – Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação

Classe	Coluna de segregação (%)	Método de ensaio
SR1	≤ 20	ABNT NBR 1582 - 6
SR2	≤ 15	

1.20.5.7 Determinação do teor de ar aprisionado

A norma NBR-NM47 (2002) define procedimentos para o ensaio de teor de ar aprisionado pelo Método do pressômetro. A aparelhagem constitui-se em um molde cilíndrico, haste com extremidade metálica de 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento, régua metálica, concha, aparelho medidor de ar incorporado ao concreto (Figura 4.13). Coloca-se o concreto no recipiente em três camadas de alturas aproximadamente iguais, se o processo de adensamento for manual, e em duas se o processo for vibratório. No adensamento manual, aplicam-se 30 golpes por camada distribuídas uniformemente. Deve-se bater levemente na face externa do molde, para eliminar eventuais vazios. No adensamento vibratório, inserir o vibrador até que o mesmo penetre 25 mm, sem deixá-lo encostar no fundo e nas laterais do molde, devendo ser retirado lentamente. Deve-se, então, efetuar o arrasamento com o auxílio da régua metálica, limpar as bordas, umedecer e colocar a tampa sobre o molde. O próximo passo é abrir os dois registros, introduzir água em um deles com o auxílio de uma seringa, para que o ar existente entre a tampa e a superfície do concreto seja totalmente eliminado. Então, fecha-se um dos registros e a válvula de alívio de pressão, aplicando 0,1 MPa de pressão inicial, verificando para que não ocorra vazamento de ar pelo outro registro que está aberto. Por fim, deve-se fechar o outro registro, abrir a válvula de transmissão de pressão e fazer a leitura. Os resultados são expressos em porcentagens com aproximação de 0,1 para teores até 2%, de 0,2 para teores entre 2% e 8% e de 0,5 para teores maiores que 8%.



Figura 4.13 – Pressômetro

1.20.5.8 Comportamento reológico utilizando reômetro BTRHEOM

Desenvolvido na França, o reômetro BTRHEOM é um reômetro de placas paralelas, que mede a tensão de escoamento e viscosidade plástica do concreto. O dispositivo consiste de um recipiente cilíndrico de 240 mm de diâmetro, 100 mm de altura com lâminas montadas no topo e no fundo do recipiente (Figura 4.14). A lâmina inferior é fixa, enquanto a lâmina superior gira e mede torque. O motor está alojado abaixo do recipiente e está ligado ao topo da lâmina por meio de um eixo de diâmetro interno de 40 mm no recipiente de concreto. O dispositivo inclui um vibrador para consolidar o concreto e medir o efeito da vibração sobre os parâmetros reológicos. O ensaio é realizado girando a lâmina superior a velocidades diferentes e o torque resultante é registrado após um período de 20 segundos, a fim de permitir que a taxa de cisalhamento se estabilize.



Figura 4.14 – Reômetro BTRHEOM

O software ADRHEO desenvolvido para o reômetro BTRHEOM calcula automaticamente os parâmetros de Bingham de tensão de cisalhamento e viscosidade plástica. Além disso, os dados gerados no software podem ser usados para calcular a curva nos parâmetros de Herschel-Bulkley. O dispositivo registra o torque Γ e a velocidade de rotação N , relacionados de acordo com a Equação expressa abaixo.

$$\Gamma = \Gamma_0 + AN^b \quad (4.3)$$

onde Γ_0 , A e b são parâmetros numéricos correlacionados com o comportamento do material.

1.20.6 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados nas matrizes autoadensáveis foram os seguintes:

- resistência à compressão,
- resistência à flexão em quatro pontos,
- resistência à tração direta e
- tração por diametral.

Estes ensaios foram realizados em uma máquina *Shimadzu* servo-controlada com capacidade de carga de 1000 kN.

1.20.6.1 Comportamento à compressão

Os corpos de prova (Figura 4.15 (a)), para o ensaio de resistência à compressão axial de (100 x 200 mm) foram ensaiados conforme NBR 5739 (2007) aos 28 dias e rompidos com controle de deformação axial em máquina de ensaio servo-controlada, marca Shimadzu, modelo UH-F 1000 kN, (Figura 4.15(b)). A taxa de deslocamento usada para ensaiar os corpos-de-prova foi de 0,5 mm/min. Foram colocados dois LVDT's para medir os deslocamentos axiais fixados longitudinalmente no centro do corpo de prova e um LVDT no sentido transversal para medir o deslocamento lateral e permitir calcular os valores de coeficiente de Poisson. Os sinais dos sensores foram registrados pelo sistema ADS 2000/AQDados, da empresa Lynx. O valor obtido para a resistência à compressão de cada matriz foi a média de 3 corpos-de-prova. O módulo de elasticidade E dos concretos foi calculado com base no diagrama tensão-deformação, obtido nos ensaios de compressão de acordo com a Equação 4.4:

$$E = \frac{\sigma_{c_2} - \sigma_{c_1}}{\varepsilon_{a_2} - \varepsilon_{a_1}} \quad (4.4)$$

sendo:

σ_{c_2} = tensão normal correspondente a 40 % do valor da carga última;

σ_{c_1} = tensão normal correspondente à deformação axial de 0,000050 (ε_{a_1});

ε_{a_2} = deformação axial correspondente à tensão σ_{c_2} ;

ε_{a_1} = deformação axial de 0,000050.

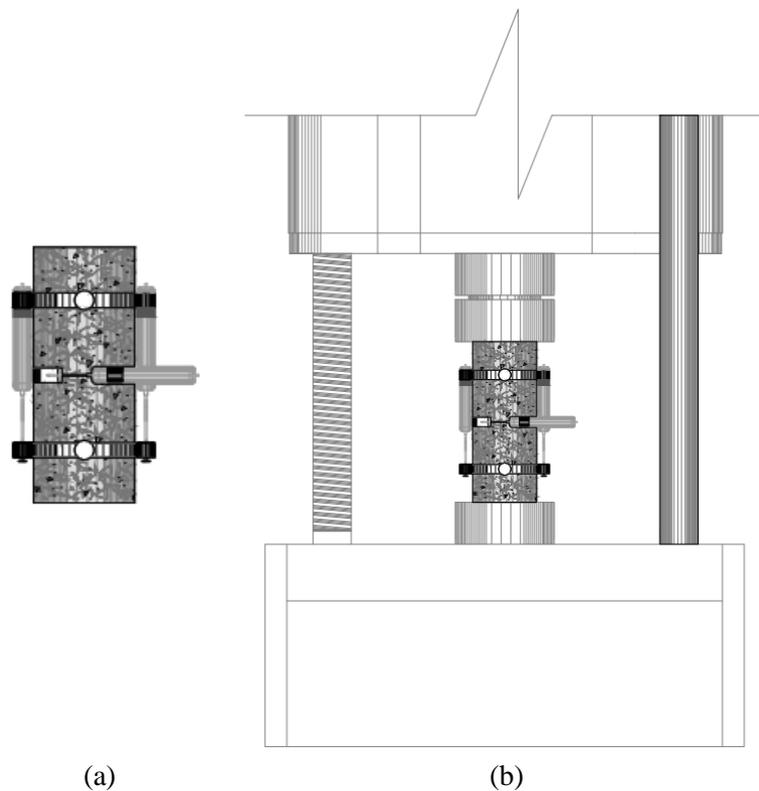


Figura 4.15 – (a) Instrumentação do corpo de prova, (b) corpo de prova na máquina de ensaios Shimadzu

1.20.6.2 Comportamento à tração na flexão

O ensaio de flexão foi realizado com controle de deslocamento do travessão da máquina a uma taxa de 0,5 mm/min. As amostras tinham dimensões de 100 x 100 x 400 mm de acordo com NBR NM 55 (1996) e foram montadas com a distância entre apoios (vão livre) de 300 mm e ensaiadas na idade de 28 dias. A flecha foi medida por meio de um LVDT posicionado à altura média da amostra prismática (Figura 4.16(a)). Foram utilizados a mesma máquina ensaio servo-controlada, marca Shimadzu, modelo UH-F 1000 kN e mesmo sistema de aquisição de dados utilizados nos ensaios de compressão (Figura 4.16(b)).

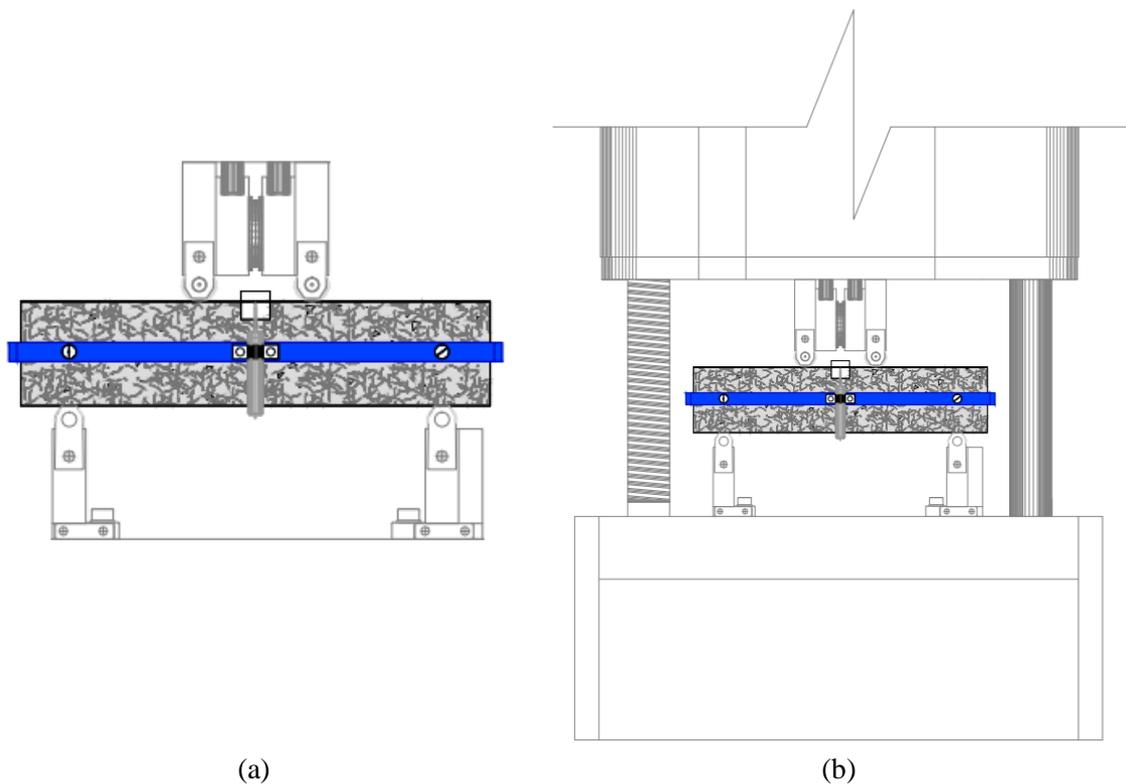


Figura 4.16 – (a) Instrumentação do corpo de prova, (b) posição do corpo de prova na máquina de ensaios

Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento do travessão a uma taxa de 0,1 mm/min. O índice de tenacidade foi avaliado através da norma ASTM C1018 e da norma Belga B 15-238. A tensão resistente à flexão é calculada a partir da Equação 4.5.

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} \quad \text{Equação (4.5)}$$

sendo:

M = momento fletor na seção média do vão livre da amostra, relativo ao máximo valor de força registrado;

b = largura da seção transversal da amostra;

h = altura da seção transversal da amostra.

A tenacidade foi avaliada tomando-se segundo os procedimentos da norma ASTM C-1018 (1997). Esta norma define a tenacidade na flexão em termos de relações entre as áreas sob a curva carga-deflexão em múltiplos de deflexão de primeira fissura e a área sob a curva carga-deflexão até a primeira fissura. Essas relações (I_5 , I_{10} , I_{20} , I_{30}) são chamadas de índices de tenacidade. Esses índices são calculados através de como relações das áreas sob a curva carga-deflexão até deflexões 3, 5,5, 10,5 e 15,5 vezes a deflexão de primeira fissura, respectivamente, como está apresentado na Figura 4.17.

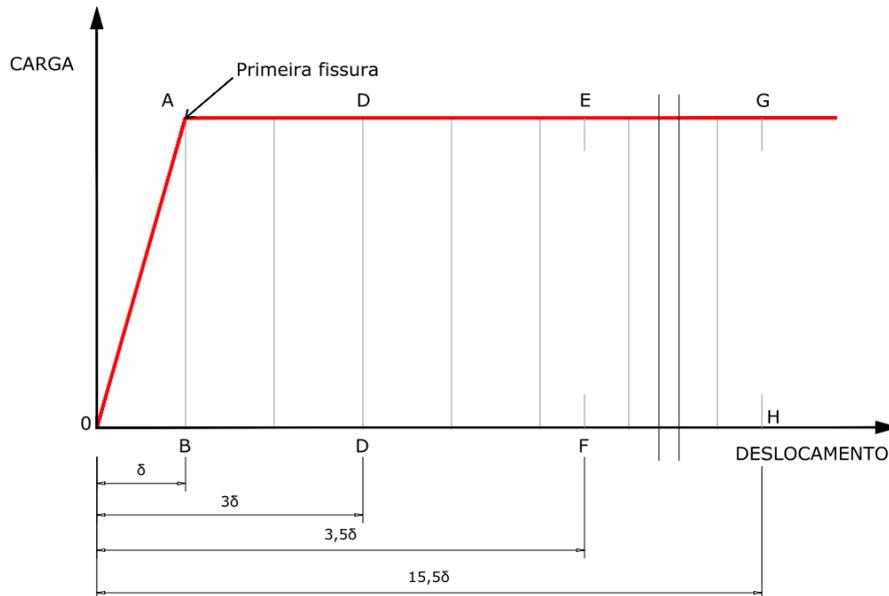


Figura 4.17 – Índices de tenacidade, indicados em curva carga x deslocamento, de acordo com a norma ASTM C1018 (1994)

1.20.6.3 Comportamento à tração direta

O sistema utilizado para a realização do ensaio de tração direta em amostras prismáticas foi desenvolvido por LIMA (2004) e adaptado por VELASCO (2008). Os acessórios são constituídos por uma barra de aço maciça e por peça de travamento em formato de “U” (Figura 4.18(a)). A barra de aço maciça fica fixada entre as garras da máquina de ensaio e foi desenvolvida para evitar o esmagamento da amostra. A segunda peça, em formato de “U”, possui três furos em suas laterais sendo ligada ao segundo acessório por três pinos de fixação. As matrizes foram moldadas em prismas de dimensões 100 x 100 x 400 mm e colocados em cura por 28 dias, após a cura, foram cortados em serra diamantada obtendo-se 2 corpos-de-prova por molde. As amostras utilizadas tinham, portanto, espessura de 50 mm. Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento do travessão a uma taxa de 0,1 mm/min em máquina de ensaio servo-controlada, marca Shimadzu, modelo UH-F 1000 kN, (Figura 4.18(b)). Os valores da resistência à tração direta foi calculada a partir da Equação 4.6.

$$\sigma = \frac{F}{b_{cp} \cdot e} \quad \text{Equação (4.6)}$$

sendo:

F = carga aplicada;

b_{cp} = largura do corpo de prova (seção central);

e = espessura do corpo de prova.

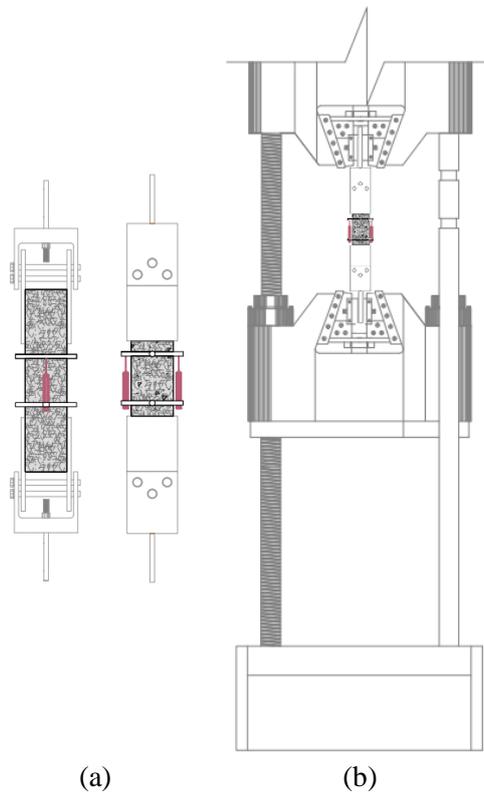


Figura 4.18 – (a) Instrumentação do corpo de prova, (b) posição do corpo de prova na máquina de ensaios

1.20.6.4 Comportamento à tração por compressão diametral

Desenvolvido por Lobo Carneiro no Brasil, o ensaio mede a resistência à tração por compressão diametral, determinando a máxima tensão suportada por corpos-de-prova cilíndricos (Figura 4.19(a)). É um ensaio de ruptura, em que o corpo-de-prova é posicionado horizontalmente e a carga é aplicada progressivamente, com velocidade de deformação, e é realizado segundo as prescrições da NBR 7222 (2011). O ensaio foi executado em máquina de ensaio servo-controlada, marca Shimadzu, modelo UH-F 1000 kN, (Figura 4.19b).

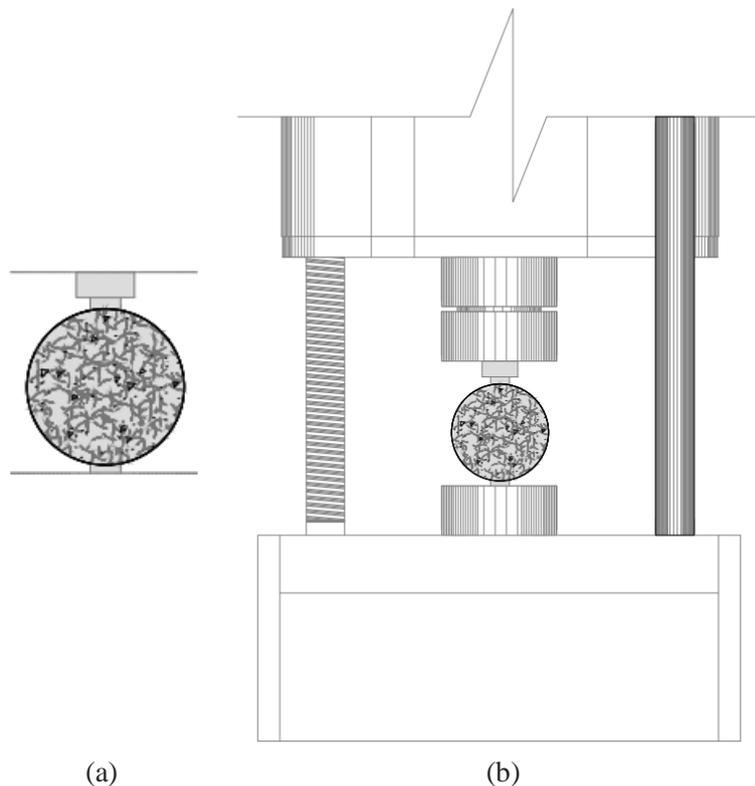


Figura 4.19 – (a) Corpo de prova, (b) posição do corpo e prova na máquina de ensaios

1.20.6.5 Comportamento da aderência das fibras de aço através do ensaio de arrancamento.

Os ensaios de arrancamento (Figura 4.20) foram realizados numa prensa AGX 100 kN da Shimadzu. O corpo de prova cilíndrico foi montado num aparado de aço confeccionado especialmente para o modelo do corpo de prova utilizado. O aparato é

constituído por uma chapa de aço montada na parte inferior da prensa, e por um anel de aço acoplado à chapa através de parafusos rosqueados de aço. O ensaio foi realizado com controle de deslocamento e com o transdutor interno da prensa. A velocidade de deformação para todos os ensaios foi de arrancamento foi de 0,3mm/s.

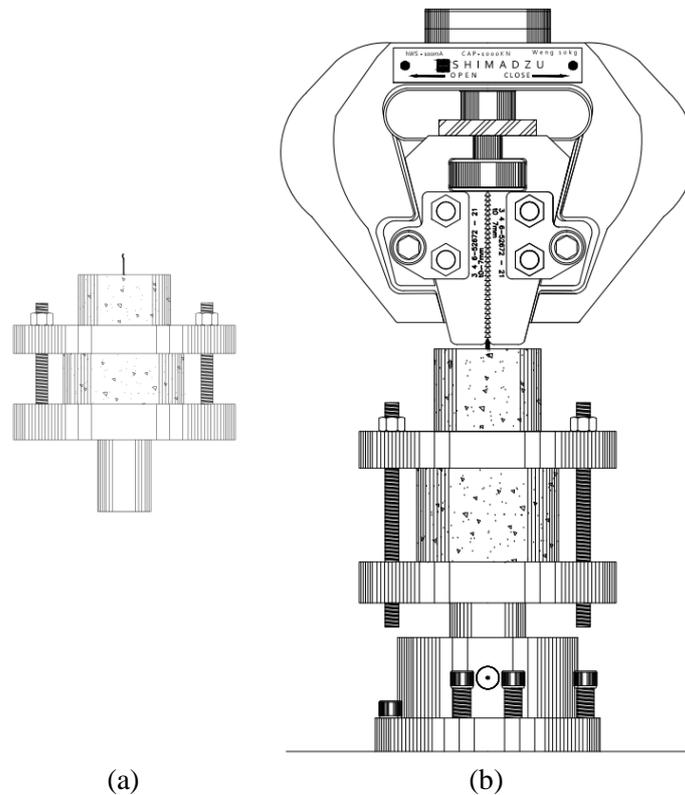


Figura 4.20 – (a) Dispositivo para ensaio, (b) posição do corpo e prova na máquina de ensaio

Os ensaios de arrancamento das fibras foram efetuados em corpos de prova de cilíndricos de concreto com um diâmetro e altura de 80 mm. Para cada matriz foi confeccionado nove corpos de prova. Os moldes permitiram a introdução do concreto sem a interferência da fibra de aço com um comprimento de embebição de 17,5mm e zero grau (0°) de inclinação (Figura 4.21). Após dois dias de cura, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em câmara úmida por vinte e oito dias onde foram retirados para os ensaios.



(a) Moldagem



(b) Desmoldagem



(c) Corpos de prova desmoldados



(d) Corpos de prova na câmara úmida

Figura 4.21 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova para o ensaio de arrancamento de fibras de aço.

1.20.7 Ensaios mecânicos

1.20.7.1 Comportamento da aderência da barra de aço-concreto através dos ensaios de arrancamento.

Os corpos-de-prova para o ensaio de tração de arrancamento possuem geometria prismática com dimensões especificadas correspondente a cada diâmetro da barra utilizada conforme Figura 4.22.

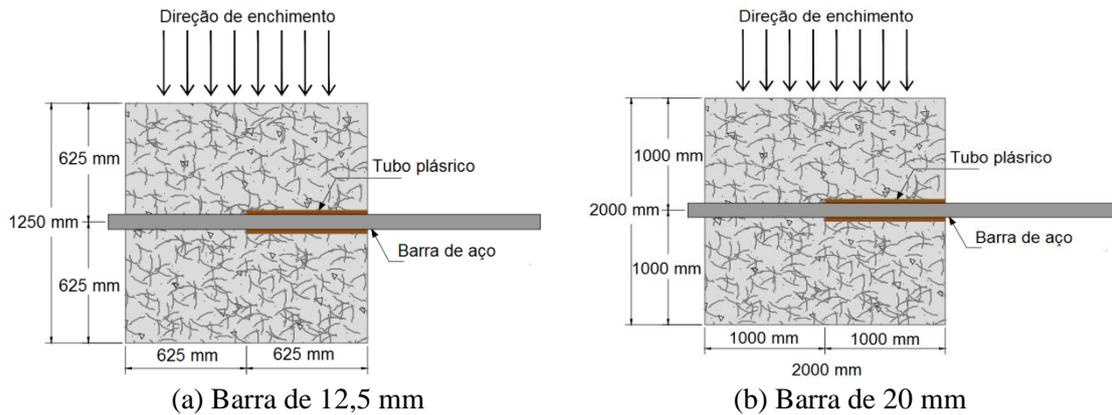


Figura 4.22 – Formas do modelo de arrancamento com barras.

O sistema utilizado para a realização do ensaio de tração em prismas de pode ser visto na Figura 4.23. O aparato foi constituído por duas placas de aço e quatro barras rosqueadas a fim de deixar livre e sem interferências o prisma de concreto.

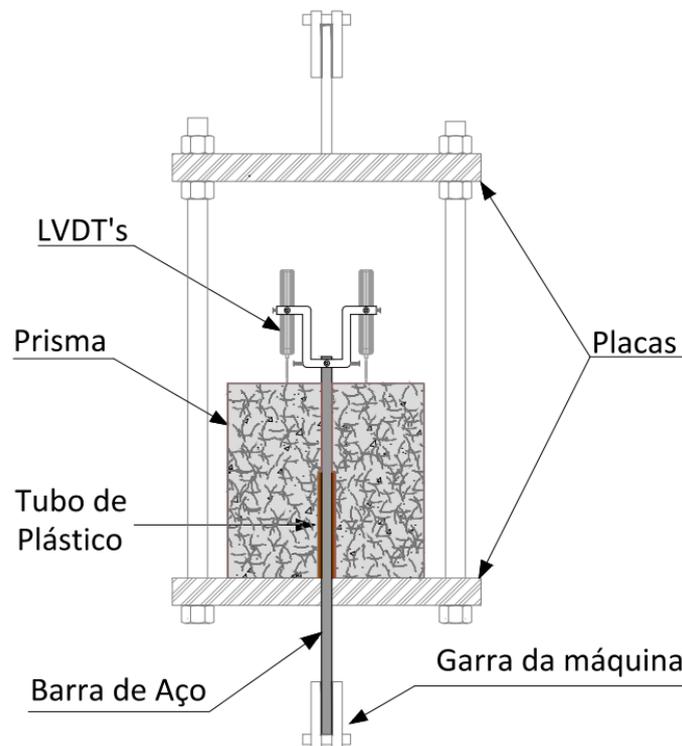


Figura 4.23 – Dispositivo e instrumentação do modelo de arrancamento.

Na parte superior do prisma, foi fixado um suporte de aço com LVDT'S e conectados à barra de aço. A velocidade do ensaio foi de 0,3 milímetros por minuto e o ensaio foi

realizado em máquina de ensaio servo-controlada, marca Shimadzu, modelo UH-F 1000 kN.

A moldagem dos prismas para o ensaio de arrancamento foi realizada para as matrizes de referência e para os compósitos com inclusão de fibras de aço no concreto nas frações volumétricas (0,5% e 1,0%). Não se utilizou a fração de 0,75% devido a mesma apresentar características próximas à de 1%. Foram confeccionados 5 corpos-de-prova prismáticos para cada matriz ou compósito. O procedimento de mistura seguiu a mesma metodologia descrita no item 4.3. As etapas estão descritas na Figura 4.24.



(a) Introdução dos materiais no misturador



(b) Umidecimento com parte da água



(c) Controle de temperatura



(d) Corpos de prova controle

Figura 4.24 – Produção dos concretos para moldagem para os ensaios estruturais.

As barras de aço CA-50 de 12mm 20mm de diâmetro foram posicionadas dentro do molde com a parte não aderente protegida por tubos plásticos tomando-se o cuidado para que as mesmas não se movimentarem durante a concretagem (Figura 4.25 (a),(b)).



(a) Moldes com as barras



(b) Detalhe dos tubos plásticos



(c) Enchimento



(d) Acabamento



(e) Desmoldagem



(f) Câmara úmida

Figura 4.25 – Procedimento de moldagem dos prismas.

Os moldes foram limpos e aplicada em sua superfície, uma camada de óleo mineral para facilitar a desmoldagem (Figura 4.25 (b)). O lançamento do concreto nos moldes, foi realizado sem interferência de vibração (Figura 4.25 (c)). Os moldes foram preenchidos até a superfície, logo em seguida foram alisadas com uma régua metálica, cobertos com manta e umedecidos. A desmoldagem ocorreu após 48 horas de enchimento dos moldes (Figura 4.25(e)). Após as barras foram envelopadas com plástico filme, para que não fossem afetados pelo ambiente da câmara úmida. Após o desmolde, os corpos de prova

foram posicionados na câmara úmida, com umidade de 100% e temperatura de 21°C ± 1°C, por 28 dias até o dia previsto para os ensaios (Figura 4.25(f)).

O procedimento adotado para o cálculo da resistência de aderência da barra de aço-concreto em ensaios de arrancamento (Equação 5.1), foi estabelecido pelo Rilem-Ceb-Fip (1973).

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot l_d \cdot \phi} \quad (4.7)$$

Onde:

τ = resistência de aderência;

P = força aplicada;

l_d = comprimento aderente;

ϕ = diâmetro da barra de aço.

Para o cálculo da resistência de aderência, o procedimento adotado, foi de acordo com Rilem-Ceb-Fip (1983), onde a resistência média de aderência (Equação 5.2) é dada pela média das resistências de aderência obtidas para os deslizamentos de 0,01 mm, 0,1 mm e 1,0 mm. Quando o deslizamento máximo for menor que 1,0 mm para o cálculo de τ_m , τ_u deverá ser empregado ao invés de $\tau_{1,0}$.

$$\tau_m = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_{1,0}}{3} \quad (4.8)$$

Sendo:

τ_m = resistência média de aderência;

$\tau_{0,01}$ = resistência de aderência para o deslizamento de 0,01 mm;

$\tau_{0,1}$ = resistência de aderência para o deslizamento de 0,1 mm;

$\tau_{1,0}$ = resistência de aderência para o deslizamento de 1,0 mm;

Segundo Leonhardt & Mönning (1977) e o Rilem-Ceb-Fip (1983), o valor referente ao deslizamento de 0,1 mm corresponde ao valor de cálculo para utilização no dimensionamento de estruturas em concreto armado. De acordo com o Rilem-Ceb-Fip (1983), o valor para as resistências média e última de aderência deve obedecer a seguinte regra:

$$\begin{aligned}\tau_m &\geq 8,0 - 0,12 \cdot \phi \\ \tau_u &\geq 13,0 - 0,19 \cdot \phi\end{aligned}\tag{4.9}$$

Onde:

τ_m = resistência média de aderência;

τ_u = resistência última de aderência;

ϕ = diâmetro da barra de aço, (mm).

A curva o ensaio para determinação do arrancamento, foi realizado de acordo com o RILEM-FIP-CEB (1973).

1.20.7.2 Comportamento à tração de tirantes de concreto armado (tension stiffening) à tração direta.

Os corpos-de-prova para o ensaio de tração de tirantes possuem a geometria adaptados da NBR 7477 (1982). Sua forma é prismática com 800 mm de comprimento e seção transversal quadrada com 150 mm de lado (Figura 4.26(a)). A armadura é constituída por uma barra de aço CA-50 de 20 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento, e foi

posicionada no eixo longitudinal do prisma. Para permitir a aplicação do carregamento na peça a barra de aço se estende 100 mm além das superfícies transversais de extremidade do prisma de concreto, como mostra (Figura 4.26(b)).

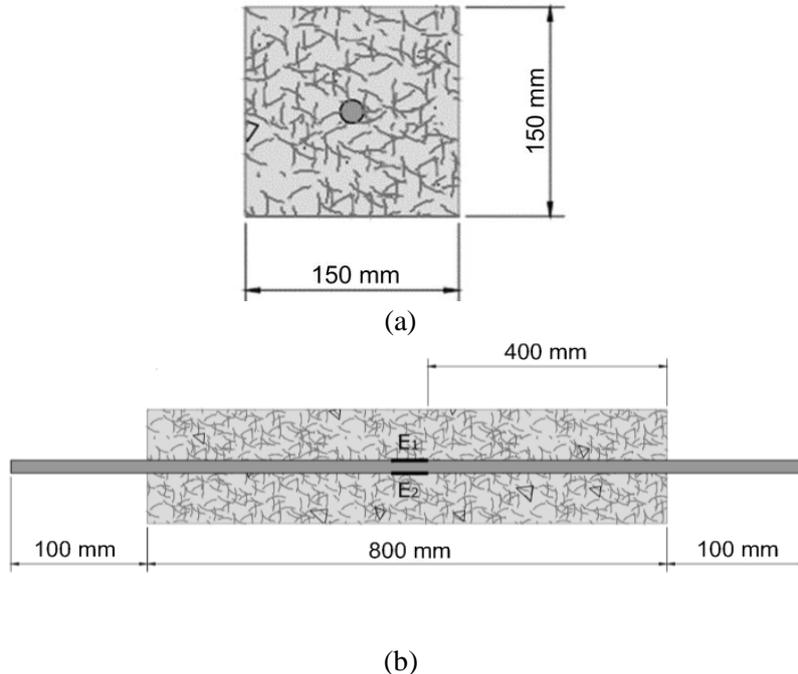


Figura 4.26 – (a) Geometria do tirante usado no ensaio de tração, (b) Localização dos extensômetros na armadura.

Em cada barra foram fixados dois extensômetros nas laterais da barra distantes 400 mm partir da extremidade do prisma de concreto. Os pontos de fixação dos extensômetros foram lixados para retirar a camada de ferrugem e as nervuras e limpos. Foram utilizados extensômetros modelo KFG-5-120-C1-11 da marca KYOWA com fator de sensibilidade igual a 2,00 e comprimento de 5mm. A base de medida dos extensômetros foi de 4,57 mm. O sistema utilizado para a realização do ensaio de tração em prismas de concreto foi desenvolvido pelo presente autor da pesquisa. Os acessórios foram constituídos por duas barras verticais posicionadas no eixo longitudinal do prisma, onde foram fixados os LVDT'S . Outras quatro barras foram posicionadas a 5 cm da aresta em cada lado do prisma. As barras foram conectadas ao prisma por parafusos com rosca, para facilitar o desmonte do aparato (Figura 4.27(a)). A velocidade do ensaio foi

de 0,3 milímetros por minuto e o ensaio foi realizado em máquina de ensaio servo-controlada, marca Shimadzu, modelo UH-F 1000 kN, (Figura 4.27(b)).

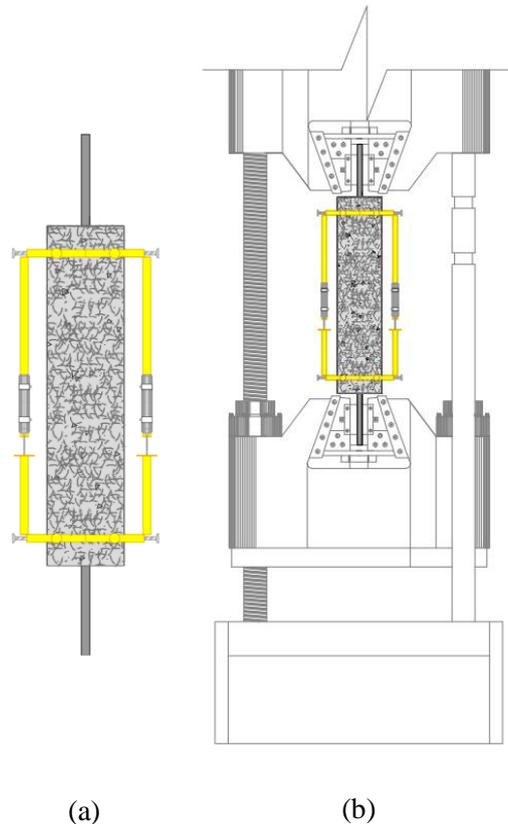
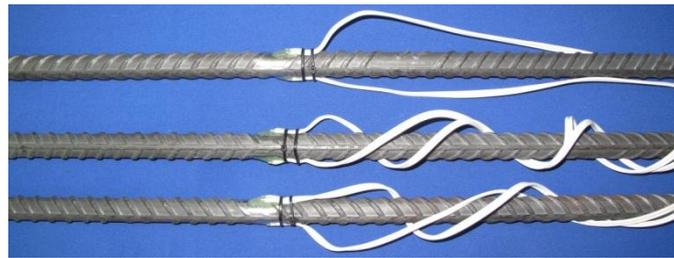


Figura 4.27 – (a) Instrumentação do corpo de prova, (b) posição do corpo e prova na máquina de ensaios.

A moldagem dos tirantes foi realizada para as matrizes de referência e para os compósitos com inclusão de fibras de aço no concreto nas frações volumétricas (0,5% e 1,0%). Não se utilizou a fração de 0,75% devido a mesma apresentar características próximas à de 1%. Foram confeccionados 3 corpos-de-prova prismáticos para cada matriz ou compósito. O procedimento de mistura seguiu a mesma metodologia descrita no item 4.3 e sequencia de mistura de acordo com a figura 4.24. As barras de aço CA-50 de 20mm de diâmetro foram posicionadas dentro do molde tomando-se o cuidado para que as mesmas não se movimentarem durante a concretagem (Figura 4.28(a),(b)). Foi tomado o cuidado para que a concretagem não danificasse a instrumentação das barras.



(a) Detalhe das barras instrumentadas



(b) Posição das barras nos moldes

Figura 4.28 – Detalhe das barras e moldes dos tirantes.

Os moldes prismáticos foram limpos e na suas superfícies foi aplicada uma camada de óleo mineral para facilitar a desmoldagem (Figura 4.29(a)). O lançamento do concreto nos moldes, foi realizado sem interferência de vibração (Figura 4.29(b),(c)). Os moldes foram preenchidos até a superfície, logo em seguida foram alisadas com uma régua metálica, cobertos com uma manta e umedecidos (Figura 4.29(d)). A desmoldagem ocorreu após 48 horas de enchimento dos moldes (Figura 4.30(a)). Após serem desmoldados, foram tomados os cuidados para que os fios e as barras não fossem afetados pelo ambiente da câmara úmida (Figura 4.30(b),(c)). Após o desmolde, os corpos de prova foram posicionados na câmara úmida, com umidade de 100% e temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, por 28 dias até o dia previsto para os ensaios (Figura 4.30(d)).



(a) Lubrificação com óleo mineral



(b) Início do enchimento



(c) Detalhe dos fios



(d) Moldes cheios

Figura 4.29 – Moldagem dos tirantes.



Figura 4.30 – Desmoldagem dos tirantes.

Foi realizado o estudo do padrão de fissuração para os modelos de tirantes estudados através de análise de imagens, nos diferentes estágios de deformação e força em intervalos de 30s estacionada na mesma posição durante todo o ensaio. O cálculo do espaçamento médio de fissuras foi efetuado tomando-se três leituras entre cada duas fissuras formada e adotando-se como parâmetro o comprimento inicial do aparato de medição (700 mm). Isso permitiu a obtenção dos espaçamentos médios entre sucessivas fissuras. O espaçamento médio foi a média dos espaçamentos médios entre cada duas fissuras (Figura 4.31).

O cálculo da abertura de primeira fissura, foi realizado tomando-se dez leituras em cada foto para os corpos de prova de cada tirante, permitindo compreender a evolução da primeira fissura no ensaio. O valor de abertura de fissura foi a média das dez medições realizadas.

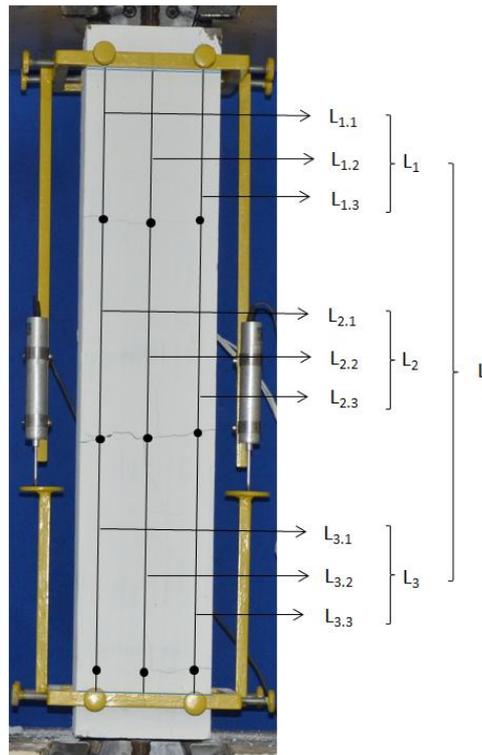


Figura 4.31 – Metodologia de análise do espaçamento de fissura

Para a previsão do módulo de elasticidade do compósito, seguiu-se o modelo desenvolvido por modelo desenvolvido por Aveston, Cooper e Kelly (1971). O módulo de elasticidade do compósito na fase elástica foi calculado a partir da seguinte equação:

$$E_c = E_m V_m + E_r V_r \quad (4.10)$$

Sendo:

E_c = módulo de elasticidade do compósito;

E_m = módulo de elasticidade da matriz;

V_m = volume da matriz;

E_r = módulo de elasticidade do reforço;

V_r = volume do reforço.

O módulo de elasticidade do compósito na fase pós fissuração foi calculado através da equação:

$$E_c = E_r V_r \quad (4.11)$$

Sendo:

E_c = módulo de elasticidade do compósito;

E_r = módulo de elasticidade do reforço;

V_r = volume do reforço.

O coeficiente de conformação superficial foi calculado a partir da equação:

$$\eta = \frac{2,25 \cdot d}{\Delta l \text{ médio}} \quad (4.12)$$

Onde:

η = coeficiente de conformação superficial;

d = lado da seção do tirante;

Δl = distancia média entre fissuras, considerando as quatro faces.

O cálculo da tensão de aderência foi obtido através da seguinte equação:

$$f_{bd} = \eta f_{ctd} \quad (4.13)$$

Sendo:

f_{bd} = resistência de aderência;

η = coeficiente de conformação superficial;

$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c$;

Nessa fase, o compósito apresenta a mesma inclinação do gráfico do reforço, devido o comportamento do compósito passar a ser regido praticamente pela barra de aço. Nessa fase, o módulo de elasticidade do compósito pode ser igualado ao módulo do reforço.

1.20.8 Ensaios de Variação Dimensional

1.20.8.1 Retração por secagem.

O ensaio foi realizado em amostras prismáticas de dimensões 75 x 75 x 285 mm, em suas extremidades os prismas possuíam pinos de aço a fim de permitir leituras de variações de volume. Primeiramente, os pinos foram atarrachados nos através dos oríficos laterais das formas (Figura 4.32 (a)). A distância entre os pinos no interior dos moldes (L) foi de 250mm. Essa distancia foi lida antes da concretagem dos moldes e foi utilizada e utilizado no cálculo das deformações. O procedimento de mistura seguiu a mesma metodologia descrita no item 4.1.4, e após a concretagem (Figura 4.32 (b) e (c)). as amostras foram mantidas em cura, cobertas por manta umidecida. A desmoldagem ocorreu após o período de 48 horas. Após a desmoldagem, as amostras foram mantidas em cura úmida até a idade para de 28 dias(Figura 4.32 (d)).

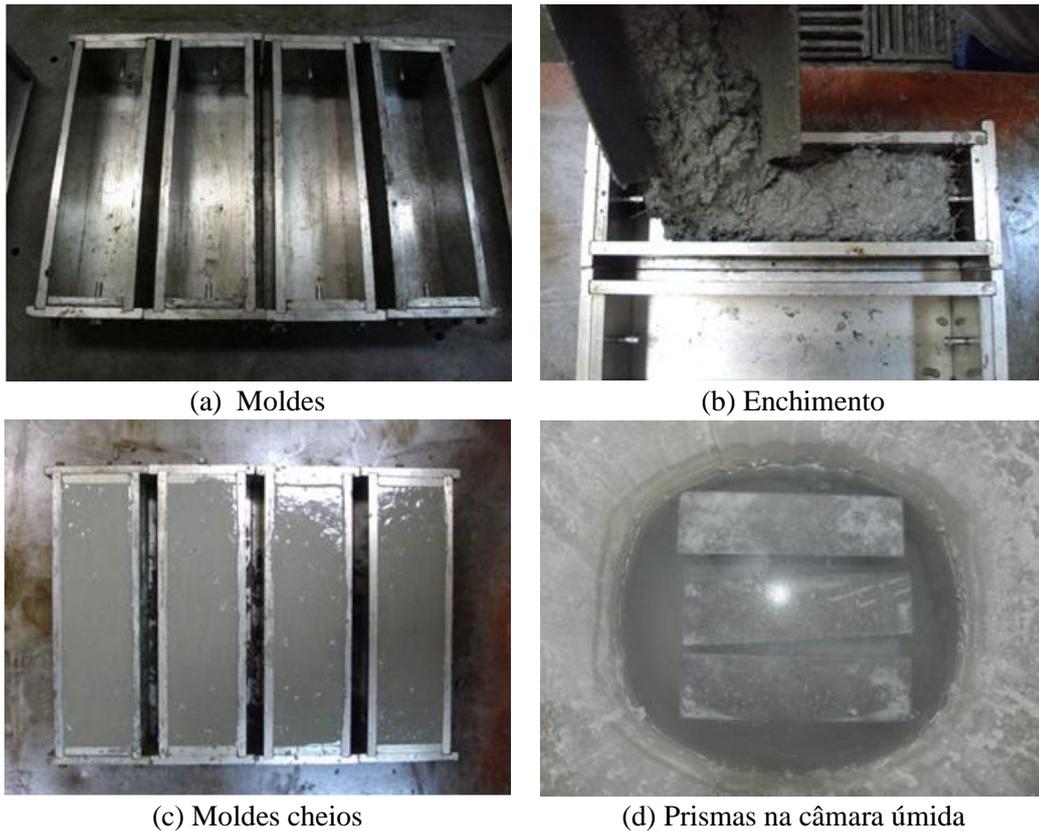


Figura 4.32 – Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de retração por secagem.

Após o período de cura, as amostras foram retiradas da câmara úmida e colocadas no relógio comparador para proceder com a leitura inicial (Figura 4.33 (b)). Antes de cada leitura, o relógio comparador foi zerado utilizando uma barra de referência padrão (Figura 4.33 (a)). Em seguida as amostras foram pesadas uma balança analítica (Figura 4.33 (c)). As amostras foram mantidas em sala climatizada, com controle de temperatura ($21^{\circ}\text{C} \pm 2$) e umidade ($50\% \pm 2$), (Figura 4.33 (d)). As leituras foram realizadas de forma mais sistemática nas duas primeiras semanas do ensaio e depois de forma mais esparsa.



Figura 4.33 – Ensaio de retração por secagem.

A deformação média foi calculada através da equação a Eq. (4.1). A perda de massa é dada com uma relação entre as diferenças de massas e a massa inicial da amostra, dada pela Eq. (4.3).

$$W = \frac{m_f - m_i}{m_i} \quad \text{Equação 4.14}$$

Onde:

m_i = massa inicial da amostra após 28 dias de cura em água;

m_f = massa da amostra, com leituras sucessivas no tempo.

1.20.8.2 *Fluência na compressão.*

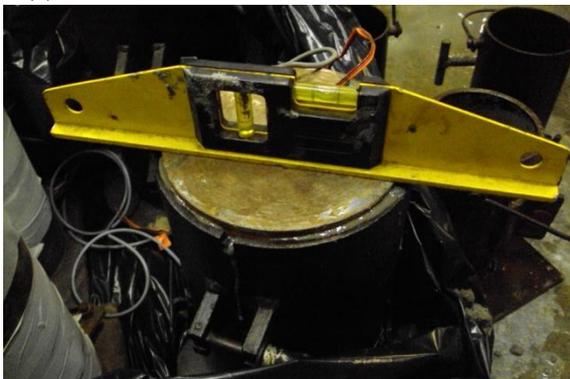
O ensaio de fluência na compressão foi realizado de acordo com a NBR 8224 (1983) em corpos de prova cilíndricos de dimensões 150 x 300 mm. Foram moldados quatro corpos de prova para cada matriz de referência, dois foram utilizados no carregamento no pórtico de ensaio e dois para controle, para medida da retração e da perda de massa. As medidas das deformações foram tomadas através de extensômetros elétricos embutidos no interior do concreto; termômetros foram instalados para medir as variações de temperatura e deformações térmicas (Figura 4.34(a)). Os moldes foram enchedos até o nível de colocação do anel de fechamento (Figura 4.34(b)). Após o fechamento, foi conferido o nivelamento dos moldes (Figura 4.34 (c)). Em seguida os moldes foram acondicionados em sacos plásticos (Figura 4.34(d)), com estopa umedecidas em seu interior, para assegurar total umidade (Velasco, 2008).



(a) Extensômetros elétricos e termômetros



(b) Enchimento dos corpos de prova



(c) Nivelamento da tampa metálica



(d) Garantia de umidade interna

Figura 4.34 – Moldagem dos corpos de prova para fluência à compressão.

Após 48 horas, os corpos de prova foram desmoldados umedecidos, (Figura 4.35(a)) e selados com filme plástico (Figura 4.35(b)). Ao redor do corpo de prova foi aplicada uma fita adesiva de alumínio (Figura 4.35(c)). Entre a fita de alumínio e os discos metálicos foi aplicado silicone (Figura 4.35(d)). Após a verificação se cada corpo de prova estava devidamente selado, os mesmos foram pesados.



(a) Umedecimento



(b) Selagem (filme plástico)



(c) Selagem (fita de alumínio)



(d) Aspecto corpo de prova

Figura 4.35 – Etapas de selagem dos corpos de prova para o ensaio de fluência à compressão.

Os corpos de prova foram mantidos selados até completarem a idade para o ensaio. Foram realizadas leituras de deformação utilizando o medidor de deformação (Figura 4.369(a)) e leituras de temperatura para a obtenção das deformações térmicas (Figura 4.369(b)).

Antes de carregar os corpos de prova, foi verificada a calibração dos pórticos de ensaio (Figura 4.37(a)). O carregamento foi aplicado aos corpos-de-prova através de uma bomba hidráulica manual conectada a uma linha de pressão (Figura 4.37(b)); a pressão foi verificada constantemente através de manômetro. Decorridos vinte e oito dias, da moldagem, os corpos de prova foram submetidos às cargas de compressão (Figura 4.37(c), (d)). Os corpos-de-prova controle foram colocados em uma prateleira, próximos aos corpos-de-prova carregados.



(a) Medidor de deformação



(b) Medidor de temperatura

Figura 4.36 – Dispositivos de leitura para o ensaio de fluência á compressão

Os corpos-de-prova foram submetidos a uma tensão correspondente a 40 % da tensão de ruptura; esse valor foi obtido através dos ensaios de resistência à compressão. Após a retirada da carga, foram medidas as deformações até sua completa estabilização. Como não se permitiu a secagem dos corpos-de-prova, a fluência básica foi calculada através da equação:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_t - \varepsilon_a - \varepsilon_{\Delta t} \quad \text{Equação (4.15)}$$

onde:

ε_f = deformação de fluência (ou fluência básica);

ε_t = a deformação total;

ε_a = deformação de retração;

$\varepsilon_{\Delta t}$ = deformação térmica.



(a) Calibração dos Pórticos



(b) Sistema hidráulico



(c) Sequência de pórticos



(d) Detalhe do pórtico

Figura 4.37 – Ensaio de fluência na compressão

1.20.9 Comportamento físico

1.20.9.1 Absorção de água por imersão

Os índices de absorção de água por imersão foram determinados conforme a NBR 9778 (2005). Foram moldados 3 corpos de prova de 50 x 100 mm e cortados em discos de $25\text{mm} \pm 1\text{mm}$. Os ensaios foram realizados com amostras com 28 dias de cura, após cura foram secos em estufa de 40°C (Figura 4.38(a)). Logo após, foram determinados as massas dos corpos de prova antes da saturação (Figura 4.38(b)). Após serem pesados os corpos de prova foram imersos em água e fervidos por 5 horas. Em seguida foram novamente pesados.



(a) corpos de provas na estufa a 40°C



(b) Fervura dos corpos de prova

Figura 4.38 – Ensaio de absorção de água por imersão

1.20.9.2 Absorção de água por capilaridade

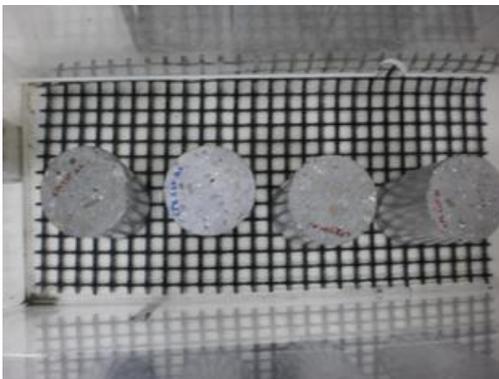
A absorção da água por capilaridade (Figura 4.39) foi determinada de acordo com a NBR 9779 (2012). Os corpos de prova foram selados com fita de alumínio, com a finalidade de que a absorção ocorra através dos capilares (poros interconectados no concreto) em uma direção. O ensaio foi realizado com três corpos de prova de 50 x 100 mm. Após selagem (Figura 4.39(a),(b),(c)) os corpos de prova foram colocados em uma caixa de vidro com lamina d'água constante de 5 mm (Figura 4.39(d)).



(a) Corpos de prova selados



(b) Nível d'água de 5mm de altura



(c) Recipiente de ensaio



(d) Pesagem dos corpo de prova

Figura 4.39 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

1.20.9.3 Penetração acelerada de íons cloreto

O ensaio consistiu em medir a corrente elétrica que passa através de um corpo de prova de 100 mm de diâmetro e 50mm de espessura. Foi realizado o ensaio para cada matriz, e moldado três corpos de prova de 100 x 200 mm. Após a cura aos 28 dias, foram seccionados em três partes iguais de 50 mm. Em seguida as laterais do corpo de prova foram seladas com adesivo epox e deixadas para cura por 24 horas. Posteriormente, os corpos de prova foram colocados em um dessecador feito vácuo com pressão de 50 mmHg por 3 horas (Figura 4.40(a)). Em seguida efetuou-se vácuo por mais com água por mais 1 hora. No fim do processo de vácuo, os corpos de prova foram deixados

imersos em água para garantir que os poros fossem preenchidos com água e permitirem a passagem de elétrons. Os corpos de prova foram retirados da água e efetuou-se o processo de colagem às células de acrílico logo após foram selados com silicone (Figura 4.40 (b)). Após a cura do silicone, as células foram ligadas aos eletrodos e estes ao resistor de $0,01\Omega$ (Figura 4.40 (c)). As células foram preenchidas com solução de 3% NaCl (do lado esquerdo) e 0.3N (de NaOH da direita). Aplicou-se uma tensão de 60V por um período de 6 horas, as leituras das tensões foram realizadas a cada 30 minutos através de um voltímetro conectado ao sistema de medição (Figura 4.40 (d)). Os resultados para cada matriz foram obtidos por meio da média dos resultados de três corpos de prova. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM C1202 (2010). Os valores das cargas são classificados conforme a Tabela 3.20. O valor da corrente, para cada corpo de prova, foi calculado de acordo com a Equação 4.10.

$$Q=900.(I_{0+} + 2.I_{30} + 2.I_{60} + \dots + I_{360}) \quad \text{Equação (4.16)}$$

onde:

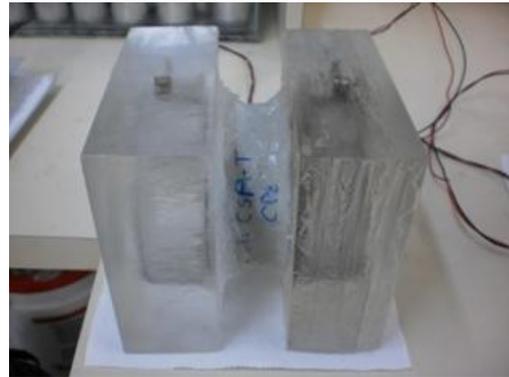
Q é a carga elétrica, em coulombs;

Q é a carga elétrica, em coulombs;

I_n é corrente elétrica em n minutos depois de aplicada a tensão, em Ampères.



(a) Saturação dos corpos de prova



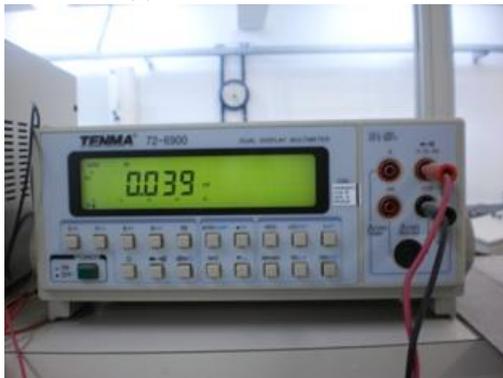
(b) Discos colados com silicone



(c) Células de acrílico



(d) Capacitor com 60V



(e) Medidor de voltagem



(f) Ligação dos eletrodos ao capacitor

Figura 4.40 – Ensaio de penetração acelerada de íons cloreto.

1.20.9.4 Avaliação estatística dos resultados

As propriedades referêntes aos ensaios realizados foram avaliadas com no mínimo 3 determinações através de análise estatística para validação dos resultados experimentais. Foi utilizado a análise de variância (ANOVA) para a comparação dos diferentes tratamentos e utilizado o software OriginPro 8. O nível de probabilidade foi de 5% ($p < 0,05$), pelo teste de comparação de médias de Tukey baseado na Diferença Mínima Significativa (DMS).

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

1.21 PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS CAA'S E CAAFA'S

São relatados os resultados dos ensaios reológicos realizados com os matrizes autoadensáveis de referência e matrizes autoadensáveis reforçadas com fibras de aço. Foram determinadas as propriedades reológicas através dos ensaios de abatimento, espalhamento do tronco de cone, espalhamento do tronco de cone invertido, habilidade passante na caixa “L”, fluidez através do funil “V”, segregação através da coluna de segregação, ar incorporado, viscosidade plástica e tensão de cisalhamento através do reômetro BTRHEOM.

1.21.1 Abatimento, espalhamento, espalhamento no cone de Abrans invertido, tempo de escoamento e ar incorporado

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos ensaios de abatimento, de espalhamento do tronco de cone e de espalhamento do tronco de cone invertido, das matrizes autoadensáveis de referência.

Tabela 5.1 – Valores para os ensaios de abatimento, espalhamento do tronco de cone, espalhamento do tronco de cone invertido, e ar aprisionado

Misturas	Abatimento (mm)	Espalhamento do tronco de cone (mm)	Espalhamento do tronco de cone invertido (mm)	Tempo de escoamento t_{500} (s)	Ar incorporado (%)
MBG	270	630	600	5,9	4,5
MSP	280	690	695	4,3	4,2
MSJ	280	685	690	4,5	4,1
MBG50	270	625	630	7,3	4,3
MSP 50	280	675	680	5,0	4,3
MSJ 50	275	670	675	5,5	4,3
MBG75	265	610	615	8,6	5,2
MSP 75	275	665	670	6,5	3,9
MSJ 75	275	650	650	7,5	4,3
MBG100	265	570	580	9,4	5,1
MSP 100	275	660	665	7,0	4,1
MSJ 100	270	640	655	8,5	4,3

De acordo com a Tabela 5.1, o abatimento do tronco de cone foi maior que 250 mm, dentro dos valores de referência para concretos autoadensáveis. A Figura 5.1 ilustra uma correlação entre os valores de espalhamento obtidos para as 12 misturas produzidas. Percebe-se que as misturas contendo seixo de rio obtiveram maiores abatimentos do que as misturas contendo brita.

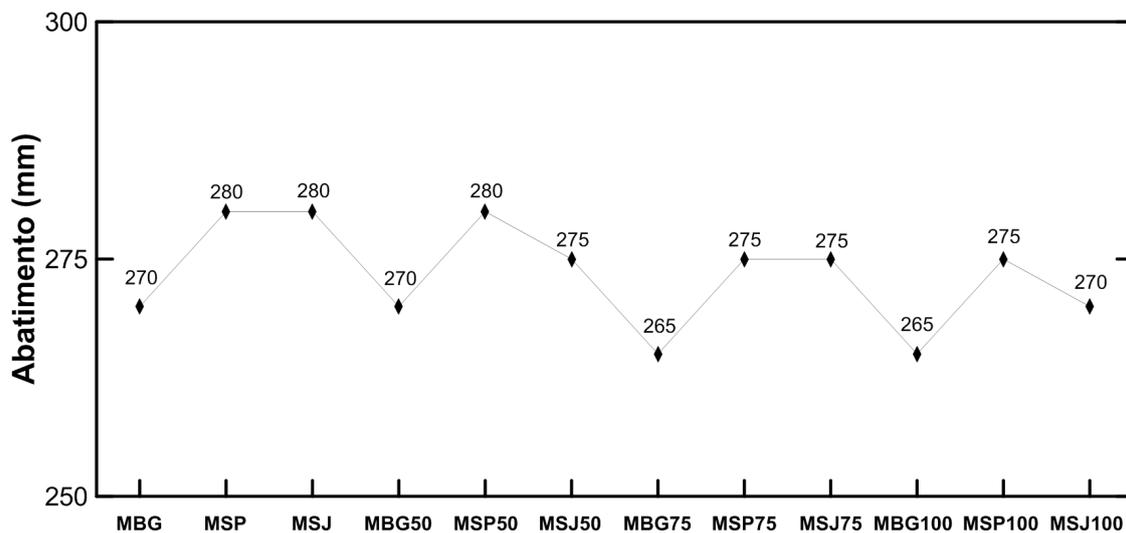
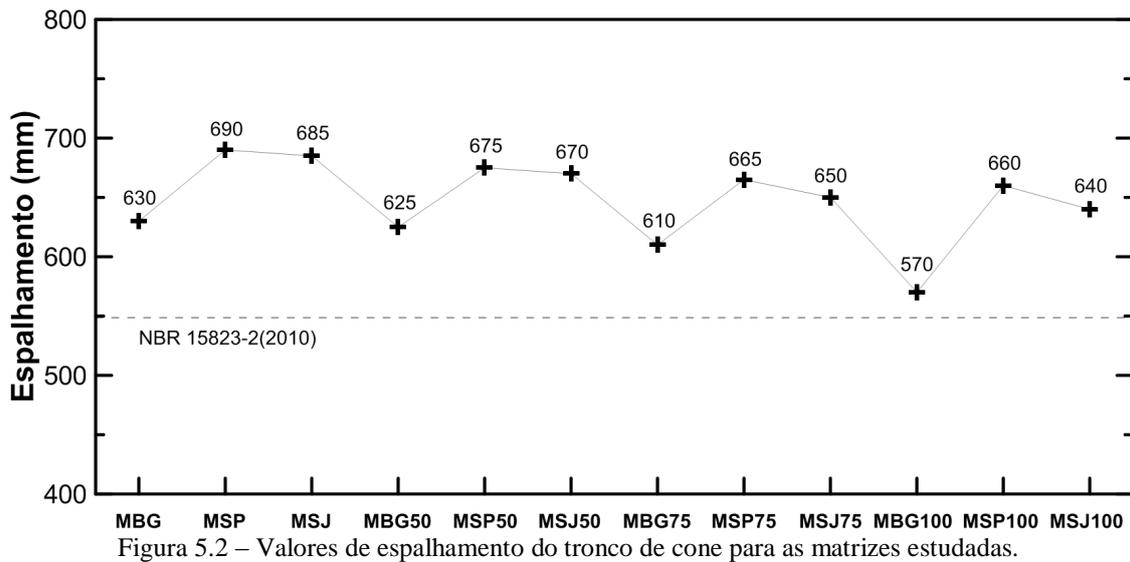
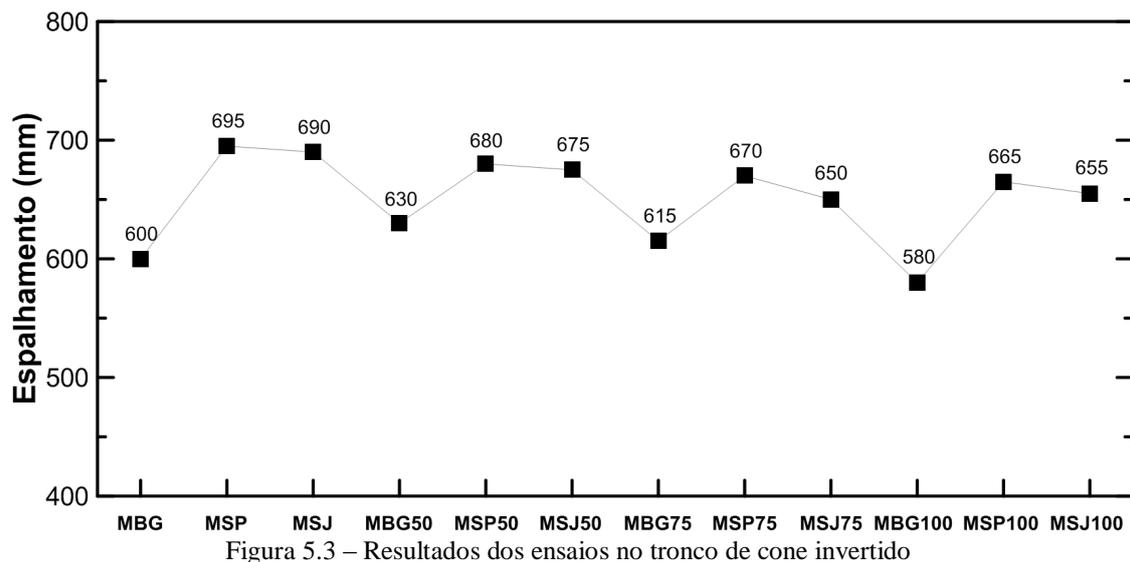


Figura 5.1 – Valores de abatimento para as matrizes estudadas.

O espalhamento do tronco de cone (Figura 5.2) para concretos com brita, recebeu classificação com base na NBR 15823-2 (2010) como classe SF1 (550mm a 650mm) e para o seixo rolado SF2 (660mm a 750mm). Os valores de espalhamento obtidos experimentalmente evidenciaram melhores desempenhos reológicos para as misturas seixo de rio em comparação às misturas contendo brita.



Para o espalhamento no cone invertido (Figura 5.3), os resultados encontram-se na faixa de valores superior a 500 mm. Assim como no espalhamento do tronco de cone, as misturas contendo seixo rolado obtiveram melhores desempenhos reológicos em comparação às misturas contendo brita.



Os resultados apresentados na Tabela 5.1, indicam que tanto o abatimento quanto o espalhamento com o tronco de cone e espalhamento com o tronco de cone invertido do concreto confeccionado com seixo de rio são maiores que os observados para o concreto produzido com brita (acréscimos variando de 4 – 18%).

A Figura 5.4 mostra os valores de viscosidade plástica (t_{500}), segundo a NBR 15823-2 de 2010, todas as misturas são classificadas como classe VS2 ($> 2s$) com menores tempo de escoamento para as misturas contendo o seixo de rio.

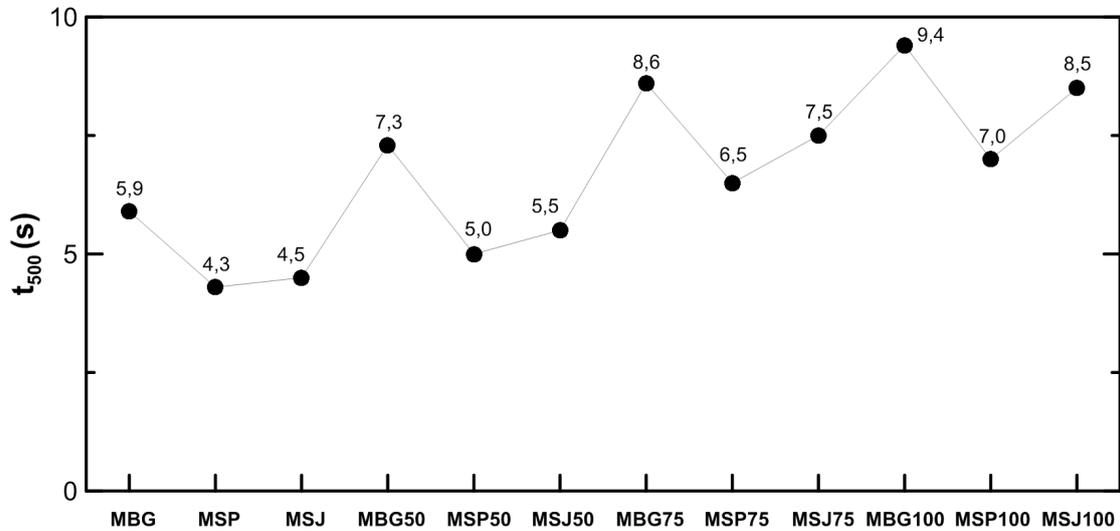


Figura 5.4 – Resultados dos ensaios para (t_{500})

O concreto produzido com seixo de rio (Figura 5.5) obteve menores teores de ar aprisionado do que os confeccionados com brita com exceção do MBG50 cujos valores foram iguais.

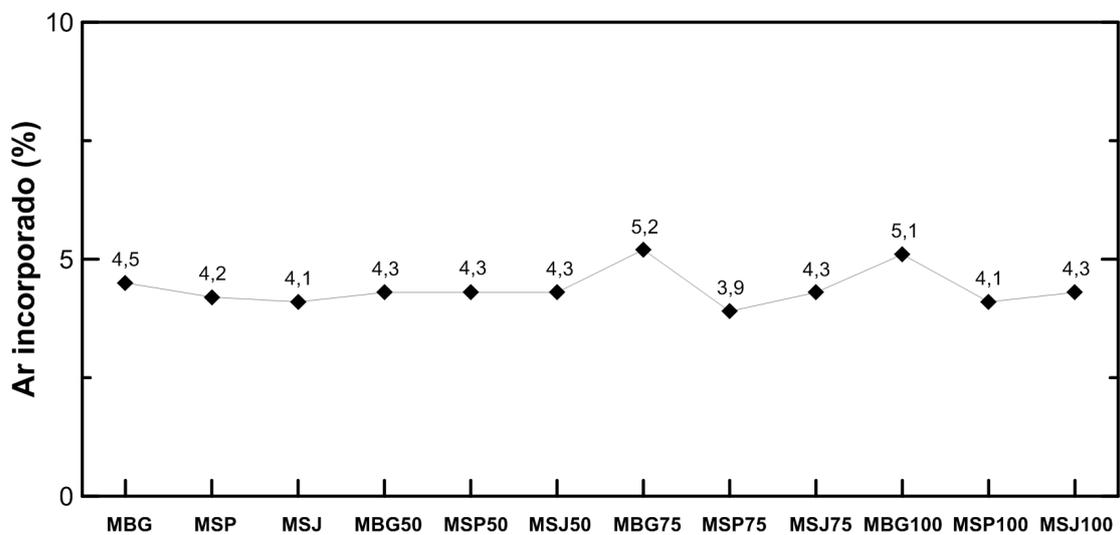


Figura 5.5 – Resultados dos ensaios no pressômetro

Com relação aos valores de t_{500} e teor de ar aprisionado, reduções de 27% e 7%, respectivamente, são observadas quando se usa o seixo em substituição à brita. A autoadensabilidade foi conseguida, tanto para as matrizes de referência quanto para as matrizes com inclusão de frações volumétricas de fibras de aço. Isso foi possível devido ao refinamento da matriz com a inclusão de sílica ativa e cinza volante em substituição parcial ao cimento utilizado. A utilização do superplastificante tornou possível reduzir a água de amassamento da mistura.

O desempenho reológico dos concretos confeccionados com seixo rolado nos parâmetros acima mencionados foram melhores que os concretos produzidos com brita. Isso se deve à forma esférica, menor angularidade e textura mais lisa do seixo de rio. A Figura 5.6 (a) mostra a relação entre o abatimento *versus* o índice de reforço e a Figura 5.6 (b) mostra o espalhamento *versus* índice de reforço utilizados nas misturas com brita e seixo de rio. Percebe-se que na comparação das três misturas, redução no abatimento para o MBG e MSP quando o índice de reforço aumentou de 33 para 48. Para o MSJ, também houve redução, mas quando o índice passou de 0 para 33.

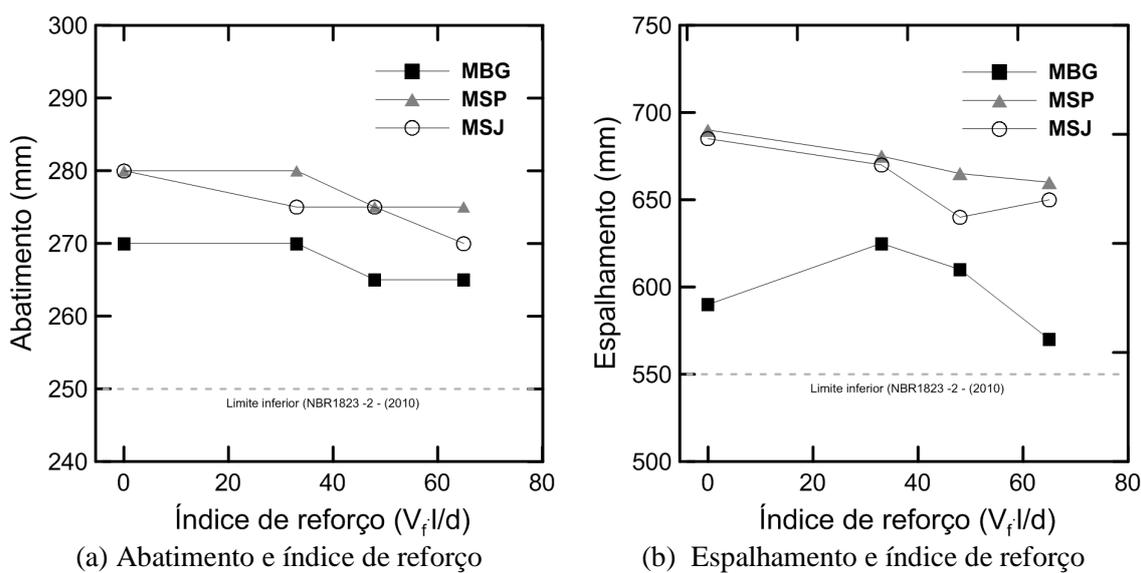


Figura 5.6 – Relação abatimento, espalhamento *versus* índice de reforço

1.21.2 Anel J, caixa L, funil V e coluna de segregação

Tabela 5.2 – Valores para os ensaios de anel J, caixa L, funil V e coluna de segregação, das misturas realizadas

Misturas	Anel J (mm)	Caixa L H_2/H_1			Funil V (s)	Coluna de segregação (%)
		1 barra	2 barras	3 barras		
		MBG	50	0,9		
MSP	10	1,0	1,0	0,9	10,5	19,1
MSJ	10	1,0	1,0	0,9	10,7	19,2
MBG50	55	0,8	0,8	0,6	16,9	–
MSP50	15	0,9	0,9	0,8	12,7	–
MSJ50	20	0,9	0,9	0,8	13,5	–
MBG75	80	0,8	0,7	0,3	31,5	–
MSP75	45	0,9	0,9	0,5	17,0	–
MSJ75	50	0,9	0,9	0,5	18,0	–
MBG100	90	0,7	0,3	Obstrução	33,3	–
MSP100	75	0,9	0,9	0,33	20,5	–
MSJ100	70	0,9	0,8	0,33	22,5	–

De acordo com a Tabela 5.2 os resultados obtidos para o anel J indicam que as matrizes contendo seixo de rio sem fibras de aço, podem ser classificadas como PJ2, indicada para a maioria das aplicações correntes utilizadas em elementos estruturais com espaçamento de armadura entre 60mm a 80mm (quando os valores para a caixa L, $H_2/H_1 \geq 0,80$ com três barras).

As matrizes contendo brita, foram classificadas como PJ1, indicada para a maioria das aplicações correntes utilizadas em elementos estruturais com espaçamento de armadura entre 80mm a 100mm (quando os valores para a caixa L, $H_2/H_1 \geq 0,80$ com duas barras). Na Figura 5.7 pode-se verificar que as misturas contendo seixo de rio apresentaram valores inferiores as misturas contendo brita.

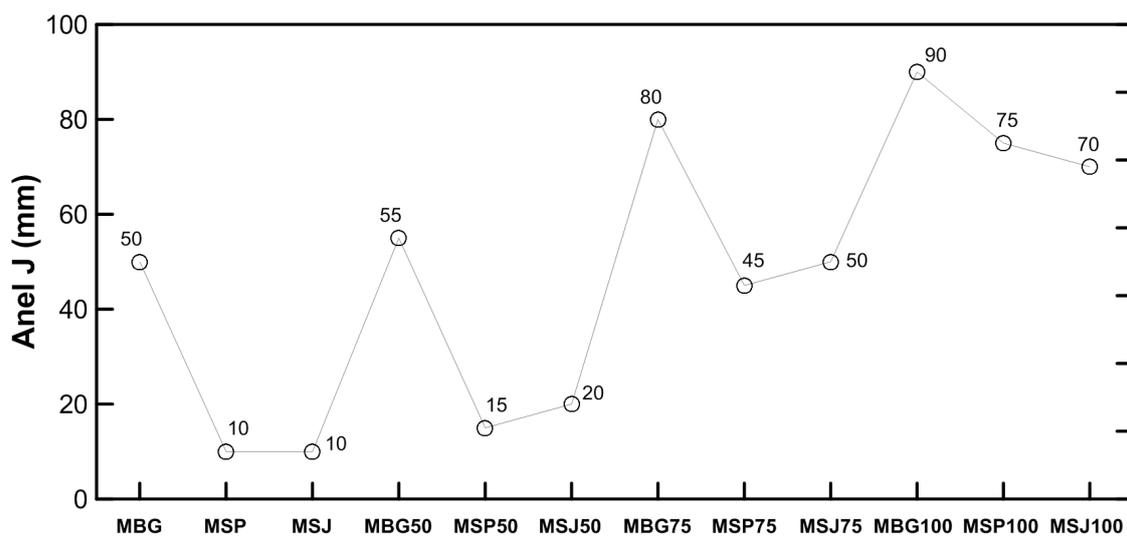


Figura 5.7 – Resultados dos ensaios no anel J

Os valores dos ensaios para a caixa L (Tabela 5.2) indicam que os concretos MSJ e MSP obtiveram uma relação H_2/H_1 entre 0,9 e 1 para as três situações estudadas (presença de uma, duas e três barras no molde). No caso do concreto MBG, observou-se decréscimo do fluxo para 1 e 2 barras e obstrução para 3 barras. A correlação entre as matrizes pode ser observada através da Figura 5.8.

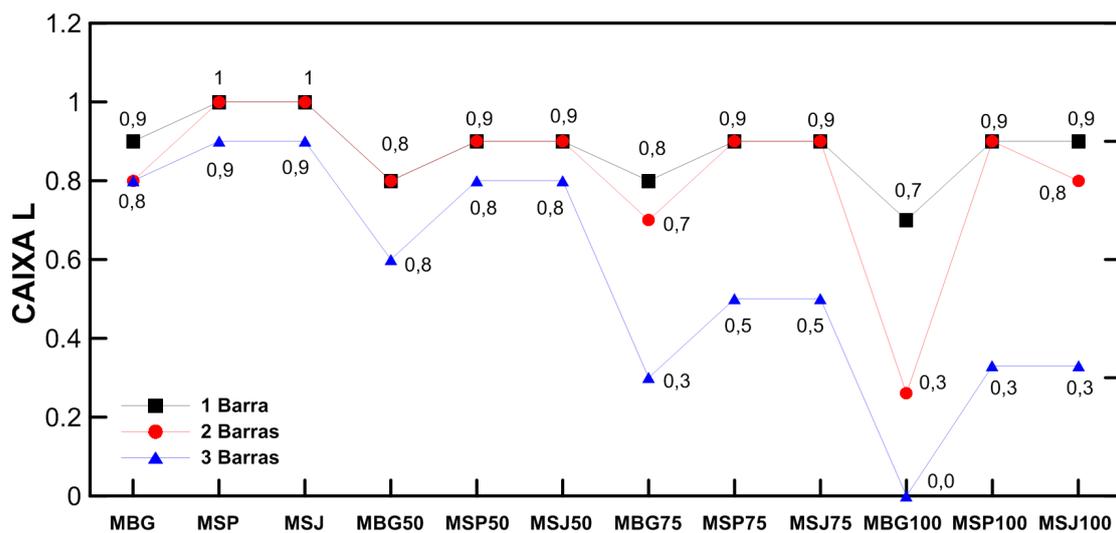


Figura 5.8 – Resultados dos ensaios na caixa L

Os valores de tempo de fluidez do funil V (Tabela 5.2) para MBG, foram cerca de 34% maior MSP e 33% maior que MSJ. A Figura 5.9 mostra a correlação entre as matrizes estudadas.

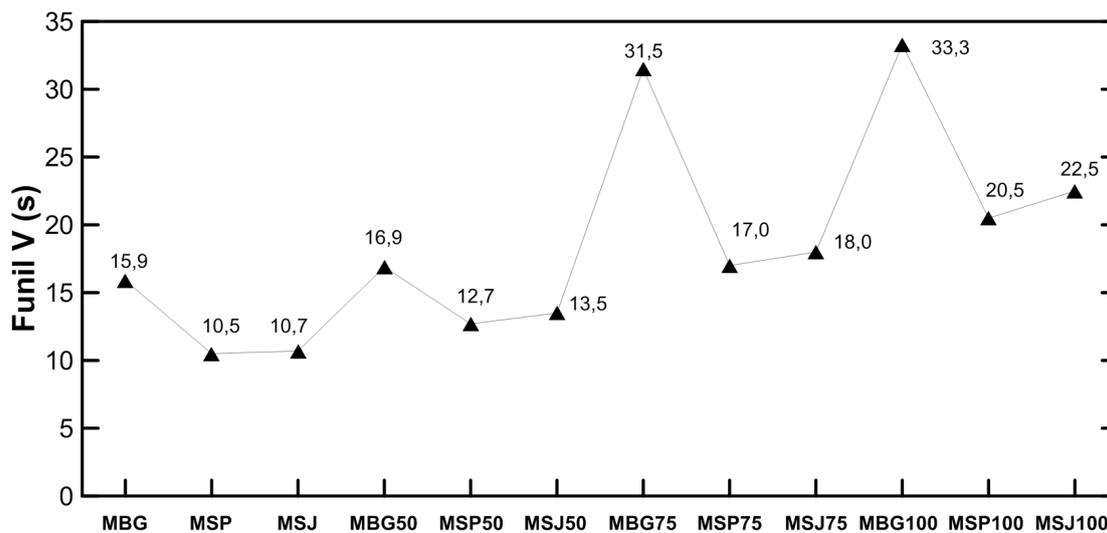


Figura 5.9 – Resultados dos ensaios no funil V

Embora os testes da coluna de segregação (Tabela 5.2) mostrarem uma considerável porcentagem de segregação para MSP e MSJ, com valores respectivamente de 19,1% e 19,2, ainda ficaram dentro dos limite estabelecidos pela norma brasileira ($SR1 \leq 20$). O gráfico apresentado na Figura 5.10 apresenta a diferença entre as matrizes.

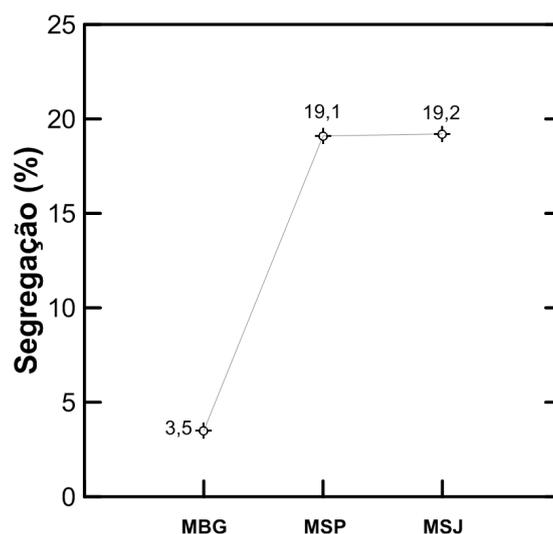


Figura 5.10 – Resultados dos ensaios na coluna de segregação

A Figura 5.11 mostra a relação a razão H_2/H_1 e o índice de reforço ($V_f.l/d$), nos ensaios na caixa “L” para as misturas MBG, MSP e MSJ. Observa-se que com o aumento do índice do reforço da mistura, houve redução na habilidade passante do concreto autoadensável com fibras de aço.

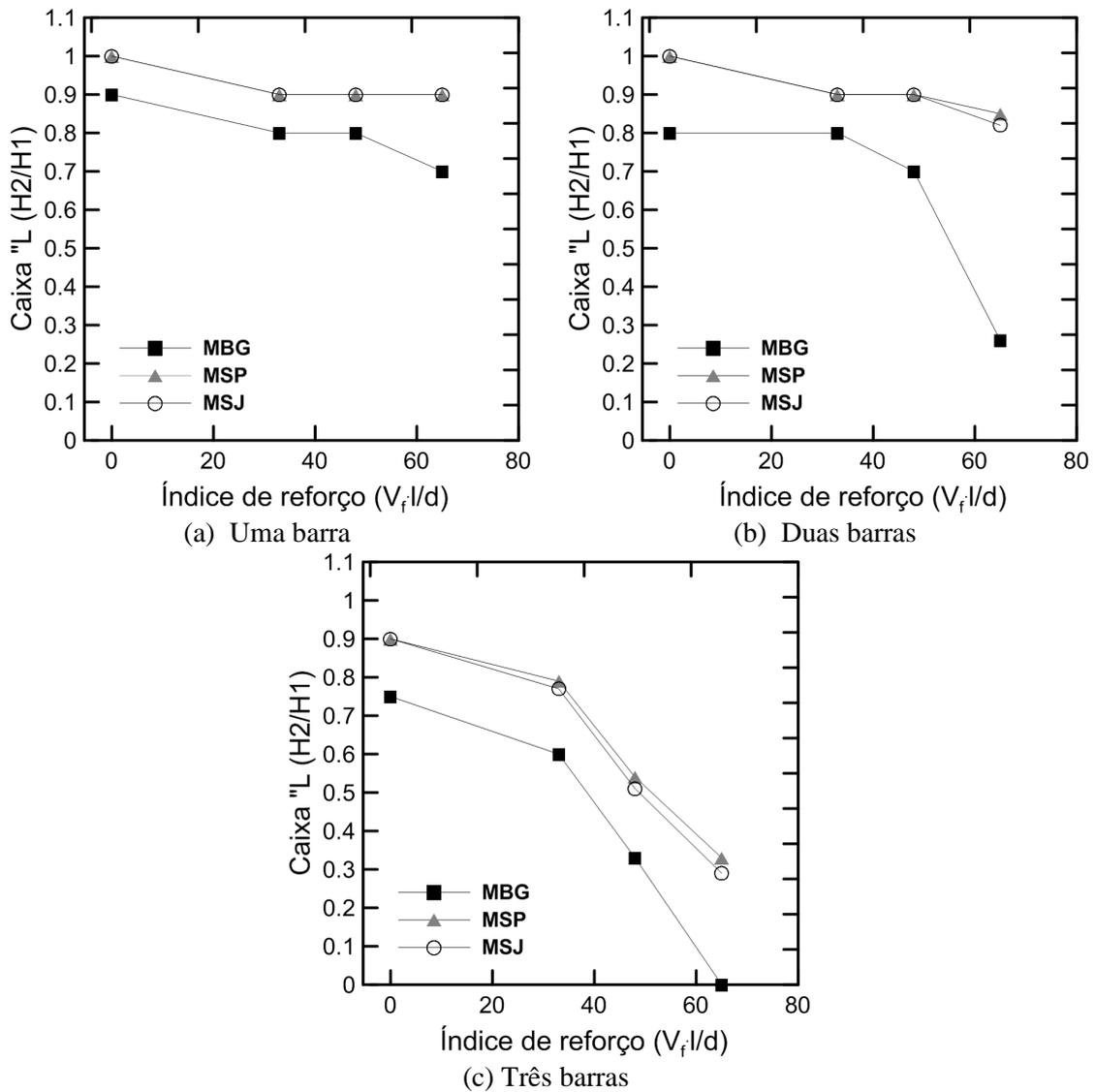


Figura 5.11 – Relação entre a razão $H2/H1$ versus índice de reforço

A figura 5.12 apresenta a relação de tempo de fluidez e índice de reforço. Observa-se que com o aumento do índice de reforço, aumentou também os tempos de fluidez para todas as misturas.

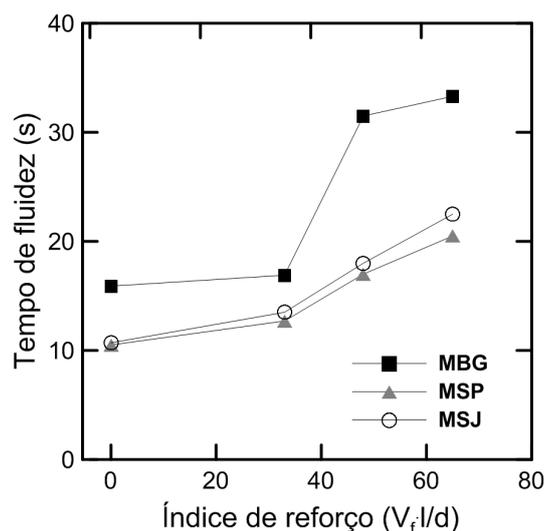


Figura 5.12 – Relação entre tempo de fluidez *versus* índice de reforço

1.21.3 Comportamento reológico das matrizes utilizando reômetro BTRHEOM

Os valores encontrados para a tensão de escoamento e viscosidade plástica estão apresentados na Tabela 5.3. Os gráficos torque *versus* velocidade de rotação das misturas das matrizes produzidas, foram obtidos a partir dos ensaios realizados no reômetro BTRHEOM, são apresentados nas Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16.

As curvas foram ajustadas aos dados experimentais através de regressão linear, de acordo com o modelo de Bingham. As misturas apresentaram boas correlações (R^2 de 0,99 a 0,95). A Figura 5.13 compara as curvas referentes às matrizes MBG, MSP e MSJ. As curvas obtidas por regressão linear se mostraram bem ajustadas aos pontos experimentais.

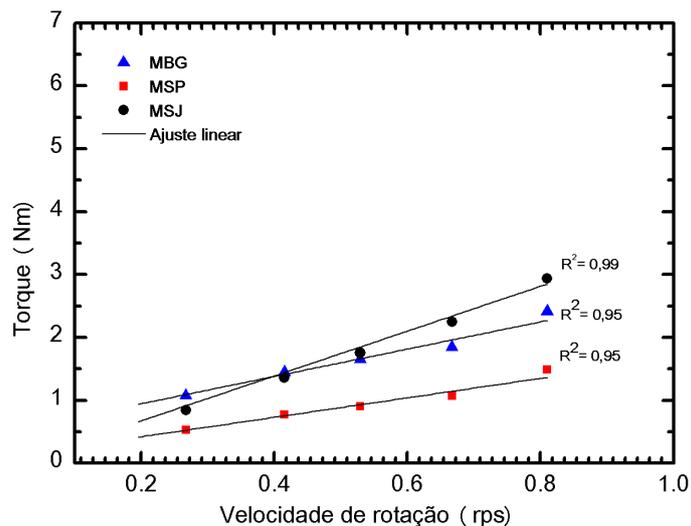


Figura 5.13 – Relação entre torque e velocidade de rotação das matrizes autoadensáveis de referência

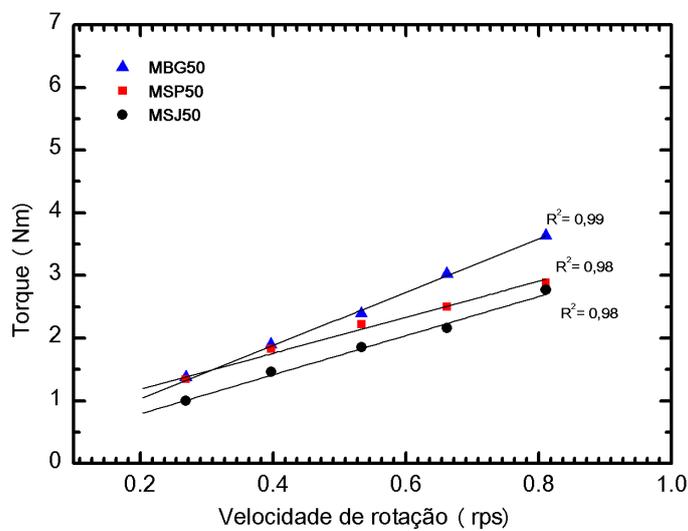


Figura 5.14 – Relação entre torque e velocidade de rotação das matrizes autoadensáveis com inclusão de 0,50% de fibras de aço

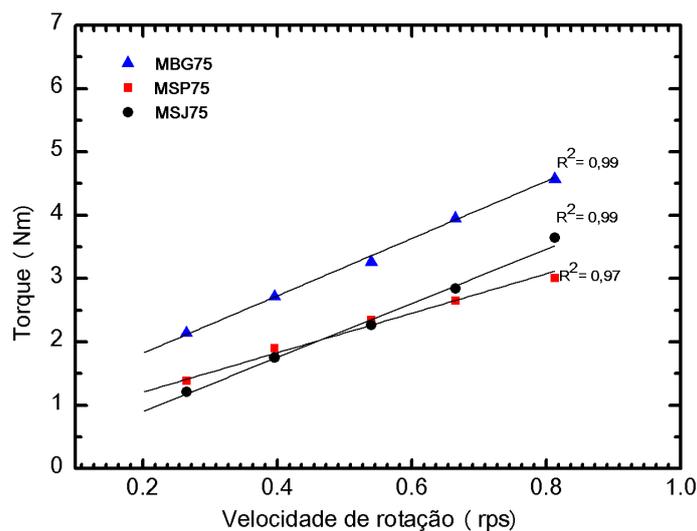


Figura 5.15 – Relação entre torque e velocidade de rotação das matrizes autoadensáveis com inclusão de 0,75% de fibras de aço

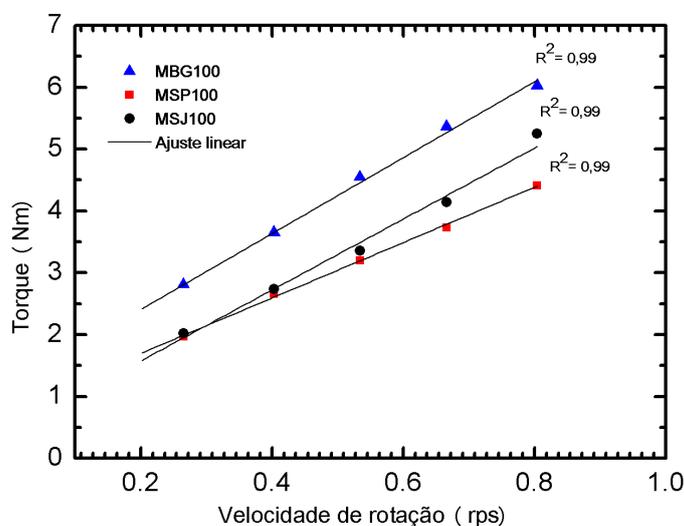


Figura 5.16 – Relação entre torque e velocidade de rotação das matrizes autoadensáveis com inclusão de 1,0% de fibras de aço

Através do modelo de Bingham, foram calculadas a viscosidade plástica e a tensão de escoamento das misturas cujos valores estão listados na Tabela 5.3. A adição de fibra indica um aumento tanto na tensão de escoamento quanto na viscosidade plástica das misturas, com exceção da mistura MSP75. Para a misturas com brita, o emprego de teores de fibra de aço de 0,50%, 0,75%, e 1%, elevou a tensão de escoamento da mistura respectivamente para 49 %, 90 % e 139 % e a viscosidade plástica em 60%, 105%, e 178%. A mistura MSP obteve aumentos nessas mesmas frações de 26%, 9%,

70% respectivamente e aumento da viscosidade plástica de 84%, 105% e 185% respectivamente. Para a MSJ, a tensão de escoamento obteve um aumento de 9%, 123% e 620% respectivamente e viscosidade plástica de 6%, 17% e 47% respectivamente. Essas diferenças podem ser visualizadas na Figura 5.17.

Tabela 5.3 – Resultados de tensão de escoamento e viscosidade plástica das matrizes

Matrizes	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)
MBG	136	97
MSP	133	69
MSJ	43	146
MBG50	203	156
MSP50	168	127
MSJ50	47	137
MBG75	258	199
MSP75	145	142
MSJ75	96	171
MBG100	326	270
MSP100	226	197
MSJ100	310	214

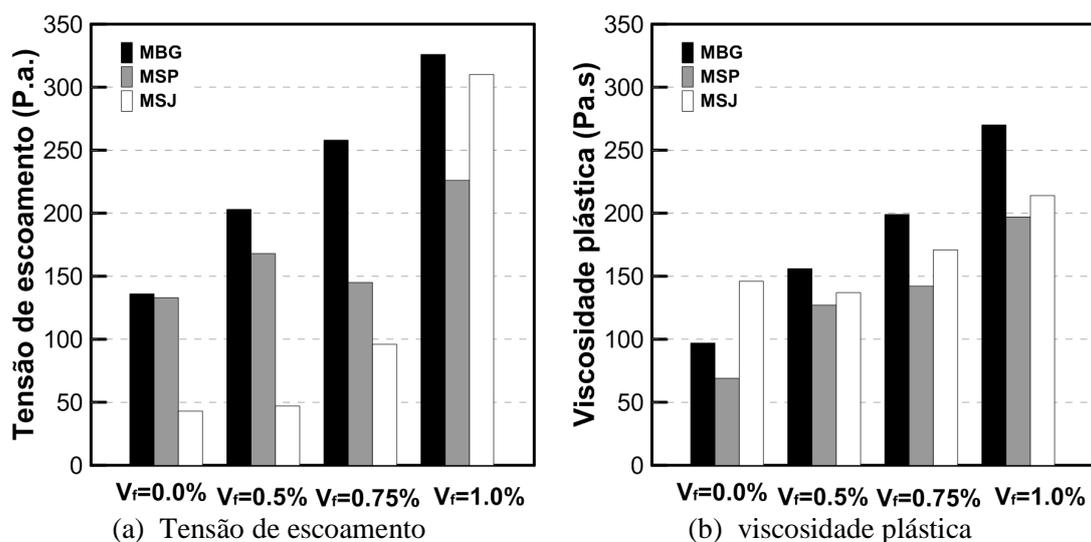


Figura 5.17 – Relação entre tensão de escoamento, viscosidade plástica e índice do reforço

1.22 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CAA'S E CAAFA'S

São apresentados e analisados, neste capítulo, os resultados obtidos a partir dos ensaios compressão, flexão, tração direta e tração por compressão diametral matrizes autoadensáveis produzidas. Para cada tipo de teste, foram ensaiados três corpos de prova de cada concreto.

1.22.1 Comportamento à compressão das matrizes

A Figura 5.18 apresenta as curvas típicas tensão *versus* deformação para o MBG, MSP e MSJ. Comparando as três curvas, percebe-se que para os dois seixos, a resistência e a deformação foram menores que a brita.

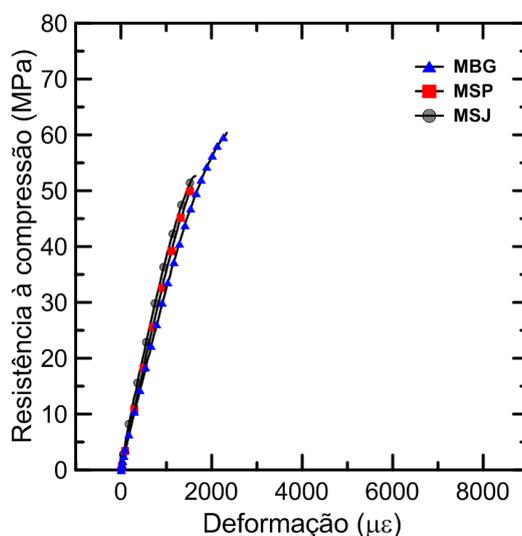


Figura 5.18 – Curvas típicas, tensão *versus* deformação, obtidas em ensaios de compressão aos 28 dias de matrizes de referências

A Tabela 5.4 apresenta os valores médios e o coeficiente de variação (CV) de resistência à compressão (f_c), deformação axial (ϵ_a) e módulo de elasticidade (E). A matriz MBG apresentou resistência à compressão média de 60,2 MPa enquanto que para o MSP e MSJ as resistências foram respectivamente de 51,1MPa e 51,4MPa. (redução de cerca de 15% e 10% respectivamente). O módulo de elasticidade do MSP foi, por sua vez, cerca de 14% maior que o observado para a matriz MBG. A maior diferença no entanto é observada na deformação correspondente à tensão de ruptura, já

que a presença do seixo rolado reduziu a deformação axial de pico em relação à matriz MBG em cerca de 32%.

Tabela 5.4 – Resultados (média e coeficiente de variação) da resistência à compressão aos 28 dias, deformação axial e módulo de elasticidade das matrizes de referência

Matriz	Resistência de à compressão (MPa)		Deformação axial de pico ($\mu\epsilon$)		Módulo de elasticidade (GPa)	
	f_c	CV (%)	ϵ_a	CV (%)	E	CV (%)
MBG	60,20	2,20	2352,90	6,40	32,30	0,80
MSP	51,10	1,40	1596,10	5,20	36,30	2,80
MSJ	54,40	5,02	1674,20	9,70	37,90	7,70

Os valores de resistência à compressão, deformação axial aos 28 dias das matrizes MBG MSP e MSJ foram comparados entre si através do teste estatístico ANOVA. A matriz MBG apresentou diferença significativa em relação as matrizes MSP e MSJ em relação à resistência à compressão e deformação axial. Entretanto esse diferença não foi significativa quando comparado apenas entre as matrizes MSP e MSJ. Com relação ao módulo apenas de elasticidade, após o teste estatístico, apenas as matrizes MBG e MSJ foram diferentes.

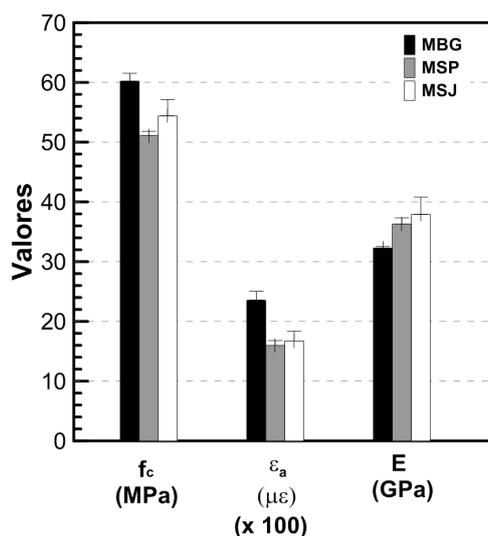


Figura 5.19 – Valores de resistência à compressão, deformação axial e módulo de elasticidade das matrizes de referência

Essa redução nos valores de resistência e deformação, pode estar associado ao fato de o seixo de rio ter menor aderência à matriz cimentícia devido o mesmo ter uma textura

superficial com menor rugosidade em relação a brita granítica (ver item 3.23). A Figura 5.19 mostra as médias e os desvios referente a Tabela 5.4.

O modo de fratura à compressão dos corpos de prova das matrizes de referência está apresentado na Figura 5.20. Nota-se que a ruptura é do tipo cisalhante em forma de coluna.

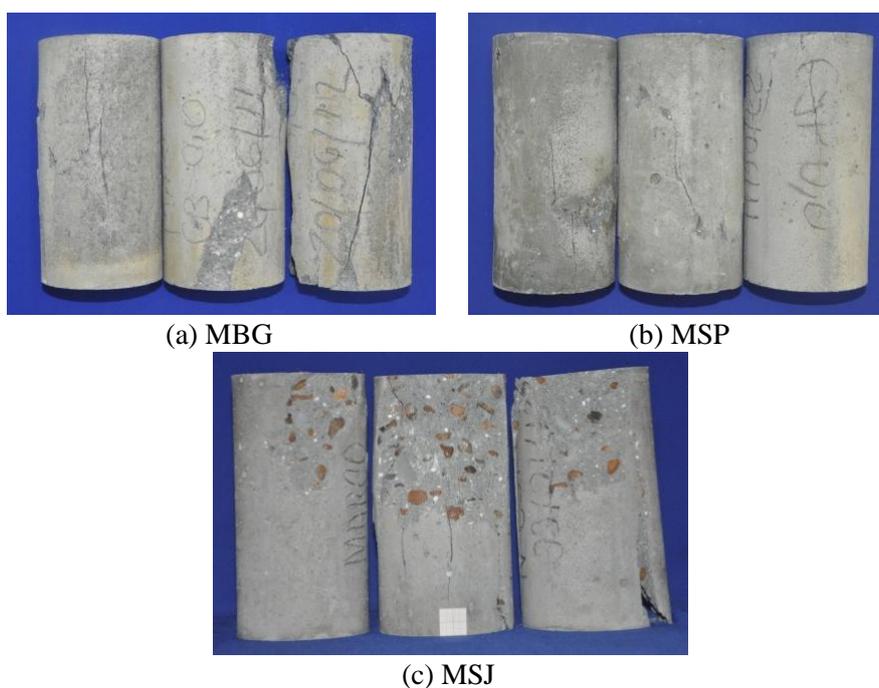


Figura 5.20 – Modo de fratura no ensaio de compressão das matrizes de referência

Através da Figura 5.21 pode-se observar as linhas de ruptura das matrizes estudadas, na matriz MBG, a ruptura passa pelo agregado, no caso da matriz MSP e MSJ há descolamento dos agregados e percebe-se que a linha de ruptura contorna o mesmo.

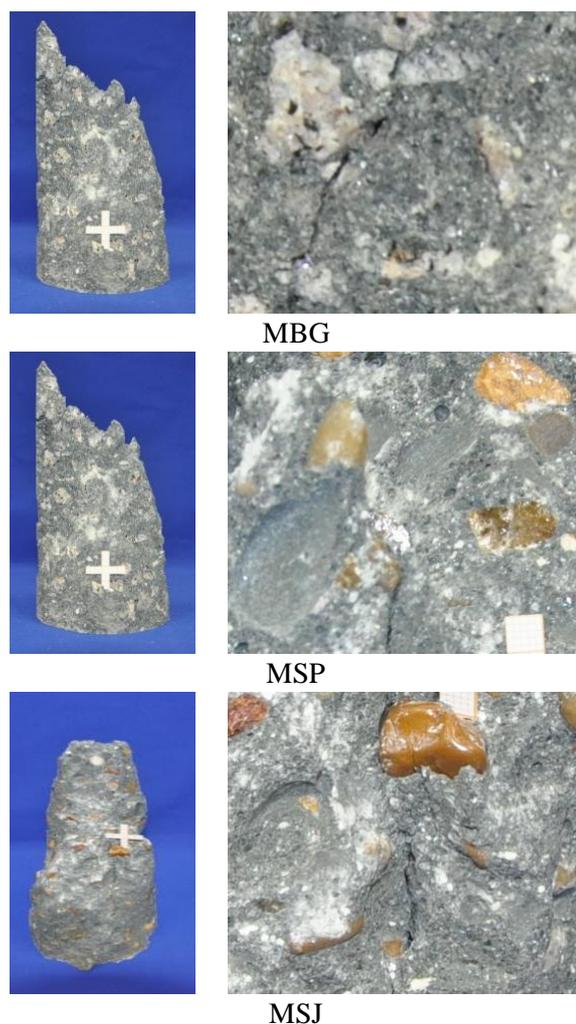


Figura 5.21 – Linha de ruptura dos corpos de prova submetidos a ensaios de compressão

1.22.2 Comportamento à compressão dos concretos fibrosos

As curvas típicas tensão *versus* deformação das matrizes com fibras de aço são mostradas na Figura 5.22, observa-se que o aumento da fração volumétrica das fibras de aço nas matrizes proporcionou ductibilidade ao concreto. Isto pode ser verificado comparando os ramos descendentes a partir da matriz MBG75. A queda de resistência pós pico foi gradativa, alcançando 5000 $\mu\epsilon$ para a matriz MBG75 e MBG100. A curva tensão-deformação das matrizes MSP e MSJ também apresentam um trecho linear elástico mais pronunciado que a das matrizes MBG.

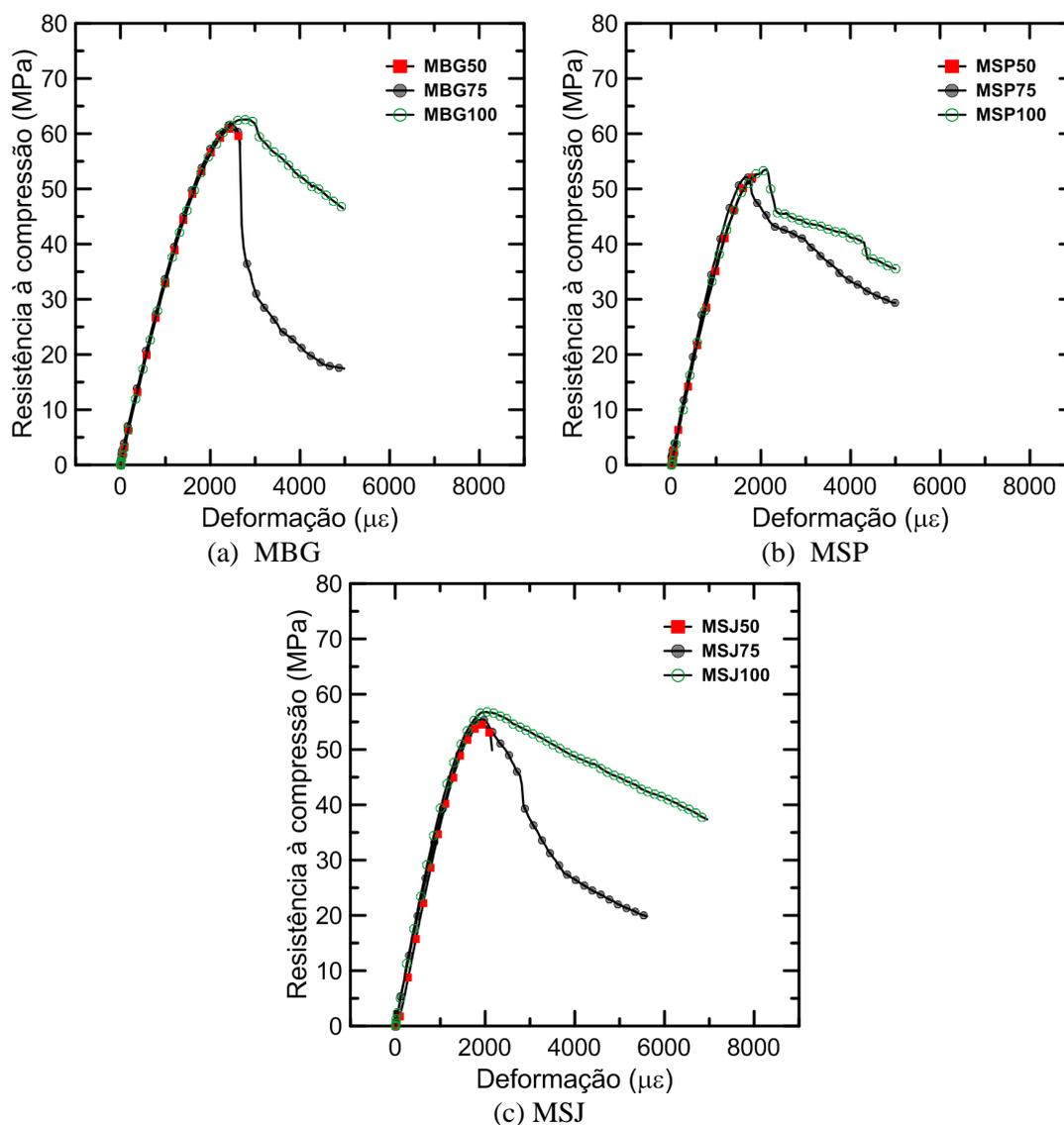


Figura 5.22 – Curvas típicas, tensão *versus* deformação, obtidas em ensaios de compressão das matrizes com fibras de aço aos 28 dias nas frações: 0,50%,0,75%,1,0%

Observando a Tabela 5.5 nota-se que a resistência a compressão das matrizes MBG100, MSP100 e MSJ100 aumentou respectivamente em 4%, 4,5% e 4% em relação as matrizes MBG, MSP, MSJ respectivamente. A deformação axial das matrizes MBG100, MSP100 e MSJ100 referente à primeira fissura, também apresentaram aumento relação às misturas de referência em 17% para MBG e 24% para MSP, MSJ. O módulo de elasticidade teve um acréscimo 5% nas matrizes MBG100, MSP100 e manteve-se contante para a matriz MSJ.

Tabela 5.5 – Resultados (média e coeficiente de variação) da resistência á compressão aos 28 dias, deformação axial e módulo de elasticidade das matrizes com fibras de aço

Mistura com brita de granito (BG)						
Matrizes	Resistência á compressão (MPa)		Deformação axial de pico ($\mu\epsilon$)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
	f_c	CV (%)	ϵ_a	CV (%)	E	CV (%)
MBG50	60,98	2,03	2466,67	2,72	33,49	0,87
MBG75	62,01	1,55	2456,67	4,46	33,24	1,62
MBG100	62,58	5,18	2833,56	7,98	33,89	1,20
Mistura com seixo de rio (SP)						
Matrizes	Resistência á compressão (MPa)		Deformação axial de pico ($\mu\epsilon$)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
	f_c	CV (%)	ϵ_a	CV (%)	E	CV (%)
MSP 50	52,03	0,95	1811,22	4,76	37,16	1,54
MSP 75	52,20	2,78	1690,67	6,41	37,76	3,99
MSP 100	53,53	3,24	2096,56	8,17	37,93	4,10
Mistura com seixo de rio (SJ)						
Matrizes	Resistência á compressão (MPa)		Deformação axial de pico ($\mu\epsilon$)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
	f_c	CV (%)	ϵ_a	CV (%)	E	CV (%)
MSJ50	54,52	3,21	1879,20	5,32	38,60	2,38
MSJ75	55,54	4,78	1910,12	5,89	38,36	4,04
MSJ100	56,83	3,24	2206,42	7,51	37,82	4,25

Os valores de resistência à compressão, deformação axial aos 28 dias das matrizes MBG50, MBG75 e MBG100 foram comparados entre si através da ANOVA. Não houve diferença significativa entre as matrizes com relação aos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Com relação a deformação axial, apenas foi detectado diferença significativa entre as matrizes MBG75 e MBG100. As matrizes MSP50, MSP75 e MSP100 também foram comparados entre si através da ANOVA. Não houve diferença significativa entre as matrizes com relação aos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Na deformação axial, as matrizes MBG75 e MBG100 obtiveram valores significativamente diferentes. As matrizes MSJ50, MSJ75 e MSJ100 quanto comparadas entre si através da ANOVA, não apresentaram diferença significativa com relação aos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade. A deformação axial apresentou valore

significativos apenas entre as matrizes MSJ50 e MSJ100. A Figura 5.23 mostra as médias e os desvios referente a Tabela 5.5.

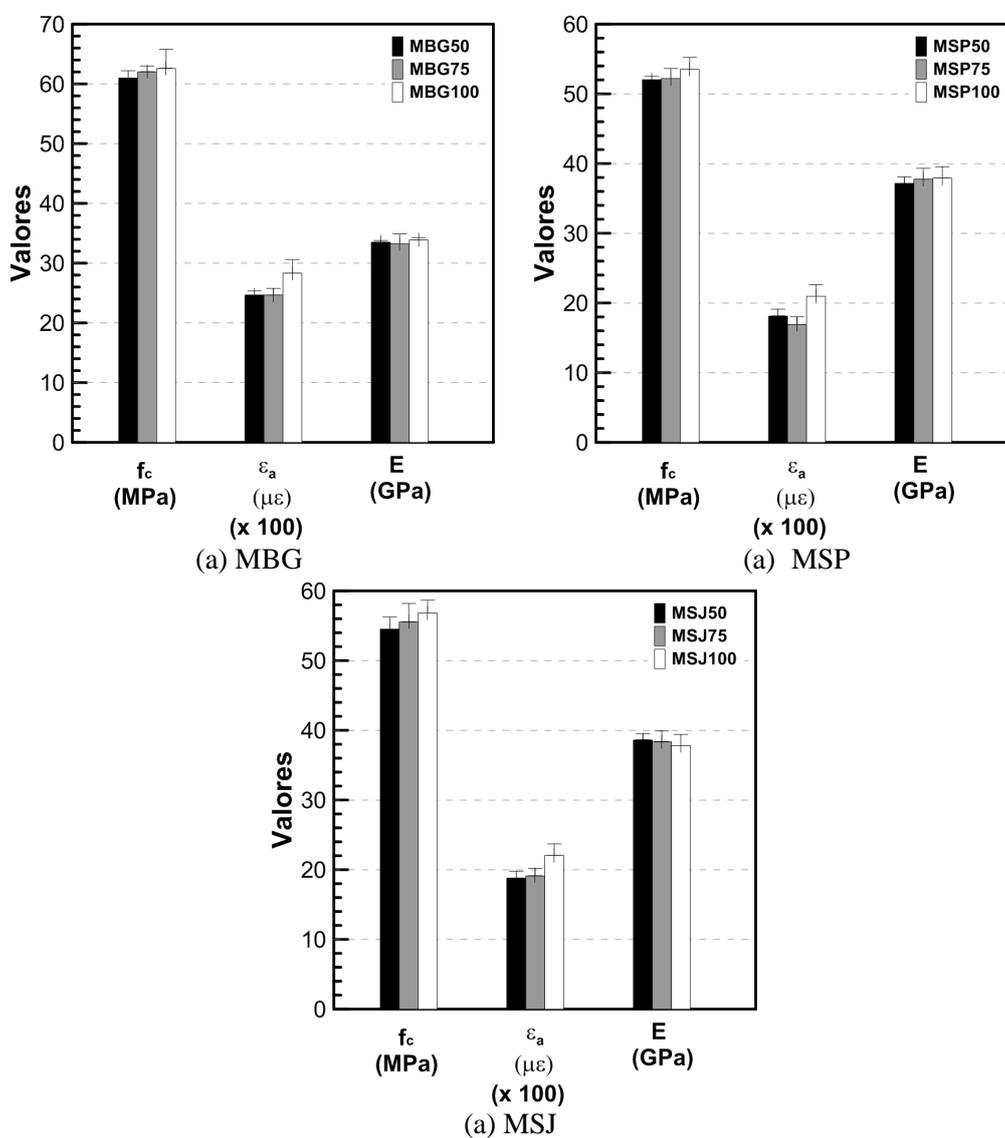


Figura 5.23 – Valores de resistência à compressão, deformação axial e módulo de elasticidade das matrizes contendo fibras de aço nas frações: 0,50%,0,75%,1,0%

A Figuras 5.24,5.25, 5.26, apresenta os modos de fratura das misturas de MBG, MSP e MSJ em cada fração volumétrica.

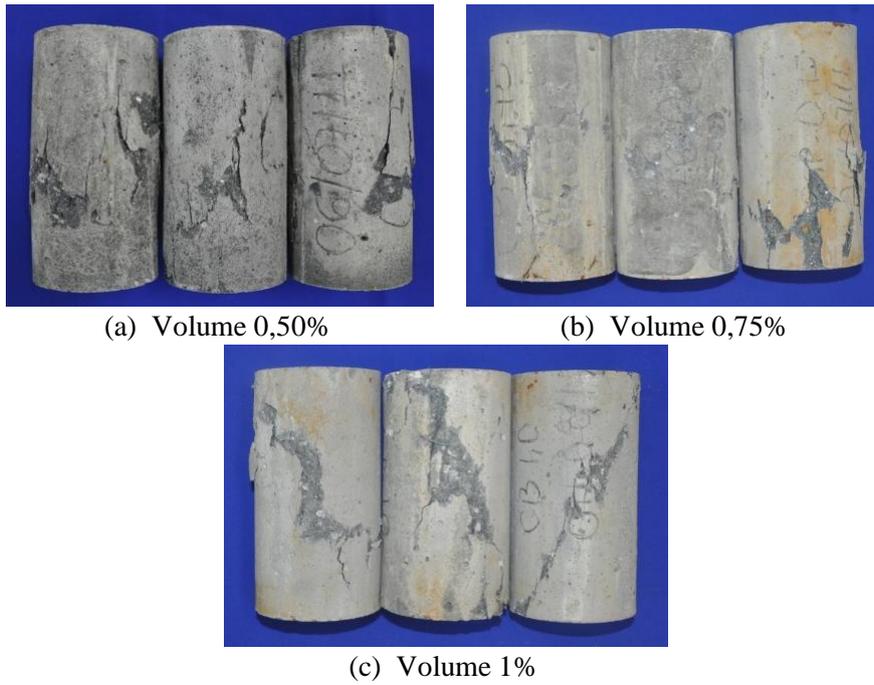


Figura 5.24 – Modo de fratura no ensaio de compressão da matriz MBG com fibras de aço

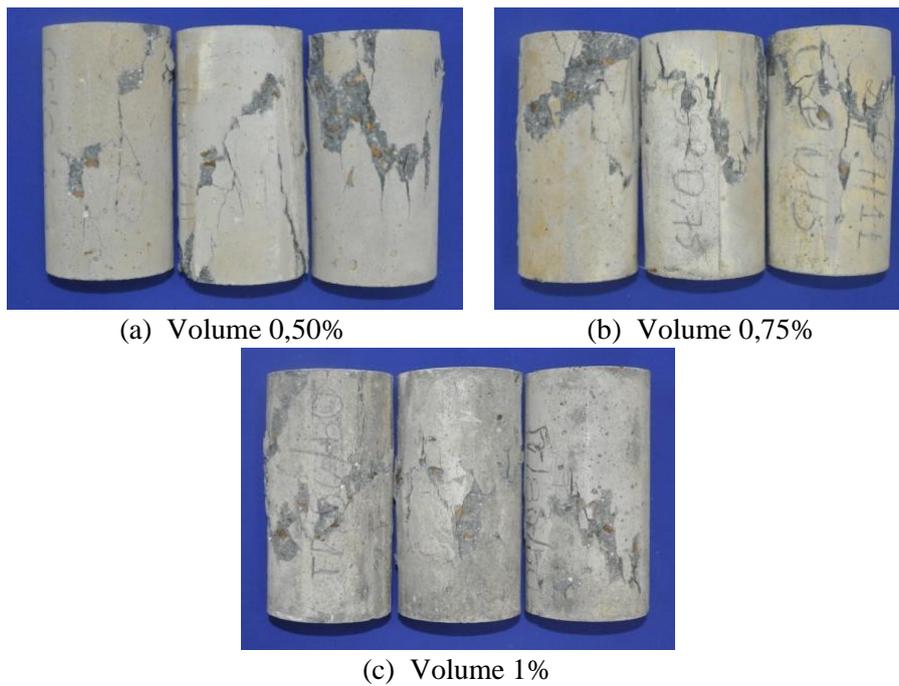


Figura 5.25 – Modo de fratura no ensaio de compressão da matriz MSP com fibras de aço

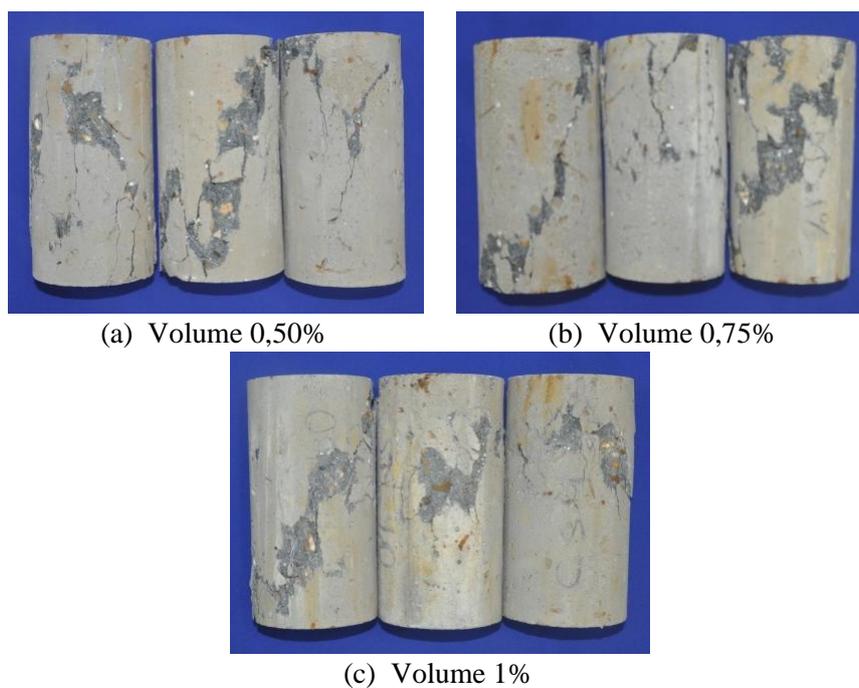


Figura 5.26 – Modo de fratura no ensaio de compressão da matriz MSJ com fibras de aço

1.22.3 Comportamento à flexão das matrizes de referência

As curvas carga *versus* deslocamento para as matrizes de referência são apresentados na Figura 5.27. As curvas das três matrizes não apresentaram diferenças quando comparadas entre si. A inclinação da curva da matriz MSP foi ligeiramente inferior às demais.

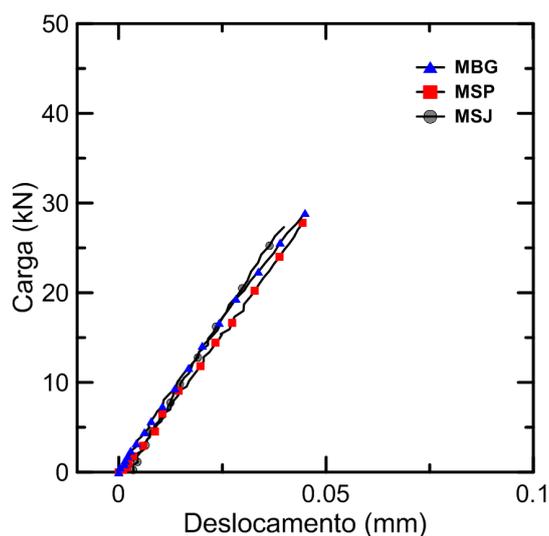


Figura 5.27 – Curvas típicas, carga *versus* deslocamento, obtidas em ensaios de flexão das matrizes de referência.

A Tabela 5.6 apresenta a tensão de ruptura (f_{f_rup}) e deslocamento na ruptura (δ_{f_rup}) obtidos para as matrizes de referência aos 28 dias. Observa-se que a carga de ruptura do MBG foi cerca de 9% maior que para o CSP e MSJ, enquanto que o deslocamento na ruptura do MBG foi 20% maior do CSP e MSJ.

Tabela 5.6 – Resultados (média e coeficiente de variação) da resistência á flexão e deslocamento aos 28 dias na ruptura das matrizes de referência

Misturas	Ruptura			
	f_{f_rup} (MPa)	CV (%)	δ_{f_rup} (mm)	CV (%)
MBG	8,90	0,60	0,05	2,81
MSP	8.12	6,96	0,04	6,05
MSJ	8.42	3,65	0,04	6,01

Esse comportamento guarda similaridade com os observados sob cargas de compressão uniaxial, indicando que a mistura com seixo rolado apresenta uma menor capacidade de deformação que o concreto com agregado britado.

Os valores de tensão de ruptura e deslocamento na ruptura das matrizes de referência para o ensaio de flexão, foram comparados entre si através do teste estatístico ANOVA. A matriz MBG apresentou diferença significativa em relação as matrizes MSP e MSJ para o deslocamento na ruptura, já para a tensão de ruptura os valores foram

estatisticamente iguais. A Figura 5.28 mostra as médias e os desvios referente a Tabela 5.6.

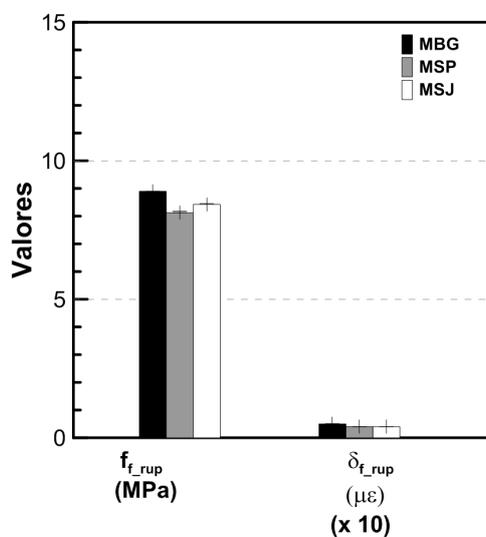


Figura 5.28 – Valores de resistência à flexão e deformação de ruptura para as matrizes de referência

A Figura 5.29, apresenta os modos de fratura na flexão das matrizes de referência. Verifica-se que a formação de uma fissura concentrou-se no terço central, com uma fissura, característica de concretos sem fibras. O tipo de agregado não alterou o padrão de fissuração das matrizes de referência.

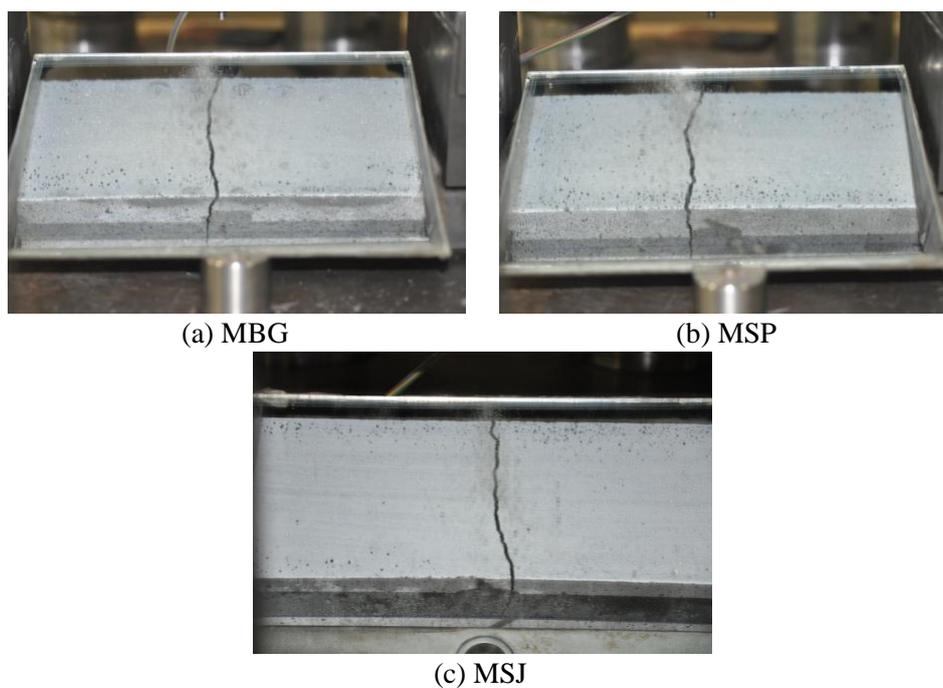


Figura 5.29 – Modo de fratura no ensaio de flexão das matrizes de referência

1.22.3.1 Comportamento à flexão das matrizes fibrosas

A Figura 5.30 apresenta as curvas típicas carga x deslocamento das matrizes com fibras de aço e agregado de brita e seixo de rio. Observa-se que o acréscimo de fibras de aço alterou o comportamento do concreto autoadensável de frágil para dúctil. Nota-se pelas curvas que as matrizes com fibras aumentarem os valores da carga, deslocamento e absorção de energia com incrementos de volume de fibras de aço.

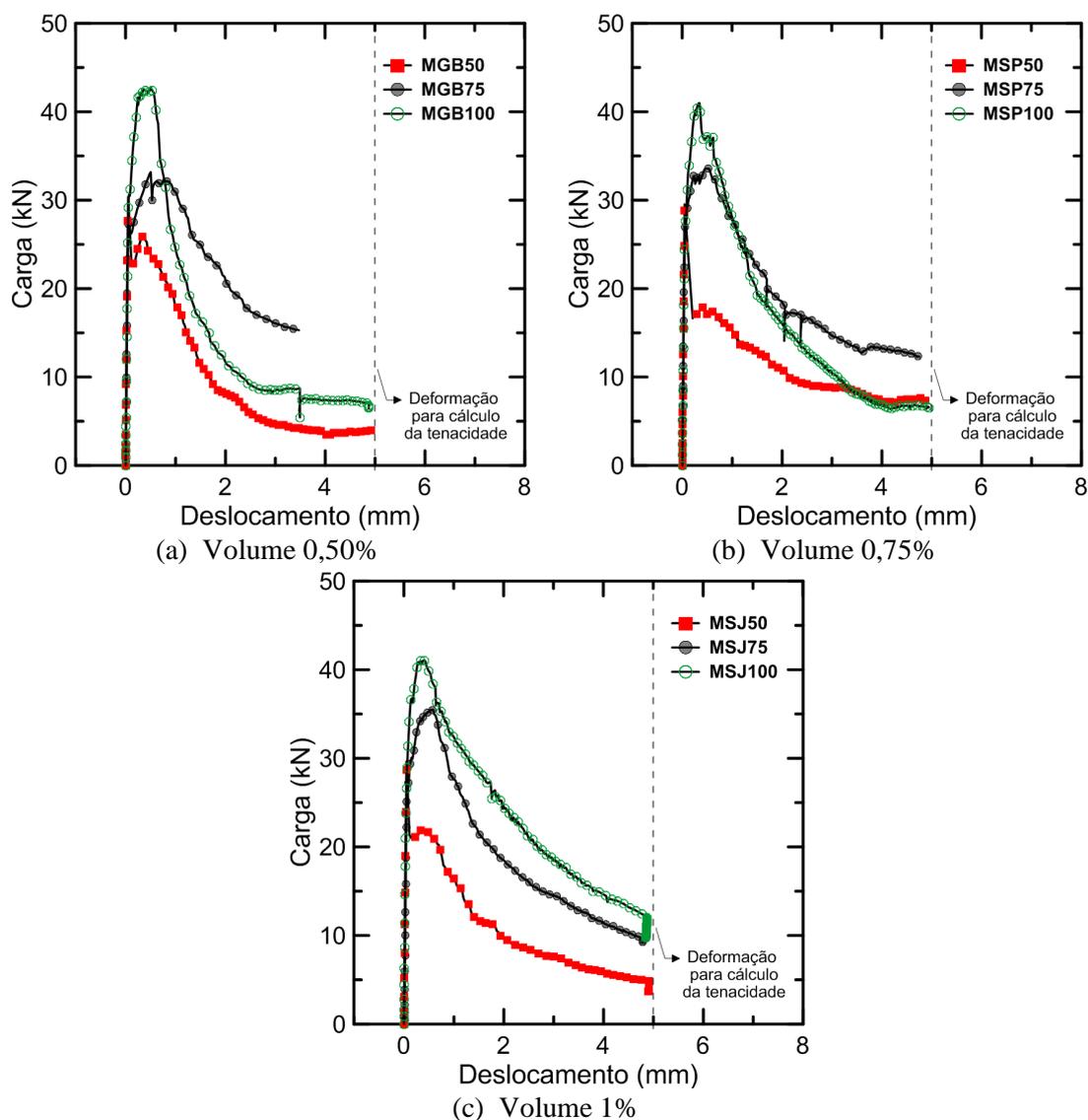


Figura 5.30 – Curvas típicas, carga *versus* deslocamento, obtidas em ensaios de flexão das matrizes com fibras de aço aos 28 dias nas frações: 0,50%,0,75%,1,0%

A Tabela 5.7 apresenta os valores médios e o coeficiente de variação (CV) para tensão de ruptura (f_{f-1}^a), deformação de primeira fissura (δ_{f-1}^a), tensão de ruptura (f_{f_rup}) e deformação de ruptura (δ_{f_rup}), obtidos para as matrizes com fibras de aço.

Tabela 5.7 – Resultados (média e coeficiente de variação), da resistência á flexão e deslocamento na flexão aos 28 dias, para a primeira fissura e ruptura de matrizes contendo volumes de fibras de aço nas frações : 0,50%,0,75%,1,0%

Mistura com brita de granito (BG)								
Misturas	Primeira fissura				Ruptura			
	$f_{f,1}^a$ (MPa)	CV (%)	$\delta_{f,1}^a$ (mm)	CV (%)	$f_{f,rupt}$ (MPa)	CV (%)	$\delta_{f,rupt}$ (mm)	CV (%)
MBG50	5,04	2,58	0,02	14,23	9,09	3,06	0,05	6,62
MBG75	5,58	3,28	0,03	14,13	10,10	8,40	0,60	9,42
MBG100	6,17	2,17	0,04	4,54	11,84	7,37	0,63	5,28
Mistura com seixo de rio (SP)								
Misturas	Primeira fissura				Ruptura			
	$f_{f,1}^a$ (MPa)	CV (%)	$\delta_{f,1}^a$ (mm)	CV (%)	$f_{f,rupt}$ (MPa)	CV (%)	$\delta_{f,rupt}$ (mm)	CV (%)
MSP 50	4,76	2,32	0,03	5,68	8,61	2,79	0,05	1,35
MSP 75	5,08	2,02	0,03	7,39	10,59	8,75	0,50	3,97
MSP100	5,31	1,37	0,03	7,38	12,72	5,08	0,34	3,23
Mistura com seixo de rio (SJ)								
Misturas	Primeira fissura				Ruptura			
	$f_{f,1}^a$ (MPa)	CV (%)	$\delta_{f,1}^a$ (mm)	CV (%)	$f_{f,rupt}$ (MPa)	CV (%)	$\delta_{f,rupt}$ (mm)	CV (%)
MSJ50	4,86	3,05	0,02	4,16	9,17	2,07	0,05	1,35
MSJ75	5,51	4,02	0,02	3,09	10,62	5,29	0,50	3,97
MSJ100	5,82	3,40	0,02	2,5	12,84	6,47	0,50	3,23

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 5.7, observa-se que dentro de uma mesma mistura quando se compara à matriz de referencia houve aumento nos valores da tensão de ruptura e deformação de ruptura conforme foi aumentado o volume de fibras. Entre as matrises MBG e MBG100, ouve aumento de 25% e 92% na tensão de ruptura e deformação de ruptura respectivamente. Em relação as matrizes MSP e MSP100 o aumento na tensão de ruptura foi de 36% e o da deformação de ruptura foi 88%. Comparando as matrizes MSJ e MSJ100, esse aumento foi de 34% para a tensão de ruptura e 92% para deformação na ruptura.

Com relação á primeira fissura, também houve ganhos entre as frações volumétricas dentro de uma mesma matriz. Entre AS matrises MBG50 e MBG100, o acrescimo do valor da tensão de primeira fissura foi de 18% e para a a deformação de primeira fissura de 50%. Em relação ao MSP50 e MSP100, o ganho foi de 10% para a tensão de

primeira fissura e na deformação de primeira não houve ganho. Entre as matrises MSJ e MSJ100, o acréscimo foi de 16% na tensão de primeira fissura e também não houve diferença para a deformação primeira fissura. A Figura 5.31 mostra as médias e os desvios referente a Tabela 5.7.

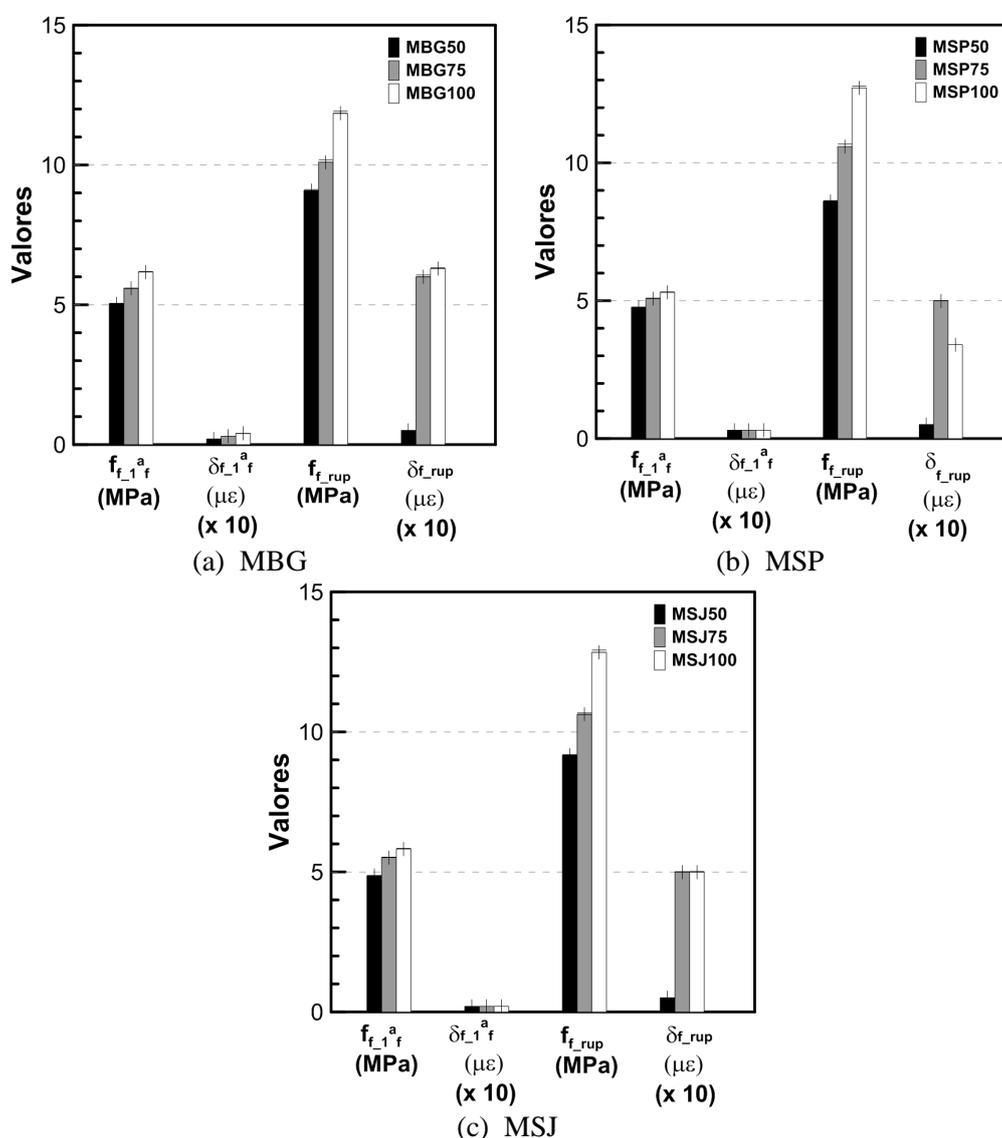


Figura 5.31 – Valores de resistência de primeira fissura, deformação de primeira fissura, resistência á ruptura e deformação das matrises contendo fibras de aço nas frações : 0,50%,0,75%,1,0%

Os resultados obtidos para os índices de tenacidade foram calculados de acordo com a Norma ASTM C1018 (1997). Os índices indicam um aumento na capacidade de absorver energia e conseqüentemente e aumento de tenacidade com o aumento do

volume de fibras, tanto para os concretos com brita (Figura 5.32 (a)), como para concretos com seixos de rio (Figura 5.32 (b),(c)).

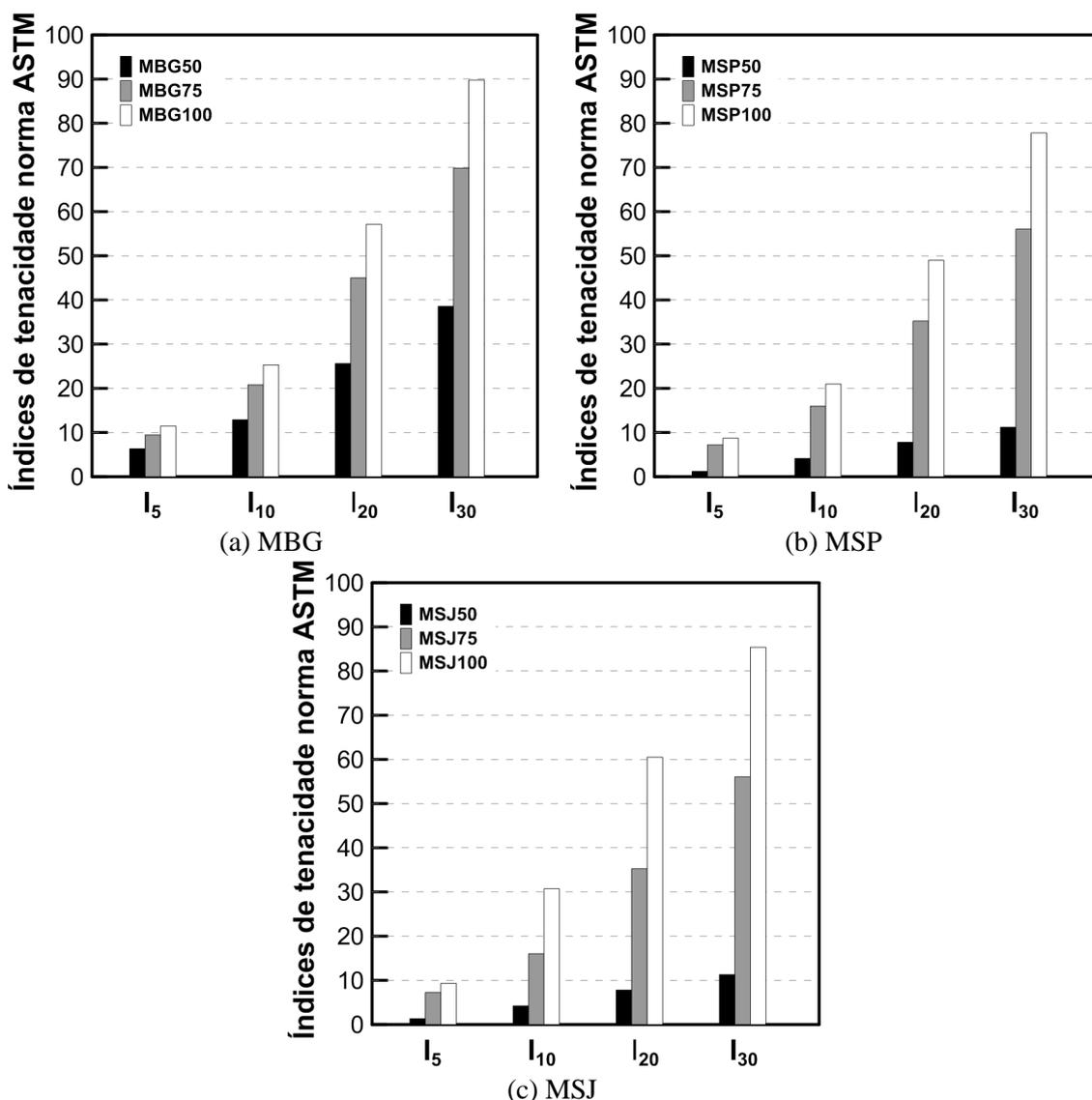


Figura 5.32 – Valores para o índice de tenacidade matrizes contendo volumes de fibras de aço nas frações : 0,50%,0,75%,1,0% de acordo com a norma ASTM C1018

A Figura 5.33, 5.34, 5.35, ilustra o modo de fratura à flexão dos corpos de prova das contendo fibras de aço das matrizes com brita e seixo de rio. Observa-se a formação de uma fissura concentrada no terço central, a qual teve sua abertura restringida pelas fibras nas matrizes contendo 0,50 %, 0,75 % e 1 % de fibra. O modo de ruptura é característico de concretos contendo fibras curtas distribuídas aleatoriamente na mistura

de concreto. A utilização de fibras de aço alterou o modo de fratura da matriz, principalmente nas frações de 0,75% e 1% de fibras de aço, permitindo que fossem alcançadas maiores deflexões. Várias microfissuras foram observadas. As fibras de aço proporcionaram uma região de fissuras na vizinhança da fissura principal, diferentemente do ocorrido com a matriz de referência.



(a) Volume 0,50%



(b) Volume 0,75%



(c) Volume 1%

Figura 5.33 – Modo de fratura no ensaio de flexão da matriz MBG com de fibras de aço

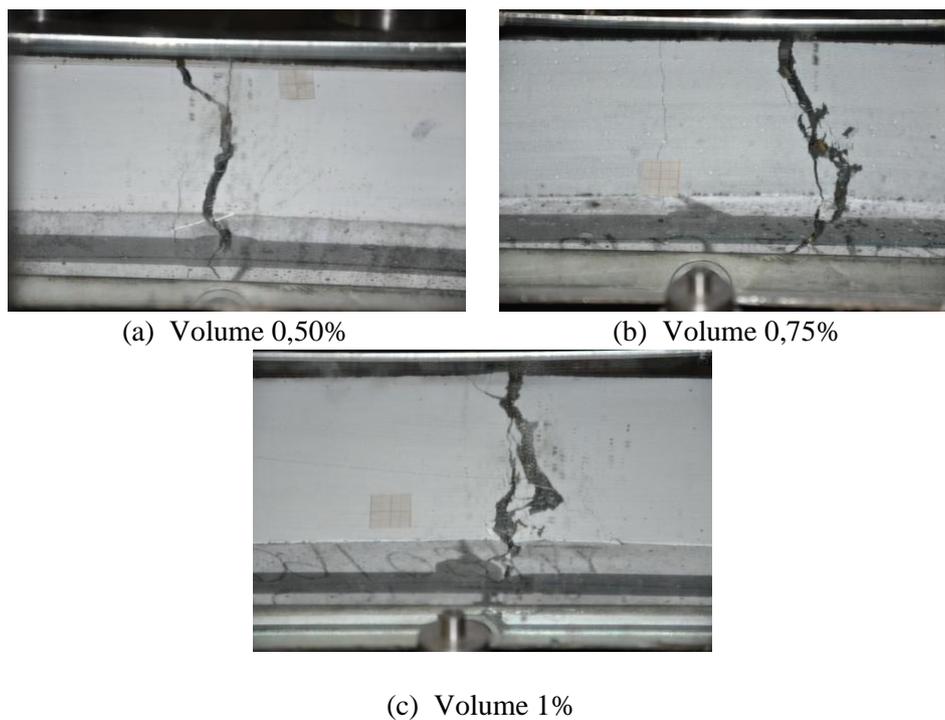


Figura 5.34 – Modo de fratura no ensaio de flexão da matriz MSP com de fibras de aço

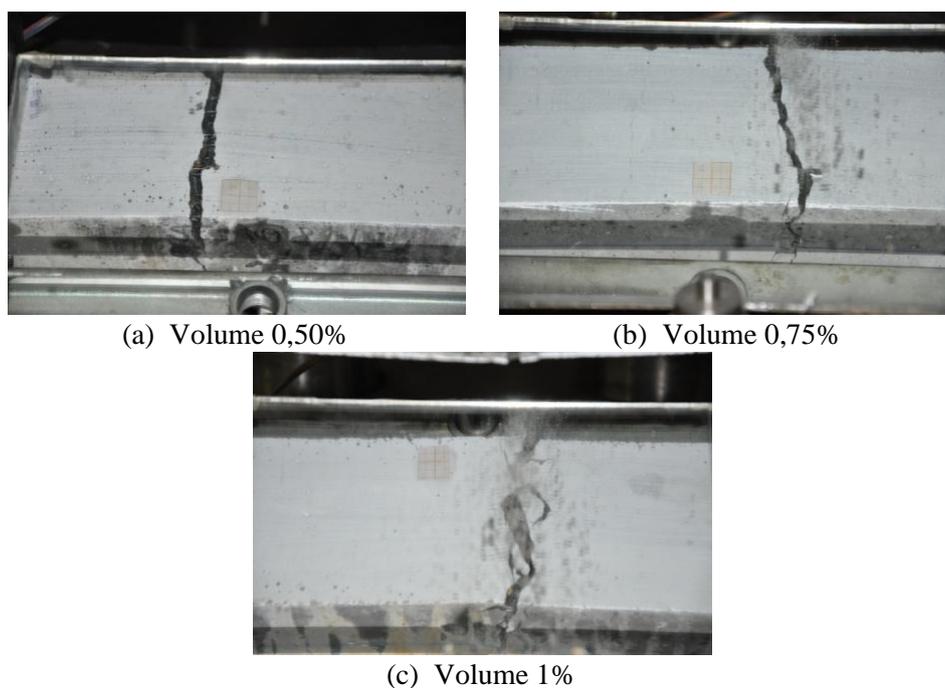


Figura 5.35 – Modo de fratura no ensaio de flexão da matriz MSJ com de fibras de aço

1.22.4 Comportamento à tração das matrizes de referência

A Figura 5.36 mostra as curvas típicas de tensão x deformação para os concretos MBG, MSP e MSJ.

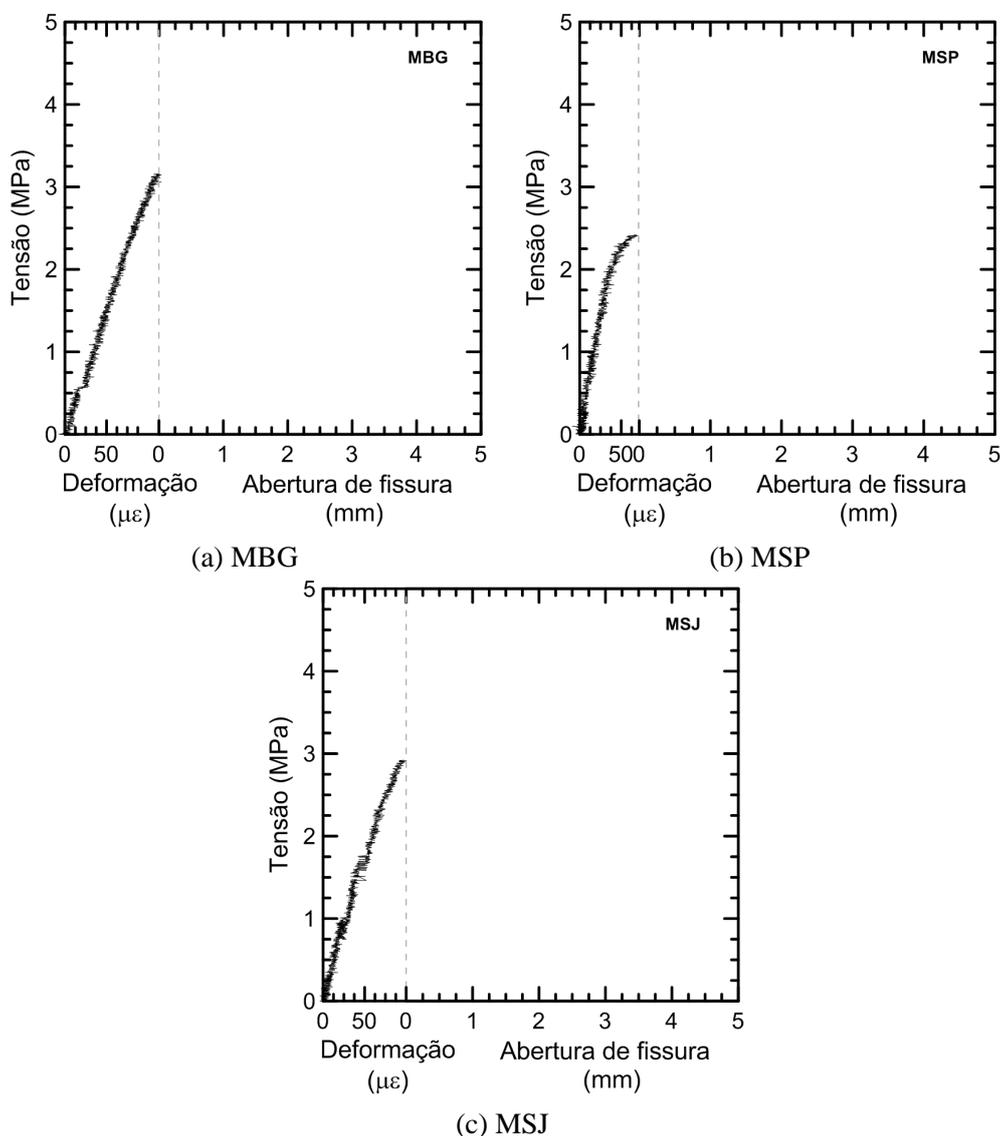


Figura 5.36 – Curvas típicas, tensão *versus* deformação, obtidas em ensaios de tração direta das matrizes de referência aos 28 dias

A Tabela 5.8 apresenta os valores médios e o coeficiente de variação (CV) da resistência à tração e da deformação na ruptura para os concretos MBG, MSP e MSJ. Verifica-se que a tensão de ruptura da matriz MBG foi cerca de 17% maior que a da

mistura CSP e 6% maior que a mistura MSJ, enquanto que a deformação de pico da mistura MBG foi cerca de 20% maior que a da mistura MSP e 8% maior que a mistura MSJ.

Tabela 5.8 – Resultados (média e coeficiente de variação), da resistência e deformação na tração direta aos 28 dias, para as matrizes de referência

Matrizes	f_t (MPa)	CV (%)	ε_t ($\mu\varepsilon$)	CV (%)
MBG	3,11	11,32	105,64	6,04
MSP	2,59	5,82	84,43	18,10
MSJ	2,92	6,50	96,60	10,70

Estatisticamente as três matrizes de referência quando analisadas entre si, não apresentaram diferença significativa no teste da ANOVA. Isso significa que o tipo do agregado adicionado à matriz cimentícia não influencia significativamente para a performance na resistência tração. A Figura 5.31 mostra as médias e os desvios referente a Tabela 5.7.

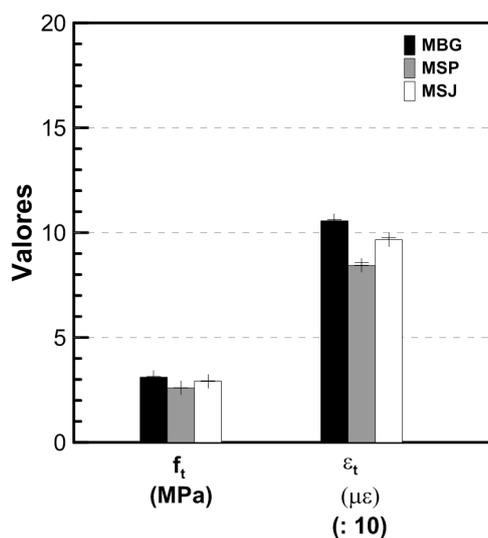


Figura 5.37 – Força de ruptura, tensão de ruptura e deformação na ruptura para matrizes de referência

A Figuras 5.38, apresenta os modos de fratura na tração direta das misturas de referência MBG, MSP e MSJ.

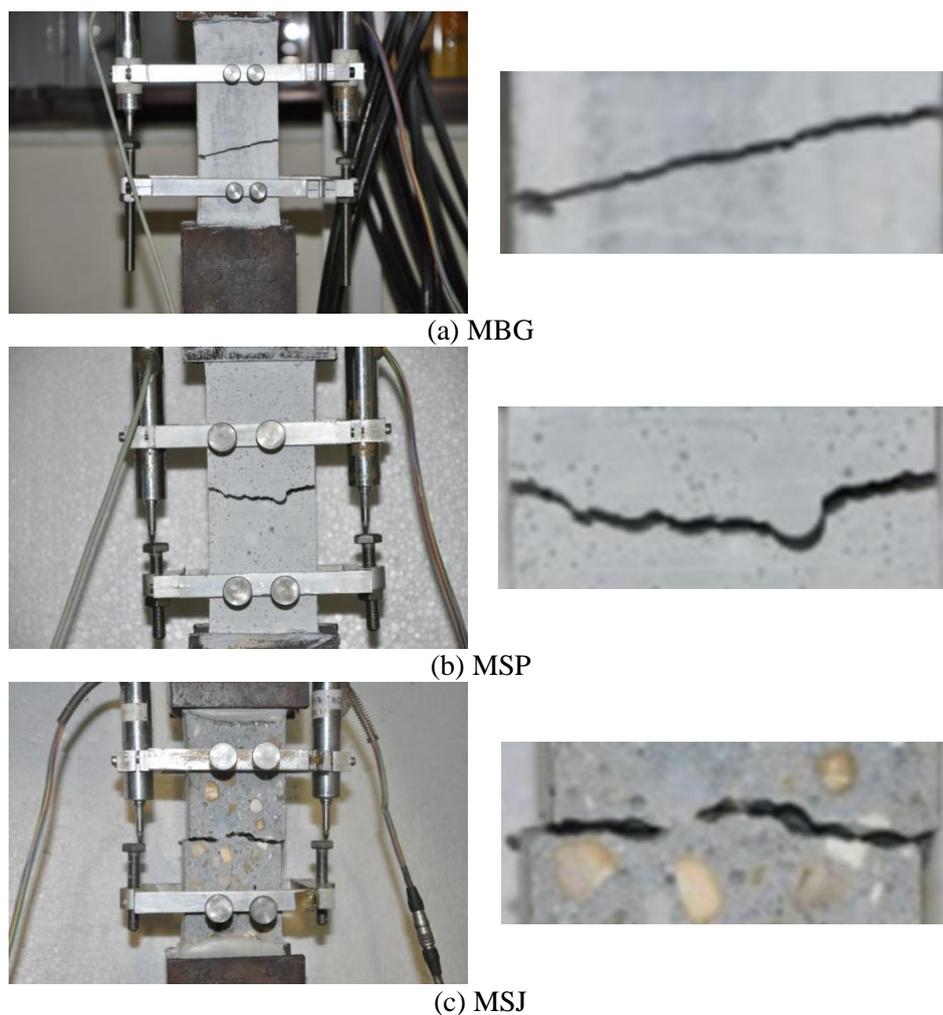


Figura 5.38 – Modo de fratura no ensaio de tração direta das matrizes de referência

Verifica-se através da figura 5.38 que a fratura à tração direta deu-se apenas com formação de fissura única nas três matrizes de referência analisadas.

1.22.5 Comportamento à tração das matrizes fibrosas

A Figura 5.39, 5.40, 5.51 mostram as curvas típicas de tensão *versus* deformação e tensão *versus* abertura de fissuras, provenientes dos ensaios de tração direta realizados em matrizes com fração volumétrica de fibras de aço de 0,50%, 0,75%, 1,0%.

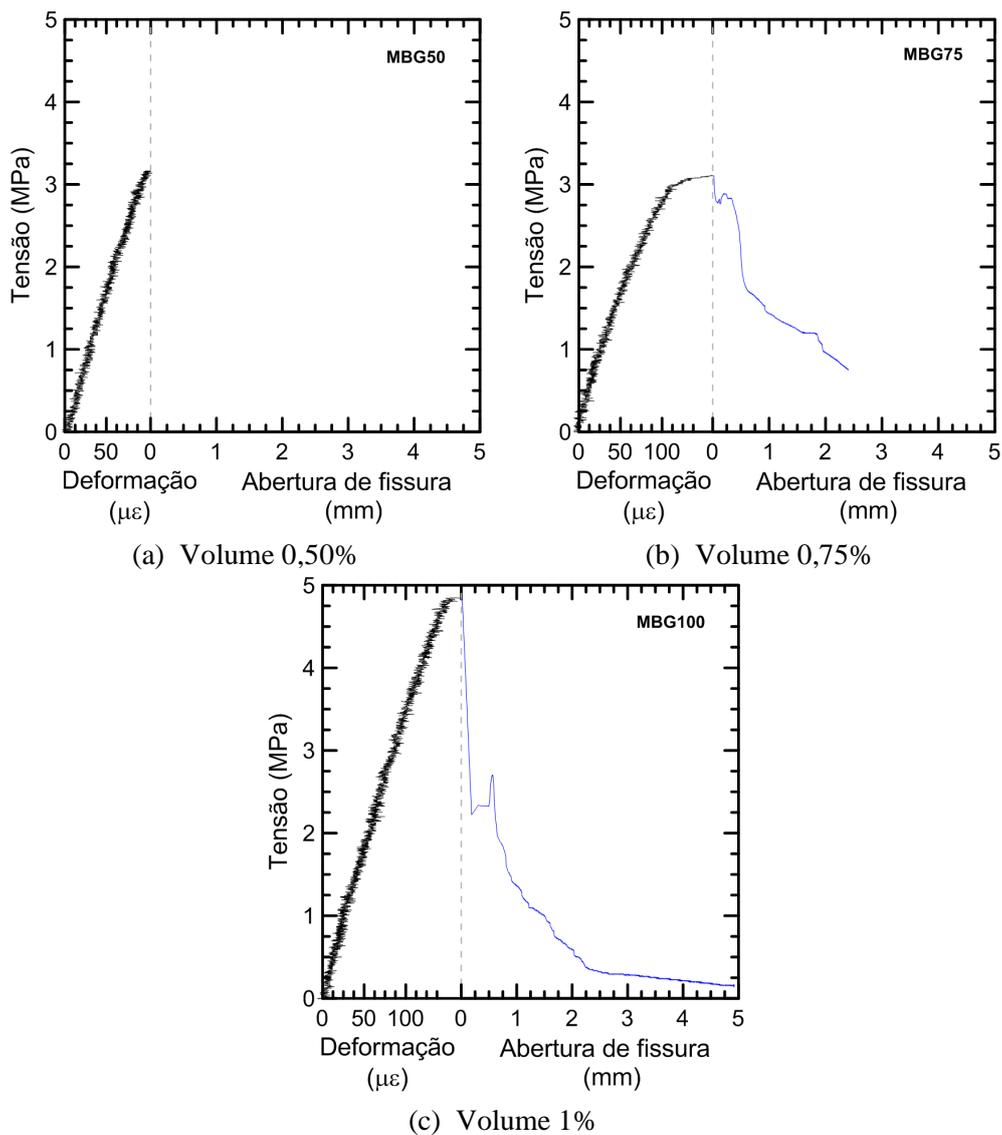


Figura 5.39 – Curvas típicas, tensão *versus* deformação e tensão *versus* abertura de fissura, MBG, obtidas em ensaio de tração direta das matrizes com fibras de aço aos 28 dias

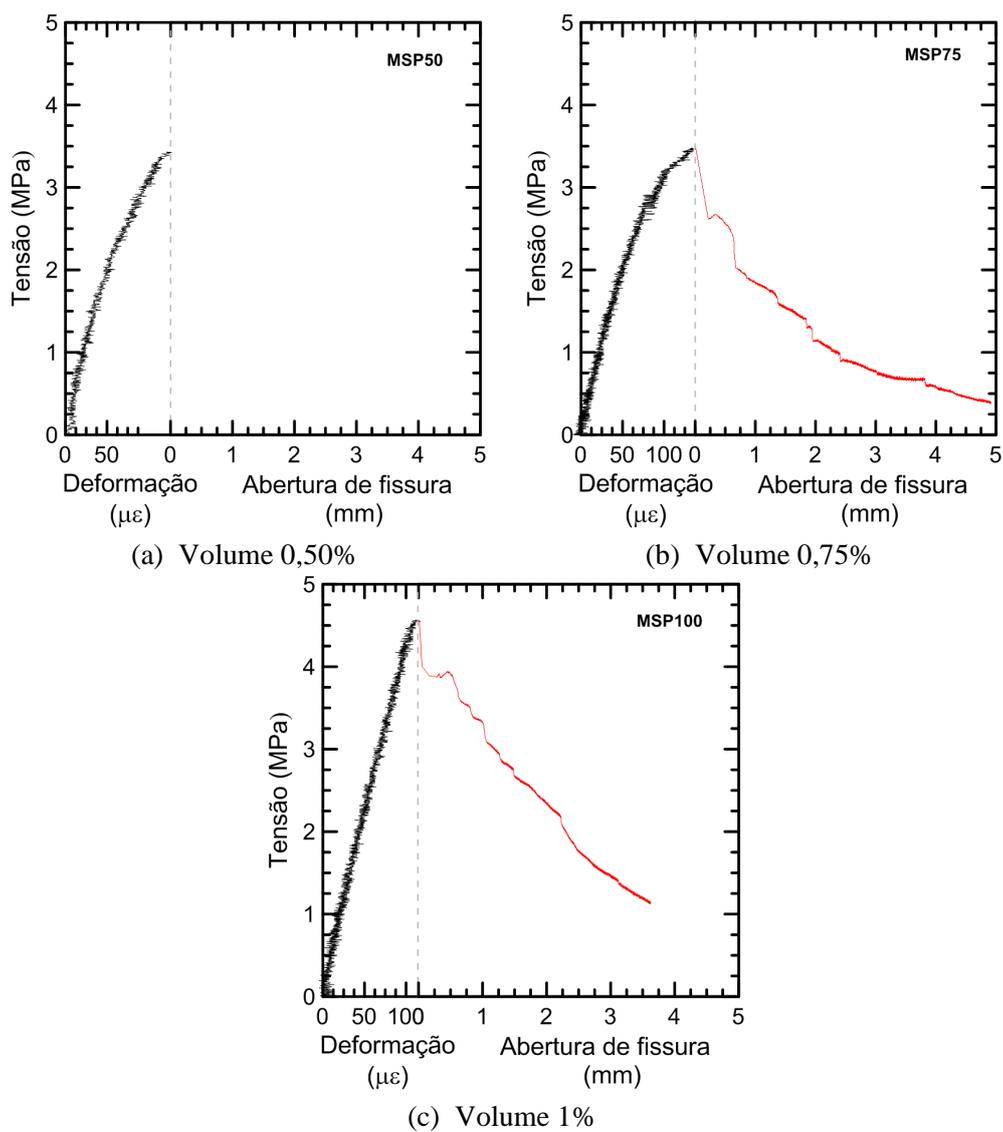


Figura 5.40 – Curvas típicas, tensão *versus* deformação e tensão *versus* abertura de fissura, MSP, obtidas em ensaio de tração direta das matrizes com fibras de aço aos 28 dias

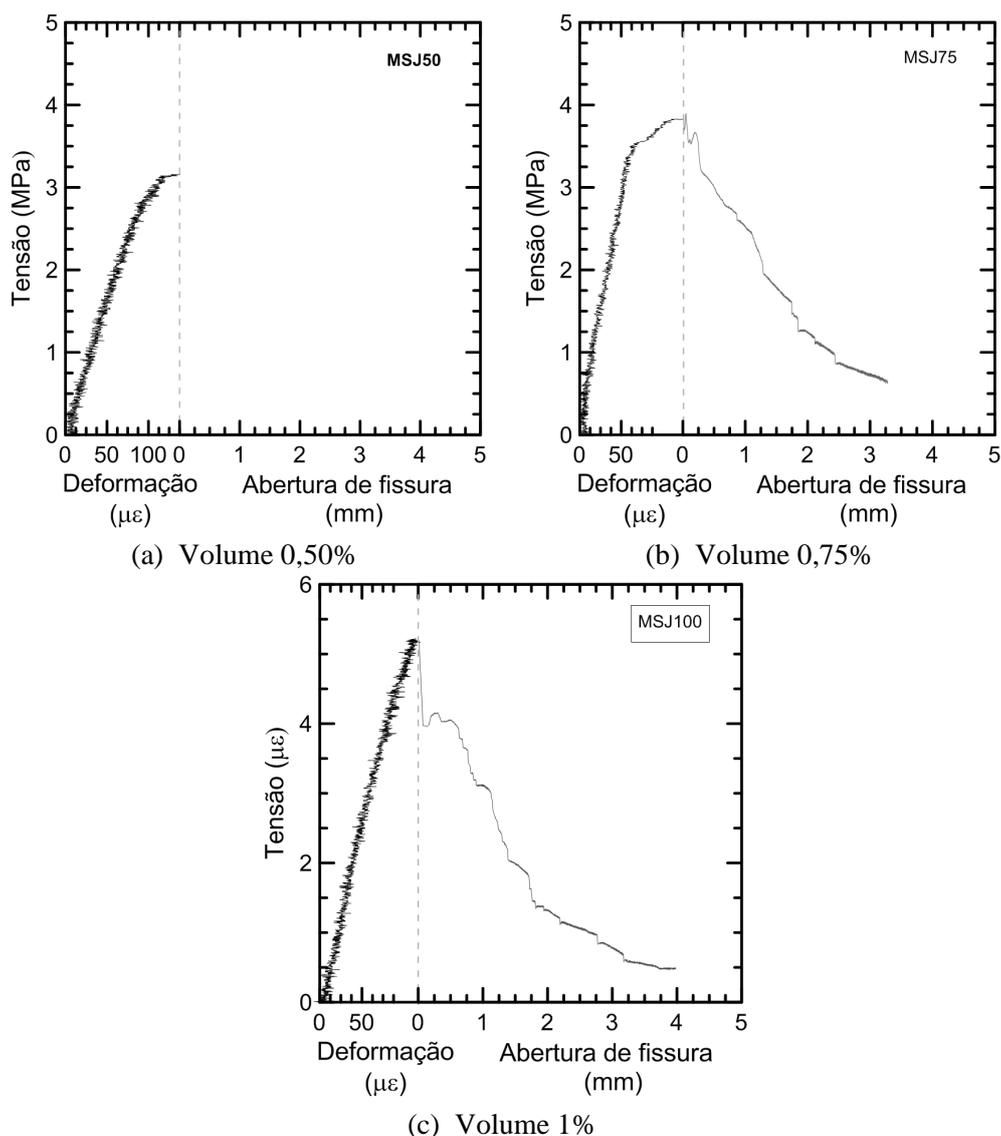


Figura 5.41 – Curvas típicas, tensão *versus* deformação e tensão *versus* abertura de fissura, MSJ, obtidas em ensaio de tração direta das matrizes com fibras de aço aos 28 dias

Os resultados listados na Tabela 5.9 indicam acréscimo na resistência à tração em relação as matrizes de referência ao se adicionar fibra de aço. Entre as matrises MBG e MBG100, houve aumento de 37% para a tensão de ruptura e 33% para a deformação na ruptura respectivamente. Em relação as matrises MSP e MSP100 o aumento na tensão de ruptura foi de 44% e o da deformação de ruptura foi 21%. Comparando as matrises MSJ e MSJ100, esse aumento foi de 43% para a tensão de ruptura e 15% para deformação na ruptura.

Tabela 5.9 – Resultados (média e coeficiente de variação), da resistência e deformação na tração direta aos 28 dias, para as matrizes contendo volumes de fibras de aço nas frações: 0,50%,0,75%,1,0%

Mistura com brita de granito (BG)				
Matrizes	f_t (MPa)	CV (%)	ε_t ($\mu\varepsilon$)	CV (%)
MBG50	3,39	5,66	118,00	13,58
MBG75	3,48	11,55	134,27	14,38
MBG100	4,95	3,41	158,69	9,99
Mistura com seixo de rio (SP)				
Matrizes	f_t (MPa)	CV (%)	ε_t ($\mu\varepsilon$)	CV (%)
MSP50	3,25	4,95	113,93	6,74
MSP75	3,75	6,57	119,53	13,53
MSP100	4,60	10,94	107,32	9,14
Mistura com seixo de rio (SJ)				
Matrizes	f_t (MPa)	CV (%)	ε_t ($\mu\varepsilon$)	CV (%)
MSJ50	3,15	4,25	138,17	6,23
MSJ75	3,82	7,21	124,74	10,07
MSJ100	5,20	9,71	114,13	11,70

Os valores da tensão de ruptura e deformação das matrizes com fibras de aço foram comparadas entre cada grupo através da ANOVA. Analisando os resultados, observou-se que houve diferença significativa entre as matrizes MBG 50 e MBG100 e MBG100 e MBG75, com relação á deformação na ruptura, estas se mostraram iguais. Para as matrizes MSP 50 e MSP100 e MSP100 e MSP75 o teste pela ANOVA mostrou que houve diferença significativa entre as matrizes mas não para a deformação na ruptura. As matrizes MSJ50, MSJ100 e MSJ100 e MSJ75 mostraram-se diferentes entre si, a deformação axial foi igual para as matrizes desse grupo. A Figura 5.42 mostra as médias e os desvios referente a Tabela 5.9.

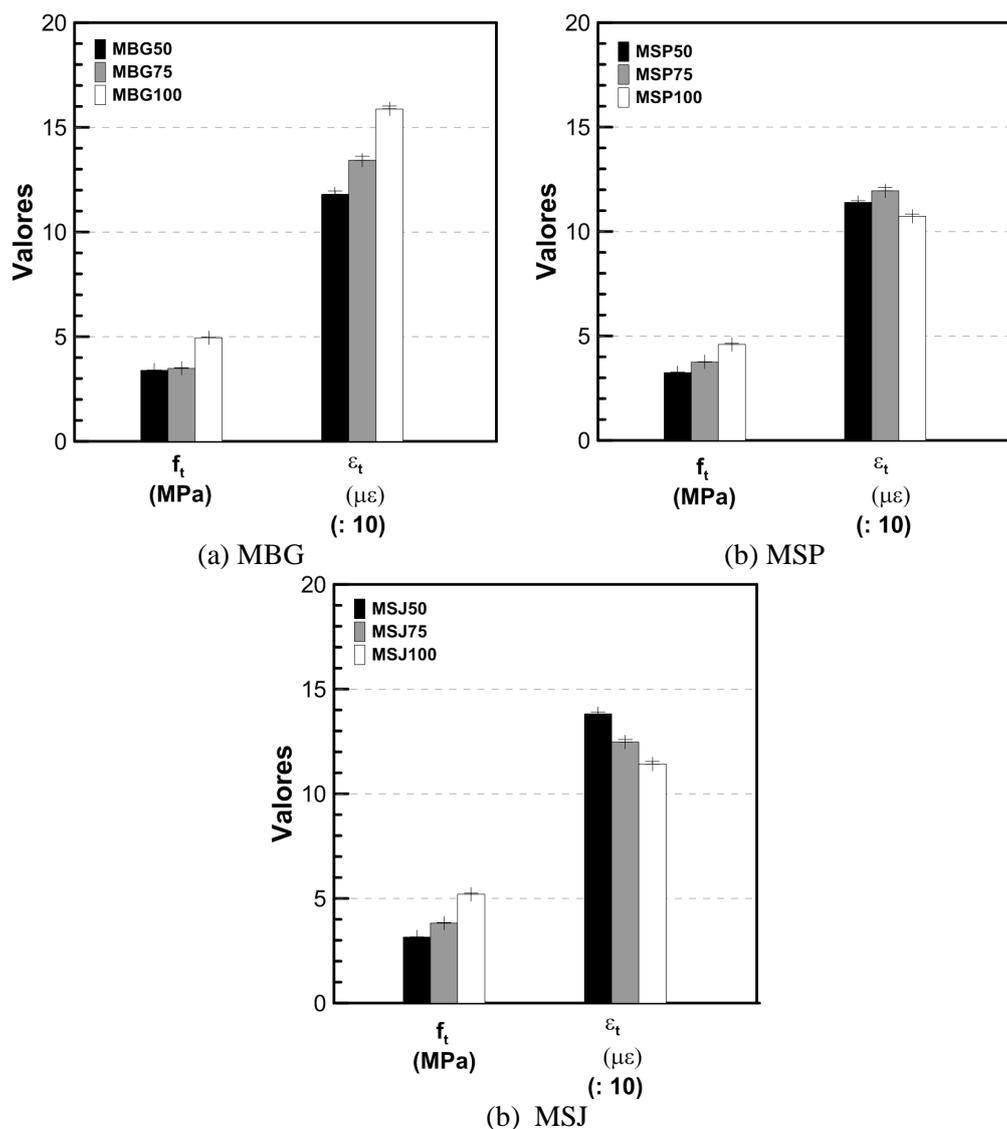


Figura 5.42 – Valores, resistência à tração direta e deformação na ruptura para matrizes contendo fibras de aço nas frações : 0,50%,0,75%,1,0%.

A Figuras 5.43, 5.44 e 5.45, apresentam os modos de fratura na tração direta das misturas com volumes de fibras de 0,50%, 0,75%, 1%. Pode-se observar que ocorreu dois modos de formação de fissura: fissura única nos volumes de fibras de aço 0,50% e fissura principal com fissuras menores no entorno da fissura principal.

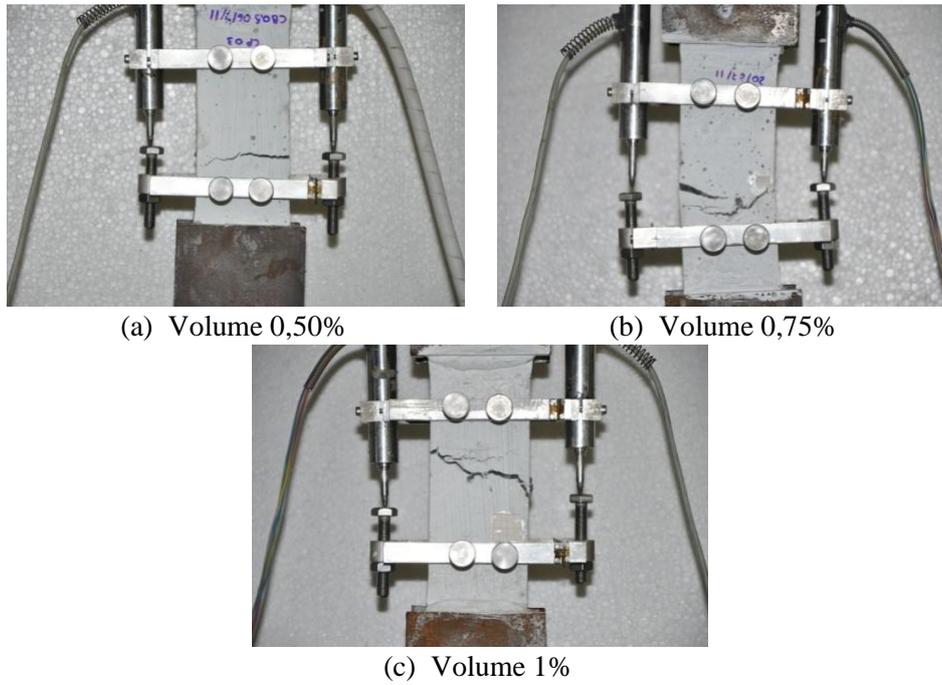


Figura 5.43 – Modo de fratura no ensaio de tração direta da matriz MBG com fibras de aço

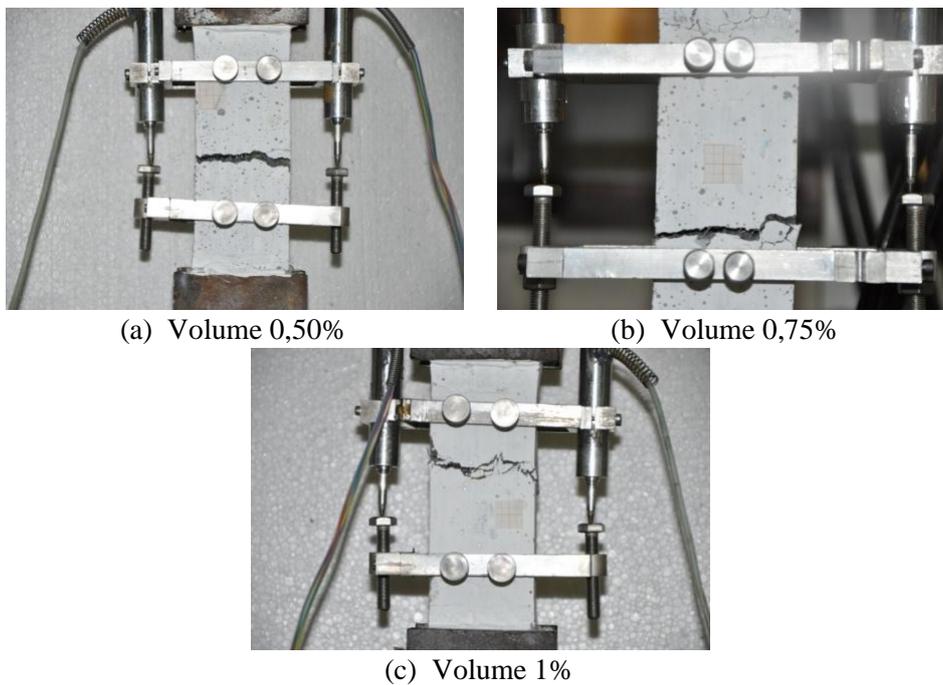


Figura 5.44 – Modo de fratura no ensaio de tração direta da matriz MSP com fibras de aço

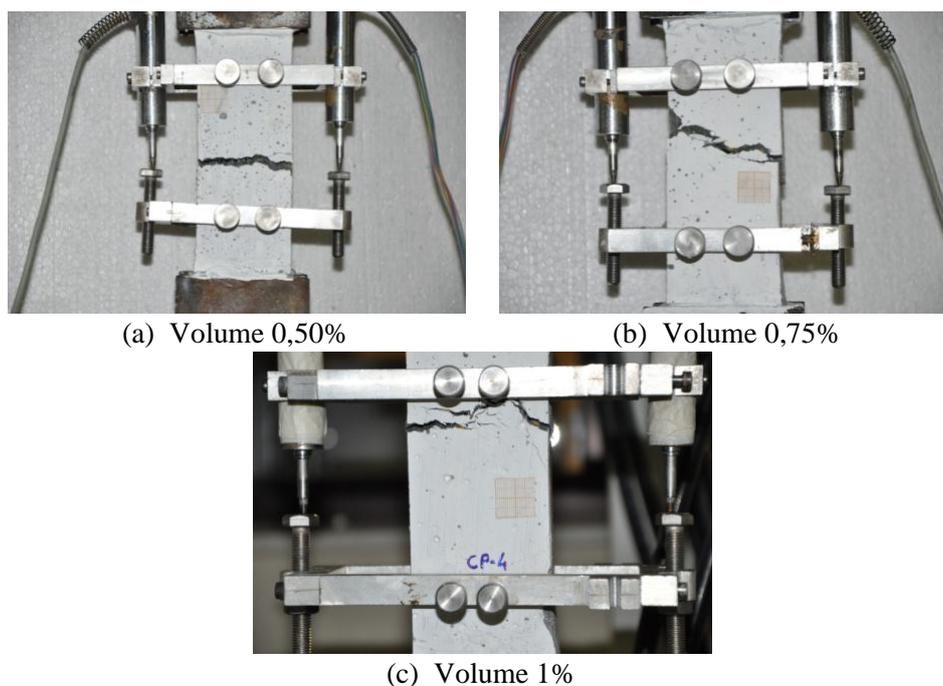


Figura 5.45 – Modo de fratura no ensaio de tração direta da matriz MSJ com fibras de aço

1.22.6 Tração por compressão diametral

A Tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Tabela 5.10 – Resultados (média e coeficiente de variação) da evolução da resistência á tração por compressão para as matrizes de referência

Dias	MBG (MPa)	CV (%)	MSP (MPa)	CV (%)	MSJ (MPa)	CV (%)
3	1.57	7.38	1.24	7.17	1.18	8.12
7	2.00	6.33	1.63	7.23	1.69	6.45
14	2.72	5.69	2.20	6.14	2.12	6.34
28	3.10	5.86	2.61	8.69	2.53	7.17

Os valores de resistência à tração por compressão diametral das matrizes MBG MSP e MSJ foram comparados entre si para os resultados aos 28 dias através do teste estatístico ANOVA. Apenas a matriz MBG apresentou diferença significativa em relação a matriz MSJ. A Figura 5.46 mostra as médias e os desvios referente a Tabela 5.10.

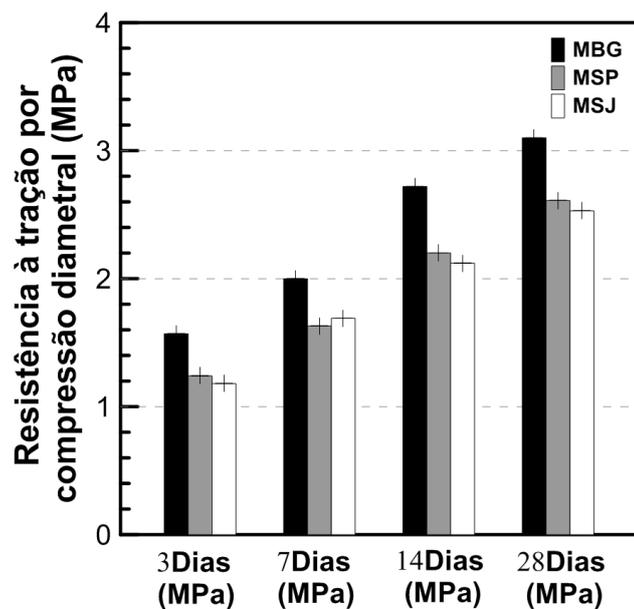


Figura 5.46 – Evolução da resistência à tração por compressão diametral para as matrizes de referência.

A Figura 5.47 apresenta os modos de fratura nos ensaios de tração por compressão diametral das misturas de referência MBG, MSP e MSJ.

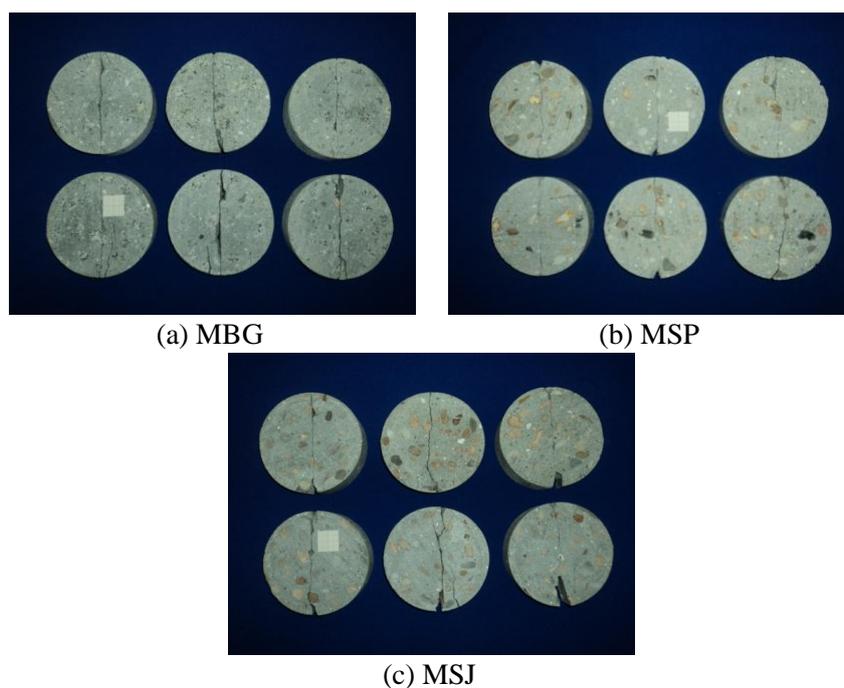


Figura 5.47 – Modo de fratura no ensaio de tração por compressão diametral das matrizes de referência

1.22.7 Arrancamento de fibras de aço

Testes de arrancamento de fibra em meio cimentício têm sido realizados nas últimas três décadas como um meio de otimizar o tipo de fibra com o tipo de matriz cimentícia e assim melhorar a compreensão dos mecanismos envolvidos no comportamento de um CRFA (CUNHA *et al.*, 2008). São apresentados os resultados obtidos no ensaio de arrancamento de fibras de aço em corpos de prova de concreto nas matrizes de referência os 28 dias.

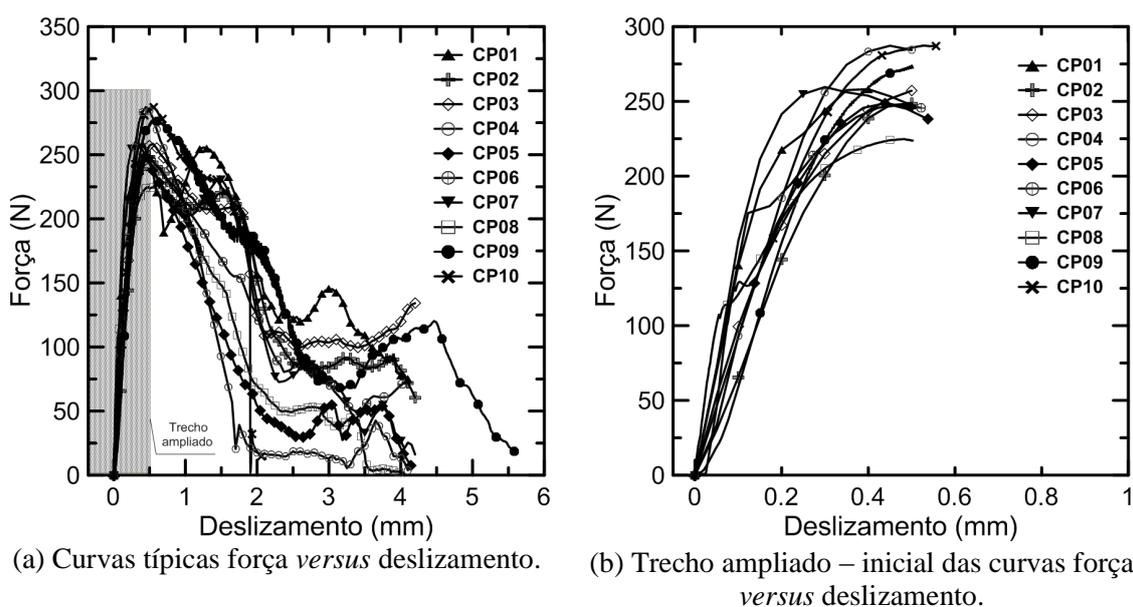


Figura 5.48 – Curvas, força *versus* deslocamento, obtidas em ensaio de resistência ao arrancamento de fibras de aço aos 28 dias em matrizes de referência

A figura 5.48 mostra as curvas experimentais típicas da força de arrancamento *versus* deslocamento, para a fibra de aço estudada. Estas curvas encontram-se representadas até um deslocamento máximo de 6 mm. No trecho linear inicial, as fibras de alguns corpos de prova (cp's) revelaram um comportamento mais rígido quando comparado com os outros cp's. O comportamento pós-pico das fibras de aço, no processo de arrancamento se deu a partir de um deslocamento aproximado de 3,0 mm por atrito dinâmico.

As fibras foram alinhadas em ângulo de 0° com o plano vertical e foram completamente arrancadas. A Tabela 5.11 indica os valores médios dos seguintes parâmetros: força máxima de arrancamento até ruptura (f_{fa_rup}), deslizamento até à ruptura (δ_{fa_rup}) força de arrancamento para um deslizamento de 0,01mm e 0,1 mm, e 1,0 mm respectivamente, $f_{0,01}$, $f_{0,1}$ e $f_{1,0}$. Incluem-se também entre parêntesis os valores do coeficiente de variação em porcentagem.

Tabela 5.11 – Valores médios e coeficientes de variação da força *versus* deslizamento até a ruptura nos ensaios de arrancamento das fibras de aço

Ângulo 0°	f_{fa_rup} (kN)	δ_{fa_rup} (mm)	$f_{0,01}$ (MPa)	$f_{0,1}$ (MPa)	$f_{1,0}$ (MPa)
	257,75 ($\pm 8,6$)	0,49 ($\pm 18,9$)	11,15 ($\pm 73,1$)	114,08 ($\pm 34,8$)	216,64 ($\pm 7,2$)

De acordo com Li (2002), o comportamento de um compósito é dependente de uma adequada aderência da interface fibra-matriz. A Figura 5.49 mostra os corpos de prova e os dispositivos para o ensaio de arrancamento de fibras de aço utilizado nessa pesquisa.



(a) Ensaio em andamento



(b) Ampliação da fibra de aço



(c) Corpos de prova ensaiados

Figura 5.49 – Ensaio de arrancamento de fibras de aço.

Quando a aderência é muito baixa, a fibra desliza facilmente e o efeito de ponte é prejudicado. Isto resulta numa baixa tenacidade e ductilidade do compósito.

Entretanto, se a aderência é elevada, a fibra rompe na matriz e, o compósito, numa situação extrema, pode até assemelhar-se a um material sem fibras. O comportamento mais apropriado depende do comprimento, diâmetro e resistência das fibras. Foi observada uma elevada dispersão no comportamento ao arrancamento nas fibras ensaiadas, principalmente com relação à $f_{0,01}$, $f_{0,1}$. Possivelmente isso se deve à heterogeneidade da matriz estar influenciando na dispersão dos resultados dos ensaios.

1.23 PROPRIEDADES ESTRUTURAIS

São apresentados os resultados do comportamento da aderência barra de aço ao concreto através dos ensaios de arrancamento e tração em tirantes de concreto.

1.23.1 Comportamento da aderência da barra de aço ao concreto através dos ensaios de arrancamento.

No ensaio de arrancamento, são analisados a força última, deslizamento último, curva força versus deslizamento, curva tensão de aderência versus deslizamento, tensão última de aderência, tensão média de aderência e panorama de fissuração. Buscou-se avaliar a influência do tipo de agregado e a fração volumétrica no comportamento da barra de aço-concreto ao arrancamento. As tabelas apresentam os valores de força última e deslizamento último e as tensões de aderência: 0,01mm, 0,1mm, 1mm, última e média para os três tipos de agregados e os dois tipos de barras.

1.23.1.1 Matrizes de referência

Os valores médios das propriedades dos ensaios de arrancamento, estão apresentados na Tabela 5.12, 5.13 e 5.14. Os valores de força última e deslizamento último para as barras de 12,5 mm e 20 mm em matrizes sem fibras, estão indicados na Tabela 5.12. Para a barra de 12,5 mm, o valor da força última variou de valor de 83,12 kN a 79,20 kN já para a barra de 20 mm a força última obteve o valor de 191,47 kN para a matriz MSJ. Porém, ocorreu o inverso para o deslizamento último, com valores menores para a barra de 20mm de 0,16 mm para a matriz MSP. Em relação à barra de 12,5 mm deslizamento último foi de 0,74 mm para a matriz MSJ. Após análise estatística

(ANOVA) para a barra de 12,5mm para as três matrizes, constatou-se que houve diferença significativa entre as matrizes MBG e MSP e MSP e MSJ para a força última, ao nível de 0,05% na comparação das médias. Para os valores de deslizamento último, a ANOVA indicou que apenas MSP e MSJ foram significativamente diferentes quando comparadas as médias entre si. Para a barra de 20mm, os resultados estatísticos indicaram que houve diferença significativa na força última na comparação das médias para as matrizes MBG e MSP e MBG e MSJ. Para o deslizamento último, não houve diferença significativa e as três matrizes analisadas foram consideradas iguais. A variabilidade para o deslizamento último das médias para os dois tipos de barras ficou acima dos 10%.

Tabela 5.12 – Valores médios da força e deslizamento até a ruptura nos ensaios de arrancamento das matrizes sem fibras em barras de 12,5mm e 20mm

Matrizes	ϕ de 12,5mm		ϕ de 20mm	
	F_u (kN)	δ_u (mm)	F_u (kN)	δ_u (mm)
MBG	79,20 ($\pm 3,0$)	0,94 ($\pm 18,0$)	175,35 ($\pm 2,9$)	0,21 ($\pm 14,7$)
MSP	83,12 ($\pm 1,8$)	1,03 ($\pm 12,1$)	188,23 ($\pm 3,5$)	0,16 ($\pm 13,4$)
MSJ	79,50 ($\pm 2,0$)	0,74 ($\pm 14,6$)	191,47 ($\pm 2,0$)	0,27 ($\pm 13,7$)

A Tabela 5.13, mostra os valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento das matrizes sem fibras e barras de 12,5 mm. Os resultados indicam que para a tensão última, os valores variaram de 32,27 MPa a 33,90 MPa. O valor da ANOVA para a barra de 12,5mm, demonstrou que houve diferença significativa entre as médias MBG e MSP e MBG e MSJ.

Para a força última, constatou-se que ao nível de 0,05% na comparação das médias, houve diferença significativa entre as matrizes MBG e MSP e MSP e MSJ. Não houve diferença significativa para a tensão média, e as três matrizes analisadas foram consideradas iguais. O coeficiente de variação das médias para a tensão no deslizamento de 0,01 mm para a matriz MSJ foi elevado e obteve o valor de 32,2.

Tabela 5.13 – Valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento das matrizes sem fibras em barras de 12,5mm

Matrizes	ϕ de 12,5mm				
	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	$\tau_{1,0}$ (MPa)	τ_u (MPa)	τ_m (MPa)
MBG	10,85 ($\pm 10,1$)	26,69 ($\pm 7,3$)	32,01 ($\pm 4,2$)	32,27 ($\pm 3,0$)	23,19 ($\pm 5,6$)
MSP	12,43 ($\pm 12,5$)	28,32 ($\pm 2,4$)	33,82 ($\pm 1,8$)	33,90 ($\pm 1,8$)	24,86 ($\pm 2,6$)
MSJ	12,84 ($\pm 32,2$)	27,84 ($\pm 2,6$)	31,94 ($\pm 1,4$)	32,39 ($\pm 2,0$)	24,21 ($\pm 4,8$)

A Tabela 5.14, apresenta os valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento das matrizes sem fibras e barras de 20 mm. Os valores para a tensão última, variaram de 27,63 MPa a 30,49 MPa. Os resultados da ANOVA indicaram que houve diferença significativa tanto para a tensão última como para a tensão média entre as matrizes MBG e MSP e MBG e MSJ.

A variabilidade para o deslizamento último das médias para os dois tipos de barras ficou acima dos 10%. O maior coeficiente de variação para as médias da tensão no deslizamento de 0,01 mm foi para a matriz MBG (27,8%).

Tabela 5.14 – Valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento para matrizes sem fibras em barras de 20mm

Matrizes	ϕ de 20mm				
	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	$\tau_{1,0}$ (MPa)	τ_u (MPa)	τ_m (MPa)
MBG	9,45 ($\pm 27,8$)	26,57 ($\pm 4,2$)	–	27,63 ($\pm 3,4$)	21,22 ($\pm 5,5$)
MSP	8,92 ($\pm 15,2$)	28,79 ($\pm 2,5$)	–	30,10 ($\pm 2,9$)	22,61 ($\pm 3,1$)
MSJ	9,08 ($\pm 8,7$)	28,51 ($\pm 0,9$)	–	30,49 ($\pm 2,0$)	22,70 ($\pm 0,6$)

Os valores médios e desvios da força de ruptura, tensão de ruptura e tensão média para os modelos de barra de 12,5 mm e 20mm podem ser visualizados respectivamente através das figuras 5.50 (a) e 5.50(b).

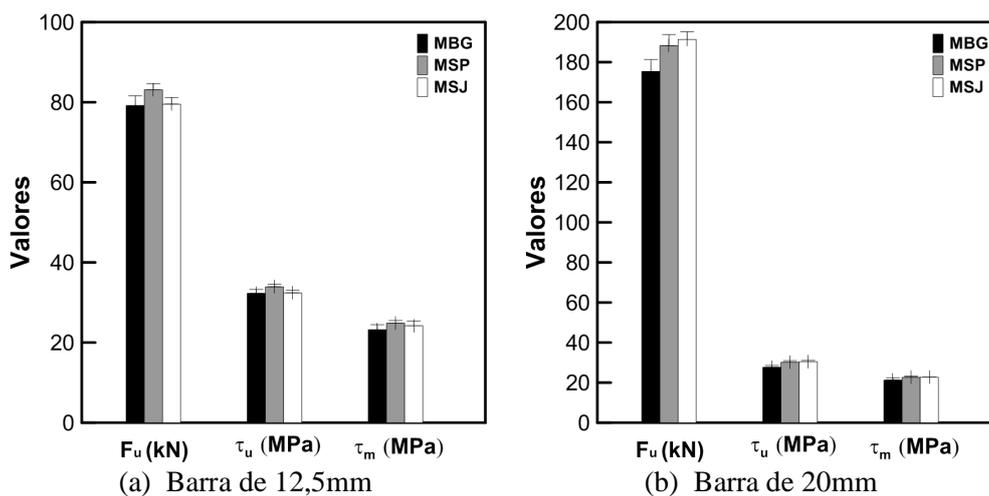


Figura 5.50 – Força última, tensão última e tensão média nos ensaios de arrancamento

Os gráficos correspondentes aos ensaios de arrancamento a seguir representam as curvas típicas de força versus deslizamento de cinco corpos de prova. De acordo com a Figura 5.51(a), até a força de 60kN no trecho linear elástico, as matrizes tiveram um comportamento idêntico uma das outras para os modelos de barras de 12,5mm e apresentaram ruptura por deslizamento da barra de aço em relação ao concreto.

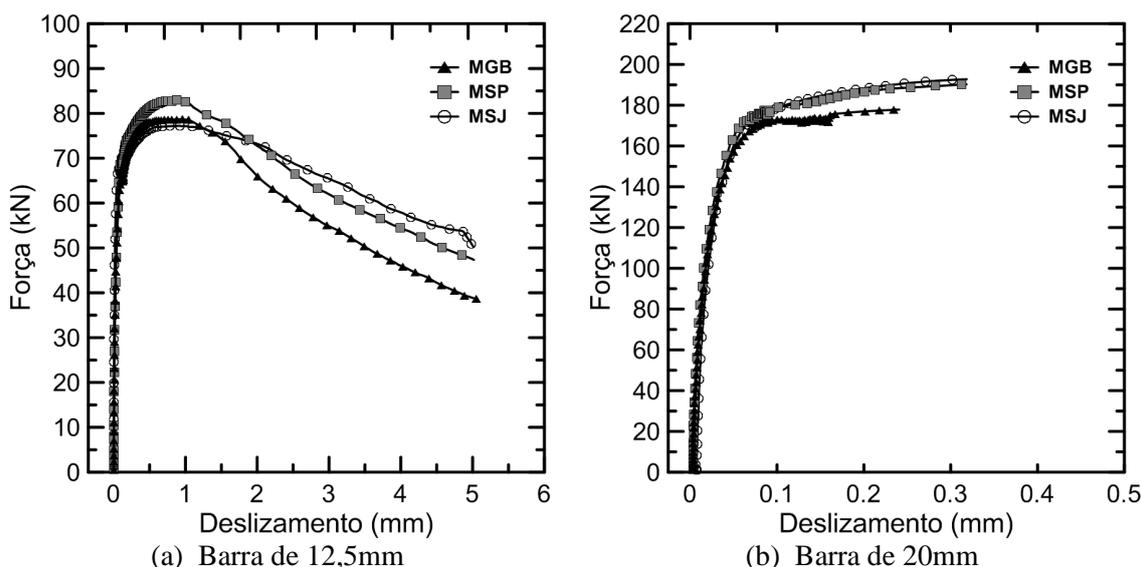


Figura 5.51 – Curvas típicas, força versus deslizamento, obtidas no ensaio de arrancamento de barras de aço das matrizes aos 28 dias

Já na figura 5.51(b), para a barra de 20mm as matrizes tiveram um menor comportamento linear elástico até a força de 120 kN, os modelos apresentaram ruptura por fendilhamento do concreto.

A tensão de aderência *versus* deslizamento foi calculada por meio da equação 4.7, ver item 4.2.7.2. A amostra do processo de fissuração dos blocos de concretos das matrizes sem fibra para os modelos com barras de 12,5 mm e 20 mm pode ser observado na Figura 5.52. Nota-se pela figura 5.52 (a) que houve processo de ruptura por deslizamento para barras de 12,5 mm e irradiação das fissuras a partir do centro de onde a barra está ancorada para as extremidades do bloco. Na figura 5.52 b), houve processo de ruptura por fendilhamento, observa-se a existência de três fissuras bem destacadas, acompanhadas por microfissuras.

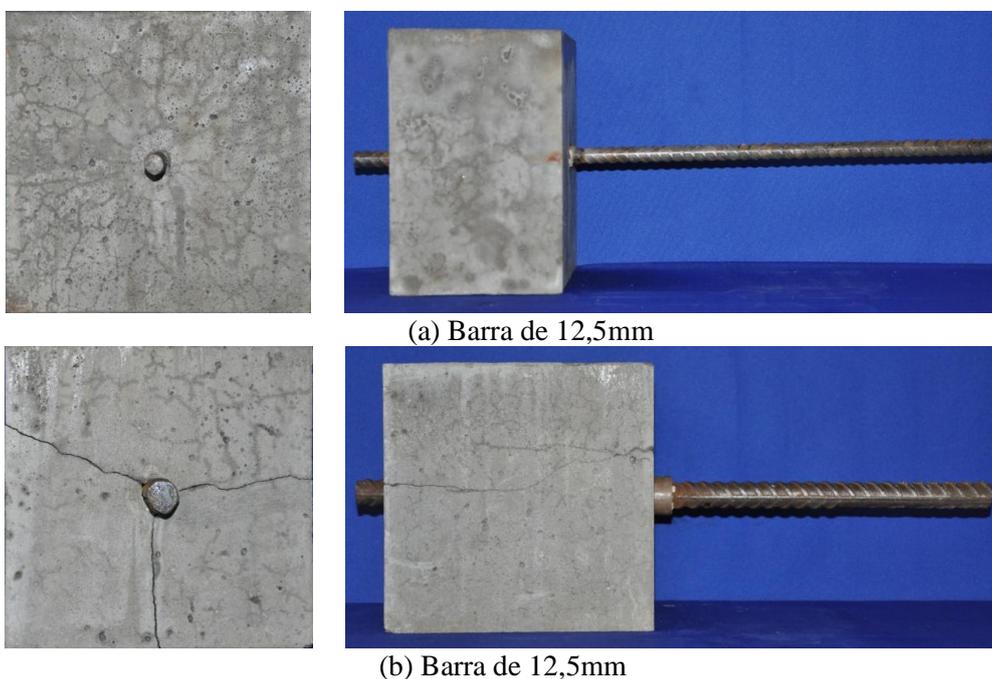


Figura 5.52 – Amostra do processo de fissuração das matrizes sem fibras

1.23.1.2 Matrizes com adição de fibras de aço

A tabela 5.15, apresenta os valores médios de força última e deslizamento último para as barras de 12,5 mm em matrizes com 0,50% e 1% de fibras de aço. Os valores para força última das matrizes com 0,50% de fibras de aço, ficaram entre 82,14 kN a 85, 10

kN e para o deslizamento último 0,70 mm a 0,87 mm. Para as matrizes com 1% de fibras de aço, os resultados para força última entre 82,71kN a 84,89kN e para o deslizamento último, 1,00 mm a 1,11 mm. A análise estatística demonstrou que tanto para a força última quanto para o deslizamento último para as duas frações de volume de fibras de aço, não houve diferença significativa entre as matrizes analisadas. A variação da média para o deslizamento das matrizes MBG50, MSP50 e MSJ ficou acima de 30%.

Tabela 5.15 – Valores médios da força e deslizamento até a ruptura nos ensaios de arrancamento das matrizes com fibras de aço em barras de 12,5mm

Matrizes	ϕ de 12,5mm	
	F_u (kN)	δ_u (mm)
MBG50	82,14 ($\pm 3,7$)	0,70 ($\pm 30,5$)
MSP50	84,93 ($\pm 3,6$)	0,70 ($\pm 40,9$)
MSJ50	85,10 ($\pm 1,2$)	0,87 ($\pm 39,6$)
MBG100	82,71 ($\pm 3,4$)	1,10 ($\pm 6,6$)
MSP100	84,89 ($\pm 1,7$)	1,00 ($\pm 13,2$)
MSJ100	84,48 ($\pm 1,5$)	1,11 ($\pm 13,6$)

A Tabela 5.16, apresenta os valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento das matrizes com 0,50% e 1% de fibras de aço dos modelos de barra de 12,5 mm. Os resultados da tensão última para volumes de 0,50% e 1% de fibras de aço mostram que os valores variaram respectivamente de 33,47 a 34,67 e 33,70 MPa a 34,42 MPa. A tensão média para 0,50% e 1% de fibras de aço variou de 33,47 a 34,67 e 33,70 MPa a 34,42 MPa respectivamente.

A ANOVA demonstrou que as médias quando comparadas entre si, para os volumes 0,50 e 1% de fibras de aço são iguais. O coeficiente de variação das médias para a tensão no deslizamento de 0,01 mm para a matriz MBG50, MSP50 e MSJ ficou acima de 18%.

Tabela 5.16 – Valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento para matrizes com fibras de aço em barras de 12,5mm

Matrizes	ϕ de 12,5mm				
	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	$\tau_{1,0}$ (MPa)	τ_u (MPa)	τ_m (MPa)
MBG50	12,05 ($\pm 20,6$)	27,46 ($\pm 6,4$)	31,64 ($\pm 3,8$)	33,47 ($\pm 3,7$)	23,72 ($\pm 4,8$)
MSP50	13,98 ($\pm 18,9$)	30,13 ($\pm 6,2$)	32,71 ($\pm 6,4$)	34,60 ($\pm 3,6$)	25,61 ($\pm 6,1$)
MSJ50	11,82 ($\pm 6,1$)	28,55 ($\pm 3,6$)	33,60 ($\pm 5,6$)	34,67 ($\pm 1,1$)	24,66 ($\pm 1,9$)
MBG100	10,47 ($\pm 8,4$)	26,24 ($\pm 5,6$)	33,61 ($\pm 3,6$)	33,70 ($\pm 3,4$)	23,44 ($\pm 4,5$)
MSP100	11,54 ($\pm 18,4$)	27,36 ($\pm 7,1$)	34,53 ($\pm 1,8$)	31,81 ($\pm 2,2$)	24,50 ($\pm 6,0$)
MSJ100	12,63 ($\pm 20,6$)	28,16 ($\pm 4,1$)	33,68 ($\pm 5,0$)	34,42 ($\pm 1,5$)	24,82 ($\pm 3,2$)

Através da Figura 5.53(a) os valores médios e desvios da força de ruptura, tensão de ruptura e tensão média, para modelos de barra de 12,5 mm e volume de fibras de 0,50% podem ser visualizados e Figura 5.53(b) e para volumes de 1% de fibras de aço.

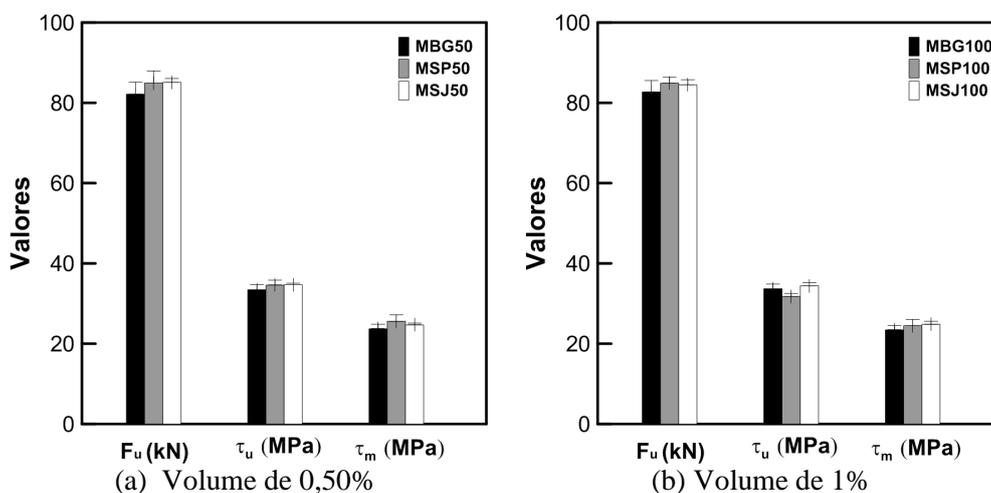


Figura 5.53 – Força última, tensão última e tensão média para as barra de 12,5mm

As curvas típicas de força versus deslizamento para modelos com barra de 12,5 mm, estão representados na Figura 5.54(a) e 5.54(b). Pode-se observar que houve ruptura por deslizamento para a barra de 12.5mm em relação ao concreto para ambas frações volumétricas de fibras de aço. Percebe-se que para os dois volumes de fibras de aço (0,50 e 1%) até a força de 60kN no trecho linear elástico, as matrizes tiveram um comportamento idêntico uma das outras

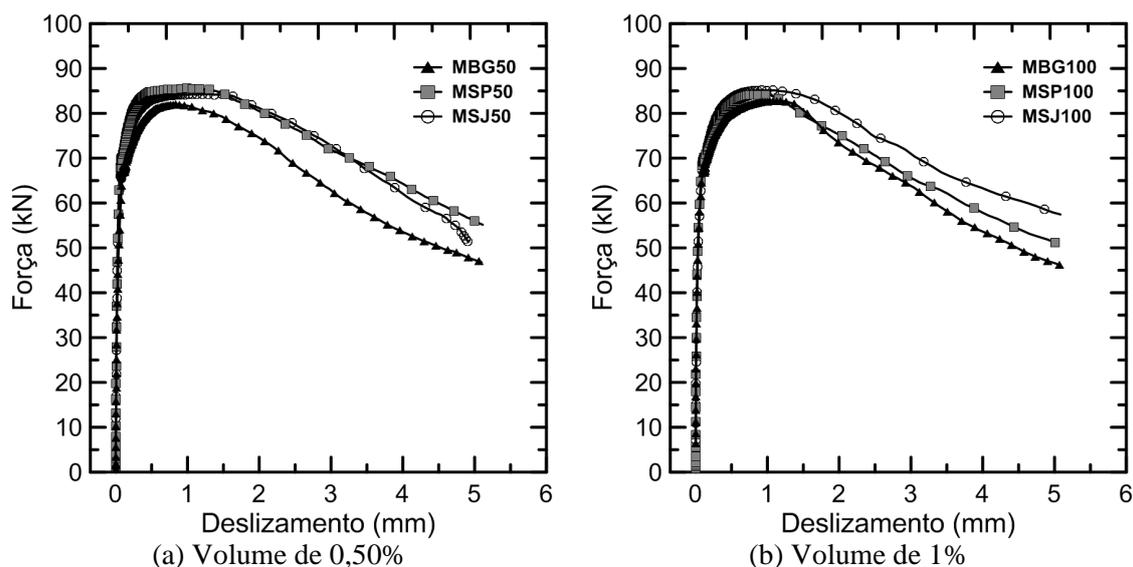


Figura 5.54 – Curvas típicas, força *versus* deslocamento, obtidas no ensaio de arrancamento de barras de aço de 12,5mm das matrizes com fibras de aço aos 28 dias

Observa-se pela Tabela 5.17, os valores médios de força última e deslocamento último para as barras de 20 mm para matrizes com 0,50% e 1% de fibras de aço. Os valores da força última para matrizes com 0,50% de fibras de aço, ficaram entre 197,77 kN a 199,63 kN e para o deslocamento último 0,40 mm a 0,70 mm.

Tabela 5.17 – Valores médios da força e deslocamento até a ruptura nos ensaios de arrancamento das matrizes em barras de 20mm

Matrizes	ϕ de 20mm	
	F_u (kN)	δ_u (mm)
MBG50	198,60 ($\pm 1,5$)	0,40 ($\pm 41,3$)
MSP50	197,77 ($\pm 5,2$)	0,51 ($\pm 33,8$)
MSJ50	199,63 ($\pm 1,7$)	0,70 ($\pm 13,5$)
MBG100	198,77 ($\pm 3,1$)	0,60 ($\pm 36,7$)
MSP100	193,15 ($\pm 2,6$)	0,50 ($\pm 32,1$)
MSJ100	197,96 ($\pm 1,6$)	0,90 ($\pm 19,9$)

A análise estatística mostrou que tanto para a força última quanto para o deslocamento último, as matrizes são consideradas iguais.

Para as matrizes com 1% de fibras de aço, os resultados para força última ficaram entre 193,15 kN a 198,77 kN e para o deslizamento último, entre 0,5 mm a 0,9 mm. O resultado da ANOVA demonstrou que as médias são iguais para a força última. Quanto ao deslizamento último, os dados estatísticos demonstraram que apenas entre as matrizes MSJ100 e MSP100 foram diferentes para o volume de 1% de fibras de aço.

A Tabela 5.18, apresenta os valores médios para tensão nos ensaios de arrancamento das matrizes com 0,50% e 1% de fibras de aço para os modelos de barra de 20 mm. De acordo com os resultados da tensão última para 0,50% e 1% de fibras de aço, os valores variaram respectivamente de 31,48 MPa a 31,80 MPa e 30,74 MPa a 31,64 MPa. A tensão média para 0,50% e 1% de fibras de aço, variou de 22,66 MPa a 24,66 MPa e 22,34 MPa a 23,99 MPa respectivamente. A ANOVA demonstrou que as médias quando comparadas entre si, para os volumes 0,50 e 1% de fibras de aço, foram diferentes para as matrizes MSP100 e MBG100 e MSJ100 e MBG100 com relação à tensão última. Para a tensão média, não houve diferença significativa no teste estatístico. O coeficiente de variação das médias para a tensão no deslizamento de 0,01 mm, para a matriz MBG ficou acima de 24%.

Tabela 5.18 – Valores médios para tensão de aderência nos ensaios de arrancamento para matrizes com fibras de aço e barra de 20mm

Matrizes	ϕ de 20mm				
	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	$\tau_{1,0}$ (MPa)	τ_u (MPa)	τ_m (MPa)
MBG50	12,74 ($\pm 24,2$)	29,22 ($\pm 4,3$)	17,61 ($\pm 9,2$)	31,61 ($\pm 1,5$)	22,66 ($\pm 11,2$)
MSP50	13,57 ($\pm 15,4$)	28,93 ($\pm 3,5$)	31,48 ($\pm 5,2$)	31,48 ($\pm 5,2$)	24,66 ($\pm 5,2$)
MSJ50	13,22 ($\pm 8,7$)	28,35 ($\pm 1,0$)	31,80 ($\pm 1,7$)	31,80 ($\pm 1,7$)	24,45 ($\pm 1,7$)
MBG100	10,90 ($\pm 14,2$)	27,56 ($\pm 4,0$)	28,54 ($\pm 10,1$)	31,64 ($\pm 3,2$)	22,34 ($\pm 6,4$)
MSP100	13,23 ($\pm 6,7$)	27,45 ($\pm 1,3$)	26,16 ($\pm 8,5$)	30,74 ($\pm 2,6$)	23,27 ($\pm 5,6$)
MSJ100	13,04 ($\pm 6,7$)	27,45 ($\pm 1,3$)	31,52 ($\pm 1,2$)	31,51 ($\pm 1,6$)	23,99 ($\pm 1,5$)

A Figura 5.55 mostra os valores médios e os desvios da força de ruptura, tensão de ruptura e tensão média, para modelos de barra de 20 mm.

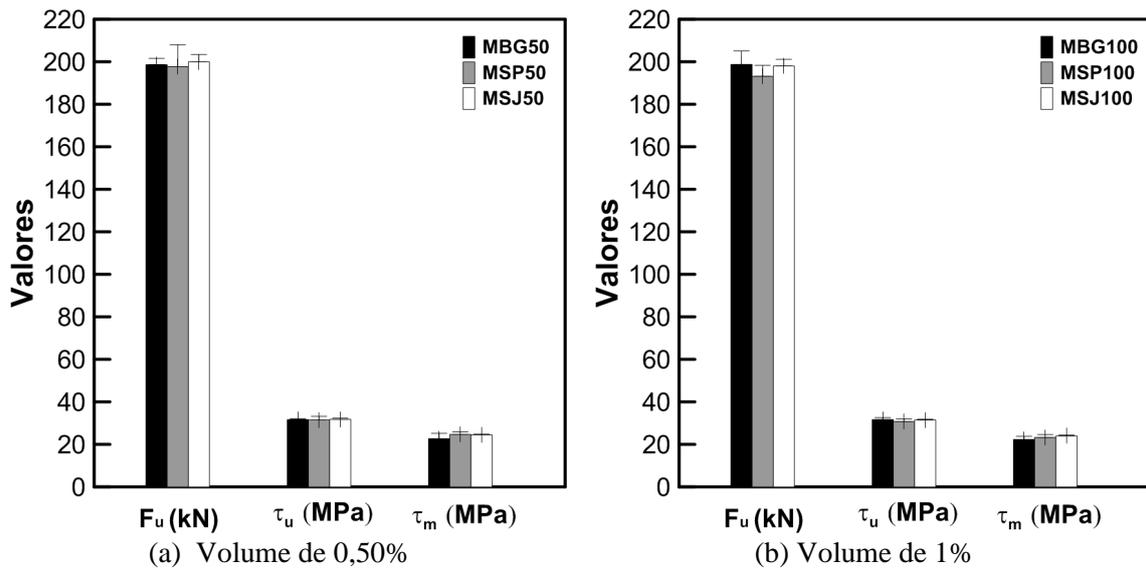


Figura 5.55 – Força última, tensão última e tensão média para as barra de 20mm

Observando as Figuras 5.56(a) nota-se de maneira geral, que houve ruptura por fendilhamento da barra de aço em relação ao concreto para volumes de 0,50% de fibras de aço. Na Figura 5.56 (b), observa-se houve ruptura por deslizamento da barra de aço em relação ao concreto para volumes de 1% de fibras de aço.

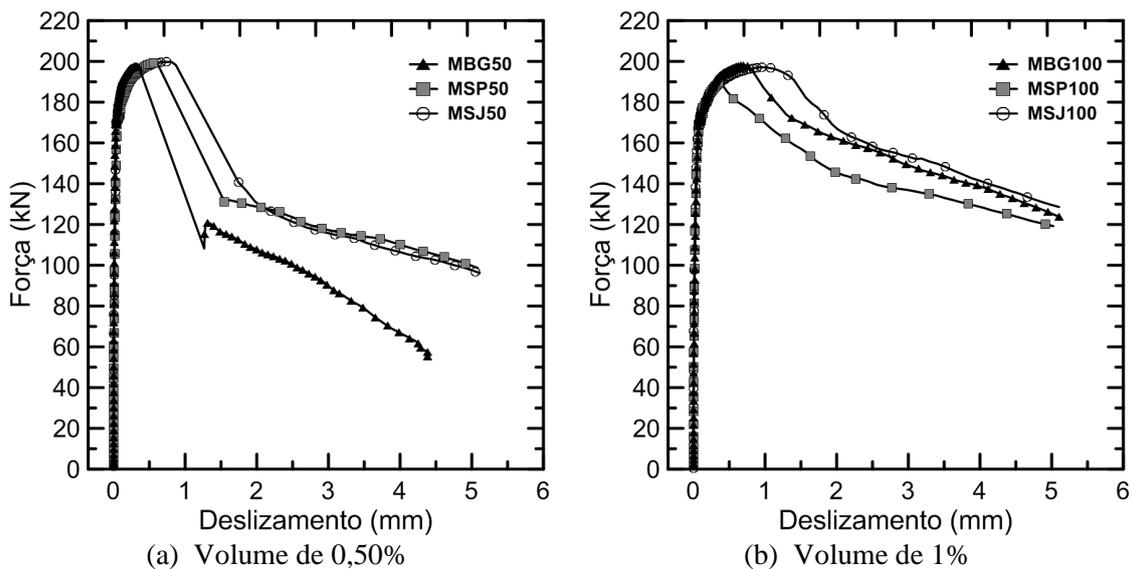


Figura 5.56 – Curvas típicas, força versus deslocamento, obtidas no ensaio de arrancamento de barras de aço de 20mm das matrizes com fibras de aço aos 28 dias

Nota-se que para os dois volumes de fibras de aço (0,50 e 1%) até a força de 160kN no trecho linear elástico, as matrizes tiveram um comportamento idêntico uma das outras.

A amostra do processo de fissuração dos blocos de concretos das matrizes com fibras de aço nas frações de 0,50% (Figura 5.57 (a)) e 1% (Figura 5.57 (b)) para modelos de barra de 12,5 mm, demonstram que para ambos os volumes de fibras, o processo de fissuração ocorreu por ruptura por deslizamento da barra em relação ao concreto. Percebe-se a irradiação das fissuras a partir do centro de onde a barra está ancorada até as extremidades dos blocos.

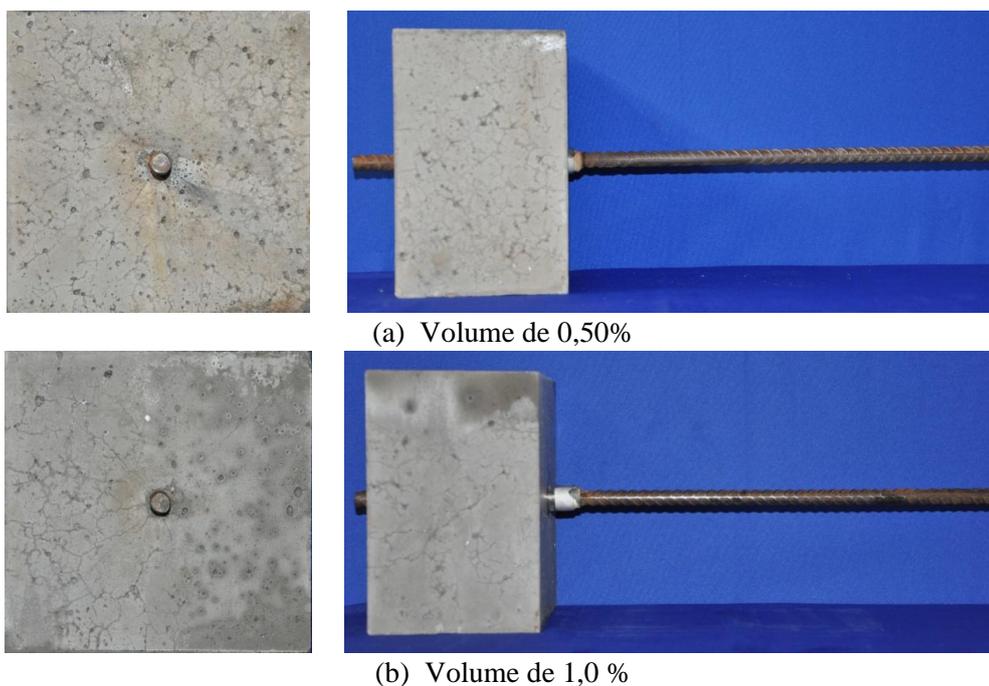


Figura 5.57 – Amostra do processo de fissuração para barras de 12,5mm

Na figura 5.58 (a) e (b), apresenta o processo de fissuração nos blocos de concretos das matrizes com fibras de aço nas frações de 0,50% e 1% respectivamente para modelos de 20 mm. A figura 5.55(a) apresenta irradiação das fissuras a partir do centro de onde a barra está ancorada até as extremidades dos blocos mas as fissuras maiores de fendilhamento não são visíveis. Já a Figura 5.58 (b), correspondente ao corpo de prova com 1% de fibras, grande parte das rupturas ocorreram pelo deslizamento da barra ocorreram por irradiação do centro para a extremidade do bloco.

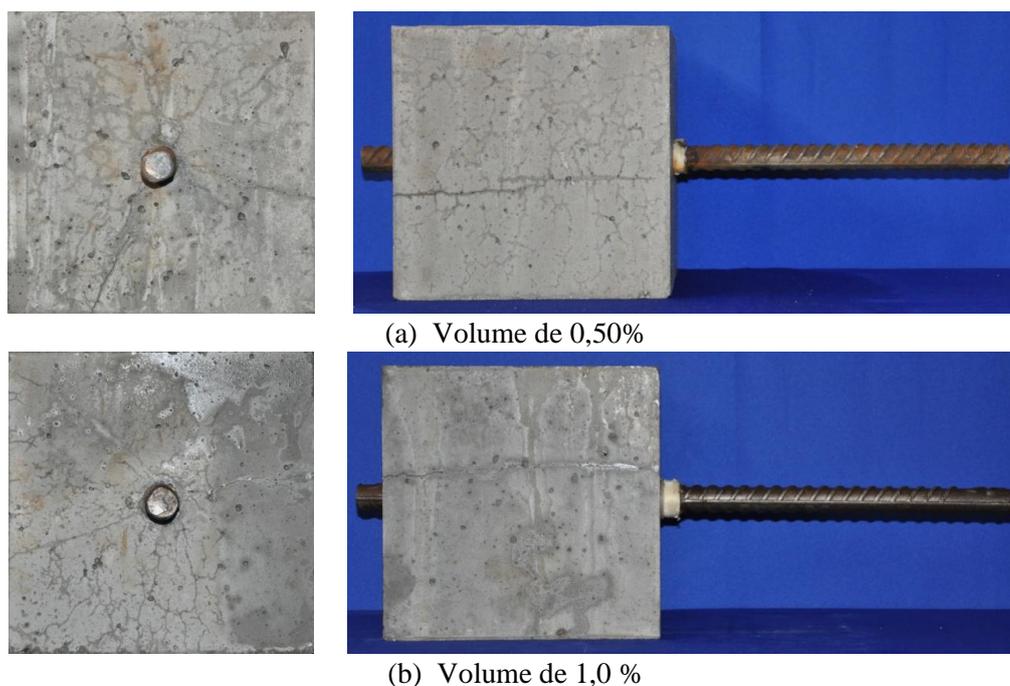


Figura 5.58 – Amostra do processo de fissuração para barras de 20mm

De acordo com as análises dos modelos de arrancamento para os três tipos de agregados e as duas frações volumétricas de fibras, pode-se concluir que:

Os resultados para os valores de tensão de aderência última e tensão de aderência média foram menores para a barra de 20mm em relação à barra de 12,5mm . Esses resultados estão de acordo com Soroushian e Shoi (1989), Soroushian et al. (1994) e Ducatti (1993), que em seus ensaios experimentais, constaram, que houve um decréscimo na tensão última de aderência quando se aumentou o diâmetro das barras.

Para Ducatti e Agopyan (1993), diâmetros e nervuras maiores, detém mais água de amassamento na face inferior da barra, isso proporciona uma maior espessura na zona de transição, enfraquecendo a ligação entre a matriz de argamassa e a armadura, acarretando aumento de poros e facilitando o esmagamento por compressão pelas nervuras.

O ACI 408R-03 (2003) preconiza que um determinado comprimento de ancoragem, quando se analisa o comportamento de aderência em termos de força necessária para o arrancamento, aumento do diâmetro da barra, gera aumento nos esforços de aderência

exigidos para provocar a ruptura de um determinado tipo de elemento. Para, Barbosa (2001), à medida que se aumenta o diâmetro da barra, a tensão última de aderência também aumenta. A pesquisadora justifica esse aumento no fato de o cobrimento e o trecho aderente ser dependente do diâmetro da barra. Ainda segundo a pesquisadora, a afirmação de que na face inferior da barra de maior diâmetro, o enfraquecimento da ligação por retenção de água na zona de transição aço concreto com maiores dimensões das nervuras é devido a um comportamento mais relacionado ao adensamento do concreto do que à espessura da zona de transição aço concreto.

1.23.2 Comportamento da aderência da barra de aço ao concreto através dos ensaios de tirantes.

1.23.2.1 Matrizes de referência

Os resultados médios das propriedades dos tirantes de concreto no ensaio de tração antes da fissuração estão apresentados na Tabela 5.19 e as propriedades após a fase de fissuração se encontram na Tabela 5.20.

Tabela 5.19 – Valores médios das propriedades dos ensaios nos tirantes até o surgimento da primeira fissura

Matriz	Força de 1 ^a fissura (kN)	Deformação de 1 ^a fissura ($\mu\epsilon$)	Resistência de 1 ^a fissura (MPa)	Módulo de elasticidade pré-fissuração (GPa)
MBG	98,55 ($\pm 4,3$)	80,80 ($\pm 5,51$)	4,38 ($\pm 4,34$)	44,70 ($\pm 4,05$)
MSP	97,61 ($\pm 1,51$)	55,17 ($\pm 10,95$)	4,34 ($\pm 3,74$)	44,15 ($\pm 3,29$)
MSJ	91,21 ($\pm 1,2$)	86,23 ($\pm 1,9$)	4,05 ($\pm 2,27$)	43,90 ($\pm 6,63$)

O valor da força de primeira fissura, encontra-se na (Tabela 5.19), observa-se que os valores para as matrizes de referência estão entre 91,21 e 98,55 kN. A análise estatística mostrou que houve diferença significativa entre os valores para as misturas MBG e MSJ com relação as forças de primeira fissura. A resistência de primeira fissura, das matrizes de referência, (Tabela 5.19), ficou entre 4,05 e 4,38 MPa; analisando os dados estatísticos, verificou-se que não ocorreu diferença significativa entre os três tipos de misturas. As deformações de primeira fissura (Tabela 5.19) variam de 55,17 a 86,23 $\mu\epsilon$

entre as matrizes, a análise de variância mostrou que não há diferença significativa entre os valores para as três misturas. O módulo de elasticidade (Tabela 5.19) do compósito antes da fase de fissuração variou de 44.15 a 44.70 GPa e após análise estatística foram são considerados iguais, isso indica que o tipo de agregado (brita e seixo de rio), não tem influência sobre o módulo de elasticidade na fase pré-fissuração do compósito.

Tabela 5.20 – Valores médios das propriedades dos ensaios nos tirantes após a múltipla fissuração

Matriz	Deformação de última fissura ($\mu\epsilon$)	Módulo de Elasticidade pós fissuração (GPa)	Força de escoamento (kN)
MBG	968,50 ($\pm 9,9$)	3,60 ($\pm 7,86$)	171,68 ($\pm 0,6$)
MSP	1119,40 ($\pm 6,4$)	3,50 ($\pm 9,02$)	175,49 ($\pm 1,88$)
MJP	1170,00 ($\pm 10,25$)	3,34 ($\pm 8,83$)	174,23 ($\pm 0,68$)

A Tabela 5.21 apresenta o módulo de elasticidade para os compósitos na fase elástica inicial, calculados através da equação (4.10), baseada no modelo ACK, desenvolvido por Aveston, Cooper e Kelly (1971), ver item 4.2.7.2. Foi determinada uma relação entre os valores do módulos de elasticidade obtidos experimentalmente (Tabela 5.21) e módulos de elasticidade teóricos para cada mistura de referência calculados pela equação 4.9. Analisando os módulos de elasticidade experimental e teórico, percebe-se que modelo ACK não se ajustou muito bem para as para as matrizes de referencia.

Tabela 5.21 – Valores do módulos de elasticidade teóricos e experimental para os compósitos na fase elástica inicial

Matriz	Módulo de elasticidade experimental (GPa)	Módulo de elasticidade teórico (GPa)
MBG	44,70	32,30
MSP	44,15	36,40
MJP	43,90	37,80

Após a fase de múltipla fissuração (Tabela 5.20), foram determinadas as deformações correspondentes a última fissura. A Tabela 5.20 mostra os valores calculados para as deformações de última fissura, com valores entre 968,50 e 1170,00 $\mu\epsilon$ para as matrizes de referência, estatisticamente não houve variação entre as misturas de referencia para deformação de ultima fissura. Terminada a fissuração, foi calculado os

módulos para cada curva durante o aumento de resistência. Os valores dos módulos de elasticidade pós fissuração (Tabela 5.20) para as misturas de referência ficaram entre foram de 3,34 a 3,60 GPa e estatisticamente iguais para as três misturas. A matriz, nesse ponto já está bem fissurada e não apresenta contribuição expressiva no suporte de rigidez, o comportamento do compósito passa a ser regido pelo comportamento do reforço no caso a barra de aço. A medida que o compósito decresce sua inclinação e atinge um patamar horizontal, verifica-se na etapa final do comportamento do tirante de concreto aos esforços de tração, indicando o início do escoamento do aço. Nesta fase o comportamento do compósito é regido praticamente em sua totalidade pelo aço e assim o escoamento ocorre em valor de força semelhante à força de escoamento do aço no ensaio de tração na barra de aço isolada. Com relação a força de escoamento, Tabela 5.20, os valores foram de 171,68 a 174,23 kN, os valores são considerados iguais estatisticamente.

O aumento da força de escoamento no compósito apresenta valores maiores que a força de escoamento na barra isolada devido a matriz fornecer uma contribuição ao suporte dos esforços por isso o escoamento ocorre a um patamar mais elevado. As curvas típicas de força *versus* deformação axial aos 28 dias para as matrizes encontram-se na Figura 5.59, assim como o comportamento da barra de aço no ensaio de resistência à tração. Nota-se que os gráficos apresentam quedas de força na etapa de fissuração indicando as aberturas de fissuras. Foi verificado que em alguns corpos de prova, as aberturas de fissuras se dão no mesmo momento e, portanto, elas aparecem no gráfico força *versus* deformação na mesma descida de força. A Figura 5.59, mostra o comportamento do compósito após a fissuração, observa-se que este, acompanha o comportamento do aço, isso mostra que o ensaio nesta fase é regido principalmente pelo reforço. Porém, a curva do compósito se encontra acima da curva do aço em todo o gráfico, evidenciando a existência de um valor de contribuição da matriz em todo o ensaio, inclusive quando já fraturada.

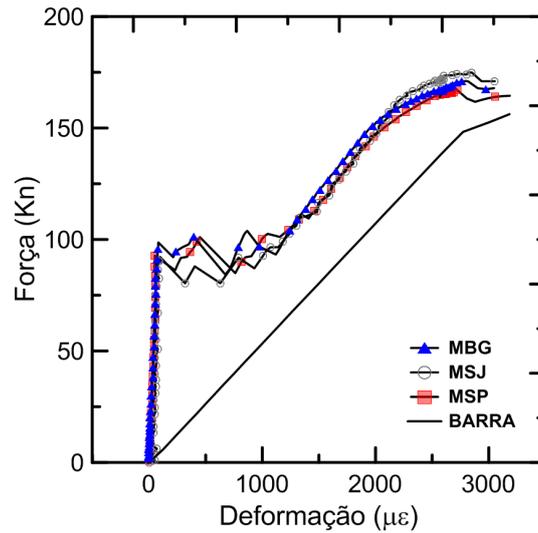


Figura 5.59 – Curvas típicas, força *versus* deformação obtidas no ensaio tração de tirantes das matrizes de referência aos 28 dias

A Figura 5.60 apresenta o gráfico força *versus* deformação dos tirantes para as matrizes de referência e o processo de fissuração, observa-se as quedas de força indicando abertura de fissura. O corpo de prova nesse caso, apresenta número de fissuras de três, visto que é possível verificar três quedas no gráfico, porém em todas as misturas de referência, mais de duas fissuras ocorreram em uma mesma queda de força.

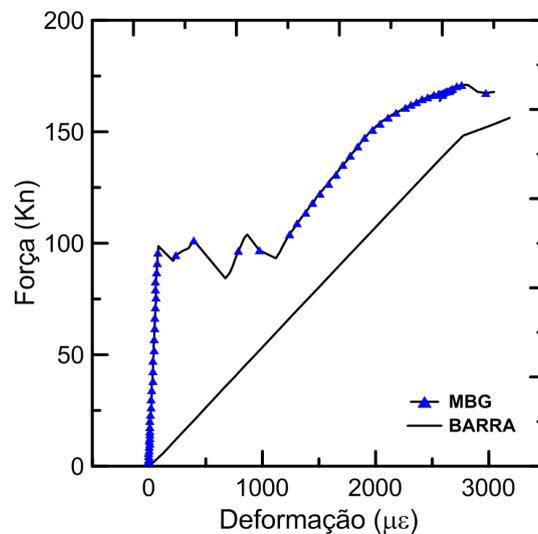


Figura 5.60 – Amostra do processo de fissuração dos tirantes de concreto sem fibras (exemplo: MBG) no ensaio de tração axial

Foi observado também, nas misturas de referência, menor número de fissuras com maiores aberturas do que nas misturas com fibras de aço. O panorama de fissuras podem ser observados na Figura 5.61.

As fissuras geralmente se formam transversalmente ao comprimento do tirante. Observou-se um padrão de formação de cinco fissuras com as primeiras aberturas bem maiores que as subsequentes, sempre mais finas, o resultado do panorama para cada tirante foi de cinco fissuras. A ordem de aparecimento das fissuras na face do corpo de prova está apresentado na Figura 5.61 e está indicado pelos números acima de cada fissura. Este padrão de fissuração dos tirantes sob esforços de tração axial se seguiu para todos os traços das misturas de referência.



Figura 5.61 – Amostra do processo de fissuração no corpo de prova de tirantes com matriz de referência sob esforços de tração, com marcação da ordem das fissuras

A metodologia de análise do espaçamento de fissuras foi realizado conforme procedimento relatado no item 4.2.7.2., onde foi determinado a evolução de

espaçamento médio entre as fissuras no decorrer de todo o ensaio para as misturas estudadas. A Figura 5.62 apresenta os gráficos de espaçamento médio entre fissuras *versus* deformação específica juntamente com força *versus* deformação para os tirantes de concreto das misturas de referência.

O espaçamento médio final entre as fissuras, foi de 113,4mm (MBG), 114,4mm (MSP) e 115,7mm para (MSP) conforme Tabela 5.22. A análise estatística pela ANOVA demonstrou que os espaçamentos médios entre fissuras são iguais dentro das matrizes de referência analisadas, indicando que o tipo de agregado não modifica essa característica do concreto.

Tabela 5.22 – Coeficiente de conformação superficial calculado pela NBR 7477

Matriz	Espaçamento médio entre fissuras (mm)	Coeficiente de conformação superficial (adaptado da NBR 7477)	Tensão de aderência (MPa) (adaptado da NBR 6118)
MBG	113,40	2,90	9,02
MSP	114,40	2,90	7,50
MSJ	115,70	2,85	8,32

O coeficiente de conformação superficial, foi calculado , adaptado da NBR 7477 (Equação 4.11, item 4.2.7.2), apenas como critério de comparação. Percebe-se que para as três matrizes de referência não houve variação do coeficiente de conformação superficial. Para os valores de tensão de aderência (Equação 4.12, item 4.2.7.2), os valores variaram entre 7,50 (MSP) e 9,02 (MBG).

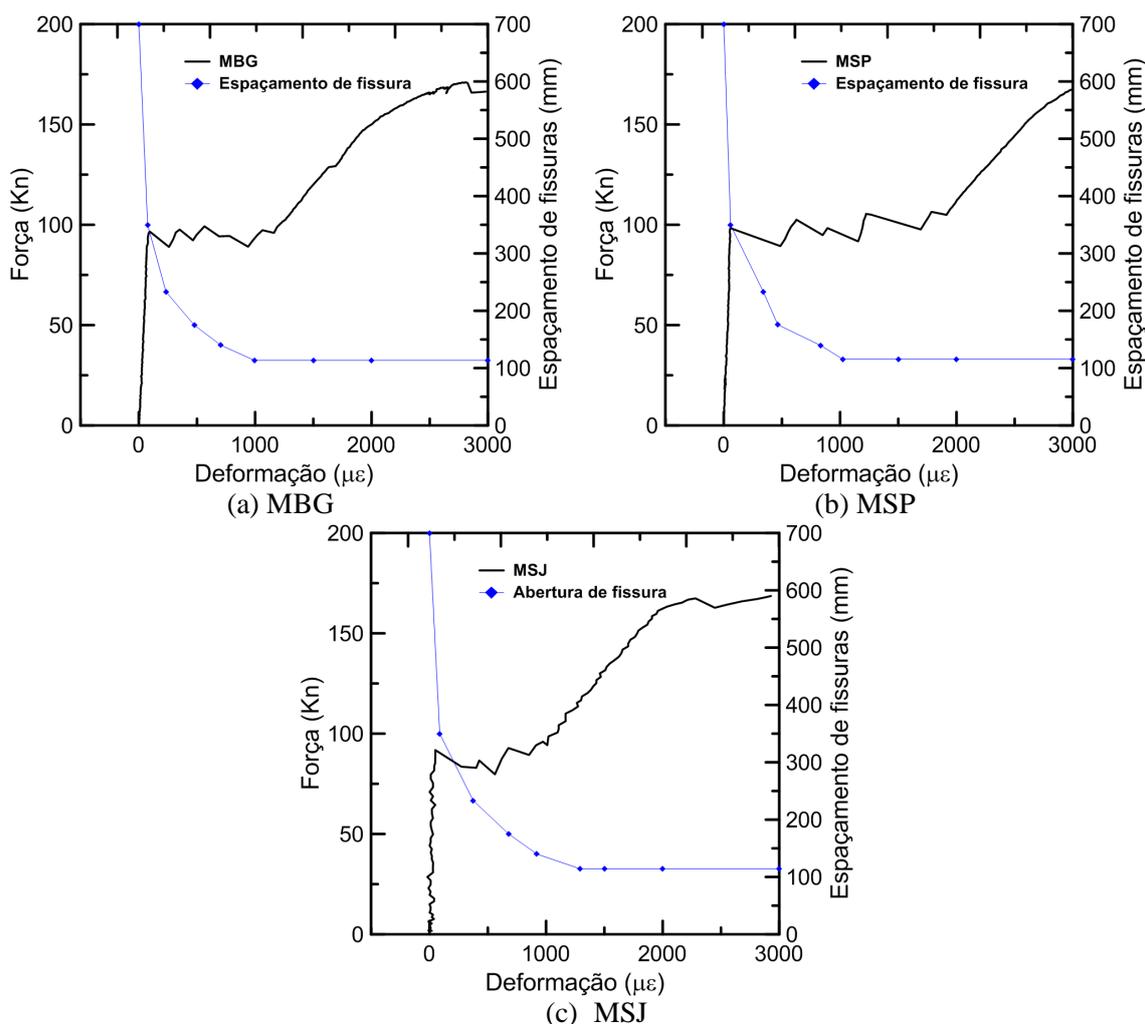


Figura 5.62 – Evolução do espaçamento médio entre fissuras para o ensaio de tração em tirantes de concreto

Foram obtidos valores de coeficiente de conformação superficial de 2,85 a 2,90, praticamente iguais para as misturas de referência. A NBR 7480 (2007) determina o valor mínimo do coeficiente 1,0 para a classe de 25 MPa e de 1,5 para a classe de 60 MPa esse valor atende a todos os concretos produzidos. A análise da abertura de primeira fissura foi realizada como explicado em no item 4.2.7.2.

Foi realizado a medição da primeira fissura e sua evolução ao longo de todo o ensaio em cada corpo de prova. A Figura 5.63 apresenta os gráficos com a evolução de abertura de primeira fissura *versus* deformação específica junto com a força *versus* deformação para os tirantes de concreto das misturas estudadas.

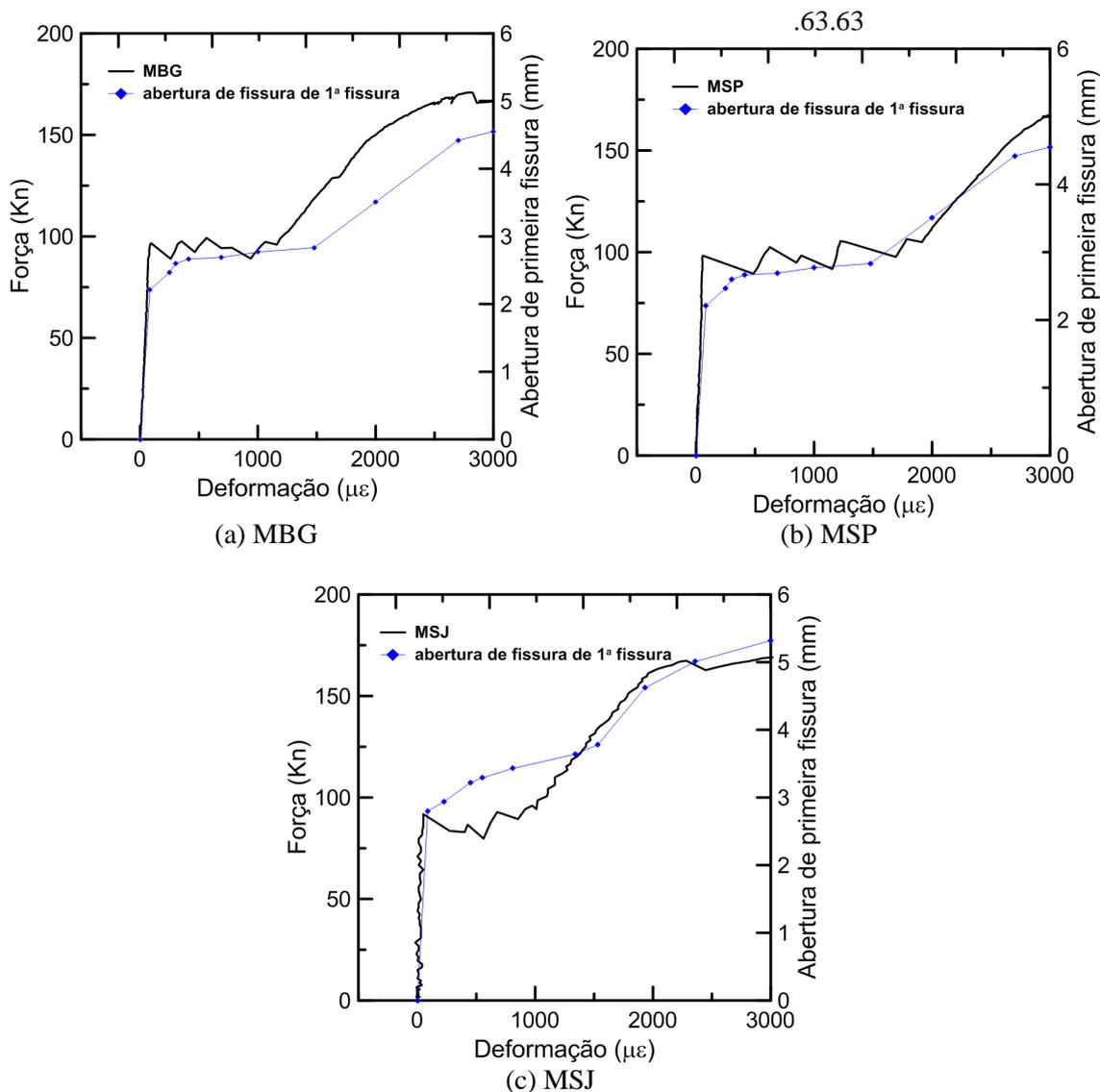


Figura 5.63 – Evolução da abertura de fissura média para o ensaio de tração em tirantes de concreto

Os gráficos de abertura de primeira fissura mostram que, para as três misturas, nota-se que no surgimento da primeira fissura, o aumento é mais elevado até o surgimento da próxima fissura. Com o avanço do processo de fissuração, o aumento de abertura da primeira fissura diminui, como consequência, enquanto as próximas fissuras abrem, a primeira fissura não sofre grandes variações quanto ao tamanho. Entretanto, com a abertura da última fissura, a primeira fissura volta a abrir com um maior aumento, isso indica que após o processo de fissuração, o aumento da primeira fissura é novamente elevado. Próximo ao início de escoamento do aço, a primeira

fissura diminui a taxa de abertura, porém ainda se mantém crescente. Não há uma variação acentuada do comportamento devido ao patamar de fissuração nas três matrizes de referência estudadas.

1.23.2.2 Matrizes com adição de fibras de aço

Tabela 5.23 – Valores médios das propriedades dos ensaios nos tirantes após a múltipla fissuração

Matriz	Força de 1 ^a fissura (kN)	Deformação de 1 ^a fissura ($\mu\epsilon$)	Resistência de 1 ^a fissura (MPa)	Módulo de elasticidade pré-fissuração (GPa)
MBG50	106,4 ($\pm 1,1$)	100,3 ($\pm 7,5$)	4,7 ($\pm 1,1$)	46,5 ($\pm 2,4$)
MSP50	102,1 ($\pm 8,3$)	100,1 ($\pm 4,5$)	4,6 ($\pm 9,6$)	46,7 ($\pm 3,1$)
MJP50	107,7 ($\pm 3,7$)	79,2 ($\pm 8,0$)	4,7 ($\pm 3,7$)	46,8 ($\pm 4,2$)
MBG100	105,3($\pm 2,0$)	72,5 ($\pm 9,2$)	4,6 ($\pm 2,0$)	47,7 ($\pm 3,4$)
MSP100	111,7 ($\pm 1,0$)	82,6 ($\pm 12,4$)	4,9 (± 10)	47,9 ($\pm 4,1$)
MSJ100	115,8($\pm 2,2$)	107,0 ($\pm 3,1$)	5,1($\pm 2,2$)	47,2 ($\pm 3,1$)

O valor da força de primeira fissura pode ser observado na (Tabela 5.23); nota-se que para os valores das matrizes com fração volumétrica de 0,50%, a diferença ficou entre 102,1 a 107,7 kN, já para as de 1%, a diferença foi entre 72,5 a 107,0 kN. A análise estatística mostrou que não houve diferença significativa entre os valores para as misturas MBG50, MSP50 e MSJ50, porém as misturas MBG100 e MSJ100 foram diferentes estatisticamente em relação a força de primeira fissura. A resistência de primeira fissura (Tabela 5.23) das matrizes com 0,50% variaram de 4,6 a 4,7 MPa e para a fração volumétrica de 1% os valores variaram entre 4,6 e 5,1kN. Analisando os dados estatísticos, verificou-se que não ocorreu diferença significativa entre os três tipos de misturas, tanto na fração de 0,50% quanto na de 1%.

Com relação as deformações de primeira fissura (Tabela 5.23), para a fração 0,50, a variação ficou entre 79,2 e 100,3 $\mu\epsilon$, para a fração de 1%, os valores variaram entre 72,5 e 115,8 $\mu\epsilon$, a análise de variância mostrou que há diferença significativa entre MBG e MSP, MBG e MSJ na fração de 050%. Para a fração de 1%, o resultado estatístico indicou diferença significativa para MBG e MSJ, MSJ e MSP. O módulo de elasticidade do compósito (Tabela 5.23) antes da fase de fissuração, variou de 46,5 a 46,8 GPa para a fração com 0,50% de fibras e 47,2 a 47,9 GPa para a fração com 1% de

fibra de aço, após análise estatística, foram são considerados iguais, indicando que o tipo de agregado (brita e seixo de rio), não tem influência sobre o módulo de elasticidade na fase pré-fissuração do compósito.

Tabela 5.23 – Valores médios das propriedades dos ensaios nos tirantes após a múltipla fissuração

Matriz	Deformação de última fissura ($\mu\epsilon$)	Módulo de Elasticidade pós fissuração (GPa)	Força de escoamento (kN)
MBG50	1080,1 ($\pm 12,3$)	4,5 ($\pm 4,1$)	189,6 ($\pm 1,64$)
MSP50	690,4 ($\pm 9,5$)	5,6 ($\pm 5,2$)	213,7 ($\pm 0,1$)
MJP50	646,7 ($\pm 6,6$)	5,7 ($\pm 3,4$)	193,6 ($\pm 1,48$)
MBG100	1230,6 ($\pm 0,4$)	7,6 ($\pm 1,4$)	210,4 ($\pm 1,63$)
MSP100	1203,0 ($\pm 8,1$)	7,5 ($\pm 5,2$)	196,0 ($\pm 0,90$)
MSJ100	1418,0 ($\pm 0,9$)	6,6 ($\pm 1,5$)	213,56 ($\pm 0,35$)

A Tabela 5.24 apresenta o módulo de elasticidade para os compósitos nas frações volumétricas de fibras de aço de 0,5% e 1% na fase elástica inicial, calculados através da equação (4.10), baseada no modelo ACK, desenvolvido por Aveston, Cooper e Kelly (1971), ver item 4.2.7.2. Comparando os módulos experimental e teórico, percebe-se que não houve uma boa previsão pelo modelo ACK para as frações de 0,50% e 1% de fibras de aço.

Tabela 5.24 – Valores do módulos de elasticidade teóricos para os compósitos na fase elástica inicial

Matriz	Módulo de elasticidade experimental (GPa)	Módulo de elasticidade teórico (GPa)
MBG50	46,5	33,9
MSP50	46,7	37,2
MSJ50	46,8	38,7
MBG100	47,7	33,4
MSP100	47,9	37,9
MSJ100	47,2	37,8

A Tabela 5.23, mostra os valores de deformações correspondentes a última fissura. As fração de volume 0,50% de fibra de aço obteve valores variando entre 646,7 e 1080,1 $\mu\epsilon$ as misturas MBG e MSP, MBG e MSJ foram estatisticamente diferentes quando comparadas entre si. Os valores para a mistura de com 1% de fibras de aço ficaram entre 1203,0 e 1418,0 $\mu\epsilon$ e estatisticamente diferente para as misturas de MBG e MSJ, MSP e MSJ. Os módulos de elasticidade pós fissuração estão descritos na

Tabela 5.23. Nas misturas de com 0,50% de fibras de aço, os valores variaram entre 4,5 a 5,7 GPa e foram estatisticamente diferentes para as misturas MBG e MSP, MBG e MSJ. Na fração de 1% de fibras de aço, esses valores variaram de 6,6 a 7,6 GPa e foram estatisticamente diferentes para as misturas MSP e MSJ, MBG e MSJ. Para força de escoamento, (Tabela 5.23) na fração de 0,50%, os valores variaram de 189,6 a 193,6 kN, e foram estatisticamente diferentes para as misturas MBG e MSP, MSP e MSJ. Para a fração de 1%, os valores variaram de 196,0 a 213,56 kN, e também foram considerados estatisticamente diferentes para as misturas MBG e MSP, MSP e MSJ. As curvas típicas de força *versus* deformação axial aos 28 dias para matrizes de frações volumétricas 0,50 e 1% encontram-se na Figura 5.64. Nota-se um aumento significativo no trecho de pós fissuração para essas frações indicando que as fibras contribuem para o enrijecimento da força de tração no tirante de concreto. A Figura 5.64, mostra o comportamento do compósito após a fissuração, observa-se que este, acompanha o comportamento do aço, isso mostra que o ensaio nesta fase é regido principalmente pelo reforço.

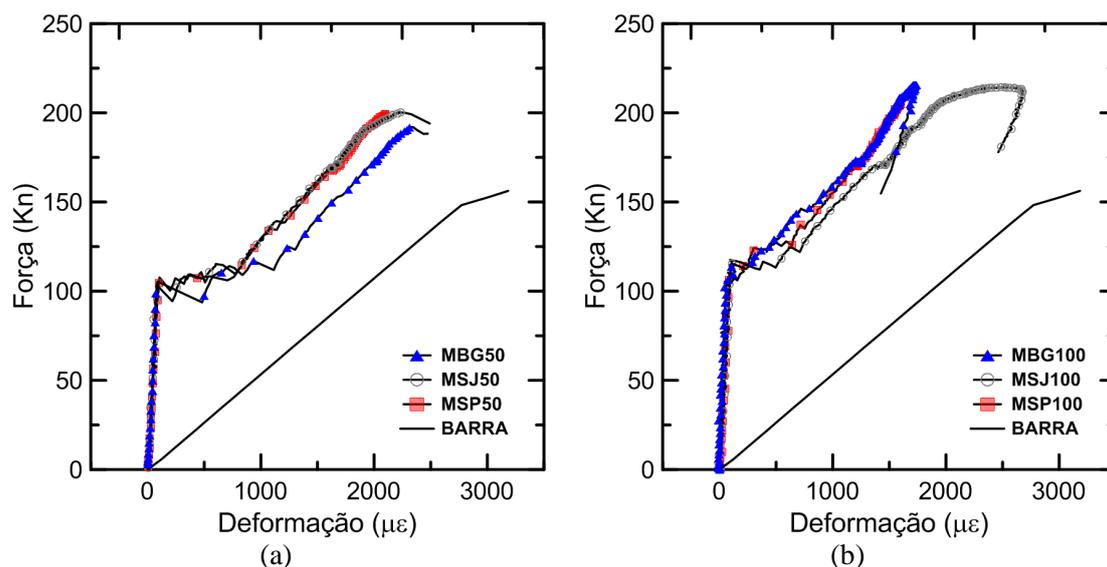


Figura 5.64 – Curvas típicas, típicas, força *versus* deformação obtidas no ensaio tração de tirantes das matrizes com fibras de aço frações: de 0,50% e 1,0% aos 28 dias

Porém, a curva do compósito encontra-se acima da curva do aço em todo o gráfico, principalmente para a fração de 1% de fibras de aço, evidenciando a existência de um valor de contribuição da matriz em todo o ensaio, inclusive quando já fraturada.

A Figura 5.65 mostra o gráfico força *versus* deformação dos tirantes para as matrizes com volumes de fibras de aço de 0,50% assim como o processo de fissuração. Observa-se uma menor descida no gráfico quando há uma ruptura de fissura. O corpo de prova nesse caso, apresenta número de fissuras de seis. Foi observado também nas misturas de 0,50%, um maior número de fissuras com menores aberturas do que nas misturas de referência. O panorama de fissuras podem ser observados na Figura 5.66.

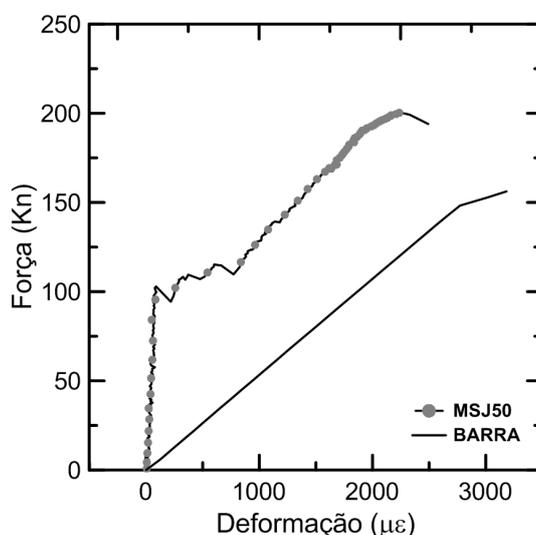


Figura 5.65 – Amostra do processo de fissuração dos tirantes de matrizes com fibras (exemplo: MSJ50) no ensaio de tração axial



Figura 5.66 – Amostra do processo de fissuração no corpo de prova de tirantes com matrizes com fibras (0,5%) sob esforços de tração, com marcação da ordem das fissuras

As Figuras 5.67 mostra o gráfico força *versus* deformação dos tirantes para as matrizes de 1% de volume de fibras de aço e o processo de fissuração. Observa-se que o processo de fissuração foi bem diferente das outras duas misturas. O corpo de prova nesse caso, apresenta número de fissuras de dez. Foi observado também, nas misturas de 1% um aumento do número de fissuras com aberturas muito reduzidas. O panorama de fissuras podem ser observados na Figura 5.68.

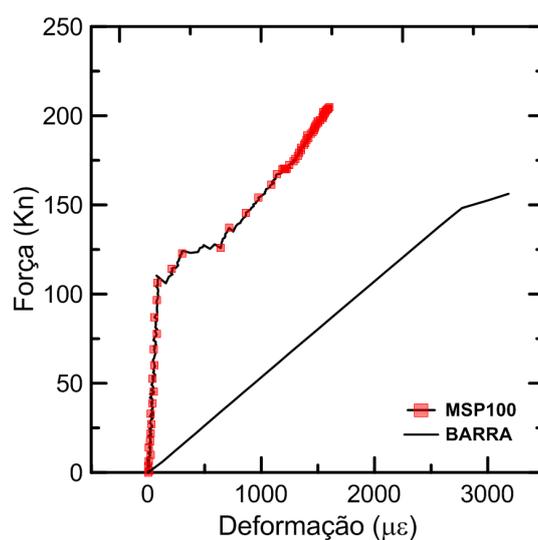


Figura 5.67 – Amostra do processo de fissuração dos tirantes de matrizes com fibras (exemplo: MSP100) no ensaio de tração axial



Figura 5.68 – Amostra do processo de fissuração no corpo de prova de tirantes com matrizes com fibras (1%) sob esforços de tração, com marcação da ordem das fissuras

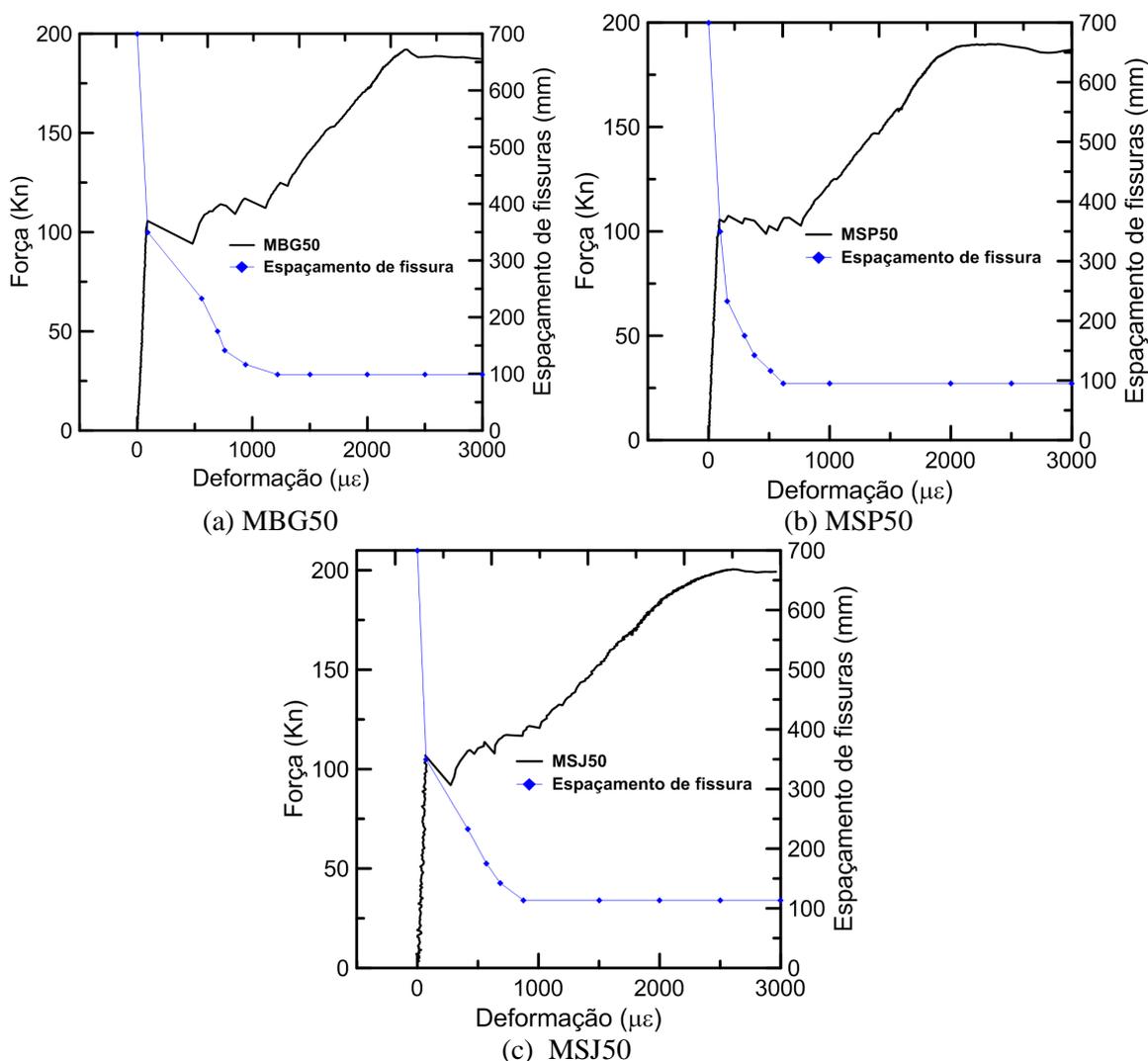


Figura 5.69 – Evolução do espaçamento médio entre fissuras para o ensaio de tração em tirantes de concreto para volume de 0,50%

A Figura 5.69 e 5.70 apresentam os gráficos de espaçamento médio entre fissuras *versus* deformação específica juntamente com força *versus* deformação para os tirantes de concreto para as misturas de 0,5% e 1%. O espaçamento médio final entre as fissuras, para a fração volumétrica de 0,5% foi de 98,75 mm (MBG50), 113,59mm (MSJ50) e 95,4 mm para (MSP50). Para a fração de 1%, os valores são de 62,2 mm (MBG100), 60,2 mm (MSJ)100 e 61,6 mm (MSP100).

Tabela 5.25 – Coeficiente de conformação superficial calculado pela NBR 7477, pela Equação (5.1)

Matriz	Espaçamento médio entre fissuras (mm)	Coeficiente de conformação superficial (adaptado da NBR 7477)	Tensão de aderência (MPa) (adaptado da NBR 6118)
MBG50	98,75	3,4	11,53
MSP50	95,45	3,5	11,37
MSJ50	113,59	2,9	9,13
MBG100	62,2	5,4	26,73
MSP100	61,6	5,4	24,84
MSJ100	60,2	5,5	28,60

O coeficiente de conformação superficial, foi calculado , adaptado da NBR 7477, apenas como critério de comparação. Nota-se que houve um aumento do coeficiente de conformação superficial com o aumento das frações volumétricas. Para a fração volumétrica de 0,50%, os valores variaram entre 2,9 (MSJ50) e 3,5 (MSP50). Para a fração volumétrica de 1%, praticamente não teve variação nos valores. Para os valores de tensão de aderência, os valores ficaram entre 9,13 (MSJ50) e 11,53 (MBG50) e para as fração de 1% 26,73 (MBG100) e 28,60 (MSJ100).

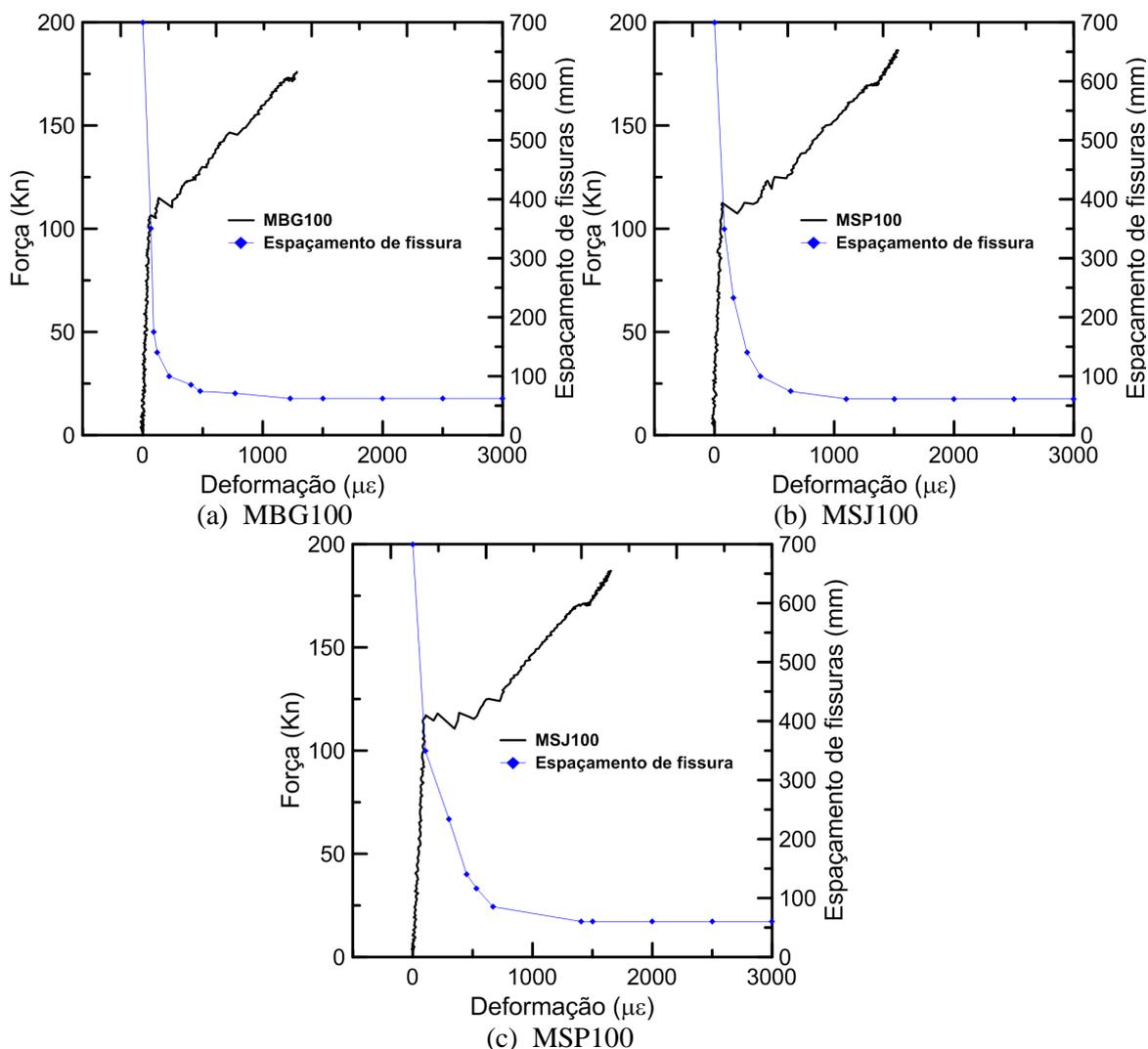


Figura 5.70 – Evolução do espaçamento médio entre fissuras para o ensaio de tração em tirantes de concreto para volumes de 1%

Os gráficos de abertura de primeira fissura (Figura 5.71 e 5.72), para os volumes de fibra de 0.5% e 1%, mostram que para houve um aumento do número de fissuras e um decréscimo no espaçamento dessa fissuras.

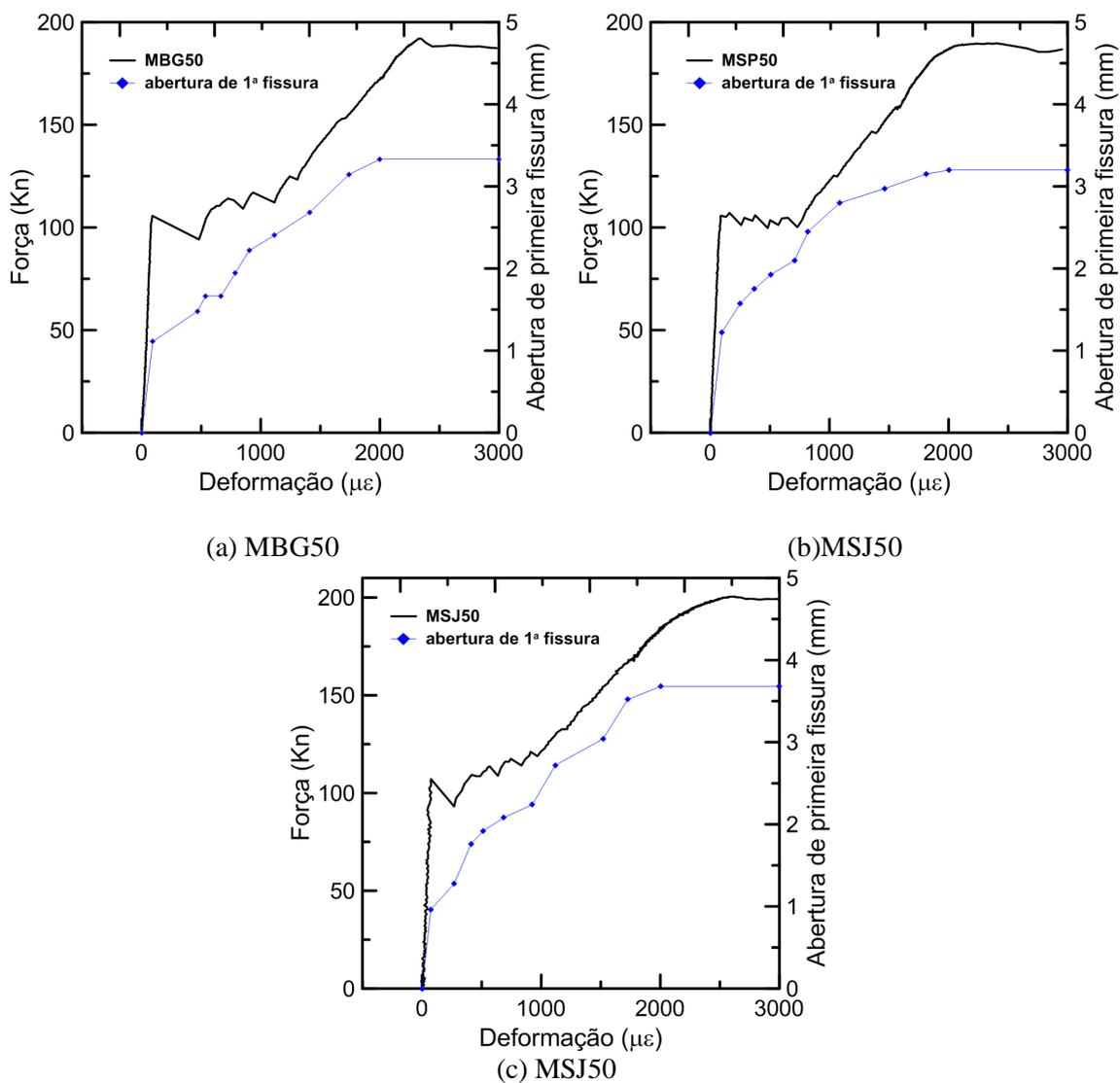


Figura 5.71 – Evolução do espaçamento médio entre fissuras para o ensaio de tração em tirantes de concreto

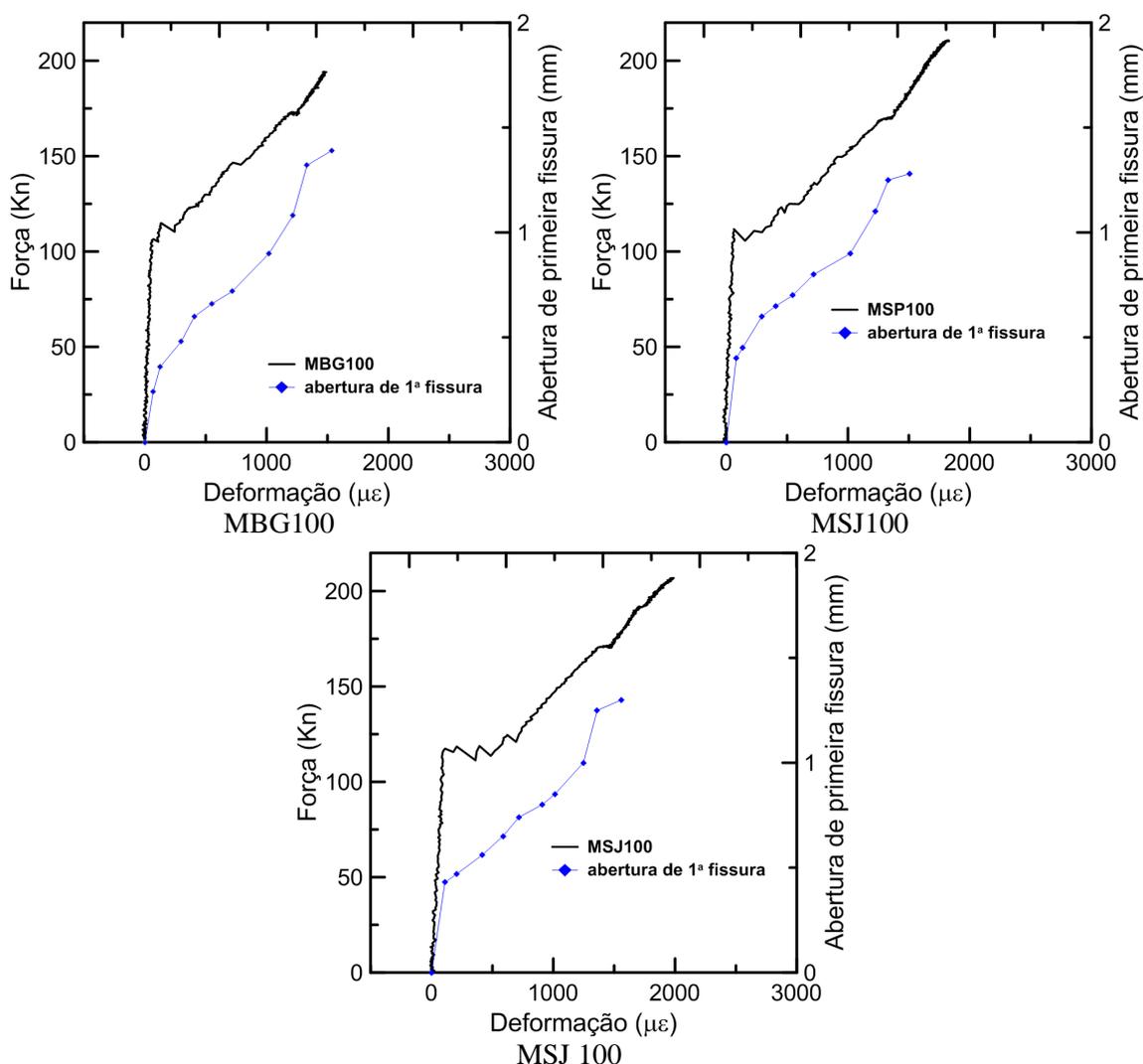


Figura 5.72 – Evolução do espaçamento médio entre fissuras para o ensaio de tração em tirantes de concreto

Os gráficos de abertura de primeira fissura mostram que, para as três misturas com volume de fibras de 0,50% e 1% até o surgimento da primeira fissura, os valores não sofreram aumento significativo ficando próximos dos valores das matrizes de referência. Com o avanço do processo de fissuração, o aumento de abertura da primeira fissura diminui, como consequência, enquanto as próximas fissuras abrem, a primeira fissura não sofre grandes variações quanto ao tamanho. Porém a inclinação do gráfico aumenta devido a ação das fibras de aço, com maior aumento para a fração de 1%. Assim como aconteceu com as matrizes de referência, após a abertura da última fissura, a primeira fissura volta a abrir com um maior aumento, indicando que

após o processo de fissuração, o aumento da primeira fissura é novamente elevado. Próximo ao início de escoamento do aço, a primeira fissura diminui a taxa de abertura, porém ainda se mantém crescente. Diferentemente das matrizes de referência, houve uma variação acentuada do comportamento devido ao patamar de fissuração nas três matrizes tanto para a fração de 0,50% como para 1%.

1.23.3 Absorção Total, índice de vazios e Massa Específica.

De acordo com a Tabela 5.26, observa-se a absorção total para as matrizes de referência. A ANOVA demonstrou que estatisticamente, a matriz MBG foi diferente para a MSP e MSJ e obteve 4,8% e 2,9% a mais de absorção total do que as matrizes de MSP e MSJ respectivamente.

Tabela 5.26 – Parâmetros de absorvidade das matrizes de referência.

Matrizes	Absorção total		Índice de vazios		Massa específica	
	Média	CV(%)	Média	CV(%)	Média	CV(%)
MBG	1,11	1,9	2,48	1,4	2,22	0,6
MSP	1,05	1,2	2,32	1,1	2,20	0,5
MSJ	1,08	1,2	2,38	1,1	2,21	0,3

A Figura 5.73 apresenta os valores de absorção total das matrizes de referência estudadas.

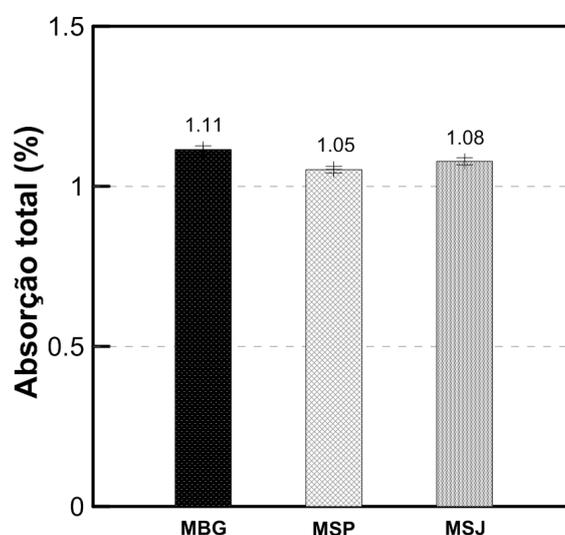


Figura 5.73 – Valores para absorção total para matrizes de referência.

A análise estatística para o índice de vazios apresentou-se similar a da absorção, demonstrando que a matriz MBG foi diferente em relação às demais matrizes demonstrando um acréscimo do índice de vazios da matriz MBG de 6,9% e 2,6% em relação à MSP e MSJ. A Figura 5.74 apresenta os valores de absorção total das matrizes de referência estudadas.

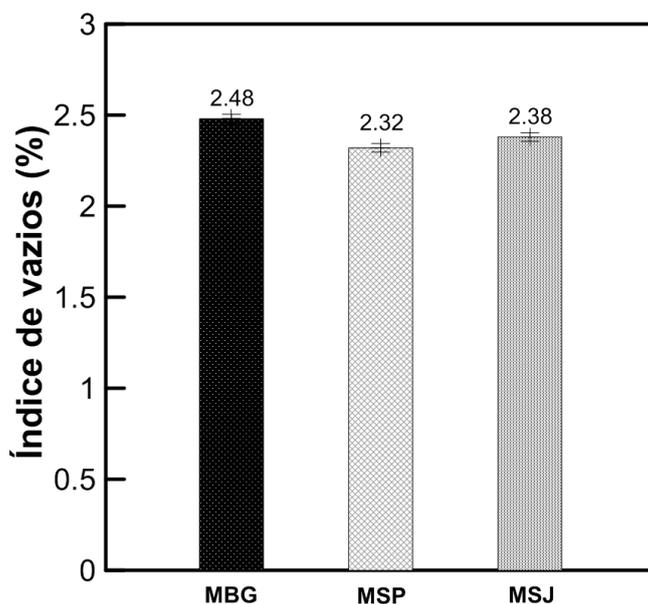


Figura 5.74 – Valores para índice de vazios total para matrizes de referência.

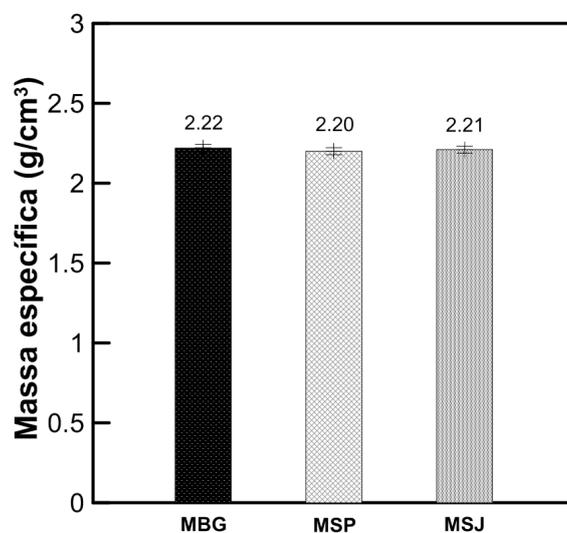


Figura 5.75 – Valores para massa específica para matrizes de referência

As massas específicas estão representadas graficamente na Figura 4.75. A massa específica das matrizes de referência foram estatisticamente iguais não demonstrando variações entre si.

1.23.4 Absorção de água por capilaridade

Na Figura 5.76 estão ilustradas as curvas de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo para as matrizes de referência estudadas.

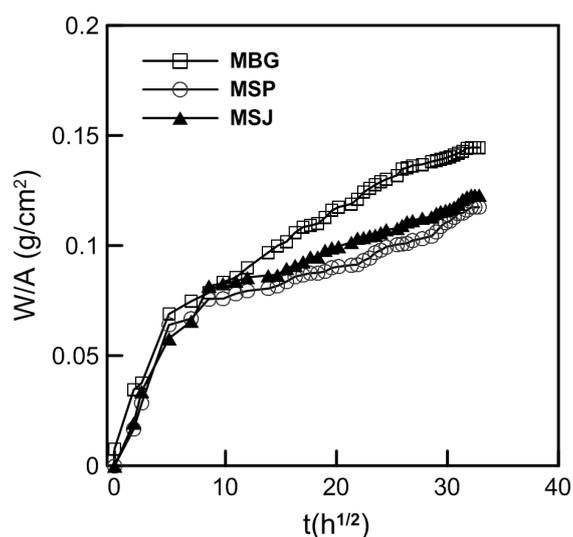


Figura 5.76 – Valores para absorbitividade para matrizes de referência

Na Tabela 5.27 encontram-se os valores de absorbitividade. Pela ANOVA, as matrizes de referência não apresentam entre elas tanto no estágio um, ponto de transição e estágio dois.

Tabela 5.27 – Parâmetros de absorvidade das matrizes de referência

Matrizes	Estágio 1		Ponto de Transição		Estágio 2	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
MBG	0,0123	0,002	0,073	0,005	0,003	0,001
MSP	0,0133	0,002	0,065	0,013	0,002	0,001
MSJ	0,0119	0,002	0,070	0,003	0,002	0,001

1.23.5

1.23.6 Penetração acelerada de íons cloreto

A partir dos resultados de penetração acelerada de íons cloreto (Figura 5.77) pode-se dizer que todos as três matrizes tiveram valores de carga elétrica abaixo de 0,1, indicando que o nível de penetrabilidade de íons cloreto é muito baixo.

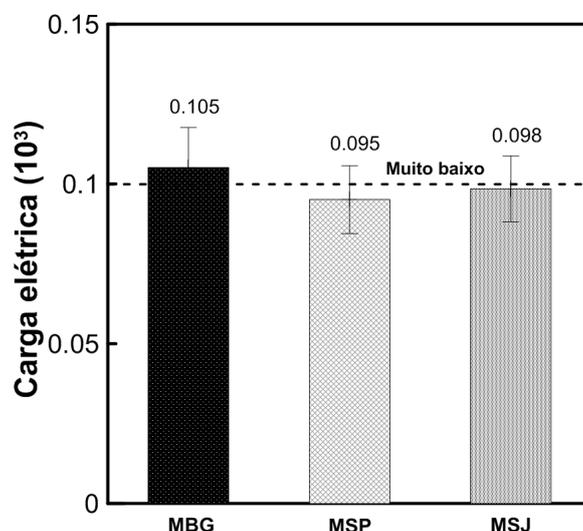
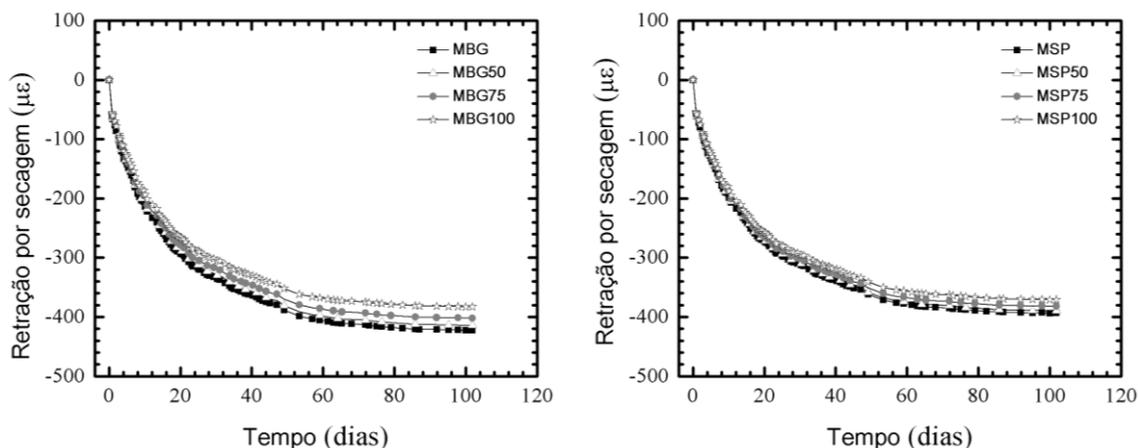


Figura 5.77 – Valores para penetração por íons cloreto para matrizes de referência

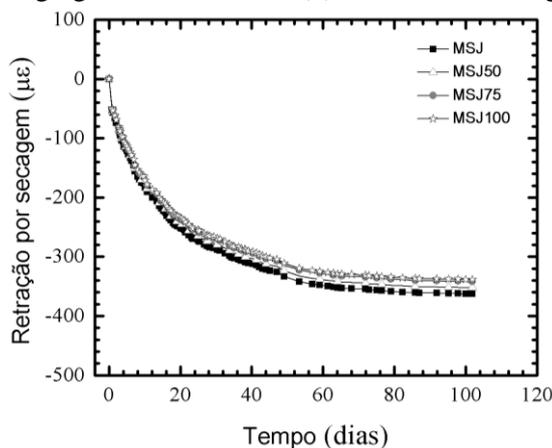
1.23.7 Retração por secagem

As curvas médias obtidas de retração por secagem *versus* tempo, para as matrizes autoadensáveis são mostradas na Figura 5.78. Os resultados de retração por secagem, aos 28 e 101 dias, contados a partir do início do ensaio, são apresentados na Tabela 5.28. Após 28 dias inicia-se o ensaio de retração pro secagem.



(a) Matrizes com o agregado brita

(b) Matrizes com o agregado seixo de rio (SP)



(c) Matrizes com o agregado seixo de rio (SJ)

Figura 5.78 – Retração por secagem com o tempo

Através da figura 5.78 nota-se que a adição de fibras de aço nas misturas diminuiu a retração por secagem. A matriz MBG apresentou retração por secagem igual a $422\mu\epsilon$ aos 101 dias, as matrizes MBG50, MBG75 e MBG100 apresentaram valores de $414\mu\epsilon$, $401\mu\epsilon$ e $382\mu\epsilon$ respectivamente (Tabela 5.28) e sua diferença representam reduções de 1,9 %, 5% e 9,5 % em relação a matriz de referência MBG. A matriz MSP apresentou retração por secagem igual a $393\mu\epsilon$ aos 101 dias, as matrizes MSP50, MSP75 e MSP100 apresentaram valores de $389\mu\epsilon$, $381\mu\epsilon$ e $370\mu\epsilon$ respectivamente, e reduções de 1,0 %, 3% e 6 % em relação ao resultado da matriz de referência MSP. Para a matriz MSJ o valor de retração por secagem foi de $362\mu\epsilon$ as matrizes MSJ50, MSJ75 e MSJ100 apresentaram valores de $351\mu\epsilon$, $341\mu\epsilon$ e $338\mu\epsilon$ respectivamente, as reduções em relação à matriz de referência foram de 3,0%, 6% e 7% em relação ao resultado da

matriz de referência. Observa-se ainda que após 28 dias de ensaio, 78% das deformações de retração por secagem já tinham sido ocorridas.

Tabela 5.28 – Valores da deformação por secagem das matrizes

Matrizes	Deformação ($\mu\epsilon$)	
	28 dias	101 dias
MBG	330	422
MBG50	324	414
MBG75	314	401
MB100	299	382
MSP	308	393
MSP50	304	389
MSP75	298	381
MSP100	290	370
MSJ	283	362
MSJ50	275	351
MSJ75	267	341
MSJ100	264	338

A Figura 5.79 mostra as médias e os desvios das três matrizes de referência. O maior desvio ocorreu para a matriz MSP, através da análise estatística, verificou-se que as matrizes são significativamente diferentes entre si, entretanto, não se pode concluir que essa diferença se deva ao tipo de agregado utilizado em cada matriz.

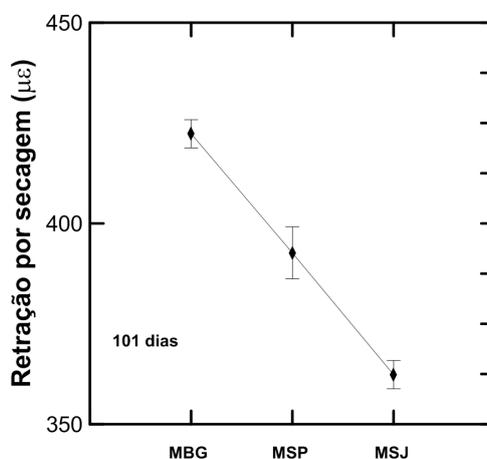
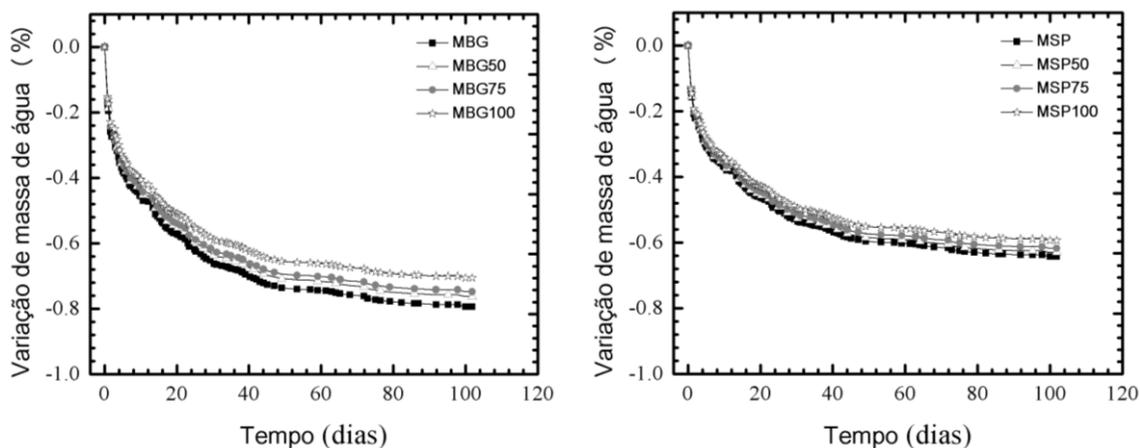


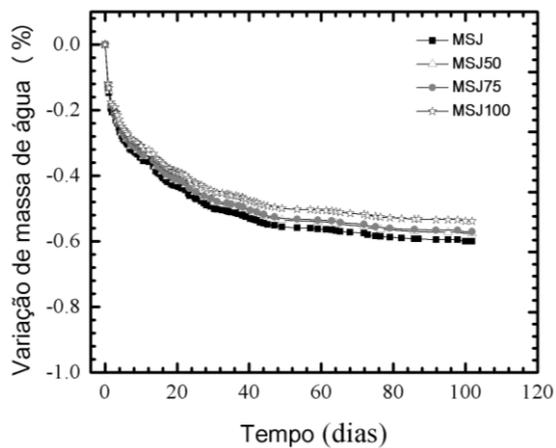
Figura 5.79 – Retração por secagem das matrizes de referência

A Figura 5.80 mostra a variação média de massa de água para cada matriz autoadensável estudada. De acordo com a Figura 5.80, percebe-se que a variação de massa das amostras ocorreu até 60 dias de ensaio após esse tempo de ensaio, não se percebe mais essa variação. A matriz MBG um valor para variação de massa de água aos 101 dias de 8% já as matrizes MSP E MSJ, obtiveram ambas 6% de variação, diferença de 2%.



(a) Matrizes com o agregado brita

(b) Matrizes com o agregado seixo de rio (SP)



(c) Matrizes com o agregado seixo de rio (SJ)

Figura 5.80 – Variação de massa de água com o tempo

A Figura 5.81 a relação entre a retração por secagem e a variação de massa de água das matrizes autoadensáveis. Através dos valores obtidos, foi construído as curvas e feito o ajuste através de regressão linear. Percebe-se uma boa correlação para todas as matrizes estudadas.

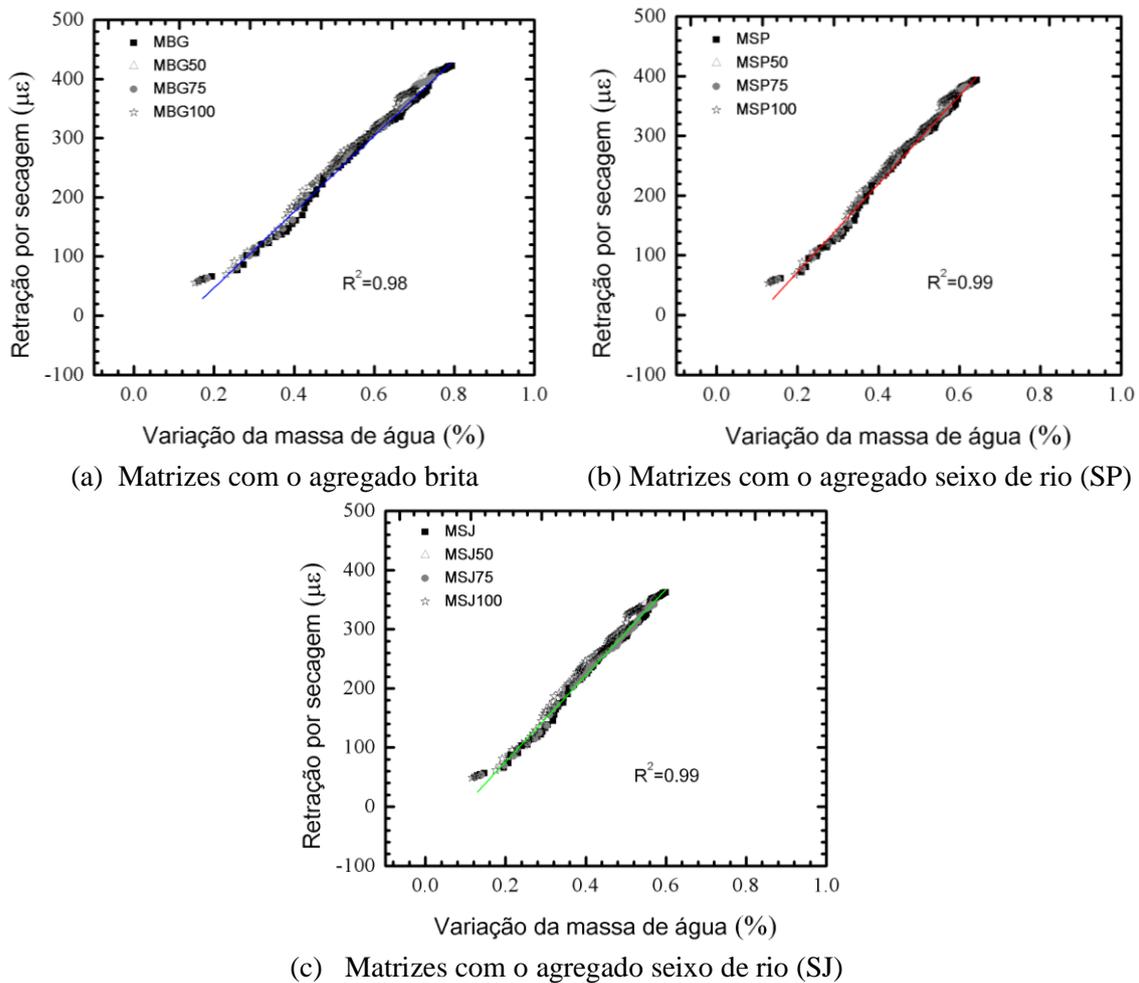


Figura 5.81 – Relação entre a retração por secagem e a variação de massa de água

1.23.8 Fluência na compressão

Os valores da fluência básica na compressão das matrizes foram obtidos a partir do ensaio de dois corpos de prova. As curvas podem ser divididas em 2 etapas. A primeira etapa de carregamento, onde foi realizado o cálculo do módulo de elasticidade aos (28

dias) e carregamento pelo período de 92 dias. A segunda etapa de descarregamento, ao qual foi determinado o módulo de elasticidade após o descarregamento.

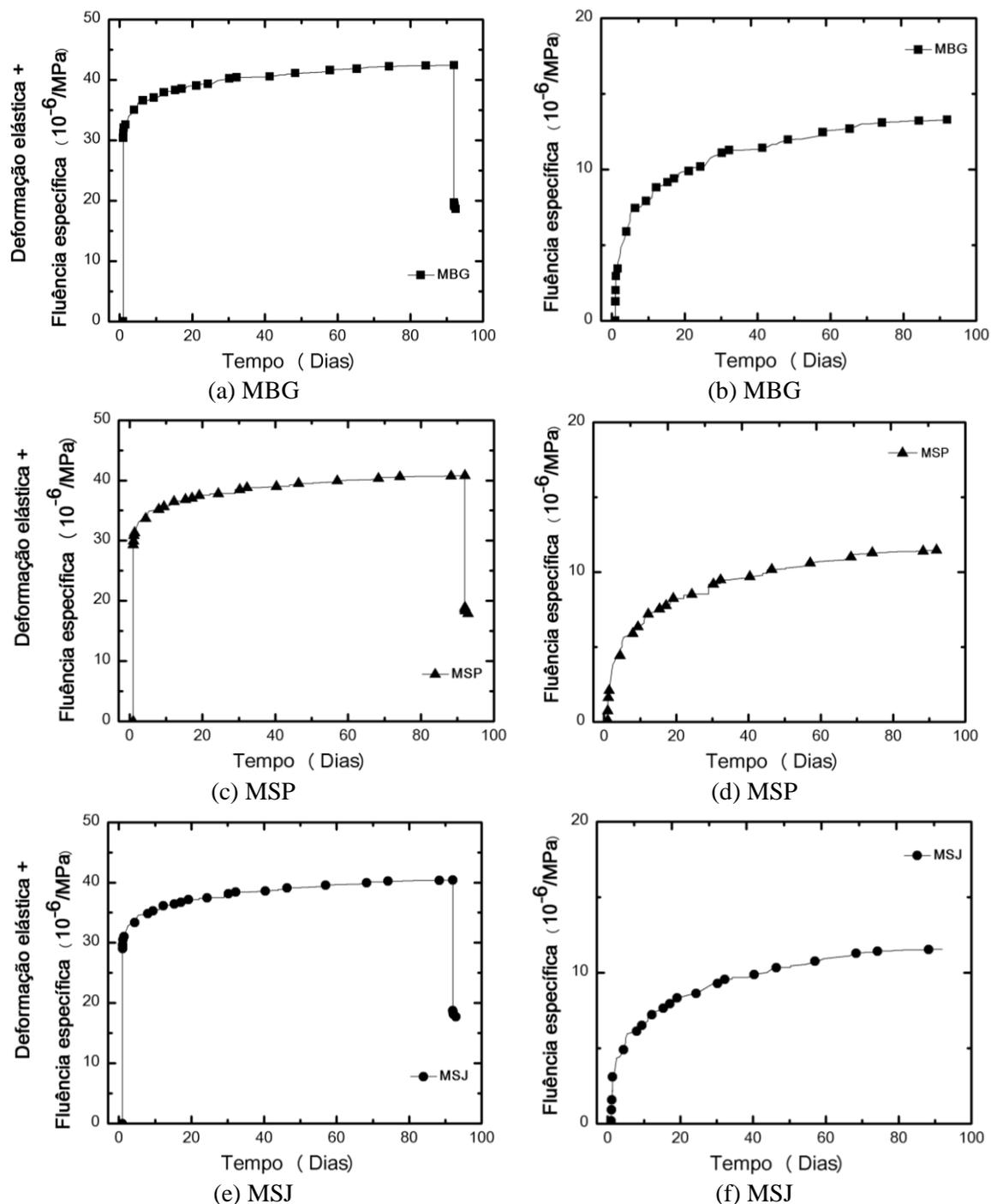


Figura 5.82 – Fluência básica na compressão: com fase elástica (coluna 1); sem fase elástica (coluna 2)

A Figura 5.82 mostra as curvas de fluência específica das matrizes de referência MBG, MSP, MSJ. As Figuras 7.82 (a), 7.82 (c) e 7.82 (e) mostram as curvas de fluência específica levando em consideração as deformações elásticas nas fases de carregamento e descarregamento. As Figuras 7.82 (b), 7.82 (d) e 7.82 (f) mostram as curvas de fluência específica sem as deformações elásticas.

Os valores do módulo de elasticidade (E_f) e fluência máxima específica no carregamento e descarregamento das matrizes de referência, estão apresentados na Tabela 5.29.

Tabela 5.29 – Valores de módulo de elasticidade (carregamento e descarregamento), e de fluência específica (carregamento), na compressão

Matrizes	Carregamento		Descarregamento
	$E_{f,28}$	Fluência específica	$E_{f,92}$
	GPa	$10^{-6}/\text{MPa}$	GPa
MBG	30,60	13,28	33,23
MSP	33,70	11,57	37,98
MSJ	35,41	11,46	39,12

Os módulos de elasticidade aos 28 dias das matrizes MBG MSP e MSJ quando comparados através da ANOVA, apresentaram variação significativa entre si. Entretanto quando comparado apenas entre MSP e MSJ essa variação não foi significativa. A matriz MBG apresentou módulo de elasticidade 13,5% menor que o módulo de elasticidade das outras duas matrizes.

Na fase de descarregamento, o módulo de elasticidade aos 92 dias apresentou aumento para todas as matrizes em relação ao módulo de elasticidade na fase de carregamento, com destaque para a matriz MSP de maior valor, 11,3% e o menor valor foi da matriz MBG, de 7,9%. A matriz MSJ obteve um valor de 9,5%. A análise de variância mostrou que houve diferença significativa quando comparado as matrizes MBG e MSP e MBG e MSJ. Porém, entre as matrizes de MSP e MSJ não houve diferenças significativas. Em relação à fluência específica, não houve diferença significativa entre as três matrizes. A matriz MBG obteve valores de 13,7% e 12,9% superior às matrizes MSP e MSJ respectivamente.

Os valores do módulo de elasticidade na fluência a compressão aos 28 dias, foram inferiores aos valores do módulo de elasticidade obtidos no ensaio de resistência à compressão. As matrizes MBG, MSP e MSJ, tiveram, os valores reduzidos em 5,3%, 7.2% e 6.6% respectivamente. Isso se deve aos métodos de medições, velocidades de carregamento diferentes e tipos de extensômetros utilizado.

A Figura 5.83 apresenta as curvas de fluência específica das três matrizes de referência.

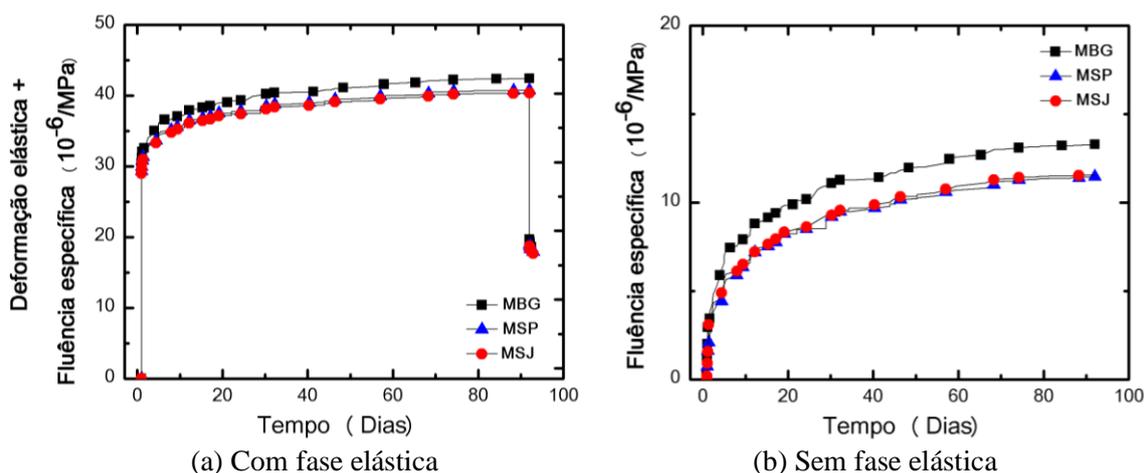


Figura 5.83 – Fluência básica na compressão

Através da Figura 5.83 pode-se visualizar as curvas das três matrizes de referência, a matriz MBG obteve maiores deformações de fluência na compressão em comparação as outras matrizes MSP e MSJ. Pode-se inferir que a matriz MBG por ser constituída de agregados de brita granítica e menor módulo de elasticidade na compressão uniaxial, deforma mais que as outras duas matrizes MSP e MSJ que utilizam o seixo de rio em sua composição e portanto, maior módulo de elasticidade na compressão uniaxial.

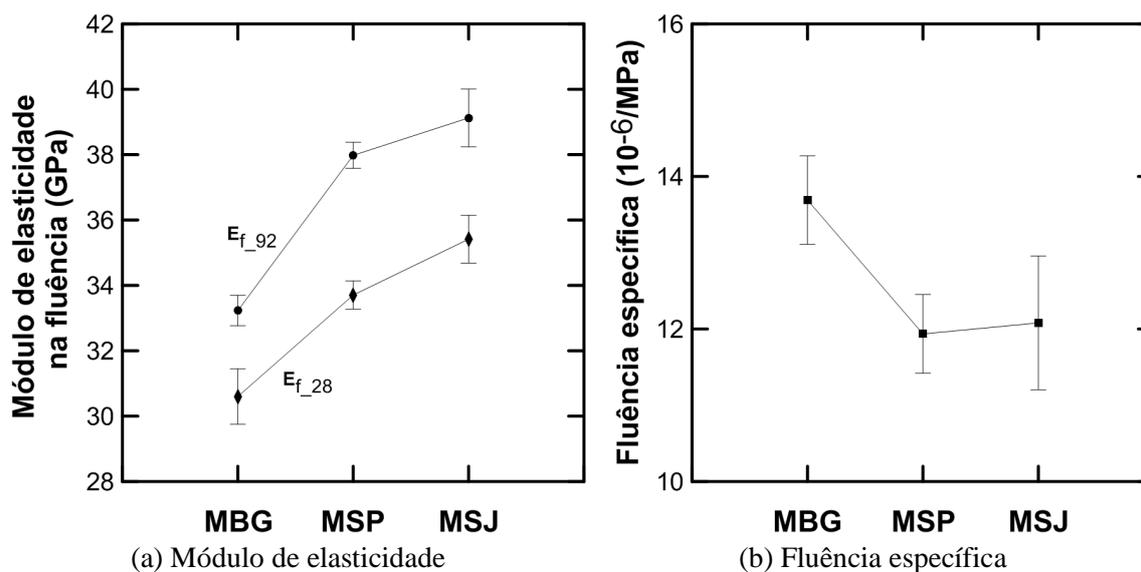


Figura 5.84 – Fluência básica na compressão das matrizes: média e desvio

Conforme ilustrado na Figura 5.84 o módulo de elasticidade aos 28 dias e 92 dias foi maior para as matrizes MSP e MSJ e maiores desvios ocorreram nas matrizes MBG e MSJ. Nota-se também que a fluência máxima decresceu da matriz MBG para MSP com uma sutil elevação na matriz MSJ, o maior desvio foi para a matriz MBG.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

1.24 CONCLUSÕES

O estudo permitiu as seguintes conclusões:

A dosagem pelo Método do Empacotamento Compressível (MEC), utilizando o programa BetonLab Pro 3, mostrou-se adequado e de fácil aplicação para produção do concreto autoadensável para matrizes sem fibras de aço, possibilitando a otimização e os ajustes do esqueleto granular e materiais componentes da mistura rápida e eficaz.

As matrizes autoadensáveis apresentaram tensões de escoamento entre 43 e 136 Pa e viscosidades plásticas entre 97 e 156 Pa.s, com uma melhor reologia sendo observada para as misturas contendo seixo rolado. A forma esférica, a baixa angulosidade e a textura suave contribuíram para a performance positiva do agregado seixo de rio, em todos os ensaios reológicos para concreto autoadensável, em comparação aos concretos produzido com brita, mesmo com incorporação das fibras de aço às misturas. A única exceção foi o ensaio de segregação, onde as misturas confeccionadas com o agregado seixo de rio obteve valores de segregação superior às misturas produzidas com o agregado brita. As características de esfericidade, angularidade e textura dos agregados graúdos foram quantificadas neste trabalho utilizando-se o *Aggregate Imaging System* (AIMS).

Do ponto de vista do comportamento à compressão, verificou-se que as misturas confeccionadas com o agregado seixo de rio apresentaram resistência à compressão menor que a mistura confeccionada com brita. O tipo de agregado influenciou no comportamento à compressão das matrizes de referência produzidas. A adição das fibras de aço nessas misturas, promoveu ganhos de ductilidade tanto no concreto produzido com brita como no concreto produzido com seixo de rio. A resistência à compressão manteve-se próxima de 60 MPa para concretos produzidos com brita e entre 50 e 55 MPa para concretos produzidos com seixo de rio.

O valor do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com o agregado brita (valor médio igual 32,3 GPa) foi menor que o dos concretos produzidos com agregado graúdo seixo de rio (diferença de até 14%). Isso se deve ao fato de os grãos de seixo serem densos e apresentarem maior módulo de elasticidade em comparação com os grãos de brita. As matrizes de referência com seixo de rio obtiveram redução dos valores para a deformação axial de pico de 32% em relação à matriz de referência confeccionada com brita.

Os ensaios de flexão dos concretos demonstraram que o tipo de agregado não influenciou no comportamento das misturas produzidas. Porém, a adição de fibras de aço melhorou o comportamento do concreto de frágil para dúctil. A carga e o deslocamento na primeira fissura aumentaram com a adição de fibras, tanto para o concreto produzido com brita quanto para o concreto produzido com seixo de rio. Os índices de tenacidade indicam um aumento na capacidade de absorver energia e conseqüentemente aumento de tenacidade com o aumento do volume de fibras, tanto para os concretos com brita como para concretos com seixos de rio.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração direta mostraram que houve aumento na resistência à tração quando foram adicionadas fibras de aço nas matrizes. A inclusão do reforço fibroso não trouxe alterações significativas nos valores de resistência à tração direta da região pré-fissurada, nos concretos produzidos com brita. Em relação ao agregados, não houve influência do tipo de agregado na resistência do compósito.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, para as matrizes de referência, apresentaram uma redução entre os valores das misturas confeccionadas com brita e seixo de rio. A maior diferença foi entre as matrizes MBG e MSJ com redução de 18%. Essa redução se deve possivelmente ao tipo de agregado brita, mais poroso, angular e de textura mais áspera que o seixo de rio.

Os ensaios de arrancamento mostram que o tipo de agregado não influencia na redução ou aumento de aderência entre a barra de aço e o concreto. A inclusão de fibras de aço

não alterou a força de arrancamento entre as misturas de referência e as misturas com fibras de aço.

Nos ensaios de tirantes, o tipo de agregado não influenciou na redução ou o aumento de resistência, assim como no espaçamento de fissuras e no aparecimento de primeira fissura das misturas analisadas. O mapa de fissuras também não foi alterado pelo tipo de agregado. Entretanto, o aumento do volume de fibras alterou o comportamento pós pico para todas as misturas com fibras.

Quanto às propriedades físicas, a massa específica, a absorção, o índice de vazios e absorvidade não apresentam diferenças entre si nas matrizes de referência produzidas. As três matrizes tiveram valores de penetrabilidade de íons cloreto muito baixo indicando não há diferença entre as matrizes.

Com relação à retração por secagem, o tipo de agregado não proporcionou alterações significativas nas matrizes analisadas.

O uso de agregados diferentes nas matrizes de referência não alterou significativamente a fluência específica. Porém houve diferença nos módulos de elasticidade a compressão na fluência aos 28 dias e 92 dias entre as matrizes MBG e MSP MBG e MSJ. A matriz MBG apresentou módulo de elasticidade aos 28 dias 13,5% menor que o módulo de elasticidade aos 28 dias das outras duas matrizes. Para o módulo de elasticidade aos 92 dias essa redução foi de 15% quando se compara as matrizes MBG e MSJ. Agregados de seixo de rio apresentam maiores módulos de elasticidade da rocha em relação a agregados de brita, possivelmente isso refletiu no módulo de elasticidade a compressão na fluência.

Foi possível produzir concreto autoadensável utilizando o seixo de rio com inclusão de fibras de aço. Atingiu-se resistência à compressão superior a 50 MPa (C50) para misturas utilizando o seixo de rio e 60MPa (C60) para misturas utilizando brita. O consumo de cimento foi fixado em 330 kg por m³ e não houve necessidade de promover alterações nas características físicas do agregado.

1.25 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho foram desenvolvidos concretos com agregado de seixo de rio de alta resistência, e inclusão de fibras de aço. Foram investigadas as propriedades e as características no estado fresco e endurecido do material assim como o comportamento mecânico e estrutural.

Os seguintes temas são sugeridos como continuidade da pesquisa:

- investigar o comportamento de concretos com agregados regionais de outras regiões, além das estudadas nessa pesquisa;
- estudar a forma angularidade e textura do seixo de rio de outras regiões, comparar com as estudadas nesse trabalho, coletar amostras em diferentes jazidas nos leitos dos rios e verificar até que ponto esse material é variável;
- desenvolver um modelo computacional para simulações do comportamento do processo de fissuração e ruptura dos elementos estruturais produzidos com concreto de seixo de rio;
- estudar a utilização desse agregado em elementos pré-fabricados, como blocos de concreto, pilares, vigas e lajes e avaliar as propriedades estruturais desses concretos;
- produzir e caracterizar concretos de altíssimo desempenho utilizando seixos de rio e fibras e verificar seu comportamento mecânico e estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V. O., “Emprego de Materiais Fibrosos na Construção Civil”. In: Simpósio internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil, pp. 11-25, São Paulo, 1993.

AİTCIN, P. C., *Concreto de alto desempenho*. 1ª ed. São Paulo: PINI, 2000.

AİTCIN, P.C., NEVILLE, A. “120 Mpa sem mistério”, *Revista Téchné* v. 3, n. 19, pp. 29-33, Nov-Dez. 1995.

AL ROUSAN, T.M., 2004, *Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System*. Ph.D. Thesis, Texas A&M University, College Station, TX, USA.

ALMEIDA FILHO, F. M., 2006 *Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos autoadensáveis*, Tese de D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, Brasil.

ALMEIDA, F.F.M., BRITO NEVES, B.B., CARNEIRO, C.D.R., “The origin and evolution of the South American Platform” *Earth Science Reviews*, v.50, pp. 77-111, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 408R-03 Reported by ACI COMMITTEE 408. Bond and development of straight reinforcing bars in tension. Farmington Hills, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI. E1-07. Aggregates for Concrete. ACI Education Bulletin E1-07. Farmington Hills, USA, August 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C234: Standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforced steel. Philadelphia, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1018: Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (using beam with third point-loading). Philadelphia 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1202: Electrical Indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. U.S.A., 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISSO 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de Tração Parte 1– Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7477: Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados à armadura de concreto armado. São Paulo, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8224: Concreto Endurecido – Determinação da Fluência. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassas e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Imersão – Índice de Vazios e Massa Específica. ABNT. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13956: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR15823-1: Concreto autoadensável, Parte 1 – Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR15823-2: Concreto autoadensável, Parte 2 – Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR15823-3: Concreto autoadensável, Parte 3 – Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR15823-4: Concreto autoadensável, Parte 4 – Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR15823-5: Concreto autoadensável, Parte 5 – Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR15823-6: Concreto autoadensável, Parte 6 – Determinação da resistência á segregação – Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM47: Concreto fresco – Determinação do teor de ar pelo método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 51: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 55: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1996.

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

AVESTON, J., COOPER, G. A., KELLY, A. Single and Multiple Fracture. Proceedings of the Conference on the Properties of Fibre Composites, National Physical Laboratory, IPC Science & Technology Press, Guildford, UK, pp. 15–26, 1971.

BAALBAKI, M. et al, *Properties and microstructure of high performance concretes containing silica fume, slag and fly ash. Fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete*, Detroit, SP 132, ACI, pp. 1433-1450, 1993.

BANGASH, M.Y.H. 1989. *Concrete and concrete structures: numerical modeling and applications*. Barking: Elsevier science publishers ltd., 1989. p. 687 p.

- BANFILL P.F.G., “The rheology of fresh cement and concrete - a review. In: *Proc. 11th Int. Congress on the Chemistry of Cement*, v. 1, pp. 50-62, 2003.
- BARROS, J., 1995, *Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica*. Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- BARROS, J.A.O., PEREIRA, E.B., SANTOS, S.P.F., “Lightweight panels of steel fiber reinforced selfcompacting concrete”, aceite para publicação *no Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006.
- BARBOSA, M.T.G., 2001 *Avaliação do comportamento de aderência em concretos de diferentes classes de resistência*, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BENTUR, A., MINDESS, S., “Fibre reinforced cementitious composites”. In: *Modern Concrete Technology Series*, 2nd Edition, 2007.
- CHAN, Y., CHU, S. “Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete”, *Cement and Concrete Research* v. 34, pp. 1167-1172, 2004.
- CUNHA, V.M.C.F., BARROS, J.A.O., CRUZ, J.S., “Modelling the influence of age of steel fibre reinforced self-compacting concrete on its compressive behavior”, *Materials and Structures*, v. 41, n. 3, pp. 465-478, 2008.
- DE LARRARD, F., *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, Modern Concrete Technology Series, v. 9, E&FN SPON, London, 1999.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). Sumário Mineral 2014. Brasília: DNPM, 2014. 141 p. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>>
- DOMONE, P.L., “A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete”. *Cement and concrete composites* v.29, pp.1-12, 2007.

DUCATTI, V.A., 1993 *Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura*, Tese de D.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

DUPONT D., 2003, *Modelling and experimental validation of the constitutive law and cracking behaviour of fibre reinforced concrete*. Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, Reino Unido, 2002. Disponível em: <<http://www.efnarc.org>>

ELIGEHAUSEN, R., POPOV, E.P., BERTERO, V.V., Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. Report no UCB/EERC-83/23, University of California, Berkeley, 1983.

The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, 2005. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/sccGuidelinesMay2005.pdf>>

FELDKAMP, L.A., DAVIS, L.C., KRESS, J.W., “Practical cone beam algorithm”, *J Opt Soc Am A* v. 1, pp. 612-619, 1984.

FERRARIS, C. F., “Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report”, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* v. 104, n. 5, pp. 461-478, Sep–Oct. 1999.

FERRARIS, C.F., OBLA, K.H., HILL, R., “The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete”, *Cement and Concrete Research* v.31, pp. 245-255, 2001.

FIGUEIREDO, A.D. 2000. *Concreto com Fibras de Aço*. São Paulo: EPUSP, 2000. p. 71 p.

FORMAGINI, S., 2005 *Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho*, Tese de D.Sc., PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FOX, R.W., MCDONALD, A.T., *Introduction to fluid mechanics*. New York: John Wiley & sons, 1998. p. 762 p.

FRANCA, V.H., 2004, *Aderência aço-concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduo de borracha*. Dissertação de M.Sc., Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

FUSCO, P.B., *Técnicas de Armar as Estruturas de Concreto*. São Paulo: Editora Pini, 2013. p. 396.

GIACCIO, G., ZERBINO, R., “Effect of aggregate type on the behavior of high strength concrete”, In: *International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*, Florianópolis/SC, Proceedings, 1996.

GOTO, Y., “Cracks formed in concrete around deformed tension bars” *ACI Journal Proceedings* v. 68, n. 4, pp. 244-251, 1971.

GULLEURD, K., CRAMER, S., *Effects of aggregates coatings and films on concrete performance – Final Report*. In: Wisconsin Highway Research Program. University of Wisconsin: Department of Civil and Environmental Engineering. Madison, USA, 2002.

IGARASHI, S., BENTUR, A., MINDESS, S. “Microhardness testing of cementitious materials”, *Adv. Cem. Based Mater* v. 2, pp. 48–57, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Informações e análises da economia mineral Brasileira. 2.ed. 2012. 65p. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br>>

KHAYAT, K., TANGTERMSIRIKUL, S., “Fresh Concrete Properties (Background Document)”, In: *Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, 2000, RILEM Publications S.A.R.L., 2000.

LARRARD, F., “Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach” *Modern Concrete Technology Series* v. 9, E&FN SPON, London, 1999.

LEONHARDT, F., MÖNNING, E., "Construções de concreto: Princípios básicos sobre armação de estruturas de concreto armado" *Interciência* v. 1 e 3, Rio de Janeiro, 1977.

LEONHARDT, F., MÖNNING E., "Construções de Concreto" *Interciência* v. 6, Rio de Janeiro, 1979.

LIMA, P.R.L., 2004, *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. Tese de D.Sc., PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LO, T.Y., CUI, H.Z., "Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete", *Materials Letters*, v. 58, pp. 916-919, Jul. 2003.

MACGREGOR, J.G., *Reinforced concrete: mechanics and design*, 2nd ed, New Jersey: Prentice Hall, 1992. p. 939.

MANRICH, S., PESSAN, L.A., 1987, *Reologia: conceitos básicos*. São Carlos: Gráfica UFSCar.

MARANGON, E., 2006, *Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

MEHTA, P.K., "High-performance concrete technology for the future", In: *International Congress on High-performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*, Florianópolis, SC, Proceedings, pp. 1-14, 1996.

MEHTA, P.K., AİTCIN, P.C., "Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete", In: *High-strength Concrete International Symposium, 2nd, ACI SP-121*. Florianópolis/SC., Proceedings, pp. 265-286, 1990.

MARANGON, E., 2011, *Caracterização material e estrutural de concretos autoadensáveis Reforçados com Fibras de Aço*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

- MILANI, E.J., THOMAZ FILHO, A., “Sedimentary Basins of South America”. In: CORDANI, U.G., MILANI, E.J., THOMAZ FILHO, A., CAMPOS, D.A. (eds.), *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31st IGC, 2000.
- NAAMAN, A., ALWAN, J., HANSEN, W. “Pull-out work of steel fibers from cementitious composites: analytical investigation”, *Cement and concrete composites* v. 13, pp. 247-255, 1991.
- NEVILLE, A.M., *Propriedades do concreto*, 2 ed. São Paulo: Editora PINI, 1997.
- NEVILLE, A. M., *Propriedades do concreto*, 5 ed. São Paulo: Editora PINI, 2015.
- OKAMURA, H., OUCHI, M., “Self-Compacting Concrete”, *Journal of advanced concrete Technology*, v1. n1, pp. 5-15, Abr. 2003.
- OKAMURA, H., OUCHI, M., “Self-Compacting Concrete: Development, Present Use and Future (keynote Lectures)”, In: *Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Sweden, pp. 3-14, 1999.
- OMAR, M.Y.M., 2006, *Análise Experimental de Pilares de Concreto Armado Reforçados com Concreto Auto-Adensável (CAA)*. Dissertação de M.Sc., UFG, Goiânia, Goiás, 2006.
- PERSSON, B., “A comparasion between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 31, pp. 193-198, 2001.
- RAMACHANDRAN, V.S. “Handbook of chemical admixtures”. In: RAMACHANDRAN, V.S. (Ed.) *Institute for Research in Construction – NRCC*, New Jersey, Noyes Publications, 1995.
- RENÓFIO, A., ISA, M.M., CEA, A.A., “Aderência entre concreto autoadensável de alta resistência e armadura” *Acta Scientiarum*, v. 26, pp. 135-139, 2004.

RIBEIRO, J.L.D., 1985, *Análise Experimental dos fatores que influenciam a aderência em barras nervuradas*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

RILEM/CEB/FIP, *Bond Test for Reinforced Steel L Beam Test. Recommendation RC 5*. International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1978.

RILEM/FIP/CEB, *Essai portant sur l'adhérence des armatures du béton*. 1. Essai par flexion (7-II-28D). 2. Essai par traction (7-II-128), Recommandations Provisoires. Matériaux et Constructions, v. 6, n. 32, p. 96–105, 1973.

RILEM-FIP-CEB, *Bond test for reinforcing steel: Beam test, recommendation RC 5*, Concrete Reinforcement Technology. Paris, France, 1983.

RILEM/CEB/FIP, *Bond Test for Reinforced Steel 2. Pull-Out-Test*. Recommendation RC 6. International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1978.

SCHRAMM, G., *Reologia e reometria: Fundamentos teóricos e práticos*. São Paulo, Ed. Artiber, 2006.

SEDRAN, T., SZITKAR, J.C., JOLY, M., CLAUX, F., DERKX, F., “A New Rheometer for Soft-to Fluid Fresh Concrete”, *ACI Materials Journal*”, v. 94, n. 3, pp. 81-90, 1997.

SEDRAN, T., 1999, *Rhéologie et Rhéométrie des Bétons. Application aux Bétons Autonivelants*, PhD Thesis, Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées, France.

SILVA, A.S.M., 2004, *Dosagem de concretos pelos métodos de empacotamento compressível e Aïtcin-Faury Modificado*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVOSO, M. M., *Manual de utilização do programa MEC-COPPE 1.0 – Simulador de compacidade de misturas granulares secas através do Método de Empacotamento Compressível (MEC)*, Rio de Janeiro, 2008.

SOROUSHIAN, P., CHOI, K.B., “Local bond of deformed bars with different diameters in confined concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 86, n. 2 (Mar-Apr), pp. 217-222, 1989.

SOROUSHIAN, P., MIRZA, F., ALHOZAIMY, A., “Bonding of confined steel fiber reinforced concrete to deformed bars”, *ACI Materials Journal*, v. 91, n. 2, (Mar-Apr), pp. 141-149, 1994.

SU, N., HSU, K-C., CHAI, H-W., “A simple mix design method for self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 12, pp. 1799-1807, 2001.

TASSIOS, T., “Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions”, *CEB Bulletin d’Information*, v. 1, n. 131, pp. 67-122, 1979.

VAN WAZER, J.R. et al., *Viscosity and flow measurement: a laboratory handbook of rheology*. 2 ed. New York, Interscience Publishers, 1966.

VELASCO R.V., 2002, *Concreto de alto desempenho reforçado com fibras depolipropileno e sisal submetido a altas temperaturas*. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.

VELASCO, R.V., 2008, *Concretos Autoadensáveis Reforçados com Elevadas Frações Volumétricas de Fibras de Aço: Propriedades Reológicas, Físicas, Mecânicas e Térmicas*. Tese de D.Sc., COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

WEIDMANN, D.F., 2008, *Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do*

concreto de cimento Portland. Dissertação de M.Sc. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

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