

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
MESTRADO EM ESTRUTURAS

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE CONCRETO FLUIDO  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO: Influência do fator de forma e da fração volumétrica  
das fibras nas propriedades mecânicas do concreto

Fernanda Alves Pinto Góis

Maceió  
2010

**FERNANDA ALVES PINTO GÓIS**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE CONCRETO  
FLUIDO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO: Influência do fator de forma e da  
fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Aline da Silva Ramos Barboza

Maceió  
2010

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária: Janaina Xisto de Barros Lima**

- G616a Góis, Fernanda Alves Pinto.  
Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto / Fernanda Alves Pinto Góis, 2010.  
162 f. : il.
- Orientador: Aline da Silva Ramos Barboza.  
Dissertação (mestrado em Engenharia Civil : Estruturas) ó Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2010.
- Bibliografia: f. 157-162.
1. Estruturas . 2. Concreto fluido. 3. Fibras de aço.  
I. Título.

CDU: 624.016



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC  
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC



**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO  
FLUÍDO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO: *Influência do fator de forma e  
da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto.***

**FERNANDA ALVES PINTO GÓIS**

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 20 do mês de agosto do ano de 2010.

Banca Examinadora:



**Prof. Dr. Aline da Silva Ramos Barboza**  
Orientadora – CTEC/UFAL



**Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho**  
COPPE-UFRJ



**Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes**  
CTEC/UFAL

Campus A. C. Simões, Av. Lourival de Melo Mota, S/N  
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas  
Tel/Fax: (82) 3214-1863  
E-mail: [ppgec@ctec.ufal.br](mailto:ppgec@ctec.ufal.br)  
Homepage: [www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec](http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec)

Dedico esse trabalho a Deus, meu Pai e Criador, Onipotente e presente em todos os dias da minha vida. Sem Sua presença seria impossível buscar meu lugar ao sol, voar ao vento do novo dia ou ir até o mais alto das montanhas, reencontrar minha esperança e meu orgulho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar oportunidade de chegar até aqui e me tornar uma pessoa mais forte e confiante nos momentos mais difíceis, e completar mais uma etapa das várias que ainda virão na minha vida.

Aos meus pais, Ytala e Ednilson, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado com todo amor e muito zelo durante todos os momentos da minha vida. Mesmo distante, nunca deixaram que eu desistisse dessa caminhada. Sem vocês eu não seria nada. Obrigada por tudo. Amo muito vocês!

Aos meus irmãos, Binho e Lipe, pelo imenso amor e grande proteção que sempre tiveram e tem por mim. Vocês são muito importantes na minha vida.

Ao meu amigo, companheiro, confidente e namorado Filipe, pelo amor, atenção, dedicação e incentivo. Sua presença mesmo longe me trouxe confiança e a paz necessária para realizar este trabalho. Te amo muito!!

A toda família de Maceió, principalmente a Tia Alaíde e as primas Kátia e Tânia, que me acolheram de forma carinhosa em sua casa e se tornaram muito especiais em meu coração. As minhas primas, Ana Laura, Ana Letícia, Lívia e Rafael, por toda amizade e brincadeiras. Obrigada sempre por tudo.

À Professora Aline Barboza, pela confiança depositada, pelos incentivos para seguir em frente nos momentos em que as coisas não davam certo e pela importante participação neste trabalho.

Ao Professor Paulo César, por compartilhar seu conhecimento e experiência nas questões práticas de laboratório e pela participação essencial durante todo o curso.

Aos outros professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) que estiveram sempre prontos para ajudar.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas e Materiais, os técnicos Alexandre Lima, Valdemir, João, Fábio, Cícero e Marco, pelo auxílio nas atividades laboratoriais, à secretária Girley, pelo fundamental apoio, aos funcionários Flabel e Sidicley, pela importante ajuda prestada no laboratório, pela amizade, e por sempre estarem dispostos a trabalhar.

Aos amigos que aqui fiz, que serão lembrados sempre com muito carinho especial Karlisson, Camila, Clayton, Romildo, Emanuella, Thaíse, Marcílio, Luís Henrique, Michelle, Alexandre Barros, Camila Leite e Kleise, agradeço ao companheirismo, apoio e amizade. Ter conhecido vocês amenizou a saudade de casa.

Por fim, a todos aqueles não citados, que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho e ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

O CONSELHO

*“Quando te decidires: Segue!  
Não esperes que o vento  
cubra de flores o seu caminho.  
Nem sequer esperes o caminho  
Cria-o. Faze-o tu mesmo.  
E parte... Sem lembrar  
que outros passos pararam,  
que outros olhos ficaram,  
te olhando seguir.”*

Prado Veppo

## RESUMO

O desenvolvimento de novas tecnologias na produção do concreto ao longo do tempo vem permitindo elevar a sua resistência à compressão, trabalhabilidade e durabilidade. Apesar de suas muitas vantagens, o concreto apresenta limitações relacionadas ao seu comportamento frágil quando na presença de esforços de tração. Uma alternativa para contornar este problema é a utilização de fibras no concreto, obtendo-se assim um material compósito que possui características diferentes do material original. Buscando colaborar na avaliação da eficiência de diferentes tipos de fibras, o presente trabalho analisa o comportamento de concretos fluidos reforçados com fibras de aço, submetidos à tensões de tração, avaliando a influência do fator de forma e da fração volumétrica. A capacidade de fluir tem servido de referência para que o concreto possa ser utilizado em peças com altas taxas de armadura, cujo adensamento não é totalmente eficiente. Entretanto, por se tratar de uma matriz cimentícia, a concentração de tensões de tração nesses pontos de alta taxa de armadura pode desencadear um processo nocivo de fissuração. São analisados no trabalho os efeitos da incorporação de fibras de aço na trabalhabilidade, no teor de ar incorporado, na resistência à compressão, na resistência à tração e no módulo de elasticidade. Adicionalmente, é executada uma comparação entre a relação das resistências à compressão e à tração dos resultados experimentais com a relação teórica da resistência à tração encontrada na literatura, e por fim, buscou-se através da regra das misturas avaliar quais os parâmetros de estudos são mais influentes no comportamento do novo compósito. Para isso, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de dimensões de 10cm x 20cm de concreto fluido de resistência usual, com teor de fibras de aço de 0,4% e 0,8% da quantidade de cimento em massa e com fatores de forma de 33, 50 e 80, para cada um dos teores, em ensaios de tração por compressão diametral. Os resultados obtidos permitiram visualizar, a partir das modificações no fator de forma e na fração volumétrica adicionadas a matriz cimentícia fluida, que fibras com maior fator de forma e maior fração volumétrica tendem a ser mais eficientes na resistência à tração dos compósitos fluidos.

Palavras-chave: Concreto Fluido Reforçado com Fibras, Fibras de aço, Fração Volumétrica, Fator de Forma, Tração por Compressão Diametral.

## ABSTRACT

The development of new technologies in the production of concrete over time is allowing increase its compressive strength, workability and durability. Despite their many advantages, concrete has limitations related to its fragile behavior in the presence of tensile loads. An alternative to solve this problem is the use of fibers in the concrete, getting a composite material that has different characteristics of the original material. Seeking collaborate with the evaluation about the efficiency of different fiber types, this work analyses the behavior of fluid concrete reinforced with steel fibers, subjected to tensile loads, evaluating the influence of shape factor and volumetric fraction. The ability of flow has served as a reference for concrete can be used on parts with high rates of reinforcement, whose compacting is not fully efficient. However, because it is a cementitious matrix, the concentration of tensile strength on these points of high rates of reinforcement, may trigger a harmful process of cracking. Are analyzed in this work the effects of the incorporation of steel fibers in the workability, the incorporated air content, the compressive strength, the tensile strength and modulus of elasticity. Additionally, a comparison is made between the relationship of the compression strength and tensile of the experimental results with the theoretical relationships of the tensile strength found in the literature , and finally, was seek by the mixture rules evaluate whose parameters of the study are more influents on the behavior of the new composite. For this, were used specimens tests cylindrical of dimensions of 10cm x 20cm of fluid concrete with regular resistance, with percentage of steel fiber of 0,4% and 0,8% of the cement mass and shape factors of 33, 50 and 80, for each of the percentage, in tests of tensile by diametrical compression. Obtained results allowed display, from changes in shape factor and volumetric fraction added to fluid cementitious matrix, that fibers with larger shape factor and higher volumetric fraction tend to be more efficient in the tensile strength of fluid composites.

Word-key: Reinforced Fiber Fluid Concrete, Steel Fibers, Volumetric Fraction, Shape Factor, Tensile Stress in Diametric Compression.

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – REPRESENTAÇÃO DAS TENSÕES TANGENCIAIS (DE CISALHAMENTO) NA INTERFACE MATRIZ-FIBRA (BENTUR; MINDESS, 2007).....	41
GRÁFICO 2 – EFEITO DE RELAÇÃO DE ASPECTO DE FIBRAS NA TRABALHABILIDADE DA ARGAMASSA (MEHTA; MONTEIRO, 2008).....	44
GRÁFICO 3 – EFEITO DA DIMENSÃO MÁXIMA DO AGREGADO E DO TEOR DE FIBRA NA TRABALHABILIDADE (MEHTA; MONTEIRO, 2008). ....	46
GRÁFICO 4 – INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO, AR INCORPORADO E CONSUMO DE CIMENTO NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO (MEHTA; MONTEIRO, 2008). ....	48
GRÁFICO 5 – DIAGRAMAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO NA COMPRESSÃO UNIAXIAL: COMPARAÇÃO ENTRE CONCRETOS SEM E COM DIVERSOS TEORES DE FIBRAS (ADAPTADO DE EZELDIN E BALAGURU, 1992, APUD SIMÕES, 1998).....	52
GRÁFICO 6 – INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS NO COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO DO CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO (ACI 544.4R-88). ....	52
GRÁFICO 7 – CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO DE ARGAMASSAS COM FIBRAS (ACI 544.4R-88).....	56
GRÁFICO 8 – RESPOSTA TENSÃO-ALONGAMENTO NA TRAÇÃO DIRETA: COMPARAÇÃO ENTRE CONCRETO NÃO REFORÇADO E REFORÇADO COM DIVERSOS TEORES DE FIBRA (ADAPTADO DE GOPALARATNAM E SHAH, 1987, APUD SIMÕES, 1998).....	57
GRÁFICO 9 – RESULTADOS DE ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA CONCRETO COM E SEM ADIÇÃO DE FIBRAS (CUCCHIARA, 2004). ....	58
GRÁFICO 10 – DIAGRAMA DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO ELÁSTICA (FIGUEIREDO, 2000). ....	61
GRÁFICO 11 – CURVAS TÍPICAS DE TENSÃO DE TRAÇÃO X DEFORMAÇÃO PARA AUSÊNCIA, BAIXO E ALTO VOLUME DE FIBRAS (BENTUR; MINDESS, 2007). ....	65
GRÁFICO 12 – COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS EM TEORES ABAIXO (A), ACIMA (B) E IGUAL (C) AO VOLUME CRÍTICO DE FIBRAS DURANTE O ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO (FIGUEIREDO, 2000).....	67
GRÁFICO 13 – EFEITO DO FATOR DE FORMA DAS FIBRAS NA TRABALHABILIDADE DO CONCRETO (HANNANT ET AL., 1974 APUD CHANH, 2005). ....	70
GRÁFICO 14 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS.....	90

GRÁFICO 15 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CARREGAMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE – METODOLOGIA A – TENSÃO $\Sigma$ A FIXA (FONTE: NBR 8522, 2008).....	97
GRÁFICO 16 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO DA SÉRIE-1.....	104
GRÁFICO 17 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO INDIRETA DA SÉRIE-1. ....	106
GRÁFICO 18 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE.....	113
GRÁFICO 19 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE TEOR DE AR INCORPORADO. ....	116
GRÁFICO 20 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO. ....	118
GRÁFICO 21 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL. ....	121
GRÁFICO 22 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO DOS CONCRETOS.....	122
GRÁFICO 23 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DE TRABALHABILIDADE DO CREF-S/F E DOS CONCRETOS INCORPORADOS COM 0,4% DE FIBRAS. ....	125
GRÁFICO 24 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DE TRABALHABILIDADE DO CREF-S/F E DOS CONCRETOS INCORPORADOS COM 0,8% DE FIBRAS. ....	126
GRÁFICO 25 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DE TEOR DE AR INCORPORADO DOS CONCRETOS ADENSADOS MANUALMENTE.....	127
GRÁFICO 26 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DE TEOR DE AR INCORPORADO DOS CONCRETOS ADENSADOS POR VIBRADOR. ....	128
GRÁFICO 27 – INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO. ....	131
GRÁFICO 28 – INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL. ....	132
GRÁFICO 29 – INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA DAS FIBRAS NO MÓDULO DE ELASTICIDADE. ....	134
GRÁFICO 30 – INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO. ....	136

GRÁFICO 31 – INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	138
GRÁFICO 32 – INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS FIBRAS NO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	139
GRÁFICO 33 – PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA EM FUNÇÃO DAS CONSTANTES A E B SEGUNDO A REGRA DAS MISTURAS CONFORME SWAMY (1974) APUD MEHTA E MONTEIRO (2008).....	144

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ILUSTRAÇÃO 1 - ESQUEMA DE FORMAÇÃO DE UM MATERIAL COMPÓSITO. ....	28
ILUSTRAÇÃO 2 - PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA DE COMPÓSITOS SINTÉTICOS E NATURAIS (LEVY NETO; PARDINI, 2006). ....	29
ILUSTRAÇÃO 3 – LÂMINAS COM REFORÇO DO TIPO: (A) UNIDIRECIONAL; (B) TECIDO BIDIRECIONAL BALANCEADO; (C) FIBRAS PICADAS; E (D) MANTA CONTÍNUA, SUBMETIDAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO UNIAXIAL LONGITUDINAIS (LEVY NETO; PARDINI, 2006). ....	29
ILUSTRAÇÃO 4 - CASA CONSTRUÍDA NO ANO DE 1540: ADOBE REFORÇADO COM PALHA (IMAGEM, 2009).....	33
ILUSTRAÇÃO 5 - FIBRAS DE AÇO (RESENDE, 2003). ....	37
ILUSTRAÇÃO 6 – TIPOS DE FIBRAS METÁLICAS: A) RETA; (B) DEFORMADAS/ONDULADAS; (C) EXTREMIDADES EM GANCHO; (D) EXTREMIDADES ALARGADAS; (E) IRREGULARES (ACI 544.1R-96). ....	38
ILUSTRAÇÃO 7 – REPRESENTAÇÃO DAS ZONAS DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES AO LONGO DE UMA FISSURA (BENTUR; MINDESS, 2007) .....	42
ILUSTRAÇÃO 8 – ESQUEMA GRÁFICO DE ENSAIO À TRAÇÃO PURA PARA O CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS SEGUNDO A NORMA UNI U73041440 (MACCAFERRI, 2009).....	54
ILUSTRAÇÃO 9 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA (FURNAS-COPPE), PARA AMOSTRAS CILÍNDRICAS (VELASCO, 2008). ....	55
ILUSTRAÇÃO 10 - ESQUEMA DE CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO INDIRETA, MÉTODO BRASILEIRO. (MACCAFERRI, 2009).....	58
ILUSTRAÇÃO 11 – ESQUEMA DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES PARA CONCRETO SEM REFORÇO DE FIBRAS (BARROS, 2009).....	63
ILUSTRAÇÃO 12 – ESQUEMA DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES PARA CONCRETO COM REFORÇO DE FIBRAS (BARROS, 2009).....	64
ILUSTRAÇÃO 13 – CONCEITUAÇÃO DO FATOR DE FORMA DA FIBRA (NUNES; AGOPYAN, 1998).....	69
ILUSTRAÇÃO 14 – DISTRIBUIÇÕES POSSÍVEIS DE TENSÃO AO LONGO DE UMA FIBRA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO CRÍTICO (BENTUR; MINDESS, 2007).....	72

ILUSTRAÇÃO 15 – CONCRETO COM FIBRAS ONDE HÁ COMPATIBILIDADE DIMENSIONAL ENTRE AS FIBRAS E O AGREGADO GRAÚDO (FIGUEIREDO, 2000).....	73
ILUSTRAÇÃO 16 – CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS ONDE NÃO HÁ COMPATIBILIDADE DIMENSIONAL ENTRE AS FIBRAS E O AGREGADO GRAÚDO (FIGUEIREDO, 2000).....	73
ILUSTRAÇÃO 17 – DIFERENÇA DE COMPORTAMENTO ENTRE FIBRAS DÚCTEIS E FRÁGEIS QUANDO INCLINADAS EM RELAÇÃO À SUPERFÍCIE DE RUPTURA (FIGUEIREDO, 2000). ....	74
ILUSTRAÇÃO 18 – CAPA DE COMPRESSÃO E RADIER EXECUTADO COM CONCRETO COM FIBRAS (DRAMIX, 2009).....	75
ILUSTRAÇÃO 19 – TUBOS DE CONCRETO (DRAMIX, 2009). ....	75
ILUSTRAÇÃO 20 – PAVIMENTAÇÃO DE GALPÃO INDUSTRIAL E POSTO DE COMBUSTÍVEL (DRAMIX, 2009).....	76
ILUSTRAÇÃO 21 – TÚNEIS COM CONCRETO PROJETADO COM FIBRAS E ANÉIS SEGMENTADOS PARA REVESTIMENTO DE TÚNEIS (DRAMIX, 2009). ....	77
ILUSTRAÇÃO 22 – SOLICITAÇÕES MECÂNICAS PARALELAS ÀS FIBRAS.....	80
ILUSTRAÇÃO 23 – SOLICITAÇÕES MECÂNICAS PERPENDICULARES ÀS FIBRAS.....	82
ILUSTRAÇÃO 24 - FIBRAS DE AÇO UTILIZADA NO ESTUDO: (A) CURTA; (B) MÉDIA; (C) LONGA. ....	88
ILUSTRAÇÃO 25 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE ABATIMENTO.....	92
ILUSTRAÇÃO 26 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE TEOR DE AR. ....	93
ILUSTRAÇÃO 27 – (A) MOLDAGEM E ADENSAMENTO DOS CONCRETOS POR MESA VIBRATÓRIA; (B) TANQUE DE CURA.....	94
ILUSTRAÇÃO 28 – (A) PRENSA AMSLER DE 200 TF; (B) EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	95
ILUSTRAÇÃO 29 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL. ....	96
ILUSTRAÇÃO 30 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE: EQUIPAMENTO DE LEITURA DIGITAL E INSTRUMENTAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA. ....	96
ILUSTRAÇÃO 31 – CORPOS-DE-PROVA DA SÉRIE-1. ....	105
ILUSTRAÇÃO 32 – DETERMINAÇÃO DOS ABATIMENTOS DOS CONCRETOS CC, CREF-S/F E CRFA. ....	114

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA E DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA DIVERSOS TIPOS DE FIBRAS E DA MATRIZ DE CIMENTO (ADAPTADO DE BENTUR E MINDESS (2007) E ACI 544.1R-96).....	36
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO E GEOMETRIA DAS FIBRAS DE AÇO PARA REFORÇO DE CONCRETO. ....	39
TABELA 3 – TIPOS E CLASSES DE FIBRAS DE AÇO PRODUZIDAS ESPECIFICAMENTE PARA USO EM CONCRETO (NBR 15530 (2007)).....	71
TABELA 4 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES OBTIDAS NO REFERENCIAL TEÓRICO. ....	84
TABELA 5 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS. ....	89
TABELA 6 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS.....	90
TABELA 7 - PROPRIEDADES DO ADITIVO PLASTIFICANTE SEGUNDO INFORMAÇÕES DOS FABRICANTES.....	91
TABELA 8 - VOLUME COMPACTADO SECO ( $V_{COMP}$ ) DE AGREGADO GRAÚDO POR M <sup>3</sup> DE CONCRETO. ....	99
TABELA 9 - DOSAGENS DE DIVERSOS PESQUISADORES. ....	101
TABELA 10 – PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS DO ESTUDO REALIZADO POR TOLEDO ET AL (2008). ....	101
TABELA 11 - DOSAGENS DOS CONCRETOS CREF-S/F-S1 E DOS CRFA-S1. ....	102
TABELA 12 – RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO FRESCO. ....	103
TABELA 13 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS DA SÉRIE-1. ....	104
TABELA 14 - DOSAGENS DOS CONCRETOS CC, CREF-S/F E CRFA. ....	109
TABELA 15 - CLASSIFICAÇÃO DAS CONSISTÊNCIAS DOS CONCRETOS (ANDOLFATO, 2002).....	110
TABELA 16 – PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE AS DOSAGENS PROPOSTAS PARA O ESTUDO. ....	111
TABELA 17 – RESULTADOS DO ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE. ....	113
TABELA 18 – RESULTADOS DO TEOR DE AR INCORPORADO DO CONCRETO FRESCO.....	115
TABELA 19 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS. ....	117

TABELA 20 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS.	120
TABELA 21 – RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO DOS CONCRETOS.	122
TABELA 22 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS COM DIFERENTE FATOR DE FORMA DE CADA VOLUME DE FIBRA.	130
TABELA 23 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS COM FIBRA DE AÇO OBTIDOS POR YAZICI ET AL. (2007).	131
TABELA 24 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS COM DIFERENTE FATOR DE FORMA DE CADA VOLUME DE FIBRA.	132
TABELA 25 – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO DOS CONCRETOS COM DIFERENTE FATOR DE FORMA DE CADA VOLUME DE FIBRA.	134
TABELA 26 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS COM DIFERENTE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE CADA TIPO DE FIBRA.	136
TABELA 27 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS COM DIFERENTE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE CADA TIPO DE FIBRA.	137
TABELA 28 – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO DOS CONCRETOS COM DIFERENTE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE CADA TIPO DE FIBRA.	139
TABELA 29 – VALOR MÉDIO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO SEGUNDO CEB-FIP (1990).	141
TABELA 30 – DADOS DE ENTRADA PARA A REGRA DAS MISTURAS.	143

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$a/c$	Relação entre a água e o cimento da mistura.
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI	American Concrete Institute
CC	Concreto Convencional
$C_m$	Consumo de Areia
CREF-S/F	Concreto de Referência sem Fibras
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço
CRFA-C1	Concreto Reforçado com 0,4% de Fibras Curtas de Aço
CRFA-C2	Concreto Reforçado com 0,8% de Fibras Curtas de Aço
CRFA-L1	Concreto Reforçado com 0,4% de Fibras Longas de Aço
CRFA-L2	Concreto Reforçado com 0,8% de Fibras Longas de Aço
CRFA-M1	Concreto Reforçado com 0,4% de Fibras Médias de Aço
CRFA-M2	Concreto Reforçado com 0,8% de Fibras Médias de Aço
$d$	Diâmetro da Fibra
$D_{max}$	Diâmetro Máximo
$E_c$	Módulo de Elasticidade do Concreto
$f_c$	Resistência do Concreto à Compressão
$f_{c,ef}$	Resistência Efetiva
$f_{ck}$	Resistência Característica do Concreto à Compressão
$f_{ct}$	Resistência do Concreto à Tração
$f_{ct}/f_{cc}$	Relação entre a Resistência à Tração e Resistência à Compressão do Concreto
$F_F$	Fração Volumétrica das Fibras
$F_M$	Fração Volumétrica da Matriz
FRC	Fiber Reinforced Concrete
$F_V$	Fração Volumétrica Dos Vazios
$l$	Comprimento da Fibra
$l_c$	Comprimento Crítico da Fibra
$L_F/D_F$	Fator de Forma da Fibra
LEMA	Laboratório de Estruturas e Materiais

$M_c$	Massa Unitária Compactada do Agregado Graúdo.
$m_F$	Massa de Fibra
MF	Módulo de Finura
$m_M$	Massa da Matriz
$m_T$	Massa Total do Compósito
NBR	Norma Brasileira Registrada
NPT	Núcleo de Pesquisas Tecnológicas
plc/c	Relação entre a Fração Sólida do Aditivo Plastificante e o Cimento
$V_a$	Volume de Água
$V_b$	Volume de Agregado Graúdo
$V_c$	Volume de Cimento
$V_{comp}$	Volume Compactado
$V_F$	Volume das Fibras
$V_M$	Volume da Matriz
$V_m$	Volume de Areia.
$V_v$	Volume dos Vazios
$\gamma$	Distorção Angular
$\varepsilon$	Deformação Normal
$\rho_a$	Densidade da Água
$\rho_{ap}$	Massa Específica Aparente do Concreto Fresco
$\rho_b$	Densidade da Brita
$\rho_c$	Densidade do Cimento
$\rho_m$	Densidade da Areia
$\sigma$	Tensão Normal
$\sigma_F$	Tensão Normal da Fibra
$\sigma_M$	Tensão Normal da Matriz
$\sigma_{mu}$	Resistência Última da Matriz
$\tau$	Tensão de Cisalhamento Puro
$\tau_{au}$	Tensão de Aderência entre a Fibra e a Matriz
$\tau_{fu}$	Tensão Tangencial de Atrito
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1. PRELIMINARES.....	21
1.2. OBJETIVOS.....	23
1.2.1. Objetivo Geral.....	23
1.2.2. Objetivos Específicos.....	23
1.3. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO .....	24
<b>2. REREFENCIAL DOCUMENTAL .....</b>	<b>26</b>
2. 1. MATERIAIS COMPÓSITOS.....	26
2.1.1. Preliminares .....	26
2.1.2. Definições e Classificação .....	27
2.1.3. Características Principais .....	31
2. 2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO.....	32
2.2.1. Preliminares .....	32
2.2.2. Histórico.....	33
2.2.3. Tipos e Propriedades das Fibras.....	34
2. 3. PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO .....	40
2.3.1. Preliminares.....	40
2.3.2. Mecanismo de Interação Fibra-Matriz.....	40
2.3.3. Trabalhabilidade.....	43
2.3.4. Teor de Ar Incorporado.....	47
2.3.5. Resistência à Compressão .....	50

2.3.6. Resistência à Tração Direta e Indireta .....	53
2.3.7. Módulo de Elasticidade .....	60
2.4. INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NO COMPÓSITO .....	63
2.4.1. Preliminares.....	63
2.4.2. Fração Volumétrica ou Teor de Fibras .....	64
2.4.3. Fator de Forma ou Forma Geométrica.....	68
2.5. APLICAÇÕES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO .....	74
2.6. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE MICROMECAÂNICA.....	78
2.6.1. Preliminares.....	78
2.6.2. Regra das Misturas .....	80
2.7. COMENTÁRIOS ADICIONAIS.....	83
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>86</b>
3.1. PRELIMINARES .....	86
3.2. VARIÁVEIS DE ESTUDO.....	87
3.3. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS.....	88
3.3.1. Cimento .....	88
3.3.2. Agregados.....	89
3.3.3. Água .....	90
3.3.4. Aditivo.....	91
3.4. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	91
3.4.1. Abatimento do Tronco de Cone.....	92
3.4.2. Teor de Ar Incorporado .....	92

3.5. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.....	94
3.6. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	94
3.6.1. Resistência à Compressão .....	95
3.6.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	95
3.6.3. Módulo de Elasticidade .....	96
3.7. DOSAGEM.....	98
3.7.1. Método de Dosagem.....	98
3.7.2. Definição da dosagem de fibras e do aditivo plastificante .....	101
3.8. PRODUÇÃO DOS CONCRETOS .....	109
<b>4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>112</b>
4.1. PRELIMINARES .....	112
4.2. ESTADO FRESCO.....	112
4.2.1. Abatimento do Tronco de Cone.....	112
4.2.2. Teor de Ar Incorporado .....	115
4.3. ESTADO ENDURECIDO .....	117
4.3.1. Resistência à Compressão .....	117
4.3.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	119
4.3.3. Módulo de Elasticidade .....	121
<b>5. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>124</b>
5.1. PRELIMINARES .....	124
5.2. FATOR TRABALHABILIDADE DOS CONCRETOS .....	124
5.3. TEOR DE AR INCORPORADO NA MISTURA .....	127

5.4. INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA DAS FIBRAS DE AÇO.....	129
5.4.1. Resistência à Compressão .....	130
5.4.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	132
5.4.3. Módulo de Elasticidade .....	134
5.5. INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS FIBRAS DE AÇO .....	135
5.5.1. Resistência à Compressão .....	135
5.5.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	137
5.5.3. Módulo de Elasticidade .....	139
5.6. RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO .....	140
5.7. REGRA DAS MISTURAS .....	142
5.8. COMENTÁRIOS ADICIONAIS.....	144
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>146</b>
6.1. CONSIDERAÇÕES .....	146
6.2. CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	147
6.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	150
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>151</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O concreto reforçado com fibras de aço é um material compósito formado por uma matriz cimentícia e por uma quantidade de fibras que modifica as propriedades do conjunto. No presente trabalho, realiza-se um estudo sobre o comportamento mecânico deste material.

Nesta seção introdutória, apresentam-se generalidades a respeito do concreto reforçado de fibras. Além disso, são expostos os objetivos para a realização do trabalho. Por fim, apresenta-se a forma na qual esta dissertação está organizada, de acordo com os assuntos abordados em cada seção.

## 1.1. Preliminares

Novos materiais tendem a surgir em função da necessidade de melhorar o desempenho e de suprir falhas de materiais já conhecidos. A história da utilização de compósitos reforçados com fibras como materiais de construção tem mais de 3000 anos. Há exemplos do uso de palhas em tijolos de argila, mencionados no livro do Êxodo, e crina de cavalo reforçando materiais cimentados. Outras fibras naturais têm sido utilizadas para conferir ductibilidade aos materiais de construção essencialmente frágeis (ILLISTON, 1994).

O concreto é um dos materiais mais utilizados nas construções devido a sua grande versatilidade de aplicação. Estudos vêm sendo realizados com o intuito de melhorar as características deste material, surgindo assim os concretos especiais tais como o concreto de alto desempenho, de alta resistência, auto-adensável, fluido, leve, colorido e com fibras.

Uma das limitações do concreto é sua baixa resistência à tração, que é de apenas 7 a 10% de sua resistência à compressão. Uma das alternativas mais usuais empregadas para melhorar o desempenho à tração consiste na adição de fibras à massa de concreto. As fibras agem como pontes de transferências de tensões, minimizando este comportamento frágil. A utilização das

fibras de aço proporciona uma melhoria nas resistências à compressão, flexão, fadiga, impacto, e principalmente aumentos na resistência à tração. Este passa a ser um material pseudo-dúctil, ou seja, continua apresentando uma resistência residual a esforços nele aplicados mesmo após sua fissuração (FIGUEIREDO, 2000).

Segundo Johnston (1994), as fibras em uma matriz cimentícia podem, em geral, ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, retração restringida, tração direta ou na flexão e cisalhamento. Secundariamente, as fibras melhoram a ductibilidade e a tenacidade de uma matriz frágil.

O desempenho dos compósitos reforçados com fibras é controlado principalmente pelo teor e pelo comprimento da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre as duas fases (HANNANT, 1994).

Entretanto, a trabalhabilidade é afetada pela adição de fibras, em proporção direta à fração volumétrica das fibras utilizadas (BENTUR; MINDESS, 2007). Concretos reforçados com altos teores de fibras produzidos de forma convencional apresentam difícil dispersão das fibras, podendo-se observar o agrupamento de fibras e conseqüentemente a formação de novelos. Neste contexto, a produção de concretos fluidos reforçados com fibras propicia a combinação do desempenho mecânico fornecido pelas fibras com uma boa dispersão das mesmas, pela fluidez obtida nos concretos.

Sendo assim, o uso do concreto fluido com adição de fibras de aço proporcionará novas possibilidades de aplicação, fazendo com que tal material seja mais eficiente, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Neste trabalho será tratado como concreto fluido o concreto que apresenta índice de consistência abaixo de 12 cm.

Devido ao grande potencial dos materiais compósitos, vem crescendo o interesse de pesquisadores e indústrias neste tipo de material. Muitas teorias e aproximações têm sido propostas para modelar o comportamento desse material, dentre as quais a técnica da homogeneização. Por meio da micromecânica é possível predizer as propriedades efetivas equivalentes do compósito em função das propriedades e frações volumétricas de seus constituintes.

A vantagem dos materiais compósitos é que, se bem projetado, eles apresentam normalmente as melhores qualidades dos seus constituintes e, muitas vezes algumas qualidades que o componente sozinho não possui. Portanto, a partir daí, algumas propriedades podem ser melhoradas através da formação de um material composto, na qual inclui a rigidez, a resistência à tração e à compressão, a resistência ao desgaste, e sua vida útil.

A resistência à tração dos compósitos depende da natureza da matriz, do tipo, características, geometria e quantidades de fibras empregadas como reforço e da forma e eficiência da interação fibra-matriz. Este trabalho busca colaborar nesta direção, caracterizando compósitos gerados com diferentes teores e geometrias de fibras de aço, avaliando seu desempenho quanto à tração, a relação entre as resistências à compressão e à tração, e verificando se é possível representar os resultados obtidos com a regra das misturas.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

O trabalho tem como objetivo geral avaliar experimentalmente o comportamento mecânico do concreto fluido, com reforço de fibras de aço, considerando a variabilidade das propriedades destas, tais como a fração volumétrica e o fator de forma.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Mais especificamente pode-se estabelecer os seguintes objetivos:

- Avaliar os principais parâmetros de influência no comportamento de um concreto fluido com fibras de aço;

- Avaliar os efeitos de variações de fator de forma e de teor de fibras de aço nas propriedades frescas e mecânicas dos concretos gerados;
- Determinar quais as características das fibras mais influentes no incremento da resistência à tração dos concretos;
- Avaliar a relação entre as resistências à compressão e à tração, segundo a literatura, a partir dos resultados de resistência média à compressão dos concretos ensaiados, e comparar com a relação dos resultados experimentais das resistências à compressão e à tração.
- Verificar se a regra de misturas, com princípio da micromecânica, é capaz de reproduzir adequadamente o comportamento experimental de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a tensões de tração.

### **1.3. Estruturação do Trabalho**

Este presente trabalho está organizado em seis seções, os quais são brevemente descritos a seguir. A Seção 1 apresenta uma breve introdução, abordando os objetivos do trabalho e a estruturação do trabalho.

A Seção 2 se constitui de uma revisão documental que contempla aspectos relativos aos Materiais Compósitos, ao Concreto Reforçado com Fibras de Aço e sobre os Princípios Básicos da Micromecânica. São apresentadas as definições, as classificações e as características principais dos Materiais Compósitos. Apresentando posteriormente as características físicas e geométricas das fibras metálicas, o mecanismo de atuação destas e o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras. E por fim, é apresentado o princípio básico da micromecânica, mostrando a teoria da regra das misturas.

A Seção 3 apresenta o programa experimental do estudo, onde são abordados, para os concretos analisados, os materiais e metodologias utilizadas na execução dos ensaios de laboratório, nos estados fresco e endurecido.

Na Seção 4 apresentará os resultados obtidos nos procedimentos experimentais descritos na seção anterior.

Na Seção 5 são analisados e discutidos os resultados dos ensaios, ressaltando a relação entre as resistências à compressão e à tração com a equação teórica e os dados experimental, e verificado o comportamento dos concretos reforçados com fibras de aço através da regra das misturas.

Na Seção 6, são elencadas as considerações finais e conclusões resultantes do presente estudo, bem como sugestões para trabalhos subseqüentes.

Apresenta-se ainda uma lista com as referências utilizadas.

## **2. REREFENCIAL DOCUMENTAL**

Tendo em vista que o foco da presente dissertação está voltado para a avaliação do desempenho de compósitos de matrizes cimentícias fluidas reforçadas com fibra de aço sob solicitações de tração, considera-se necessário revisar, inicialmente, os conceitos fundamentais mais importantes sobre materiais compósitos, o funcionamento da interação da fibra na matriz cimentícia, a influência das características de cada um destes elementos nas propriedades do compósito resultante, e as principais vantagens da micromecânica, a qual é basicamente a técnica de homogeneização para análise teórica do compósito. Nesta seção serão abordados, de forma genérica, a influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras, que governam a eficiência do compósito, sendo feitas algumas considerações específicas sobre os materiais envolvidos na presente pesquisa.

### **2.1. Materiais Compósitos**

#### **2.1.1. Preliminares**

Inúmeras conquistas tecnológicas recentes, principalmente aquelas relacionadas com aplicações na área aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, bioengenharia, automobilística, construção civil e artigos esportivos, entre outras, somente se tornaram viáveis após o advento dos compósitos estruturais. Esses materiais formam uma classe bastante ampla e abrangente, compreendendo desde os polímeros reforçados com fibras, os materiais híbridos metal/compósito e os concretos estruturais, até outros compósitos que incorporam matriz metálica ou matriz cerâmica. Portanto, a característica básica dos compósitos é combinar, a nível macroscópico, pelo menos duas fases distintas denominadas matriz e reforço (SAVEGE, 1993).

Os compósitos obtidos a partir de reforços contínuos apresentam um excelente desempenho estrutural, considerando-se a resistência e a rigidez específicas. Embora a associação deste termo esteja ligada às chamadas tecnologias de ponta, nas quais peças e dispositivos desse material são empregados em componentes utilizados em satélites, aeronaves, implantes ortopédicos, etc., esta classe teve origem há milhares de anos, com o uso de madeiras, ossos e tecidos musculares, ou seja, os compósitos naturais, utilizados na eficiência estrutural (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

O uso de materiais compósitos em aplicações estruturais vem crescendo de forma significativa em função da necessidade de suprir falhas ou de melhorar o desempenho de materiais já conhecidos. Ao longo da história, o ser humano vem substituindo ou acrescentando novos materiais na execução de suas construções. Devido à importância dos materiais compósitos, muitos estudos têm sido desenvolvidos a fim de entender o comportamento dos mesmos na presença das mais variadas ações e, com isso, aperfeiçoar os procedimentos de projeto e suas aplicações nos diversos setores industriais.

### **2.1.2. Definições e Classificação**

Define-se por material compósito o resultado da combinação de dois ou mais materiais distintos em suas propriedades físicas. Trata-se de uma classe de meio heterogêneo, cujo objetivo é a obtenção de um material que, combinando as características de seus componentes de maneira adequada, apresente um melhor desempenho estrutural melhor do que estes, sob condições específicas de utilização (SISTEMA PERGANUN, 2009).

A palavra compósito tem sua origem na língua inglesa, sendo o termo *composite* definido em português pela professora Eloísa Mano, como: “Compósito é uma classe de materiais heterogêneos, tanto em escala macroscópica quanto em microscópica; multifásicos, resultantes de uma combinação racional, em que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço (componente estrutural ou reforço) e o outro, contínuo, o meio de transferência deste esforço (MANO, 1991 apud BERNADI, 2003).

O compósito é definido como um sistema composto pela mistura ou combinação de dois ou mais macroconstituintes, que se diferenciam em forma e/ou constituição, sendo absolutamente insolúveis um no outro (Ilustração 1).

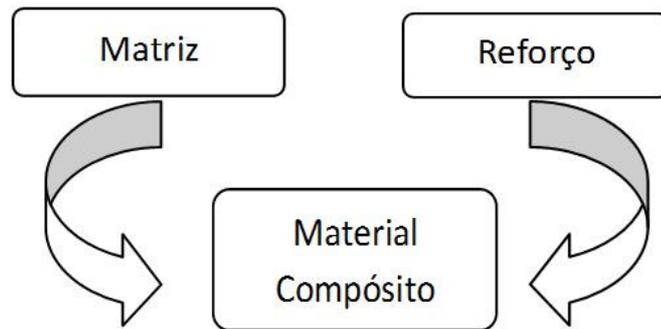


Ilustração 1 - Esquema de formação de um material compósito.

A estrutura a ser obtida deverá constituir um novo material com características homogêneas ao ser analisado macroscopicamente. Esta nova composição tem como principais vantagens relacionadas ao comportamento mecânico o aumento da rigidez e da resistência mecânica. O principal objetivo é obter um material final com propriedades superiores a de seus constituintes.

De acordo com o tipo de materiais constituintes e dos processos de fabricação, há diferentes classificações de materiais compósitos, associadas as suas características, comportamento e vantagens específicas.

Os compósitos podem se constituir de fibras ou partículas, conforme apresentada na Ilustração 2. Caso o reforço seja na forma de fibras, pode-se dispô-las em feixes paralelos entre si, de modo a formar e orientar o reforço em multidireções, multicamadas ou na forma de camadas isoladas ou lâminas. Os compósitos obtidos com reforço multidirecional têm como ponto de partida as preformas têxteis e se constituem em um salto tecnológico no sentido de se obter estruturas maciças de grande volume e com propriedades ajustadas à aplicação a que se destinam.

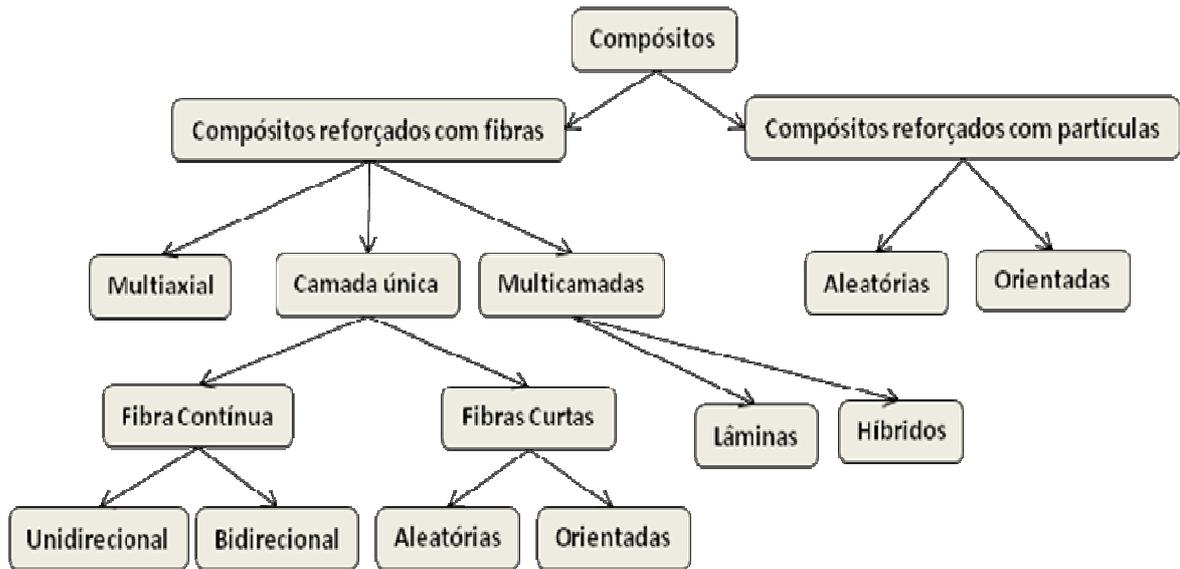


Ilustração 2 - Proposta de classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Os compósitos de fibras isoladas podem ser subdivididos em compósitos com fibras contínuas ou fibras curtas. Os compósitos com multicamadas, por sua vez, podem ser subdivididos em compósitos laminados, onde um único tipo de fibra é utilizado na manufatura do compósito, mas que podem apresentar orientações definidas e distintas entre as laminas, e os compósitos híbridos, onde dois ou mais tipos de fibras de reforço são utilizados. Os compósitos obtidos com fibras contínuas podem apresentar reforço unidirecional ou reforço bidirecional (tecidos). Nestes casos, o material é moldado de forma que a fase de reforço seja contínua e orientada preferencialmente.

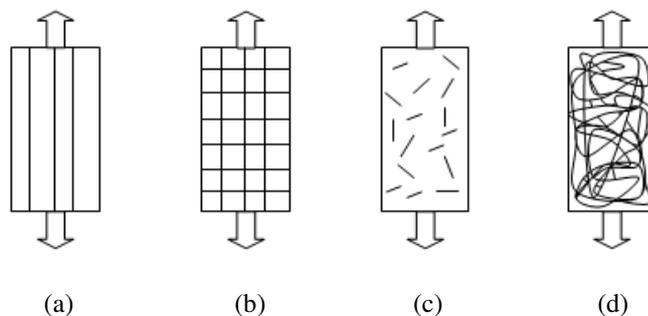


Ilustração 3 – Lâminas com reforço do tipo: (a) unidirecional; (b) tecido bidirecional balanceado; (c) fibras picadas; e (d) manta contínua, submetidas a esforços de tração uniaxial longitudinais (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Considerando-se os quatro casos de distribuição de fibras mostrado na Ilustração 3, para uma mesma matriz, um tipo específico de fibra e a mesma fração volumétrica, e submetidos a esforços de tração longitudinais, o autor relata que há diferença em relação à eficiência de comportamento mecânico quando submetido a esforços de tração de mesma intensidade e na mesma direção: os compósitos obtidos a partir de lâminas reforçadas com fibras unidirecionais e tecidos bidirecionais (Ilustração 3a e 3b) tendem a ser muito mais eficientes estruturalmente em relação aos compósitos obtidos com fibras picadas e mantas contínuas (Ilustração 3c e 3d). No caso 3a, a resistência mecânica e a rigidez teriam maiores valores na direção longitudinal, em relação ao caso 3b, onde os resultados de resistência mecânica e rigidez apresentariam valores intermediários. Já no caso 3c e 3d, estes valores seriam menores que nas situações anteriores. Mas tal fato só se verifica para esforços na direção longitudinal. Se os esforços fossem aplicados transversalmente, o melhor desempenho ocorreria no caso 3b. Nota-se que estas tendências aos esforços aplicados, contínuos ou não, influenciam significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos. Desta forma, arranjos distintos e combinações de fibras conferem aos compósitos diferentes características e propriedades (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Outro fator determinante no desempenho de um compósito, frente aos mais diversos tipos de solicitações, que é um dos principais objetivos deste trabalho, são as frações volumétricas das fibras ( $F_F$ ), da matriz ( $F_M$ ) e dos vazios ( $F_V$ ). Estes parâmetros são usados para quantificar os volumes percentuais de cada componente em relação ao volume total de um compósito. Os valores de  $F_F$  e  $F_M$  são determinados pelo processo de fabricação adotado, para qualquer tipo de compósito. Segundo Mathews e Rawlings (1994), é possível obter compósitos com valores de  $F_F$  de até 70%, e deseja-se que os valores de  $F_V$  sejam menores que 1%, pois estes são prejudiciais ao desempenho mecânico dos compósitos.

Outra característica importante dos compósitos é sua versatilidade quanto às propriedades físicas, químicas e mecânicas, ou seja, a combinação de diferentes tipos de matriz e pelas várias opções de reforço, tendendo ao infinito da imaginação.

### 2.1.3. Características Principais

Os materiais compósitos apresentam características bem diversas entre si, com isso apresentam diferentes aplicações em seus usos. Estas aplicações dependem do desempenho estrutural, da disponibilidade e do preço da matéria prima, do processo de fabricação, entre outros. O desempenho dos compósitos sintéticos, em alguns aspectos, supera quando comparados com os naturais, entretanto, a necessidade de resguardar o meio ambiente cresce, bem como a utilização de produtos renováveis, a fim de promover o desenvolvimento sustentável. Pode ser visto então, o uso de materiais como ossos, dentes, bambu, madeira, na qual apresentam bons desempenho mecânico em alguns aspectos, incluindo elevados índices de resistência e rigidez, que merecem ser melhores estudados, o que não será abordado neste trabalho.

Embora as características dos compósitos possam variar em função do tipo de aplicação a que se destinam, muitos aspectos são comuns a inúmeros tipos de compósitos. As relações entre tensões e deformações, sendo o módulo de elasticidade abordado a seguir, apresentam certas peculiaridades que são típicas de cada classe de materiais.

Os materiais que apresentam comportamento elástico linear apresentam tensão como função linear da deformação e, após a remoção de forças atuantes, esses materiais voltam à sua forma original, ou seja, um material é considerado perfeitamente elástico se as deformações aparecem ou desaparecem imediatamente com a aplicação ou remoção de tensões. Por semelhança de muitos outros materiais estruturais, o concreto é admitido elástico até um certo limite, sob uma tensão permanente.

O módulo de elasticidade avalia a resistência do material à deformação elástica. É uma medida da sua rigidez. Materiais com baixo módulo deformam muito elasticamente quando sujeitos a solicitações mecânicas. Alguns desses materiais são indicados para estruturas previamente projetadas para sofrerem deformação apenas transitória. No entanto, na maioria das aplicações não se deseja a ocorrência de deflexões, ou seja, os materiais devem apresentar alto módulo de elasticidade. A avaliação da rigidez do material é importante tanto durante o processo de montagem/fabricação, quando durante sua vida útil, para que haja controle da estabilidade dimensional do componente. No caso de materiais perfeitamente elásticos a

determinação do módulo exige alguns cuidados. No entanto, quando a relação linear entre tensão e a deformação não é obedecida, ou no caso de materiais compósitos, a determinação dessa propriedade apresenta algumas peculiaridades. Este é o caso do concreto, portanto, o módulo de elasticidade do concreto varia em função das matérias primas utilizadas e de sua resistência mecânica.

## **2. 2. Concreto Reforçado com Fibras de Aço**

### **2.2.1. Preliminares**

O concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) é um material compósito formado por uma matriz cimentícia e por uma certa quantidade de fibras dispersas que visa a melhoria das propriedades do conjunto. Estes novos materiais tendem a surgir em função da necessidade de melhorar o desenvolvimento e suprir falhas de materiais já conhecidos. Contudo, a utilização dos mesmos exige o estudo e a compreensão e aperfeiçoamento do seu comportamento.

Apesar de o concreto apresentar um bom comportamento estrutural quando em compressão, uma das limitações é sua baixa resistência à tração, que é de apenas 7 a 10% de sua resistência à compressão. Uma das alternativas mais usuais empregadas para melhorar o desempenho à tração consiste na adição de fibras dispersas à massa de concreto. As fibras não só tem atuado como reforço à tração, mas também tem melhorado o seu desempenho como um todo, pois elas minimizam o comportamento frágil característico deste material. Pois, o concreto, com exceção daqueles de resistência muito elevada, tem as características de um material quase-frágil, ou seja, um material com pouca ductibilidade (HANAI, 2005).

Segundo Barros (1996), com a correta adição de fibras à composição dos materiais de matriz cimentícia ocorre melhorias nas propriedades do compósito, tais como: capacidade de absorção de energia, ductilidade, o comportamento sob fissuração e a resistência às ações dinâmicas e estáticas. A mudança dessas propriedades depende das propriedades físicas das fibras, das características da matriz cimentícia e da interação entre a fibra e a matriz. Desta

forma, o material passa a ter exigências específicas para o seu controle de qualidade, dosagem e aplicação diferentes do concreto convencional.

O avanço nas pesquisas acerca das propriedades do concreto reforçado com fibras tende a melhorar o desempenho deste material e abrir novos campos de aplicação. Segundo Figueiredo (2000), para algumas aplicações, o concreto reforçado com fibras apresenta vantagens tecnológicas e econômicas em relação ao convencional, como é o caso de revestimento de túneis, do concreto projetado, dos pavimentos, dos pré-moldados, entre outras aplicações. Para isso é preciso que, além do aperfeiçoamento deste material em si, o estudo do comportamento estrutural deste material sirva como referência para que sua aplicação seja feita de forma otimizada e segura.

### 2.2.2. Histórico

A utilização de compósitos reforçados com fibras na construção civil é bastante antiga e intuitiva, tendo sido retratada nas Sagradas Escrituras, onde o povo egípcio empregava palha e raízes na fabricação de tijolos e adobes, a fim de criar compósitos com melhor desempenho. Na Ilustração 4 é mostrada uma casa construída com adobe reforçado com palha.



Ilustração 4 - Casa construída no ano de 1540: adobe reforçado com palha (IMAGEM, 2009).

O primeiro material utilizado na construção com adição de fibras produzido em escala industrial foi o cimento-amianto, obtido a partir de observações feitas na prática, sem um devido conhecimento do comportamento das fibras na pasta de cimento, porém apresentou uma resistência mecânica elevada se comparada com outros compósitos usados na construção civil (AGOPYAN, 1993).

Na década de 1910 e 1920 surgiram várias patentes para o concreto à base de cimento portland, incluindo peças descontínuas e curtas de aço para o reforço estrutural do concreto. Com o objetivo de aumentar a resistência e a estabilidade do concreto armado, as fibras de aço são incluídas em conjunto com a armadura convencional. Os desenvolvimentos modernos do concreto com fibras se deram no início da década de 1960, aparecendo no mercado uma grande variedade de fibras e de novos materiais, o que continua acontecendo até hoje. Alguns exemplos destas fibras são: metálicas (aço), minerais (vidro), naturais (sisal, juta, bambu e coco) e sintéticas (polipropileno, náilon e poliéster).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o primeiro uso estrutural do concreto reforçado com fibras de aço foi em 1971, na produção de painéis desmontáveis para um estacionamento do aeroporto Heathrow, em Londres. O concreto continha 3%, em peso, de fibras de aço estiradas a frio de 0,25 mm de diâmetro por 25 mm de comprimento. Na época da última inspeção relatada, após cinco anos de uso, as lajes não apresentaram sinais de fissura.

As fibras atuam nas microfissuras durante o endurecimento da pasta de cimento, impedindo sua propagação e retardando o aparecimento de microfissuras. Atuam na pasta endurecida limitando a abertura e comprimento das fissuras, aumentando assim a sua durabilidade.

### **2.2.3. Tipos e Propriedades das Fibras**

Existem numerosos tipos de fibras disponíveis para uso comercial. De acordo com a terminologia adotada pelo American Concrete Institute (ACI), Committee 544 (Fiber Reinforced Concrete), existem quatro categorias de concreto reforçado com fibras: concreto reforçado com fibras de aço, de vidro, sintéticas e naturais.

A escolha de um determinado tipo de fibra a ser usada depende das características que se quer obter no compósito. O módulo de elasticidade e a resistência mecânica são as duas propriedades mais importantes na definição da capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto (FIGUEIREDO, 2005).

As fibras com módulo de elasticidade baixo e alongamento maior do que as matrizes de cimento, como por exemplo, as fibras de polipropileno e as de polietileno, são capazes de absorver grandes energias, com elevada tenacidade e grande resistência ao impacto, mas não contribuem muito para o aumento da resistência do compósito (OLIVEIRA, 2005). As fibras com módulo de elasticidade e de resistência alto, como as fibras de aço, de vidro e de carbono, produzem compósitos com elevada resistência à tração, rigidez e capacidade de resistir a cargas dinâmicas.

Na Tabela 1 podem ser observadas algumas das características de diversos tipos de fibras. Para se obter um produto final com uma durabilidade e uma qualidade satisfatória, a compatibilidade entre fibra e matriz é fundamental para este resultado. Uma revisão mais completa dos tipos de fibras utilizadas no concreto pode ser encontrada em Bernadi (2003).

Tabela 1 - Valores de resistência mecânica e de módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e da matriz de cimento (adaptado de Bentur e Mindess (2007) e ACI 544.1R-96).

Fibra	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro $\mu\text{m}$	Resistência à Tração Mpa	Módulo de Elasticidade Mpa	Deformação Específica na Ruptura (%)
Aço	7,8	100 -1000	500 - 2600	210000	0,5 - 3,5
Vidro					
E	2,54	8 - 15	2000 - 4000	72000	3 - 4,8
AR	2,7	12 - 20	1500 - 3700	80000	2,5 - 3,6
Sintéticas					
Acrílico	1,18	5 - 17	200 - 1000	17000 - 19000	28 - 50
Aramida	1,44	10 - 12	2000 - 3100	62000 - 120000	2 - 3,5
Carbono	1,9	8 - 10	1800 - 2600	230000 - 380000	0,5 - 1,5
Nylon	1,14	23	1000	5200	20
Poliéster	1,38	10 - 80	280 - 1200	10000 - 18000	10 - 50
Polietileno	0,96	25 - 1000	80 - 600	5000	12 - 100
Polipropileno	0,9	20 - 200	450 - 700	3500 - 5200	6 - 15
Naturais					
Celulose	1,5	25 - 125	350 - 2000	10000 - 40000	3,5
Sisal	-	-	280 - 600	13000 - 25000	3,0
Coco	1,12 - 1,15	100 - 400	120 - 200	19000 - 25000	-
Bambu	1,5	50 - 400	350 - 500	33000 - 40000	-
Juta	1,02 - 1,04	100 - 200	250 - 350	25000 - 32000	1,5 - 1,9
Capim Elefante	-	425	180	49000	3,6
Matriz de Cimento (para comparação)	2,5	-	3 - 7	10000 - 45000	0,02

De acordo com o ACI 544.1R-96, uma característica importante das fibras é a relação entre seu comprimento e seu diâmetro equivalente (diâmetro do círculo com área igual à área da seção transversal da fibra), a qual é chamada relação de aspecto ou fator de forma ( $L_F/D_F$ ). Quanto maior for o fator forma, melhor será a aderência entre a fibra e a matriz cimentícia.

As fibras de aço (Ilustração 5) são fabricadas com base de fios de aço trefilados, que são cortadas e comercializadas em diversos comprimentos e diâmetros. A resistência à tração dessas fibras varia entre 500 e 2600 MPa, enquanto seu módulo de elasticidade é algo em torno de 210 GPa. A qualidade dos concretos reforçados com fibras de aço depende basicamente do fator de forma, de tal modo que, quanto maior for esse fator, melhor será o seu desempenho.



Ilustração 5 - Fibras de Aço (RESENDE, 2003).

As fibras de aço destinadas para reforço do concreto possuem comprimentos variando entre 12,7 mm e 63,5 mm e fator forma variando entre 30 e 100, sendo desde modo, suficientemente curtas para se dispersarem aleatoriamente numa mistura fresca de concreto (ACI 544.1R-96).

Alguns tipos de fibras metálicas são apresentados na Ilustração 6. Diversas são as formas utilizadas, tais como retas, deformadas ou irregulares, todas dependendo do processo de fabricação. Em geral, as fibras metálicas retas e as deformadas são obtidas através do corte de fios finos ou folhas de aço. As fibras também podem ser produzidas a partir de fios trefilados progressivamente até se chegar ao diâmetro desejado. Com isto, acabam por apresentar uma maior resistência mecânica (dado o seu encruamento), a qual pode ser ainda maior quando da utilização de aços com maior teor de carbono (FIGUEIREDO, 2000).

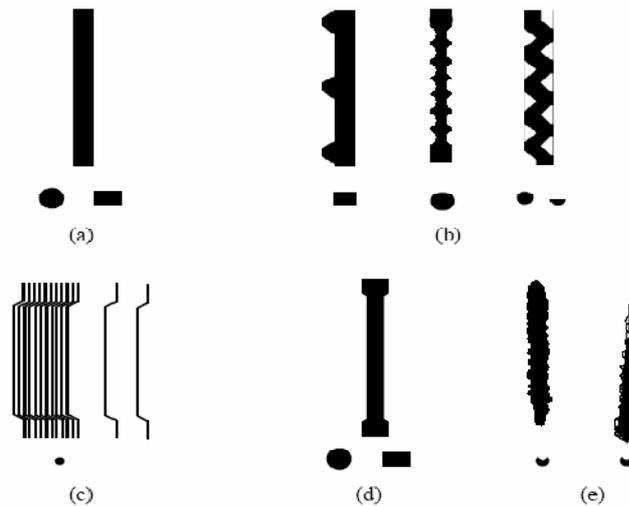


Ilustração 6 – Tipos de fibras metálicas: a) reta; (b) deformadas/onduladas; (c) extremidades em gancho; (d) extremidades alargadas; (e) irregulares (ACI 544.1R-96).

Na maioria das vezes, as fibras metálicas se apresentam soltas, embora aquelas com extremidades dobradas também sejam fornecidas em pentes e unidas nas extremidades por uma cola solúvel em água. Deste modo, durante a mistura, essas fibras se separam e se dispersam individualmente pela massa, facilitando o processo de mistura com o concreto e evitando o agrupamento e a má distribuição.

Recentemente publicada, a norma brasileira NBR 15530: 2007 – Fibras de aço para concreto – Especificação, estabelece parâmetros para a classificação das fibras de aço com baixo teor de carbono e dispõe sobre os requisitos mínimos de forma geométrica, tolerâncias dimensionais, defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento. Com isso, procura-se garantir que o produto fornecido em conformidade com estes requisitos tenha potencial para proporcionar um desempenho adequado ao concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), desde que sejam observados os cuidados com a dosagem e controle do material.

Na NBR 15530 (2007) são previstos na norma três tipos básicos de fibras em função de sua conformação geométrica: o Tipo A corresponde a fibra de aço com ancoragens nas extremidades; o Tipo C é referente fibra de aço corrugada; e Tipo R indica a fibra de aço reta. Além disso, existem três classes previstas as para fibras de aço segundo esta norma, as quais foram definidas segundo o aço que deu origem às mesmas: a Classe I refere-se a fibra oriunda de arame trefilado a frio; a Classe II indica a fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio; e a Classe III corresponde a fibra oriunda de arame trefilado e escarificado.

Na Tabela 2 apresenta-se a correspondência entre as geometrias e classes definidas na NBR 15530 (2007) para as fibras de aço.

Tabela 2 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto.

Tipo (geometria)	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	I	

Segundo Figueiredo et al. (2008), além dessa classificação possibilitar o estabelecimento de requisitos mínimos que podem ser correlacionados com o comportamento final do CRFA, procurou-se também abranger a maioria das fibras de aço disponíveis no mercado nacional.

Como citado anteriormente, a escolha do tipo de fibra depende da propriedade que se deseja alterar no compósito. Neste trabalho, definiu-se a fibra de aço para adição à matriz cimentícia, considerando que este tipo de fibra pode melhorar a capacidade resistente do compósito à tração.

## **2. 3. Propriedades do Concreto Reforçado com Fibras de Aço**

### **2.3.1. Preliminares**

Entre as causas dos avanços no uso de concreto reforçados com fibras de aço, estão as significativas vantagens que as fibras incorporam ao concreto, principalmente por aumentar sua resistência à tração. Essa melhoria impulsiona a busca pelo conhecimento e pela quantificação das propriedades desses concretos. Por este motivo, analisou-se neste trabalho o desempenho dos concretos reforçados com fibra de aço, em termos do seu comportamento no estado fresco e endurecido. As propriedades do concreto reforçado com fibras dependem de vários fatores, principalmente dos seguintes:

- Teor de fibras adicionadas no concreto;
- Características geométricas das fibras;
- Orientação e distribuição das fibras dentro do concreto;
- Relação de aspecto ou fator forma ( $L_F/D_F$ ) das fibras;
- Resistência da matriz de concreto e tensão de aderência entre as fibras e a matriz;
- Relação entre dimensão máxima do agregado e comprimento da fibra.

### **2.3.2. Mecanismo de Interação Fibra-Matriz**

O comportamento do concreto reforçado com fibras é controlado pela interação fibra-matriz através de processos de transferência de força da matriz para as fibras e de mecanismos de “costura” das fissuras, em níveis avançados de carregamento. Em matrizes frágeis como o concreto, o efeito da interação de tensão é influenciado pela condição da matriz antes e após a fissuração, pelas propriedades mecânicas da fibra e da matriz, pela geometria das fibras (comprimento, forma e diâmetro), pelo mecanismo de ancoragem das mesmas e pelo teor de

fibras no compósito. Para que o compósito apresente um bom desempenho é necessário assegurar que seus componentes atuem em conjunto.

Segundo Figueiredo (2000), as fibras de aço quando adicionadas no concreto dificultam a propagação das fissuras devido ao seu alto módulo de elasticidade, sendo que as mesmas permitem uma redistribuição de esforços no material quando utilizada com baixos teores, devido à capacidade portante pós-fissuração do compósito. Portanto, a capacidade de reforço das fibras está diretamente ligada ao módulo de elasticidade destas, em relação ao módulo da matriz.

No estágio de pré-fissuração, segundo Bentur e Mindess (2007), o mecanismo de transferência de tensões é de natureza elástica e as deformações na interface da fibra e da matriz são iguais. No Gráfico 1 pode ser observado a representação das tensões tangenciais na interface fibra-matriz.



Gráfico 1 – Representação das tensões tangenciais (de cisalhamento) na interface matriz-fibra (BENTUR; MINDESS, 2007)

Segundo Pasa (2007), a transição do mecanismo de transferência de tensão é um processo gradual, acontecendo por meio de aderência elástica (antes do deslocamento) e por atrito (após o deslocamento), durante o qual ambos são efetivos. Quando o deslocamento das fibras ocorre no estágio de pré-fissuração, o efeito combinado destes dois mecanismos pode influenciar a curva tensão-deformação do compósito, e a ocorrência deste deslocamento depende das propriedades dos materiais que constituem o compósito e da sua interação.

Segundo Bentur e Mindess (2007), na fissura 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 (Ilustração 7).

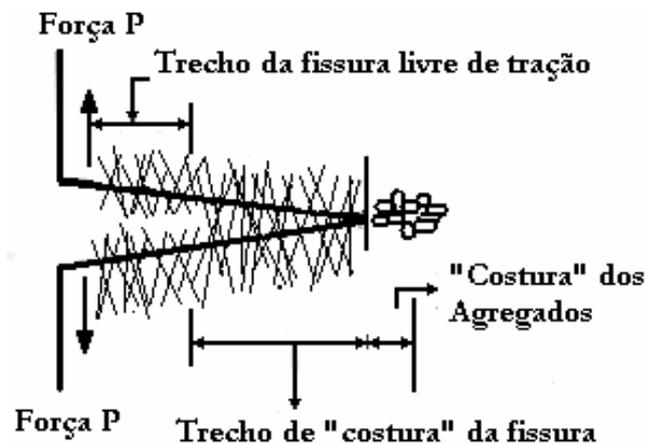


Ilustração 7 – Representação das zonas de transferência de tensões ao longo de uma fissura (BENTUR; MINDESS, 2007)

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. Isto conduz ao conceito de comprimento crítico, abordado no item 2.4.3.

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.

Alguns estudos relatam a influência da adesão fibra-matriz no fenômeno e salientam a contribuição da geometria da fibra na energia total absorvida pelo compósito. Segundo Weiler e Grosse (1996), a interação fibra-matriz é capaz de levar o compósito a suportar carregamentos maiores, devido ao gasto energético necessário para deformar a fibra.

### 2.3.3. Trabalhabilidade

A resistência de um concreto misturado nas proporções devidas é seriamente alterada pelo grau de compacidade, portanto, é importante que a consistência da mistura permita que o concreto possa ser transportado, lançado nas formas e adensado com relativa facilidade e sem segregação. Portanto, se o concreto satisfaz estas condições é qualificado como trabalhável (NEVILLE, 1997).

A adição de qualquer tipo de fibra ao concreto convencional reduz a trabalhabilidade. Independentemente do tipo de fibra, a perda da trabalhabilidade é proporcional à concentração de volume de fibras no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Esta redução é influenciada pelo fator de forma da fibra, pela geometria da fibra, pela fração volumétrica adicionada, pelo traço do concreto e pela aderência das fibras com a matriz. Normalmente fibras longas e fibras com maior relação de aspecto tendem a reduzir mais a trabalhabilidade.

Segundo Figueiredo (2000), além do efeito de contenção de fissuração no concreto endurecido, a adição de fibras altera condições de consistência do concreto, e conseqüentemente, a trabalhabilidade. Isto se deve principalmente ao fato de ao se adicionar as fibras ao concreto está se adicionando também uma grande área superficial que demanda água de molhagem. Dessa forma, deve-se ter uma menor quantidade de água disponível para fluidificar a mistura.

O ACI 544.3R-93, recomenda três diferentes métodos para a avaliação da trabalhabilidade do concreto com fibras. O primeiro e o mais simples é o abatimento do tronco de cone, o qual pode não ser adequado quando o teor de fibras é elevado, já que reduções nas medidas do abatimento não necessariamente levam a processos de lançamento e compactação satisfatórios. O segundo método é o que mede a fluidez do concreto com fibras submetido à vibração e forçado a descer por um cone invertido. Por último, há a indicação da utilização do ensaio Vebe, considerado o mais apropriado para avaliar a trabalhabilidade de misturas de concreto reforçado com fibras.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as fibras proporcionam estabilidade considerável a uma massa de concreto fresco, e o ensaio de abatimento do tronco de cone não é um bom índice de

trabalhabilidade. Por exemplo, a introdução de volume de 1,5% de fibras de aço ou de vidro em um concreto com 200 mm de abatimento pode reduzir o abatimento da mistura para cerca de 25 mm, mas o lançamento do concreto e sua compactação por vibração podem ainda ser satisfatórios. Portanto, apesar da mistura parecer sem trabalhabilidade, estas respondem bem à vibração, sendo então na maioria dos casos realizados devido a sua facilidade de execução.

O ensaio com cone invertido não é adequado para a avaliação da trabalhabilidade de concreto com fibras com quaisquer teores, pois se o concreto for muito plástico, acaba passando pela extremidade inferior aberta do cone com facilidade, invalidando o ensaio, e, se for muito coeso, acaba por entupir a extremidade inferior de modo a impossibilitar a obtenção de qualquer resultado do ensaio (CECCATO, 1998).

O ensaio Vebe é a medida de consistência do concreto definida como sendo o tempo necessário para remoldar o concreto contido no equipamento da forma troncônica para a forma cilíndrica (OLIVEIRA, 2005). Portanto, quanto maior o índice Vebe, menor a trabalhabilidade do concreto.

Os efeitos do teor de fibra e a relação de aspecto no tempo pelo ensaio Vebe são apresentados no Gráfico 2. Pode-se observar que o fator forma tem grande influência no volume de fibras que pode ser adicionado à matriz, a fim de garantir uma compactação relativamente fácil. Nota-se, também, que o aumento do fator forma e do teor de fibras acarreta uma redução na trabalhabilidade, devido à maior estabilidade do material.

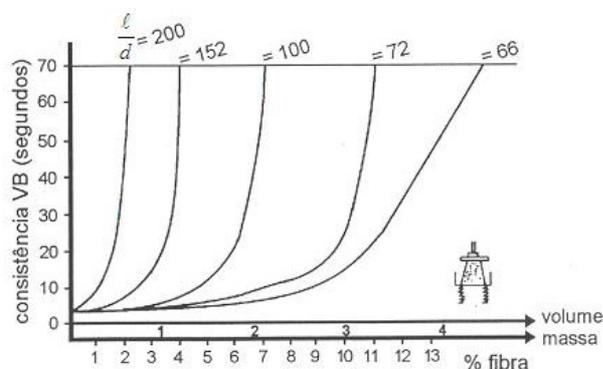


Gráfico 2 – Efeito de relação de aspecto de fibras na trabalhabilidade da argamassa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ensaio de abatimento do tronco de cone realizados por Yazici et al. (2007), em concretos reforçados com fibras de aço, observaram que a variação do fator de forma na ordem de 45, 65 e 80 e o aumento da fração volumétrica de 0,5%, 1,0% e 1,5%, os valores do abatimento variaram de 125 e 230 mm. Visto que, as fibras com fator de forma de 80, nos teores de 1,0% e 1,5% promoveram uma redução acentuada da trabalhabilidade das misturas de concreto. Por outro lado, a resistência à tração por compressão diametral dos concretos reforçados com fibras de aço foi significativamente melhorada com os aumentos de fator de forma e da fração volumétrica.

No estudo do comportamento do concreto reforçado com fibras de aço realizado por Toledo Filho et al. (2008) também observou que a adição de 2,0%, em volume, do reforço fibroso, a redução no abatimento do tronco de cone foi de ordem 78% em relação ao concreto de referência, sem a incorporação de fibras, mas as fibras apesar da redução na trabalhabilidade permitiram acréscimo nos valores de resistência à compressão dos compósitos cerca de 31,5%.

Já em outro estudo, na qual foi avaliado a influência de três diferentes fator de forma (48, 54 e 66) e três teores de fibras de aço (20, 40 e 60 Kg/m<sup>3</sup>), notou que os resultados de abatimento no tronco de cone são praticamente iguais para todas as misturas com mesmo consumo de fibras, e mesmo com o aumento da consistência, a compactabilidade das misturas não foram alteradas, apresentando boa fluidez e mobilidade durante a moldagem e compactação dos corpos-de-prova (NUNES; AGOPYAN, 1998).

A trabalhabilidade do concreto ou da argamassa contendo fibras de aço também é acentuadamente reduzida à medida que a dimensão máxima e o volume do agregado graúdo aumenta. Pode-se observar no Gráfico 3, este efeito da dimensão máxima do agregado na trabalhabilidade com relação de aspecto igual a 100. Visto também que utilizando agregados com 20 mm de dimensão máxima não é possível obter boa consistência adicionando ao concreto fibras com teores acima de 3%.

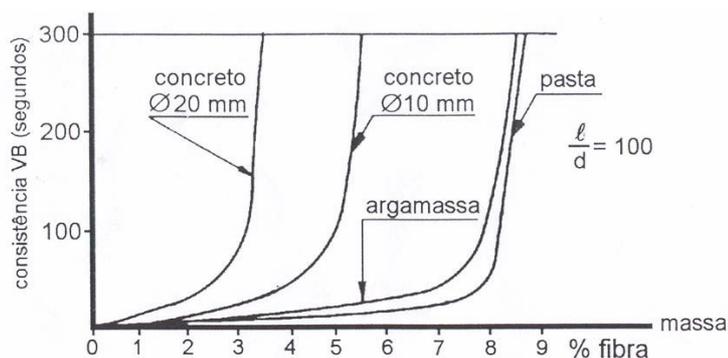


Gráfico 3 – Efeito da dimensão máxima do agregado e do teor de fibra na trabalhabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Tem que se atingir um equilíbrio ao selecionar a quantidade apropriada e a relação de aspecto das fibras, com papel importante na seleção das fibras e no projeto de misturas do concreto reforçado com fibras. Em geral a quantidade máxima de fibras de aço utilizadas é cerca de 2% em volume, com uma relação de aspecto máxima de 100. Contudo, o volume de 2% de fibras de aço já provoca uma acentuada perda de trabalhabilidade, principalmente quando se usam agregados maiores. De acordo com ACI 544.3R-93, agregados com dimensão máxima maior que 19 mm não são recomendados para concreto com fibras de aço.

Entretanto, a trabalhabilidade é afetada pela adição de fibras, em proporção direta à fração volumétrica das fibras utilizadas (BENTUR; MINDESS, 2007). Concretos reforçados com altos teores de fibras produzidos de forma convencional apresentam difícil dispersão das fibras, podendo-se observar o agrupamento de fibras e conseqüentemente a formação de novelos. Neste contexto, a produção de concretos fluidos reforçados com fibras propicia a combinação do desempenho mecânico fornecido pelas fibras com uma boa dispersão das mesmas, pela fluidez obtida nos concretos (VELASCO (2008); MARANGON (2006)).

Sendo assim, o uso do concreto fluido reforçado com adição de fibras de aço proporcionará novas possibilidades de aplicação, fazendo com que tal material seja mais eficiente, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

### 2.3.4. Teor de Ar Incorporado

O ar incorporado no concreto é definido como ar introduzido intencionalmente, por meio de um agente apropriado. Esse ar deve ser claramente distinguido do ar aprisionado acidentalmente. O ar incorporado produz cavidades descontínuas na pasta de cimento, de modo que não se formam canais para passagem de água e não aumenta a permeabilidade do concreto. Os vazios nunca são ocupados pelos produtos de hidratação, pois o gel só pode se formar na água (NEVILLE, 1997). Na matriz cimentícia, o ar incorporado corresponde aos vazios formados pela entrada de ar observada no seu interior.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) podem-se encontrar vazios preenchidos por ar dentro do concreto de duas formas: através de bolhas de ar incorporado ou através de vazios de ar aprisionado. As bolhas de ar incorporado possuem dimensões entre 100µm e 1mm de diâmetro, enquanto os vazios de ar aprisionado são maiores, ficando entre 1mm e 10 mm. Os vazios de ar aprisionado, que na maioria das vezes são causados por deficiência nas dosagens e escolha dos materiais, são nefastos à qualidade final do concreto.

A incorporação denominada natural, bem como a presença de vazios de ar incorporado advém de fatores como tipo e finura dos aglomerantes e agregados miúdos, dosagem dos materiais, tipo e grau de adensamento aplicado, temperatura e tempo de mistura do concreto. Já a incorporação através de aditivos se dá em casos especiais com os objetivos de redução do tamanho das macro-bolhas (vazios de ar aprisionado), aumento da trabalhabilidade do concreto, redução do consumo de cimento e melhoria da qualidade do concreto quanto a ação de gelo e degelo. Dentro de limites aceitáveis, para incorporações de até 6% através de aditivos, a cada incremento da incorporação de ar em 1% pode-se permitir a redução da água da mistura em até 3% e a percentagem de areia em até 1% levando a melhorias na resistência à compressão simples do concreto. (REALMIX, 2010).

Na maioria dos concretos reforçados com fibras, o teor de ar incorporado é maior quando comparadas com argamassas sem adição de fibras. O fenômeno de incorporação de ar é ocasionado, principalmente, pelo processo de mistura mecânica que introduz ar no concreto, sendo o mesmo processo favorável à remoção deste ar incorporado na medida em que ele promove a fusão de pequenas bolhas formando bolhas maiores que apresentam tendência à

flutuação sendo, então, carregadas para a superfície da argamassa onde se rompem (MANSUR et al. 2006).

O teor de ar incorporado nos concretos, apesar de favorecer a sua trabalhabilidade, atua de forma desfavorável em relação às resistências mecânicas. Mehta e Monteiro (2008) observaram que o nível da perda de resistência como resultado do ar incorporado não depende apenas da relação água-cimento da mistura do concreto, mas também do consumo de cimento, conforme apresentado no Gráfico 4. Em suma, como uma primeira aproximação, a perda de resistência devida à incorporação de ar pode estar relacionada ao nível geral da resistência do concreto. Mas, a uma dada relação água-cimento ou consumo de cimento, o ar incorporado normalmente reduz a resistência do concreto. Para uns consumos baixos de cimento, na verdade, o ar incorporado pode aumentar a resistência.

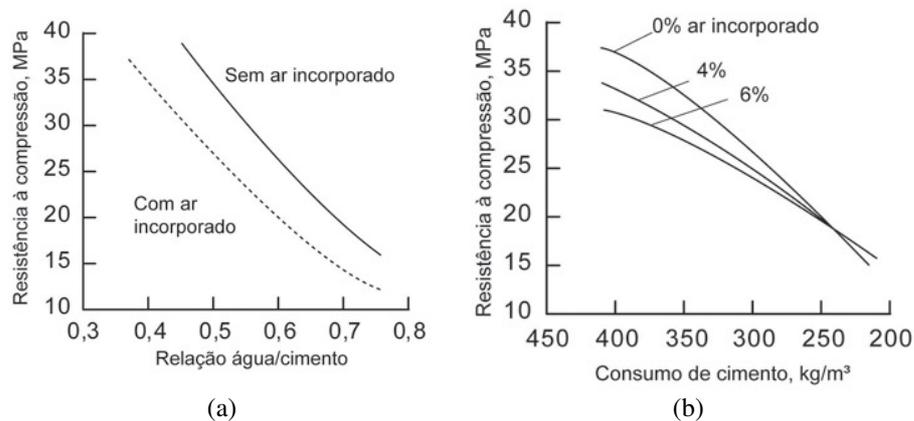


Gráfico 4 – Influência da relação água/cimento, ar incorporado e consumo de cimento na resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Santana (2008), o ar incorporado substitui parte do agregado miúdo com as seguintes vantagens: possui melhor coeficiente de forma, é elástico e movimenta-se sem atrito, diminuem a porcentagem de vazios acidentais e irregulares, aumenta a coesão, diminui a exsudação, impede a sedimentação e obtura a passagem de água, diminuindo os vazios capilares. A desvantagem do ar incorporado é que, se com o aumento do seu teor não houver uma redução do consumo de água no concreto, a resistência mecânica do mesmo diminui proporcionalmente.

Existem dois métodos normalizados de se quantificar o teor de ar incorporado no concreto, sendo um gravimétrico, especificado pela NBR 9833: 2008 - Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico, e outro pressométrico, normalizado pela NBR NM 47: 2002 – Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. A desvantagem da utilização do método pressométrico é a necessidade do aparelho medidor de ar incorporado, enquanto que no método gravimétrico a desvantagem está em ter de se usar o valor da massa específica teórica, totalmente compactada, como parâmetro para o cálculo do teor de ar incorporado. No entanto, o preparo do concreto deve ser criterioso, pois a forma de mistura e manuseio interfere de maneira significativa no resultado dos ensaios.

Segundo a Realmix (2010), os concretos convencionais contêm no seu interior, mesmo sem o uso de aditivos incorporadores de ar, 1 a 3% do seu volume em ar aprisionado, devido ao processo de mistura e a sua consistência. Já nos casos de concretos produzidos em centrais e transportados por caminhões betoneira este percentual pode chegar à ordem de 4%. A aplicação de aditivos incorporadores de ar ao concreto torna possível transformar as macro-bolhas incorporadas na mistura em micro-bolhas, além de elevar o teor de ar no concreto. Nestes casos as bolhas geradas são pequenas, em torno de 0,2 mm, e podem contribuir muito para a trabalhabilidade do concreto, sem necessariamente trazer reduções de resistências.

Em um estudo realizado por Yazici et al. (2007), observou que a adição de fibras de aço na matriz cimentícia, a medida que aumenta o fator de forma e a fração volumétrica das mesmas, aumenta o peso unitário dos concretos. Consequentemente, acarretando um aumento no teor de ar incorporado na mistura. No entanto, Barros (2009) em seu estudo observou que a adição de 1% de fibras de aço no concreto não apresentou influência significativa no teor de ar incorporado do concreto, observando, portanto um decréscimo de 0,5% no teor de ar.

A incorporação de ar no concreto também é notada quando se utiliza aditivo plastificante no concreto. Giublin et al. (2006) em seu estudo sobre concreto com fibras de aço observou um aumento de 1,5% de ar incorporado no concreto obtido experimentalmente em laboratório, na aplicação de 0,6% de aditivo plastificante sobre a massa de cimento.

O teor de ar incorporado no concreto reforçado com fibras de aço é, portanto, um tema de extrema importância à sua qualidade final, já que estudos desenvolvidos para este assunto são pouquíssimos, não se tendo valores referenciais para as diversas propriedades do compósito.

O controle dos percentuais de ar no concreto fresco permite aferir as dosagens, as adições de aditivos e de fibras de aço e, como consequência, garantir a qualidade do material. Valores de ar acima dos previstos na dosagem do novo material compósito indicam que este poderá sofrer prejuízos mecânicos, como reduções de resistência à compressão e módulo de elasticidade, ou estéticos como a formação de macro-bolhas superficiais.

### **2.3.5. Resistência à Compressão**

A resistência à compressão é considerada, geralmente, a propriedade fundamental do concreto, embora em muitos casos, a durabilidade e a impermeabilidade possam ser mais importantes. Apesar disso, a resistência dá uma indicação geral da qualidade do concreto por estar diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento endurecida (NEVILLE, 1997).

A resistência de um material é definida como a capacidade para resistir à tensão sem se romper. Algumas vezes, a ruptura é identificada como o surgimento de fissuras. Entretanto, investigações microestruturais em concreto comum mostram que, diferentemente da maioria dos materiais estruturais, o concreto contém muitas fissuras finas antes mesmo de ser submetido a tensões externas. No concreto, portanto, a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura, sendo definida a tensão máxima que a amostra de concreto pode suportar. A resistência do concreto é em função do processo de hidratação do cimento, que é lento, e as especificações e os ensaios para a resistência se baseiam em corpos-de-prova curados sob condições padrão de temperatura e umidade para períodos de 28 dias, sendo o ensaio de resistência à compressão axial mais fácil de realizar em laboratórios e este é aceito universalmente como um índice geral da resistência do concreto. As resistências à tração e à flexão são da ordem de 10% a 15% da resistência a compressão, sendo o principal motivo dessa grande diferença entre a compressão e tração é atribuída à heterogênea e complexa microestrutura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Bentur e Mindess (2007) afirmam que a adição de fibras produz pequeno ou nenhum aumento na resistência à compressão do concreto. O objetivo da adição de fibras ao concreto não é

alterar a resistência à compressão do mesmo. O que se constante na literatura, é que na maioria das vezes a resistência à compressão não é muito alterada com a adição de fibras, podendo haver casos em que há um decréscimo no valor da resistência. Este decréscimo pode não ser devido à adição de fibras ao concreto e sim à adição de mais água para aumentar a trabalhabilidade do mesmo.

Foram documentados aumentos insignificantes na maior parte dos casos, mas em um estudo realizado por Williamson, 1974 apud ACI 544.4R-88, observou um acréscimo de 23% para um concreto com 2% de teor de fibras, no qual foram ensaiados corpos-de-prova cilíndricos de concreto com dimensão máxima do agregado de 19 mm e fibras com um fator de forma de 100. Para o caso de argamassas, o mesmo constatou um aumento imperceptível ou muito pequeno. Além disso, a presença de fibras não altera as características básicas da curva tensão-deformação, conforme observado por Fannella and Naaman (1985). Nesta curva, ocorre alteração na inclinação da porção descendente, apresentando-se menos abrupta em relação ao caso sem fibras, semelhante à resposta do concreto reforçado com fibras de aço, indicando que há um acréscimo considerável de tenacidade do material. O aumento da tenacidade em compressão, obtida pela adição de fibras, é benéfica para a prevenção de ruptura repentina e explosiva (ACI 544.4R-88, 1988).

Conclui-se, então, que o reforço das fibras impõe uma mudança significativa no comportamento pós-pico do material, tornando sua resposta muito mais suave, em termos da declividade do ramo descendente do diagrama tensão-deformação, e levando-o a atingir níveis de deformação específica maiores, até a ruptura. Portanto, tais informações podem ser comprovadas através do estudo experimental conduzido por Ezeldin e Balaguru (1992) apud Simões (1998), apresentada no Gráfico 5, com objetivo de verificar a influência das características do reforço de fibras no desempenho à compressão do concreto.

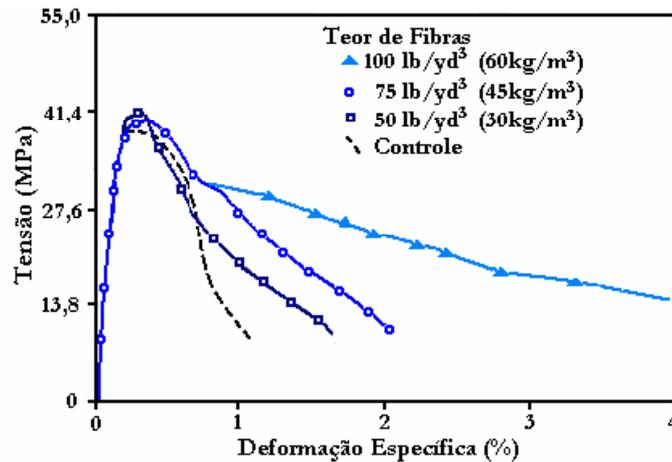


Gráfico 5 – Diagramas tensão-deformação na compressão uniaxial: comparação entre concretos sem e com diversos teores de fibras (adaptado de EZELDIN E BALAGURU, 1992, apud SIMÕES, 1998).

As fibras têm pequeno efeito sobre a resistência à compressão, aumentando ou diminuindo levemente o resultado do teste. Entretanto, segundo o ACI 544.4R-88, as fibras de aço com teores normalmente empregados (menos que 2%) não acrescentam melhoras na resistência à compressão do concreto, podendo até levar a uma pequena redução nesta propriedade, conforme apresentado no Gráfico 6.

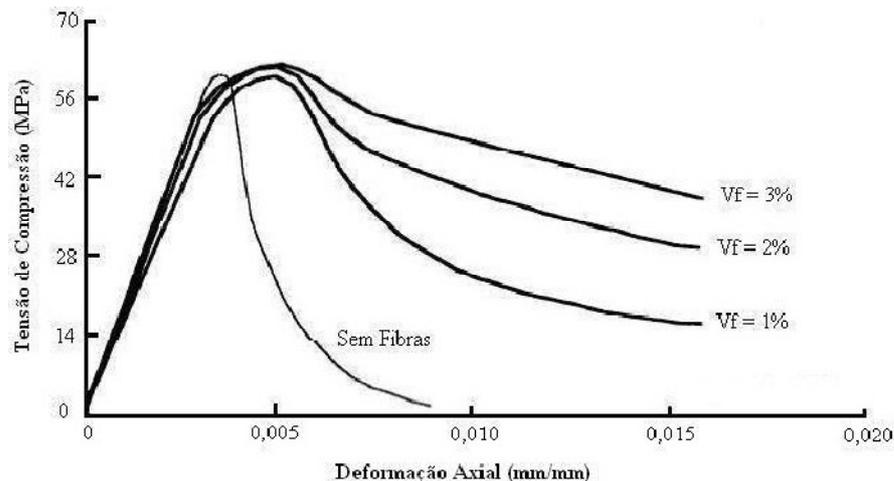


Gráfico 6 – Influência do teor de fibras no comportamento à compressão do concreto com fibras de aço (ACI 544.4R-88).

As fibras de aço no reforço do concreto não há uma tendência clara sobre a influência à resistência à compressão. Em estudos realizados por Barros (2009) e Chanh (2005) verificaram que as fibras de aço pouco influenciaram na resistência à compressão, havendo até um decréscimo na mesma.

No entanto, estudos mais recentes mostraram que a incorporação de fibras de aço na matriz cimentícia fluida influenciam no aumento da resistência à compressão. Velasco (2008) observou incrementos máximos de 31% na resistência à compressão axial em idade de 28 dias, em concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas, em 1%, 1,5%, 2% e 2,5%. Marangon (2006), também observou incrementos na resistência à compressão em concretos fluidos reforçados com fibras de aço com diferentes teores 1,0%, 1,5% e 2,0%, respectivamente aumentos na resistência em cerca de 3,2%, 1,6% e 12%.

Para a execução do ensaio à compressão, podem ser usadas normas comuns do concreto convencional, sendo que os corpos-de-prova cilíndricos devem ser moldados com vibração externa a fim de não influenciar a distribuição das fibras.

### **2.3.6. Resistência à Tração Direta e Indireta**

A adição de fibras a matrizes cimentícias conduz a um aumento na resistência do concreto à tração, em comparação com o concreto sem fibras, sendo que a ruptura dessas matrizes quando solicitadas a tensões de tração é bastante frágil e as deformações associadas são também relativamente baixas.

O comportamento a tração do concreto reforçado com fibras é fortemente influenciado pela presença das mesmas, especialmente na fase de pós-fissuração. Somente utilizando elevadas dosagens, sobretudo de microfibras (da ordem de 1,5% a 2% ou superiores em volume) podem ser obtidos incrementos relevantes. É o caso de concretos de alto desempenho e com elevadas dosagens de fibras curtas, no qual o comportamento chega ser de um tipo enrijecido (MACCAFERRI, 2009). Essa afirmação também é relatada por Dipsia (1987), na qual a resistência à tração não aumenta significativamente quando é utilizada fibras de aço inferior a

2% de fração volumétrica, exceto quando se utiliza microsíllica, dado que nestes casos a resistência da interface fibra-matriz aumenta, melhorando assim os mecanismos de reforço das fibras. Contudo, Narayana (1986) afirma que a resistência aumenta com a porcentagem, esbeltez e capacidade de fixação da fibra à matriz.

O ensaio de tração direta não é de fácil execução. Como se pode observar na Ilustração 8, é recomendado entalhar o corpo de prova de maneira a induzir a fissura.

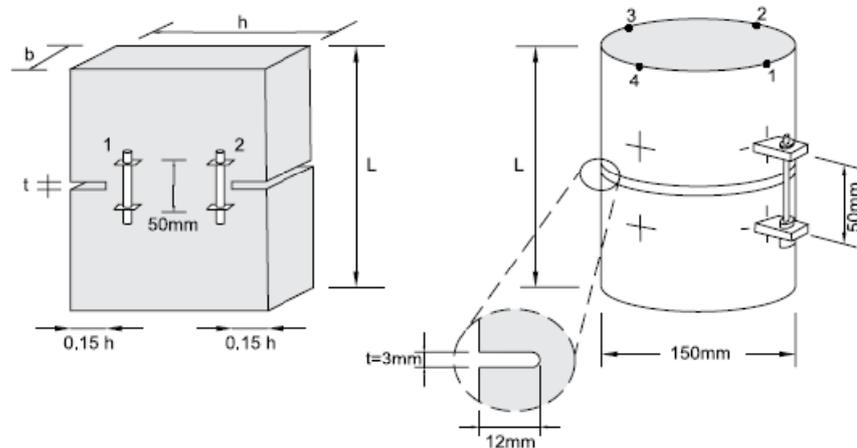


Ilustração 8 – Esquema gráfico de ensaio à tração pura para o concreto reforçado com fibras segundo a norma UNI U73041440 (MACCAFERRI, 2009).

Não existe nenhum ensaio padrão para determinar a curva tensão x deformação de concretos com fibras na tração direta. A curva depende do tamanho do espécime, método de ensaio, rigidez da máquina de ensaio, comprimento do espécime, e se única ou múltiplas fissuras ocorrem no espécime (ACI 544.4R-88). Na Itália está sendo aprovada a norma UNI U73041440 onde são fornecidas algumas indicações sobre as dimensões do corpo-de-prova, cilíndrico ou prismático e a profundidade do entalhe em relação ao qual se mede a abertura da fissura.

A tração direta também pode ser executada segundo o procedimentos do Furnas (1996). Para execução deste ensaio, as duas extremidades das amostras são mantidas fixas, na qual todas as peças que fornecem o sistema de rótulas são rosqueadas o suficiente para impedir qualquer rotação. O sistema é considerado único e firme, no entanto deve-se tomar cuidado com a

manutenção do alinhamento da amostra na montagem inicial do ensaio de maneira a evitar qualquer excentricidade. Este procedimento favorece a indução de esforço somente de tração direta durante o carregamento, principalmente no ramo pós-fissuração dos compósitos reforçados com fibras. Na Ilustração 9, é apresentada a execução do ensaio segundo Furnas.



Ilustração 9 – Ensaio de resistência à tração direta (FURNAS-COPPE), para amostras cilíndricas (VELASCO, 2008).

No estudo de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço Velasco (2008), verificou usando o método de ensaio mostrado na Ilustração 9, descrito em Furnas (1996), que a utilização de 1% e 1,5%, em volume, de fibras de aço não causou alterações nos valores de resistência à tração direta, quando comparados ao valor obtido para o concreto sem reforço de fibra. Somente o concreto reforçado com 2% de fibras de aço apresentou uma redução de 15% no valor de resistência à tração direta, em comparação com a matriz sem adição de fibras.

No Gráfico 7, pode-se observar curvas tensão x deformação de argamassas com fibras de aço com diferentes formas. É visto que a parte ascendente da curva, antes da fissuração, é semelhante à de argamassas sem fibras e a parte descendente depende do teor e geometria das fibras utilizadas.

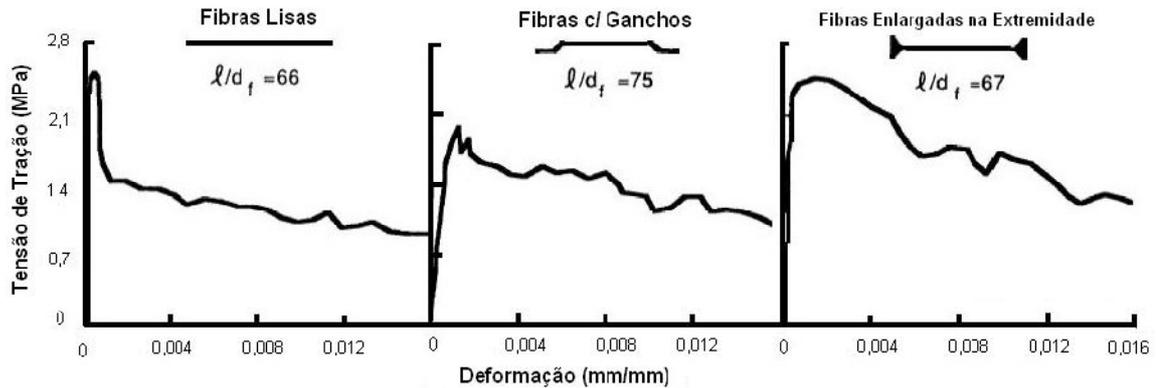


Gráfico 7 – Curvas tensão x deformação de argamassas com fibras (ACI 544.4R-88).

Além do volume de fibras e do fator de forma, existem outros parâmetros importantes que influem na resistência de tração dos compósitos, como a geometria da fibra, as características da ligação entre a fibra e a matriz de concreto e o processo de mistura adotado.

A adição de fibras no compósito promove um incremento nesta propriedade desde que sejam evitados o mau adensamento e a incorporação de ar, atribuindo aos concretos certa capacidade resistente mesmo após as primeiras fissuras e reduzindo a fissuração. Fibras alinhadas na direção das tensões de tração produzem maiores incrementos na resistência à tração direta. Um volume de 5% de fibras lisas e retas de aço orientadas na direção da tração pode acarretar um aumento nessa resistência de até 130%. Para uma distribuição aleatória das fibras, o aumento é mais moderado, atingindo valores em torno de 60% para um teor de 5% de fibras (BENTUR; MINDESS, 2007).

Resultados de ensaios de tração direta em corpos-de-prova prismáticos, realizados por Gopalaratnam e Shah (1987) apud Simões (1998), podem ser observados no Gráfico 8. Na resposta mecânica à tração, em termos do diagrama tensão-alongamento, exibida pelo concreto quando reforçado com fibras, são constatadas três etapas distintas, conforme analisado por Simões (1998). A primeira etapa é caracterizada por um comportamento linear, com módulo de elasticidade praticamente igual ao da matriz, e corresponde aos estágios de carregamento anteriores à fissuração. A segunda etapa pode ser descrita como um trecho de deformações não lineares que ocorre entre o surgimento da primeira fissura e a verificação da tensão de pico. Esse trecho, em geral, é muito curto, podendo, muitas vezes, ser imperceptível. A terceira e última etapa está relacionada à resistência pós-pico ou residual e, dependendo do teor de fibras na mistura, essa resistência pode ser da ordem de 40% ou mais

da resistência à tração. Com o aumento nas deformações, ocorre uma gradual diminuição na capacidade de carga do compósito. O aspecto linear verificado é explicado pela resistência friccional (atrito) ao arrancamento, oferecida pelas fibras. Assim como nos ensaios de compressão, também se observa um aumento da tenacidade para o caso de tração.

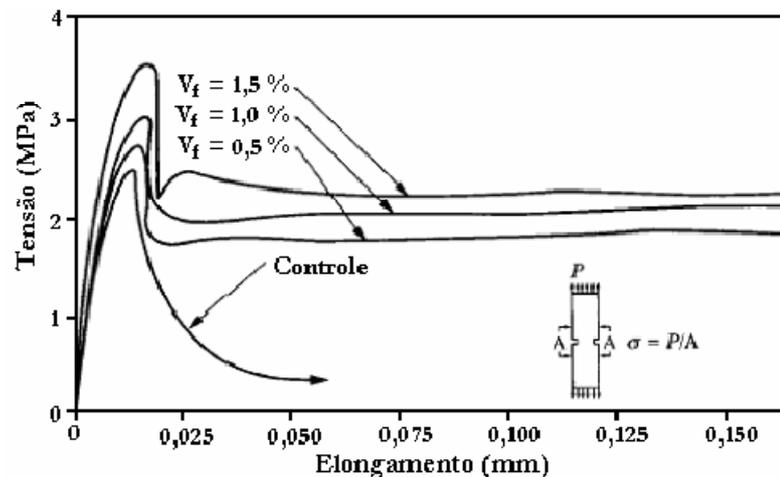


Gráfico 8 – Resposta tensão-alongamento na tração direta: comparação entre concreto não reforçado e reforçado com diversos teores de fibra (adaptado de GOPALARATNAM E SHAH, 1987, apud SIMÕES, 1998).

As dificuldades práticas para realizar o ensaio de tração direta levaram ao desenvolvimento de procedimentos alternativos, como por exemplo o ensaio de compressão diametral, também chamado de Ensaio Brasileiro.

O ensaio de compressão diametral é universalmente adotado, não apenas pelo seu método simples de execução, mas pelo desenvolvimento do método teórico, que permite transformar a carga de compressão aplicada ao longo de duas linhas axiais que são diametralmente oposta em resistência à tração do material. No entanto, essa teoria foi desenvolvida, em fins da década de 40 e aplicada de maneira muito competente pelo professor Lobo Carneiro no começo da década de 50, para materiais frágeis como o concreto.

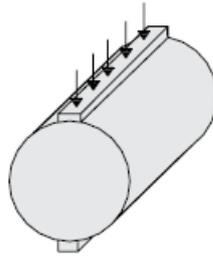


Ilustração 10 - Esquema de corpo de prova para ensaio de tração indireta, método brasileiro. (MACCAFERRI, 2009).

Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, um corpo de prova de concreto cilíndrico é submetido a uma força de compressão aplicada em uma região reduzida, ao longo de todo o seu comprimento (Ilustração 10). A tensão de compressão produz uma tensão de tração transversal, que é uniforme ao longo do diâmetro vertical. A ruptura ocorre quando é alcançada a máxima resistência à tração na direção ortogonal a força aplicada. A partir da carga máxima, obtém-se a resistência à tração indireta do concreto reforçado com fibras. Portanto, é possível estimar a resistência à tração direta a partir da indireta. Segundo Mehta e Monteiro (2008), comparado à tração direta, o ensaio de tração por compressão diametral é conhecido por superestimar a resistência à tração do concreto em 10 a 15%.

Quando submetido a tensões de tração, o concreto convencional rompe, repentinamente, no momento em que a deformação correspondente à sua resistência for superada. É observado, experimentalmente, que o concreto reforçado com fibras continua resistindo a cargas consideráveis, com deformação bastante superior às deformações do concreto convencional.

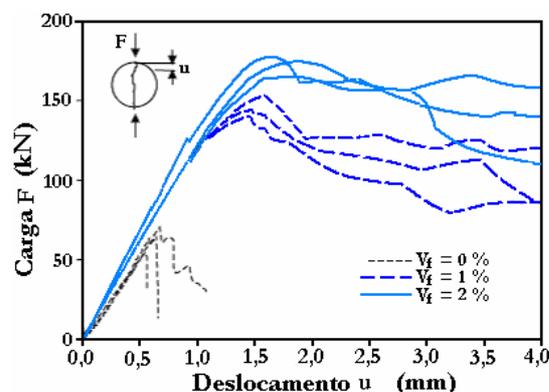


Gráfico 9 – Resultados de ensaio de compressão diametral para concreto com e sem adição de fibras (CUCCHIARA, 2004).

O Gráfico 9, apresentado por Cucchiara (2004) ilustra através de resultados de ensaios de compressão diametral que ocorre um aumento considerável de resistência à tração. Mais importante, no entanto, é que, observando os resultados obtidos, pode-se perceber o quanto a incorporação de fibras influencia no aumento da resistência à tração.

O aumento da resistência à tração provocada pela adição das fibras de aço é observado em dados experimentais de ensaios de compressão diametral em corpos-de-prova de concreto reforçado com fibras por diversos autores. Entre eles, podem ser citados, Nanni (1988), Sharma (1986), Cho e Kim (2003), Lim e Oh (1999), Nunes et al. (2006), Fugii et al. (2008) e Yazici (2007). Este último, em seu estudo na qual analisou o efeito do fator de forma e do volume das fibras de aço, concluiu que no ensaio da resistência à tração por compressão diametral o uso das fibras de aço no concreto obteve um aumento na resistência em torno de 11% a 54% em relação à mistura de controle sem reforço.

Em outro estudo, Garcez (2005) observou que o fator de forma das fibras de aço não provoca grandes variações na resistência à tração por compressão diametral dos compósitos, mas foi observado incrementos nesta propriedade quando os compósitos foi adicionado fibras em teores superiores a 45 kg/m<sup>3</sup>.

O motivo para alguns autores afirmarem que não ocorre aumento na resistência à tração de CRFA pode estar ligado à constatação de que, quando as fibras eram adicionadas à mistura, ocorria incorporação de ar, o que, associado a problemas de moldagem e de distribuição inadequada das fibras na massa, tendia a se refletir negativamente na resistência à tração do material (GARCEZ, 2005). Mais recentemente, com a evolução da tecnologia dos aditivos plastificantes e superplastificantes, está sendo possível obter misturas mais trabalháveis, com pouca incorporação de ar e melhor distribuição das fibras na massa. Desta forma, se confirmaria o efeito final positivo, em termos de acréscimo de resistência, da adição de fibras ao concreto.

### 2.3.7. Módulo de Elasticidade

As características elásticas de um material são uma medida de sua rigidez. Apesar do comportamento não-linear do concreto, é necessário estimar o módulo de elasticidade (relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional assumido) para se determinarem as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Segundo Neville (1997), como semelhança de muito outros materiais estruturais, o concreto é elástico até um certo limite. Um material é denominado perfeitamente elástico se as deformações aparecem ou desaparecem imediatamente com a aplicação ou remoção de tensões.

O módulo de elasticidade do concreto, diferentemente dos aços, varia em função das matérias primas utilizadas e de sua resistência mecânica. No entanto, o cimento hidratado não tem sempre a mesma estrutura, pois é formado por cristais de diferentes espécies. Além disso, a microestrutura da zona de transição (pasta-agregado) afeta o módulo de elasticidade. Como resultado é praticamente impossível se ter um único módulo para o composto cimentício.

Outro fator a ser considerado é que apesar do agregado e da pasta apresentarem comportamento elástico, o mesmo não acontece com o concreto. Isto estaria relacionado ao fato de que o concreto apresenta microfissuras mesmo antes do carregamento. Essas fissuras se localizam principalmente na zona de transição. Seu número e velocidade de propagação dependeriam das características das matérias primas e resistência do concreto. Portanto, na maioria dos estudos de concreto reforçado com fibras, as fibras simplesmente atuam como inclusões rígidas na matriz, sem produzir muito efeito na estabilidade dimensional do compósito.

De acordo com Tanesi e Agopyan (1997), o módulo de elasticidade da fibra é determinante no comportamento final do compósito. Das fibras mais utilizadas no reforço de matrizes cimentícias, discutidas no item 2.2.3, as fibras de aço, a aramida, o vidro e o carbono possuem módulo de elasticidade que podem ser considerados altos, enquanto que as fibras de nylon e polipropileno possuem módulo de elasticidade mais baixos.

Para se entender melhor este aspecto deve ser observado o Gráfico 10, na qual se representa esquematicamente o comportamento de uma matriz hipotética reforçada com dois tipos de fibras: uma de módulo de elasticidade alto e outra de módulo baixo, sendo todas de comportamento elástico perfeito. A curva de tensão x deformação da matriz está representada pela linha O-A, enquanto as linhas O-B e O-C representam o trabalho elástico das fibras de alto e baixo módulo respectivamente.

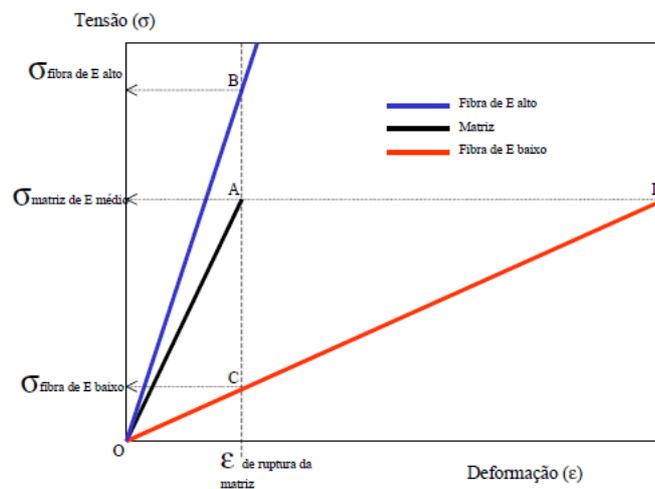


Gráfico 10 – Diagrama de Tensão x Deformação elástica (FIGUEIREDO, 2000).

No momento em que a matriz se rompe (ponto A) e transfere a tensão para a fibra de baixo módulo (ponto C), esta apresenta uma tensão muito baixa neste nível de deformação, necessitando ser deformada muito mais intensamente, até o ponto D, para garantir o mesmo nível de tensão, sendo esta a causa da instabilidade pós-pico de carregamento do compósito. Logo, para um dado carregamento, a fibra de baixo módulo não oferecerá uma boa capacidade de reforço após a fissuração da matriz, ou permitirá uma grande deformação do compósito, com uma conseqüente elevação no nível de fissuração, caso tenha resistência mecânica e ductibilidade suficiente para atingir o nível de tensão necessário (ponto D). Por outro lado, a fibra de alto módulo de elasticidade já apresentará um elevado nível de tensão no momento da ruptura da matriz, o que lhe permitirá atuar como um reforço já a partir do ponto B, caso sua resistência não seja superada.

Cabe lembrar que o módulo de elasticidade de um matriz cimentícia varia no tempo, especialmente nas primeiras idades. Em alguns casos, as fibras são empregadas justamente para elevar o módulo do compósito em idades baixas, para impedir que ocorra fissuração. É o caso do emprego de fibras em argamassas de revestimento. Entretanto, segundo Figueiredo (2000), os cimentos atuais, em conjunto com os aditivos aceleradores de pega e redutores de água, propiciam um elevado ganho de resistência inicial, e em paralelo, um rápido incremento do módulo de elasticidade.

Nunes et al. (2006) em seu trabalho foram estudadas quatro matrizes de concreto com resistência à compressão variando de 38 MPa a 75 MPa aos 28 dias. Também foi variada a dimensão máxima do agregado graúdo de 12,5mm e 19 mm. Essas matrizes foram adicionadas volumes variados de fibras de aço em 1,0%, 1,5% e 2,0%, e então estudados a influência das fibras de aço em diversas propriedades mecânica do concreto. Portanto, observou que a adição das fibras pouco influenciou o valor do módulo de elasticidade, que apresentou grande dispersão provavelmente devido à formação de novelos de fibras na mistura, deixando-as com mais vazios e, conseqüentemente, menos rígida. No trabalho realizado por Barros (2009), foi também observado que o módulo de elasticidade dos concretos estudados sofreu uma redução após a incorporação de 1% das fibras de aço comparado com o concreto sem reforço de fibras.

O comportamento de concretos reforçado com fibras de aço também foi analisado por Toledo Filho et al. (2008), notando que a boa dispersão das fibras de aço na matriz permitiu acréscimo no valor do módulo de elasticidade dos compósitos quando reforçado com 2% de fibras.

Portanto, vários autores têm realizado ensaios visando obter os diagramas tensão-deformação de compressão do compósito. Esses ensaios mostram quanto, em função das variáveis influenciadoras, no caso as fibras de aço, podem variar os diagramas, especialmente a tensão máxima, a deformação correspondente a essa tensão e o ramo descendente.

## 2.4. Influência das Fibras no Compósito

### 2.4.1. Preliminares

É amplamente conhecido que o concreto possui um bom desempenho quando submetido a tensões de compressão. Segundo a NBR 6118 (2003) – Projeto de Estruturas de Concreto, os concretos de resistência normal apresentam um  $f_{ck}$  superior a 10 MPa e inferior a 50 MPa, sendo os mais utilizados. Porém, seu uso está sendo gradualmente substituído pelos concretos de alta resistência, cujos valores de  $f_{ck}$  variam entre 50 e 150 MPa.

O bom comportamento da matriz cimentícia, entretanto, fica comprometido por sua limitada resistência à tração. O concreto normalmente contém muitas microfissuras na zona de transição entre a matriz e os agregados graúdos, e pouca energia são necessários para que ocorra o aumento destas fissuras. Quando o concreto é submetido à tração ou à flexão, a energia se concentra rapidamente nas extremidades das microfissuras existentes, provocando um crescimento incontrolado das mesmas e fazendo com que a ruína do material se apresente de forma frágil, como mostra a Ilustração 11.

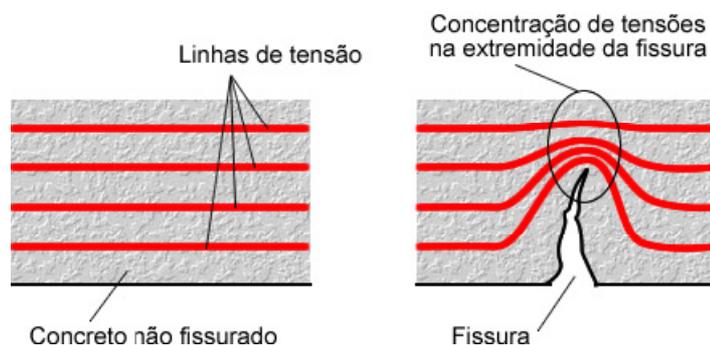


Ilustração 11 – Esquema da concentração de tensões para concreto sem reforço de fibras (BARROS, 2009).

No caso do concreto com adição de fibras, ocorre o retardamento no alargamento das fissuras. As fibras agem como pontes de ligação, transferindo as solicitações de um lado a outro da

matriz e minimizando as tensões nas extremidades das fissuras, conforme mostra na Ilustração 12.

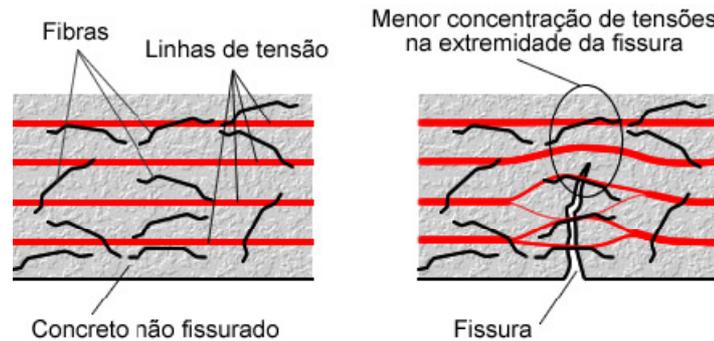


Ilustração 12 – Esquema da concentração de tensões para concreto com reforço de fibras (BARROS, 2009).

A eficiência das fibras em melhorar as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias frágeis depende da transferência de tensões da matriz para as fibras, ou seja, quanto maior a tensão de tração transferida para as fibras, maior a eficiência. Depende também da transposição das fissuras pelas fibras, nos estágios mais avançados do carregamento.

Para atuar com sucesso no mecanismo de ponte de transferência as fibras devem ter comprimento e volume adequados, e depende também da orientação das fibras e da resistência de aderência fibra-matriz.

#### 2.4.2. Fração Volumétrica ou Teor de Fibras

Por definição, as propriedades mecânicas do compósito dependem do teor de fibras que são incorporadas no material, visto que estas formam o componente estrutural. Em princípio, quanto maior o teor de fibras, melhor será o desempenho, pois maior será o número de fibras que interceptará cada microfissura, evitando assim a propagação das mesmas (GARCEZ, 2005).

As fibras passam a absorver partes das tensões internas, pois o carregamento imposto à matriz é transferido para as fibras, resultando na maioria dos casos, no aumento do módulo de elasticidade e da tensão máxima do compósito, devido ao aumento da contribuição de resistência mecânica da fibra nas propriedades mecânica do material compósito. É desta maneira que as fibras melhoram a eficiência no controle de fissuração da matriz.

No Gráfico 11, pode ser observado à influência dos teores de fibras. Quando utilizado baixos teores de fibras, ocorre principalmente mudanças no comportamento plástico e na tenacidade do compósito, expressos pelo alongamento da curva Tensão x Deformação, graças ao maior controle da abertura das fissuras no estágio pós-fissuração.

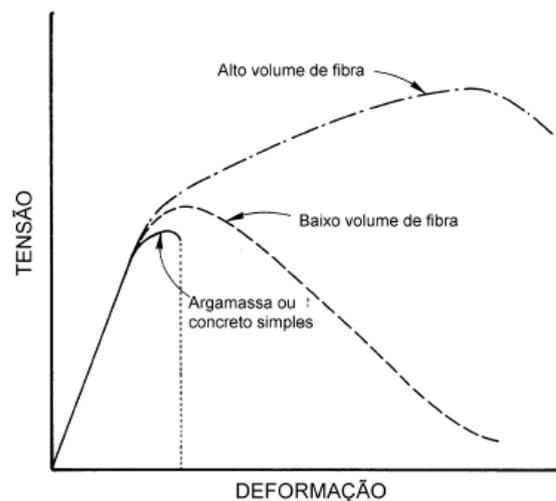


Gráfico 11 – Curvas típicas de Tensão de Tração x Deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras (BENTUR; MINDESS, 2007).

No estágio da pós-fissuração, a presença de fibras pode modificar o comportamento do material, pois o valor da resistência à tração pode passar a superar o encontrado na pré-fissuração da matriz cimentícia, como observado no Gráfico 11, para um alto volume de fibras.

O aumento da resistência à tração traz benefícios em termos estruturais, mas volumes muito altos de fibras podem comprometer a trabalhabilidade da mistura, dificultando assim o processo executivo. Um baixo volume de fibras aumenta o nível de tensão transferido da

matriz para cada fibra, levando mais rapidamente o rompimento da aderência fibra-matriz e o arrancamento das fibras. Portanto, para um bom aproveitamento do material deve-se buscar, sempre que possível, uma fração volumétrica que promova aumento de resistência à tração, e um bom nível de trabalhabilidade da mistura.

O tipo de fibra e sua fração volumétrica têm um efeito significativo nas propriedades do concreto reforçado com fibras. Segundo Mehta e Monteiro (2008), classificam os compósitos reforçados com fibras como uma função da fração volumétrica de fibra, como:

- a) As fibras com *baixa fração volumétrica*, menor que 1% de fibras incorporadas no concreto, são utilizadas para reduzir a fissuração por retração. São aplicadas em lajes e pavimentos com grande superfície exposta, que são peças estruturais com altos níveis de fissuração por retração. Para reduzir a fissuração por retração nas barras e malhas de aço, as fibras apresentam várias vantagens, como: apresentam distribuição de carga eficiente quando são distribuídas uniformemente em três dimensões; são menos sensíveis à corrosão do que as barras de aço; e podem reduzir o custo de mão-de-obra para lançamento das barras e malhas de aço.
- b) As fibras com *fração volumétrica moderada*, entre 1% e 2%, aumentam o módulo de ruptura, de tenacidade à fratura e de resistência ao impacto. São aplicadas nos concreto projetado e em estruturas que exigem capacidade de absorção de energia, maior capacidade de resistência à delaminação, lascamento e fadiga.
- c) As fibras com alta fração volumétrica, maior que 2%, levam ao endurecimento por deformação dos compósitos. São conhecidos por compósitos de alto desempenho reforçado com fibras, devido ao melhor desempenho.

Conforme Figueiredo (2000), a definição conceitual de volume crítico é a de que ele corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura da matriz. Ou seja, abaixo do volume crítico no momento em que haja a ruptura da matriz ocorre necessariamente uma queda na carga que o material tem capacidade de suportar. Acima do volume crítico, o compósito continua aceitando níveis de carregamentos crescentes mesmo após a ruptura da matriz. Este conceito se encontra ilustrado no Gráfico 12, onde se apresentam curvas de carga por deflexão em prismas de concretos com fibras rompidas à flexão. Existe um trecho elástico linear inicial correspondente ao estágio pré-fissurado da matriz do compósito e outro, similar a um patamar de escoamento, onde se

pode diferenciar o comportamento do concreto reforçado com teores abaixo, acima e igual ao volume crítico.

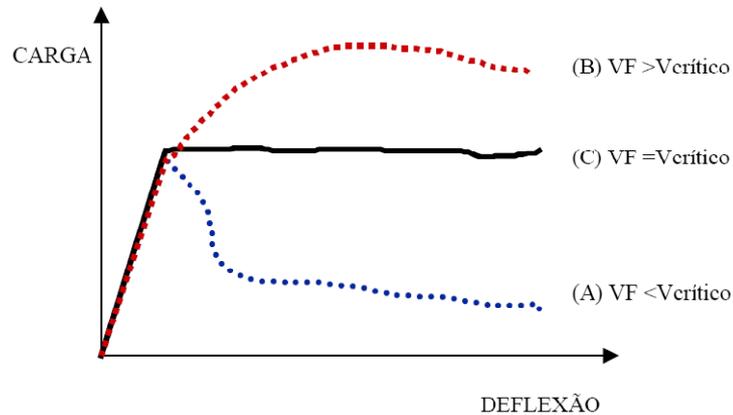


Gráfico 12 – Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão (FIGUEIREDO, 2000).

A determinação do volume crítico está associada à modelagem proposta por Aveston et al. (1971) apud Figueiredo (2000), a qual focaliza um compósito ideal, com fibras contínuas e alinhadas à direção do esforço principal. Este modelo não representa com precisão a realidade do material do concreto reforçado com fibras de aço, onde as fibras são descontínuas e distribuídas randomicamente. Para corrigir estes desvios são normalmente utilizados os chamados fatores de eficiência, que permitem uma maior aproximação do  $V_{fcrit}$  teórico e aquele obtido experimentalmente. Assim, o volume crítico é calculado através da Equação (1), associado ao efeito da orientação da fibra.

$$V_{f(crit)} = \frac{\varepsilon_{mu} E_c}{\sigma_{fu} \eta_1} \quad (1)$$

Onde:  $\varepsilon_{mu} \Rightarrow$  Deformação última de ruptura da matriz;

$E_c \Rightarrow$  Módulo de deformação elástica da matriz;

$\sigma_{fu} \Rightarrow$  Resistência à tração da fibra;

$\eta_1 \Rightarrow$  Fator de correção do volume crítico em função da orientação das fibras.

No caso particular do concreto reforçado com fibras de aço, adotam-se os seguintes valores de referência:  $\varepsilon_{mu} = 100 \times 10^{-6}$ ;  $E_c = 25000 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_{fu} = 1100 \text{ MPa}$ ;  $\eta_1 = 0,20$ , correspondente a fibras em 3 direções (HANNANT, 1978 apud FIGUEIREDO, 2000), obtém-se portanto um  $V_{f(crit)} = 1\%$ , valor semelhante ao indicado por Shah (1991 apud Pasa, 2007), para um volume crítico das fibras de aço em um concreto reforçado com fibras de aço.

De acordo com Bentur e Mindess (2007), o volume crítico percentual de fibras pode ser calculado pelas Equações (2) a (4), apresentados a seguir. Os autores salientam que as equações são indicadas para compósitos de fibras curtas, onde os valores da máxima tensão tangencial de atrito ( $\tau_{fu}$ ) variam entre 1 e 10 MPa.

$$V_{f(crit)} = \frac{\sigma_{mu}}{\tau_{fu}} \frac{1}{l/d}, \text{ para fibras alinhadas} \quad (2)$$

em uma direção.

$$V_{f(crit)} = \frac{\pi \sigma_{mu}}{2 \tau_{fu}} \frac{1}{l/d}, \text{ para fibras} \quad (3)$$

distribuídas em duas direções aleatórias.

$$V_{f(crit)} = 2 \frac{\sigma_{mu}}{\tau_{fu}} \frac{1}{l/d}, \text{ para fibras} \quad (4)$$

distribuídas em três direções aleatórias.

Onde:  $\sigma_{mu} \Rightarrow$  Resistência última da matriz à tração direta, na ausência de fibras.

$\tau_{fu} \Rightarrow$  Máxima Tensão tangencial de atrito.

$l/d \Rightarrow$  Relação de aspecto da fibra ou fator de forma.

Segundo Pasa (2007), adotando-se os seguintes valores de referência:  $\sigma_{mu} = 3 \text{ MPa}$ ,  $\tau_{fu} = 7 \text{ MPa}$  e  $l/d = 60$ , obtém-se um  $V_{f(crit)} = 1,4\%$ .

### 2.4.3. Fator de Forma ou Forma Geométrica

O fator de forma, ou relação de aspecto, é um dos principais parâmetros de caracterização de uma fibra. O mesmo é definido como a relação entre o comprimento da fibra e o diâmetro de

uma circunferência virtual, cuja área seria equivalente à seção transversal da fibra, como representado na Ilustração 13. Este índice é capaz de indicar a eficiência da fibra para melhorar a tenacidade do compósito.

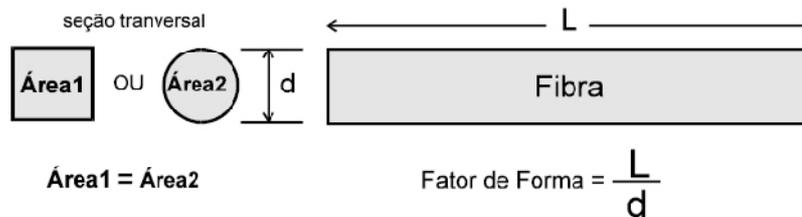


Ilustração 13 – Conceituação do fator de forma da fibra (NUNES; AGOPYAN, 1998).

Um aumento do fator de forma pode representar um aumento no comprimento da fibra ou um decréscimo no seu diâmetro equivalente. Segundo Mehta e Monteiro (2008), um maior fator de forma pode tanto significar uma melhora na resistência ao arrancamento da fibra, pelo aumento do comprimento de ancoragem, como um aumento ao número de fibras que podem interceptar uma fissura, decorrente da utilização de um número maior de fibras mais delgadas.

Segundo Chanh (2005), o melhor desempenho das fibras no concreto no estado endurecido, está diretamente relacionado com fibras de maior fator de forma, uma vez que essas melhoram a aderência fibra-matriz. Por outro lado, um maior fator de forma, afeta negativamente a trabalhabilidade da mistura fresca como pode ser observado no Gráfico 13. Chanh (2005) observa ainda que, na prática, é muito difícil obter uma mistura uniforme se o fator de forma das fibras for maior do que 100.

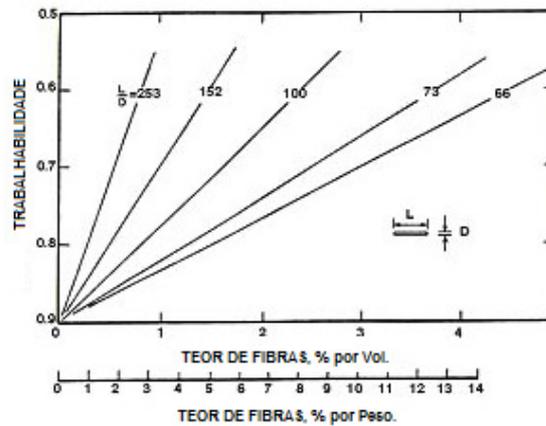


Gráfico 13 – Efeito do fator de forma das fibras na trabalhabilidade do concreto (HANNANT et al., 1974 apud CHANH, 2005).

Nunes e Agopyan (1998) analisaram a influência do fator de forma de fibras ancoradas na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço, e mostraram que para as fibras de mesmo comprimento, ocorre o aumento da tenacidade à flexão do CRFA com o aumento do fator de forma da fibra. Este fato justifica-se pelo maior número de fibras presentes por unidade de volume da matriz. Entretanto, os autores ressaltam que a influência do fator de forma das fibras ancoradas na tenacidade à flexão do CRFA existe, mas esta influência é menos significativa do que a influência do consumo de fibras na tenacidade.

Tendo em vista a importância do fator de forma no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço, a NBR 15530 (2007) procurou-se regular dois fatores primordiais: a geometria da fibra e a resistência do aço utilizado na fabricação da mesma. Na Tabela 3 se encontram apresentados o nível de resistência mínima do aço em função da classe da fibra, além da especificação do fator de forma mínimo, para cada uma das situações. Constata-se que a norma estabelece diferentes níveis de resistência em função do tipo e, principalmente, da classe de fibra avaliada.

Tabela 3 – Tipos e Classes de fibras de aço produzidas especificamente para uso em concreto (NBR 15530 (2007)).

<b>Classificação da fibra</b>	<b>Fator de forma mínimo</b>	<b>Limite de resistência à tração do aço (MPa)</b>
A I	40	1000
A II	30	500
C I	40	800
C II	30	500
C III	30	800
R I	40	1000
R II	30	500

O comprimento crítico é outro fator que influencia no comportamento do concreto reforçado com fibras. Figueiredo (2000) afirma que o comprimento crítico de uma fibra pode ser definido como aquele que, quando da ocorrência de uma fissuração perpendicular à fibra e posicionada na região média do seu comprimento proporciona uma tensão no seu centro igual à sua tensão de ruptura.

Na Ilustração 14 pode observar as possíveis distribuições de tensão na fibra em relação ao comprimento crítico. Portanto, o comprimento crítico está baseado no modelo que descreve a transferência de tensão entre a matriz e a fibra como aumentando linearmente dos extremos para o centro da fibra.

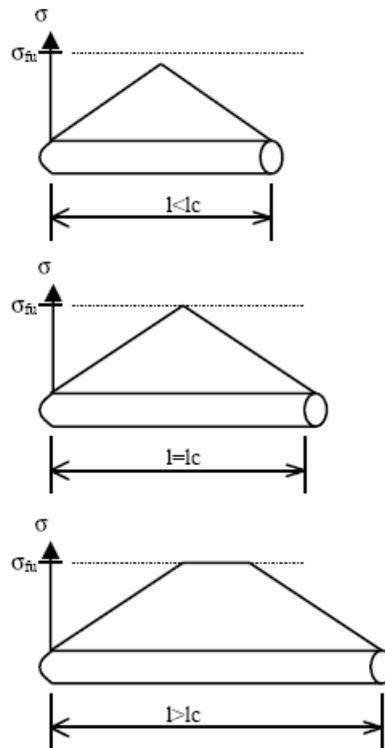


Ilustração 14 – Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico (BENTUR; MINDESS, 2007).

Quando a fibra tem um comprimento menor que o comprimento crítico ( $l < l_c$ ), a carga de arrancamento proporcionada pelo comprimento embutido na matriz não é suficiente para produzir uma tensão que supere a resistência da fibra. Nesta situação, com o aumento da deformação e conseqüentemente da abertura da fissura, a fibra que está atuando como ponte de transferência de tensões pela fissura será arrancada do lado que possuir menor comprimento embutido. Este é o caso normalmente encontrado para as fibras de aço no concreto de baixa e moderada resistência. Quando se tem um concreto de elevada resistência mecânica, melhora-se a condição de aderência entre a fibra e a matriz e, nestes casos, é possível ultrapassar o valor do comprimento crítico causando rupturas de algumas fibras. Quando o comprimento da fibra é maior que o comprimento crítico ( $l > l_c$ ), ocorre o travamento da fibra, impedindo seu arrancamento e ocasionando a elevação de tensão atuante na mesma até que seja alcançada a tensão de ruptura.

A máxima tenacidade do compósito é obtida quando o comprimento médio das fibras empregadas é igual ao comprimento crítico, isto é,  $l = l_c$ . Desta forma, a principal

contribuição destas fibras se dará no comportamento pós-fissuração da matriz, pois serão os responsáveis pela redução da propagação das fissuras e pelo aumento da tenacidade.

Assim, quanto mais direcionadas as fibras estiverem em relação ao sentido da tensão principal de tração, melhor será o desempenho do compósito. Recomenda-se a utilização de fibras cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto, ou seja, deve haver uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras de modo que estas interceptem com maior frequência a fissura que ocorre no compósito. Nas Ilustração 15 e Ilustração 16, é mostrado, respectivamente, as situações em que há compatibilidade dimensional entre as fibras e os agregados graúdos e a situação em que não há compatibilidade.

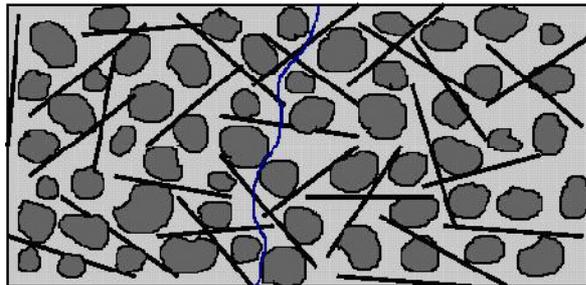


Ilustração 15 – Concreto com fibras onde há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).

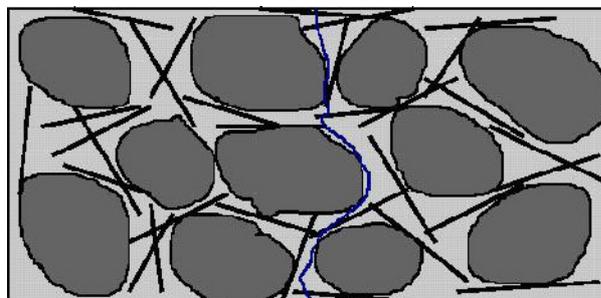


Ilustração 16 – Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000).

Percebe-se que, quando não há esta compatibilidade, poucas fibras trabalham como ponte de transferência de tensões na fissura. Duas alternativas são normalmente empregadas de maneira a otimizar a mistura de concreto com fibras: ou se reduz a dimensão máxima característica do agregado, ou se aumenta o comprimento da fibra.

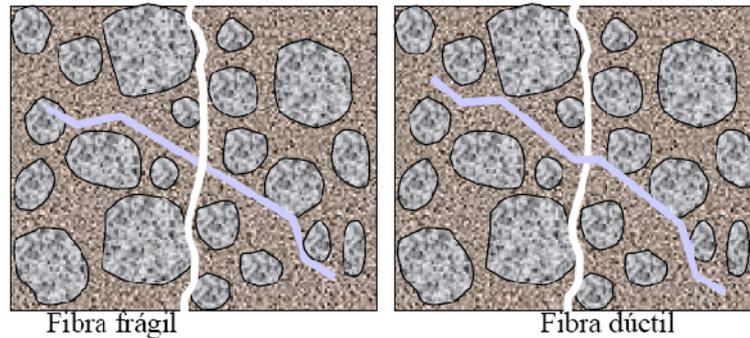


Ilustração 17 – Diferença de comportamento entre fibras dúcteis e frágeis quando inclinadas em relação à superfície de ruptura (FIGUEIREDO, 2000).

Ainda segundo Figueiredo (2000), a perda de eficiência da fibra inclinada em relação ao plano de ruptura pode ser ainda maior para o conjunto caso a mesma não apresente ductilidade suficiente. Isto ocorre pelo elevado nível de tensão de cisalhamento que a fibra é submetida nesta situação. Se ela não for capaz de se deformar plasticamente, de modo a se alinhar ao esforço principal, acaba rompendo-se por cisalhamento, conforme apresentada na Ilustração 17.

## 2.5. Aplicações do Concreto Reforçado com Fibras de Aço

De acordo com o ACI 544.1R-96, o concreto reforçado com fibras de aço quando usado em aplicações estruturais deve ser usadas junto com armaduras contínuas apropriadamente projetadas. As fibras de aço podem confinar a fissuração com segurança e melhorar a resistência à deterioração do material gerada por fadiga, impacto e retração ou carregamentos térmicos. Em aplicações em que a presença de armadura contínua não é essencial à segurança

e a integridade da estrutura, como pisos, pavimentos, camadas de revestimento e revestimentos de concreto projetado, a melhora da resistência à flexão, resistência ao impacto, tenacidade e desempenho de fadiga associada às fibras pode ser usada para reduzir a espessura das seções, e melhorar o desempenho de ambos.

A aplicação do concreto reforçado com fibras, apesar de ainda não estar muito difundida no Brasil, já é amplamente utilizado em alguns países. Atualmente, as principais aplicações incluem na execução de pavimentos e lajes, revestimento de túneis, construção e reparos de rodovias, de barragens e de tabuleiros de pontes, pistas de pouso, pisos industriais, revestimento de canais, minas, túneis e galerias, e especialmente com uso de concreto projetado.



Ilustração 18 – Capa de Compressão e radier executado com concreto com fibras (DRAMIX, 2009).



Ilustração 19 – Tubos de Concreto (DRAMIX, 2009).

A aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em pavimentos é uma das principais aplicações no Brasil, ao lado do revestimento de túneis. Isto se deve a algumas vantagens tecnológicas do uso de fibras de aço em pavimentos, como o fato de se eliminar a etapa de colocação da armadura, o que reduz o tempo total de execução da obra, o número de operários, e ganho de espaço pelo não estocamento da armadura na obra. Além disso, as fibras também permitem o corte das juntas de dilatação sem a necessidade de barras de transferência pré-instaladas, reforçando as bordas das juntas minimizam o efeito de lascamento nessas regiões e não apresentam restrição quanto à mecanização da execução do pavimento (FIGUEIREDO, 2005).



Ilustração 20 – Pavimentação de Galpão Industrial e Posto de Combustível (DRAMIX, 2009).

Mas nem tudo é vantagem no uso das fibras, como a tecnologia para este concreto especial possui suas limitações e até desvantagens. Como se sabe que a fibra minimiza o quadro geral de fissuração, isto contribui para o empenamento do pavimento por retração diferencial, portanto a observação dos cuidados relativos à cura é fundamental. Algumas fibras ficam na superfície do concreto após o acabamento superficial do pavimento de concreto, ficando estas susceptíveis à corrosão, o que provocará o aparecimento de um certo número de pontos de ferrugem, prejudicando o aspecto estético do mesmo. Além disso, se houver algum problema que requeira demolição do pavimento, a exigência de energia para isso será muitas vezes maior, implicando o consumo de tempo muito maior do que aquele associado à armadura convencional.

Existem dois tipos de concretos utilizados para o revestimento de túneis em que as fibras tem um grande emprego: o concreto projetado e o concreto pré-moldado. A utilização das fibras no concreto projetado ocorre para revestimento de túneis urbanos, metroviários, de desvio e adução e interceptores de esgoto. Já o uso das fibras no concreto pré-moldado são utilizadas quando o sistema de escavação e revestimento de túneis é mecanizado e realizado por meio de tuneladora.



Ilustração 21 – Túneis com concreto projetado com fibras e Anéis segmentados para revestimento de túneis (DRAMIX, 2009).

Por fim, caso se considere que o custo de misturar, transportar e lançar o concreto não muda com a incorporação de fibras, a diferença do custo entre o concreto com fibras in loco e o concreto convencional não é grande. Também comparado ao concreto simples, já que a espessura das lajes de concreto com fibras projetadas para um dado carregamento pode ser substancialmente reduzida, a diferença total no primeiro custo pode se mostrar insignificante. Considerando-se a vida útil, portanto, o concreto com fibras apresentaria uma boa relação custo-benefício (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

## 2.6. Princípios Básicos de Micromecânica

### 2.6.1. Preliminares

Considerando as afirmações anteriores, define-se que o compósito estrutural é constituído por uma matriz (M), a qual é reforçada, em escala macroscópica, por um ou mais tipos de fibras (F). Os compósitos mais simples são normalmente reforçados por um único tipo de fibra, a qual via de regra é utilizada, por exemplo, na forma de cabos e filamentos unidirecionais, ou na forma de tecidos bidimensionais com fibras mutuamente perpendiculares entre si.

As propriedades elásticas dos materiais são características mecânicas essenciais para a análise de tensões e o projeto de componentes utilizado em diversos ramos da engenharia. Através das propriedades elásticas é possível relacionar as tensões mecânicas e as deformações que ocorrem em um material. Uma das principais vantagens da micromecânica é permitir o cálculo das propriedades efetivas de um compósito a partir das propriedades efetivas de seus constituintes, desde que as frações volumétricas dos mesmos sejam conhecidas.

No princípio da micromecânica, o volume total do material ( $V_T$ ) divide-se em três parcelas: o volume das fibras ( $V_F$ ), o volume da matriz ( $V_M$ ) e o volume de vazios ( $V_V$ ). O volume de vazios corresponde ao volume de ar incorporado da mistura que aparecem durante a cura do material. Matematicamente, pode-se escrever que:

$$V_T = V_F + V_M + V_V \quad (5)$$

Pode-se definir que as frações volumétricas são dadas por:

$$F_F = V_F/V_T ; F_M = V_M/V_T ; F_V = V_V/V_T \quad (6)$$

Combinando as Equações (5) e (6), tem-se:

$$F_F + F_M + F_V = 1 \quad (7)$$

Em compósitos de boa qualidade, a fração volumétrica dos vazios tem de ser necessariamente baixa. Já as frações volumétricas da matriz e das fibras são normalmente de grandeza próximas e valores superiores ao dos vazios. Então, quando se deseja fazer estimativas rápidas, e sabe que a fração volumétrica de vazios é baixa para poder ser desprezada, pode-se aproximar a Equação (7), para:

$$V_F + V_M = 1 \quad (8)$$

Nas equações da micromecânica, as propriedades efetivas são estimadas em função das frações volumétricas dos constituintes. No caso experimental, o que se mede são os pesos ou as massas dos constituintes, e depois é calculado as frações dos mesmos. Conhecido os pesos ou as massas específicas (ou densidades) destes, pode-se obter os volumes dos constituintes.

Pode-se então afirmar que a massa total ( $m_T$ ) de um compósito é dada pela soma das massas de fibra ( $m_F$ ) e da matriz ( $m_M$ ), mas desprezando a massa de vazios, tem então:

$$m_T = m_F + m_M \quad (9)$$

Então, as frações em massa das fibras e da matriz, são obtidas por:

$$M_F = m_F/m_T \text{ e } M_M = m_M/m_T \quad (10)$$

Na produção de compósitos por impregnação manual, a determinação da massa das fibras deve ser antes do início da produção, e seu valor registrado. Ao final, após o componente estar pronto (ou curados, no caso dos corpos-de-prova), pesa-se o mesmo obtendo a massa total, e em seguida calcula a massa da matriz, usando a Equação (9). A partir destes três valores, calcula as frações em massa, e conhecendo as massas específicas ou densidades da fibra e matriz, é obtido as frações volumétricas de cada. A vantagem é que conhecendo a massa de fibra, é possível uma estimativa do massa da matriz, o que se podem evitar desperdícios.

### 2.6.2. Regra das Misturas

Para melhor entender a regra das misturas de um compósito, podemos considerar uma lâmina com reforço unidirecional sendo tracionada, por uma força  $F$  na direção das fibras (Ilustração 22).

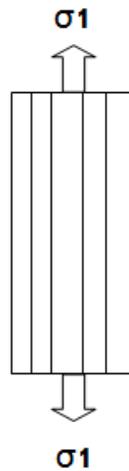


Ilustração 22 – Solicitações mecânicas paralelas às fibras.

A tensão normal ( $\sigma$ ) do compósito corresponde por uma força  $F$ , dividida pela área da seção transversal da lâmina. Os módulos de elasticidade e as frações volumétricas das fibras e da matriz da lâmina são, respectivamente,  $E_F$ ,  $V_F$ ,  $E_M$  e  $V_M$ . Caso a força  $F$  provoque uma tensão longitudinal, e as fibras e a matriz atuam de forma análoga a molas em paralelo, uma parcela da força solicitará as fibras ( $F_F$ ), e a outra parcela solicitará a matriz ( $F_M$ ). Então, pode aplicar a equação de equilíbrio de forças, obtendo-se:

$$F = F_F + F_M \quad (11)$$

Levando em consideração um corpo elástico, a força normal será o produto da tensão normal multiplicada pela área resistente, pode-se dizer então que:

$$\sigma_1 \cdot A = \sigma_F \cdot AF + \sigma_M \cdot AM \quad (12)$$

Sendo A a área total seção, AF a parcela da área relativa às fibras, AM a área relativa à matriz, e  $\sigma_F$  e  $\sigma_M$  são a tensão normal da fibra e da matriz, podendo ainda ser descrita como:

$$\sigma_1 = \sigma_F \cdot (AF/A) + \sigma_M \cdot (AM/A) \quad (13)$$

Quando os comprimentos da fibra, da matriz e da lâmina são idênticos, as relações (AF/A) e (AM/AF) se forem multiplicadas por um comprimento (L) no numerador e denominador, são encontradas as frações volumétricas das fibras e da matriz. Neste caso, a Equação (13), transforma-se em:

$$\sigma_1 = \sigma_F \cdot V_F + \sigma_M \cdot V_M \quad (14)$$

De acordo com a Lei de Hooke,  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , substituindo na equação acima, obtém-se:

$$E_1 \cdot \varepsilon_1 = E_F \cdot \varepsilon_F \cdot V_F + E_M \cdot \varepsilon_M \cdot V_M \quad (15)$$

Como a deformação da lâmina, da matriz e das fibras são idênticas, pode-se dizer que:

$$E_1 = E_F \cdot V_F + E_M \cdot V_M \quad (16)$$

Portanto, a Equação (16) é considerada como a Regra das Misturas, e permite que estime o módulo de elasticidade, a partir dos módulos de elasticidade e das frações volumétricas das fibras e da matriz. Considerando a equação  $V_F + V_M = 1$ , e substituindo na Equação (16), tem-se:

$$E_1 = E_F \cdot V_F + E_M \cdot (1 - V_F) \quad (17)$$

Analisando a Equação (17), o módulo de elasticidade na direção das fibras é uma função do primeiro grau, ou seja, o Módulo de Elasticidade do compósito cresce linearmente com o aumento da fração volumétrica das fibras.

Quando se solicita uma tensão na direção perpendicular as fibras Ilustração 23, há um alongamento na direção transversal imposto à lâmina.

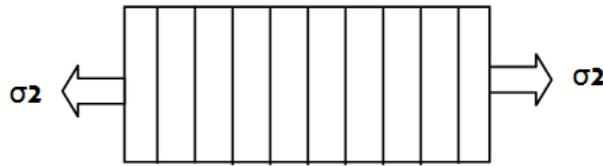


Ilustração 23 – Solicitações mecânicas perpendiculares às fibras.

Sendo portanto um  $AL_2$  igual à soma dos alongamento das fibras e da matriz, ou seja:

$$AL_2 = AL_F + AL_M \quad (18)$$

Este alongamento pode ser definido como o produto da deformação normal multiplicada pelo seu comprimento inicial, ou seja ( $AL = \varepsilon \cdot L$ ). Então, a partir do comprimento total da lâmina ( $L_2$ ), e dos comprimentos parciais da fibra e da matriz ( $L_{2F}$  e  $L_{2M}$ ), este alongamento pode ser descrito como:

$$\varepsilon_2 = (L_{2F} / L_2) \cdot \varepsilon_{2F} + (L_{2M} / L_2) \cdot \varepsilon_{2M} \quad (19)$$

Se a área da seção transversal da lâmina é constante, os quocientes ( $L_{2F} / L_2$ ) e ( $L_{2M} / L_2$ ) são iguais as frações volumétricas da fibra e da matriz. De acordo com a Lei de Hooke ( $\varepsilon = \sigma / E$ ), e considerando que a tensão normal aplicada é constante, obtém-se:

$$1/E_2 = (V_F/E_F) + (V_M/E_M) \quad (20)$$

$$\text{Ou: } E_2 = (E_F \cdot E_M) / (V_F \cdot E_M + V_M \cdot E_F) \quad (21)$$

Neste caso, há um aumento do módulo de elasticidade perpendicular as fibras,  $E_2$ , junto com a fração volumétrica das fibras,  $V_F$ , sendo portanto, um diagrama não-linear.

Além dos módulos de elasticidade,  $E_1$  e  $E_2$ , uma lâmina com reforço unidirecional apresenta dois coeficientes de Poisson. O maior deles,  $\nu_{12}$ , é referido quando a tensão normal é aplicada na direção paralela as fibras, e o menor deles,  $\nu_{21}$ , ocorre quando a tensão é perpendicular as fibras.

De acordo com Jones (1975) e Gibson (1994), a variação do coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ) com fração volumétrica de fibras é linear. Podendo ser escrita como:

$$\nu_{12} = V_F \cdot \nu_F + V_M \cdot \nu_M = V_F \cdot \nu_F + (1 - V_F) \cdot \nu_M \quad (22)$$

E o coeficiente de Poisson,  $\nu_{21}$ , é obtido pela equação:

$$E_1/E_2 = \nu_{12} / \nu_{21} \quad (23)$$

Portanto, apesar de simples, as equações da micromecânica para estimativas das propriedades efetivas são suficientemente precisas para o uso no projeto de componentes estruturais em compósitos.

Conclui-se então que as Propriedades de Materiais Compósitos Convencionais, pode ser avaliada pela Regra das Misturas, sendo portanto:

$$P = P_a \cdot V_a + P_b \cdot V_b \quad (24)$$

Onde:  $P$  é a propriedade do compósito;  $P_a$  é a propriedade do componente A;  $P_b$  é a propriedade do componente B; e  $V_a$  e  $V_b$  são as frações volumétricas dos componentes A e B.

## 2.7. Comentários Adicionais

Fazendo um resumo das principais abordagens encontradas na literatura, tratando especificamente do concreto reforçado com fibras de aço, tem-se a Tabela 4 mostrada a seguir. Pode-se perceber que os estudos desenvolvidos para o assunto são relativamente novos comparados com concretos usuais. A maioria dos trabalhos apresenta resultados qualitativos, faz com que não se tenha ainda valores quantitativos de consenso para as diversas propriedades características do material, principalmente no que se refere a concretos fluidos. Desta forma, justifica-se o aprofundamento dos estudos com foco em parâmetros que colaborem não só com o aperfeiçoamento do material em si, mas também com os métodos de análise e dimensionamento de elementos estruturais executados com o novo compósito,

permitindo que a aplicação dos concretos fluidos reforçados com fibras seja feita de forma otimizada e segura.

Tabela 4 - Resumo das principais considerações obtidas no referencial teórico.

Autores	Teor de Fibras	Fator Forma
Bentur e Mindess (2007)	<p>- A presença de fibras modifica o comportamento do material, e o valor da resistência a tração pode passar a superar o encontrado na pré-fissuração da matriz cimentícia.</p> <p>- Um volume de 5% de fibras lisas e retas de aço orientadas na direção da tração pode acarretar um aumento nessa resistência de até 130%.</p>	
Gopalaratnam e Shah (1987)	Dependendo do teor de fibras na mistura, a resistência a tração pode ser 40% maior.	
Weiler e Grosse (1996)		A geometria da fibra contribui na energia total absorvida pelo compósito, ou seja, suporta carregamentos maiores.
Mehta e Monteiro (2008)	A quantidade máxima de fibras de aço utilizadas é cerca de 2% em volume, com uma relação de aspecto máxima de 100, pois um volume alto de fibras provoca uma perda na trabalhabilidade.	Um maior fator de forma pode tanto significar uma melhora na resistência ao arrancamento da fibra, pelo aumento do comprimento de ancoragem, como um aumento na quantidade de fibras que podem interceptar uma fissura, decorrente da utilização de um número maior de fibras mais delgadas.
Williamson (1974)	Observou-se um acréscimo de 23% para um concreto com 2% de teor de fibras, para a resistência a compressão.	
ACI 544.4R-88	Aumentando os teores não acrescentam melhoras na resistência à compressão do concreto.	
Maccaferri (2008)	O comportamento à tração é fortemente influenciado pelo aumento do volume das fibras	
Cucchiara (2004)	Através de resultados de ensaios de compressão diametral ocorre um aumento considerável de resistência à tração.	
Ramakrishnan (1989)	Em teores que variaram de 0,5% a 2 %, conclui-se que a adição de fibras conduz a aumento na resistência à fissuração de 15% a 90%, e a aumento na resistência à flexão de 15% a 129%.	Verifica-se que fibras de aço deformadas nas extremidades têm uma contribuição mais efetiva do que as fibras lisas no melhoramento das resistências à tração e à compressão.
Balaguru e Shah (1992)	Concretos de resistência normal contendo fibras apresentam índices de tenacidade muito maiores que o concreto sem fibras.	
Nunes e Agopyan (1998)	A tenacidade do compósito será maior se houver um número maior de fibras por unidade volumétrica de matriz que provavelmente possam interceptar uma fissura e atuar como ponte.	Com o aumento do fator de forma da fibra ocorre um aumento na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço.

Figueiredo (2000)	Volume crítico corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura da matriz.	Comprimento Crítico é definido como aquele que, quando da ocorrência de uma fissuração perpendicular à fibra e posicionada na região média do seu comprimento proporciona uma tensão no seu centro igual à sua tensão de ruptura.
Barros (2009)	A adição de 1% de fibras de aço no concreto não influencia no teor de ar incorporado do concreto, ocorre até um decréscimo de 0,5% do teor de ar do concreto de referência sem fibras.	
Yazici et al. (2007)	Concretos reforçados com fibras de aço, na variação do teor em 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibras apresentam diminuição na trabalhabilidade e aumento no peso unitário, a medida que se aumenta os teores das fibras.	A resistência à compressão e à tração por compressão diametral dos concretos reforçados com fibras de aço é melhorada com aumentos do fator de forma das mesmas.
Toledo Filho et al. (2008)	A adição de 2,0% de fibras reduz a trabalhabilidade em cerca de 78% em relação ao concreto de referência sem fibras, mas as fibras permitem um acréscimo nos valores de resistência à compressão dos compósitos cerca de 31,5%.	

Baseado na literatura, as propriedades do concreto com fibras de aço depende de vários fatores, como: o teor de fibras adicionadas no concreto; as características geométricas das fibras; a orientação e distribuição das fibras dentro do concreto; o fator forma das fibras; a resistência da matriz de concreto e tensão de aderência entre as fibras e a matriz; e a relação entre dimensão máxima do agregado e comprimento da fibra. Com foco no teor de fibras e no fator de forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência dessas características no comportamento do compósito, sendo este não um concreto usual, mas um concreto fluido.

## **3. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1. Preliminares**

Como explicitado na Seção 1, a presente pesquisa tem por objetivo verificar o comportamento estrutural, com foco na resistência à tração por compressão diametral, de concretos fluidos reforçados com fibras de aço, buscando oferecer subsídios para a avaliação dos efeitos da incorporação destas fibras numa matriz cimentícia.

O referencial documental disponível, apresentado na Seção 2, forneceu a base teórica para a escolha dos parâmetros básicos que seriam variados para geração dos concretos reforçados com fibra de aço, bem como permitiu definir quais as estratégias para os ensaios adotados. Decidiu-se trabalhar com concretos reforçados com fibras de aço, submetidos a tensões de tração por compressão diametral, buscando coletar dados e utilizá-los para analisar a relação entre as resistências à tração e à compressão, e verificá-los a partir da regra das misturas dos compósitos mostrada no item 2.6.2.

Nesta seção são descritos os materiais, os equipamentos e o procedimento experimental para a determinação da influência das características físicas (fator de forma e fração volumétrica) das fibras de aço, em corpos-de-prova de concreto com resistência usual, bem como a discussão dos procedimentos de ensaios realizados nos concretos, nos estados fresco e endurecido. Além disso, a definição da dosagem é apresentada. Todos os concretos foram produzidos e ensaiados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

### 3.2. Variáveis de Estudo

Em relação às variáveis de estudo, decidiu-se, baseado na análise da literatura, que os principais fatores a investigar seriam:

- o fator de forma das fibras (relação comprimento/diâmetro) e,
- o teor de fibras incorporado no compósito.

Considera-se que estes são os fatores mais influentes na determinação do incremento de desempenho dos compósitos gerados, causados pela adição das fibras, quando submetidos a tensões de tração.

Nesta dissertação foram utilizadas fibras de aço, obtidas através do processo de trefilação a frio do aço, com resistência à tração em torno de 1000 MPa. Conforme classificação da NBR 15530 (2007) – Fibras de aço para concreto – Especificação, a fibra de aço usada neste estudo corresponde ao tipo denominado AI. Para a variação do fator de forma foram utilizados três tipos de fibras:

- a) as fibras curtas apresentam comprimento (l) de 25 mm e seção transversal circular com diâmetro (d) de 0,75 mm, resultando um fator de forma de 33 conforme Ilustração 24 (a);
- b) as fibras médias apresentam comprimento (l) de 30 mm e seção transversal circular com diâmetro (d) de 0,60 mm, resultando um fator de forma de 50 conforme Ilustração 24 (b);
- c) e as fibras longas apresentam comprimento (l) de 60 mm e seção transversal circular com diâmetro (d) de 0,75 mm, resultando um fator de forma de 80, conforme Ilustração 24 (c).

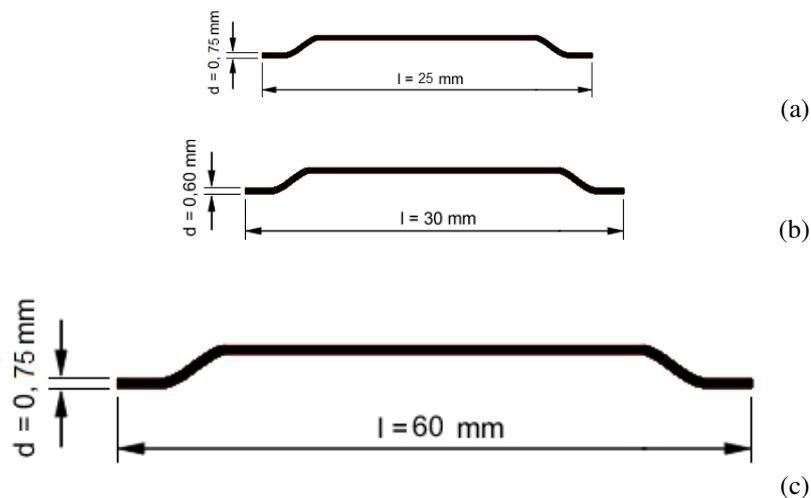


Ilustração 24 - Fibras de aço utilizada no estudo: (a) curta; (b) média; (c) longa.

O comprimento das fibras, como apresentando no item 2.4.2, devem ser, no mínimo, igual ao dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo, afim de evitar incompatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo, portanto foram utilizados agregados com dimensão máxima de 12,5 cm.

Em relação à geometria, as fibras apresentam ancoragem em gancho nas duas extremidades, na qual proporciona maior resistência aos esforços de tração devido a sua melhor aderência à matriz de concreto, quando comparada com fibras sem ancoragem, conforme pode ser observado em resultados de estudos de CRFA.

Para cada tipo de fibra foram estipulados três teores, na qual foi definida no decorrer desta pesquisa através de testes experimentais.

Todos as matrizes foram geradas utilizando um traço padrão, posteriormente apresentado na Tabela 14 do item 3.7.2, dosado para atingir uma resistência usual de 20 MPa.

### 3.3. Características dos Materiais

#### 3.3.1. Cimento

Os materiais aglomerantes utilizados foram um cimento Portland, do tipo composto CP II-F 32 e CP II-Z 32, de um mesmo lote de fabricação. As características físicas e químicas dos mesmos, de acordo com os fabricantes, se enquadram na NBR 11578: 1997 – Cimento Portland Composto.

### 3.3.2. Agregados

O agregado miúdo natural utilizado foi uma areia natural de rio, classificada como areia média, de acordo com a NBR 7211:2005 – Agregado para Concreto, cuja dimensão máxima característica é de 2,4 mm, utilizado somente este tipo de areia para a produção de todos os concretos desta pesquisa.

O agregado graúdo natural utilizado foi uma brita de origem granítica comercialmente conhecida como brita 1 ( $D_{max} = 12,5$  mm), típica da região, utilizada na produção do concreto convencional, do concreto de referência e dos concretos reforçado com fibras de aço.

A caracterização dos agregados foi realizada neste estudo desenvolvido no decorrer desta pesquisa.

Na Tabela 5 são apresentadas as características da areia e da brita utilizada.

Tabela 5 - Caracterização dos agregados.

Caracterização	Areia Média	Brita 12,5 mm
Massa Específica ( $g/cm^3$ )	2,611	2,685
Massa Unitária do Estado Solto ( $g/cm^3$ )	1,482	1,385
Massa Unitária do Estado Compactado ( $g/cm^3$ )	-	1,508
Módulo de Finura	2,424	-
Absorção (%)	0,644	0,625

As composições granulométricas dos agregados são apresentadas na Tabela 6 e no Gráfico 14 são traçadas as curvas granulométricas dos mesmos.

Tabela 6 - Composição granulométrica dos agregados.

Peneiras (mm)	Areia Média		Brita 12,5 mm	
	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada
12,5	0,35	0,35	-	-
9,57	6,4	6,75	-	-
6,3	45,1	51,85	-	-
4,76	21,7	73,55	-	-
2,38	17,75	91,3	3,95	3,95
1,19	2,9	94,2	10,1	14,05
0,59	1,7	95,9	27,8	41,85
0,29	1,5	97,4	43,3	85,15
0,14	1,3	98,7	12,25	97,4
Fundo	1,3	100	2,6	100
Total	100	-	100	-

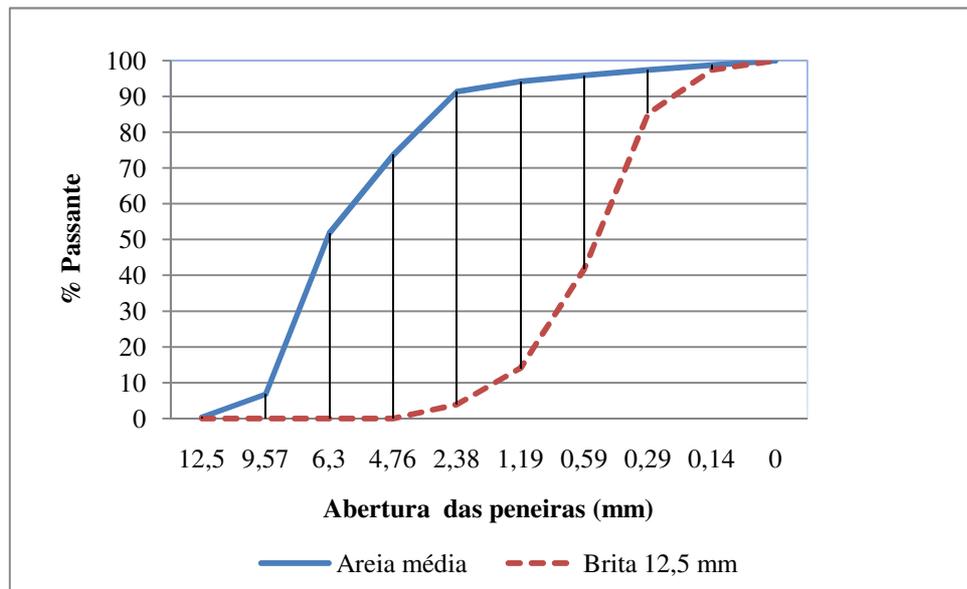


Gráfico 14 – Curvas granulométricas dos agregados.

### 3.3.3. Água

Na produção dos concretos foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água da Universidade Federal de Alagoas.

### 3.3.4. Aditivo

O aditivo utilizados neste estudo foi o aditivo plastificante, o qual foi usado na confecção dos concretos para promover trabalhabilidade à mistura, sem a necessidade de alteração da relação água/cimento. As propriedades dos aditivos plastificantes, fornecidas pelos fabricantes, encontram-se na Tabela 7. De acordo com informações dos fabricantes, a dosagem do plastificante deve ser no máximo até 1% da solução total do plastificante da quantidade de cimento. O procedimento de dosagem foi em relação à quantidade total da solução, seja, para os concretos final com dosagem igual a 3 kg/m<sup>3</sup> da solução total correspondem a 1,8 kg/m<sup>3</sup> de água e 1,2 kg/m<sup>3</sup> de sólidos.

Tabela 7 - Propriedades do aditivo plastificante segundo informações dos fabricantes.

<b>Fabricante</b>	<b>Aditivo 1</b>	<b>Aditivo 2</b>
Nome	Centrament N 3	Mastermix 390 N
Função principal	Plastificante de pega normal	Plastificante multifuncional
Base química	Lignosulfonatos	Lignosulfonatos
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,17	1,16 – 1,20
Teor de sólidos (%)	40	34 - 38
Estado Físico	Líquido	Líquido
Cor	Marrom	Castanho Escuro
pH	7,5 a 8,5	7 a 9

### 3.4. Ensaio no Estado Fresco

No estado fresco, os concretos foram avaliados segundo o ensaio de abatimento do tronco de cone, tendo dessa forma, um parâmetro de medida da trabalhabilidade.

Foram registrados também os teores de ar incorporado de todas as misturas de concreto produzidas nesta pesquisa, sendo possível avaliar a influência de variáveis, como, o tipo de adensamento, e a quantidade e o fator de forma de fibras de aço, na quantidade de ar da mistura fresca e comparação com o valor encontrado para um concreto de referência sem fibras.

#### **3.4.1. Abatimento do Tronco de Cone**

A consistência dos concretos foi determinada através do ensaio do abatimento do tronco de cone, segundo a NBR NM 67: 1998 - Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, como uma forma de medir a trabalhabilidade, conforme apresentado na Seção 2, no item 2.3.3. Na Ilustração 25 é apresentada a execução do ensaio.



Ilustração 25 – Execução do ensaio de abatimento.

#### **3.4.2. Teor de Ar Incorporado**

O teor de ar incorporado foi determinado em todos os concretos estudados conforme a NBR 9833: 2008 – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.

O recipiente do medidor foi preenchido segundo o abatimento do concreto, sendo preenchidos em três camadas e adensados manualmente com 25 golpes por camadas, ou preenchido em duas camadas, sendo cada uma delas adensadas por vibração. Após o adensamento, o concreto foi rasado e a superfície externa do recipiente foi limpa com um pano úmido. Então, foi pesado todo o conjunto, determinando a massa do concreto. Na Ilustração 26 é apresentada a execução do ensaio.



Ilustração 26 – Execução do ensaio de teor de ar.

A massa específica aparente do concreto fresco ( $\rho_{ap}$ ), expressa em  $\text{kg/m}^3$ , foi calculada dividindo a massa de concreto (subtração da massa do recipiente vazio da massa total obtida no ensaio), expressa em kg, pelo volume do recipiente, expressa em  $\text{dm}^3$ .

Seguindo as recomendações da norma, foi posteriormente calculado o rendimento, o consumo de cimento, o volume total dos componentes da betonada, chegando ao valor do índice de ar, sendo possivelmente calculado o teor de ar de cada mistura.

O teor de ar incorporado ao concreto fresco ( $A$ ), expressos em %, foi calculado através da seguinte expressão (25):

$$A = \left(1 - \frac{1}{I_a}\right) \times 100 \quad (25)$$

Onde  $I_a$  é o índice de ar presente na mistura.

### 3.5. Moldagem dos corpos-de-prova

Para cada concreto produzido, foram moldados 10 corpos-de-prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (10 x 20).

A moldagem dos corpos-de-prova de todos os concretos produzidos, o convencional, o de referência e os reforçados com fibras de aço, foram realizados com adensamento externo por mesa vibratória (Ilustração 27 (a)). Terminada a moldagem, os corpos-de-prova eram mantidos em temperatura ambiente por um tempo de 24 horas, até serem desmoldados.

Feita a desmoldagem, os corpos-de-prova foram levados à cura em tanque de imersão (Ilustração 27 (b)), onde permaneceram submersos até a data de ensaio, em 28 dias.



(a)



(b)

Ilustração 27 – (a) Moldagem e adensamento dos concretos por mesa vibratória; (b) Tanque de cura

### 3.6. Ensaio no Estado Endurecido

No estado endurecido os concretos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Todos os ensaios no estado endurecido foram realizados aos 28 dias de idade.

Apesar da influência das fibras atuarem no comportamento dos concretos na pós-fissuração, não foi possível captar este comportamento, e obter o diagrama tensão x deformação dos concretos após a fissuração, devido à máquina de ensaio, pois esta apresentara somente a tensão máxima de ruptura dos concretos.

### 3.6.1. Resistência à Compressão

No ensaio de resistência à compressão, para cada concreto estudado, foram utilizados 03 corpos-de-prova cilíndricos, de 10 cm x 20 cm, seguindo as recomendações da NBR 5739: 2007 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Os corpos-de-prova foram ensaiados na prensa AMSLER de 200 tf, conforme Ilustração 28.



Ilustração 28 – (a) Prensa AMSLER de 200 tf; (b) Execução do ensaio de resistência à compressão

### 3.6.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para a execução do ensaio de resistência à tração foram seguidas as recomendações da NBR 7222: 1994 – Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.

Para cada tipo de concreto, foram utilizados 03 corpos-de-prova cilíndricos, de 10 cm x 20 cm. Os corpos-de-prova foram ensaiados na prensa AMSLER de 200 tf, conforme Ilustração 29.



Ilustração 29 – Execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

### 3.6.3. Módulo de Elasticidade

Para cada tipo de concreto estudado, na determinação do módulo de elasticidade, foram utilizados 03 corpos-de-prova cilíndricos 10 x 20. Para a realização do ensaio foi usado equipamento digital que registrava as leituras dos carregamentos, impostos pela prensa através da célula de carga, e das respectivas deformações do concreto, através de extensômetros posicionados diametralmente opostos no corpo-de-prova. Na Ilustração 30 é apresentada a execução do ensaio.

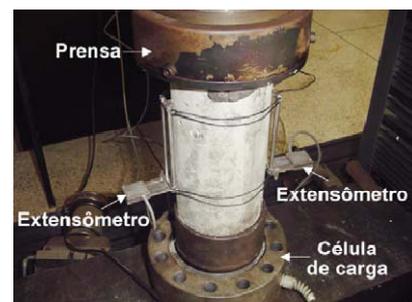


Ilustração 30 – Execução do ensaio do módulo de elasticidade: Equipamento de leitura digital e instrumentação do corpo-de-prova.

O procedimento para determinação do módulo de elasticidade seguiu as recomendações da NBR 8522: 2008 - Concreto. Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, sendo utilizada a Metodologia A (tensão  $\sigma_a$  fixa), conforme representação esquemática das etapas de carregamento apresentada no Gráfico 15.

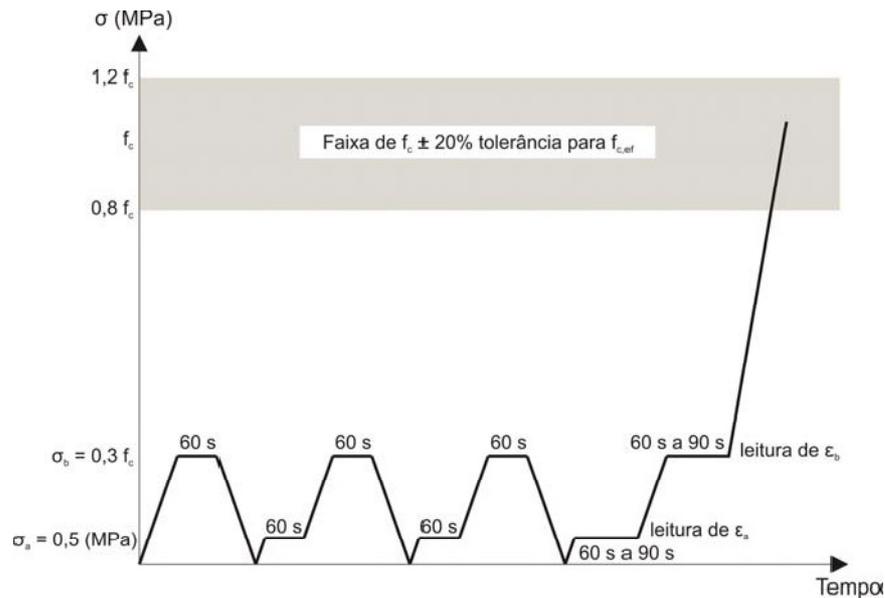


Gráfico 15 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A – Tensão  $\sigma_a$  fixa (Fonte: NBR 8522, 2008).

O valor de  $f_c$  foi determinado através da média dos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos. As etapas de carregamento foram comandadas manualmente pelo operador da prensa, onde, na última etapa, conforme é mostrado no Gráfico 15, os valores de  $\epsilon_a$  e  $\epsilon_b$  e seus respectivos valores de carregamento foram anotados para posterior determinação do módulo de elasticidade do concreto ( $E_{ci}$ ), em GPa, dado pela Equação (26).

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\sigma_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad (26)$$

Onde,  $\sigma_b$  é a tensão maior, em MPa, dada por  $\sigma_b = 0,3.f_c$ ;  $\epsilon_b$  é a deformação específica média dos corpos-de-prova sob a tensão maior; e  $\epsilon_a$  é a deformação específica média dos corpos-de-prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

As deformações específicas  $\varepsilon$  foram calculadas a partir da Equação (27).

$$\varepsilon = \frac{\text{valor da deformação registrado no equipamento}}{\text{valor da base do extensômetro}} \quad (27)$$

Para corpos-de-prova cilíndricos 10 x 20, o valor da base do extensômetro é de 100 mm, conforme especificação do fabricante do equipamento digital utilizado para realizar as leituras das cargas e deformações no ensaio do módulo de elasticidade.

Após as leituras de  $\varepsilon_a$  e  $\varepsilon_b$  e seus respectivos valores de carregamento, foram retiradas as instrumentações, e o corpo-de-prova foi carregado na mesma taxa de velocidade utilizada durante as etapas de carregamento, até que se produziu a ruptura, obtendo-se a resistência efetiva ( $f_{c,ef}$ ). Quando o valor de  $f_{c,ef}$  diferiu em mais de 20% do valor de  $f_c$ , os resultados do corpo-de-prova foram descartados.

## 3.7. Dosagem

### 3.7.1. Método de Dosagem

As dosagens dos concretos foram obtidas a partir do método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), conforme apresentada por Rodrigues (1998).

Porém, para que fosse possível viabilizar comparações entre os concretos, foram mantidas constantes a quantidade de cimento, de 400 kg/m<sup>3</sup>, e a relação a/c de 0,5. Além disso, foram utilizados os mesmos agregados empregados na produção de todos os concretos desse estudo (agregado miúdo com dimensão máxima de 2,4 mm e agregado graúdo de 12,5 mm), fixando também o consumo dos agregados.

Para o procedimento da definição das quantidades dos materiais componentes da mistura dos concretos, segundo o método ABCP, o proporcionamento agregado graúdo/miúdo é feito determinando-se o teor ótimo de agregado graúdo na mistura, em função da sua dimensão

máxima característica e do módulo de finura da areia, enquanto que o consumo de areia será função dos teores de pasta e agregado graúdo do concreto.

O consumo estimado de agregado graúdo ( $C_b$ ) é obtido diretamente da Tabela 8, onde fornece o volume compactado seco do agregado graúdo por metro cúbico de concreto ( $V_{comp}$ ), através do módulo de finura da areia (MF) e da dimensão máxima característica ( $D_{máx}$ ) do agregado graúdo. Conforme apresentado na Tabela 5 (item 3.3.2), o módulo de finura da areia é de 2,424, e a dimensão máxima do agregado graúdo utilizado é 12,5 mm.

Tabela 8 - Volume compactado seco ( $V_{comp}$ ) de agregado graúdo por m<sup>3</sup> de concreto.

MF	$D_{máx}$ (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Portanto, pela interpolação dos valores da Tabela 8, o volume compactado seco ( $V_{comp}$ ) vale 0,625. Desse modo, com a determinação  $V_{comp}$ , a determinação do consumo do agregado graúdo ( $C_b$ ) é feita pela Equação (28):

$$C_b = V_{comp} \times M_c \quad (28)$$

Onde  $V_{comp}$  e  $M_c$  são, respectivamente, o volume compactado por m<sup>3</sup> de concreto e a massa unitária compactada do agregado graúdo.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 5 (item 3.3.2), o valor de  $M_c$  da brita utilizada vale 1508 kg/m<sup>3</sup>. Assim, o  $C_b$  é igual a 942,5 kg/m<sup>3</sup>.

O volume de areia ( $V_m$ ) é determinado admitindo-se que o volume do concreto é formado pela soma dos volumes absolutos do cimento ( $V_c$ ), água ( $V_a$ ) e agregados ( $V_m - V_b$ ), conforme a Equação (29).

$$V_m = 1 - \left( \frac{C}{\rho_c} + \frac{C_b}{\rho_b} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad (29)$$

Onde,  $\rho_c$ ,  $\rho_b$  e  $\rho_a$  são, respectivamente, as massas específicas do cimento, agregado graúdo e água.

Como já foram definidos,  $C = 400 \text{ kg/m}^3$  e  $C_b = 942,5 \text{ kg/m}^3$ . Do mesmo modo,  $C_a$  é determinado pela relação a/c de 0,5 previamente fixada, ou seja,  $C_a = 200 \text{ kg/m}^3$ . As densidades  $\rho_c$ ,  $\rho_b$  e  $\rho_a$  valem respectivamente,  $3150 \text{ kg/m}^3$ ,  $2685 \text{ kg/m}^3$  e  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Assim, pela Equação (29),  $V_m$  vale 0,322.

O consumo da areia é expresso então pela Equação (30).

$$C_m = V_m \cdot \rho_m \quad (30)$$

Onde  $\rho_m$  é a massa específica da areia.

Então, sendo  $V_m$  igual a 0,322 e  $\rho_m$  igual a  $2611 \text{ kg/m}^3$ , o consumo de areia ( $C_m$ ) vale  $840,72 \text{ kg/m}^3$ .

Definidos o consumo dos quatro componentes básicos do concreto convencional, sendo composto apenas por cimento, areia, brita e água, a seguinte etapa será a definição do consumo dos constituintes que compõem os CREF-S/F e CRFA, definidos através de testes experimentes com base em trabalhos de diversos pesquisadores. Portanto, a definição da dosagem de aditivo plastificante nos CREF-S/F e CRFA, no sentido de promover maior trabalhabilidade à mistura, e da fração volumétrica das fibras de aço para os concretos reforçados com fibras é apresentada no item a seguir.

### 3.7.2. Definição da dosagem de fibras e do aditivo plastificante

A etapa de definição da quantidade de aditivo plastificante e da fração volumétrica de fibras de aço a ser adicionada nos CRFA foi realizada a partir de testes experimentais baseado em dosagens de trabalhos de diversos autores, conforme apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Dosagens de diversos pesquisadores.

Autores	Cimento [kg/m <sup>3</sup> ]	Água [kg/m <sup>3</sup> ]	Agregados [kg/m <sup>3</sup> ]		Aditivo [kg/m <sup>3</sup> ]	Fibras de aço [kg/m <sup>3</sup> ]
			Areia	Brita		
Barros (2009)	400	198,9	875	895	1,8	78,5
Sharma (1986)	483	235	655	980	-	68
Fugii et al (2008)	400	160	810	1080	-	10; 15; 10; 25; 30
Nunes; Agopyan (1998)	425	221	701,25	998,75	1,2	20; 40; 60
Figueiredo et. al (2006)	450	180	909	859,5	0,9	20
Yazici et al (2007)	438	159	773	907	10,95	39; 17; 117

Não sendo o objetivo deste trabalho a determinação das propriedades térmicas de um concreto contendo sílica ativa e cinza volante em substituição, em massa, do cimento Portland, reforçado com fibras de aço, conforme foi estudado por Toledo et al. (2008), sua dosagem foi tomada como base apenas para os valores quantitativos da massa das fibras de aço e do aditivo. A dosagem dos concretos deste estudo está apresentada na Tabela 10. A mistura MA0 refere-se ao concreto de referência, sem a incorporação de fibras. As misturas MA1 e MA2 referem-se aos concretos reforçados com frações volumétricas de 1,0% e 2,0%, respectivamente.

Tabela 10 – Proporcionamento dos materiais do estudo realizado por Toledo et al (2008).

Misturas	Cimento [kg/m <sup>3</sup> ]	Sílica [kg/m <sup>3</sup> ]	Cinza Volante [kg/m <sup>3</sup> ]	Volastonita [kg/m <sup>3</sup> ]	Água [l/m <sup>3</sup> ]	Agregados [kg/m <sup>3</sup> ]		Aditivo [l/m <sup>3</sup> ]	Fibras [kg/m <sup>3</sup> ]
						Areia	Brita		
MA0	245	35	70	145	175	850	850	2,8	-
MA1	245	35	70	145	175	850	850	5,25	78
MA2	245	35	70	145	175	850	850	5,25	156

Para os testes iniciais (TESTE-1, TESTE-2 e SÉRIE-1), foi utilizado o cimento do tipo CP II Z-32, o aditivo plastificante de pega normal Centrament N3, e fibras de aço, variando a fração volumétrica em 0,75 e 1,5% e seu fator de forma em 33, 50 e 80. A relação água/cimento foi igual a 0,5 para todos os concretos realizados na pesquisa, correspondendo a 400 kg/m<sup>3</sup> de cimento e 200 kg/m<sup>3</sup> de água, e quantidade dos agregados foi de 840,72 kg/m<sup>3</sup> para o agregado miúdo e 942,5 kg/m<sup>3</sup> para o agregado graúdo correspondendo também uma quantidade fixa durante toda a pesquisa.

Inicialmente, o primeiro teste foi realizado adicionando 2 kg/m<sup>3</sup> de aditivo plastificante, correspondente a 0,5% da relação da solução total de plastificante por cimento, a fim de verificar o aspecto de trabalhabilidade da mistura sem fibras, através do ensaio de abatimento do tronco de cone. O TESTE-1 obteve um resultado de abatimento de 2 cm, não apresentando trabalhabilidade desejável, pois o concreto sem fibras servirá de referência para o concreto reforçado com fibras de aço, sendo necessário partir de um concreto com consistência classificada como fluida, pois a medida que vai adicionando as fibras, diminuirá a sua trabalhabilidade. Em seguida, foi realizado o TESTE-2 com dosagem de 4 kg/m<sup>3</sup> de aditivo plastificante, correspondente a dosagem máxima permitida pelo fabricante igual 1% (plc/c), obtendo assim um resultado de abatimento igual a 19 cm, atendendo portanto as características desejada para um concreto fluido.

Porém, a partir do resultado de trabalhabilidade do TESTE-2, foi produzido um concreto de referência e seis concretos reforçados com fibras de aço, variando as fibras em duas frações volumétrica correspondendo a 0,75% e 1,5% (representadas por 1 e 2, respectivamente), e em três fatores de forma correspondente a 33, 50 e 80 (C = curta, M = média e L = longa). Na Tabela 11, é apresentada a dosagem da primeira série produzida.

Tabela 11 - Dosagens dos concretos CREF-S/F-S1 e dos CRFA-S1.

Concreto	Cimento [kg/m <sup>3</sup> ]	Água [kg/m <sup>3</sup> ]	Agregados [kg/m <sup>3</sup> ]		PLC [kg/m <sup>3</sup> ] (plc/c = 0,4%)	Fibras [kg/m <sup>3</sup> ]
			Areia	Brita		
CREF-S/F-S1	400	200	840,72	942,5	4,0	0
CRFA-C1-S1	400	200	840,72	942,5	4,0	59,15
CRFA-C2-S1	400	200	840,72	942,5	4,0	118,3
CRFA-M1-S1	400	200	840,72	942,5	4,0	59,15
CRFA-M2-S1	400	200	840,72	942,5	4,0	118,3
CRFA-L1-S1	400	200	840,72	942,5	4,0	59,15
CRFA-L2-S1	400	200	840,72	942,5	4,0	118,3

Para esta série, chamada de SÉRIE-1, foram realizados ensaios no estado fresco de abatimento no tronco de cone para medir a trabalhabilidade das misturas, e do teor de ar incorporado para avaliar a influência das fibras e do aditivo, sendo executados segundo a NBR 9833:2008, preenchendo o recipiente e adensados por vibração de imersão; e no estado endurecido os concretos foram moldados em corpos-de-prova cilíndricos de dimensão de 10 x 20 cm, desmoldados após 24 horas e levados à cura em tanque de imersão, onde permaneceram até a idade de ensaio de 28 dias, estes então foram submetidos à ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, a fim de avaliar as propriedades mecânicas dos concretos.

A Tabela 12 é apresentada os resultados dos testes dos ensaios no estado fresco.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios no estado fresco.

<b>Concreto</b>	<b>Abatimento (cm)</b>	<b>Teor de Ar Incorporado (%)</b>
CREF-S/F-S1	23	2,2
CRFA-C1-S1	21	2,6
CRFA-C2-S1	19	4,5
CRFA-M1-S1	19	4,1
CRFA-M2-S1	15	5,3
CRFA-L1-S1	17	3,1
CRFA-L2-S1	13	8,1

Os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone mostraram que a adição de 0,75% e 1,5% de fibras aço com o fator de forma crescente, reduziu a trabalhabilidade à medida que se adiciona fibras de aço a massa do concreto. Os resultados do ensaio de teor de ar incorporado na mistura indicam que a adição de fibras, com o aumento do teor e do fator de forma, faz com que o teor de ar incorporado aumente nos concretos, minimizando assim as propriedades mecânicas dos concretos.

Os resultados dos ensaios no estado endurecido de resistência à compressão e de tração por compressão diametral são apresentados no Tabela 13 e representados nos Gráfico 16 e Gráfico 17.

Tabela 13 – Propriedades mecânicas dos concretos da Série-1.

Concreto	Resistência dos Concretos (MPa)	
	Compressão	Tração Indireta
CREF-S/F-S1	14,79	2,57
CRFA-C1-S1	17,31	2,58
CRFA-C2-S1	14,84	2,10
CRFA-M1-S1	16,23	2,42
CRFA-M2-S1	14,21	2,83
CRFA-L1-S1	18,01	3,01
CRFA-L2-S1	21,91	4,23

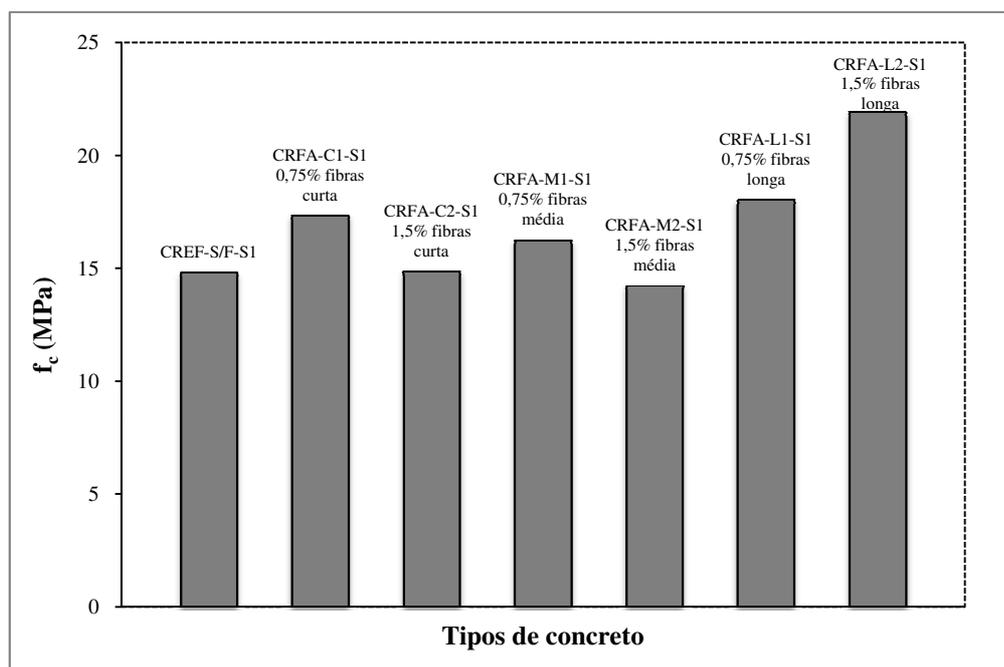


Gráfico 16 – Representação gráfica dos resultados de resistência média à compressão da SÉRIE-1.

A partir dos resultados de resistência média à compressão apresentados na Tabela 13 e representados no Gráfico 16, observa-se que os concretos alcançaram resistências máxima de até 21,9 MPa quando reforçados com teor de 1,5% de fibras longas, e apenas 14,8 MPa de resistência à compressão no concreto de referência sem fibras. Foi observado que devido à quantidade máxima de aditivo plastificante permitida pelo fabricante, igual a 1%, os concretos obtiveram um retardamento de pega, ocasionando assim um concreto poroso e bastante fraco, sem a devida hidratação dos grãos de cimento na mistura. Durante a realização dos ensaios no estado endurecido, foi observado que os corpos-de-prova expulsavam bastante água do seu interior. Pode ser observado na Ilustração 31 que o concreto apresenta estrutura bastante fraca

e um material esfarelado, e a expulsão da água do interior no corpo-de-prova durante a execução do ensaio no estado endurecido.



Ilustração 31 – Corpos-de-prova da SÉRIE-1.

Mesmo assim, nos resultados das resistências de compressão observa-se nos concretos reforçados com fibras curtas de aço um aumento de 17,09% para um teor de fibras igual a 0,75% e um pequeno acréscimo de 0,34% nos concretos com 1,5% de teor de fibras, comparado com o concreto de referência. Nos concretos com fibras médias, ocorreu um acréscimo para 0,75% de fibras e um decréscimo de resistência quando se adicionou mais fibras desse fator. Já nos concretos com fibras longas, obteve um acréscimo de 21,78% e de 48,16%, nos teores de 0,75% e 1,5%, respectivamente. O decréscimo da resistência à compressão pode ter sido devido ao teor de ar incorporado na mistura causado pela adição de aditivos plastificantes e de fibras de aço.

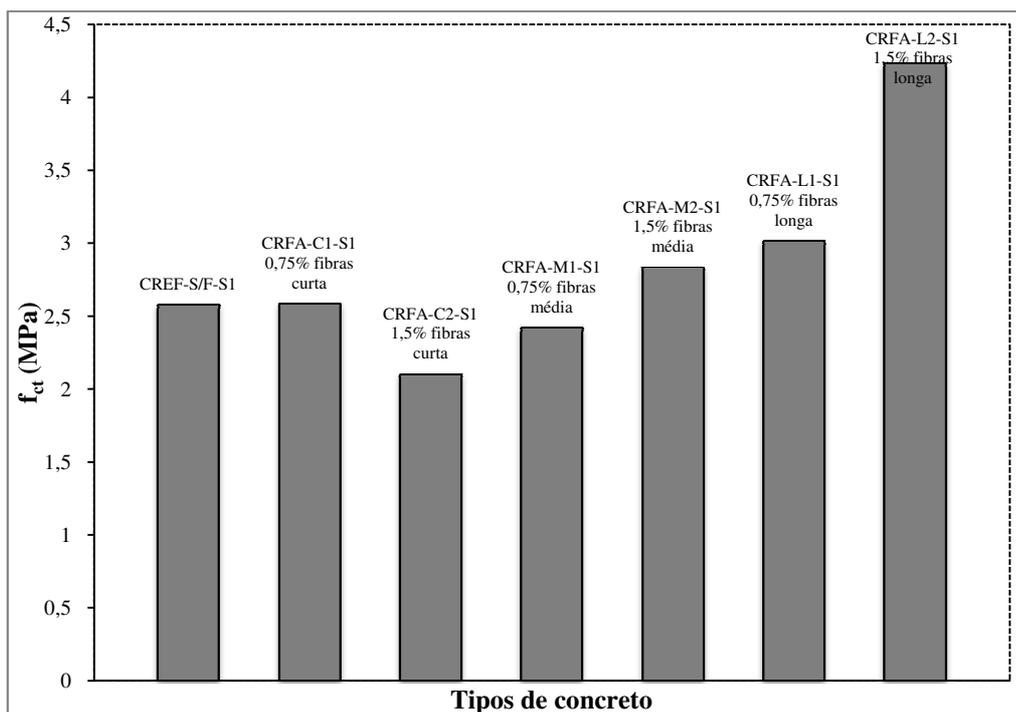


Gráfico 17 – Representação gráfica dos resultados de resistência média à tração indireta da SÉRIE-1.

No Gráfico 17, a representação gráfica a partir dos resultados de resistência média à tração por compressão diametral observa-se que nos concretos com fibras curtas um mínimo acréscimo de 0,31% para 0,75% de teor de fibras, e um decréscimo de 18,41% no concreto com 1,5% de teor. Nos concretos com fibras médias, foi observado um decréscimo de 6,14% e um acréscimo de 9,98%, com respectivamente 0,75% e 1,5% teor de fibras. Já nas adições de fibras longas, observa um aumento de 17,02% e 64,37% a medida que se adiciona as fibras. Sendo todos comparados com o concreto de referência sem fibras. As fibras de aço têm como objetivo principal aumentar a resistência à tração do concreto, que pode ter sido comprovado na maioria das misturas produzidas.

Como base nos resultados apresentados pela SÉRIE-1, realizou posteriormente mais testes, a fim de obter uma dosagem do concreto com melhor qualidade e resultados mais satisfatórios, sem a ocorrência do retardamento do tempo de pega e a obtenção de um concreto com melhor ductibilidade no seu interior.

Com a possível hipótese da incompatibilidade do aditivo plastificante de pega normal com a mistura, o TESTE-3 foi feita a alteração para o aditivo plastificante multifuncional, reduzindo-o também a dosagem para uma quantidade de 0,5% (solução total plc/c). Este teste

foi realizado para um concreto de referência sem fibras a fim de obter um concreto fluido, para posteriormente adicionar as fibras. O resultado do ensaio de abatimento do tronco de cone para verificar a trabalhabilidade foi insatisfatório, igual a 4,6 cm.

O TESTE-4 foi realizado com o aproveitamento da mistura do TESTE-3, sendo após o ensaio de abatimento, recolocado toda a mistura do concreto na betoneira e adicionado 1,5% de fibras médias. Após a adição das fibras, o concreto foi misturado para melhor distribuição das fibras, e posteriormente foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone obtendo resultado igual a 0 cm. Mesmo sem trabalhabilidade, foram moldados corpos-de-prova adensados por vibrador de imersão para verificar as propriedades mecânicas do concreto. Os ensaios dos concretos no estado endurecido foram realizados em idade de quatro dias, obtendo resistência média de compressão de 27,7 MPa e resistência média de tração por compressão diametral igual a 4,2 MPa. Os resultados das propriedades mecânicas deste concreto foram satisfatórios, mas a concreto continuou poroso e fraco (internamente “esfarelado”, com bastante areia), dando a possível continuidade dos testes.

O TESTE-5 foi realizado com base no teste anterior, aumentando o teor de aditivo plastificante para 0,75%, obtendo uma trabalhabilidade com abatimento igual a 5 cm. Sendo um concreto sem adição de fibras com trabalhabilidade pequena, foram moldados corpos-de-prova adensados manualmente a fim de verificar as propriedades mecânicas e a estrutura interna. Os ensaios dos concretos no estado endurecido foram realizados em idade de três dias, obtendo resistência média de compressão de 21 MPa e resistência média de tração por compressão diametral igual a 2,3 MPa. Mesmo com resultados satisfatórios, o concreto continuou fraco, continuando os testes.

A realização do TESTE-6 foi com base no teste anterior, adicionando 1,5% de fibras médias. Como esperado, houve diminuição da trabalhabilidade por causa das fibras, obtendo como resultado de abatimento igual a 0 cm. Mesmo assim, foram moldados corpos-de-prova adensados por vibração externa, e ensaiados após três dias. Os resultados do ensaio endurecido foram 19,6 MPa e 3,4 MPa, para compressão e tração indireta, respectivamente. Comparando-o com teste anterior, quando adiciona fibras, observa-se uma redução na resistência à compressão e um acréscimo na resistência à tração. Mesmo com boas resistências, os concretos continuam frágeis.

O TESTE-7 foi realizado com a diminuição do teor de fibras médias para 0,8%, continuando a dosagem do teste anterior, a fim de obter melhor trabalhabilidade. O abatimento do tronco de cone foi dado 0 cm, continuando sem trabalhabilidade. Mesmo reduzindo a quantidade de fibras, os resultados do ensaio endurecido foram bem próximos do TESTE-6 e continuando com a estrutura interna fraca.

Como os testes anteriores (TESTE-3 ao TESTE-7) não apresentaram trabalhabilidade, foi alterado o tipo do aditivo plastificante, retornando para o mesmo dos TESTES-1 e 2 e da SÉRIE-1, o plastificante Centrament N3 da MC-Bauchemie. Portanto, o TESTE-8 foi realizado com a mesma dosagem do TESTE-7, apenas com a alteração de fabricante do aditivo. A trabalhabilidade deu slump igual a 8 cm, considerada boa para um concreto com adição de fibras. Os resultados de resistência no ensaio endurecido com idade de 3 dias foram 12,3 MPa para e 2,1 MPa (compressão e tração indireta, respectivamente), mas estes continuaram fracos.

Após vários testes realizados, como por exemplo, o ensaio de tempo de pega, foi verificado uma incompatibilidade dos aditivos plastificante com o tipo do cimento CP II Z-32. Houve então a necessidade de mudar o tipo de cimento para o CP II F-32, reduzir a quantidade de 1% de plastificante para 0,75% (ou seja, de 4 kg/m<sup>3</sup> para 3 kg/m<sup>3</sup>), e também reduzir a fração volumétrica das fibras de 0,75% e 1,5% para 0,4% e 0,8%, pois com elevadas frações volumétricas implicaria na fluidez dos concretos, na qual o objetivo deste trabalho é a produção de concretos fluidos reforçados com fibras de aço, portando diminuindo a fração das fibras, não precisaria aumentar a quantidade de aditivo plastificante.

O último teste realizado foi o TESTE-9, realizado seguindo as alterações descrita acima, produzindo um concreto reforçado com 0,8% de fibras médias, resultando num slump de 7 cm. Os ensaios no estado endurecido foi realizado com idade de 7 dias, a fim de verificar apenas a sua estrutura interna. Os resultados de resistência média à compressão e à tração por compressão indireta foram registrados em 18,9 MPa e 2,3 MPa. Finalmente, foi observado que a estrutura interna encontrava adequada e mais resistente, sem esfrelamento.

Com isso, obtendo resultados satisfatórios e uma estrutura interna mais resistente após as modificações no TESTE-9, a dosagem do concreto de referência sem fibra e dos CRFA produzidos neste estudo foi definida conforme apresentada na Tabela 14, produzindo então o concreto convencional (CC), o concreto de referência sem fibras (CREF-S/F), e os concretos

reforçados com fibras de aço (CRFA), este último variando a fração volumétrica e o fator de forma, sendo um dos objetivos principais desse estudo.

Tabela 14 - Dosagens dos concretos CC, CREF-S/F e CRFA.

Concreto	Cimento [kg/m <sup>3</sup> ]	Água [kg/m <sup>3</sup> ]	Agregados [kg/m <sup>3</sup> ]		PLC [kg/m <sup>3</sup> ] (plc/c = 0,3%)	Fibras [kg/m <sup>3</sup> ]
			Areia	Brita		
CC	400	200	840,72	942,5	-	-
CREF-S/F	400	200	840,72	942,5	3,0	-
CRFA-C1	400	200	840,72	942,5	3,0	31,52
CRFA-C2	400	200	840,72	942,5	3,0	63,04
CRFA-M1	400	200	840,72	942,5	3,0	31,52
CRFA-M2	400	200	840,72	942,5	3,0	63,04
CRLA-L1	400	200	840,72	942,5	3,0	31,52
CRFA-L2	400	200	840,72	942,5	3,0	63,04

O concreto convencional é composto apenas pelos quatro componentes básicos (cimento, areia, brita e água). Foi incorporada aos concretos de referência e aos reforçados com fibras de aço uma dosagem de aditivo plastificante, de relação plastificante/cimento (plc/c) de 0,75%, no sentido de promover maior trabalhabilidade à mistura.

Por fim, nos concretos reforçados com fibras a dosagem das fibras correspondente a uma fração volumétrica de fibras de aço de 0,4% e 0,8%, ou seja, 31,52 e 63,04 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

### 3.8. Produção dos Concretos

Neste estudo foram produzidos oito concretos, onde, para viabilizar comparações futuras entre esses, mantiveram-se constantes o consumo de cimento e dos agregados, e a relação água/cimento dos mesmos. A manutenção da relação água/cimento foi estabelecida para que não houvesse outras influências sobre a resistência à compressão do compósito. Os concretos estudados foram os seguintes:

- Concreto convencional (CC);
- Concreto de referência sem fibras (CREF-S/F);
- Concreto reforçado com 0,4% de fibras curtas de aço (CRFA-C1);
- Concreto reforçado com 0,8% de fibras curtas de aço (CRFA-C2);
- Concreto reforçado com 0,4% de fibras médias de aço (CRFA-M1);
- Concreto reforçado com 0,8% de fibras médias de aço (CRFA-M2);
- Concreto reforçado com 0,4% de fibras longas de aço (CRFA-L1);
- Concreto reforçado com 0,8% de fibras longas de aço (CRFA-L2).

Neste trabalho, os concretos foram determinados com base no método de dosagem pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). O concreto convencional não foi utilizado aditivo nem fibras, sendo composto apenas de quatro componentes básicos (cimento, areia, brita e água). O concreto de referência sem fibras utilizou aditivo plastificante para promover a trabalhabilidade desejada, correspondente a uma consistência do concreto fresco classificada como fluida, conforme Tabela 15 apresentada por Andolfato (2002). Nos concretos reforçados com fibras de aço foram utilizados aditivo plastificante e fibras de aço, variando a fração volumétrica e o fator de forma das fibras. Deve-se ressaltar que o teor de plastificante foi mantido constante nas misturas.

Tabela 15 - Classificação das consistências dos concretos (ANDOLFATO, 2002).

<b>Consistência</b>	<b>Abatimento (cm)</b>
Seca	0 a 2
Firme	2 a 5
Média	5 a 12
Mole	12 a 18
Fluida	18 a 25

Para a produção dos concretos foi utilizado um misturador de eixo horizontal. Apesar deste tipo de misturador não ser adequado na produção de concretos fibrosos, foi utilizado devido à disponibilidade do laboratório. No entanto, observou uma boa dispersão das fibras na matriz cimentícia devido ao uso de aditivo plastificante.

Na produção dos concretos, a colocação dos materiais no misturador foi iniciada com os agregados, areia e brita, e a incorporação da água de absorção dos mesmos, sendo misturados por 30 segundos. Na sequência, o misturador teve seu movimento cessado para a colocação do cimento, e em seguida foram misturados por mais 30 segundos. Com a betoneira ainda em movimento, após os 30 segundos da etapa anterior, parte da água de amassamento foi adicionada (80% da relação a/c), onde foram misturados por mais 120 segundos. Porém, para o caso do concreto convencional (CC), toda a água de amassamento foi colocada nesse estágio, sendo essa a fase final de sua mistura. Nos demais concretos, CREF-S/F e CRFA, o processo de mistura continua com a colocação do aditivo plastificante juntamente com a parte da água de amassamento (20% da relação a/c), sendo misturados por 150 segundos. Por fim, nos concretos reforçados com fibras, após os 150 segundos do passo anterior, foram incorporadas as fibras de aço ao concreto e misturadas por mais 90 segundos.

Na Tabela 16 são apresentadas as principais diferenças entre as dosagens propostas para o estudo.

Tabela 16 – Principais diferenças entre as dosagens propostas para o estudo.

<b>Tipos de concreto</b>	<b>Aditivo plastificante</b>	<b>Fibras de Aço</b>
CC	Não	Não
CREF-S/F	Sim	Não
CRFA	Sim	Sim

Em todos os concretos produzidos foi utilizada a mesma dimensão máxima característica do agregado graúdo, possibilitando assim, uma melhor comparação entre os concretos no estado endurecido.

## **4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1. Preliminares**

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos para os todos concretos analisados neste estudo, com base nos experimentos realizados nos estados fresco e endurecido.

No estado fresco, todos os concretos ensaiados, realizados segundo a norma descrita na seção anterior, são apresentados os resultados de cada mistura adquiridos a partir de uma única amostra. Já os resultados da resistência à compressão, da resistência à tração e do módulo de elasticidade dos concretos no estado endurecido, são apresentados a média aritmética dos dois maiores resultados das três amostras cilíndricas ensaiadas para cada tipo de concreto e o desvio padrão das três amostras.

### **4.2. Estado Fresco**

No estado fresco, foram verificados a trabalhabilidade pelo ensaio de abatimento do tronco de cone e determinados o teor de ar incorporado, em todos os concretos pesquisados neste trabalho.

#### **4.2.1. Abatimento do Tronco de Cone**

A Tabela 17 apresenta os resultados do abatimento do tronco de cone para todos os concretos, executados de acordo com a NBR NM 67 (1998).

Tabela 17 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone.

Concreto	Abatimento (cm)
CC	1
CREF-S/F	20
CRFA-C1	19
CRFA-C2	17
CRFA-M1	19
CRFA-M2	15
CRFA-L1	13
CRFA-L2	12

No Gráfico 18 estão dispostos os resultados de abatimento do tronco de cone apresentado na Tabela 17.

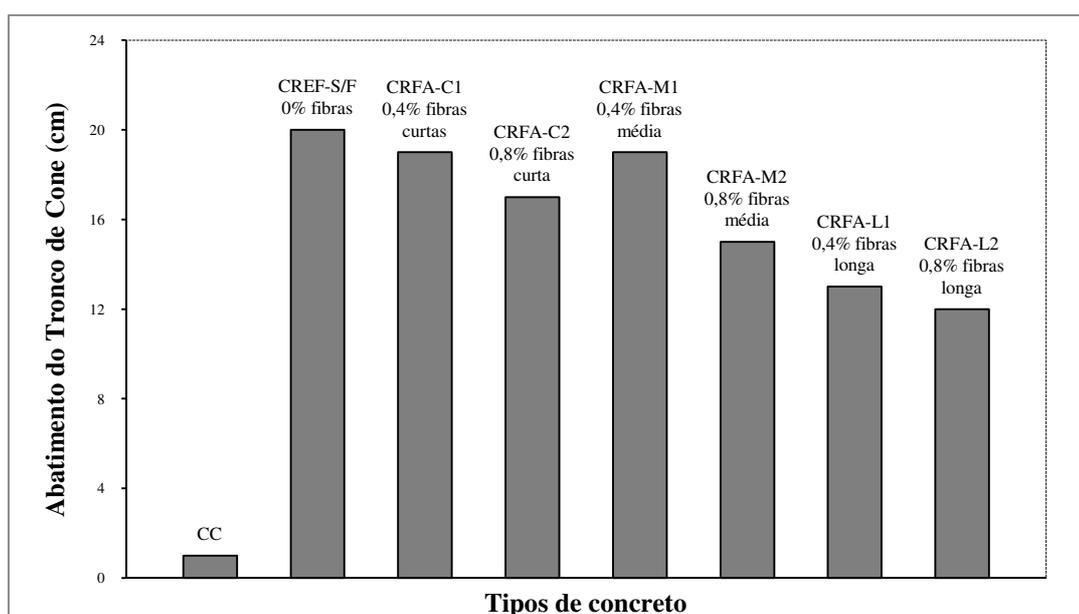


Gráfico 18 – Representação dos resultados obtidos no ensaio de Abatimento do Tronco de Cone.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a adição de fibras ao concreto reduz a trabalhabilidade, sendo proporcional a concentração de volume de fibras no concreto. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 17, é possível verificar esta afirmação, visto que a adição de fibras de aço com maior fator de forma e a maior fração volumétrica, representou a maior redução no abatimento em relação ao concreto de referência (CREF-S/F). Tais observações

também foram verificadas nos estudos realizado por Yazici et al. (2007), Barros (2009), Toledo Filho et al. (2008).

O concreto convencional (CC) apresentou menor trabalhabilidade, indicando reduções de cerca 95% em relação ao CREF-S/F. O menor valor obtido no ensaio de abatimento do CC deve-se ao fato de que, na sua composição, não foram incorporados aditivos plastificantes, estes que melhoram a deformabilidade dos concretos no estado fresco.

Durante a realização do ensaio observou que as misturas apresentaram boa retenção de água, sem exsudação, e homogeneidade, com todos os constituintes, inclusive as fibras, permanecendo uniformemente distribuídos em toda a matriz cimentícia.

A Ilustração 32 apresenta a determinação do abatimento dos concretos CC, CREF-S/F e CRFA.



Ilustração 32 – Determinação dos abatimentos dos concretos CC, CREF-S/F e CRFA.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 17, todos os concretos apresentaram deformabilidade adequada sob o seu peso próprio. Portanto, segundo a classificação apresentada por Andolfato (2002), conforme Tabela 15 (item 3.4.), os concretos CREF-S/F, CRFA-C1, e CRFA-M1 apresentaram consistência fluida, e os concretos CRFA-C2 CRFA-M2, CRFA-L1 e CRFA-L2 corresponderam a uma consistência mole, enquanto que, o valor do abatimento do concreto convencional (CC) correspondeu a uma consistência seca.

#### 4.2.2. Teor de Ar Incorporado

Os resultados da determinação do teor de ar incorporado e o tipo de adensamento no concreto fresco são apresentados na Tabela 18. Segundo a NBR 9833:2008, apresentada no item 3.4.2, para o cálculo da massa total do concreto, o recipiente do medidor foi preenchido e adensados de forma manual ou vibrado, dependendo da valor do abatimento.

Tabela 18 – Resultados do teor de ar incorporado do concreto fresco.

<b>Concreto</b>	<b>Teor de Ar Incorporado (%)</b>	<b>Adensamento para preenchimento do recipiente</b>
CC	1,60	Vibrado
CREF-S/F	12,08	Manual
CRFA-C1	15,38	Manual
CRFA-C2	13,19	Manual
CRFA-M1	1,90	Vibrado
CRFA-M2	2,93	Vibrado
CRFA-L1	2,63	Vibrado
CRFA-L2	2,21	Vibrado

Os resultados apresentados do teor de ar incorporado de cada concreto na Tabela 18, estão representados no Gráfico 19.

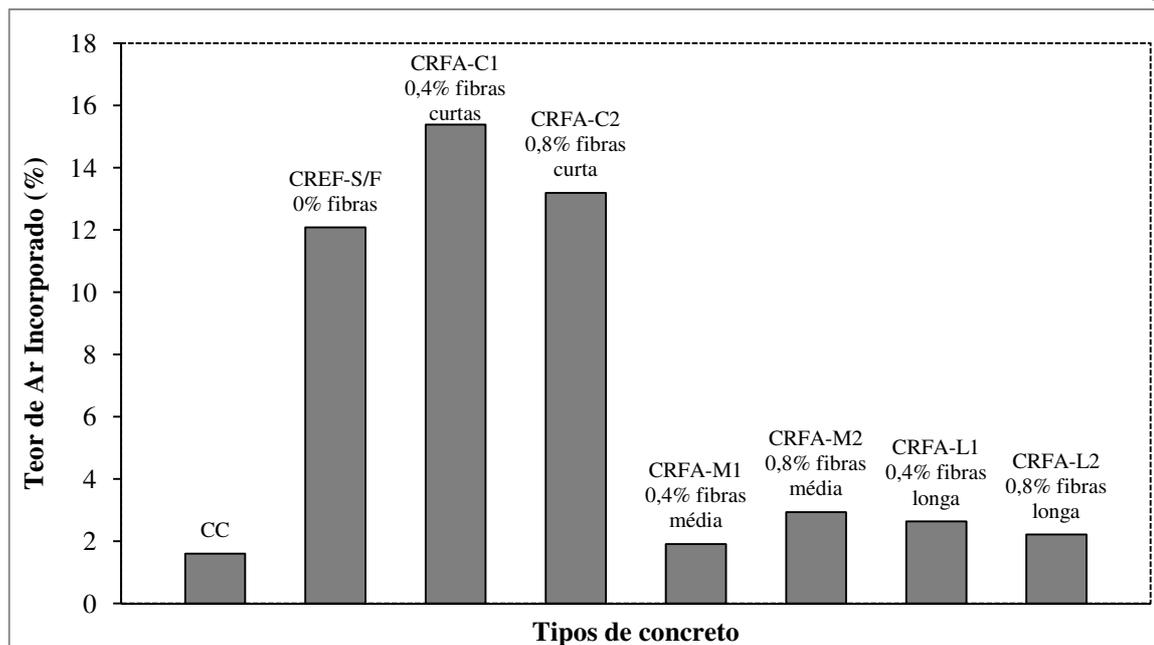


Gráfico 19 – Representação dos resultados obtidos no ensaio de Teor de Ar Incorporado.

De acordo com os valores determinados, apresentados na Tabela 18 e no Gráfico 19, foi possível observar que, os concretos CREF-S/F, CRFA-C1 e CRFA-C2, apresentaram influência significativa no teor de ar incorporado do concreto quando o adensamento dos mesmos foi feito de forma manual, apresentando vários vazios no recipiente. Nos demais concretos, o adensamento foi realizado por vibração por imersão, preenchendo mais os vazios do recipiente.

No geral, o concreto de referência e os concretos reforçados com fibras de aço apresentaram maiores teores de ar incorporado, possivelmente, devido à utilização de aditivo plastificante, o que pode ter ocasionado o surgimento de bolhas de ar na mistura fresca dos concretos. Já o concreto convencional (CC), em relação às demais misturas produzidas neste estudo, apresentou menor teor de ar incorporado. Tal resultado pode ser avaliado como uma causa da ausência da incorporação de aditivos e das fibras de aço, favorecendo a obtenção de uma mistura com uma menor quantidade de bolhas de ar.

### 4.3. Estado Endurecido

No estado endurecido, aos 28 dias de idade, foram realizados os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

#### 4.3.1. Resistência à Compressão

Os resultados de resistência média à compressão dos concretos são apresentados na Tabela 19. Para cada tipo de concreto, aos 28 dias, foram rompidos três corpos-de-prova cilíndricos 10 x 20 cm.

Tabela 19 – Resultados de resistência média à compressão dos concretos.

<b>Tipos de Concreto</b>	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>
CC	30,25	0,70
CREF-S/F	19,41	3,49
CRFA-C1	23,17	2,74
CRFA-C2	23,15	1,82
CRFA-M1	22,91	2,00
CRFA-M2	21,76	1,38
CRFA-L1	21,83	1,20
CRFA-L2	24,45	1,12

No Gráfico 20, estão dispostos os resultados de resistência média à compressão apresentados na Tabela 19.

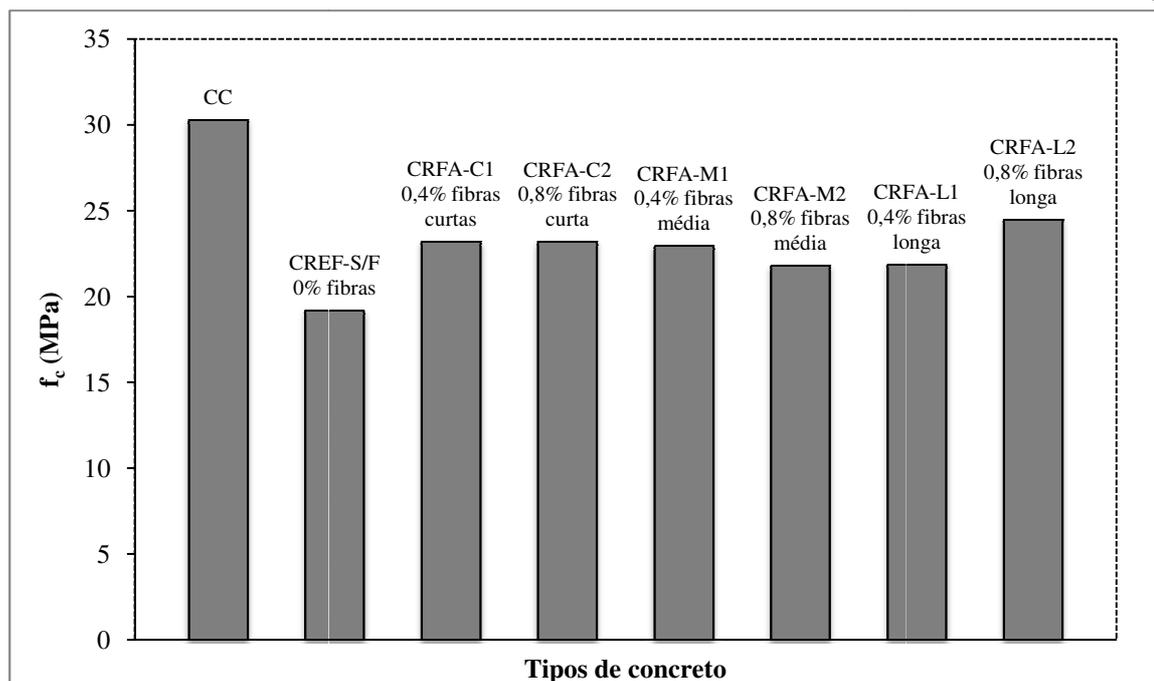


Gráfico 20 – Representação dos resultados obtidos de resistência média à compressão.

Como pode ser observado pelos resultados apresentados na Tabela 19 e dispostos no Gráfico 20, as resistências médias à compressão foram superiores em todos os concretos reforçados com fibras de aço quando comparados com o concreto de referência sem fibras, embora o aumento da resistência à compressão não seja a característica principal das fibras.

Como forma de comparação dos resultados alcançados deste estudo, tais observações também foram relatadas no trabalho realizado por Fugii et al (2008), na qual analisou em corpos-de-prova cilíndrico com dimensões de 10 x 20 cm, rompidos aos 28 dias, que a adição de fibras de aço, com teores de 0,3% e 0,4% e fator de forma de valor igual a 67, na matriz cimentícia resultou em um aumento da resistência à compressão em torno de 25% em relação a matriz cimentícia sem adição de fibras.

Já o concreto convencional (CC), apresentou melhor resistência média à compressão, quando comparado com o concreto de referência e os concretos reforçados com fibras de aço, visto que a adição de aditivo plastificante e de fibras de aço ocasionou uma redução significativa. Observa um aumento da resistência média à compressão do concreto convencional (CC) em torno de 55,8% em relação ao concreto de referência sem fibras, e um aumento cerca de 32,2% em relação as resistências médias dos concretos reforçados com fibras de aço. No

entanto, conforme Bentur e Mindess (2007), a adição de fibras produz pequeno ou nenhum aumento na resistência à compressão do concreto, podendo haver casos em que há um decréscimo no valor da resistência. Portanto, tais observações foram verificadas para o caso do concreto convencional (CC).

Segundo Barros (2009), a ruptura do concreto devido à ação de esforços de compressão se dá pelo desenvolvimento e interligação das microfissuras, existentes nas várias zonas de interface entre a pasta e os agregados, a medida que se aumenta a intensidade do carregamento. Dependendo do alinhamento da fibra em relação à direção do carregamento, fração volumétrica e geometria das fibras, e condições da microestrutura da matriz, as fibras de aço podem promover ganhos na resistência à compressão pelas capacidades de retardar o prolongamento das fissuras interceptadas por elas e transferir esforços entre as faces das fissuras.

No caso dos resultados obtidos, conforme Tabela 19, o concreto reforçado com fibras de aço com maior fração volumétrica e maior fator de forma promoveu melhores condições de aderência na matriz, desse modo, as fibras podem ter atuado de forma semelhante a um sistema de confinamento do concreto, dificultando o desenvolvimento de fissuras longitudinais e, assim, ocasionando ganho na resistência à compressão com relação ao concreto de referência sem fibras.

#### **4.3.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral**

Os resultados apresentados na Tabela 20 correspondem à resistência média à tração por compressão diametral dos três corpos-de-prova cilíndricos de dimensão 10 x 20 cm ensaiados, por tipo de concreto.

Tabela 20 – Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos.

<b>Tipos de Concreto</b>	<b><math>f_{ct}</math> (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>
CC	3,30	0,07
CREF-S/F	2,63	0,14
CRFA-C1	2,75	0,07
CRFA-C2	2,66	0,10
CRFA-M1	2,75	0,17
CRFA-M2	3,05	0,19
CRFA-L1	3,06	0,20
CRFA-L2	3,69	0,22

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 20, a adição de fibras proporcionou um aumento na resistência à tração por compressão diametral em relação à matriz de referência sem a adição de fibras, em todos os concretos estudados.

O concreto convencional (CC) em relação ao concreto de referência sem fibras apresentou um aumento de resistência média à tração por compressão diametral em torno de 25,5% e um aumento em torno de 9,3% em relação a média das resistências dos concretos reforçados com fibras de aço. Deve-se ao fato da incorporação de aditivos plastificante, aumentando assim a porosidade da matriz e o ar incorporado nos mesmos. Porém, durante a realização do ensaio observou-se uma ruptura brusca nos concretos sem adição de fibras, o que de fato, as fibras influenciam nesse comportamento, minimizando e interceptando as fissuras durante a aplicação de qualquer carregamento.

Segundo a literatura (MEHTA; MONTEIRO, 2008; FUSCO, 2008), uma das principais limitações do concreto é sua baixa resistência à tração, que é de apenas 7 a 10% de sua resistência à compressão. Segundo esse contexto, pode ser observado, a partir dos resultados dos concretos com adição de fibras um incremento da resistência à tração acima de 10% da resistência à compressão em todos os concretos produzidos quando se adicionou as fibras.

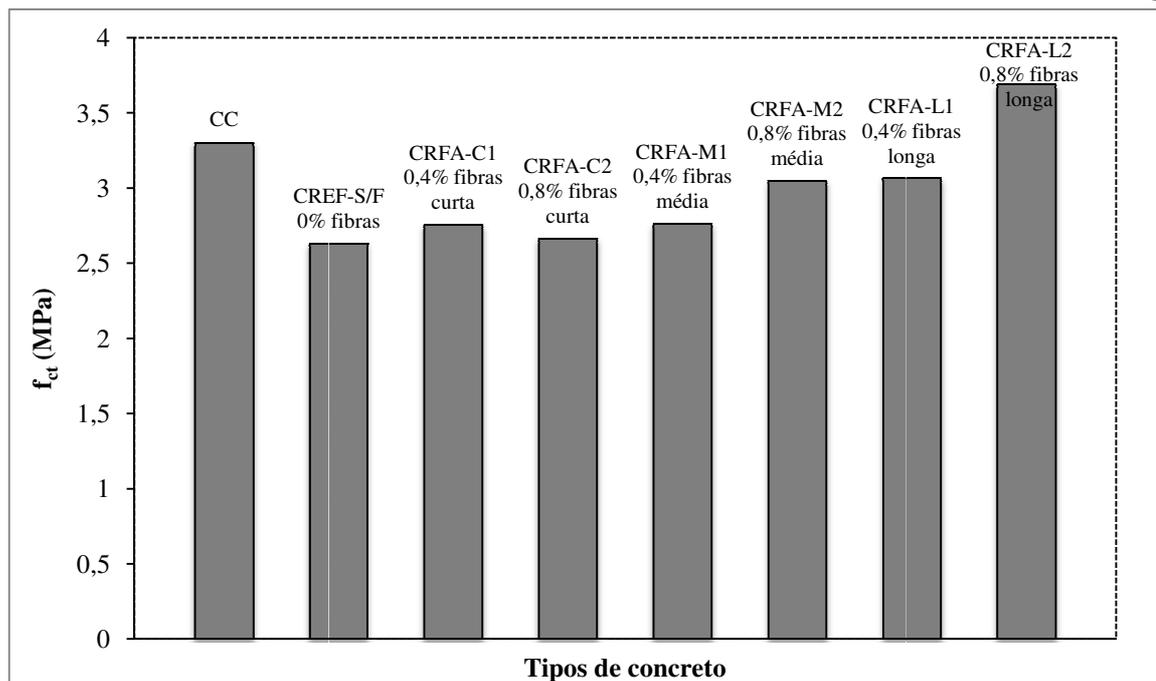


Gráfico 21 – Representação dos resultados obtidos de resistência média à tração por compressão diametral.

Segundo Balaguru e Shah (1992), volumes de fibras abaixo de 2,0% não proporcionam um grande aumento na resistência à tração por compressão diametral, exceto quando é utilizado fumo de sílica. Contrariando tal afirmação através do Gráfico 21 apresentado, observa-se que em todos os concretos estudados houve um aumento da resistência à tração em relação à matriz de referência sem adição de fibras, nos compósitos contendo apenas 0,4% e 0,8% de teores de fibras de aço.

#### 4.3.3. Módulo de Elasticidade

Na Tabela 21 são apresentados os resultados do módulo de elasticidade médio dos concretos, determinado segundo a NBR 8522 (2008). Para cada tipo de concreto, foram produzidos três corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm, curados por imersão até a idade de 28 dias.

Tabela 21 – Resultados do módulo de elasticidade médio dos concretos.

Tipos de Concreto	$E_c$ (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
CC	30,04	1,47
CREF-S/F	28,62	0,84
CRFA-C1	27,88	1,58
CRFA-C2	25,97	2,59
CRFA-M1	27,21	1,09
CRFA-M2	25,16	0,94
CRFA-L1	28,84	2,76
CRFA-L2	28,05	0,49

No Gráfico 22, estão dispostos os resultados de módulo de elasticidade médio dos concretos apresentados na Tabela 21.

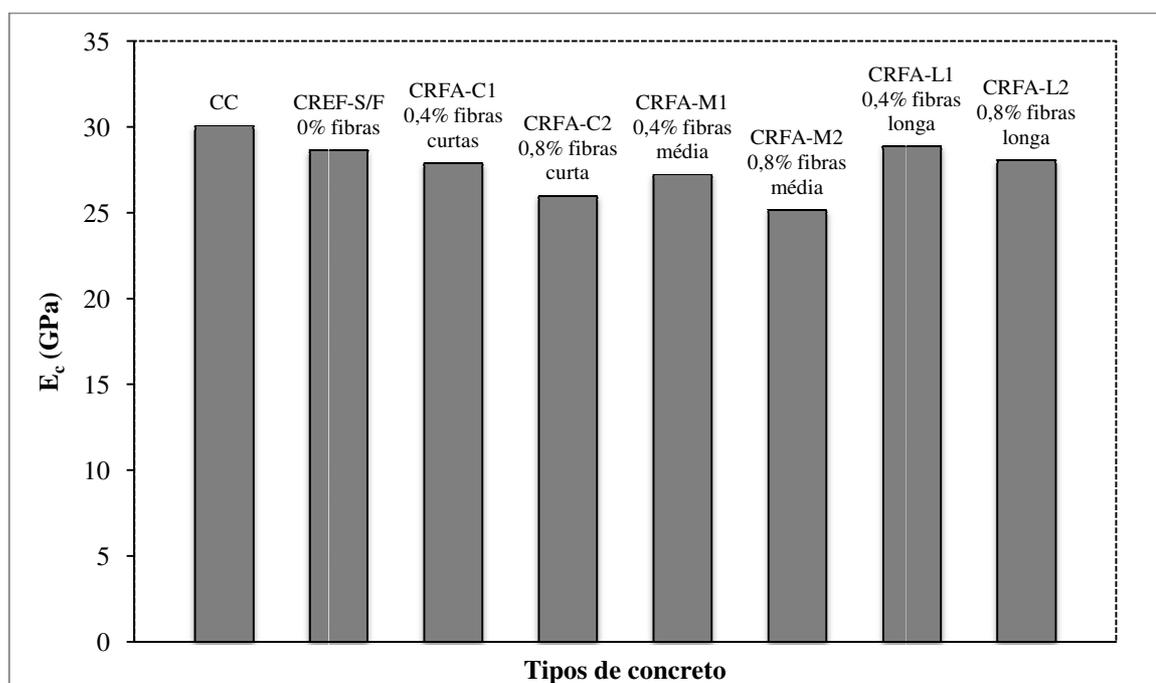


Gráfico 22 – Representação dos resultados obtidos de módulo de elasticidade médio dos concretos.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 21, ao contrário do que foi verificado nas resistências à compressão e à tração, a adição de fibras ocasionou uma redução no módulo de elasticidade na maioria dos concretos, na medida em que se adiciona o dobro do volume de fibras de aço (ou seja, de 0,4% para 0,8%), nos diferentes fator de forma das fibras,

verificando apenas um acréscimo insignificante no concreto CRFA-L1. Estes sendo comparados com o concreto de referência sem fibras (CREF-S/F).

Conforme explica Mehta e Monteiro (2008), em materiais compósitos, a fração volumétrica, a densidade e o módulo dos principais componentes, além das características da zona de transição na interface, determinam o comportamento elástico do compósito. Porém, apesar de possuir a mesma matriz cimentícia, mas sem adição de aditivo e fibras de aço, o concreto convencional (CC) alcançou módulo de elasticidade em torno de 5% superior à do CREF-S/F, e foi verificado também um aumento do módulo de elasticidade do CC comparado com todos os concretos reforçados de fibras de aço.

De modo geral, a adição de fibras não representou alterações expressivas nos valores médios de módulo de elasticidade dos concretos. Tal resultado vai de encontro com o que normalmente é encontrado na literatura técnica, como citam Mehta e Monteiro (2008), indicando a pouca influencia das fibras no módulo de elasticidade do concreto.

Como forma de comparação dos resultados alcançados neste estudo, os resultados do módulo de elasticidade do concreto de referência sem fibras e do concreto reforçado com 1% de fibras média de aço obtidos por Barros (2009), foi de 39,9 GPa e 36,6 GPa, respectivamente, verificando também uma redução do módulo de elasticidade após a incorporação de fibras de aço.

Assim, constatou-se que, a adição de fibras influenciou mais nos valores de resistência à compressão e à tração do que nos valores do módulo de elasticidade, apesar das fibras de aço possuir módulo de elasticidade superior ao da matriz cimentícia.

## **5. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **5.1. Preliminares**

Nesta seção são analisados os resultados obtidos nos ensaios descritos na Seção 3. Discutem-se os efeitos das variáveis de estudo, estabelecendo-se comparações com os resultados obtidos para o concreto fluido sem fibras, que é tomado como testemunho.

Primeiramente são analisados os resultados da influência da adição das fibras sobre a trabalhabilidade e o teor de ar incorporado das misturas. Nos itens seguintes, são analisadas as modificações no comportamento dos compósitos causados pela variação do fator de forma e da fração volumétrica das fibras de aço adicionadas, a partir dos dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

Feitas as comparações do comportamento do concreto fluido reforçado com fibras de aço a partir das modificações das fibras de aço adicionadas na matriz cimentícia, foram analisados a relação entre a resistência à compressão e à tração pela equação proposta pelo CEB-FIP (1990), a partir dos valores de resistência à compressão dos concretos estudados. Por fim, os dados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral são analisados através da Regra das Misturas caracterizando o melhor comportamento do novo compósito.

### **5.2. Fator Trabalhabilidade dos Concretos**

Antes de analisar os resultados de abatimento para os concretos fibrosos, deve-se fazer uma avaliação da trabalhabilidade de materiais compósitos. Segundo Velasco (2002), a mistura de concreto reforçado com fibras pode ser compactada sob vibração da mesma forma que o concreto simples. Entretanto, as fibras têm, em geral, a tendência de reduzir o abatimento do concreto e de fazer com que ele pareça sem trabalhabilidade quando imóvel, apesar do mesmo

poder responder bem à vibração. Desta maneira, é salientar que, no presente estudo, o ensaio de abatimento de tronco de cone foi utilizado para fornecer uma indicação qualitativa da trabalhabilidade da massa fibrosa, embora que este ensaio não seja o mais indicado para quantificação da perda da trabalhabilidade em concretos reforçados com fibras de aço, como explicado na seção 2, optou-se pela sua realização, devido à facilidade de execução do ensaio.

No Gráfico 23 estão dispostos os resultados dos valores para o abatimento do concreto antes e após a adição 0,4% das fibras.

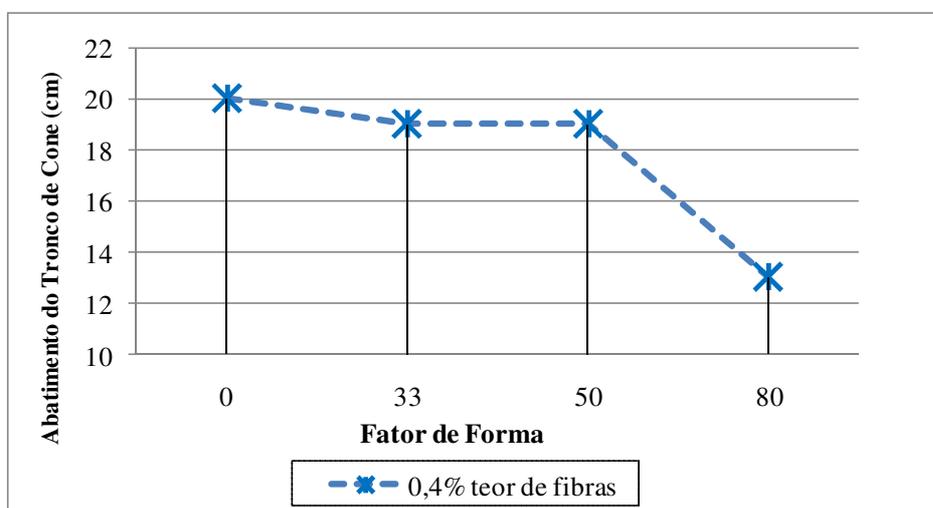


Gráfico 23 – Representação dos resultados de trabalhabilidade do CREF-S/F e dos concretos incorporados com 0,4% de fibras.

Para análise do fator de forma na trabalhabilidade dos concretos, observa-se através dos resultados plotados no Gráfico 23 que os concretos com 0,4% de teor de fibras, reduziu a trabalhabilidade para fibras com fator de forma de 33 e 50 em valores iguais a 5,3%. Já as fibras com fator de forma de 80 reduziu significativamente em 53,8%, em relação ao concreto de referência sem fibras.

Para análise do fator de forma nos concretos com teores de 0,8% de fibras, estão dispostos os resultados do ensaio de abatimento destes concretos no Gráfico 24.

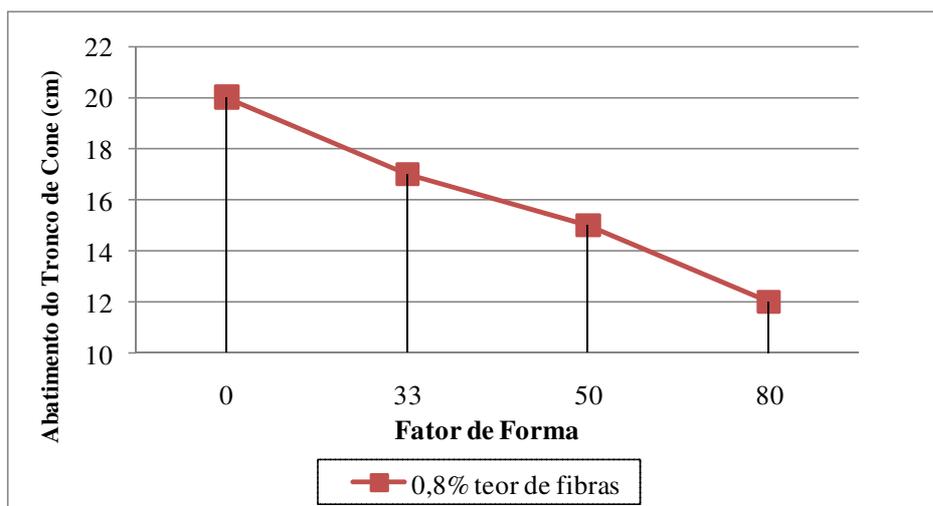


Gráfico 24 – Representação dos resultados de trabalhabilidade do CREF-S/F e dos concretos incorporados com 0,8% de fibras.

Para os concretos com teores de 0,8% de fibras, observou-se que na medida em que o fator de forma destas aumenta, há uma redução no abatimento de 17,6%, 33,3% e 66,7%, respectivamente para o fator de forma de 33, 50 e 80. Portanto, a adição de fibras causou a diminuição do abatimento, tornando-se estes valores comparativos com os valores do concreto de referência sem fibras (CREF-S/F).

Como forma de comparação da trabalhabilidade da mistura fresca, para os dois teores analisados, estudos realizados por Chanh (2005) também confirmam tais observações, visto que um maior fator de forma, afeta negativamente a trabalhabilidade dos compósitos.

Observa-se uma clara tendência à redução da trabalhabilidade, para todas as fibras e teores analisados, a partir do momento de sua incorporação. A redução é mais evidente em teores mais elevados e com fibras com fator de forma maior, que implicam em um número maior de fibras incorporadas por metro cúbico de concreto, chegando a atingir valores em torno de 67%.

É importante enfatizar que de fato, foi comprovado nos ensaios, que as fibras reduziram a trabalhabilidade da mistura, mas com o uso de aditivo plastificante, apresentaram-se bastante trabalháveis.

### 5.3. Teor de Ar Incorporado na Mistura

De acordo com os valores determinados, apresentados Tabela 18 da seção anterior, não foi possível obter uma comparação entre todos os concretos neste parâmetro, devido ao tipo diferente de adensamento dos concretos, na qual se obteve uma diferença significativa no teor de ar incorporado das misturas do adensamento do tipo manual para do tipo vibrado. Portanto, serão analisados os concretos pelo tipo de adensamento.

No Gráfico 25, estão apresentados os resultados do ensaio de teor de ar incorporados dos concretos CREF-S/F, CRFA-C1 e CRFA-C2, cujo foram adensados de forma manual.

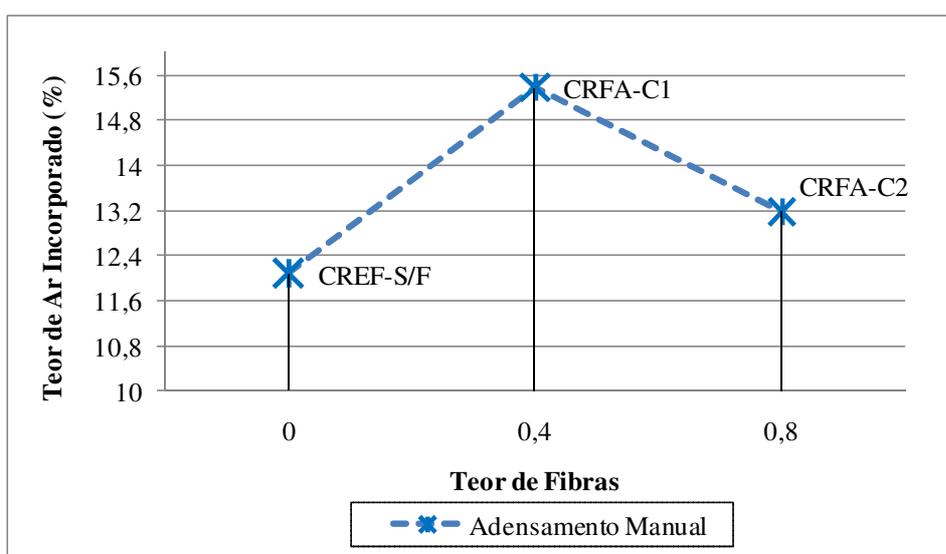


Gráfico 25 – Representação dos resultados de teor de ar incorporado dos concretos adensados manualmente.

Para análise do teor de ar incorporado nos concretos CREF-S/F, CRFA-C1 e CRFA-C2, onde o adensamento foi realizado manualmente, foi possível observar a adição de fibras de aço causou alteração na quantidade de ar incorporado. Avaliando a influência da fração volumétrica de fibras com o menor fator de forma, verificou uma redução no valor do teor de ar incorporado com o aumento do volume de fibras, o que de fato era esperado um aumento neste valor. Isto pode ter sido ocasionado devido à má execução deste ensaio, não sendo

totalmente compactado, já que o concreto foi adensado de forma manual, comprovando a desvantagem do método gravimétrico.

Os resultados do ensaio de teor de ar incorporado dos demais concretos adensados por meio de vibração estão dispostos no Gráfico 26.

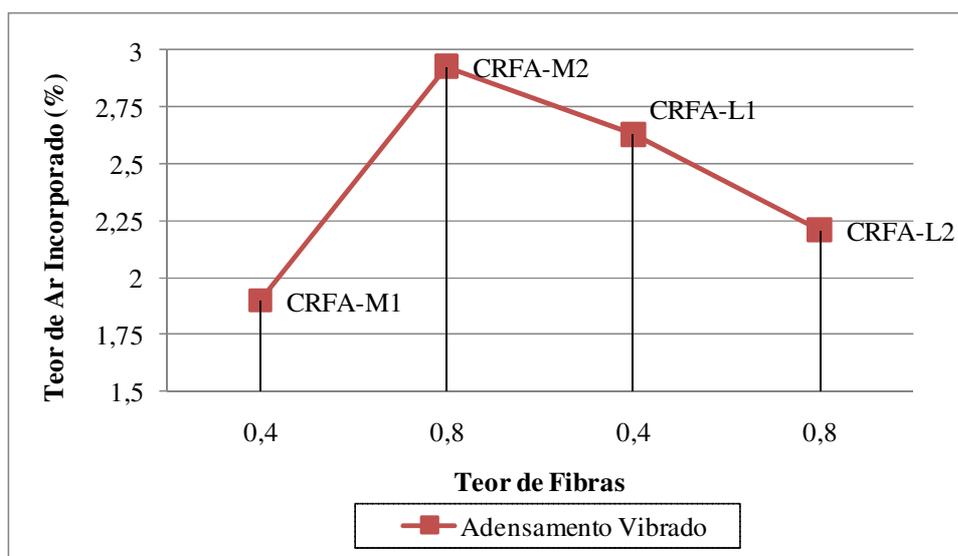


Gráfico 26 – Representação dos resultados de teor de ar incorporado dos concretos adensados por vibrador.

Na análise do fator de forma das fibras, observa-se no Gráfico 26, os concretos CRFA-M1 e CRFA-L1 com teor igual a 0,4%, a variação do fator de forma de 50 e 80, respectivamente, causou um acréscimo no teor de ar incorporado dos concretos. Já nos concretos CRFA-M2 e CRFA-L2 com teor de fibras de 0,8%, observou que o aumento do fator de forma das fibras apresentou um decréscimo no teor de ar dos compósitos.

Na análise do teor de fibras, os concretos reforçados com fibras média (fator de forma de 50), foi observado um aumento de ar incorporado ao adicionar mais fibras, ou seja, 0,4% para 0,8%. Já nos concretos reforçado com fibras longas, foi observado um decréscimo de ar incorporado, a medida que se adiciona o dobro do volume de fibra de aço. Tais observações também foram verificadas no trabalho realizado por Barros (2009) sobre concreto reforçado com fibras de aço, na qual observou um decréscimo insignificante no teor de ar incorporado

do concreto de referência sem fibras, após a incorporação de 1% de fibra de aço com fator de forma de 50.

Portanto, a incorporação de ar nos concretos também é fortemente influenciada não somente pelas fibras de aço, como também pela presença de aditivo plastificante na mistura, observado também por Giublin et al. (2006), na qual os aditivos plastificante podem ocasionar na mistura fresca dos concretos a formação de bolhas de ar.

No geral, verifica-se que a adição das fibras de aço acarretou num maior teor de ar incorporado em todas as misturas, comparadas com a mistura sem adição de fibras. Tanto para o aumento do fator de forma quanto no aumento do volume das fibras, observou que as fibras aumentaram os valores do teor de ar. No entanto, verificou uma dispersão dos resultados, devido ao processo de mistura não padrão, pois durante a realização dos ensaios obteve auxílio de diferentes técnicos. Constate-se que mesmo com aumento do teor de ar incorporado nas misturas, atuou de forma favorável em relação às resistências à compressão e à tração dos compósitos ensaiados, discordando com as observações feitas por Mehta e Monteiro (2008).

#### **5.4. Influência do Fator de Forma das Fibras de Aço**

Para a análise da influência do fator de forma na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, foram utilizados concretos moldados com as fibras 25/75, 30/60 e 75/60, uma vez que ambas apresentam comprimentos distintos. Para melhor visualização, foram apresentados gráficos onde cada curva corresponde aos concretos com o mesmo volume de fibra. Contudo, vale salientar que todas as curvas mostradas tem seu valor inicial no concreto de referência sem fibras (CREF-S/F).

### 5.4.1. Resistência à Compressão

Na Tabela 22 são apresentados de forma mais simplificada os resultados de resistência média à compressão dos concretos estudados que foram apresentados na seção anterior, a fim de analisar a influência do fator de forma das fibras para volumes iguais.

Tabela 22 – Resultados de resistência média à compressão dos concretos com diferente fator de forma de cada volume de fibra.

<b>Tipos de Concreto</b>	<b>Fator de Forma</b>	<b>Fração Volumétrica</b>	<b>f<sub>c</sub> (MPa)</b>
CREF-S/F	-	-	19,41
CRFA-C1	33	0,4%	23,17
CRFA-M1	50	0,4%	22,91
CRFA-L1	80	0,4%	21,83
CRFA-C2	33	0,8%	23,15
CRFA-M2	50	0,8%	21,76
CRFA-L2	80	0,8%	24,45

Como pode ser observado através dos resultados apresentados na Tabela 22, os concretos com incorporação de fibras alcançaram resistências médias à compressão superiores ao concreto de referência sem fibras.

No Gráfico 27 estão dispostos os resultados da resistência média à compressão apresentados na Tabela 22 em função do fator de forma das fibras.

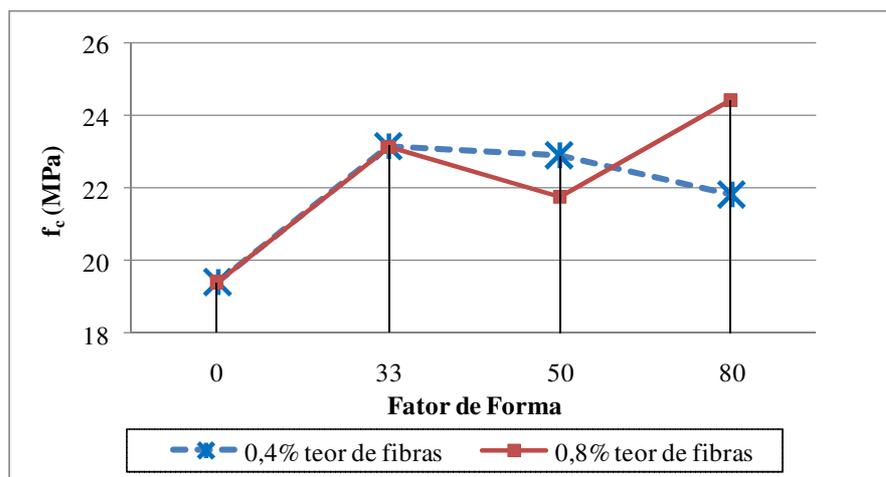


Gráfico 27 – Influência do fator de forma das fibras na resistência à compressão.

Para a análise do fator de forma das fibras nos concretos, nota-se que nos concretos reforçados com fibras com teores de iguais a 0,4%, estas não causaram grandes variações na resistência à compressão dos compósitos quando aumenta o fator de forma das mesmas, apresentando um pequeno decréscimo nas resistências. Já nos concretos incorporados com fibras com teores iguais a 0,8% observou um decréscimo na resistência à compressão na medida em que se aumentou o fator de forma de 33 para o de 50, e um acréscimo na resistência à compressão para as fibras com fator de forma igual a 80. Em geral, houve uma diminuição da resistência com o aumento do fator de forma.

Como forma de comparação do fator de forma das fibras de aço na resistência média à compressão dos resultados obtidos neste estudo, são apresentadas na Tabela 23 os valores médios de resistência à compressão de concretos reforçados com fibras de aço obtidos por Yazici et al. (2007), verificando também uma dispersão dos resultados.

Tabela 23 – Resultados de resistência média à compressão dos concretos com fibra de aço obtidos por Yazici et al. (2007).

Tipos de Concreto	Fator de Forma	Fração Volumétrica	$f_c$ (MPa)
CC	-	-	49,1
CRFA-C1	45	1,0%	53,7
CRFA-C2	45	1,5%	57,7
CRFA-M1	65	1,0%	58,3
CRFA-M2	65	1,5%	56,4
CRFA-L1	80	1,0%	58,3
CRFA-L2	80	1,5%	52,1

De forma genérica, pode-se considerar que a variação do fator de forma das fibras de aço, no intervalo estudado, apenas influenciou positivamente para o fator de forma de 80 quando o mesmo foi adicionado com 0,8% de fibras. Observa-se que cada ponto dos diagramas representa a média de três corpos-de-prova ensaiados. Portanto, o fator de forma não provocou grandes variações na resistência à compressão dos compósitos.

#### 5.4.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Na Tabela 24 e no Gráfico 28 são apresentados os resultados da resistência média à tração dos concretos estudados, agrupados os valores em função do fator de forma das fibras.

Tabela 24 – Resultados de resistência média à tração dos concretos com diferente fator de forma de cada volume de fibra.

Tipos de Concreto	Fator de Forma	Fração Volumétrica	$f_{ct}$ (MPa)
CREF-S/F	-	-	2,63
CRFA-C1	33	0,4%	2,75
CRFA-M1	50	0,4%	2,75
CRFA-L1	80	0,4%	3,06
CRFA-C2	33	0,8%	2,66
CRFA-M2	50	0,8%	3,05
CRFA-L2	80	0,8%	3,69

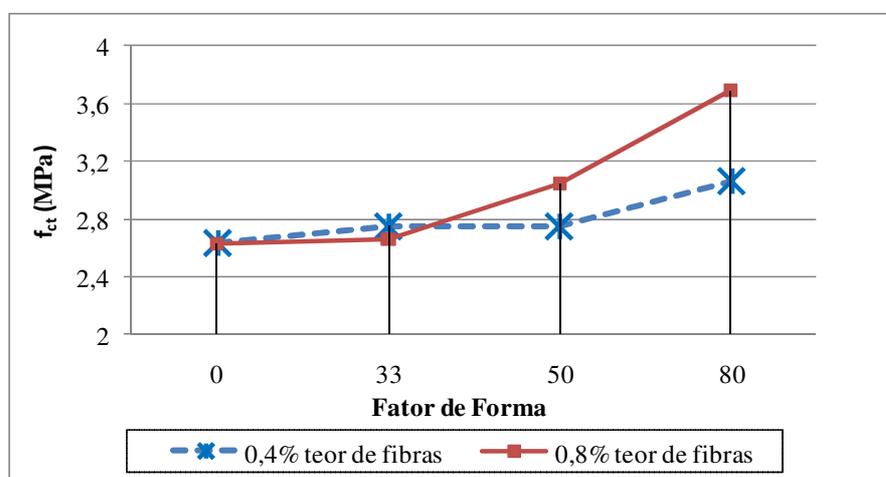


Gráfico 28 – Influência do fator de forma das fibras na resistência à tração por compressão diametral.

Quando são avaliados os efeitos do fator de forma na resistência à tração por compressão diametral, observa-se que, com o aumento do fator de forma, ocorre um incremento em todos os concretos. Contudo, as fibras proporcionaram um significativo aumento médio em relação à matriz de referência sem a adição de fibras, em todos os concretos estudados.

No Gráfico 28, observa-se que, com o aumento do fator de forma e do comprimento das fibras, o que implica numa melhor ancoragem, obtêm-se um acréscimo nos valores de resistência à tração dos compósitos. As fibras, neste caso, passam a atuar com mais eficiência no controle da fissuração, mantendo mais integridade do corpo-de-prova em maiores tensões, o que se reflete em um leve aumento na capacidade de carga.

Analisando a influência do fator de forma das fibras na resistência à tração, observa-se a partir dos dados apresentados na Tabela 24, que nos concretos CRFA-C1, CRFA-M1 e CRFA-L1, com teor iguais a 0,4% e respectivamente com um crescente fator de forma de fibras, ocorreram um incremento na resistência à tração iguais a 4,6% no fator de forma de 33 e 50, e um aumento de cerca de 16,4% no concreto com o maior fator de forma, em relação ao valor da resistência do concreto de referência. Nos demais concretos, CRFA-C2, CRFA-M2 e CRFA-L2, alterando apenas o volume de fibras para o dobro, observa-se também um incremento de 1,2%, 16% e 40,3%, respectivamente no fator de 33, 50 e 80, também em relação ao concreto de referência sem fibras. Isto também foi verificado por Yazici (2007) na qual o aumento do fator de forma aumenta a resistência à tração dos compósitos. No entanto, contrariando tais observações, Garcez (2005) em seu estudo observou um decréscimo de resistência à tração no aumento do fator de forma dos concretos.

Observa-se que o concreto CRFA-L2 apresentou melhor desempenho quando submetido a esforços de tração, em comparação com as outras misturas. Isto, provavelmente, deve-se ao fato de que, aumentando o fator de forma e o comprimento das fibras, a probabilidade das fissuras serem interceptadas por estas é maior, e por consequência, a costura promovida pelas fibras se torna mais eficiente, reduzindo a abertura das fissura, aumentando assim a sua resistência à tração.

### 5.4.3. Módulo de Elasticidade

Os resultados apresentados na seção anterior, do ensaio de módulo de elasticidade dos concretos estudados, são descritos na Tabela 25 e posteriormente representados no Gráfico 29, a fim de analisar a influência do fator de forma das fibras de aço, obtendo a mesma fração volumétrica.

Tabela 25 – Resultados de módulo de elasticidade médio dos concretos com diferente fator de forma de cada volume de fibra.

Tipos de Concreto	Fator de Forma	Fração Volumétrica	$E_c$ (GPa)
CREF-S/F	-	-	28,62
CRFA-C1	33	0,4%	27,88
CRFA-M1	50	0,4%	27,21
CRFA-L1	80	0,4%	28,84
CRFA-C2	33	0,8%	25,97
CRFA-M2	50	0,8%	25,16
CRFA-L2	80	0,8%	28,05

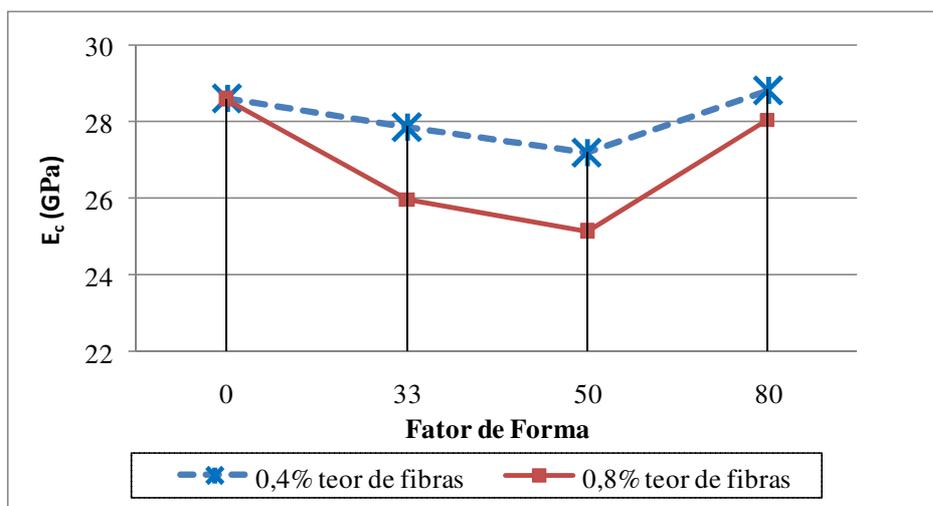


Gráfico 29 – Influência do fator de forma das fibras no módulo de elasticidade.

Quando são avaliados os efeitos do fator de forma sobre o módulo de elasticidade dos compósitos, nota-se um decréscimo quando são incorporadas as fibras com fator de forma de 33 e 50 na matriz cimentícia de referência, para os dois teores de fibras. Mas, observa-se um acréscimo insignificante do valor do módulo de elasticidade para as fibras com fator de forma

de 80 para os dois teores, em relação às matrizes incorporadas com fibras com de menor fator de forma (33 e 50).

Em relação ao concreto de referência sem fibras (CREF-S/F) a adição de fibras não apresentou influência significativa nos valores médios de módulo de elasticidade dos concretos. Contudo, o aumento do fator de forma das fibras de aço não representou alterações expressivas nesta propriedade.

## **5.5. Influência da Fração Volumétrica das Fibras de Aço**

Para análise da influência da fração volumétrica das fibras, foram utilizados concretos moldados com volumes de 0,4% e 0,8% de fibras de aço. São apresentados os resultados médios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, obtidos para os dois teores de fibras pesquisados. Para melhor visualização, foram plotados gráficos onde cada curva corresponde aos concretos para o mesmo tipo de fator de forma da fibra. Salienta-se que todas as curvas mostradas tem seu valor inicial no concreto de referência sem fibras (CREF-S/F).

### **5.5.1. Resistência à Compressão**

Na Tabela 26 e no Gráfico 30 são apresentados os resultados da resistência média à tração dos concretos estudados, agrupados os valores em função da fração volumétrica para cada tipo de fibras a ser analisada.

Tabela 26 – Resultados de resistência média à compressão dos concretos com diferente fração volumétrica de cada tipo de fibra.

Tipos de Concreto	Fator de Forma	Fração Volumétrica	$f_c$ (MPa)
CREF-S/F	-	-	19,41
CRFA-C1	33	0,4%	23,17
CRFA-C2	33	0,8%	23,15
CRFA-M1	50	0,4%	22,91
CRFA-M2	50	0,8%	21,76
CRFA-L1	80	0,4%	21,83
CRFA-L2	80	0,8%	24,45

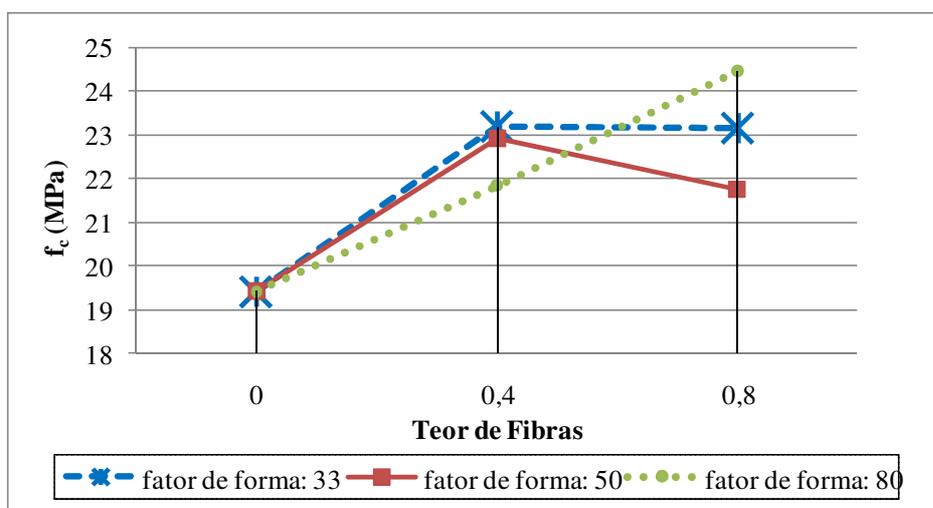


Gráfico 30 – Influência da fração volumétrica das fibras na resistência à compressão.

Como observado no Gráfico 30 todos os compósitos sofreram incrementos na resistência à compressão com adição de fibras, embora que quando analisado a influência do teor das mesmas, ocorreu um decréscimo na resistência à medida que dobrou a sua quantidade em alguns compósitos.

Nos concretos reforçados com fibra de menor fator de forma foi verificado que não apresentou influencia no aumento do teor das fibras, ou seja, quando adicionou o dobro da quantidade do mesmo tipo de fibra. No entanto, os concretos com a fibra de fator de forma de 50 sofreu perdas suaves em torno de 5% na resistência à compressão na medida em que aumentou o teor de fibras de 0,4% para 0,8%, isso pode ter ocorrido devido à má compactação durante a realização dos ensaios com o aumento do volume de fibras. Já os concretos de maior fator de forma observou-se que os compósitos sofreram incrementos em

torno de 12% na resistência à compressão com o aumento da fração volumétrica das fibras de 0,4% para 0,8%.

Segundo o ACI 544.4R-88, as fibras de aço com teores menores que 2% não apresentam melhoras na resistência à compressão do concreto, no entanto, observa-se que a presença de 0,4% e 0,8% de fibras de aço influenciou nesta propriedade.

Observa-se portanto, que a melhor influencia da fração volumétrica das fibras no concreto obteve no compósito com fibra de maior fator de forma, apresentando este o melhor resultado comparado com os demais concretos, também observado na influência do fator de forma conforme analisado anteriormente.

### 5.5.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os valores de resistência média à tração, apresentada na seção anterior, estão expostos na Tabela 27, por ordem do fator de forma, em função influência da fração volumétrica das fibras de aço a serem analisadas. No Gráfico 31 está disposta a influência da fração volumétrica para o mesmo tipo de fator de forma das fibras.

Tabela 27 – Resultados de resistência média à tração dos concretos com diferente fração volumétrica de cada tipo de fibra.

Tipos de Concreto	Fator de Forma	Fração Volumétrica	$f_{ct}$ (MPa)
CREF-S/F	-	-	2,63
CRFA-C1	33	0,4%	2,75
CRFA-C2	33	0,8%	2,66
CRFA-M1	50	0,4%	2,75
CRFA-M2	50	0,8%	3,05
CRFA-L1	80	0,4%	3,06
CRFA-L2	80	0,8%	3,69

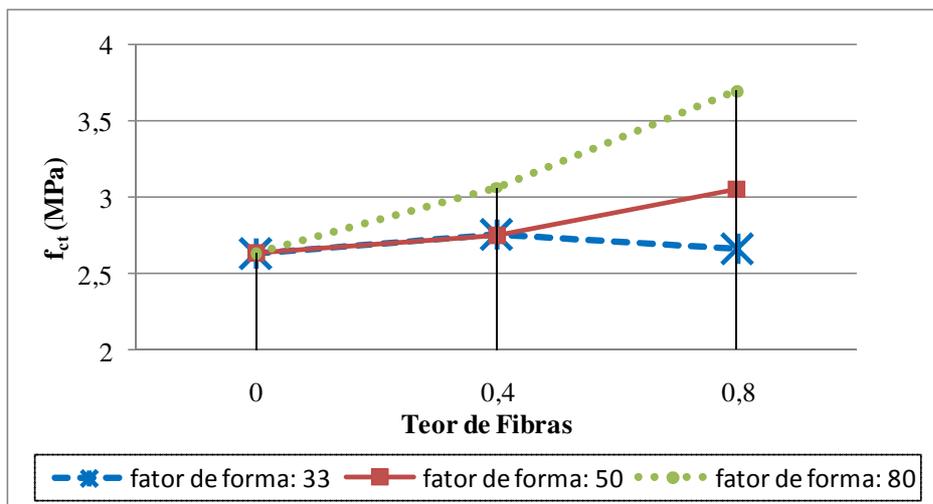


Gráfico 31 – Influência da fração volumétrica das fibras na resistência à tração por compressão diametral.

Nota-se, examinando o Gráfico 31, que a presença de fibras curtas tende a aumentar a resistência à tração nos dois teores estudados em relação ao concreto sem fibras, mas foi observado um suave decréscimo em torno de 3,4% na resistência quando aumentou o teor das fibras de 0,4% para 0,8%. Como foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, pode ter ocorrido incompatibilidade entre as fibras e a seção transversal do corpo-de-prova com o aumento do volume das fibras, o que favoreceu o alinhamento das fibras em uma direção, afetando os resultados.

Nas misturas com adição de fibras média, a incorporação das fibras causou incrementos na resistência à tração dos compósitos, visto que, com o aumento do teor de fibras obteve um aumento na resistência, ou seja, o CRFA-M2 obteve um aumento cerca de 11% em relação ao CRFA-M1. Já a presença de fibras de maior fator de forma tende a incrementar significativamente a resistência à tração cerca de 29,4%, quando se incorporava o dobro do volume deste tipo de fibra.

Cabe destacar que os compósitos com adição da fibra de maior fator de forma, apresentam desempenho superior aos gerados com as demais fibras, para os dois teores de adição.

O aumento da resistência à tração provocada pela adição das fibras de aço em ensaios de compressão diametral é observado por diversos autores conforme citado no referencial teórico deste estudo, concluindo que a adição de fibras no compósito influencia significativamente no aumento da resistência à tração, visto uma das limitações que o concreto apresenta é sua baixa

resistência à tração, sendo melhorada, portanto com a incorporação de fibras na massa do concreto.

### 5.5.3. Módulo de Elasticidade

Na Tabela 28 são apresentados os resultados de módulos de elasticidade médio dos concretos para a influência das duas frações volumétricas das fibras de aço utilizadas no estudo, para cada fator de forma destas.

Tabela 28 – Resultados de módulo de elasticidade médio dos concretos com diferente fração volumétrica de cada tipo de fibra.

Tipos de Concreto	Fator de Forma	Fração Volumétrica	$E_c$ (GPa)
CREF-S/F	-	-	28,62
CRFA-C1	33	0,4%	27,88
CRFA-C2	33	0,8%	25,97
CRFA-M1	50	0,4%	27,21
CRFA-M2	50	0,8%	25,16
CRFA-L1	80	0,4%	28,84
CRFA-L2	80	0,8%	28,05

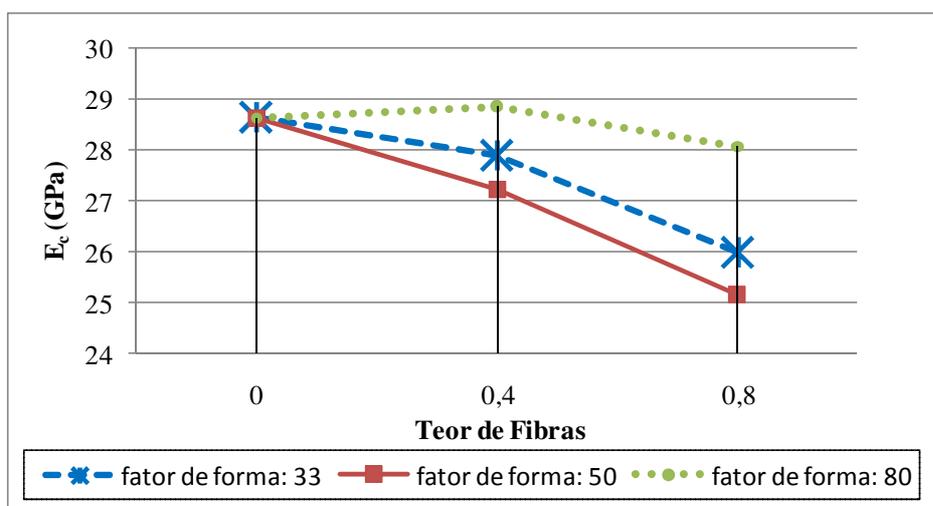


Gráfico 32 – Influência da fração volumétrica das fibras no módulo de elasticidade.

No Gráfico 32 são mostradas as curvas de influência da fração volumétrica das fibras no módulo de elasticidade médio dos concretos ensaiados. Observa-se que a fração volumétrica das fibras não influenciam no valor do módulo de elasticidade dos compósitos, na maioria dos casos a presença das fibras gerou perdas. Apenas no concreto CRFA-L1 verificou uma leve inversão dessa tendência. Ou seja, os dados parecem indicar que a perturbação na matriz causada pelas fibras é mais significativa que sua contribuição para a rigidez do compósito, nos teores estudados. Portanto, o concreto com maior fator de forma e a menor fração volumétrica obteve o maior valor do módulo de elasticidade de todos os concretos.

Em comparação com os resultados obtidos, em análise da influência da fração volumétrica das fibras na matriz cimentícia, Nunes et al. (2006) e Barros (2009) também verificaram pouca influência do valor do módulo de elasticidade dos compósitos com a adição de fibras.

## **5.6. Relação entre as Resistências à Tração e à Compressão**

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as resistências à compressão e à tração são intimamente relacionadas; entretanto, não há proporcionalidade direta. À medida que a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta. Em outras palavras, a razão entre resistência à compressão pela resistência à tração depende do nível geral da resistência à compressão; quanto mais alta a resistência à compressão, menor a razão.

A relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão é da ordem de 10 a 11% para concreto de baixa resistência, de 8 a 9% para o de média resistência e de 7% para o de alta resistência.

A relação entre a resistência à tração/compressão parece ser determinada pelo efeito combinado de vários fatores das propriedades da matriz e da zona de transição na interface. Portanto, Mehta e Monteiro (2008) observaram que não apenas a idade da cura, mas também características da mistura de concreto, como a relação água/cimento, tipo de agregado, aditivos e adições. Por essa razão, a partir dos dados experimentais, juntamente com os dados

teóricos encontrados na literatura, será analisado e verificado a influência da adição das fibras na relação entre a resistência à compressão e à tração.

O Código Modelo CEB-FIP (1990) recomenda que os valores limites mínimo e máximo de resistência à tração característica,  $f_{ctk,max}$  e  $f_{ctk,min}$  podem ser estimados a partir da resistência característica  $f_{ck}$  (em MPa). Portanto, o valor médio da resistência à tração é dado pela relação:

$$f_{ctm} = 1,40 \left( \frac{f_{ck}}{f_{cko}} \right)^{2/3} \quad (31)$$

Onde:  $f_{cko}$  é 10 MPa.

A Tabela 29 apresenta a relação entre as resistências médias da tração pela da compressão dos resultados obtidos no programa experimental desta pesquisa, e a relação entre a resistência à compressão obtida experimentalmente pela equação teórica da resistência à tração, conforme Equação (31) apresentada pelo CEB-FIP (1990).

Tabela 29 – Valor médio da resistência à tração segundo CEB-FIP (1990).

<b>Tipos de Concreto</b>	<b><math>f_c</math> (exp) (MPa)</b>	<b><math>f_{ct}</math> (exp) (MPa)</b>	<b>Relação entre <math>f_{ct} \text{ (exp)}/f_c \text{ (exp)}</math> (%)</b>	<b><math>f_{ctm}</math> (CEB) (MPa)</b>	<b>Relação entre <math>f_{ctm} \text{ (CEB)}/f_c \text{ (exp)}</math> (%)</b>
CRFA-C1	23,17	2,75	11,87	2,18	11,22
CRFA-C2	23,15	2,66	11,49	2,45	10,58
CRFA-M1	22,91	2,75	12,00	2,45	10,58
CRFA-M2	21,76	3,05	14,02	2,43	10,62
CRFA-L1	21,83	3,06	14,02	2,35	10,80
CRFA-L2	24,45	3,69	15,09	2,36	10,79

A partir dos resultados apresentados na Tabela 29, verifica a relação entre as resistências à tração pela resistência à compressão tanto com os dados experimentais, quanto na relação analítica.

Dos resultados experimentais, verifica-se uma média da relação das resistências cerca de 13,1% para os concretos reforçados com fibras de aço, observando a influência da adição das fibras no incremento da resistências à tração, também verificado nos ensaios realizados neste estudo. Já a relação entre as resistências segundo o CEB-FIB (1990) estão em torno de 10,6%,

visto que os valores apresentados da resistência à tração encontrados segundo a Equação (31) são inferiores ao valores encontrados nos ensaios executados. Portanto, a relação entre a resistência à tração por compressão a partir dos resultados experimentais compósitos reforçados com fibras de aço é mais influente no incremento desta relação, do que a relação teórica analisada segundo o CEB-FIP (1990). No entanto, observou que as relações entre as resistências, tanto experimentalmente quanto teoricamente, estão acima 10% em todos os concretos analisados quando se adicionou as fibras.

Portanto, verificou uma boa aproximação da relação entre as resistências à tração e à compressão dos dados experimentais realizados neste trabalho com a relação segundo a literatura, da equação apresentada pelo CEB-FIP (1990), observando que a relação das resistências analítica apresentaram uma pequena distorção dos resultados obtidos experimentalmente de concretos fluidos reforçados com fibras de aço.

## 5.7. Regra das Misturas

A tensão de tração que o concreto fluido reforçado com fibras de aço está submetido, para a resistência máxima do compósito, inicialmente previstas para compósitos com fibras alinhadas, vista no referencial documental no item 2.6.2 (Regra das Misturas), pode ser previstas usando-se uma hipótese da abordagem como material compósito com base em Swamy (1974) apud Mehta e Monteiro (2008), podendo-se escrever:

$$\sigma_c = A \cdot \sigma_m \cdot (1 - V_f) + B \cdot \sigma_f \cdot V_f \cdot f_f \quad (32)$$

Onde:

$\sigma_c$ ,  $\sigma_m$  e  $\sigma_f$  = resistências do compósito (contendo a fibra), da matriz e da fibra, respectivamente;

$V_f$  = fração volumétrica;

$f_f$  = relação de aspecto das fibras (fator de forma);

A e B = constantes.

A partir dos dados dos ensaios experimentais de resistência à tração dos compósitos, foram feitas equações conforme a Equação (32) para cada tipo de concreto, a fim de analisar a influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras de aço que são as variáveis de estudo desta dissertação.

A Tabela 30 apresenta todos os dados de entrada da Equação (32), para cada tipo de concreto, e as equações em função das constantes A e B.

Tabela 30 – Dados de entrada para a Regra das Misturas.

Tipo de Concreto	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	$V_f$	$f_f$	Equação
CRFA-C1	2,75	2,63	1000	0,004	33	$2,75 = 2,691.A + 132.B$
CRFA-C2	2,66	2,63	1000	0,008	33	$2,66 = 2,609.A + 264.B$
CRFA-M1	2,75	2,63	1000	0,004	50	$2,75 = 2,691.A + 200.B$
CRFA-M2	3,05	2,63	1000	0,008	50	$3,05 = 2,609.A + 400.B$
CRFA-L1	3,06	2,63	1000	0,004	80	$3,06 = 2,691.A + 320.B$
CRFA-L2	3,96	2,63	1000	0,008	80	$3,96 = 2,609.A + 640.B$

A partir dos dados apresentados na Tabela 30, observa-se que fração volumétrica das fibras na matriz cimentícia fluida corresponde apenas 0,004 e 0,008, o que verifica que a matriz cimentícia corresponde a valores acima de 95% do compósito. Portanto, verifica que as fibras, apesar de corresponderem a uma pequena quantidade, apresentaram influência significativa no incremento da resistência dos concretos, principalmente nos concretos CRFA-M2, CRFA-L1 e CRFA-L2, em torno de 50% segundo a hipótese da regra das misturas.

No Gráfico 33 apresentado a seguir, pode ser feita uma avaliação dos parâmetros de influência da mistura considerando que a constante A é relacionada com a resistência da matriz, e a constante B está relacionada com a resistência, a fração volumétrica e o fator de forma das fibras, para cada tipo de concreto estudado.

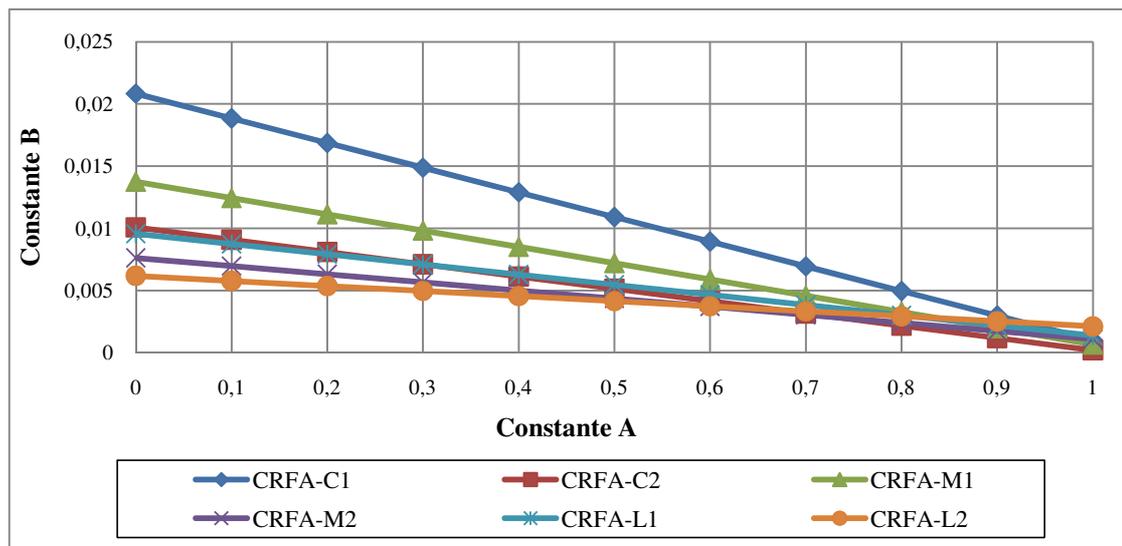


Gráfico 33 – Parâmetros de influência em função das constantes A e B segundo a regra das misturas conforme Swamy (1974) apud Mehta e Monteiro (2008).

No ponto considerado para a influência nula da constante A, o que representa efeito nulo da resistência da matriz, verifica-se uma dispersão de resultados para cada fator de forma e fração volumétrica de fibras do compósito, o que significa que a influência das fibras dispersa o comportamento, sendo portanto mais significativo se comparado com pontos de influência quase nula da constante B, ou seja, participação de influência nula das fibras, o que verifica um agrupamento de resultados quando não tem influência das fibras.

Pode ser observado, as fibras com pequena fração volumétrica numa matriz cimentícia, influenciam no comportamento do compósito. Portanto, verifica-se que a fração volumétrica e o fator de forma são bastante influentes no incremento da resistência à tração, também observado nos ensaios experimentais, conforme analisados nos itens anteriores.

## 5.8. Comentários Adicionais

Com a avaliação experimental do comportamento do concreto fluido reforçado com fibras de aço, pode-se comprovar que a fração volumétrica e o fator de forma das fibras de aço são os fatores de maior importância. Aliado a isso, os procedimentos de execução, como a

incompatibilidade entre o comprimento das fibras e a seção transversal do corpo-de-prova, favorecendo o alinhamento das fibras em uma única direção, a formação de bolhas de ar na mistura, pode agravar algumas propriedades do compósito.

Com os resultados obtidos nos ensaios de diversas amostras, nas quais as variáveis eram o teor e o fator de forma das fibras de aço do concreto fluido, pode-se dizer que a adição de fibra de aço não traz benefícios para a trabalhabilidade e incorporação de ar das misturas, entretanto, aumenta a resistência à tração dos compósitos. Aumentando-se a fração volumétrica e o fator de forma das fibras, sem alterações na resistência da matriz cimentícia fluida de referência, tem-se um aumento significativo na resistência à tração do concreto.

A partir da análise feita nesse capítulo, serão tiradas as conclusões para o comportamento do concreto fluido reforçado com fibras de aço estudada.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES**

Nesta seção serão apresentadas as principais conclusões extraídas desta pesquisa, obtidas a partir da análise dos ensaios de comportamento mecânico dos concretos fluidos reforçados com fibras de aço, das comparações entre a relação das resistências à tração e à compressão, e da regra das misturas dos compósitos segundo a literatura. Serão também apresentadas sugestões para trabalhos futuros na área de interesse.

Tendo em vista que o emprego de concretos reforçados com fibras vem crescendo ao longo das últimas décadas, e atualmente uma variedade de fibras comercialmente disponíveis no mercado, inclusive o brasileiro, para uso como reforço de matrizes cimentícias, com destaque as fibras de aço. Em consequência desse crescimento, os concretos reforçados com fibras de aço tornam-se foco de vários estudos e programas de pesquisa, com o objetivo de quantificar as melhorias provocadas em suas propriedades e otimizar os métodos de projetos e fabricação deste novo material, para que seu consumo se expanda ainda mais, inclusive com a redução de custos.

O presente estudo buscou contribuir nesta direção, coletando dados para esclarecer como as fibras de aço com características diferentes, disponíveis no mercado, se comportam, em termos de desempenho mecânico. Além disso, buscou determinar quais as fibras mais eficientes para a melhoria da resistência à tração por compressão diametral.

### **6.1. Considerações**

Nesse levantamento documental, bem como nas experimentações desenvolvidas no trabalho, viu-se que os parâmetros que mais influenciam o comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço são a fração volumétrica e o fator de forma. Além disso, durante o processo de execução dos modelos ensaiados, pode-se perceber que o uso de aditivos plastificantes são bem sensíveis nas propriedades mecânicas do concreto.

A trabalhabilidade é afetada pela adição de fibras, em proporção direta à fração volumétrica e o fator de forma das fibras utilizadas (BENTUR; MINDESS, 1990). A adição de aditivos plastificantes para melhorar esta trabalhabilidade, propicia a combinação do desempenho mecânico fornecidos pelas fibras com uma boa dispersão das mesmas. Apesar das recomendações fornecidas pelos fabricantes, o cuidado com a quantidade de aditivo na mistura deve ser sempre levado em conta, a fim de evitar um concreto poroso, conseqüente do elevado teor de ar incorporado nas misturas.

Em se tratando de matrizes fluidas, foi observado que os compósitos com teor de 0,4% de fibras com fator de forma de 30 e de 50, apresentaram consistência fluida, correspondendo o melhor percentual de fibras para compósitos fluidos. No entanto, os demais concretos apesar de corresponderem uma consistência mole, apresentaram melhores resultados na resistência à tração.

Os ensaios realizados confirmaram que o concreto reforçado com fibras de aço com maior fração volumétrica e maior fator de forma promoveu melhores condições de aderência na matriz, desse modo, ocasionando ganhos significativos nas resistências à compressão e à tração com relação ao concreto fluido de referência sem fibras.

A partir destas constatações, e levando em conta dos objetivos do trabalho, propostas na Seção 1, foram estabelecidas algumas conclusões, apresentadas a seguir.

## **6.2. Conclusões Específicas**

A realização do programa experimental proposto neste trabalho permitiu coletar subsídios para que fossem elaboradas as conclusões apresentadas a seguir. Salienta-se que as mesmas são válidas para os tipos de fibras de aço e matrizes cimentícias fluidas ensaiadas neste estudo.

*Em relação às variáveis de estudo:*

- A incorporação das fibras interfere nas propriedades dos compósitos no estado fresco e endurecido. No estado fresco, incorporação de fibras provoca perdas na trabalhabilidade e no teor de ar incorporado nas misturas. No estado endurecido, a influência é mais significativa no desempenho dos compósitos frente às resistências de tração do que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.
- O uso de teor de fibras mais elevados, apesar de interferir na trabalhabilidade das misturas, provoca incrementos significativos no desempenho dos compósitos, especialmente nos teores  $63 \text{ kg/m}^3$ . Em termos da resistência à tração por compressão diametral, durante a realização do ensaio observou-se uma ruptura brusca nos concretos sem adição de fibras, o que de fato, as fibras influenciam nesse comportamento, minimizando e interceptando as fissuras durante a aplicação de qualquer carregamento.
- O fator de forma das fibras de aço passa a ser um parâmetro bastante influente, sendo que os compósitos com fibras de fator de forma maior tendem a apresentar melhores resultados nas resistências à compressão e à tração.

*Em relação ao desempenho dos compósitos:*

- A resistência à compressão é afetada positivamente quando se usam teores elevados e fibras longas, embora esta influência não seja a característica principal das fibras. Este aumento pode ter sido ocasionado pela diminuição da água no concreto, devido à adição das fibras de aço.
- A resistência à tração por compressão diametral dos compósitos ensaiados foi incrementado de forma significativa com o aumento do fator de forma de fibras e, principalmente pelo seu baixo teor de fibras, considerado relativamente com pouca influência segundo o levantamento bibliográfico realizado, contendo apenas 0,4% e 0,8% de teores de fibras de aço.
- O módulo de elasticidade não é afetado pela adição das fibras, sendo levemente reduzido à medida que se aumenta o fator de forma e a fração volumétrica das fibras. Apesar das fibras de aço possuir módulo de elasticidade superior ao da matriz cimentícia, a presença da mesma numa matriz cimentícia fluida torna a estrutura interna do concreto menos deformável.

*Em relação à resistência à tração a partir da resistência à compressão:*

- A partir dos ensaios realizados, verificou-se que a média da resistência à tração dos compósitos reforçados com fibras de aço é de 13,1% da sua resistência à compressão.
- Os valores da resistência à tração segundo a equação teórica do CEB-FIP (1990), a partir dos resultados da resistência média à compressão dos compósitos ensaiados, apresentaram menor do que valores dos compósitos ensaiados.
- A relação entre as resistências, com os valores teóricos da resistência à tração segundo CEB-FIP (1990) apresentaram menor do que a relação entre as resistências experimentais, ou seja, a resistência à tração foi cerca de 10,6% da resistência à compressão.

*Em relação à regra das misturas:*

- A influência nula da constante A verifica-se uma dispersão de resultados para cada fator de forma e fração volumétrica de fibras do compósito, o que significa que a influência das fibras dispersa o comportamento.
- A influência quase nula da constante B verifica um agrupamento de resultados quando não tem influência das fibras.
- As fibras de aço, apesar de corresponderem uma pequena quantidade, apresentaram influência no incremento da resistência dos concretos, principalmente nos concretos CRFA-M2, CRFA-L1 e CRFA-L2, em torno de 50% segundo a hipótese da regra das misturas.

*Portanto, de forma geral, a partir dos dados coletados, pode-se extrair as seguintes conclusões e recomendações gerais:*

- O emprego de fibras de aço para o incremento da resistência à tração por compressão diametral é viável e eficiente;
- Preferencialmente devem-se utilizar fator de forma e teores mais elevados, desde que sejam tomados os devidos cuidados com a trabalhabilidade;
- Deve-se sempre atentar para a quantidade adequada de aditivos plastificante, a fim de evitar perdas no desempenho final dos compósitos;

### 6.3. Sugestões para Trabalhos Futuros

Ao final do trabalho percebeu-se que a abordagem dada ao assunto não é conclusiva, apresentando possibilidades de continuidade da pesquisa. Considera-se que as seguintes sugestões de trabalhos poderiam ser implementadas em estudos posteriores:

- Desenvolver método de dosagem racional para concretos fluidos fibrosos, de forma que possibilite a utilização de maiores frações volumétricas de fibras à mistura, sem prejuízo das propriedades de fluidas do concreto, levando em consideração os custos totais relativos à produção e aplicação;
- Determinar teores e comprimentos críticos para os diversos tipos de fibras de aço, a fim de validar as equações apresentadas no Referencial Documental, e assim buscar a eficiência máxima dos compósitos gerados;
- Determinar quantidades máximas para o uso de aditivo plastificante, a fim de não obter prejuízos no desempenho dos compósitos;
- Determinar as curvas tensão x deformações no comportamento de concretos submetidos por tração direta;
- Avaliar os efeitos das fibras de aço no comportamento de concretos submetidos à flexão;
- Realizar análises comparativas de desempenho com outros tipos de fibras, em busca de materiais com desempenho equivalentes ou superiores ao dos compósitos com fibras de aço;
- Dosar, produzir e caracterizar concretos fluidos fibrosos de baixo impacto ambiental, utilizando materiais recicláveis e/ou resíduos industriais e agrícolas;
- Realizar estudos de modelagem numérica para os concretos fluidos fibrosos, ajustando-os em um modelo constitutivo.

Sendo assim, vê-se que ainda há muito que percorrer para considerar que todos os parâmetros estão definidos e este trabalho representa apenas mais um passo no caminho do que ainda falta ser estudado.

## REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V. O Emprego de Materiais Fibrosos na Construção Civil. In: **Simpósio internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil**, 1993, São Paulo. p. 11-25.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544-4R-88). In: **Manual of concrete Practice**. Detroit, Michigan, v. 85. 1988.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.3R-93). In: **Manual of concrete Practice**. Detroit, Michigan, v. 90. 1993.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete (ACI 544.1R-96). In: **Manual of concrete Practice**. Detroit, Michigan, v. 93. 1996.
- ANDOLFATO, R. P. **Controle tecnológico básico do concreto**. Universidade Estadual Paulista. Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural. 33 f. Ilha Solteira, São Paulo, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto. Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 47**: Concreto. Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9833**: Concreto fresco. Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto. Especificação. Rio de Janeiro, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Modelagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2004.

BALAGURU, P. N., SHAH, S. P. **Fiber-Reinforced Cement Composites**. McGraw-Hill International Editions, 1992.

BALAGURU, P. Contribution of fibers to crack reduction of cement composites during the initial and final setting period. **In: Journal of Materials. American Concrete Institute**. May-June, 1994.

BARROS, A. R. **Avaliação do comportamento do concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 178 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) –Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

BARROS, J. O. Estado-da-arte dos betões reforçado com fibras. **Eng. Civil UM, Departamento de Eng. Civil, Univ. do Minho**, 1996, Guimarães, Portugal, n. 3, p. 29-47.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. London and New York: Modern Concrete Technology Series, 2 ed. 2007.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas com Fibra de Aramida Kevlar**. 2003. 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CECCATO, M. R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 1998, 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –Universidade de São Paulo, 1998.

CHANH, N. V. Steel fiber reinforced concrete. **In: Joint Seminar on Concrete Engineering**. Ho Chi Minh City University of Technology, 2005. p. 108-116.

CHO, S.; KIM, Y. Effects of Steel Fibers on Short Beams Loaded in Shear. **In: ACI Structural Journal**, 2003. v. 100, n. 6, p. 765-774.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB-FIP Model Code 1990. **CEB-FIB 1990**. Lausanne, 1993.

CUCCHIARA, C.; MENDOLA, L. L.; PAPIA, M. Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement. **In: Cement and Concrete Composites**, 2004, v. 26, n. 7, p. 777-786.

DIPSIA, M. **Mechanical properties of superplasticized steel fibre high strength semi-lightweight concrete**. M.S. Thesis, Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, 1987. 128 p.

DRAMIX. **Catálogo de Produtos – Aços Longos**. Disponível em: <[http://www.belgo.com.br/produtos/construcao\\_civil/dramix/pdf/dramix.pdf](http://www.belgo.com.br/produtos/construcao_civil/dramix/pdf/dramix.pdf)>. Acesso em: 17 jul. 2009.

FANELLA, D. A. e NAAMAN, A. E. Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression. **In: ACI Journal**, 1985, v. 82, n. 4, p. 475-483.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de Aço**. 2000. 69 p. Boletim Técnico, Série BT/PCC/260– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras**. Concreto Ensino, Pesquisa e Realizações. Ibracon, v. 2. São Paulo: Ippis Gráfica e Editora, 2005. cap.39, p.1195-1225.

FIGUEIREDO, A. D.; BITTENCOURT, T. N.; CALDAS, A. Propriedades de concreto reforçados com fibras de aço (CRFA): comparação entre métodos de medida. **In: Simpósio sobre Estruturas de Concreto**, 5., 2006. p.10

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M. A nova normalização brasileira sobre fibras de aço. **In: Concreto & Construções**, 2008. IBRACON. Ano XXXVI. Nº 50. ISSN 1809-7197. p. 67-75.

FREIRE, W. J. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. São Paulo: Unicamp, 2003.

FUGII, A. P.; RAMOS, M. F.; AKASAKI, J. L. Avaliação de tubos de concreto reforçados com fibras curtas de aço. **In: Congresso Brasileiro de Concreto**, 50., 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: 2008. p. 15

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural: tópicos aplicados**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2008.

GARCEZ, E. O. **Análise Teórico-Experimental do Comportamento de Concretos Reforçados com Fibras de Aço Submetidos a Cargas de Impacto**. 2005. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GARCEZ, E. O.; CAETANO, L. C.; . Análise experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto. **In: Congresso Brasileiro de Concreto**, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2006. p. 12

GOPALARATNAM, V. S.; GETTU, R. On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. **In: Cement & Concrete Composites**, 1995. v.17, n. 3, p. 239 – 254.

GROSSI, B. F. **Uma contribuição para a modelagem numérica do concreto com fibras curtas de aço**. 2006. 227p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas)- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

GUIBLIN, C. R.; SAITO, J.; MANCINI FILHO, V.; MULLER NETO, J. Pavimento de concreto com fibras de aço utilizado na ampliação do Terminal de Contêineres de Paranaguá. **In: Congresso Brasileiro de Concreto**, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2006. p. 16

HANAI, J. B. Comportamento Resistente, Ductibilidade e Confinamento. **Concreto Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ibracon, v. 1. São Paulo: Ippis Gráfica e Editora, 2005. cap. 6.

HANNANT, L. **Fibre-reinforced Cements and Concretes**. 2. ed. London, 1994. 518 p.

ILLSTON, J.M. **Construction Materials: Their Nature and Behavior**. 2. ed. London, 1994. 518 p.

IMAGEM. **Casa construída no ano de 1540**. Disponível em:

<<http://flickr.com/photos/kafkan/2332411511/sizes/o/>>. Acesso em: 29 jun. 2009.

JOHNSTON, C. D. **Fibre-reinforced cement and concrete: advances in concrete technology**. 2ed. London, 1994. p.603-673.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto – Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. v. 1, 2. ed. Rio de Janeiro: Livraria Interciência, 1982.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L.C., **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 313 p.

LIM, D. H.; OH, B. H. Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams. **In: Engineering Structures**. 1999, v.21. n. 10. p. 937-944.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas**. 2004, 144 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas)–Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

LOBÃO, L. M. M. **Taxa de Armadura Longitudinal de Tração Mínima em Vigas de Concreto de Resistência Normal com Fibras de Aço**. 2005. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MACCAFERRI. **Fibras como Elemento estrutural para reforço de Concreto**. Disponível em: <<http://www.macaferri.com>> Acesso em: 10 maio 2009.

MANSUR, A. A. P; MANSUR, H. S. Avaliação do teor de ar incorporado em argamassas modificadas com poli (álcool vinílico). In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Materiais, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: 2006. P. 3788 – 3799.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008. 674p.

NANNI, A. Splitting-tension test for fiber reinforced concrete. **In: ACI Materials Journal**, 1988. v. 85, n.4, p. 229-233.

NARAYANA, R; PALANGIAN, A. S. K. Factors influencing the strenght of steel fibre reinforced concrete. **In: Rilem Symposium FRC 86**, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, 1986. v. 1.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NUNES, F. G. T.; ARAÚJO, D. L.; GUERRA, E. A. Influência da adição de fibras de aço nas propriedades mecânicas do concreto. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2006. p. 16

NUNES, L. N.; AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço**, 1998. 26 p. Boletim Técnico, Série BT/PCC/225 – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, S. L. **Taxa de Armadura Longitudinal Mínima em Vigas de Concreto de Alta Resistência com Fibras de Aço**. 2005. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

OUAAR, A., **Micromechanics of rate-independent multi-phase composites. Application to Steel Fiber-Reinforced Concrete**. 2006. 259 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Université Catholique de Louvain, Bélgica, 2006.

PASA, V. F. **Análise do Comportamento de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço via Método dos Elementos Finitos**. 2007. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PROENÇA, S. P. B. **Sobre modelos matemáticos do comportamento não-linear do concreto: análise crítica e contribuições**. 1998. 271 p. Tese (Doutorado em Engenharia)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

REALMIX. **Importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco**. Informativo Técnico 2. Disponível em: [www.realmixconcreto.com.br](http://www.realmixconcreto.com.br). Acesso em: 17 de janeiro de 2010.

RESENDE, F. M. **Influência das Fibras de Aço, Polipropileno e Sisal no Amortecimento de Concretos de Resistência Normal e de Alto Desempenho**. 2003. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. 3. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, Estudo Técnico 66, 1998. 32 p.

SANTANA, J. A. **Viabilidade do uso de resíduos de britagem em concretos de estruturas pré-fabricadas em Salvador**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana)-Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

SAVAGE, G. **Carbon-Carbon Composites**, London, UK: Chapman & Hall, 1993.

SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras – Correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: Pini, 1994.

SHARMA, A. K. Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. **In: ACI Journal**, 1986. v. 83, n. 4, p. 624-628.

SISTEMA PERGANUM, **Divisão de Bibliotecas e Documentos**. PUC-Rio, Certificação Digital nº 0310260. Disponível em: [http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0310260\\_06\\_cap\\_02.pdf](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0310260_06_cap_02.pdf). Acesso em 15 de agosto de 2009.

SIMÕES, L. C. **Um Modelo Constitutivo para Concreto com Fibras**. 1998. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

TANESI, J. A. **A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1999.

TANESI, J.; AGOPYAN, V. Compósitos reforçados com fibras plásticas para construção civil. In: Encontro tecnologia de sistemas plásticos na construção civil, 2., 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1997. p. 219-252

TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; MARANGON, E. Estudo reológico e mecânico de concretos fibrosos auto-adensáveis. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 50., 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: 2008. p. 10

TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; VELASCO, R. V. Análise experimental e numérica do comportamento térmico de concretos reforçados com fibras de aço. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 50., 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: 2008. p. 17

VELASCO, R. V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. 2008. 388 f. Tese (Doutorado em Estruturas)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

VELASCO, R. V. **Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas**. 2002. 200 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

YAZICI, Ş.; GOZDE, İ.; VOLKAN, T. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. In: **Construction and Building Materials**, 2007. v. 21, p. 1250-1253.

ZIA, P., AHMAD, S., LEMING, M. State of the art Report: High Performance Concrete. In: **Federal Highway Administration**, McLean, 1994.

WEILER, B.; GROSSE, C. Pullout behaviour of fibers in steel fiber reinforced concrete. In: **Annual Journal on Research and Testing Materials**, v. 7., 1996, p. 116-127.