

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO  
COMPORTAMENTO DE CONCRETOS REFORÇADOS COM  
FIBRAS DE AÇO SUBMETIDOS A CARGAS DE IMPACTO**

ESTELA OLIARI GARCEZ

Orientador: Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Co-orientador: Prof. Roberto Domingo Rios

Porto Alegre  
Abril 2005

**Estela Oliari Garcez**

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO  
COMPORTAMENTO DE CONCRETOS REFORÇADOS COM  
FIBRAS DE AÇO QUANDO SUBMETIDOS A CARGAS DE  
IMPACTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre

Abril 2005

**ESTELA OLIARI GARCEZ**

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO  
COMPORTAMENTO DE CONCRETOS REFORÇADOS COM  
FIBRAS DE AÇO SUBMETIDOS A CARGAS DE IMPACTO**

Porto Alegre, 15 de abril de 2005.

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Ph.D., University of Leeds  
Orientador

Prof. Roberto Domingo Rios  
Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Co-orientador

Prof. Américo Campos Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr. (UFSC)**  
Dr., EPUSP/SP

**Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)**  
Dr., EPUSP/SP

**Prof. Virgínia Maria Rosito D'Avila (UFRGS)**  
Dr., PPGEC/UFRGS

À minha família.

## O CONSELHO

Quando te decidires : Segue!  
Não esperes que o vento  
cubra de flores o 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

GARCEZ, E.A. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre.

Quando o concreto é submetido a ações especiais, como cargas cíclicas ou ação de cargas de impacto, modificações em sua composição são necessárias, já que o concreto não apresenta desempenho satisfatório à tração, o que compromete o seu comportamento frente à ação de cargas dinâmicas. Uma alternativa para amenizar esta deficiência consiste em adicionar fibras ao concreto. Estas atuam como reforços à tração, transformando a matriz cimentícia, tipicamente frágil, em um material que apresenta boa resistência residual após a fissuração. Buscando colaborar na avaliação da eficiência de diferentes tipos de fibras, o presente trabalho analisa o comportamento de concretos com fibras de aço, submetidos ao impacto, avaliando a influência do fator de forma, do comprimento e do teor de fibras, assim como do tamanho do agregado. São ainda analisados os efeitos da incorporação de fibras na resistência à compressão, na resistência à tração por compressão diametral, no módulo de elasticidade e na tenacidade dos compósitos. Adicionalmente, é executada uma comparação entre os resultados experimentais e os derivados de um esquema de modelagem da situação de impacto através do uso do método de elementos discretos. Buscou-se, através da modelagem teórica, executar um mapeamento dos danos, provocados por cargas de impacto incrementais, ao longo do tempo, bem como determinar as energias necessárias para levar as placas até a ruptura. Os resultados indicam que a incorporação de fibras de aço não consegue retardar o aparecimento da primeira fissura, mas aumenta significativamente a tenacidade dos compósitos. Fibras mais longas e com maior fator de forma tendem a ser mais eficientes, desde que se supere um teor de fibras mínimo, que neste trabalho ficou em torno de 100.000 fibras/m<sup>3</sup>, para fibras longas (50-60 mm) e de 400.000 fibras/m<sup>3</sup>, para fibras curtas, cuja ancoragem é menos eficiente. O método de teste de impacto por queda de esfera se mostrou adequado e sensível, porém o esquema de modelagem numérica testado necessita ser refinado para permitir uma adequada simulação do comportamento de concretos com fibras.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras de aço; cargas de impacto; método dos elementos discretos.

## ABSTRACT

GARCEZ, E.A. **A numerical and experimental analysis of steel fiber reinforced concretes subjected to impact loads**. 2005. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre.

When submitted to special loading patterns, derived from dynamical actions such as cyclic or impact loads, concrete elements need to be reinforced, in order to resist the tensile stresses. A feasible alternative, in such cases, is to incorporate fibers in the concrete matrix. The fibers act as a tensile reinforcement, transforming the fragile cement matrix into a composite with significant post-cracking residual strength.

In order to contribute with the data collection about the efficiency of different fiber types, the present research work presents an analysis of the behavior of steel fiber reinforced concretes subjected to impact loads. The work investigates the influences of changes in the shape factor, length and amount of fibers. The effects of these combinations on other basic properties of the composites, such as compression strength, split cylinder tensile strength, Young's modulus and tenacity is also measured. Additionally, a comparison is made between the experimental results from the impact tests and the estimates obtained from a theoretical model that uses the discrete element method (DEM). This theoretical approach aimed to determine if the model was able to simulate the damage evolution over time generated by the increasing impacts loads, as well as to determine the total energy necessary to crack and break the specimens. The results obtained pointed out that the introduction of steel fibers does not affect the energy for the first crack but increases significantly the tenacity of the composite. Longer fibers, with greater shape factors, tend to be more efficient, provided that the fiber content is sufficiently high. The minimum recommended fiber content, according to the data from this research, may be around 100.000 fibers/m<sup>3</sup>, for longer fibers (50-60 mm). Or around 400.000 fibers/m<sup>3</sup>, for shorter fibers, which are not so efficient in terms of anchorage. The impact test method developed was considered adequate, being sensitive to the phenomenon and providing reliable data. The DEM model, however, needs to be refined to be able to deal with fiber concrete composites.

Keywords: steel fiber reinforced concrete; composite materials; impact loads; discrete element method.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 HIPÓTESES.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5 LIMITAÇÕES.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....</b>	<b>5</b>
<b>2 COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRAS.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 A FUNÇÃO DAS FIBRAS NA MATRIZ CIMENTÍCIA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 A INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.1 Comportamento Pré-Fissuração.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.2 Comportamento Pós-Fissuração.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3.3 Mecanismo de Arrancamento das Fibras de Aço.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4 PARÂMETROS INFLUENTES NA INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.1 Teor de Fibras.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.2 Comprimento Crítico.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.3 Fator de Forma.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.4 Módulo de Elasticidade das Fibras .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.5 Distribuição e Ancoragem das Fibras.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.6 Volume Crítico.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5 FIBRAS MAIS UTILIZADAS NO REFORÇO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS.....</b>	<b>27</b>
<b>2.5.1 Fibras de Vidro.....</b>	<b>27</b>
<b>2.5.2 Fibras Sintéticas .....</b>	<b>29</b>
<b>2.5.3 Fibras Naturais .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.4 Fibras de Aço .....</b>	<b>31</b>
<b>3 DESEMPENHO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 COMPORTAMENTO NO ESTADO ENDURECIDO.....</b>	<b>36</b>



3.3.1 Tenacidade.....	36
3.3.2 Comportamento à Compressão.....	37
3.3.3 Comportamento à Tração.....	38
3.3.4 Comportamento à Flexão.....	38
3.3.5 Comportamento ao Cisalhamento.....	39
3.3.6 Comportamento à Torção.....	39
3.3.7 Comportamento à Abrasão, Erosão e Cavitação.....	39
3.3.8 Comportamento à Fadiga.....	40
3.3.9 Comportamento ao Impacto.....	40
3.4 DURABILIDADE DE COMPÓSITOS DE CONCRETO E FIBRAS DE AÇO	42
3.5 USOS ESTRUTURAIS DO CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO.....	43
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	45
4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	45
4.2 VARIÁVEIS DE ESTUDO.....	47
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS.....	49
4.3.1 Cimento.....	49
4.3.2 Agregado Graúdo.....	49
4.3.3 Agregado Miúdo.....	50
4.3.4 Aditivo.....	51
4.3.5 Água de Amassamento.....	51
4.4 DETERMINAÇÃO DO TRAÇO DO CONCRETO UTILIZADO.....	51
4.5 MOLDAGEM E CURA.....	51
4.6 ENSAIOS REALIZADOS.....	52
4.6.1 Resistência à Compressão Simples .....	52
4.6.2 Resistência à Compressão Diametral.....	53
4.6.3 Módulo de Elasticidade.....	53
4.6.4 Ensaios de Impacto – Queda de Esfera.....	54
4.6.5 Ensaios de Tenacidade.....	57
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	58
5.1 ANÁLISE DA PERDA DE TRABALHABILIDADE DA MISTURA.....	58
5.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA DA FIBRA.....	60
5.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA FIBRA.....	63
5.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO AGREGADO.....	64
5.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS .....	68
5.6 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS.....	74

<b>5.7 ANÁLISE DA TENACIDADE.....</b>	<b>75</b>
<b>6 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO QUANDO SUBMETIDO A CARGAS DE IMPACTO.....</b>	<b>78</b>
<b>6.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>78</b>
<b>6.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS.....</b>	<b>79</b>
<b>6.3 FORMULAÇÃO EMPREGADA NO TRABALHO.....</b>	<b>81</b>
<b>6.3.1 Cálculo dos Coeficientes de Rigidez Equivalentes das Barras .....</b>	<b>81</b>
<b>6.3.2 Solução da Equação do Movimento.....</b>	<b>82</b>
<b>6.3.3 Intervalo de Integração.....</b>	<b>84</b>
<b>6.3.4 Fratura no Concreto.....</b>	<b>84</b>
<b>6.3.5 Critério de Ruptura Empregado.....</b>	<b>90</b>
<b>6.3.6 Consideração da Não-Homogeneidade dos Materiais.....</b>	<b>92</b>
<b>6.3.7 Avaliação dos Efeitos das Cargas de Impacto.....</b>	<b>92</b>
<b>6.4 SIMULAÇÕES.....</b>	<b>94</b>
<b>6.4.1 Definição das Propriedades do Modelo.....</b>	<b>94</b>
<b>6.4.2 Definição da Região de Aplicação da Carga.....</b>	<b>95</b>
<b>6.4.3 Modelo Simulado.....</b>	<b>97</b>
<b>6.4.4 Resultados.....</b>	<b>97</b>
<b>6.4.5 Considerações Finais.....</b>	<b>100</b>
<b>7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>102</b>
<b>7.1 CONSIDERAÇÕES .....</b>	<b>102</b>
<b>7.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....</b>	<b>104</b>
<b>7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>107</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>109</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mecanismo de concentração de tensões na tração no extremo das microfissuras.....	7
Figura 2.2 - Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões.....	8
Figura 2.3 -. Representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz após desligamento parcial da fibra.....	11
Figura 2.4 - Representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz imediatamente após a fissura.....	11
Figura 2.5 - Representação das zonas de transferência de tensões ao longo de uma fissura.....	12
Figura 2.6 - Evolução do processo de arrancamento de uma fibra de aço em uma matriz poliméricas de resina epóxi .....	14
Figura 2.7 - Elementos de concreto reforçado com fibras de aço após a ruptura.....	14
Figura 2.8 - Curvas de arrancamento típicas para fibras de aço lisas e deformadas.....	15
Figura 2.9 - Curvas típicas de tensão de tração x deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras .....	16
Figura 2.10 - Representação da aderência fibra-matriz.....	17
Figura 2.11 - Tensão máxima atingida pela fibra, em relação à tensão última admissível, em função do comprimento da fibra.....	18
Figura 2.12 - Fator de forma.....	19
Figura 2.13 - Diagrama tensão x deformação elástica.....	21
Figura 2.14 - Representação do comportamento de uma fibra dúctil na vizinhança da fissura.....	22
Figura 2.15 - Curva tensão x deformação do compósito.....	24

Figura 2.16 - Modelo utilizado para representar o processo de arrancamento de uma fibra.....	25
Figura 2.17 - Comportamento de compósitos reforçados com diferentes teores de fibras durante o ensaio de tração na flexão.....	26
Figura 2.18 - Fibras de vidro.....	28
Figura 2.19 - Fios de fibra de aramida.....	29
Figura 2.20 - Aspecto das (a) fibras de polipropileno convencionais, de superfície lisa e (b) fibras de polipropileno corrugadas .....	30
Figura 2.21 - Fibra sintética estrutural.....	30
Figura 2.22 - Fibras de aço encontradas no mercado.....	31
Figura 2.23 - Fibras de aço com extremidades deformadas, coladas em forma de pentes.....	32
Figura 2.24 - Fibras de aço com extremidades deformadas, produzidas soltas..	32
Figura 3.1 - Critérios da ASTM para determinação dos parâmetros de tenacidade.....	37
Figura 3.2 - Exemplos de aplicação de concretos reforçado com fibras em (a) tubos de concreto, (b) concreto projetado, (c) pisos industriais e (d) radiers.....	44
Figura 4.1 - Fluxograma de pesquisa adotado.....	46
Figura 4.2 - Fibras utilizadas no programa experimental.....	48
Figura 4.3 - Ensaio de módulo de elasticidade, realizado com o auxílio de dois transdutores tipo LVDT.....	54
Figura 4.4 - Esquema do ensaio de queda de esfera.....	55
Figura 4.5 - Detalhe da placa de concreto no equipamento de ensaio de queda de esfera.....	56
Figura 4.6 - Posicionamento dos deflectômetros.....	56
Figura 4.7 - Esquema de ensaio estático.....	57
Figura 5.1 - Ensaio de abatimento de tronco de cone.....	59

Figura 5.2 - Influência do fator de forma na resistência à compressão e no módulo de elasticidade.....	60
Figura 5.3 - Influência do fator de forma na resistência à tração por compressão diametral.....	61
Figura 5.4 - Influência do fator de forma na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura.....	62
Figura 5.5 - Influência do fator de forma na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e energia de ruptura, para os diversos teores de moldagem.....	62
Figura 5.6 - Influência do comprimento das fibras na resistência à compressão e no módulo de elasticidade.....	63
Figura 5.7 - Influência do comprimento na resistência à tração.....	64
Figura 5.8 - Influência do comprimento na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura.....	65
Figura 5.9 - Influência do tamanho do agregado na resistência à compressão e no módulo de elasticidade.....	65
Figura 5.10 - Influência do tamanho do agregado na resistência à tração.....	66
Figura 5.11 - Influência do tamanho do agregado e do teor de fibras na resistência à tração por compressão diametral dos compósitos.....	66
Figura 5.12 - Influência do tamanho do agregado na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura dos compósitos.....	67
Figura 5.13 - Influência do tamanho do agregado na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para ruptura dos compósitos.....	68
Figura 5.14 - Influência do teor na resistência à compressão e no módulo de elasticidade dos compósitos gerados com as fibras 45/30, 45/50, 65/60 e 80/60.....	69
Figura 5.15 - Influência do teor na resistência à tração dos compósitos gerados com as fibras 45/30, 45/50, 65/60 e 80/60.....	70
Figura 5.16 - Influência do teor na energia necessária para a primeira fissura e para a ruptura dos compósitos reforçados com as fibras 45/30, 45/50, 65/60 e 80/60.....	71
Figura 5.17 - Evolução da energia necessária para o aparecimento da primeira fissura para todas as fibras e teores ensaiados.....	71

Figura 5.18 - Evolução da energia necessária para a ruptura dos compósitos todas as fibras e teores ensaiados.....	72
Figura 5.19 - Evolução da energia necessária para o aparecimento da primeira fissura em relação ao número de fibras por $m^3$ .....	73
Figura 5.20 - Evolução da energia necessária para a ruptura dos compósitos em relação ao número de fibras por $m^3$ .....	73
Figura 5.21 – Evolução dos deslocamentos verticais.....	74
Figura 5.22 – Gráfico de carga x deslocamento empregados para análise da evolução da tenacidade com o aumento do teor de fibras tipo 45/30.....	75
Figura 5.23 – Gráfico de carga x deslocamento empregados para análise da evolução da tenacidade com o aumento do teor de fibras tipo 80/60.....	76
Figura 5.24 – Evolução da tenacidade com o aumento do teor de fibras tipo 45/30.....	77
Figura 5.25 – Evolução da tenacidade com o aumento do teor de fibras tipo 80/60.....	77
Figura 6.1 - Esquema do Método dos Elementos Distintos, apresentado por Cundall.....	80
Figura 6.2 - Módulo cúbico apresentado por Nayfeh & Hefzy a) Módulo Cúbico, b) e c) composição de prismas.....	81
Figura 6.3 - Concentração de tensões na extremidade de uma trinca.....	86
Figura 6.4 - Fratura em diferentes materiais. (L): Zona Linear, (N): Zona não linear e (F): Zona Microfissurada.....	87
Figura 6.5 - Diagramas (s – e) característicos de materiais dúcteis e não dúcteis.....	88
Figura 6.6 - Distribuição das tensões nas proximidades da ponta da fissura para o modelo da fissura fictícia proposto por Hillerborg .....	89
Figura 6.7 - Relação constitutiva elementar implementada por Rocha .....	90
Figura 6.8 - Diagrama tensão x tempo gerados no programa Working Model™.....	93
Figura 6.9 - Gráfico força x altura, gerado com os valores obtidos no programa Working Model™ e regressão encontrada.....	93

Figura 6.9 - Discretização das placas em elementos normais e diagonais.....	95
Figura 6.10 - Alteração da seção de aplicação de carga no decorrer do tempo (a) correspondente aos primeiros 8 ms de contato e (b) correspondente aos 7 ms posteriores.....	96
Figura 6.11 - Gráfico carga x tempo, representando as diversas alturas de queda do ensaio.....	96
Figura 6.12 - Esquema de ruptura encontrado aos 0,318 s de simulação.....	98
Figura 6.13 - Esquema de ruptura encontrado aos 0,378s de simulação.....	98
Figura 6.14 - Esquema de ruptura encontrado aos 0,498s de simulação.....	98
Figura 6.15 - Perspectiva do esquema de ruptura para o tempo 0,498s.....	99
Figura 6.15 - Gráfico reação x tempo para as diversas aplicações de carga.....	99
Figura 6.16 - Padrão de fissuração das placas submetidas a cargas de impacto	100

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Módulo de elasticidade das fibras .....	20
Tabela 3.1 - Recomendações para dosagem de concretos reforçados com fibras de aço.....	35
Tabela 4.1 - Características das fibras utilizadas no programa experimental.....	48
Tabela 4.2 - Teores adotados em kg/m <sup>3</sup> .....	49
Tabela 4.3 - Caracterização granulométrica do basalto.....	50
Tabela 4.4 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo.....	50
Tabela 5.1 - Porcentagens de aditivos incorporadas aos diversos concretos e abatimentos obtidos após a incorporação.....	59
Tabela 5.2 - Resultados do cálculo do índice de tenacidade.....	76
Tabela 6.1 - Valores de cargas para as diversas alturas de queda, inseridas no programa de DEM, obtidas através da regressão.....	94
Tabela 6.2 - Propriedades para simulação da resposta das placas de concreto simples as cargas de impacto.....	97



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta_t$  - intervalo de integração

$\Delta_{t_{crit}}$  - intervalo crítico de integração

$\beta$  - parâmetro de escala

$\gamma$  - parâmetro de forma

$\delta$  - deslocamento da primeira fissura

$e_b$  - deformação da barra b

$\epsilon_{cu}$  - deformação última do compósito

$\epsilon_{mc}$  - deformação do compósito no final da fissuração múltipla

$\epsilon_{mu}$  - deformação última da matriz

$\epsilon_n$  - deformação específica correspondente à tensão  $\sigma_n$

$\epsilon_0$  - deformação específica correspondente à tensão  $\sigma_{inf}$

$e_p$  - deformação crítica

$\dot{e}_b$  - velocidade de deformação da barra b

$\nu$  - coeficiente de Poisson

$\zeta_n$  - coeficiente de amortecimento crítico

$\rho$  - densidade específica

$\sigma_{fu}$  - resistência última à tração da fibra

$\sigma_{inf}$  - tensão de 0,5MPa

$\sigma_n$  - 40% da tensão de ruptura do material

$\sigma'_{mu}$  - resistência última da matriz à tração direta, na ausência de fibras

$\tau_{au}$  - tensão de aderência entre a fibra e a matriz

$\tau_f$  - resistência ao atrito

$\tau_{fu}$  - máxima tensão tangencial de atrito

$A_n$  - área das arestas normais do módulo cúbico

$A_d$  - área das arestas diagonais do módulo cúbico

$A_f$  - área de influência da barra

$C$  - matriz diagonal de amortecimento

$c_A$  - coeficiente geométrico do modelo cúbico

$C_p$  - velocidade de propagação da onda de compressão em meio elástico

CV (%) - coeficiente de variação

$d$  - diâmetro da fibra

$E$  - módulo de elasticidade secante

$EA_n$  - rigidez das barras normais às faces do elemento cúbico

$EA_d$  - rigidez das barras diagonais do elemento cúbico

$E_c$  - módulo de elasticidade do compósito

$E_f$  - módulo de elasticidade da fibra

$E_{FISS}$  - energia necessária para o aparecimento da primeira fissura

$E_{RUP}$  - energia necessária para ruptura do compósito

$E_{sec}$  - módulo de elasticidade secante

$F$  - força axial resultante da barra

$f_c$  - resistência à compressão

$f_n$  - frequência natural de vibração do modo  $n$

$f_t$  - resistência à tração

$f_w(G_f)$  - distribuição de probabilidade adotada para  $G_f$

$\vec{F}_r(t)$  - vetor de forças reativas que atuam sobre os nós do modelo

$F_r^b$  - força interna em cada barra

$G_f$  - energia específica de fratura

$k_r$  - ductilidade do material

$L_c$  - aresta do elemento do módulo cúbico

$\ell$  - comprimento da fibra

$\frac{\ell}{d}$  - relação de aspecto da fibra ou fator de forma

$\ell_c$  - comprimento crítico

$M$  - matriz diagonal de massas nodais

$n$  - modo fundamental do modelo

$\vec{P}(t)$  - vetor de forças internas que atuam sobre os nós do modelo

$R_f$  - fator de falha

$r$  - raio da fibra

$V_f$  - volume percentual de fibras

$V_{f(crit)}$  - volume crítico de fibras

$x$  - vetor de deslocamentos nodais

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

#### **1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO**

O concreto, um dos mais importantes materiais de construção já desenvolvidos, tem sido, ao longo dos anos, um grande aliado do ser humano. Seu uso está fortemente ligado aos processos de adensamento populacional, exploração e transformação do meio ambiente.

Reconhecido por sua versatilidade, que permite sua utilização tanto para a construção de estruturas esbeltas quanto massivas, este material vem sendo estudado há bastante tempo. Ao longo do último século se desenvolveram tecnologias de produção que permitiram elevar consideravelmente sua resistência à compressão, trabalhabilidade e durabilidade. Apesar de todo o progresso, o concreto continua apresentando um comportamento frágil, com baixa resistência à tração, exigindo o uso de armaduras de reforço.

Para amenizar esta deficiência de comportamento, uma alternativa possível seria a utilização de fibras descontínuas dispersas na matriz cimentícia, formando um compósito com características mecânicas mais adequadas e equilibradas, capaz de suportar solicitações de tração mais elevadas e apresentar um melhor comportamento frente à deformação.

Diversos tipos de fibras, geradas a partir de diferentes materiais, tais como o aço, o carbono, o vidro, os asbestos, a aramida, o polipropileno, o sisal, o coco e o bambu, podem ser utilizadas como reforço de matrizes cimentícias, agregando a estas diferentes características.

O melhoramento provocado pela inserção de fibras depende tanto das características da matriz, quanto das fibras. De acordo com estudos recentes (Bernardi, 2003), constata-se que as fibras de menor diâmetro, denominadas microfibras, atuam em conjunto com a matriz desde o início do carregamento. Já as fibras de maior diâmetro e rigidez, que recebem a denominação de macrofibras, como as fibras metálicas, passam a contribuir principalmente na fase pós-fissuração do compósito, como as fibras metálicas

Diversas pesquisas produziram evidências da eficiência das fibras (Hannant, 1978; Guimarães et al., 2001). Existem ainda dúvidas quanto à eficácia da adição de fibras na melhoria da resistência última, dada a possibilidade de incorporação de ar e a incerteza quanto à homogeneidade da dispersão, ou distribuição das fibras. Todavia, é consensual a aceitação do fato de que as fibras melhoram a ductilidade dos compósitos de base cimentícia. Bentur e Mindess (1990) apresentam uma série de estudos realizados em compósitos à base de cimento reforçados com diversos tipos de fibras, onde é possível observar, por exemplo, ganhos em resistência à tração, abrasão, fadiga e impacto.

Nestes estudos, observa-se que as fibras de aço proporcionam incrementos consideráveis na resistência ao impacto de matrizes cimentícias. Aliado a isto, são fibras largamente empregadas e comercializadas, razões pelas quais foram escolhidas como objeto de estudo desta pesquisa, como justificado a seguir.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Segundo Ferreira (2002), a utilização dos concretos de cimento Portland reforçados com fibras de aço, denominados CRFA, vem ganhando, nos últimos anos, grande impulso, com diversas aplicações em obras hidráulicas, em pavimentos viários rígidos, em túneis ferroviários e rodoviários e pisos industriais, uma vez que o material pode conduzir a estruturas mais duráveis, esbeltas e, em conseqüência, a obras mais econômicas.

De maneira análoga ao que acontece no caso das armaduras tradicionais, as fibras de aço são adicionadas ao concreto com o objetivo de modificar o regime de ruptura do material, conferindo uma resposta mais dúctil no regime pós-pico do carregamento e restringindo a abertura e a propagação de fissuras. Por estarem distribuídas por todo o

volume do material, acabam por gerar um compósito virtualmente isotrópico, mais rígido e resistente.

Acredita-se que as fibras possam se constituir em um importante fator para controlar a fissuração de estruturas de concreto submetidas a cargas de elevada energia aplicadas num curto espaço de tempo. Isto permitirá construir compósitos mais adequados para utilização em situações onde haja perigo de quedas ou choques de objetos, de explosões, ou ainda quando for desejável uma maior resistência à penetração de projéteis. Portanto, torna-se necessário o aprofundamento dos conhecimentos relativos ao comportamento frente à fissuração de estruturas submetidas a cargas dinâmicas.

A questão de pesquisa que se estabelece está correlacionada com o fato de que os compósitos freqüentemente apresentam propriedades emergentes, decorrentes da sinergia entre os elementos que o compõem, que superam as propriedades individuais de cada elemento. No caso do impacto, é fundamental conhecer as propriedades do compósito resultante, pois as mesmas são os parâmetros básicos necessários para que se possam realizar análises numéricas de simulação dos efeitos deste tipo de solicitação.

Propriedades como a resistência à tração e a energia específica de fratura dependem da natureza da matriz, do tipo, características e quantidade de fibra empregada como reforço e da forma e eficiência da interação fibra-matriz. Dados sobre as mesmas ainda são escassos. Este trabalho busca colaborar nesta direção, caracterizando compósitos gerados com diferentes teores e geometrias de fibra de aço, avaliando seu desempenho quanto ao impacto e verificando se é possível representar os resultados obtidos com o emprego de um modelo de elementos discretos.

### **1.3 HIPÓTESES**

A premissa principal deste trabalho é que, com a adição de fibras de aço dispersas na massa de concreto, o comportamento do compósito formado seja significativamente alterado.

A partir desta premissa básica foram formuladas as seguintes hipóteses de trabalho:

- a adição de fibras de aço melhora significativamente o desempenho ao impacto de matrizes cimentícias, pois a presença destes elementos de reforço demanda a aplicação de uma maior energia para causar a ruptura do compósito;
- a variação do comprimento, do fator de forma, do teor de fibras e do tamanho do agregado alteram a eficiência da interação fibra-matriz, afetando significativamente o desempenho do compósito;
- o método dos elementos discretos é uma ferramenta adequada para modelar o comportamento de compósitos com fibra de aço submetidos a esforços de impacto.

#### **1.4 OBJETIVOS**

Os objetivos principais do presente trabalho foram a caracterização do comportamento mecânico básico e a determinação da resistência ao impacto de concretos com incorporação de fibras de aço com diferentes geometrias e em diferentes teores. Alguns objetivos específicos foram formulados da seguinte forma:

- avaliar os efeitos de variações de fator de forma, de comprimento e de teor de fibras, bem como a influência do tamanho do agregado nas propriedades mecânicas dos compósitos gerados;
- determinar quais as características das fibras mais influentes no incremento da resistência ao impacto dos compósitos;
- verificar se a simulação via método de elementos discretos, com o modelo numérico disponível, é capaz de reproduzir adequadamente o comportamento experimental de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a impacto.

## **1.5 LIMITAÇÕES**

Dadas as limitações de tempo e recursos, esta pesquisa se propôs a analisar somente corpos-de-prova com matrizes de concreto simples de resistência padrão de 30 MPa, utilizando fibras de aço de baixo teor de carbono, com fator de forma ( $l/d$ ) variando entre 45 e 80. Não foram avaliados no estudo os efeitos de variações do tipo ou quantidade de cimento e agregado, sendo adotada apenas uma relação água-aglomerante.

## **1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação é dividida em sete capítulos, sendo o Capítulo 1 relativo à introdução do assunto e à apresentação dos objetivos.

No Capítulo 2, intitulado Compósitos de matriz cimentícia reforçada com fibras, serão abordados tópicos sobre a interação fibra-matriz, atentando-se para os mecanismos de transferências de tensões entre a matriz e as fibras. Também serão destacados os parâmetros mais influentes nesta interação.

No Capítulo 3 será discutido o desempenho dos compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras de aço.

No Capítulo 4 será apresentado o programa experimental, onde serão descritos os materiais utilizados e os procedimentos de ensaio empregados para avaliar o desempenho de concretos fabricados com fibras de aço de diferentes características.

No Capítulo 5 serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo anterior.

No Capítulo 6, intitulado modelagem do comportamento do concreto quando submetido a cargas de impacto, será exposta a formulação do programa utilizado na simulação do modelo numérico, baseado no método dos elementos discretos.

O Capítulo 7 apresentará as conclusões desta dissertação e serão apontadas sugestões para estudos posteriores sobre o tema abordado.



## CAPÍTULO 2

### COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRAS

#### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Tendo em vista que o foco da presente dissertação está voltado para a análise do desempenho de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aço sob solicitações de impacto, considera-se necessário revisar, inicialmente, como funciona a interação fibra-matriz e analisar como as características de cada um destes elementos afetam as propriedades do compósito resultante. Neste capítulo serão abordados, de forma genérica, os mecanismos de aderência das fibras, que governam a eficiência do compósito, sendo feitas algumas considerações específicas sobre os materiais envolvidos na presente pesquisa.

#### 2.2 A FUNÇÃO DAS FIBRAS NA MATRIZ CIMENTÍCIA

O concreto de cimento Portland pode ser visto como um compósito formado por três componentes principais: pasta de cimento, agregados miúdos e agregados graúdos. Em função da natureza destes componentes principais e de suas proporções, bem como da utilização ou não de aditivos e adições, o compósito é capaz de apresentar uma grande variação de suas propriedades.

Por exemplo, quando submetido a tensões de compressão, verifica-se que o concreto pode apresentar diferenciados valores de resistência. Atualmente, os concretos de resistência normal, com valores de  $f_{ck}$  menores que 50MPa, são os mais utilizados. Porém, seu uso está sendo gradualmente substituído pelos concretos de alta resistência, cujos valores de  $f_{ck}$  variam entre 50 e 150MPa, principalmente em estruturas expostas a ambientes agressivos e em empreendimentos onde os elementos estruturais necessitam seções reduzidas. Ainda são recentes e, portanto, tem utilização reduzida, os concretos de ultra-alta-resistência, que atingem valores de  $f_{ck}$  maiores que 150MPa (Resende,

2003). Estudos indicam que resistências ainda mais elevadas, da ordem de 200MPa, podem ser atingidas em concretos com uso de pós reativos (Biz, 2001).

O bom comportamento da matriz cimentícia, entretanto, fica comprometido por sua limitada resistência à tração. Antes mesmo de ser submetido a tensões externas, o concreto normalmente contém microfissuras na zona de transição entre a matriz e os agregados graúdos, e pouca energia é necessária para que ocorra o aumento destas fissuras, justificando a ruptura frágil do material, como explicam Mehta e Monteiro (1994).

O problema, analisado do ponto de vista microestrutural, consiste no fato de que, quando o concreto é submetido à tração ou à flexão, a energia se concentra rapidamente nas extremidades das microfissuras existentes, como mostra a Figura 2.1, provocando um crescimento incontrolado destas. Este fenômeno tem, como provável consequência, uma ruína frágil do material.

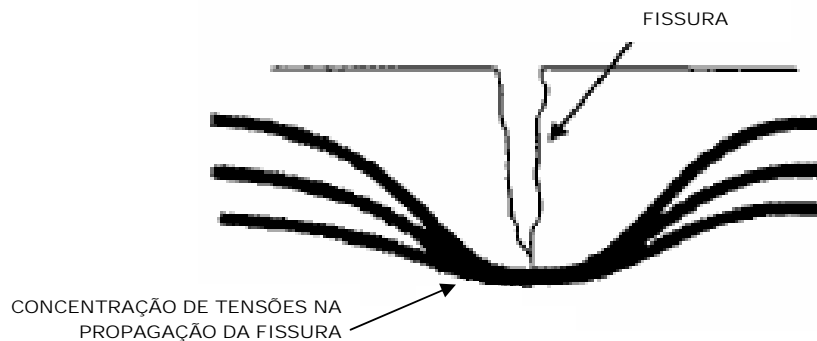


Figura 2.1 - Mecanismo de concentração de tensões na tração no extremo das microfissuras (Nunes e Agopyan, 1998).

Uma das soluções mais usuais empregadas para melhorar o desempenho à tração de matrizes frágeis consiste na adição de fibras às mesmas. As fibras agem como pontes de transferência de tensões, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das fissuras, conforme mostra a Figura 2.2.

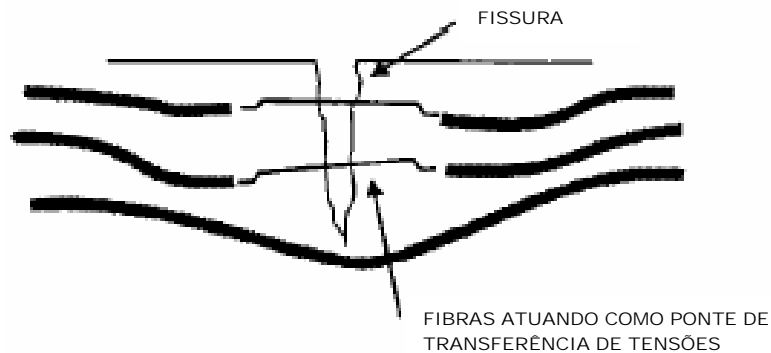


Figura 2.2 - Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões (Nunes e Agopyan, 1998).

Diversas fibras, de diferentes materiais, tais como o aço, o carbono, o vidro, os asbestos, a aramida, o polipropileno, o sisal, o coco e o bambu, podem ser utilizadas como reforço de matrizes cimentícias, agregando a estas diferentes características, conforme será discutido em maior detalhe no item 2.5.

De forma geral, num concreto reforçado com fibras, o processo de fissuração é acompanhado pelo surgimento de forças de impedimento causadas pelas tensões de aderência desenvolvidas na interface fibra-matriz. Como consequência, torna-se necessária uma maior energia para que ocorra a abertura e propagação das fissuras, tornando a ruína do material menos frágil, o que proporciona um eventual ganho de ductilidade na estrutura.

A possibilidade de construir estruturas mais dúcteis, capazes de suportar solicitações dinâmicas, tem despertado bastante interesse, justificando os vários estudos em desenvolvimento sobre concretos com fibras para *retrofit* sísmico (Billington e Yoon, 2004).

Por alterar o comportamento microscópico do concreto, a presença de fibras causa mudanças em suas propriedades macroscópicas, mais utilizadas no dimensionamento de estruturas. Enquanto o concreto convencional, quando submetido a tensões de tração, rompe repentinamente, no momento em que a deformação correspondente à sua

resistência última for superada, o concreto reforçado com fibras continua resistindo a cargas consideráveis, com deformações bastante superiores à deformação de fratura do concreto convencional. Mais ainda, altera-se o padrão de fissuração do material, com uma tendência ao aparecimento de fissuras de menor abertura e mais regularmente espaçadas. Dado o impedimento à propagação causado pelas fibras, a primeira fissura não consegue levar o compósito à ruína (Nunes e Agopyan, 1998).

Mehta e Monteiro (1994) argumentam que produtos reforçados com fibras não apresentam melhora substancial na resistência à tração, se comparados a misturas similares sem fibras. Pesquisas recentes, com emprego de microfibras, parecem indicar o contrário (Bernardi, 2003). Esta aparente contradição pode estar associada ao fato de que a incorporação de fibras normalmente provoca impactos sobre a trabalhabilidade. Historicamente, quando as fibras eram adicionadas à mistura, ocorria uma incorporação de ar, o que, associado aos problemas de moldagem e de distribuição inadequada das fibras na massa, acabava tendo reflexos negativos sobre a resistência.

Acredita-se que, mais recentemente, com a evolução da tecnologia dos aditivos plastificantes e superplastificantes, está sendo possível obter misturas trabalháveis, com pouca incorporação de ar e boa distribuição das fibras na massa. Desta forma, se justificaria o fato de que o efeito final da adição de fibras, em termos de acréscimo de resistência, se tornou mais positivo. Estudos específicos são todavia necessários para esclarecer o assunto.

Mesmo admitindo que as resistências últimas à tração do compósito não aumentem apreciavelmente, as deformações de tração na ruptura certamente aumentam, com a incorporação das fibras. A eficiência do reforço das fibras se traduz num incremento da capacidade de absorção de energia do compósito. O índice capaz de indicar a capacidade de absorção de energia de um determinado material, para um determinado nível de deslocamento, é denominado tenacidade, que é também definida pela área sob o diagrama carga x deslocamento vertical (Ferreira, 2002).

Comparado ao concreto convencional, portanto, o concreto reforçado com fibras é mais tenaz e resistente ao impacto. Um dos objetivos principais deste trabalho é justamente avaliar o aumento potencial da resistência ao impacto de matrizes cimentícias com diferentes fibras metálicas, como justificado no Capítulo 1. Entretanto, para que as

fibras atuem de forma eficiente é fundamental que haja uma boa interação das mesmas com a matriz, aspecto discutido a seguir.

## **2.3 A INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ**

A eficiência do reforço das fibras na matriz cimentícia pode ser caracterizada em dois estágios: pré e pós-fissuração. Em ambos os casos, o comportamento 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. Ou seja, para que um compósito apresente bom desempenho, é necessário assegurar que seus componentes atuem em conjunto. A boa interação fibra-matriz resulta em um aumento da capacidade de absorção de energia do compósito. Estas questões são abordados em maior detalhe nos próximos itens.

### **2.3.1 Comportamento Pré-Fissuração**

No estágio de pré-fissuração, a transferência de tensões entre a fibra e a matriz ocorre por aderência. Ou seja, a aderência desenvolvida na interface distribui o carregamento externo entre ambas.

Enquanto houver aderência, os deslocamentos longitudinais dos dois componentes devem ser compatíveis, isto é, a deformação na interface deve ser a mesma. Devido à diferença de rigidez entre as fibras e a matriz, aparecem tensões tangenciais ao longo da superfície de contato, que auxiliam na transferência de parte da força aplicada para as fibras.

Quando as tensões tangenciais na interface, devidas ao carregamento, excedem a tensão de aderência entre a fibra e a matriz ( $\tau_{au}$ ), inicia-se o processo de desligamento da fibra da matriz, com o surgimento de tensões de atrito na interface da zona de desligamento. Ocorre, então, a transição de transferência de tensão por aderência para transferência por tensão de atrito, conforme mostra a Figura 2.3. A tensão máxima da interface ao atrito denomina-se  $\tau_{fi}$ , valor que permanece constante após o escorregamento da fibra, como mostrado na figura (Bentur e Mindess,1990).



Figura 2.3 - Representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz após desligamento parcial da fibra (Bentur e Mindess, 1990).

A distribuição de tensões tangenciais resultantes, ao longo da interface fibra-matriz, não é linear, como pode ser observado na Figura 2.4.

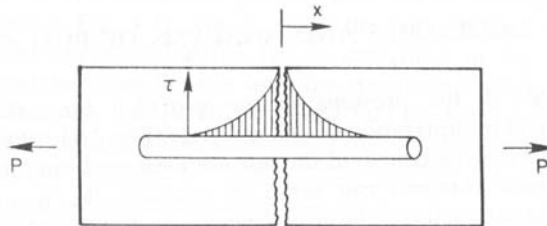


Figura 2.4 - Representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz imediatamente após a fissura (Bentur e Mindess, 1990).

### 2.3.2 Comportamento Pós-Fissuração

Como explicado acima, após a fissuração, o mecanismo dominante na transferência de tensões da matriz para as fibras passa a ser o atrito. A tensão de atrito é uma tensão tangencial distribuída ao longo da interface fibra-matriz. Com o aumento da carga ocorrem deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz, ou seja, as fibras passam a sofrer um processo de arrancamento. O gasto energético para o arrancamento da fibra é muito elevado, o que justifica a alta tenacidade do compósito (Nunes e Agopyan, 1998).

O incremento do carregamento externo provoca o aumento das fissuras, de tal forma que ocorre a separação da matriz em vários segmentos. As fibras, então, passam a

formar pontes de ligação entre as bordas destes segmentos, dando origem às chamadas “costuras” das fissuras. Na fissura, podem ser identificados três trechos, onde as transferências de tensões ocorrem de forma distinta, como mostra a Figura 2.5:

- trecho livre de tração, onde a matriz se encontra fissurada e as fibras se romperam ou escorregaram da matriz;
- trecho de “costura” das fissuras pelas fibras, no qual a tensão é transferida por atrito das fibras;
- trecho de microfissuração da matriz, mas com suficiente continuidade e ancoragem dos agregados, para que ocorra transferência de tensão pela própria matriz.

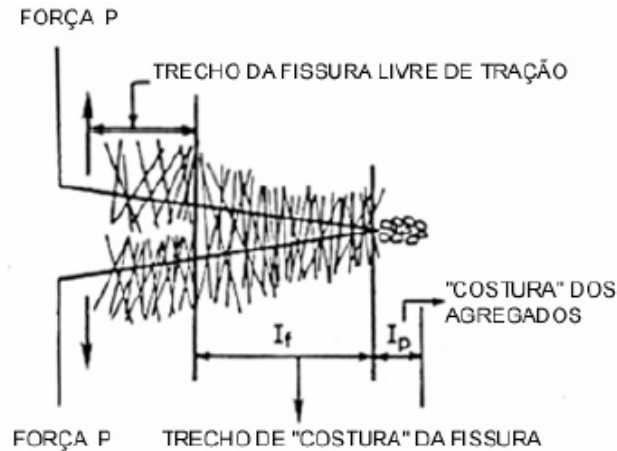


Figura 2.5 - Representação das zonas de transferência de tensões ao longo de uma fissura (Bentur e Mindess, 1990).

Considerando 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 2.4.2.

No caso específico das fibras de aço, objeto de estudo desta dissertação, a eficiência da interação fibra-matriz é determinada pelo processo de arrancamento das fibras, cujo mecanismo é explicado no item seguinte.

### 2.3.3 Mecanismo de Arrancamento das Fibras de Aço

O mecanismo de arrancamento das fibras de aço tem sido um aspecto intensamente investigado, uma vez 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 (Weiler e Grosse, 199\_ ; Alwan, Naaman, Guerrero, 1999).

Weiler e Grosse (199\_) argumentam que a interação fibra-matriz é capaz de levar o compósito a suportar carregamentos maiores, devido ao gasto energético necessário para deformar a fibra. Na Figura 2.5 podem ser observados os resultados de ensaios de arrancamento realizados em uma fibra de aço imersa em matriz de resina epóxi transparente, efetuado com o intuito de estabelecer uma relação entre a carga aplicada e as deformações na fibra.

Pode-se observar na figura que, no primeiro estágio do ensaio, ocorrem somente deformações elásticas na parte reta da fibra, até que a aderência entre a fibra e a matriz seja rompida (Figura 2.5a). As fibras começam então a ser arrancadas da matriz, ao mesmo tempo em que ocorrem deformações plásticas em suas extremidades (Figura 2.5b). Enquanto o escorregamento da fibra se processa (Figura 2.5c), na matriz também ocorrem deformações. No caso da matriz de resina epóxi, as deformações são elásticas, e decrescem no momento em que a fibra torna-se totalmente reta (Figura 2.5d). No concreto, o processo de arrancamento provocaria a formação de uma rede de microfissuras.

O fenômeno de ancoragem é especialmente importante no caso das fibras de aço e pode se maximizado com o emprego de fibras deformadas nas extremidades, sendo necessária uma grande quantidade de energia para provocar o deslizamento dessas fibras. A Figura 2.7 mostra seções de concreto reforçado com fibras de aço após a ruptura, onde pode-se observar claramente as extremidades retificadas ou rompidas das fibras.



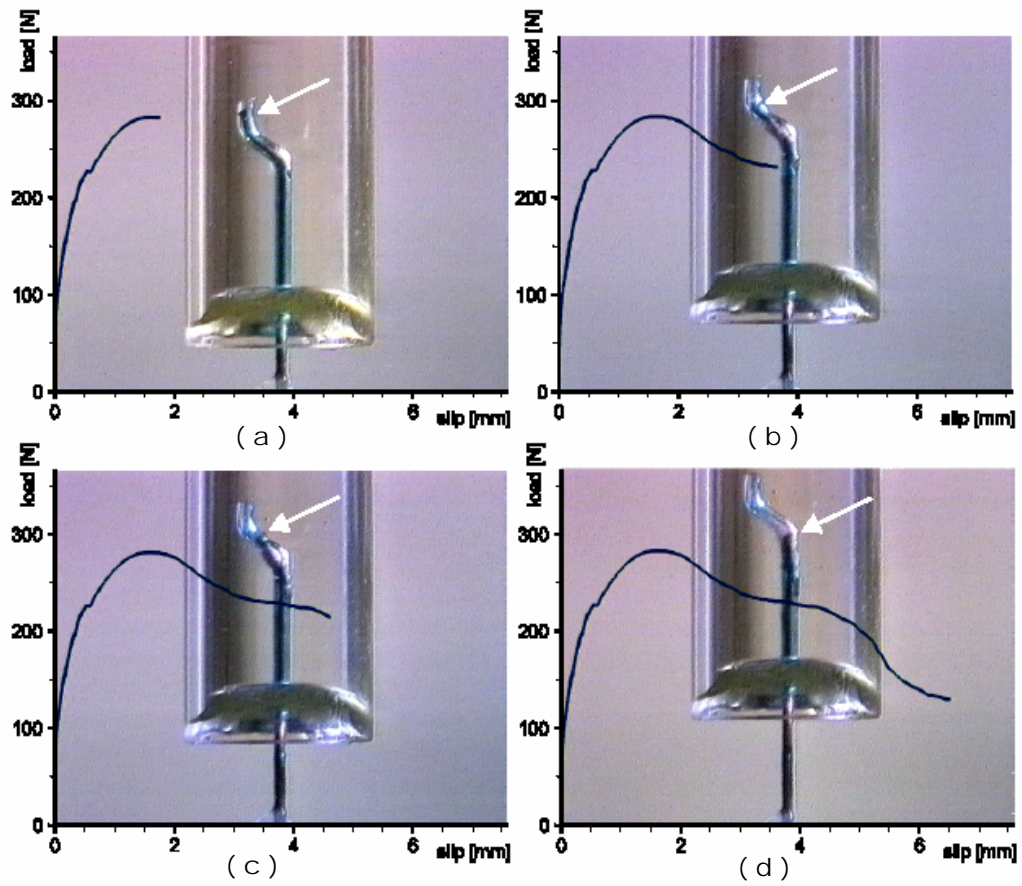


Figura 2.6- Evolução do processo de arrancamento de uma fibra de aço em uma matriz polimérica de resina epóxi (Weiler e Grosse, 199\_).



Figura 2.7 – Amostras de concreto reforçado com fibras de aço após a ruptura.

A Figura 2.8 mostra algumas curvas do tipo carga x escorregamento, obtidas de testes de arrancamento de fibras de aço realizados por Weiler e Grosse (199\_). Como se pode observar, tanto a adesão fibra-matriz quanto à geometria da fibra influenciam fortemente o comportamento ao arrancamento.

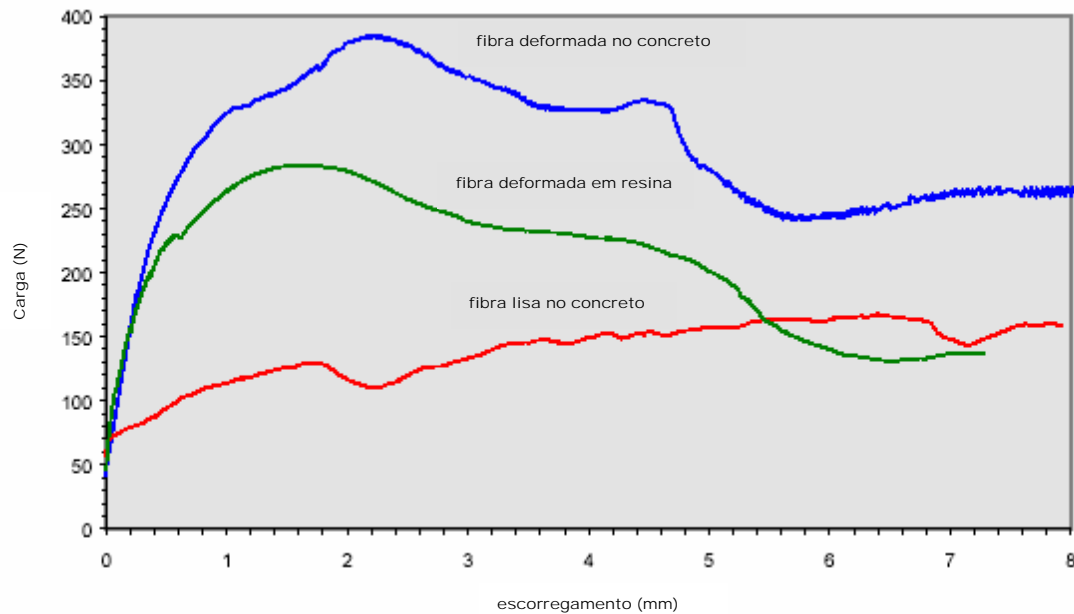


Figura 2.8 – Curvas de arrancamento típicas para fibras de aço lisas e deformadas (Weiler e Grosse, 199\_)

Nota-se na figura que a curva de arrancamento da fibra com extremidades deformadas possui dois picos de carga. O primeiro marca o início do processo de escorregamento, enquanto o segundo pico corresponde ao momento em que a fibra se retifica totalmente, no qual a matriz sofre grande alívio de deformação. Observa-se que a carga máxima atingida é menor que no primeiro pico, uma vez que a eficiência da ancoragem da fibra vai diminuindo durante o processo de retificação da mesma.

## 2.4 PARÂMETROS INFLUENTES NA INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

Conforme Resende (2003), além do tipo de fibra, que será discutido no item 2.5, fatores como a geometria, a fração volumétrica e o arranjo das fibras podem influenciar na

eficiência da interação fibra-matriz e modificar as propriedades mecânicas do compósito, como discutido a seguir.

#### 2.4.1 Teor de Fibras

O principal papel das fibras no compósito, como já discutido, está associado ao controle da fissuração e à alteração do comportamento do concreto a partir do aparecimento da primeira fissura. A Figura 2.9 ilustra este fato, mostrando como a adição de fibras pode modificar o gráfico de tensão-deformação. Observa-se na mesma que, quando são utilizados teores baixos de fibras, ocorrem 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.

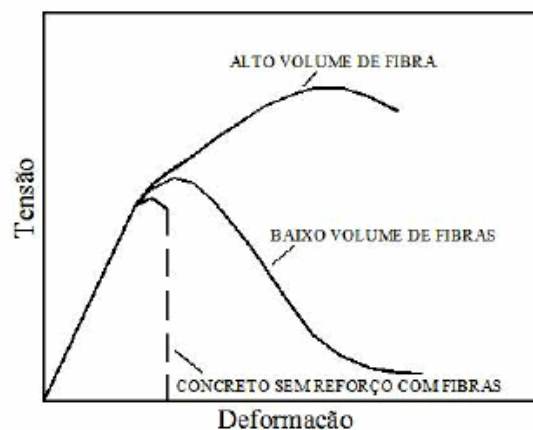


Figura 2.9 - Curvas típicas de tensão de tração x deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras (Bentur e Mindess,1990).

Mudanças significativas no comportamento estrutural do material, no estágio pré-fissuração, somente são observadas quando utilizadas técnicas que garantam a adição de altos volumes de fibras.

A questão é que a incorporação de altos teores pode causar problemas de trabalhabilidade, sendo necessário o uso de técnicas especiais, como a SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete), sistema no qual fibras de aço são dispostas inicialmente em um molde, para posterior infiltração de pasta de cimento fluida. Esta técnica permite volumes de fibras entre 8 e 12%, já tendo sido utilizada para produzir componentes com

teores de fibras superiores a 25% (ACI, 1996). Também podem ser usados não-tecidos de fibras aglomeradas, dando origem a uma adaptação da técnica denominada Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON).

Quando os volumes de fibras incorporados são elevados, ocorre tanto o incremento da tenacidade, como da resistência última dos elementos. A literatura da área, entretanto, não define limites a partir dos quais se poderia considerar que os volumes de fibras fossem considerados elevados.

#### 2.4.2 Comprimento Crítico

Os mecanismos de transferência de tensões no compósito são influenciados pelo comprimento crítico das fibras. Este parâmetro é definido por Bentur e Mindess (1990) como sendo o menor comprimento necessário para o desenvolvimento de tensões nas fibras, iguais à sua resistência. Esta definição está baseada no modelo que descreve a transferência de tensões entre a matriz e a fibra aumentando linearmente dos extremos para o centro da fibra, como mostra a Figura 2.10 e Figura 2.11.

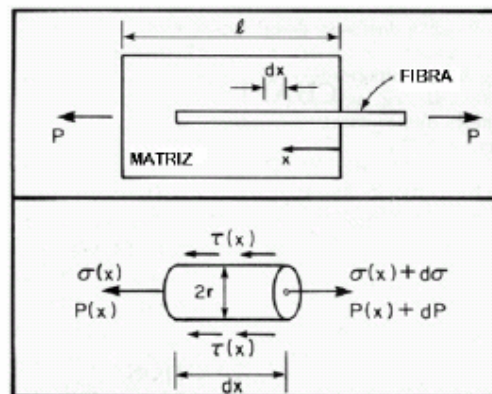


Figura 2.10 - Representação da aderência fibra-matriz (Bentur e Mindess, 1990).

O comprimento crítico pode ser calculado pela Equação 2.1, em função da transferência da tensão tangencial de atrito entre a matriz e a fibra:

$$\ell_c = \frac{\sigma_{fu}}{\tau_{fu}} r \quad (2.1)$$

onde:  $\sigma_{fu}$  → tensão última à tração da fibra

$\tau_{fu}$  → máxima tensão tangencial de atrito

$r$  → raio da fibra

Quando o comprimento da fibra embutido na matriz é menor do que o crítico ( $l < l_c$ ), a ancoragem não é suficiente para gerar tensões de escoamento ou de ruptura nas fibras, como mostra a Figura 2.11. Nesta situação, com o aumento da deformação e, conseqüentemente, da abertura da fissura, a fibra que está atuando como ponte de transferência de tensões será mais facilmente arrancada do lado que possuir o menor comprimento embutido (Figueiredo, 2000). Ou seja, as fibras não estarão atuando de forma eficiente.

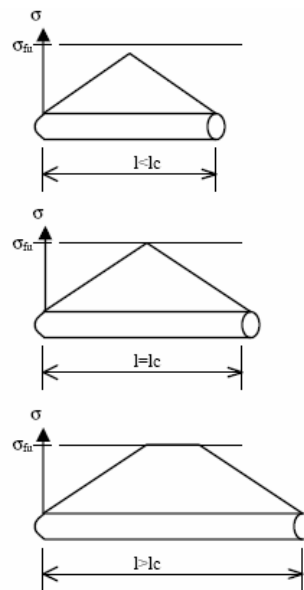


Figura 2.11 – Tensão máxima atingida pela fibra, em relação à tensão última admissível, em função do comprimento da fibra.

Quando o comprimento da fibra embutido na matriz é maior que o comprimento crítico ( $l > l_c$ ), ocorre o travamento da fibra, impedindo seu arrancamento e ocasionando a elevação da tensão atuante na mesma até que seja alcançada a tensão de ruptura.

Como a ruptura da fibra envolve menor consumo de energia que o seu arrancamento, neste caso ocorrerá a redução da energia total envolvida no processo de ruptura do compósito, tornando o material mais frágil.

Por outro lado, o aumento do comprimento da fibra aumenta sua eficiência, pois permite que a mesma desenvolva uma maior tensão, o que impacta positivamente a resistência do compósito. Ou seja, para  $\ell > \ell_c$ , há uma contradição entre os requisitos de resistência e tenacidade do elemento, como explicam Bentur e Mindess (1990).

A máxima tenacidade do compósito, conseqüentemente, é obtida quando o comprimento médio das fibras empregadas é igual ao comprimento crítico, isto é,  $\ell = \ell_c$ .

Estes preceitos, entretanto, são bastante teóricos, uma vez que não é possível prever onde ocorrerá a fissura em relação ao comprimento da fibra e por conseqüência, as duas extremidades da fibra não estarão, necessariamente, ancoradas da mesma maneira.

### 2.4.3 Fator de Forma

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 Figura 2.12. Este índice é capaz de indicar a eficiência da fibra para a melhora da tenacidade do compósito.

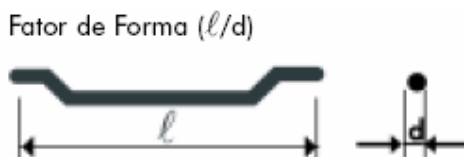


Figura 2.12 - Fator de forma (Belgo, 2004).

Um aumento no fator de forma pode representar um aumento no comprimento da fibra ou um decréscimo no seu diâmetro equivalente. Desta forma, segundo Metha e Monteiro (1994), 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 no número de fibras que podem interceptar uma fissura, decorrente da utilização de um maior número de fibras mais delgadas.

Nunes e Agopyan (1998), ensaiando concretos reforçados com fibras de aço de mesmo comprimento e fatores de forma diferentes, mostraram que ocorre um aumento da tenacidade à flexão do compósito com o aumento do fator de forma, fato justificado pelo maior número de fibras presentes por unidade de volume da matriz. Entretanto, os autores ressaltam que a influência do fator de forma é menos significativa do que a influência do consumo, ou teor total, de fibras.

#### 2.4.4 Módulo de Elasticidade das Fibras

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 2.5, os asbestos, as fibras de aço, a aramida, o vidro e o carbono possuem módulo de elasticidade que podem ser considerados altos, enquanto as fibras de polipropileno e nylon possuem módulos de elasticidade mais baixos. Na Tabela 2.1 são mostrados os valores do módulo de elasticidade de algumas fibras.

Tabela 2.1 - Módulo de elasticidade das fibras (Bentur e Mindess, 1990).

Fibra	Módulo de Elasticidade (GPa)
Carbono	230
Aço	200
Asbestos	164 - 196
Aramida	65 - 133
Vidro	70 - 80
Polipropileno	5 - 77
Nylon	4

Na Figura 2.13, Figueiredo (2000) representa esquematicamente o comportamento de uma matriz hipotética reforçada com dois tipos diferentes de fibras: uma de módulo de

elasticidade alto e outra de módulo de elasticidade baixo, sendo admitido que todas apresentam um comportamento elástico perfeito. A curva 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.

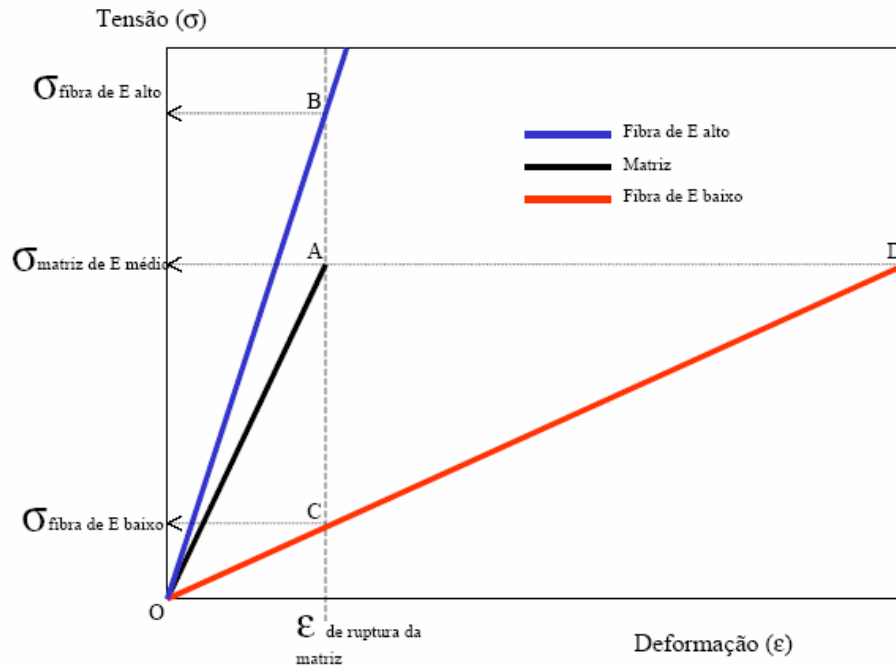


Figura 2.13 - Diagrama tensão x deformação elástica. (Figueiredo, 2000).

No momento em que a matriz rompe (ponto A) e transfere a tensão para a fibra de baixo módulo (ponto C), esta apresenta uma tensão muito baixa para este nível de deformação, necessitando ser deformada intensamente, até o ponto D, para garantir o mesmo nível de tensão da matriz, 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 ductilidade 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 reforço 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. Com isto, as fibras de baixo módulo de elasticidade só têm a possibilidade de atuar como reforço durante um curto espaço de tempo após o lançamento do compósito.

Bentur e Mindess (1990) descrevem os comportamentos de fibras com elasticidade diferente quando submetidas à tração, na região de vizinhança com a fissura. Se a fibra for suficientemente dúctil, ocorrerá uma contração lateral na mesma, como pode ser observado na Figura 2.14, devido ao efeito do coeficiente de Poisson, que é maior na fibra do que na matriz. Isto gera tensões normais de tração na interface fibra-matriz. Entretanto, se a fibra for frágil e o comprimento embutido na matriz exceder o comprimento crítico ( $l_c$ ) (vide seção 2.4.2), a fibra estará ancorada o suficiente para não ser arrancada, e continuará a suportar carga até que ocorra sua ruptura.

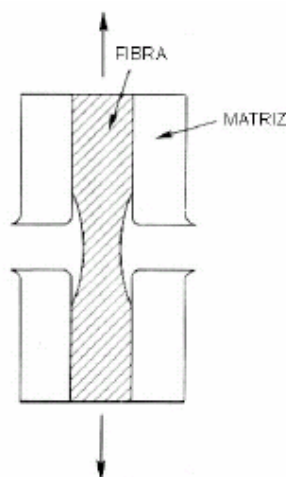


Figura 2.14 - Representação do comportamento de uma fibra dúctil na vizinhança da fissura (Bentur e Mindess, 1990).

#### **2.4.5 Distribuição e Ancoragem das Fibras**

Como explica Chen (1982), a direção de propagação de uma fissura de tração é transversal à direção da tensão atuante. Desta forma, o início e crescimento de cada nova fissura reduz a área disponível de suporte de carga, o que causa um aumento de tensões nas extremidades de cada fissura. Por esta razão se admite que o mecanismo de ruptura na tração se caracteriza pela união de algumas fissuras pré-existentes ou desenvolvidas nos primeiros estágios de carga, ao contrário do que acontece no estado de ruptura por tensões de compressão, que admite a existência de numerosas fissuras independentes. Tendo em vista este fato, é intuitivo concluir que, quanto mais direcionadas as fibras estiverem, em relação ao sentido da tensão principal de tração, melhor será o desempenho do compósito. Em alguns casos, portanto, utilizam-se técnicas para favorecer a orientação das fibras no compósito. No caso do concreto, todavia, é mais comum buscar uma distribuição aleatória e homogênea das fibras na matriz, formando um reticulado tridimensional não orientado. Fibras muito longas, entretanto, podem tender a se orientar durante o processo de lançamento e compactação, dependendo das dimensões do elemento onde estão sendo empregadas (Figueiredo, 2000).

Em concretos de baixa e moderada resistência mecânica, a fratura se propaga preferencialmente na região da interface entre o agregado graúdo e a pasta. A fibra deve atuar como ponte de transferência de tensões nas fissuras. Portanto, o comprimento da mesma necessita ser suficiente para facilitar o seu correto posicionamento, sendo recomendado normalmente que este seja superior a duas vezes a dimensão máxima do agregado. Segundo Figueiredo (2000), esta compatibilidade dimensional possibilita que a fibra atue como um elemento de reforço do concreto e não como mero reforço da argamassa. Quando não há compatibilidade de tamanho entre a fibra e o agregado, poucas fibras acabam trabalhando de forma eficiente como pontes de transferência de tensões através da fissura.

Como já discutido, para melhorar as condições de ancoragem, podem ser utilizadas fibras com características especiais. A maioria das fibras metálicas, por exemplo, possuem deformações em forma de gancho em suas extremidades. Neste caso, além dos mecanismos por aderência e atrito, se estabelece um mecanismo de transferência de

tensões através da ancoragem mecânica da fibra na matriz. Bentur e Mindess (1990) acreditam ser este o mecanismo predominante que determina a capacidade de transferência de tensões de fibras deformadas.

### 2.4.6 Volume Crítico

O volume crítico de fibras  $V_{f(crit)}$  é definido por Hannant (1978) como sendo o volume de fibras  $V_f$  que, após a fissuração da matriz, suportará o carregamento que o compósito suportava antes da fissuração. Ou seja, para que haja uma majoração na resistência última do compósito, devido à incorporação das fibras, é necessário que o teor de fibras empregado resulte num volume de fibras superior ao crítico.

Quando  $V_f > V_{f(crit)}$ , o carregamento antes suportado pela matriz é transferido para as fibras após o aparecimento da primeira fissura. Como o volume é suficientemente grande para suportar esta carga, o compósito se mantém íntegro. Carregamentos adicionais podem provocar incrementos de fissuração na matriz, gerando um padrão de fissuração múltipla, sem, contudo, levar à ruptura do compósito.

A Figura 2.15 apresenta a curva tensão x deformação de um compósito reforçado com fibras, na qual se pode observar o aumento da deformação durante o estágio de fissuração múltipla.

Onde:

- $\sigma_{fu}$  → resistência última da fibra;
- $\epsilon_{mu}$  → deformação última da matriz;
- $\epsilon_{mc}$  → deformação do compósito no final da fissuração múltipla;
- $\epsilon_{cu}$  → deformação última do compósito;
- $E_c$  → módulo de elasticidade do compósito;
- $E_f$  → módulo de elasticidade da fibra;
- $V_f$  → volume percentual de fibras.

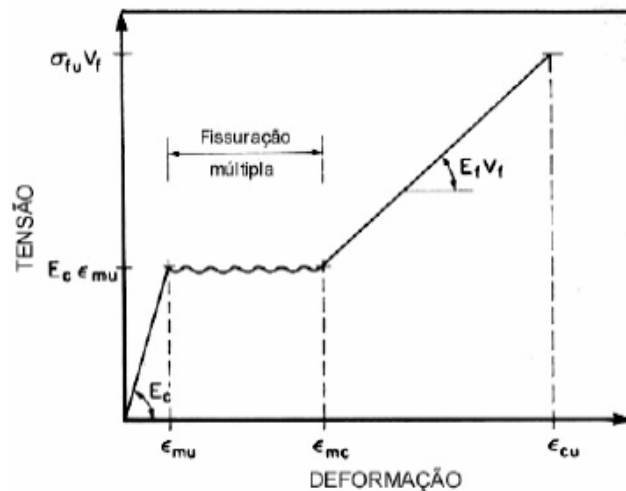


Figura 2.15 - Curva tensão x deformação do compósito. (Bentur e Mindess, 1990).

Após o término da fissuração múltipla, a matriz estará dividida em fissuras paralelas, e qualquer força adicional causará o rompimento ou o desligamento das fibras.

O desligamento das fibras, que se inicia na superfície da fissura, progride ao longo do comprimento da fibra. No trecho desligado, a resistência ao atrito ( $\tau_f$ ) ainda proporciona alguma resistência ao arrancamento da fibra, como indicado na Figura 2.16. A ruptura só ocorrerá quando as fibras esgotarem sua capacidade resistente ou quando a tensão tangencial na interface superar a resistência de aderência entre a fibra e a matriz. Mecanismos de ancoragem tipo ganchos podem incrementar a resistência de ancoragem da fibra, como já salientado.

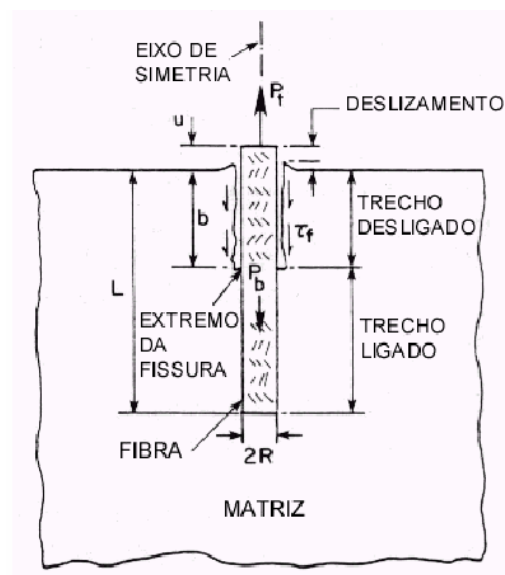


Figura 2.16 - Modelo utilizado para representar o processo de arrancamento de uma fibra (Bentur e Mindess,1990).

Quando  $V_f < V_{f(crit)}$ , o volume de fibras é insuficiente para suportar o carregamento que atuava na matriz antes da fissuração. Ou seja, a transferência da força da matriz para as fibras provoca o esgotamento da resistência da fibra e a ruptura ocorre pela propagação de uma única fissura principal, como salientam Bentur e Mindess (1990). Nestes casos ocorre necessariamente uma redução na carga que o material tem capacidade de suportar no momento da ruptura da matriz.

Figueiredo (2000) ilustra o conceito de volume crítico com a Figura 2.17, que apresenta curvas cargas x deflexão de prismas de concreto com fibras, rompidos à flexão. Como se pode observar na figura, existe um trecho elástico linear inicial, correspondente ao estágio pré-fissurado da matriz do compósito, e um outro trecho, similar a um patamar de escoamento, onde é possível diferenciar o comportamento do concreto reforçado com teores superiores, inferiores e iguais ao volume crítico de fibras.

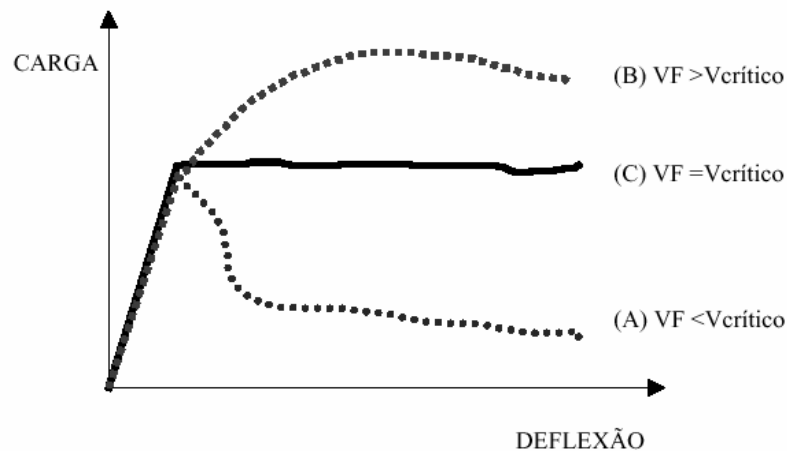


Figura 2.17 - Comportamento de compósitos reforçados com diferentes teores de fibras durante o ensaio de tração na flexão (Figueiredo, 2000).

De acordo com Bentur e Mindess (1990), o volume crítico percentual de fibras pode ser calculado pelas Equações 2.2 a 2.4, apresentadas 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.

$$V_{f(crit)} = \frac{\sigma'_{mu}}{\tau_{fu}} \frac{1}{\ell/d}, \text{ para fibras alinhadas em uma direção} \quad (2.2)$$

$$V_{f(crit)} = \frac{\pi}{2} \frac{\sigma'_{mu}}{\tau_{fu}} \frac{1}{\ell/d}, \text{ para fibras alinhadas em duas direções aleatórias} \quad (2.3)$$

$$V_{f(crit)} = 2 \frac{\sigma'_{mu}}{\tau_{fu}} \frac{1}{\ell/d}, \text{ para fibras distribuídas em três direções aleatórias} \quad (2.4)$$

onde:  $\sigma'_{mu}$  → resistência última da matriz à tração direta, na ausência de fibras

$\tau_{fu}$  → máxima tensão tangencial de atrito

$\ell/d$  → relação de aspecto da fibra ou fator de forma

## 2.5 FIBRAS MAIS UTILIZADAS NO REFORÇO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

O concreto reforçado com fibras pode ser conceituado como um compósito, formado por fibras dispersas aleatoriamente ou de forma orientada e alinhada em uma matriz de cimento. Uma grande variedade de fibras pode ser utilizada para reforçar matrizes frágeis. A escolha depende das características que se deseja fornecer ao compósito (Accetti e Pinheiro, 2000).

Segundo a ACI (1996), existem numerosos tipos de fibras disponíveis para uso comercial e experimental. As mais empregadas para reforço de matrizes cimentícias são as fibras de aço, de vidro, as fibras sintéticas e as naturais.

Na parte experimental deste trabalho se utilizará a fibra de aço, em função do fato de que este tipo de fibra permite obter um excelente desempenho na etapa de pós-fissuração do compósito, aspecto importante quando as estruturas são submetidas a cargas de impacto, como discutido no Capítulo 1. Para fins de comparação, todavia, considera-se interessante fazer uma breve revisão sobre os demais tipos de fibras. Uma revisão mais completa de cada tipo de fibra pode ser encontrada em Bernardi (2004).

### 2.5.1 Fibras de vidro

As fibras de vidro são normalmente produzidas a partir da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), com a adição de óxidos de cálcio ( $\text{CaO}$ ), boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e/ou alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Isto resulta num material amorfo, que é comercializado na forma de fios têxteis, mantas, tecidos e fios trançados. São utilizadas para reforço de materiais termoplásticos e termofixos, com aplicação diversificada na indústria automobilística, eletro-eletrônica, na construção civil, em saneamento, na indústria náutica (Saint-Gobain, 2005).

No caso das matrizes cimentícias, as fibras de vidro geralmente são adicionadas para produção de elementos estruturais de seção delgada, especialmente painéis de fechamento. A função das fibras, nestes casos, é de promover maior estabilidade dimensional e aumentar a resistência e o módulo de elasticidade nas idades iniciais (Bentur e Mindess, 1990).

As primeiras pesquisas realizadas sobre performance da fibra de vidro, por volta de 1960, mostraram que a fibra de vidro convencional, a base de óxido de boro, chamada E-glass, apresentava baixa resistência aos álcalis presentes na matriz de cimento Portland, o que levou ao desenvolvimento de fibras de vidro especiais, resistentes a esses álcalis, chamadas AR-glass (alkali resistant glass).

Um exemplo de fibras de vidro tipicamente utilizadas para a produção de compósitos de matriz cimentícia pode ser visualizado na Figura 2.18. Os teores de adição normalmente empregados são inferiores a 5% do volume de concreto, valor que pode ser considerado como um alto teor de adição (Bentur e Mindess, 1990).



Figura 2.18 – Fibras de vidro.

Além de empregadas na produção de concretos e argamassas especiais, as fibras de vidro têm sido foco de estudos para incorporação em matrizes poliméricas (à base de resinas poliéster, éster vinílica ou epóxi) para produção de perfis e barras pultrudadas, de diferentes seções. Estes elementos podem ser utilizadas na fabricação de peças estruturais, ou podem ser empregados como substitutivos da armadura no concreto, uma vez que apresentam alta resistência à tração (Maji et. al, 1997).

Em relação ao impacto, Bernardi (2003) relata que as fibras de vidro tradicionais não apresentam desempenho satisfatório no controle da propagação da fissuração após o aparecimento da primeira fissura. Pode-se atribuir este comportamento às características de aderência da fibra, que apresenta uma superfície muito lisa e não dispõe de mecanismos de ancoragem externos.

### **2.5.2 Fibras Sintéticas**

As fibras sintéticas são fibras derivadas de polímeros orgânicos, resultantes de pesquisas desenvolvidas na indústria petroquímica e têxtil. Entre as principais fibras sintéticas estão as fibras acrílicas, de poliamidas aromáticas (aramida), de nylon, de poliéster, de polietileno, de polipropileno e de carbono. A maioria destas fibras ainda são pouco utilizadas no reforço de matrizes cimentícias e não foram objeto de muitas pesquisas. Outras, entretanto, são facilmente encontradas no mercado e suas propriedades e usos são extensivamente estudados, destacando-se as fibras de aramida e polipropileno.

As fibras de aramida apresentam alto módulo de elasticidade e, quando incorporadas às matrizes de concretos de cimento Portland, na forma de pequenos segmentos, apresentam excelente desempenho, particularmente no incremento da rigidez, resistência ao impacto e comportamento à flexão dos compósitos. Os teores de adição variam entre 1 e 5% do volume de concreto ou argamassa (Bentur e Mindess, 1990). Entretanto, seu alto custo ainda limita suas aplicações, como explica Bernardi (2003).

Na Figura 2.19 são mostrados fios de aramida, que devem ser cortadas em filamentos curtos para incorporação em matrizes cimentícias.



Figura 2.19 – Fios de fibra de aramida.



Já as fibras de polipropileno apresentam baixo módulo de elasticidade, grande capacidade de deformação, boa resistência aos álcalis e baixo custo. Estas fibras costumam ser utilizadas para o controle da microfissuração durante o endurecimento da pasta de cimento, em estruturas de grande área superficial, tais como pisos industriais e pavimentos, sendo recomendado adições inferiores a 0,3% do volume. Também podem ser utilizadas na fabricação de seções delgadas a teores máximos de 5% do volume, com uso de técnicas especiais de produção (Bentur e Mindess, 1990). Dada sua reduzida resistência à tração, em comparação com outras fibras, não resultam em melhorias significativas de desempenho quando utilizadas para reforçar concretos sujeitos a cargas de impacto (Bernardi, 2003). Atualmente, fibras com superfície corrugada (vide figura 2.20) estão sendo produzidas com o intuito de incrementar a aderência, buscando melhorar a resistência ao impacto de concretos (Fitesa, 2005). Também está sendo produzida uma fibra sintética estrutural para aplicações em pisos e pavimentos de concreto, concreto projetado e pré-moldados, apresentada na Figura 2.21.

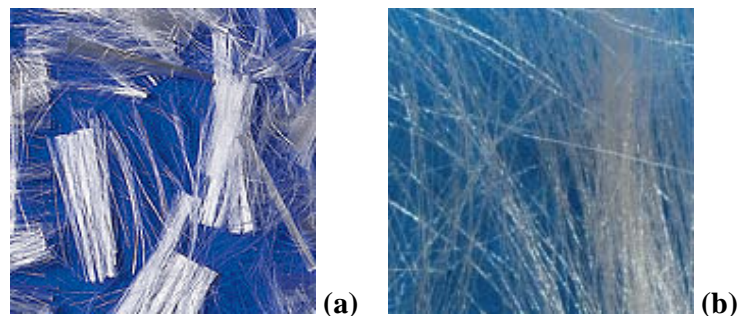


Figura 2.20 – Aspecto das (a) fibras de polipropileno convencionais, de superfície lisa e (b) fibras de polipropileno corrugadas (Fitesa, 2005).



Figura 2.21 – Fibra sintética estrutural (Fitesa, 2004).

### 2.5.3 Fibras naturais

Entre as principais fibras naturais utilizadas no reforço de matrizes cimentícias encontram-se as de sisal, coco, bagaço de cana-de-açúcar, bambu e juta, entre outras. Sob o ponto de vista ambiental e econômico, o emprego de fibras naturais é vantajoso, em função do custo reduzido, do baixo consumo de energia necessário para sua produção e do caráter renovável do material de origem. No entanto, em relação à durabilidade dos concretos reforçados com este tipo de fibra, têm-se observado problemas devido à falta de estabilidade dimensional e da possibilidade de degradação em curto espaço de tempo das fibras em presença de umidade (Tezuka, 1989).

### 2.5.4 Fibras de Aço

As fibras de aço são produzidas a partir de fios de aço trefilados, que são cortados e comercializados em diversos comprimentos e diâmetros. As destinadas ao reforço do concreto possuem comprimentos variando entre 6,4 e 76mm e fator de forma variando entre 20 e 100, sendo desta forma suficientemente curtas para se dispersarem aleatoriamente numa mistura fresca de concreto (ACI, 1996).

Os concretos reforçados com fibras de aço vêm encontrando cada vez maior aceitação e, portanto, a utilização de fibras deste tipo está progressivamente se expandindo em nível internacional. Uma variedade de tipos e morfologias de fibras já está disponível no mercado. Podem ser encontradas fibras de aço retas, onduladas e torcidas, como mostrado na figura 2.22. No Brasil, atualmente, as fibras deformadas nas extremidades são as mais facilmente encontradas.



Figura 2.22 - Fibras de aço encontradas no mercado.

Normalmente, as fibras de diâmetros maiores são comercializadas na forma de pentes, como se observa na Figura 2.23. Nestes pentes as fibras ficam levemente aderidas umas às outras, graças ao emprego de um adesivo solúvel em água. Já as fibras com diâmetros menores são comercializadas na forma de fibras individuais soltas, como observado na Figura 2.24.

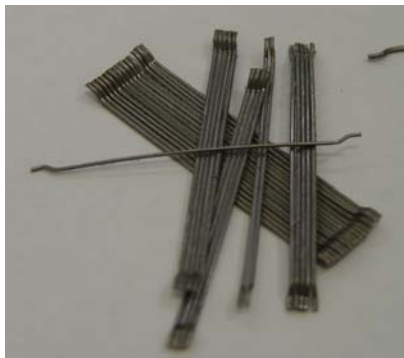


Figura 2.23 - Fibras de aço com extremidades deformadas, coladas em forma de pentes.



Figura 2.24 - Fibras de aço com extremidades deformadas, produzidas soltas.

Dado o material de origem, as fibras de aço são consideradas como fibras de alta resistência e alto módulo de elasticidade. A resistência à tração mínima requerida para as mesmas é de 345MPa, conforme a norma ASTM A820, enquanto as especificações da JSCE requerem 552MPa.

Em função de suas propriedades mecânicas, as fibras de aço podem ser empregadas como reforço à tração em concretos, podendo substituir a armadura tradicional em pisos e pavimentos industriais, em revestimentos de túneis e taludes, e em certos elementos pré-fabricados, tais como tubos de concreto.

O principal efeito da adição das fibras de aço está na modificação do modo de ruptura do material. Como descrito em itens anteriores, as macro-fibras costuram as fissuras, conferindo uma resposta mais dúctil ao compósito no regime pós-pico de carregamento.

A eficiente forma de ancoragem das fibras de aço, especialmente as que apresentam extremidades deformadas, permite que se desenvolva um mecanismo de transferência de tensão entre as faces da fissura, que confere ao compósito uma habilidade de suportar cargas em níveis de deslocamento bem superiores àqueles onde a fissuração da matriz não reforçada se daria, sendo o controle da fissuração do compósito governado pelo processo de arrancamento das fibras.

Dado o interesse específico da presente pesquisa nos concretos reforçados com fibras de aço, o Capítulo 3 expande a discussão sobre o comportamento deste tipo de compósito.

## **CAPÍTULO 3**

### **DESEMPENHO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO**

#### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Entre as causas dos avanços no uso de concretos reforçados com fibras de aço, estão as significativas vantagens que estas incorporam ao compósito, principalmente por aumentar sua capacidade de absorção de energia. Essa melhoria impulsiona a busca pelo conhecimento e pela quantificação das propriedades desses concretos.

Por este motivo, neste capítulo será analisado o desempenho esperado de compósitos à base de fibra de aço, em termos do seu comportamento no estado fresco e endurecido, e de sua durabilidade potencial.

#### **3.2 COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO**

O efeito mais marcante da adição de qualquer fibra no estado fresco das misturas de concreto consiste na redução da trabalhabilidade, isto porque as fibras atuam como uma adição inerte, provocando o intertravamento da mistura. Esta redução é influenciada pelo fator de forma da fibra, pela geometria da fibra, pela fração volumétrica adicionada, pelo traço do concreto e pelas características da interface fibra-matriz (ACI, 1996) e, portanto, algumas adaptações na dosagem das matrizes podem ser exigidas, de maneira que seja assegurada uma adequada dispersão das fibras adicionadas, validando a hipótese da formação de uma rede tridimensional que garanta propriedades homogêneas ao compósito.

Segundo Metha e Monteiro (1994) o ensaio de abatimento não é um bom índice para quantificar a trabalhabilidade de concretos reforçados com fibras, já que reduções nas

medidas do abatimento não necessariamente levam a processos de lançamento e compactação insatisfatórios. Portanto, o ensaio VeBe é considerado mais adequado para avaliar a trabalhabilidade desses concretos.

A dosagem de um concreto com fibras deve ser efetuada de maneira a resultar em uma trabalhabilidade que permita o lançamento, adensamento e acabamento com o mínimo de esforço, com segregação mínima do material, já que as misturas de concreto reforçado com fibras de aço apresentam uma tendência a gerar aglomerações de fibras, os chamados bolos ou novelos. Essas aglomerações resultam no enfraquecimento do material, uma vez que apenas nata de cimento será capaz de penetrar no seu interior, e dependem do diâmetro máximo e da granulometria do agregado, do fator de forma da fibra, da fração volumétrica de fibra e da maneira de introduzir a fibra na mistura.

Assim como o concreto convencional, as especificações de dosagem de um concreto reforçados com fibras de aço vão depender da finalidade para o qual o mesmo está sendo produzido. Nos casos em que é necessário o uso de concretos fluidos, prática que está se tornando cada vez mais freqüente, a trabalhabilidade pode ser obtida com o uso de aditivos superplastificantes. O ACI fornece algumas recomendações de dosagem consideradas adequadas para promover a trabalhabilidade adequada da mistura. As mesmas estão reproduzidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Recomendações para dosagem de concretos reforçados com fibras de aço (ACI, 1996).

	9mm	19mm	38mm
Cimento ( $\text{kg/m}^3$ )	356 - 593	297 - 534	279 - 415
Relação a/c	0,35 - 0,45	0,35 - 0,50	0,35 - 0,55
Porcentagem de finos	45 - 60	45 - 55	40 - 55
Porcentagem de ar incorporado	4 - 8	4 - 6	4 - 5
Volume de fibras ( $\text{kg/m}^3$ )			
Fibras deformadas	31 - 78	24 - 63	16 - 55
Fibras lisas	63 - 157	47 - 126	31 - 110

### 3.3 COMPORTAMENTO NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, o bom comportamento de um concreto com fibras é definido pela sua capacidade de suportar esforços. Nos itens a seguir discute-se quais as expectativas de desempenho em várias situações.

#### 3.3.1 Tenacidade

As restrições à abertura e propagação das fissuras promovidas pelas fibras alteram os diagramas tensão x deformação dos compósitos gerados, resultando no aumento da absorção de energia durante o processo de fraturamento dos mesmos.

Como já salientado, o conceito de tenacidade expressa a energia de trabalho até a ruptura, representada pela área sob a curva tensão x deformação.

A determinação da tenacidade dos concretos reforçados com fibras de aço é normalmente procedida em ensaios à flexão de vigas, e diferentes sistemas de medida vêm sendo empregados para sua quantificação.

As normas mais utilizadas e aceitas são a ASTM C-1018, prescrita pela American Society for Testing and Materials (ASTM, 1997), a recomendação JSCE SF-4, da Japan Society of Civil Engineers (JSCE, 1984), e o critério proposto pela European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures (EFNARC, 1996). O American Concrete Institute (ACI, 1999a) recomenda a utilização dos índices energéticos adimensionais, adotados na ASTM C-1018, para a avaliação da contribuição das fibras de aço no aumento da tenacidade dos compósitos. Conforme ilustrado na Figura 3.1, o deslocamento da primeira fissura ( $\delta$ ), corresponde ao ponto onde o diagrama carga x deslocamento apresenta o primeiro desvio brusco da linearidade. A ASTM C-1018 estabelece seus níveis de deslocamento de referência como sendo múltiplos do deslocamento necessário para abertura da primeira fissura, isto é,  $3\delta$ ,  $5.5\delta$  e  $15.5\delta$ . Estes deslocamentos conduzem aos índices  $I_5$ ,  $I_{10}$  e  $I_{30}$ , que corresponderiam a áreas, no diagrama de carga x deslocamento, 5, 10 e 30 vezes maiores que a área obtida para o deslocamento da primeira fissura, para um material de comportamento elasto-plástico.

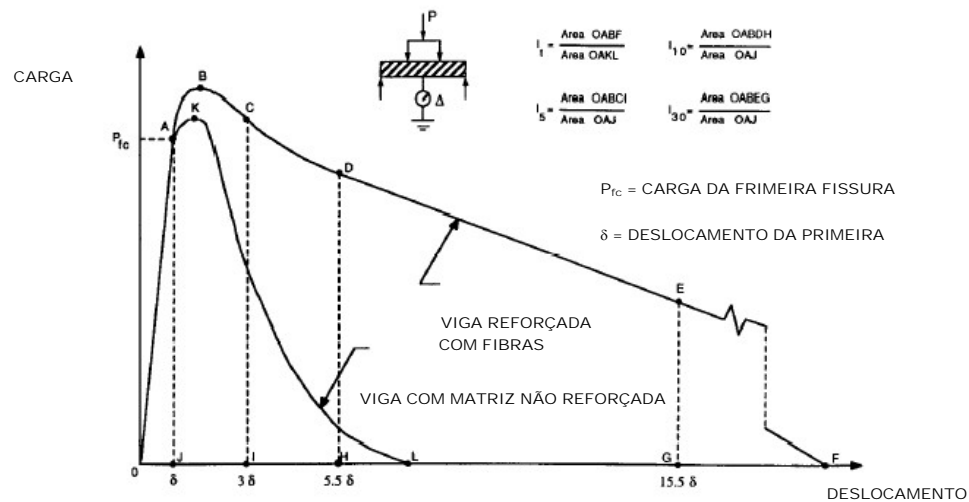


Figura 3.1 - Critérios da ASTM para determinação dos parâmetros de tenacidade.

Outro critério muito utilizado atualmente é o da norma JSCE SF-4. Nela, o cálculo da tenacidade baseia-se na determinação do fator de tenacidade, expresso em MPa, que representa a resistência residual média do compósito até um deslocamento equivalente a  $L/150$ , sendo  $L$  o vão do corpo-de-prova.

### 3.3.2 Comportamento à Compressão

A resistência à compressão é pouco afetada pela presença de fibras de aço (ACI, 1996). Os incrementos de resistência podem atingir níveis de 25%, porém essa não é considerada como a mais importante contribuição do reforço com fibras de aço.

A principal contribuição das fibras está no incremento substancial da ductilidade no estágio de pós-fissuração do compósito, ou seja, no aumento da capacidade de absorção de energia do material (Bentur e Mindess, 1990).

### 3.3.3 Comportamento à Tração

Fibras alinhadas na direção da tensão de tração podem provocar um grande incremento na resistência à tração direta. Entretanto, na maioria dos casos, o que se possui é uma distribuição randômica das fibras, e para esta situação, o incremento na resistência à tração direta é muito pequena. Então, a adição de fibras não deve ser realizada com a intenção de aumentar a resistência à tração.



Assim como no caso da compressão, as fibras de aço levam a um incremento no comportamento pós-fissuração do compósito, ou seja, provocam um incremento na tenacidade do mesmo (Bentur e Mindess, 1990).

### **3.3.4 Comportamento à Flexão**

Os incrementos na resistência à flexão do concreto reforçado com fibras de aço são substancialmente maiores que os incrementos na resistência à compressão e à tração. Dados têm mostrado que a resistência à flexão do concreto reforçado com fibras de aço é cerca de 50 a 70% maior que a resistência à flexão de um concreto não reforçado (ACI, 1996).

No entanto, sabe-se que a consequência direta da adição de fibras é o aumento da capacidade portante pós-fissuração do material, fazendo com que haja um maior gasto energético para sua ruptura. Este comportamento é avaliado através da tenacidade ou capacidade de absorção de energia, que é caracterizado pela área sob a curva carga x deslocamento vertical obtida experimentalmente. O ensaio mais utilizado para esta quantificação é o ensaio de tração na flexão, por melhor representar as situações práticas a que estes compósitos são solicitados (Gopalaratnam e Gettu, 1995).

Contudo, estudos realizados por Guimarães *et. al* (2000), para a análise da repetibilidade deste ensaio em vigas, demonstraram que o mesmo apresenta uma grande sensibilidade e limitações para teores elevados de fibras ( $100 \text{ kg/m}^3$ ). Logo, para a quantificação dos incrementos na tenacidade à flexão do material, provocados pela incorporação de fibras, cuidados especiais devem ser tomados, especialmente no controle de qualidade de produção do material.

### **3.3.5 Comportamento ao Cisalhamento**

Fibras de aço têm sido utilizadas como malhas de reforço para resistir a esforços cortantes e também com estribos como reforço ao cisalhamento. Tem-se mostrado que fibras dispersas agem como reforço eficaz, tal como barras de estribos com espaçamento regular, e são mais eficazes na redução da propagação de fissuras e manutenção da integridade do concreto adjacente. Fibras de aço podem substituir total

ou parcialmente os estribos. Além disso, o reforço com fibras pode reduzir significativamente tempo e custos de produção (El-niema, 1991).

Resultados de testes em laboratório mostram que a resistência à fissuração por cisalhamento é aumentada significativamente com a adição de fibras de aço a mistura, além de uma melhora na resistência última ao cisalhamento (Hwan, 1998, *apud* Bonaldo e Pinto Jr.). Isto indica que o reforço com fibras de aço pode reduzir a quantidade de estribos necessária pelas normas de dimensionamento atuais, e que uma combinação de fibras e estribos pode ser usada para obtenção de estruturas de concreto com resistência e ductilidade necessárias. Kützing (1997) apresenta resultados que demonstram claramente o aumento da capacidade de resistir ao cisalhamento do concreto com a introdução de  $40 \text{ kg/m}^3$  de fibras de aço.

### **3.3.6 Comportamento à Torção**

Poucos estudos que abordem o comportamento do concreto reforçado com fibras sob solicitações de torção são encontrados na literatura. No entanto, El-Niema (1993), investigando o efeito da adição de fibras de aço em vigas de concreto armado sob o efeito de cargas de torção, observou incrementos da ordem de 30% de torque para o aparecimento da primeira fissura e de 60% para esgotamento da capacidade torsional das vigas que receberam a adição de 1,2% de volume de fibras.

### **3.3.7 Comportamento à Abrasão, Erosão e Cavitação**

Segundo Bentur e Mindess (1990), o concreto reforçado com fibras de aço é mais resistente à abrasão que o concreto simples, em estruturas sujeitas a altas velocidades de escoamento de líquidos, que induzem no concreto um processo de cavitação.

Kormann *et. al* (2002) analisaram o desempenho de fibras de aço em concretos sujeitos à abrasão hidráulica, para realização de reparos no vertedouro de uma usina hidrelétrica. O compósito demonstrou bom desempenho mecânico, tanto sob condições extremas impostas durante ensaios de laboratório, quanto no campo, sob condições de intemperismo e sujeito a solicitações decorrentes da passagem de água pelo vertedouro do reservatório da barragem.

### 3.3.8 Comportamento à Fadiga

Em relação ao comportamento à fadiga do concreto reforçado com fibras de aço, dependendo do tipo da fibra e da sua concentração, uma mistura bem dosada terá uma resistência à fadiga de cerca de 65% a 90% da resistência à flexão estática em 2 milhões de ciclos. A adição de fibras, além de aumentar a vida da estrutura submetida à fadiga, também diminui a largura das fissuras, contribuindo para aumentar a durabilidade da estrutura (ACI, 1996).

### 3.3.9 Comportamento ao Impacto

Cargas de impacto podem ser admitidas como cargas resultantes da colisão entre dois corpos, durante um intervalo de tempo muito pequeno. Para caracterizar o comportamento do concreto submetido a cargas de impacto, dois parâmetros importantes são: a resistência à tração e a energia específica de fratura. Estes serão dados importantes para o modelagem realizada neste trabalho.

O comportamento do concreto reforçado com fibras de aço de diferentes tipos pode ser avaliado sob ação de cargas de impacto induzidas por cargas explosivas, através de equipamentos de queda de pesos, pelo uso do pêndulo de Charpy ou por ação de cargas dinâmicas de tração e compressão. Segundo o ACI (1996), comparações entre o concreto reforçado com fibras de aço e o concreto convencional podem ser feitas a partir da quantificação direta das diferenças de desempenho de ambos, quando submetidos ao mesmo tipo de ensaio de impacto. Alternativamente, pode-se avaliar as diferenças no comportamento de um concreto, com ou sem fibras, entre ensaios estáticos e o dinâmicos.

De forma geral, os concretos reforçados com fibras de aço possuem uma performance bem superior à dos concretos simples, quando avaliados os efeitos da ação de cargas de impacto, pois as fibras contidas no material dificultam a propagação de fissuras após a incidência dos carregamentos.

Pesquisas realizadas por Gopalaratnam e Shah (1986, *apud* Resende, 2003) utilizando um pêndulo de Charpy instrumentado, mostraram que: (a) os valores da energia de fratura da fibra de aço sob carregamento de impacto foram cerca de 70% a 80% mais

altos do que os obtidos em carregamentos estáticos; (b) a energia de fratura de concretos reforçados com fibras de aço foi aumentada de 40 a 100 vezes em relação ao concreto simples; (c) as resistências ao impacto dos concretos reforçados com fibras de aço foram cerca de 50% a 100% mais altas que as resistências estáticas. Resultados semelhantes foram encontrados por Banthia *et al.* (1987) nos quais os impactos foram aplicados por um peso em queda livre, onde mais uma vez ficou evidenciado que a presença de fibras de aço traz benefícios ao material submetido a cargas de impacto.

Dancygier e Yankelevsky (1996), estudando a resposta ao impacto de projéteis em concretos de alto desempenho, com resistência à compressão variando entre 95 e 110MPa, reforçados com armadura convencional ou reforçados com fibras de aço, mostraram que os corpos de prova com adição de fibras apresentaram menores crateras na face exposta ao impacto. A presença das fibras também reduziu a profundidade de penetração dos projéteis, pois, ao contrário do reforço convencional, as mesmas estão espalhadas em toda a profundidade, e não apenas em uma determinada região. Por isso as fibras de aço impedem o desenvolvimento de fissuras e minimizam a área de dano.

Banthia *et. al* (1998), ao investigarem a resistência ao impacto de placas formadas por uma matriz de concreto de resistência normal, sem reforço ou reforçadas com um amado de fibras sintéticas ou fibras de aço dispersas aleatoriamente, concluíram que os maiores incrementos no desempenho ao impacto ocorreram no caso do reforço com fibras de aço dispersas. Esses incrementos ocorreram tanto no carregamento último, quanto na capacidade de absorção de energia.

Mais recentemente, Bernardi (2003) realizou um estudo de comparação do comportamento de concretos reforçados com diversos tipos de fibras, onde ficou comprovado que a adição de fibras de aço ao concreto, apesar de não conseguir retardar o aparecimento da primeira fissura no compósito, consegue aumentar significativamente sua resistência última ao impacto.

Mehta e Monteiro (1994) argumentam que, apesar da existência de indicativos do bom desempenho dos concretos reforçados com fibras de aço ao impacto, a escassez de ensaios padronizados de resistência ao impacto torna difícil avaliar a real magnitude da melhora provocada pela inserção das fibras.

### 3.4 DURABILIDADE DE COMPÓSITOS DE CONCRETO E FIBRAS DE AÇO

Além da discussão em torno das propriedades mecânicas dos concretos reforçados com fibras de aço, é de fundamental importância tecer algumas considerações sobre a durabilidade destes compósitos.

O principal fenômeno de deterioração que pode afetar as fibras de aço é a corrosão. A conhecida suscetibilidade dos metais a este fenômeno de deterioração conduz à idéia de que as fibras mais próximas à superfície do concreto, onde o cobrimento é menor, estariam inclinadas a desenvolver um processo de corrosão severa, com possível redução de seus diâmetros. Como conseqüência desta redução, consideráveis decréscimos na resistência e na tenacidade dos compósitos poderiam ser provocados. Entretanto, a bibliografia indica que este tipo de degradação não é tão severa, em grande parte dos casos.

De fato, segundo a ACI (1996), enquanto o concreto não se encontra fissurado, a corrosão das fibras estará limitada às zonas mais expostas do material, ficando o fenômeno normalmente limitado aos 2,5 mm superficiais.

Metha e Monteiro (1994) argumentam que, apesar da oxidação das fibras da superfície ser inevitável, na maioria das condições ambientais, em concretos com alto consumo de cimento, baixa relação água/cimento, que sejam bem compactados e curados, as fibras no interior do concreto normalmente permanecem sem corrosão, proporcionando excelente durabilidade ao concreto.

Quando o concreto se encontra fissurado, mas as aberturas das fissuras são menores que 0.1 mm, testes de laboratório em ambientes contendo cloretos indicam que as conseqüências, em termos de corrosão, também não são significantes, uma vez que o acesso dos agentes agressivos é limitado e a alcalinidade das matrizes cimentícias ainda é capaz de proteger a maioria das fibras. Entretanto, em condições extremas de fissuração, a possibilidade de corrosão generalizada se incrementa e deve ser considerada com cuidado.

Kormann *et. al* (2002) realizaram estudos de resistência à abrasão para qualificação do desempenho de concretos reforçados com fibras de aço aplicados em superfícies hidráulicas sujeitas à erosão-abrasão e concluíram que, apesar dos compósitos

possuírem bom desempenho mecânico frente às solicitações, a exposição dos corpos de prova à umidade constante provocou uma elevada corrosão das fibras de aço aparentes.

Cabe lembrar que, apesar de suscetíveis à corrosão, as fibras de aço podem desempenhar um importante papel na garantia da durabilidade de uma estrutura de concreto armado, pois retardam a ocorrência e reduzem a abertura das fissuras. Esses efeitos aumentam consideravelmente a serviceabilidade e durabilidade das estruturas de concreto (Hwan *et al*, 1998, apud Bonaldo e Pinto Jr.).

### **3.5 USOS ESTRUTURAIS DO CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO**

O uso estrutural de concreto reforçado com fibras de aço teve início por volta de 1970, com a produção de painéis para pavimentação de garagens e pistas de pouso. Posteriormente, obras de estabilização de taludes começaram a utilizar concreto projetado com adição de fibras de aço, como alternativa para o concreto projetado armado com malha de arame, técnica também empregada para revestimentos de túneis (Metha e Monteiro, 1994). Desde então, o uso de concretos com fibras de aço passou a se difundir, para usos variados, principalmente no Japão, América do Norte e Europa.

Atualmente, as principais aplicações incluem a execução de pavimentos e lajes, revestimento de túneis, construção e reparo de rodovias, pistas de pouso, pisos industriais, construção e reparo de barragens, construção e reparo de tabuleiros de pontes, revestimento de canais, minas, túneis e galerias, especialmente com uso de concreto projetado. Concretos com fibras também são utilizados para a produção de painéis modulares pré-moldados, tubulações e aduelas. Alguns exemplos de aplicação podem ser visualizadas na Figura 3.2.

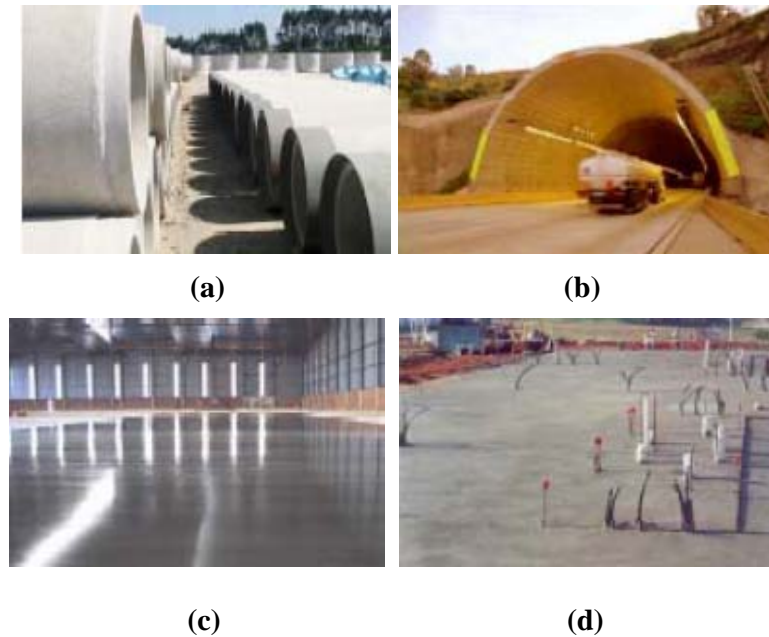


Figura 3.2 – Exemplos de aplicação de concretos reforçado com fibras em (a) tubos de concreto, (b) concreto projetado, (c) pisos industriais e (d) radiers.

No caso específico das aduelas, os concretos com fibras de aço estão encontrando campo fértil. Em pesquisa recente, desenvolvida pela Universidade de Campinas (Unicamp) em parceria com uma fabricante nacional de fibras, foi provada a eficiência da substituição da armadura convencional por fibras de aço na fabricação de aduelas de concreto pré-moldadas para revestimento de túneis (Concreto, 2004). Outra área em expansão é o emprego de pisos reforçados com fibras de aço. O uso da fibra permite a construção de “panos” maiores e mais esbeltos, resultando em ganhos estéticos, com reduções nos custos. Neste caso, a resistência ao impacto é um parâmetro fundamental, justificando os interesses desta pesquisa.

A construção de painéis resistentes a projéteis e explosões também vem se constituindo em uma área de demanda, reforçando o interesse na caracterização do desempenho de concretos com fibras ao impacto.

No caso das construções resistentes a sismos, os concretos com fibras de aço também tem despertado interesse, devido à possibilidade de incremento da ductilidade dos nós da estrutura resistente.

## **CAPÍTULO 4**

### **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Como explicitado no Capítulo 1, a presente pesquisa tem por objetivo verificar o comportamento estrutural, com foco na resistência ao impacto, de concretos reforçados com fibras de aço, buscando oferecer subsídios para a avaliação dos efeitos da incorporação destas fibras numa matriz cimentícia.

Neste capítulo será discutida a estratégia de pesquisa adotada para atingir o objetivo proposto. No mesmo são descritos os materiais utilizados e os procedimentos de ensaio empregados para avaliar o comportamento ao impacto de concretos fabricados com fibras de aço de diferentes características.

#### **4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA**

Este item apresenta a estratégia de pesquisa adotada para o estudo.

A revisão da bibliografia disponível, apresentada no Capítulo 2, forneceu a base teórica para a escolha dos parâmetros básicos que seriam variados para geração dos compósitos com incorporação de fibra de aço, bem como permitiu definir quais as estratégias para os ensaios adotados e para a modelagem numérica. A partir destas considerações desenvolveu-se a estratégia da pesquisa ilustrada pelo fluxograma da Figura 4.1.

As definições básicas (tipo de compósito, método de ensaio e abordagem de modelagem) foram tomadas em função das justificativas apresentadas no Capítulo 1. Decidiu-se trabalhar com compósitos reforçados com fibras de aço, submetidos ao impacto, buscando coletar dados e utilizá-los para ajustar e validar um modelo baseado no método dos elementos discretos.



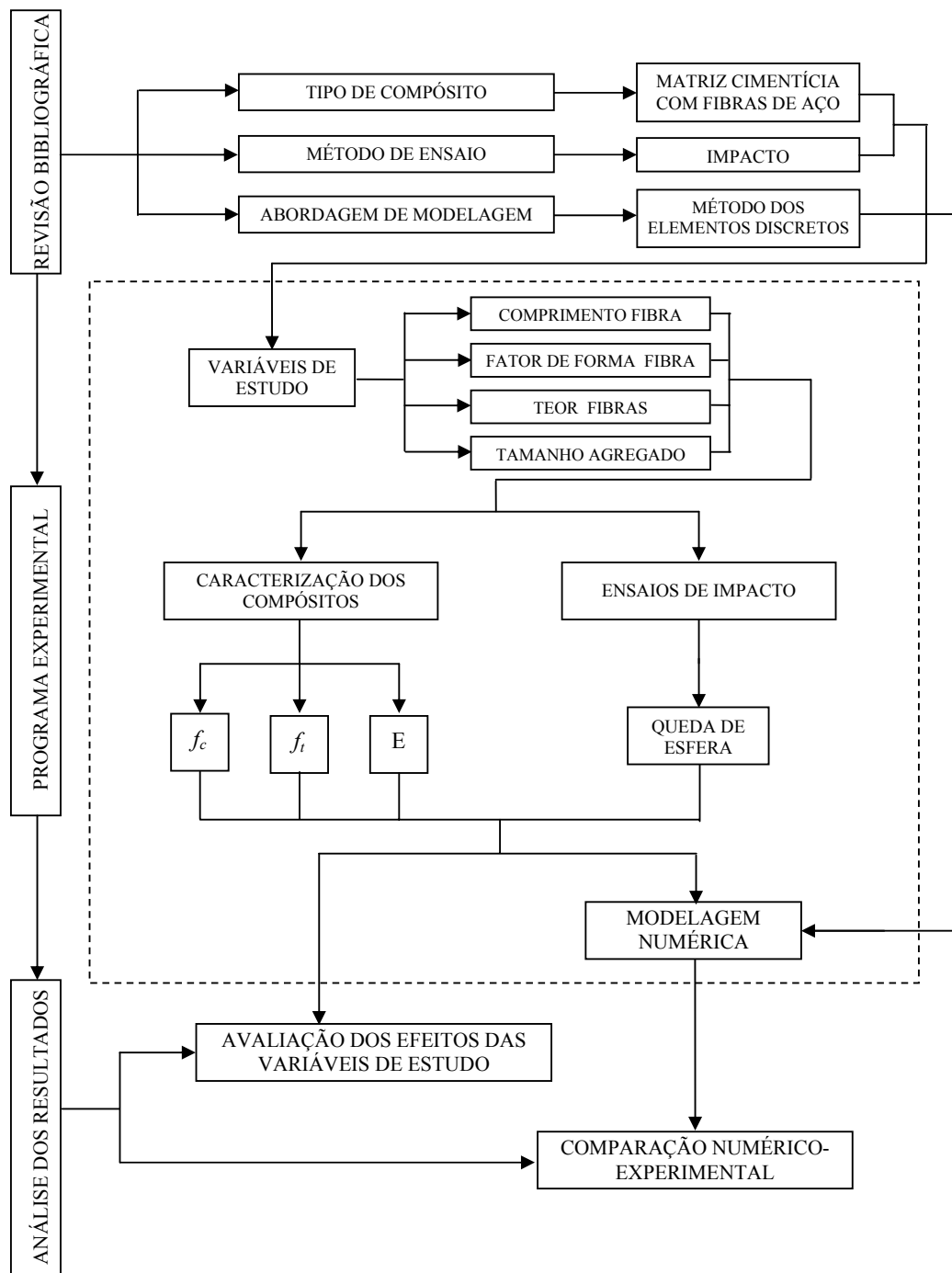


Figura 4.1 – Fluxograma de pesquisa adotado.

Existem muitas variáveis que influenciam no desempenho de um compósito, tanto associadas à matriz como ao elemento de reforço. Nesta pesquisa, decidiu-se concentrar a atenção em variáveis associadas à fibra, sendo então definida e mantida constante uma matriz cimentícia de referência. A exceção foi a variação do diâmetro do agregado graúdo em uma série de ensaios. O item 4.2 apresenta as variáveis de estudo adotadas.

A caracterização dos compósitos gerados foi feita através de alguns ensaios mecânicos (módulo de elasticidade, resistência à compressão e à tração), para avaliação dos efeitos da incorporação de fibras nestes parâmetros básicos de dimensionamento, e ensaios de impacto do tipo queda de esfera, que produziram dados para a comparação direta de desempenho entre os compósitos e para a comparação com os resultados do modelo numérico.

## **4.2 VARIÁVEIS DE ESTUDO**

Em relação às variáveis de estudo, cabe inicialmente salientar que as fibras de aço são comercializadas em diversos comprimentos e diâmetros. Decidiu-se, baseado na análise da literatura, que os principais fatores a investigar seriam:

- o comprimento das fibras,
- o fator de forma das fibras (relação comprimento/diâmetro),
- o teor de fibras incorporado no compósito e,
- o diâmetro máximo do agregado constituinte do 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 cargas de impacto.

Nesta dissertação foram utilizadas fibras de aço Dramix®, produzidas pela empresa Belgo/Grupo Arcelor. Portanto, a definição final dos níveis das variáveis de estudo foi baseada na tipologia de fibras deste fabricante, disponíveis no mercado brasileiro. Foram selecionados quatro tipos de fibras: dois com fator de forma igual a 45 e comprimentos variáveis (30 e 50 cm) e dois com comprimento igual a 60 cm e fatores de forma variáveis (65 e 80), cujas características são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características das fibras utilizadas no programa experimental.

Fibra	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Fator de Forma	Resistência do Arame (N/mm <sup>2</sup> )	Fibras/kg
RL 45/30 BN	30	0,62	45	1100	13000
RL 45/50 BN	50	1,05	45	1000	2800
RC 65/60 BN	60	0,90	65	1000	3200
RC 80/60 BN	60	0,75	80	1100	4600

De acordo com o fabricante, a letra R na denominação das fibras indica dupla ancoragem nas extremidades. A letra C indica que as fibras são comercializadas na forma de pentes colados, e a letra L indica que as fibras são comercializadas como segmentos independentes.

O primeiro número indica o fator de forma e o segundo, o comprimento da fibra. A letra B indica aço claro, sem revestimento, enquanto a letra N significa que o aço tem baixo teor de carbono (Belgo, 2004).

A Figura 4.2 ilustra as fibras utilizadas no programa experimental.

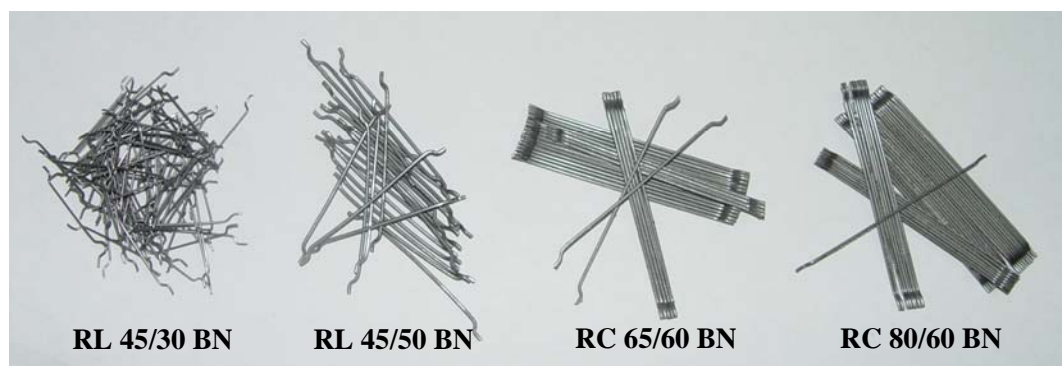


Figura 4.2 - Fibras utilizadas no programa experimental.

Para cada tipo de fibra foram estipulados três teores, com base nas recomendações de dosagem mínima fornecidas pelo fabricante, como apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Teores adotados em kg/m<sup>3</sup>

Fibra	Teor Mínimo	Teor Intermediário	Teor Máximo
RL 45/30 BN	30	45	60
RL 45/50 BN	30	45	60
RC 65/60 BN	10	30	45
RC 80/60 BN	10	30	45

Todas as matrizes foram geradas utilizando um traço padrão, apresentado no item 4.4, dosado para atingir uma resistência nominal de 30 MPa. O traço padrão empregava agregado de diâmetro máximo 19mm. Entretanto, para avaliar o efeito tamanho da fibra em relação ao tamanho do agregado, foram gerados também compósitos com agregado de diâmetro máximo 12,5mm.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

Para confecção das matrizes de concreto de referência, foram empregados materiais comumente encontrados em obras, como apresentado a seguir.

#### 4.3.1 Cimento

O material aglomerante utilizado foi um cimento Portland, do tipo CPV – ARI, da marca Cauê, de um mesmo lote de fabricação. As características físicas e químicas do mesmo, de acordo com o fabricante, se enquadram na *NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial* (ABNT, 1991).

#### 4.3.2 Agregado Graúdo

Nesta pesquisa foi adotado agregado graúdo de origem basáltica. O mesmo foi retirado do estoque existente no laboratório, lavado e seco ao ar antes da utilização. A caracterização granulométrica foi feita segundo a *NBR 7217 – Agregados* -

*Determinação da composição granulométrica* (ABNT, 2003), resultando nos dados da Tabela 4.3, que permitem classificá-lo como uma brita 1.

Tabela 4.3 - Caracterização granulométrica do basalto.

Abertura da peneira (mm)	19	12,5	9,5	6,3	4,8	<4,8
% retida média	1	50	36	11	1	1
% retida acumulada	1	51	87	98	99	100
Dimensão máxima característica (mm)						19
Módulo de finura						1,87

Para as moldagens com agregado gráudo de diâmetro máximo 12,5 mm foi realizado um processo de peneiramento do material utilizado para as demais concretagens, sendo mantido apenas o material passante na peneira 12,5 mm.

#### 4.3.3 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa de rio, proveniente do Rio Jacuí, classificada como areia regular ou média. A caracterização granulométrica da mesma, realizada de acordo com a *NBR 7217 – Agregados - Determinação da composição granulométrica* (ABNT, 2003), é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo.

Abertura da peneira (mm)	9,6	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	<0,15
% retida média	0	1	2	6	17	47	26	1
% retida acumulada	0	1	3	9	26	73	99	100
Módulo de finura								2,12
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )								2,59

#### **4.3.4 Aditivo**

Com o intuito de aumentar a trabalhabilidade das misturas com fibras, sem elevar a relação água-aglomerante, optou-se pelo uso do aditivo plastificante Mastermix 330N, da marca MBT Brasil, disponível no laboratório.

O aditivo foi utilizado em quantidade suficiente para a obtenção de um abatimento similar ao verificado no concreto sem adição de fibras, obedecendo sempre as recomendações do fabricante, que indicam abatimentos de  $100 \pm 20$ mm.

#### **4.3.5 Água de Amassamento**

A água de amassamento utilizada na mistura do concreto foi a água potável disponível na rede local de abastecimento.

### **4.4 DETERMINAÇÃO DO TRAÇO DO CONCRETO UTILIZADO**

A definição do traço adotado nesta pesquisa foi feita a partir de informações e curvas de dosagem disponíveis no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), já utilizados em pesquisas semelhantes. O traço definido foi de 1 : 2,21 : 3,21 (cimento : areia : brita), em massa, com relação água/cimento de 0,52.

A trabalhabilidade das misturas neste estudo foi medida pelo ensaio de tronco de cone, realizado segundo a *NBR NM67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone* (ABNT, 1998). Seguindo recomendações do fabricante das fibras, estabeleceu-se que o abatimento padrão deveria ser de  $100 \pm 20$ mm. Os teores de plastificante foram ajustados, nos traços com fibras, para que fosse atingido este abatimento.

### **4.5 MOLDAGEM E CURA**

A moldagem de todos os corpos-de-prova foi realizada de acordo com as recomendações da *NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto* (ABNT, 1984).

A mistura dos materiais para confecção do concreto obedeceu a seguinte ordem de colocação na betoneira: agregado graúdo, água de amassamento, cimento e agregado miúdo. Após uma homogeneização de 5 minutos, o primeiro valor do abatimento de tronco de cone era medido. Posteriormente as fibras eram adicionadas, sendo coletada a segunda medida do abatimento de tronco de cone. A terceira medida de abatimento era realizada após mistura do aditivo, nos casos onde foi necessária a incorporação deste.

Os corpos-de-prova moldados eram mantidos em ambiente de laboratório até a desmoldagem, que se dava após um período de 24 horas. Os corpos-de-prova eram então armazenados em câmara úmida, em condições de temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e de umidade relativa maior que 95%, até a idade de ensaio.

#### **4.6 ENSAIOS REALIZADOS**

Apesar da crescente utilização de fibras para reforço de elementos de concreto, não existem ainda normas nacionais e nem consenso internacional para quantificação das melhoras provocadas, especialmente quando as estruturas estão sujeitas a esforços dinâmicos. Diante da ausência de normalização específica, buscou-se um ensaio capaz de avaliar o comportamento do concreto quando submetido a cargas de impacto e a contribuição da adição de fibras na matriz do concreto nas etapas de pré e pós-fissuração dos compósitos. O teste escolhido foi o de queda de esfera, recomendado para elementos cerâmicos, mas que já foi usado em outras pesquisas de concretos com fibras, com bons resultados (Bernardi, 2003).

Para complementar a caracterização dos compósitos gerados, foram também realizados ensaios para avaliar quantitativamente a resistência à compressão axial, a resistência à compressão diametral e módulo de elasticidade. Cada um destes ensaios está descrito a seguir.

##### **4.6.1 Resistência à Compressão Simples**

A resistência à compressão axial foi avaliada com utilização de corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, seguindo as recomendações da NBR 5739 - *Concreto* –

*Ensaio de compressão de corpos cilíndricos* (ABNT, 1994). Foram ensaiados três corpos-de-prova para cada compósito, na idade de 28 dias.

#### 4.6.2 Resistência à Compressão Diametral

A resistência à compressão diametral foi avaliada com a utilização de corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, seguindo as recomendações da NBR 7222 - *Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos* (ABNT, 1994). Foram ensaiados três corpos-de-prova para cada compósito, com idade de 28 dias. Os ensaios foram realizados em uma prensa computadorizada marca SHIMADZU, com controle automático do carregamento.

#### 4.6.3 Módulo de Elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade longitudinal secante dos compósitos foi realizada conforme determina a NBR 8522 – *Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação* (ABNT, 2002). O módulo secante foi calculado com o emprego da expressão 4.1.

$$E_{\text{sec}} = \frac{\sigma_n - \sigma_{\text{inf}}}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \quad (4.1)$$

sendo:  $\sigma_n$  a tensão considerada para o cálculo do módulo, adotada em 40% da tensão de ruptura do material;

$\sigma_{\text{inf}}$  a tensão de 0,5MPa;

$\varepsilon_n$  a deformação específica correspondente à tensão  $\sigma_n$  ;

$\varepsilon_0$  a deformação específica correspondente à tensão  $\sigma_{\text{inf}}$  .

Foram ensaiados três corpos-de-prova para cada compósito, na idade de 28 dias, com auxílio de um anel de ensaio com dois transdutores tipo LVDT, monitorados por um sistema de aquisição de dados tipo SYSTEM 5000, da Vishay Instruments. A Figura 4.3 mostra o equipamento de ensaio.





Figura 4.3 - Ensaio de módulo de elasticidade, realizado com o auxílio de dois transdutores tipo LVDT.

Os valores obtidos foram comparados com os valores estimados de módulo, calculados a partir da resistência à compressão, de acordo com a formulação sugerida na NBR 6118 - (ABNT, 2003).

#### **4.6.4 Ensaio de Impacto – Queda de Esfera**

Este método do ensaio foi concebido com base nos parâmetros recomendados pelo Anexo Q da NBR 13818 – *Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificações e Métodos de Ensaio* (ABNT, 1997), sendo realizadas algumas adaptações para emprego de espécimes de concreto.

A lógica do ensaio consiste em submeter placas de um determinado material a quedas de uma esfera com peso padronizado. As quedas sucessivas, de alturas crescentes, ocasionam o surgimento de fissuras e a ruptura das placas. Em Bernardi (2003), um estudo utilizando este ensaio em concretos reforçados com fibras de aço, polipropileno, sisal, aramida e vidro foi desenvolvido. No mesmo, as fibras de aço aumentaram significativamente a resistência final dos compósitos ao impacto.

No presente trabalho foram ensaiados três corpos-de-prova para cada combinação de variáveis, na idade de 28 dias. Dadas as características do ensaio, o mesmo foi realizado em corpos-de-prova na forma de placas quadradas, com 30 cm de lado e 6 cm de altura.

O equipamento de ensaio é composto de um tubo rígido com diâmetro nominal de 75mm, graduado ao longo da altura, em intervalos de 10cm, a partir de uma marcação inicial correspondente a 10cm de distância da face placa, até uma altura final de 220cm. A esfera empregada, constituída de aço-cromo, têm massa nominal de 1 kg. A Figura 4.4 apresenta um esquema geral do ensaio.

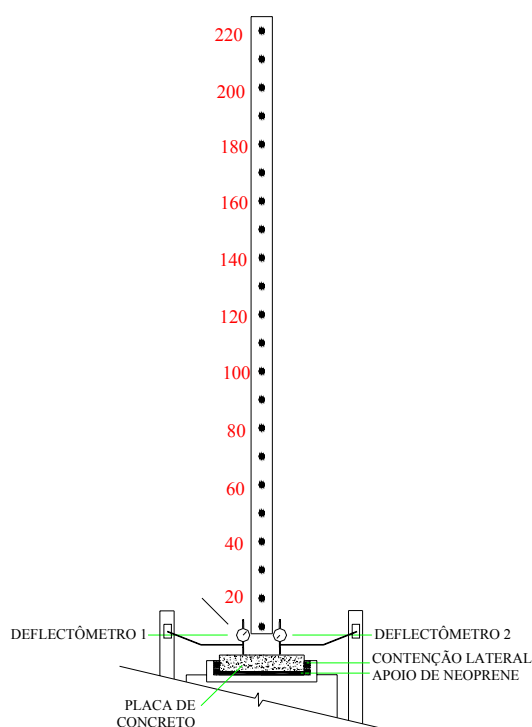


Figura 4.4 - Esquema do ensaio de queda de esfera.

A placa ensaiada é apoiada sobre tiras de neoprene com 1cm de espessura, coladas no perímetro do quadro de suporte da placa, buscando simular um apoio semi-elástico de primeira espécie, que só oferece restrição ao deslocamento vertical. Para garantir o posicionamento inicial da placa no suporte, sem provocar sua imobilização, tiras de espuma são usadas em sua lateral. Na Figura 4.5 é mostrada uma placa de concreto posicionada para o ensaio.



Figura 4.5 - Detalhe da placa de concreto no equipamento de ensaio de queda de esfera.

Determina-se, então, a energia acumulada necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura do material, avaliando-se a contribuição das fibras ao longo do processo de fissuração. Como critério de ruptura foi adotada a percepção visual da propagação da fissura até a face superior da placa.

Além do registro das energias, feitas a partir das alturas de queda, e do acompanhamento do progresso da fissuração, realizado com o auxílio de um fissurômetro, o controle dos deslocamentos verticais das placas ao longo do ensaio, buscando registrar a evolução da deformação permanente, também foi realizado. As medições são realizadas com auxílio de dois defletores, posicionados de acordo com o diagrama mostrado na Figura 4.6.

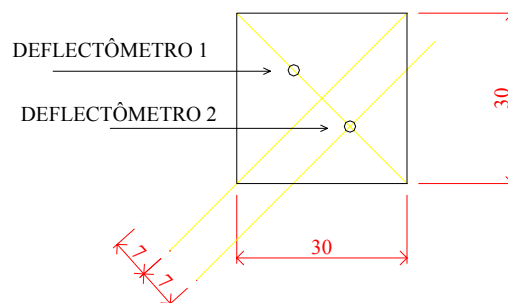


Figura 4.6 - Posicionamento dos defletores.

#### 4.6.5 Ensaios de Tenacidade

Para avaliar a contribuição da adição das fibras de aço na tenacidade do concreto, parâmetro correlacionado com a energia de fratura, que é empregada na modelagem numérica, foi efetuada uma série de ensaios complementares, com aplicação de carga estática.

Placas idênticas às submetidas ao ensaio de impacto, com diferentes teores de adição das fibras 45/30 e 80/60, foram ensaiadas estaticamente, com controle de deslocamento, e velocidade de aplicação da carga de 0,6 mm/min. O ensaio foi realizado em uma prensa Shimadzu, com monitoramento de dados automático via computador. Os dados obtidos foram depurados e analisados para a definição da tenacidade em um mesmo nível de deslocamento para todas as placas.

O esquema de ensaio estático reproduziu as condições de contorno do ensaio de impacto, empregando-se o mesmo estrado de apoio. A forma de aplicação de carga pode ser observada na Figura 4.7. Nota-se que foi usada, para aplicação da carga, a mesma esfera empregada nos ensaios de impacto, reproduzindo o efeito de um carregamento concentrado no centro da placa.



Figura 4.7 - Esquema de ensaio estático.

## **CAPÍTULO 5**

### **APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios descritos no Capítulo 4. Discutem-se os efeitos das variáveis de estudo, estabelecendo-se comparações com os resultados obtidos para o concreto simples, que é tomado como testemunho.

Primeiramente são apresentados os resultados da influência da adição das fibras sobre a trabalhabilidade das misturas. Nos itens seguintes, são analisadas as modificações no comportamento dos compósitos causados pela variação do fator de forma da fibra, do comprimento da fibra, do tamanho máximo do agregado e também a influência dos teores de fibra adicionados. Os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração e ensaio de queda de esfera foram submetidos a análises de variância multifatorial (ANOVA), com auxílio do software *Statística*. Os dados brutos empregados nas análises estão apresentados no Anexo 1.

#### **5.1 ANÁLISE DA PERDA DE TRABALHABILIDADE DA MISTURA**

A Figura 5.1 apresenta a variação de trabalhabilidade das misturas de concreto, medida através do ensaio de abatimento de tronco de cone. Embora este ensaio não seja o mais indicado para quantificação da perda da trabalhabilidade em concretos reforçados com fibras, como explicado no Capítulo 3, optou-se pela sua realização, devido à facilidade de execução do ensaio. Foram tomados valores para o abatimento do concreto antes e após a adição das fibras. Esta etapa foi realizada sem o emprego de aditivo na mistura, a fim de avaliar a redução provocada pela adição das fibras.

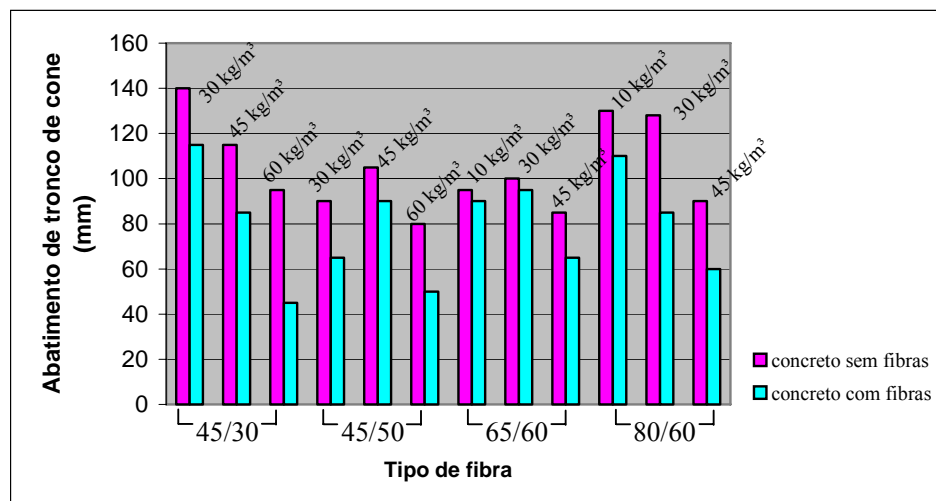


Figura 5.1 - Ensaio de abatimento de tronco de cone.

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, que implicam em um número maior de fibras incorporadas por metro cúbico de concreto, chegando a atingir valores em torno de 50%.

Nos concretos estudados, para contornar esta perda de trabalhabilidade, foi realizada a incorporação de aditivo plastificante, após a inserção das fibras, com o objetivo de se atingir índices de trabalhabilidade similares aos anteriores à adição das fibras, como detalhado no Capítulo 4. As quantidades adicionadas e os abatimentos obtidos após a incorporação de aditivo são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Porcentagens de aditivos incorporadas aos diversos concretos e abatimentos obtidos após a incorporação.

Fibra	Teor [kg/m³]	% aditivo em massa	Slump [mm]
45/30	30	0,150	125
	45	0,150	100
	60	0,225	105
45/50	30	0,150	80
	45	0,150	110
	60	0,150	95
65/60	10	0,150	115
	45	0,150	110
	60	0,150	95
80/60	10	0,075	130
	45	0,150	115
	60	0,150	95

## 5.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA DA FIBRA

Para a análise da influência do fator de forma na resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência ao impacto, foram utilizados concretos moldados com as fibras 65/60 e 80/60, uma vez que ambas apresentam o mesmo comprimento, com fatores de forma distintos.

Como pode ser observado nas Figuras 5.2 e 5.3, o fator de forma não provoca grandes variações na resistência à compressão, no módulo de elasticidade e na resistência à tração dos compósitos, sendo, entretanto, o efeito das fibras levemente positivo para os dois primeiros e negativo para o último. De forma genérica pode-se considerar que a variação do fator de forma das fibras de aço, no intervalo estudado, não influencia nas propriedades básicas dos compósitos gerados. Observa-se que cada ponto dos diagramas representa a média de três corpos de prova ensaiados.

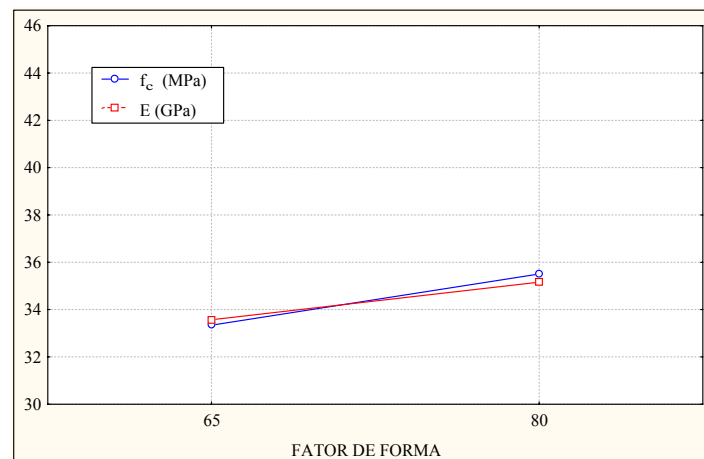


Figura 5.2 - Influência do fator de forma na resistência à compressão e no módulo de elasticidade.

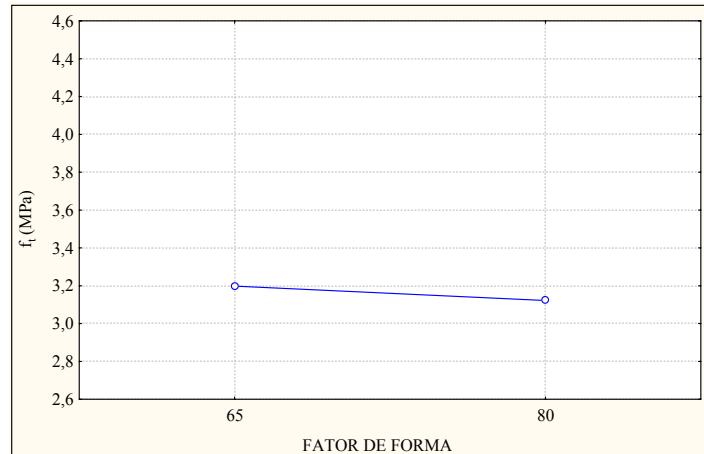


Figura 5.3 - Influência do fator de forma na resistência à tração por compressão diametral.

Quando são avaliados os efeitos do fator de forma na resistência ao impacto dos compósitos, observa-se que, com o aumento do fator de forma, ocorre um incremento tanto na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura, quanto na necessária para a ruptura do compósito. As médias plotadas na Figura 5.4 mostram variações nas energias da ordem de 45% para o aparecimento da primeira fissura e em torno de 20% para a ruptura dos compósitos reforçados com as fibras 80/60. Isto, provavelmente, deve-se ao fato de que, aumentando-se o fator de forma ( $\ell/d$ ) e mantendo-se constante o comprimento, um número maior de fibras é incorporado à matriz, para um mesmo teor de adição. Como existe um número maior de fibras, a probabilidade das fissuras serem interceptadas por estas é maior, e por consequência, a costura promovida pelas fibras se torna mais eficiente.



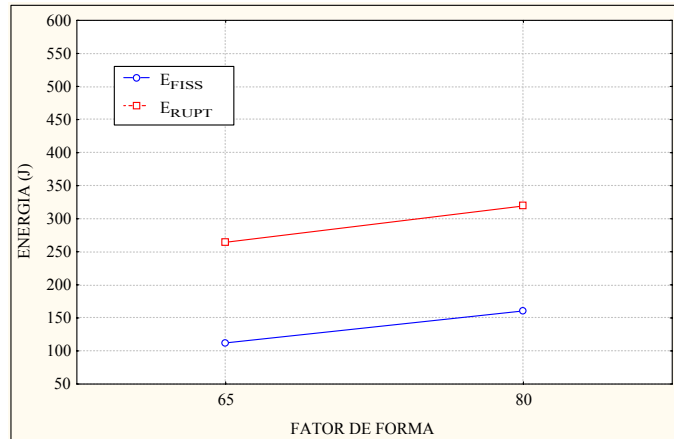


Figura 5.4 - Influência do fator de forma na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura.

Na Figura 5.5 são mostradas as tendências de comportamento dos compósitos para os diversos teores de adição de fibras. Observa-se que, quanto maior o teor de fibras adicionado, maiores são os incrementos nas energias necessárias para fraturar e romper os compósitos. A diferença na inclinação das retas entre os teores 10 e 30 e os teores 30 e 45 demonstra a tendência exponencial dos incrementos de energia em função dos teores de fibra adicionados. Os incrementos na energia de ruptura provocados pelo aumento do teor são maiores que os incrementos para o aparecimento da primeira fissura. Este efeito confirma a eficiência das fibras de aço no estágio pós-fissurado dos compósitos.

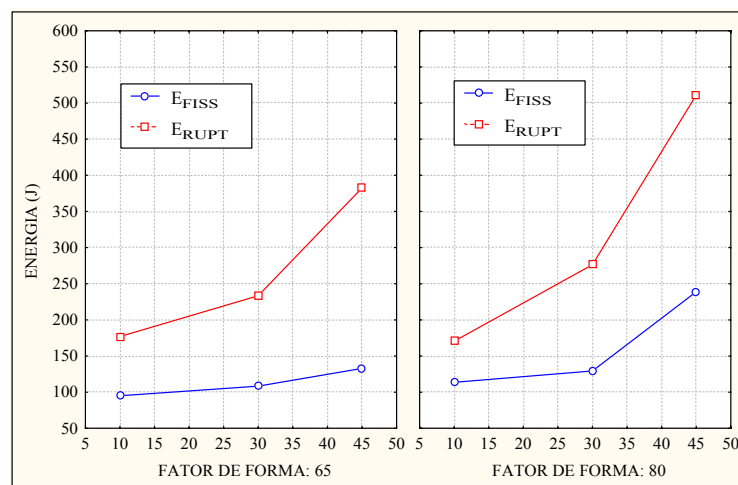


Figura 5.5 - Influência do fator de forma na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e energia de ruptura, para os diversos teores de moldagem.

### 5.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA FIBRA

Para a análise da influência do comprimento da fibra na resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura dos compósitos no ensaio de impacto, foram utilizadas as fibras 45/30 e 45/50. Essas fibras apresentam o mesmo fator de forma, porém possuem comprimentos diferentes, de 30 e 50mm, respectivamente. Os resultados encontrados podem ser observados nas Figuras 5.6 a 5.8.

Na Figura 5.6, observa-se que, com o aumento do comprimento das fibras, o que implica numa melhor ancoragem, obtêm-se um acréscimo nos valores de resistência à compressão dos compósitos, da ordem de 10%. As fibras, neste caso, passam a atuar com mais eficiência no controle da fissuração, mantendo a integridade do corpo-de-prova em altas deformações, o que se reflete em um leve aumento da capacidade de carga. O oposto ocorre com o módulo de elasticidade, que apresenta uma redução da ordem de 6,5% com o aumento do comprimento.

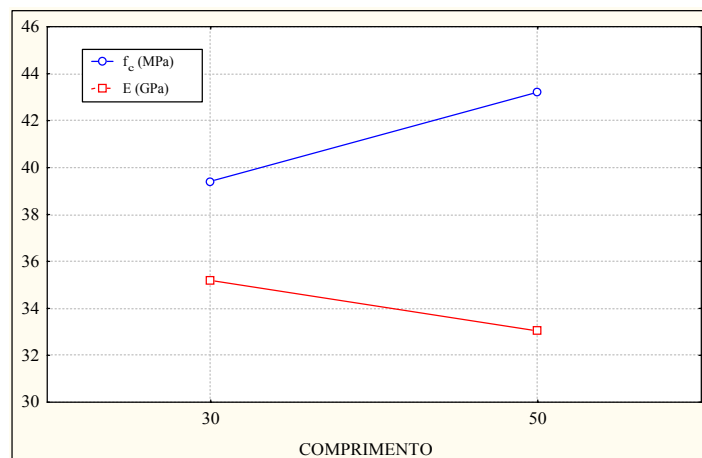


Figura 5.6 - Influência do comprimento das fibras na resistência à compressão e no módulo de elasticidade.

Na Figura 5.7 podem ser observados os resultados de resistência à tração dos compósitos. Não se observa uma variação significativa nos valores encontrados. O mesmo acontece quando são avaliadas as energias necessárias para causar a primeira fissura e para a ruptura, vistas na Figura 5.8. Portanto, conclui-se que o aumento do

comprimento não interferiu na resposta dos compósitos estudados às solicitações de impacto impostas.

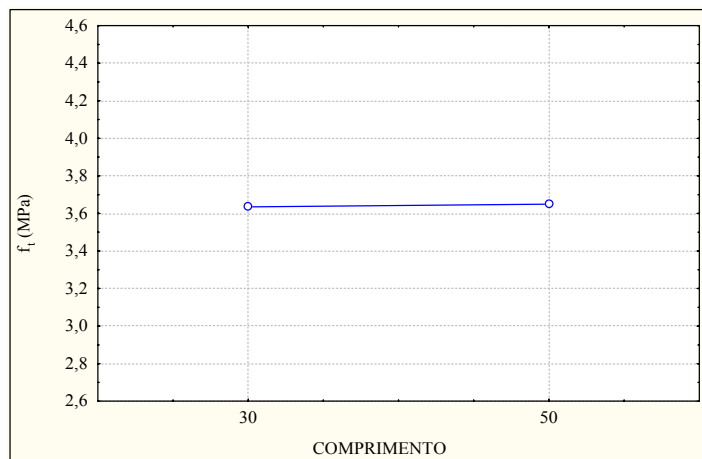


Figura 5.7 - Influência do comprimento na resistência à tração por compressão diametral.

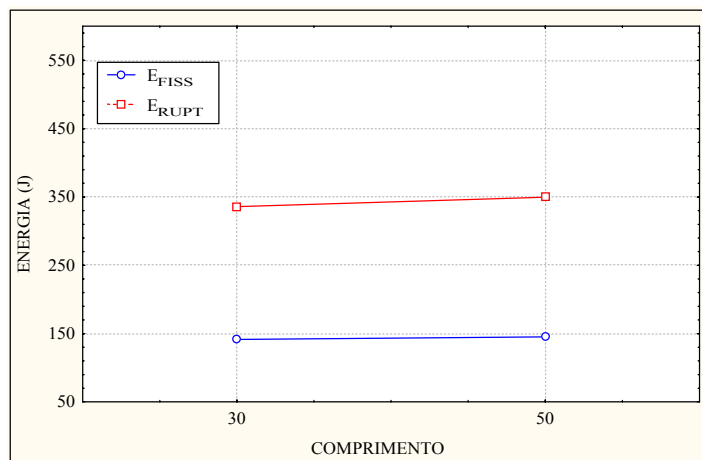


Figura 5.8 - Influência do comprimento na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura.

#### 5.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO AGREGADO

Para verificar a relevância da recomendação da utilização de fibras cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado, como discutido no Capítulo 2, foram produzidos concretos com a fibra 45/30 e agregados com diâmetro máximo de 12,5 e 19mm. O concreto com agregado de

diâmetro máximo 12,5mm obedece à recomendação acima, enquanto o concreto produzido com agregado de diâmetro máximo 19mm não a segue.

Como se pode observar na Figura 5.9, a variação do tamanho do agregado não afeta de forma significativa as médias encontradas para a resistência à compressão dos compósitos.

Quando são avaliados os efeitos do tamanho do agregado sobre o módulo de elasticidade dos compósitos, nota-se um decréscimo da ordem de 7% quando se emprega o agregado maior. Isto pode ser associado ao fato de que agregados maiores acarretam zonas de transição maiores e menos resistentes.

Na Figura 5.10 pode-se visualizar o comportamento à tração dos compósitos analisados. Ao contrário do observado no caso do módulo, o agregado com diâmetro maior acarretou um acréscimo estatisticamente significativo de 10% na resistência. Esta tendência contrariou a expectativa.

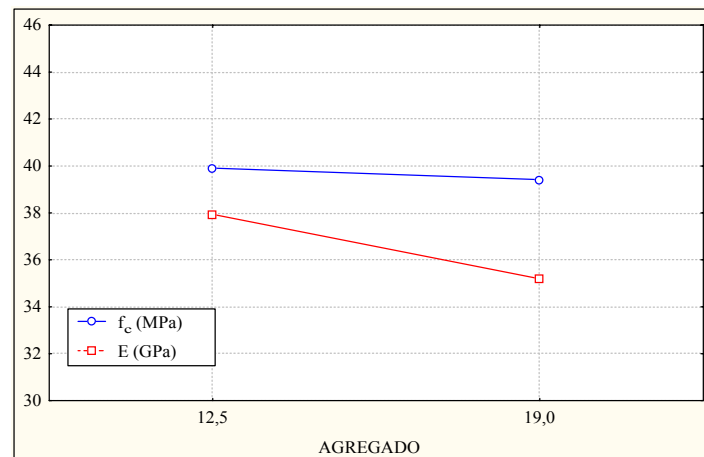


Figura 5.9 - Influência do tamanho do agregado na resistência à compressão e no módulo de elasticidade.

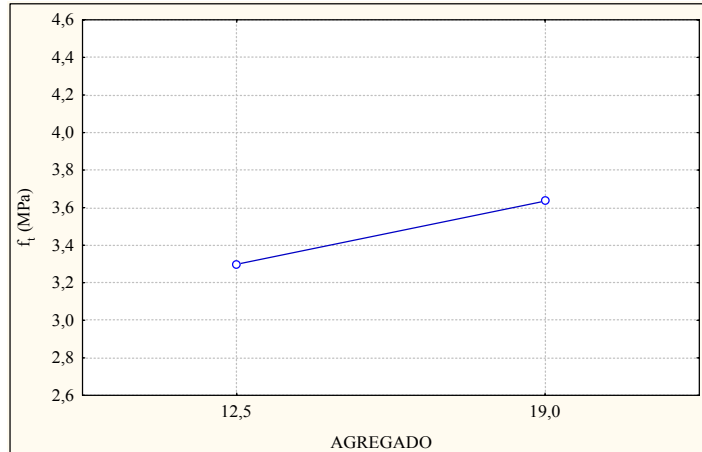


Figura 5.10 - Influência do tamanho do agregado na resistência à tração por compressão diametral.

Buscando explicar o resultado, foi examinada a comparação entre os efeitos dos agregados na resistência à tração por compressão diametral, teor a teor. Como se pode ver na Figura 5.11, nos teores mais elevados o concreto com agregado de 19 mm alcançou melhores resistências. Somente no teor de 30 kg/m<sup>3</sup> o agregado menor apresentou melhor desempenho. Isto parece indicar que a questão do tamanho do agregado só é importante quando a quantidade de fibras não é muito elevada. Acredita-se que devem ser realizados novos ensaios para confirmar ou rechaçar esta hipótese.

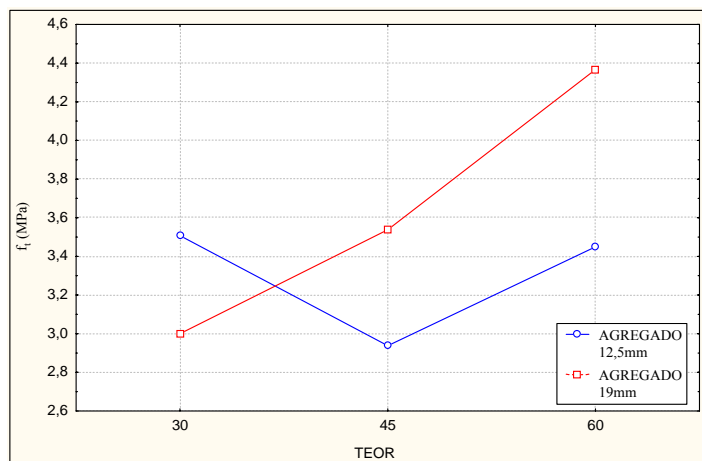


Figura 5.11 - Influência do tamanho do agregado e do teor de fibras na resistência à tração por compressão diametral dos compósitos.

O tamanho do agregado não interfere no comportamento ao impacto, pois não altera de forma significativa a quantidade de energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura dos compósitos, como pode ser observado nas médias de energia plotadas na Figura 5.12.

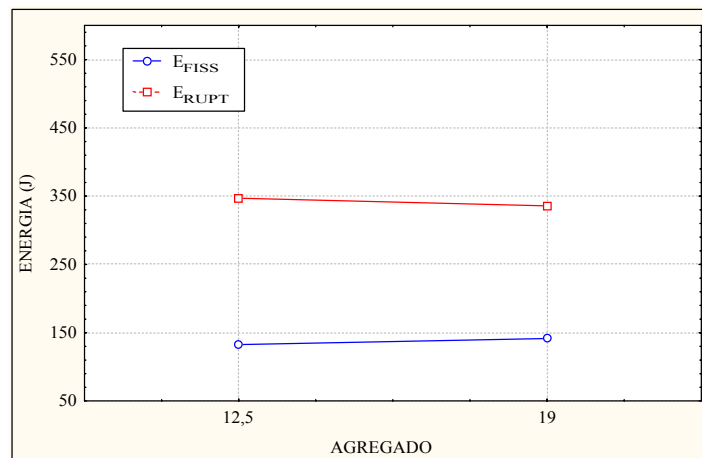


Figura 5.12 - Influência do tamanho do agregado na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura dos compósitos.

Confirma-se esta tendência quando são plotados os gráficos de energia x teor de fibras, mostrados na Figura 5.13. O aumento do teor de fibras tende a aumentar tanto a energia necessária para o aparecimento da primeira fissura quanto a energia necessária para levar o compósito à ruptura. Apesar dos compósitos com agregado de diâmetro máximo 12,5mm apresentarem um comportamento levemente superior aos compósitos com agregado de 19mm, em termos de energia de ruptura, para os teores de 45 e 60 kg/m<sup>3</sup>, não são encontradas grandes diferenças de energia com a variação do tamanho do agregado. Ou seja, a teoria que a fibra deve ter comprimento superior a duas vezes o diâmetro máximo do agregado utilizado, de forma a garantir uma ancoragem eficiente, não parece ser aplicável a compósitos submetidos a esforços de impacto como os impostos neste estudo.

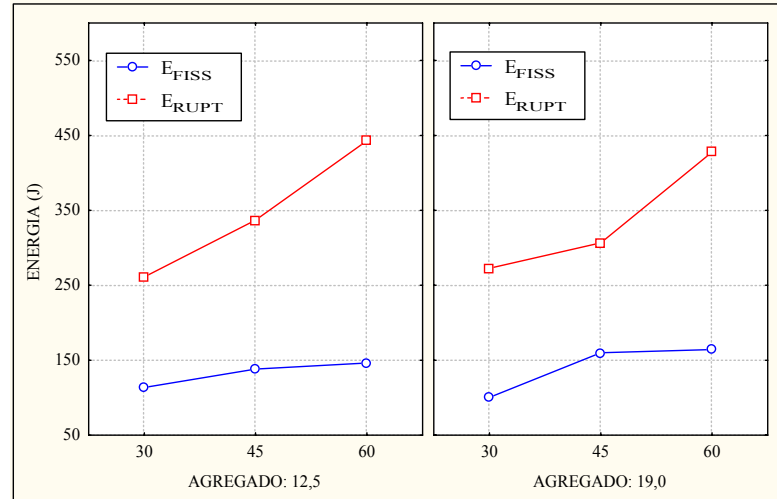


Figura 5.13 - Influência do tamanho do agregado na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para ruptura dos compósitos.

## 5.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS

Na Figura 5.14 são apresentados os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade, obtidos para os diversos teores de fibra pesquisados. Salienta-se que os teores ensaiados variaram em função do tipo de fibra, como discutido no Capítulo 4.

Nota-se, examinando os gráficos da figura, que a presença de fibras de baixo fator de forma tende a incrementar significativamente a resistência à compressão, especialmente quando as mesmas têm um comprimento maior. Já as fibras de maior fator de forma e maior comprimento causam perdas suaves na resistência à compressão, possivelmente por que as fibras muito longas prejudicam a homogeneidade das misturas e a compactação do material, principalmente quando são utilizadas seções de pequena dimensão. Como foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro nos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, pode ter ocorrido uma incompatibilidade entre o comprimento da fibra e a seção transversal do corpo-de-prova, o que favoreceu o alinhamento das fibras na direção da altura do cilindro, afetando os resultados encontrados. A realização de estudos específicos sobre esta questão seria interessante para balizar as técnicas de ensaio a serem empregadas para caracterizar concretos com fibras.

Quanto ao módulo, em todos os casos a presença das fibras gerou perdas. Apenas nos teores mais altos é que as fibras 45/30 e 80/60 mostraram uma leve inversão desta 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.

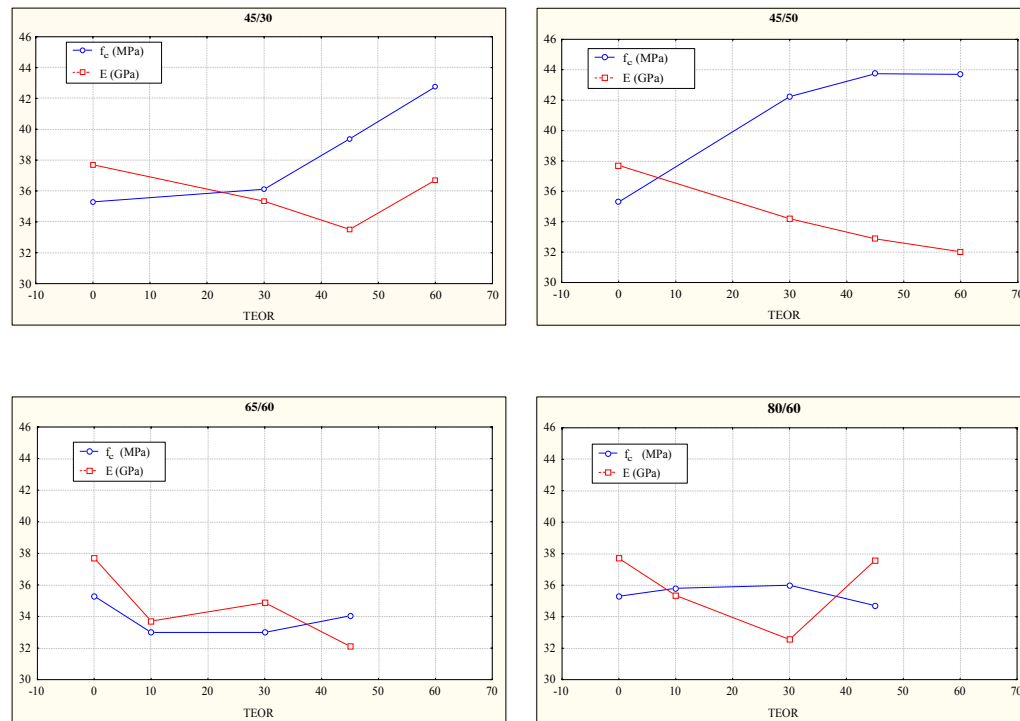


Figura 5.14 - Influência do teor na resistência à compressão e no módulo de elasticidade dos compósitos gerados com as fibras 45/30, 45/50, 65/60 e 80/60.

Como observado na Figura 5.15, todos os compósitos com adição de fibras em teores superiores a  $45 \text{ kg/m}^3$  sofreram incrementos na resistência à tração, quando comparados com o concreto tido como testemunho. A fibra de maior diâmetro (45/50) provocou incrementos na resistência à tração para todos os teores adicionados. No entanto, a fibra de menor diâmetro e menor comprimento (45/30) apresentou melhores resultados para teores elevados. Como a resistência à tração dos compósitos foi obtida nos ensaios de resistência à compressão diametral, também pode ter ocorrido uma incompatibilidade entre o comprimento das fibras 65/60 e 80/60 e o tamanho do corpo-de-prova. O



possível alinhamento das fibras, provocado pela incompatibilidade de dimensões, causaria interferências diretas na resistência dos compósitos reforçados com fibras longas, em baixos teores.

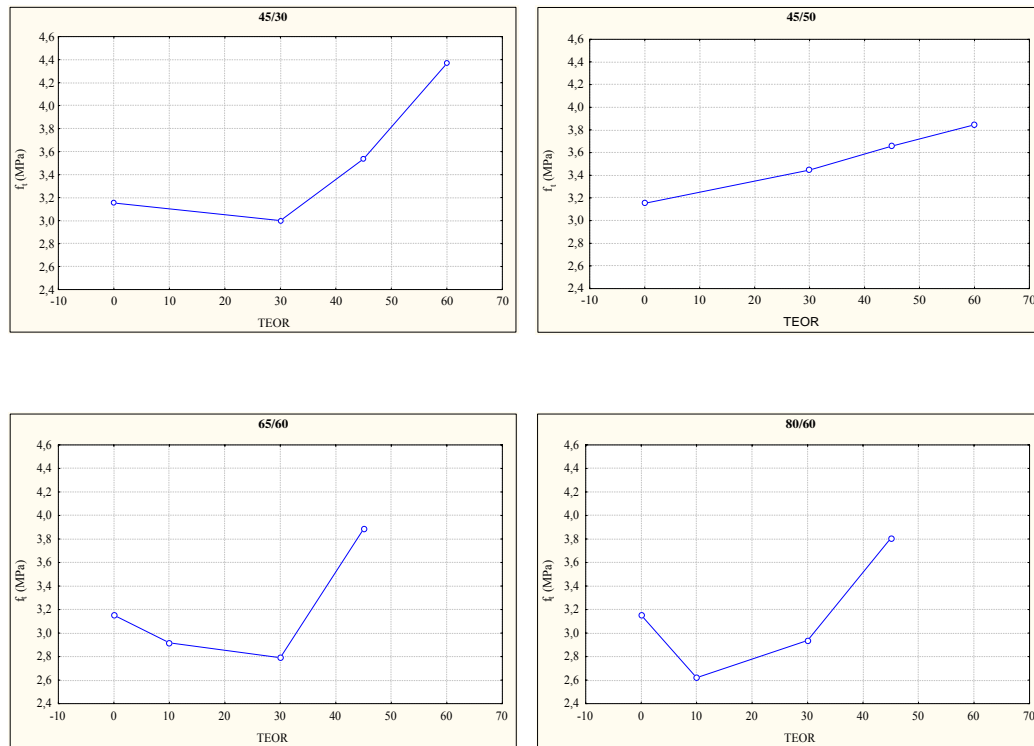


Figura 5.15 - Influência do teor na resistência à tração dos compósitos gerados com as fibras 45/30, 45/50, 65/60 e 80/60.

Na Figura 5.16 verifica-se que todas as fibras, em todos os teores, provocaram o aumento da energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura do compósito. Para efeitos de comparação, os resultados da evolução da energia necessária para o aparecimento da primeira fissura são agrupados na Figura 5.17. Observa-se que a presença das fibras não retardou significativamente o aparecimento da primeira fissura, principalmente para baixos teores, conforme esperado. Efeitos positivos só puderam ser observados em teores mais elevados, para algumas fibras. Cabe destacar que os compósitos com adição da fibra 80/60, de maior fator de forma e maior comprimento, apresentaram desempenho superior aos gerados com as demais fibras, para todos os teores de adição.

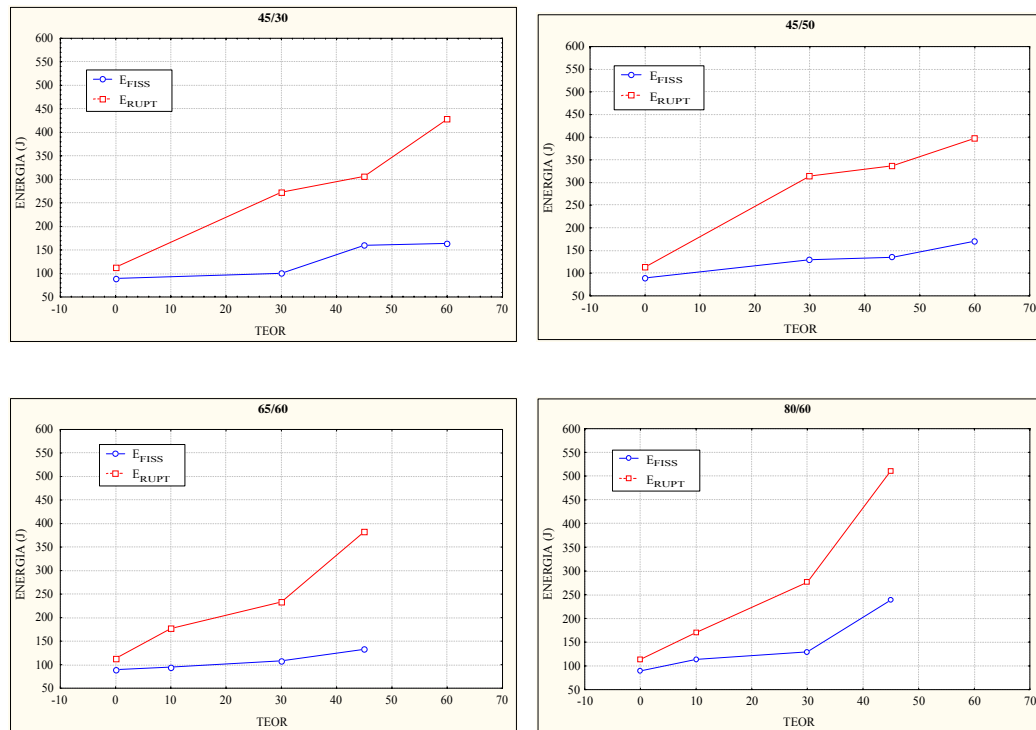


Figura 5.16 - Influência do teor na energia necessária para a primeira fissura e para a ruptura dos compósitos reforçados com as fibras 45/30, 45/50, 65/60 e 80/60.

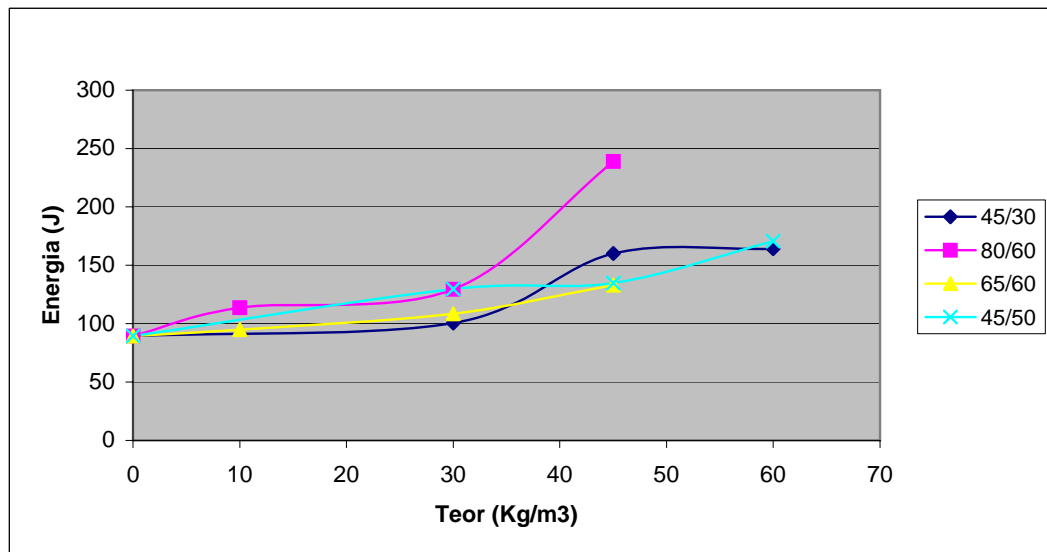


Figura 5.17 - Evolução da energia necessária para o aparecimento da primeira fissura para todas as fibras e teores ensaiados.

Na Figura 5.18 são mostradas as energias necessárias para levar os compósitos à ruptura. Observa-se a mesma tendência de comportamento para os compósitos reforçados com as fibras de mesmo comprimento (65/60 e 80/60), bem como para as fibras de mesmo fator de forma (45/30 e 45/50). Os maiores fatores de forma resultaram maiores energias de ruptura. Novamente a fibra 80/60 apresentou melhores resultados, para teores mais elevados.

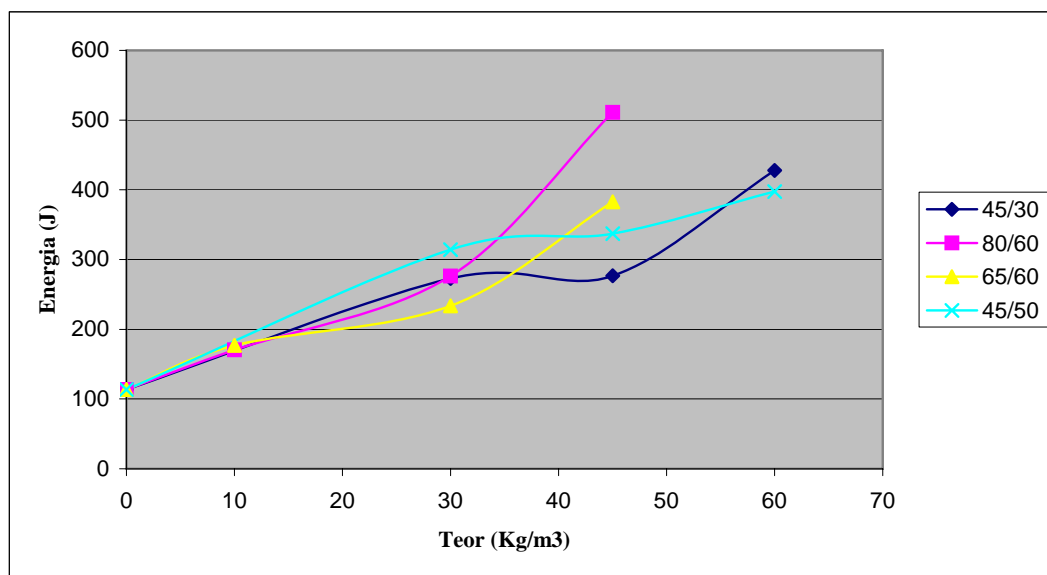


Figura 5.18 - Evolução da energia necessária para a ruptura dos compósitos para todas as fibras e teores ensaiados.

Também foram analisadas a energia de fissuração e a energia de ruptura em relação ao número de fibras por  $m^3$  de concreto. Na Figura 5.19 estão plotados os resultados das energias necessárias para o aparecimento da primeira fissura, em função do número de fibras, para todos os compósitos ensaiados. Observa-se que o comportamento dos compósitos com fibras de comprimentos de 50 e 60mm, que apresentam um número de fibras por  $m^3$  parecido, é similar e superior ao comportamento dos compósitos com fibras curtas, de 30mm. Nestes últimos, o efeito da adição de fibras só começa a ser sentido de forma efetiva para quantidades superiores a 400.000 fibras/ $m^3$ .

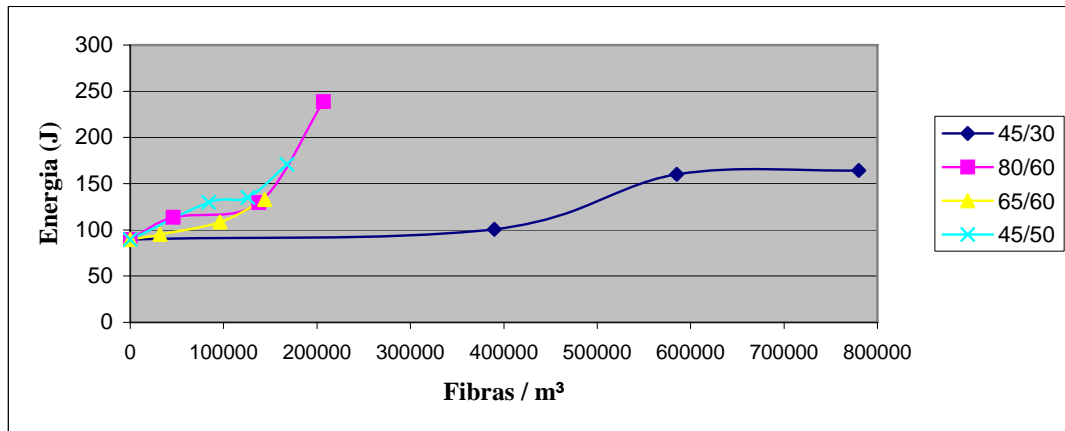


Figura 5.19 - Evolução da energia necessária para o aparecimento da primeira fissura em relação ao número de fibras por m<sup>3</sup>.

Na Figura 5.20 estão plotadas as energias necessárias para a ruptura dos compósitos em relação ao número de fibras por m<sup>3</sup>. Pode-se notar novamente que as fibras de maior comprimento são efetivas a partir das 100.000 fibras por metro cúbico, enquanto que as curtas tornam-se mais eficientes a partir de 600.000 fibras/m<sup>3</sup>.

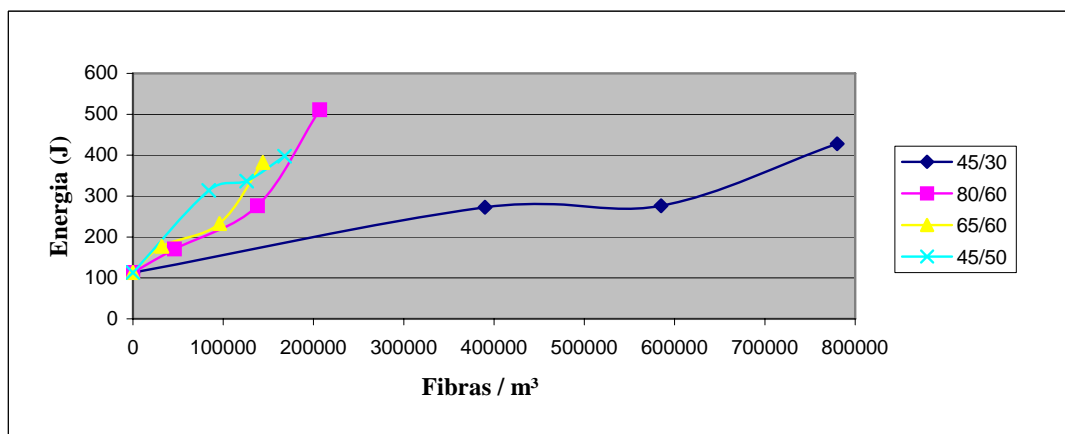


Figura 5.20 - Evolução da energia necessária para a ruptura dos compósitos em relação ao número de fibras por m<sup>3</sup>.

Analisando os dois últimos gráficos, pode-se detectar uma tendência que indica que, quando são empregadas fibras maiores (acima de 50 mm), é necessário um número bem menor de fibras para modificar o comportamento ao impacto do compósito. Este efeito não é linear, o que parece confirmar a existência de um certo comprimento crítico de ancoragem das fibras.

## 5.6 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

Os dados de deslocamento coletados nos ensaios de queda de esfera estão apresentados no Anexo 1, juntamente com os resultados obtidos nos demais ensaios deste programa experimental. Entretanto, esses resultados não apresentaram nível de significância estatística relevante, sendo descartados da análise.

Somente para fins de ilustração do tipo de comportamento observado, a Figura 5.21 apresenta um gráfico mostrando a evolução dos deslocamentos verticais em três placas de concreto com adição de 30 kg de fibras 45/30, comparadas com uma placa testemunho.

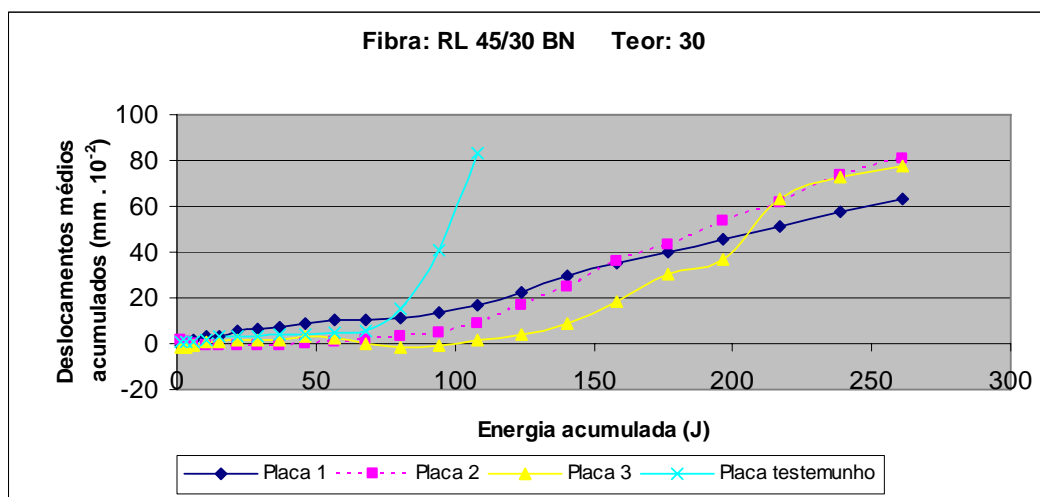


Figura 5.21 – Evolução dos deslocamentos verticais.

Observa-se que a adição de fibras enrijece significativamente a placa, reduzindo os deslocamentos para um determinado nível de carregamento. Nota-se, ainda, que as três placas apresentaram deslocamentos muito similares, evidenciando que o método de ensaio tem boa reprodutibilidade.

O problema ocorrido em alguns corpos-de-prova, que prejudicou a análise destes dados, foi decorrente do deslocamento lateral do ponto de medição em função da curvatura da placa e/ou de sua movimentação. Estudos estão sendo efetuados para modificar a coleta de dados, tornando o método de ensaio mais robusto para análise dos deslocamentos.

## 5.7 ANÁLISE DA TENACIDADE

A Figura 5.22 mostra os resultados obtidos, na forma de diagramas carga x deslocamento, para os ensaios de avaliação de tenacidade dos compósitos reforçados com a fibra 45/30. Observa-se que o aumento do teor de fibras provoca ganhos na resistência última, que podem atingir 35% no caso do maior teor. Nota-se, também, que os teores empregados estão abaixo do teor crítico, pois as cargas caem subitamente quando se atinge o carregamento máximo, com desenvolvimento da fissura. A presença das fibras, entretanto, permite que seja mantida uma parcela da capacidade de carga, que é tanto maior quanto for o teor de adição.

Para análise da tenacidade, as curvas foram seccionadas em um deslocamento padrão para que se produzissem índices de tenacidade equivalentes, representados pela área sob cada curva.

O nível de deslocamento selecionado para cálculo dos índices nas placas foi de 5,3 mm, equivalente à cerca de duas vezes e meia o deslocamento de ruptura obtido para a placa testemunho. Embora este não seja exatamente um dos índices padronizados por norma, como discutido no Capítulo 3, ele permite que seja feita uma análise comparativa da evolução da tenacidade com o aumento do teor de fibras.

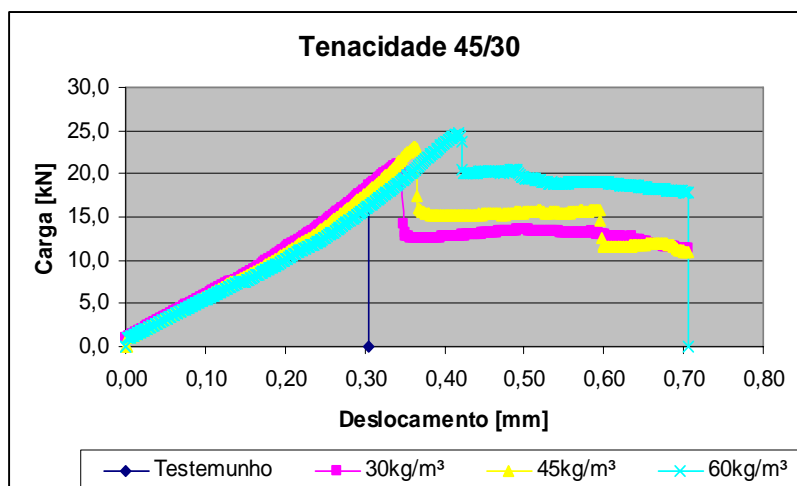


Figura 5.22 – Gráficos de carga x deslocamento empregados para análise da evolução da tenacidade com o aumento do teor de fibras tipo 45/30.

Na Figura 5.23 são mostrados os resultados dos ensaios de tenacidade para os compósitos reforçados com a fibra 80/60. Pode-se observar que o comportamento das placas com adição de 45 kg/m<sup>3</sup> reproduz o comportamento de compósitos com adições próximas ao teor crítico.

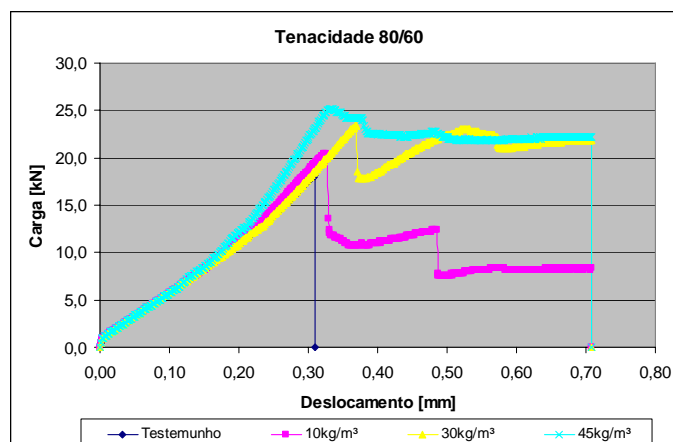


Figura 5.23 – Gráficos de carga x deslocamento empregados para análise da evolução da tenacidade com o aumento do teor de fibras tipo 80/60.

A Tabela 5.2 mostra os resultados dos cálculos dos índices de tenacidade para o nível de deslocamento estipulado. Observa-se que a tenacidade cresce significativamente com o aumento do teor de fibras. É interessante observar que o incremento de tenacidade apresenta tendência linear de aumento com o teor de fibras, como evidenciado na Figura 5.24 e 5.25.

Tabela 5.2 - Resultados do cálculo do índice de tenacidade.

Teor		Tenacidade (KN.mm)	Incremento de Tenacidade
Testemunho	0	19,28	0%
45/30	30	60,16	212%
	45	68,38	255%
	60	83,80	335%
80/60	10	54,09	181%
	30	83,86	335%
	45	90,50	369%

Analisando estes dados em conjunto com os obtidos nos ensaios de impacto, verifica-se que a adição de maiores teores de fibra tem efeito linear no aumento da tenacidade, porém exponencial no aumento da resistência ao impacto.

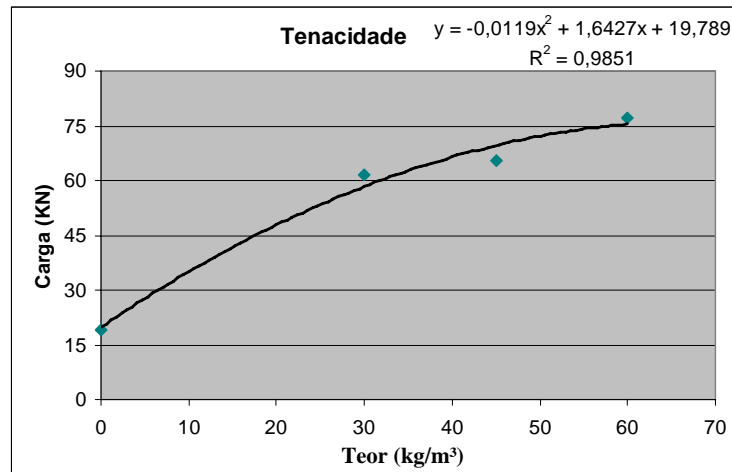


Figura 5.24 – Gráficos de carga x deslocamento empregados para análise da evolução da tenacidade com o aumento do teor de fibras tipo 45/30.

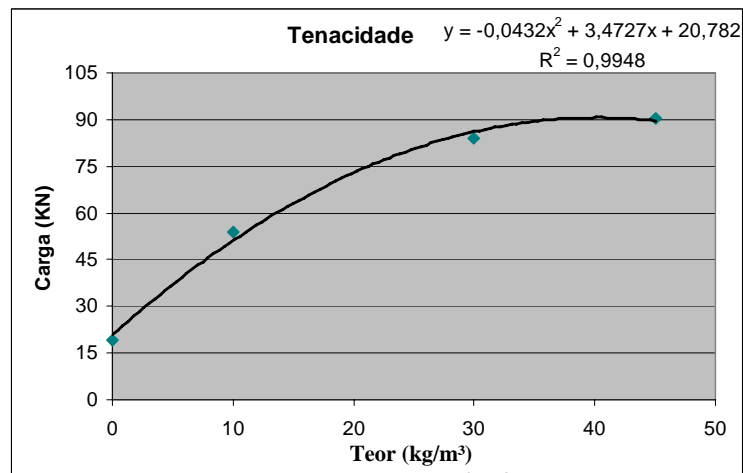


Figura 5.25 – Gráficos de carga x deslocamento empregados para análise da evolução da tenacidade com o aumento do teor de fibras tipo 80/60.



## CAPÍTULO 6

### MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO QUANDO SUBMETIDO A CARGAS DE IMPACTO

#### 6.1 INTRODUÇÃO

Para a modelagem dos efeitos da atuação de cargas estáticas ou dinâmicas em elementos estruturais, formulações devem ser empregadas de maneira a representar adequadamente a fratura nesses elementos. Estudos desenvolvidos pela equipe do Laboratório de Dinâmica Estrutural e Confiabilidade (LDEC), utilizando o Método dos Elementos Discretos, levaram à elaboração de um programa capaz de analisar o comportamento de estruturas laminares de concreto simples e concreto armado, quando submetidas a cargas estáticas e dinâmicas, tanto em padrões de fissuração ou ruptura, quanto em relação aos valores limites de resistência dos materiais frente às cargas aplicadas, dando-se ênfase na simulação das características aleatórias das propriedades dos materiais.

Em Rios (2002a), foi realizado um estudo da aplicação do Método dos Elementos Discretos no caso de estruturas submetidas a cargas impulsivas. Entretanto, a coleta de dados experimentais tornou-se fundamental para ajustar e validar o programa. O conhecimento adquirido na etapa experimental deste estudo acerca das propriedades e do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço, permitiram que simulações fossem realizadas com o este intuito. Para tanto, o entendimento da formulação empregada no programa deve ser entendida, e por este motivo, nos itens a seguir, é realizada uma revisão bibliográfica sobre os tópicos adotados na estrutura do programa.

## 6.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

A maioria dos modelos teóricos desenvolvidos para simulação do comportamento estrutural de diversos materiais utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), que é baseado nas hipóteses da mecânica dos meios contínuos.

Entretanto, a adoção da hipótese de continuidade em problemas que envolvam o estudo de materiais de comportamento frágil, como o concreto, é um condicionante muito forte, já que o processo de fratura do material compromete a hipótese básica do corpo teórico utilizado ser contínuo. Considerações trabalhosas podem ser usadas no MEF para representar adequadamente o problema da fissuração, como o Modelo de Fissuras Discretas e o Modelo de Fissuras Distribuídas, apresentados em d'Avila (2003).

Algumas limitações da teoria da mecânica do contínuo são contornadas, então, com o emprego do Método dos Elementos Discretos (MED), que propõe a representação do meio contínuo através de um conjunto de massas ligadas por meio de barras de treliça espacial unidas em seus extremos, formando arranjos basicamente cúbicos. Estabelece-se em cada um dos vértices, onde se considera que as massas estão concentradas, as correspondentes equações de equilíbrio dinâmico. Mediante integração numericamente explícita no domínio do tempo é obtido o comportamento de um corpo sólido ao longo de um certo intervalo de tempo.

A utilização do Método dos Elementos Discretos é extremamente vantajosa nos casos onde é envolvida fratura de materiais frágeis, como no caso do concreto e cerâmica, pois, nestes casos, um esquema de fratura é conseguido desativando-se as barras que tenham atingido seu limite de resistência, com uma operação muito simples.

O modelo adotado neste trabalho foi apresentado inicialmente por Hrennikoff, em 1941, que propôs a representação do contínuo mediante arranjos de bielas de rigidez equivalente. Posteriormente, em 1971, Absi desenvolveu a mesma idéia realizando aplicações a estudos de fundações de base elástica e à representação de muros em prédios altos através de arranjos de barras com rigidez equivalente. Em 1977, Cundall desenvolveu um método para realizar estudos mecânicos geotécnicos com materiais granulares, onde foi utilizada a integração explícita das equações de movimento da estrutura formada por partículas rígidas com massas conectadas entre si, mediante molas e amortecedores, como mostra a Figura 6.1. Nesta figura observa-se que, antes da

fratura, surgem forças de tração, compressão e corte entre partículas adjacentes, mas após a falha, a descontinuidade faz com que desapareçam as tensões de tração entre as partículas. O método desenvolvido por Cundall foi chamado Método dos Elementos Distintos e representou uma importante contribuição para o desenvolvimento do Método dos Elementos Discretos, cujas formulações e demais considerações são apresentadas na seção seguinte (Rios, 2002a).

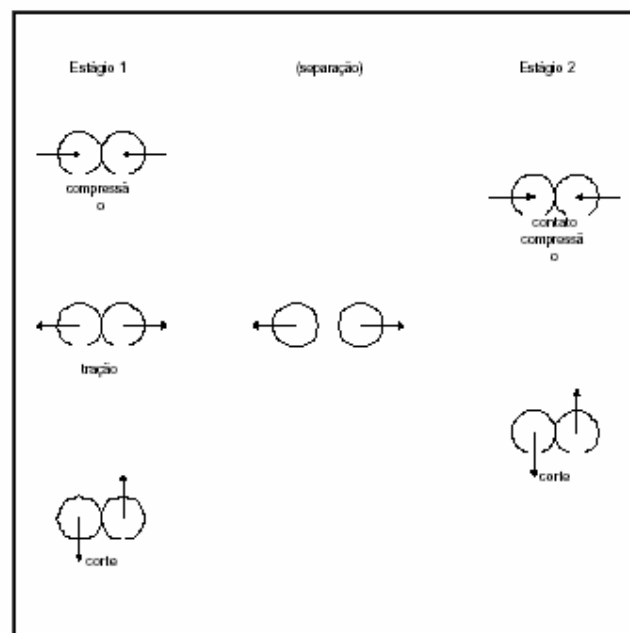
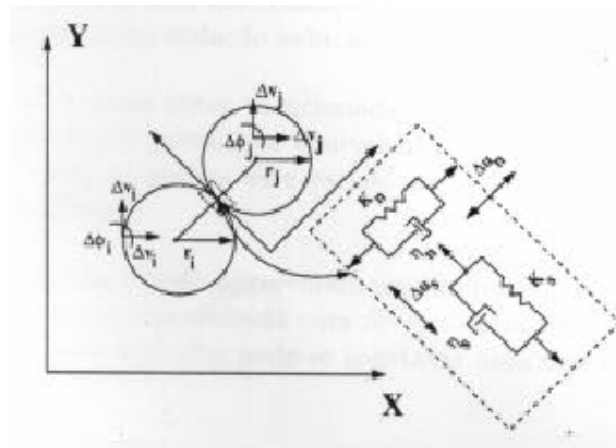


Figura 6.1 - Esquema do Método dos Elementos Distintos  
(Cundall, 1977, *apud* Rios, 2002a).

### 6.3 FORMULAÇÃO EMPREGADA NO TRABALHO

Para a modelagem da resposta de sistemas estruturais de concreto submetidos a cargas de impacto, é necessária uma análise dinâmica não-linear que considere a variação das propriedades mecânicas do material para ações de curta duração, a velocidade de aplicação das cargas e a distribuição aleatória das propriedades mecânicas e/ou defeitos presentes na estrutura (Rios *et. al.*, 2002b). Essas considerações são empregadas no trabalho e, para tanto, a formulação utilizada é descrita a seguir.

#### 6.3.1 Cálculo dos Coeficientes de Rigidez Equivalentes das Barras

O modelo adotado foi proposto por Nayfeh e Hefzy (1978, *apud* Rios, 2002a), que representa o meio contínuo através de um sólido fictício, formado por arranjos de barras, como observado na Figura 6.2. As propriedades mecânicas das barras são determinadas através do cálculo da rigidez das barras normais às faces ( $EA_n$ ) e da rigidez das barras diagonais do elemento cúbico ( $EA_d$ ).

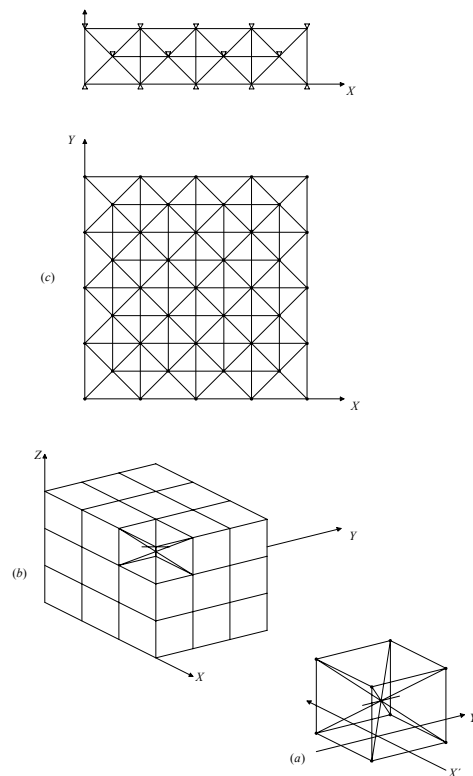


Figura 6.2 - Modelo cúbico apresentado por Nayfeh & Hefzy (1979) a) Módulo Cúbico, b) e c) composição de prismas.

Os coeficientes de rigidez obtidos por Nayfeh e Hefzy (1978, *apud* Rios, 2002a), para um arranjo cúbico de barras, são dados pelas expressões das Equações 6.1, 6.2 e 6.3.

$$\delta = \frac{9\nu}{(4-8\nu)} \quad (6.1)$$

$$EA_n = \frac{L_c^2 (9+8\delta)}{2 (9+12\delta)} E \quad (6.2)$$

$$EA_d = \frac{2\delta EA_n}{\sqrt{3}} \quad (6.3)$$

sendo E e  $\nu$  as propriedades elásticas do sólido que se deseja representar,  $L_c$  a aresta de cada face do módulo cúbico,  $A_n$  a área das arestas normais e  $A_d$  a área das arestas diagonais.

As deduções que permitem chegar a essas expressões podem ser verificadas de forma mais detalhada em Iturrioz (1995) e Rios (2002a).

### 6.3.2 Solução da Equação do Movimento

A equação do movimento é dada pela expressão da Equação 6.4.

$$M\ddot{\bar{x}} + C\dot{\bar{x}} + \bar{F}_r(t) - \bar{P}(t) = 0 \quad (6.4)$$

onde  $\bar{x}$  representa o vetor de deslocamentos nodais, M a matriz diagonal de massas nodais, C é a matriz diagonal de amortecimento e  $(\bar{F}_r(t) - \bar{P}(t))$  a diferença entre o vetor de forças reativas  $\bar{F}_r(t)$  e o vetor de forças internas  $\bar{P}(t)$ , as quais atuam sobre os nós do modelo.

Para cada nó  $i$  do modelo verifica-se que

$$\vec{F}_r^i = \sum_{b=1}^k \vec{F}_r^b \quad (6.5)$$

sendo  $k$  o número de barras que concorrem no nó  $i$ . A força interna em cada barra  $F_r^b$  é obtida a partir de uma equação constitutiva elementar, que pode ser expressa por:

$$F_r^b = \text{const}(\varepsilon_b, \dot{\varepsilon}_b) \quad (6.6)$$

sendo que  $\varepsilon_b$  e  $\dot{\varepsilon}_b$  representam a deformação e a velocidade de deformação da barra  $b$ , e que a função dependerá do tipo de material a modelar.

O amortecimento  $C$  é proporcional à massa, de tal forma que:

$$C = MD_f \quad (6.7)$$

sendo  $D_f$  uma constante vinculada ao coeficiente de amortecimento crítico  $\xi_n$ , como segue:

$$D_f = \xi_n 2\pi f_n \quad (6.8)$$

onde  $f_n$  representa a frequência natural de vibração do modo  $n$ , expressa em Hertz e  $n$  o modo no qual a estrutura dissipa mais energia (que em geral é o modo fundamental de vibração da estrutura). Entretanto, a determinação do valor  $D_f$  é um aspecto delicado do modelo, que deve ser mais investigado, sendo um dos pontos a ser melhorado no programa. Esforços foram feitos para que o amortecimento não fosse apenas função da massa, mas também da rigidez do sistema. Resultados interessantes foram obtidos ao incorporar a dependência da rigidez de forma indireta, isto é, fazendo  $D_f$  depender de um índice de dano local da estrutura, calculado em cada nó, função da degradação da rigidez das barras que concorrem ao nó, mas o cálculo adicional necessário implicou num gasto computacional elevado.

A solução da equação do movimento é facilitada pelo fato da matriz de massas nodais  $M$  e da matriz de amortecimento  $C$  serem diagonais, sendo possível integrá-las no tempo de forma explícita. Entretanto, a integração das equações de movimento através dos métodos explícitos exige a determinação do intervalo de integração  $\Delta_t$ , descrito na seção seguinte.

### 6.3.3 Intervalo de Integração

A integração das equações do movimento através dos métodos explícitos exige que o intervalo de integração  $\Delta_t$  seja menor que um intervalo crítico  $\Delta_{\text{crit}}$ , a partir do qual o processo torna-se instável, sendo uma desvantagem do método.

No entanto, em problemas de impacto, a descrição das ações e do processo de ruptura do material exige o uso de intervalos de integração pequenos, o que elimina a desvantagem do método em relação a procedimentos implícitos.

A determinação de  $\Delta_{\text{crit}}$  depende, essencialmente, da frequência de vibração e do amortecimento do modelo. No modelo teórico adotado,  $\Delta_{\text{crit}}$  é calculado pela expressão 6.9, onde  $L_c$  é o comprimento característico do elemento utilizado na discretização e  $C_p$  é a velocidade de propagação da onda de compressão em meio elástico, dada pela Equação 6.10.

$$\Delta_{\text{crit}} \leq 0,6 \frac{L_c}{C_p} \quad (6.9)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6.10)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade do material e  $\rho$  a densidade do material.

### 6.3.4 Fratura no Concreto

A propriedade mais marcante do concreto, que influencia significativamente em seu comportamento estrutural, é a sua baixa resistência à tração quando comparada com sua resistência à compressão. Isto faz com que as estruturas de concreto normalmente funcionem fissuradas, mesmo para baixos níveis de carregamento. As fissuras reduzem consideravelmente a rigidez da estrutura, modificando a distribuição interna das tensões.

O processo de evolução da fissuração em estruturas de concreto, sob carregamento, é caracterizado pelo crescimento das microfissuras existentes na pasta de cimento e pela junção destas em macrofissuras. Este mecanismo faz com que o concreto não rompa

quando a tensão máxima é atingida, mas sim que ocorra um decréscimo gradual de tensão com o aumento da deformação, chamado amolecimento.

O amolecimento do concreto é explicado através dos conceitos da Mecânica da Fratura, que permite relacionar as cargas máximas que podem atuar sobre uma estrutura com a localização e a grandeza das fissuras pré-existentes na mesma.

Na mecânica linear da fratura, existem duas possibilidades de análise de propagação das fissuras: através do critério global, também chamado critério energético de Griffith ou através do critério local, denominado critério do fator de intensidade de tensões de Irwin. Estes critérios são discutidos a seguir.

### *Critério Global*

O primeiro grande avanço na área da mecânica da fratura se deve a Griffith, que, em 1920, sugeriu que a presença de defeitos em um determinado material, como a existência de pequenas cavidades, seria responsável pelo incremento local do estado tensional. Outra importante observação de Griffith foi o sensível aumento na tensão de ruptura do material ocasionado pela diminuição das dimensões dos corpos de prova. Esse efeito, denominado efeito de escala, foi posteriormente explicado por Weibull, em 1938, já que a diminuição do volume do corpo de prova reduz a probabilidade da existência de descontinuidades, traduzindo um aumento da tensão última da peça analisada (Rios, 2002a).

As idéias de Griffith embasaram o estudo da propagação das fissuras em nível microestrutural, a partir de uma análise macroscópica do sólido, com a introdução do critério energético. Este critério estabelece uma condição para a propagação da fissura: a igualdade entre a energia liberada pelo sistema e a energia necessária para criar superfícies livres para propagação de trincas. Neste caso, a capacidade de carga do corpo é determinada avaliando-se qual a energia necessária para produzir a propagação instável da fissura pré-existente, sendo necessário realizar o balanço energético em toda a estrutura em análise, dispensando uma análise do estado tensional na extremidade da fissura. A trinca só irá se propagar caso exista um fluxo de energia até sua extremidade, que será dissipada no processo de fratura.



### *Critério Local*

No critério local, a propagação instável da fissura é função do estado tensional nas proximidades do extremo da trinca. Este critério baseia-se nos estudos de Irwin (1957, *apud* Rios, 2002a), que considera a existência de uma tensão infinita na ponta da trinca.

De acordo com as idéias de Irwin, a presença de uma fissura em um corpo elástico linear produz uma concentração de tensões em suas extremidades, como mostra a Figura 6.3. Os fatores de intensidade de tensões são proporcionais à carga aplicada, à geometria da estrutura e à disposição das fissuras nela contida. Em Iturrioz (1995) e em Rios (2002a) é apresentada uma descrição mais detalhada do critério.

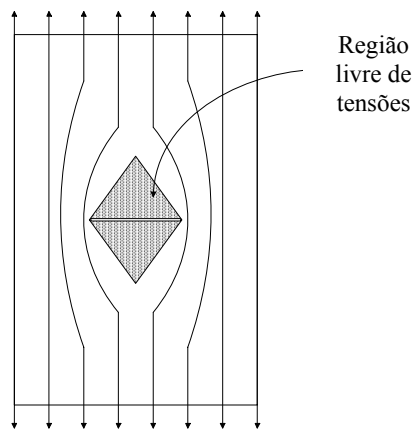


Figura 6.3 - Concentração de tensões na extremidade de uma trinca.

Acontece que, seguindo o critério de tensões limites, a previsão de tensões infinitas na ponta da trinca, estabelecidas pela Teoria da Elasticidade, não é observada na prática. Supõe-se então que, nas regiões onde ocorram tensões infinitas, ocorra uma plastificação local, seguida de uma perda de coesão entre as duas partes do material, que se dividem.

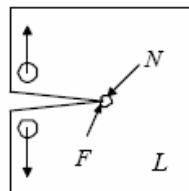
Se a região de plastificação local é suficientemente pequena, é possível aplicar a mecânica linear da fratura para determinar a instabilização de uma fissura. Quando a região de plastificação é maior, deve-se utilizar a mecânica não-linear da fratura, segundo o qual a fissura cresce de forma estável antes de instabilizar seu crescimento (Iturrioz, 1995).

Pode-se distinguir ainda dois tipos de mecânica não-linear da fratura: a dúctil, aplicável a metais, e a não-dúctil, aplicável ao concreto e a materiais cerâmicos.

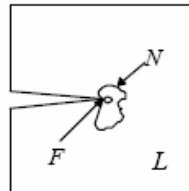
No caso de materiais dúcteis, a maior parte da zona não-linear (N) tem um comportamento plástico com encruamento ou plástico perfeito, e a zona microfissurada (F), que tem um comportamento plástico com abrandamento, é muito pequena.

No caso de materiais não-dúcteis, a zona microfissurada (F) ocupa praticamente toda a região não-linear. Na Figura 6.4, verifica-se a diferença de comportamento para fratura linear, fratura dúctil e não-dúctil. Estas considerações são empregadas no critério de ruptura do programa, exposto no item 6.3.5.

a) *Fratura linear*



b) *Fratura dúctil*



c) *Fratura não dúctil*

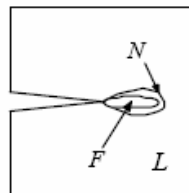


Figura 6.4 - Fratura em diferentes materiais. (L): Zona Linear, (N): Zona não linear e (F): Zona Microfissurada.

Na Figura 6.5, pode-se comparar duas relações  $(\sigma - \varepsilon)$  típicas para materiais dúcteis e não dúcteis.

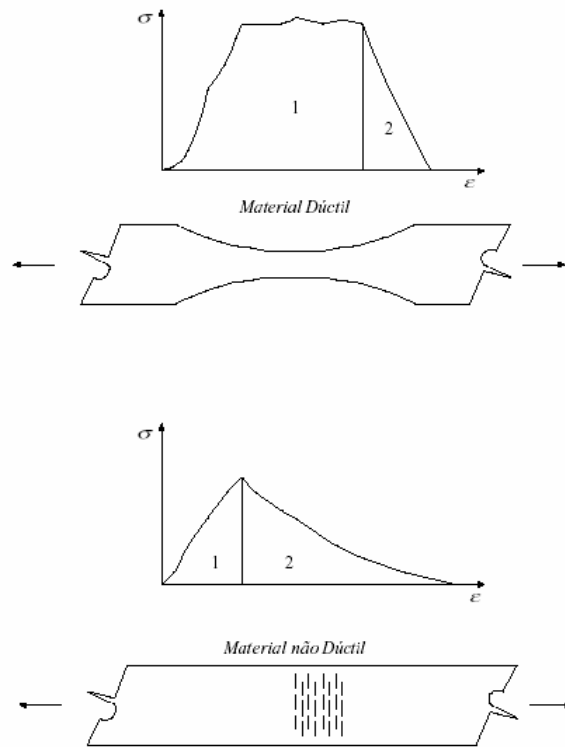


Figura 6.5 - Diagramas  $(\sigma - \varepsilon)$  característicos de materiais dúcteis e não dúcteis.

A partir da análise anterior pode-se modelar adequadamente o comportamento da zona microfissurada do concreto através do modelo analítico proposto por Hillerborg (1978, *apud* Rios, 2000a). Este modelo, denominado de “Fissura Fictícia”, representa a zona onde se desenvolve a fissura mediante uma fissura discreta fictícia. Esta fissura fictícia tem uma lei tensão-deslocamento  $(\sigma - \delta)$  do tipo  $\sigma_y = f(\delta_c)$ , que rege seu comportamento mecânico, onde  $\sigma_y$  é a tensão na direção normal à fissura e  $\delta_c$  é a abertura da trinca. A área sob a curva  $f(\delta_c)$  representa a energia específica de fratura  $G_f$  do material, dada pela Equação 6.11.

$$G_f = \int_0^{\infty} \sigma_y d(\delta_c) \quad (6.11)$$

A energia específica de fratura pode ser entendida como a energia dissipada durante o processo de fissuração, portanto é considerada como uma propriedade do material. O valor da energia específica de fratura pode ser estimado segundo o CEB-FIB (1990), conforme procedimento mostrado no Anexo 2.

A fissura começa a abrir no momento em que a tensão em seu extremo atinge a tensão limite  $f_t$ . A Figura 6.6 ilustra a distribuição das tensões nas proximidades da ponta da fissura para o modelo da fissura fictícia proposto por Hillerborg (1978) e a representação da energia de fratura do material.

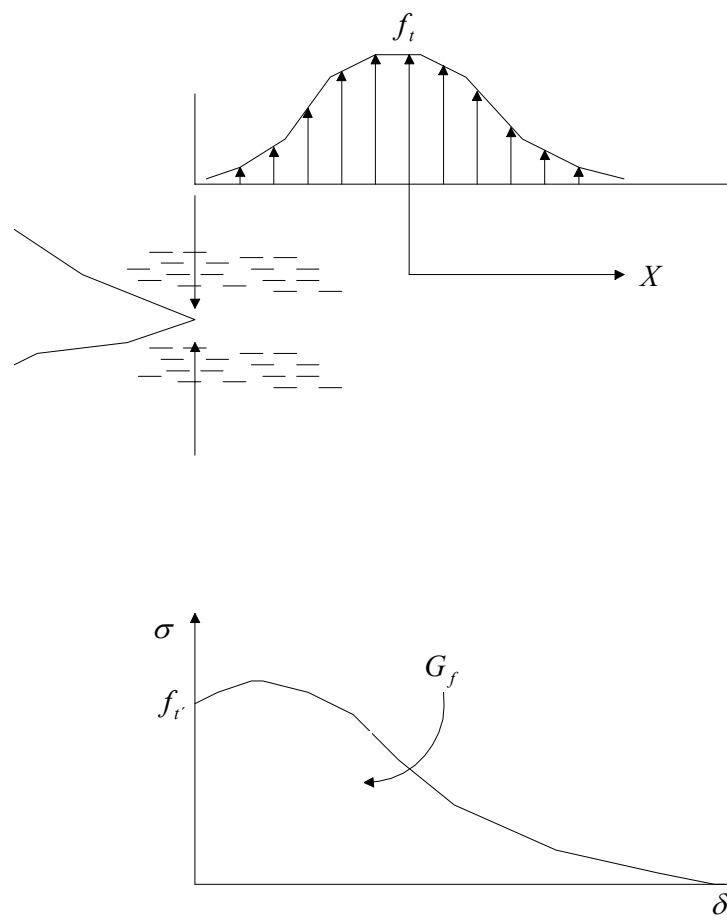


Figura 6.6 - Distribuição das tensões nas proximidades da ponta da fissura para o modelo da fissura fictícia proposto por Hillerborg (1978).

### 6.3.5 Critério de Ruptura Empregado

O critério de ruptura utilizado para estudo de materiais não-dúcteis e não-homogêneos foi implementado inicialmente por Rocha (1989) e posteriormente utilizado por Iturrioz (1995) e Rios (2002a). Este se baseia na relação constitutiva elementar bilinear mostrada na Figura 6.7.

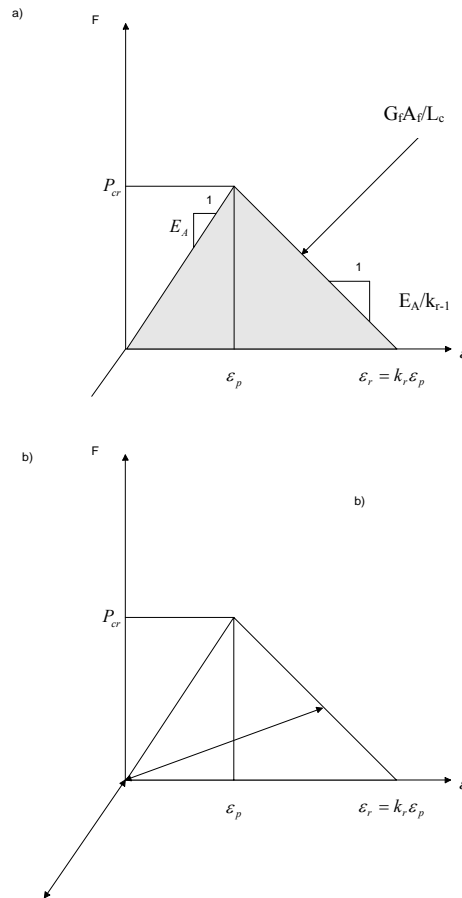


Figura 6.7 - Relação constitutiva elementar implementada por Rocha (1989).

A relação bilinear representa a relação  $(\sigma - \epsilon)$ , cujos parâmetros têm os seguintes significados:

- $F$  é a força axial resultante da barra, função da deformação  $\epsilon$ , sendo a carga crítica  $P_{cr}$  associada à deformação crítica  $\epsilon_p$ ;

-  $E_A$  é a rigidez axial das barras normais e diagonais, obtidas a partir das constantes dos materiais;

-  $L_c$  é o comprimento dos elementos normais;

-  $A_f$  é a área de influência da barra, ou seja, a área transversal formada com sua ruptura, podendo ser expressa na forma  $A_f = c_A L_c^2$ , onde  $c_A$  é o coeficiente geométrico próprio do modelo cúbico, igual a 0,1385;

-  $G_f$  é a energia específica de fratura, ou seja, a energia consumida por unidade de área de fratura formada;

-  $k_r$  é o parâmetro que representa a ductilidade e permite calcular a deformação  $\varepsilon_r = k_r \varepsilon_p$ , para a qual a barra não transmite mais esforços de tração.  $k_r$  é dado pela Equação 6.12.

$$k_r = \frac{2 \cdot c_A}{\lambda \cdot R_f \cdot L_c} \quad (6.12)$$

sendo  $\lambda$  o parâmetro que permite relacionar  $E_A$  e  $E'$  e  $R_f$  o fator de falha.

O parâmetro  $\lambda$  é dado pela Equação 6.13, sendo  $E' = E(1 - \nu^2)$  no estado plano de deformações

$$\lambda = \frac{E_A}{E' \cdot L_c^2} \quad (6.13)$$

O fator de falha  $R_f$ , definido por Rocha (1989), permite escrever a resistência à tração do compósito em função de deformação crítica  $\varepsilon_p$  através da Equação 6.14.

$$f_t = R_f \varepsilon_p \quad (6.14)$$

Sendo a deformação crítica  $\varepsilon_p$  escrita em função da energia de fratura  $G_f$ , segundo a Equação 6.15.

$$\varepsilon_p = E \sqrt{\frac{G_f}{E(1 - \nu^2)}} \quad (6.15)$$

### 6.3.6 Consideração da Não-Homogeneidade dos Materiais

No estudo de materiais como o concreto, é necessário incluir a não-homogeneidade do material, introduzindo-se a aleatoriedade na definição das propriedades mecânicas e geométricas.

No modelo apresentado originalmente por Rocha (1989), a aleatorização foi implementada definindo-se a energia de fratura  $G_f$  como um campo aleatório, posto que  $G_f$  define indiretamente a resistência local à propagação da fratura.

Uma distribuição de probabilidade Weibull com dois parâmetros foi adotada para  $G_f$ , dada pela expressão 6.16:

$$f_w(G_f) = 1 - e^{-\left[\frac{G_f}{\beta}\right]^\gamma} \quad (6.16)$$

onde  $\beta$  e  $\gamma$  são, respectivamente, os parâmetros de escala e de forma. Estes parâmetros podem ser expressos em termos do valor esperado  $E[G_f]$  e do coeficiente de variação  $CV[G_f]$ , que são parâmetros de entrada no programa computacional.

### 6.3.7 Avaliação dos Efeitos das Cargas de Impacto

Para a caracterização das cargas de impacto, na forma de diagramas força x tempo, foi utilizado o programa Working Model™, que foi empregado para simular as condições reais do ensaio de queda de esfera, discutido no Capítulo 4. Foram simuladas as cargas provocadas pelo impacto da esfera de aço de 1 kg de massa e 7 cm de diâmetro na placa de concreto, de dimensões 30 x 30 x 6 cm, para as alturas de queda de 10 a 220 cm, que geraram diagramas como o mostrado na Figura 6.8, onde pode-se observar a forma bilinear do diagrama de carga em um intervalo de aplicação de aproximadamente 15 ms.

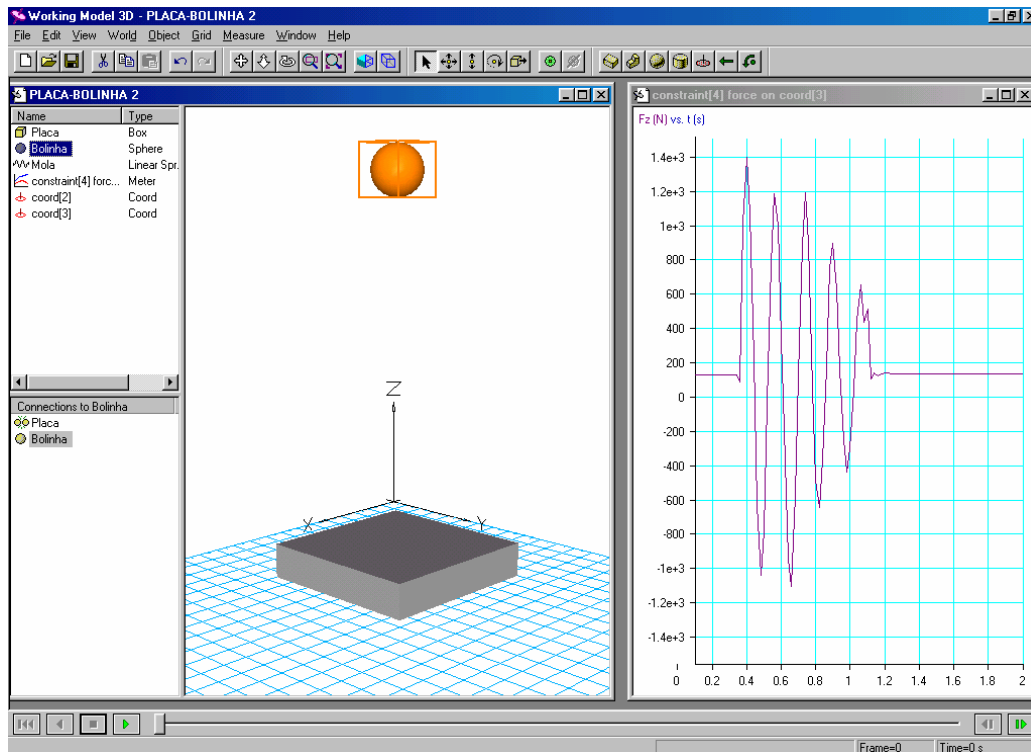


Figura 6.8 - Diagrama tensão x tempo gerados no programa Working Model™.

Para cada altura de queda, o valor do maior pico do diagrama representa a carga máxima derivada da ação da esfera sobre a placa. Com os valores encontrados, foi realizada uma regressão, definindo-se uma equação polinomial para definição das cargas de entrada no programa de modelagem via DEM. Os resultados encontrados foram plotados no gráfico da Figura 6.9, onde se encontra também a regressão obtida.

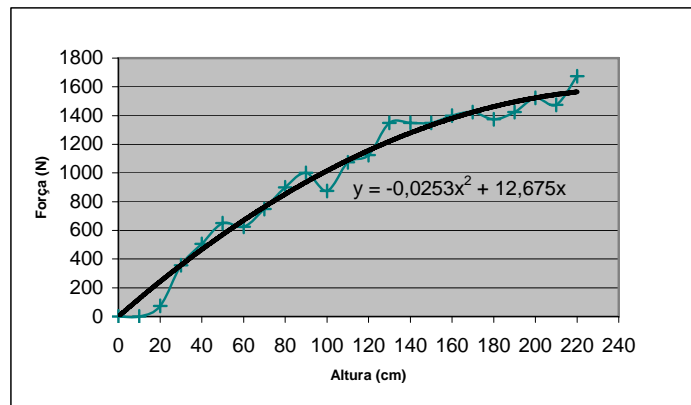


Figura 6.9 - Gráfico força x altura, gerado com os valores obtidos no programa Working Model™ e regressão encontrada.



Os resultados, em termos de cargas estimadas, encontrados através da aplicação da regressão, podem ser verificados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Valores de cargas para as diversas alturas de queda, inseridas no programa de DEM, obtidas através da regressão.

ALTURA (cm)	F(N)
10	124
20	243
30	357
40	467
50	571
60	669
70	763
80	852
90	936
100	1015
110	1088
120	1157
130	1220
140	1279
150	1332
160	1380
170	1424
180	1462
190	1495
200	1523
210	1546
220	1564

## 6.4 SIMULAÇÕES

Neste item serão apresentadas as propriedades do modelo simulado e as modificações inseridas no programa para simulação das condições reais de ensaio.

### 6.4.1 Definição das Propriedades do Modelo

Para a simulação numérica das placas, de dimensões 30 x 30 x 6 cm, foi escolhida uma discretização com elementos normais de 1cm de comprimento, sendo a placa apoiada nas quatro bordas. Na Figura 6.9 é mostrada a configuração da discretização, onde se

pode observar os elementos normais e diagonais que formam o modelo. A discretização escolhida resultou em um modelo com um número total de 12127 nós e 76926 barras.

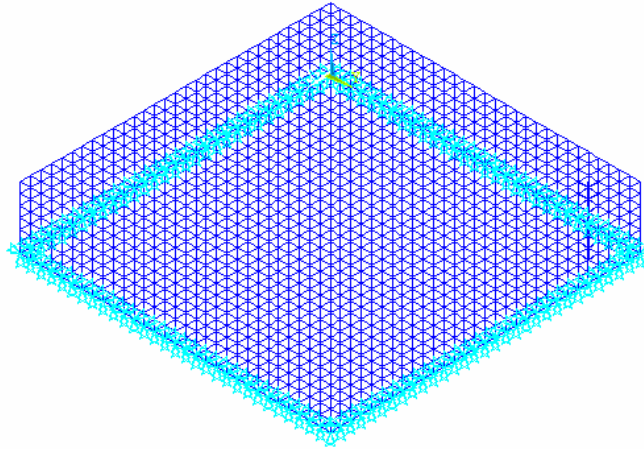


Figura 6.9 - Discretização das placas em elementos normais e diagonais.

#### **6.4.2 Definição da Região de Aplicação da Carga**

Para a simulação das condições reais de aplicação de carga nas placas, áreas de contato diferenciadas precisaram ser adotadas para a mesma queda da esfera, uma vez que o impacto da esfera provoca o aumento da seção de aplicação da carga ao danificar o corpo-de-prova com a queda, aumentando a seção de aplicação da carga, como observado na Figura 6.10.

Foram então definidas duas áreas de contato, sendo cada queda considerada em um intervalo de 15 ms. Nos primeiros 8ms de cada queda, a carga foi distribuída em um círculo de raio 0,005 m, cuja área de contato é capaz de abranger apenas um único ponto para aplicação de carga, localizada no centro da placa. Nos 7 ms posteriores, a carga foi distribuída em um círculo de raio 0,01 m, tendo-se cinco pontos de aplicação de carga.

Estas áreas de contato foram adotadas com base no tamanho dos elementos da discretização, sendo estas, no entanto, superiores as áreas de contato reais do ensaio.

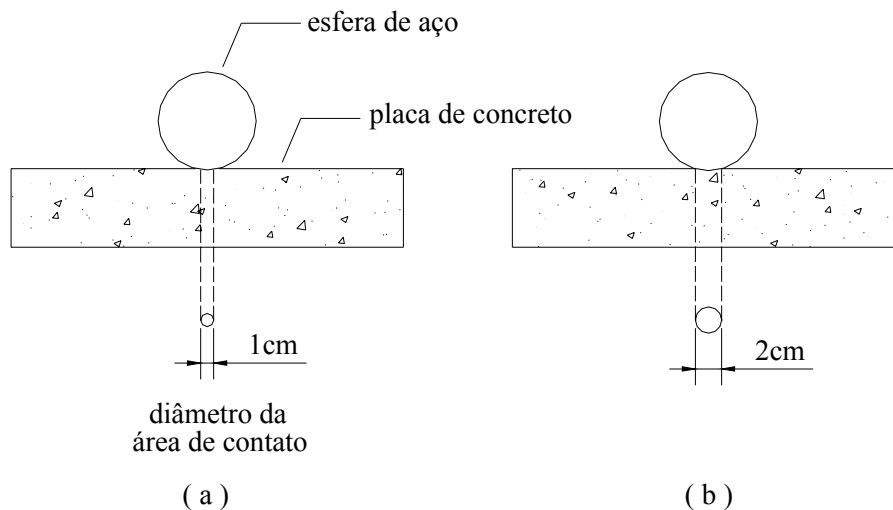


Figura 6.10 - Alteração da seção de aplicação de carga no decorrer do tempo  
(a) correspondente aos primeiros 8 ms de contato e (b) atuante nos 7 ms posteriores.

A cada intervalo de 15 ms de carregamento, 17 ms de repouso foram impostos à placa. O conjunto de cargas aplicadas e os respectivos intervalos de repouso podem ser observados na Figura 6.11. Por simplificação computacional, o pulso bi-linear da Figura 6.8 foi substituído por um pulso retangular, uma vez que, devido ao pequeno intervalo de aplicação da carga (0,15 ms), seu efeito não introduz erros. O intervalo total de aplicação de todas as cargas é 0,5 s.

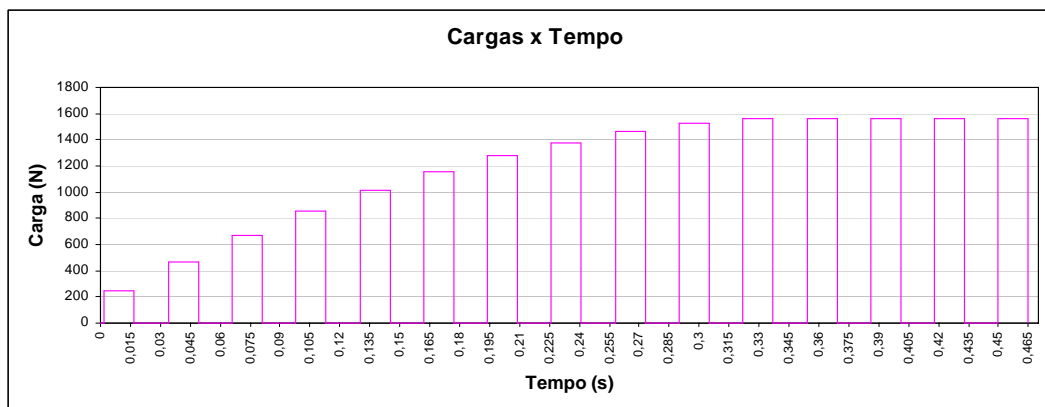


Figura 6.11 - Gráfico carga x tempo, representando as diversas alturas de queda do ensaio.

### 6.4.3 Modelo simulado

Para cada simulação, dados que representem as características do compósito real devem ser inseridos no programa. O programa foi desenvolvido inicialmente para a simulação de concreto simples, já tendo sido testado por Rios (2002a) para obtenção da resposta de placas submetidas a cargas de impacto. Neste trabalho, no entanto, adaptações foram feitas no programa para simulação de placas de concreto reforçado com fibras, cujas características são mostradas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Propriedades para simulação da resposta das placas de concreto simples as cargas de impacto.

Propriedades	
Densidade $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2400
Coefficiente de Poisson $\nu$	0,20
Módulo de elasticidade E (GPa)	34,479
Energia de fratura $G_f$ (N/m)	150
Fator de Falha $R_f$	1,36
Coefficiente de variação $G_f$ [CV] (%)	25

O coeficiente de amortecimento  $D_f$  também deve ser fornecido ao programa, sendo calculado pela expressão 6.8. Estimando-se a frequência natural do modelo em 2000 Hz e a razão de amortecimento crítico  $\xi_n$  em 5%, obtêm-se um valor de aproximado de 5000 para  $D_f$ . Estas propriedades representam um material com resistência à tração aproximada de 3,14 MPa.

### 6.4.4 Resultados

O padrão de falha para a placa simulada é mostrado na seqüência de figuras a seguir. Na Figura 6.12 é observado o esquema de ruptura encontrado aos 0,318 s de simulação, cuja carga aplicada é 1523 N, o que equivale a altura de queda de 200 cm, ou seja, equivale a uma energia de 216,8 J. Na Figura 6.13, gerada aos 0,378 s de simulação, a carga aplicada de 1564 N corresponde a 220 cm de altura de queda e a 261,2 J de

energia. Na Figura 6.14 é mostrado o esquema de ruptura para os 0,498 s de simulação. Este estágio representa a queda da esfera repetida 5 vezes da altura de 220 cm, com energia equivalente a 352,1 J. A Figura 6.15 mostra em perspectiva o esquema de ruptura para o tempo de 0,498 s.

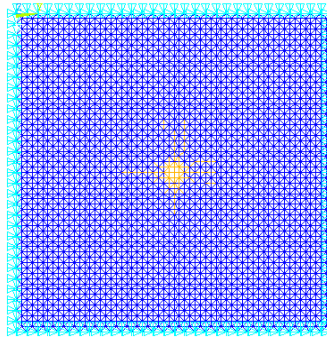


Figura 6.12 – Esquema de ruptura encontrado aos 0,318 s de simulação.

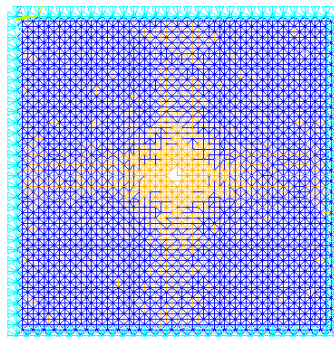


Figura 6.13 – Esquema de ruptura encontrado aos 0,378s de simulação.

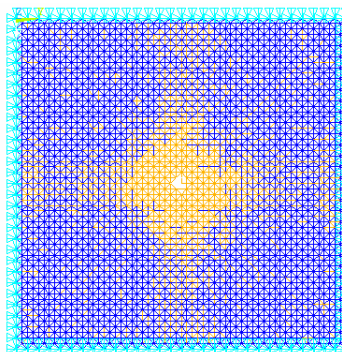


Figura 6.14 – Esquema de ruptura encontrado aos 0,498s de simulação.

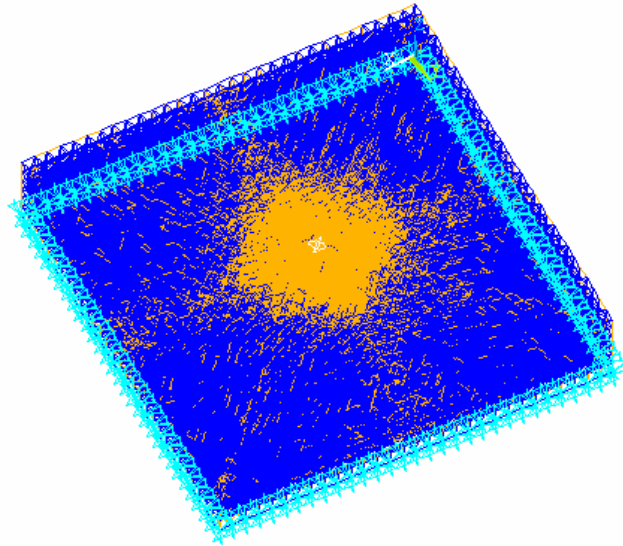


Figura 6.15 - Perspectiva do esquema de ruptura para o tempo 0,498s.

A Figura 6.16 mostra a evolução no tempo da reação total nos apoios da placa para as cargas aplicadas. Os resultados encontrados para as reações correspondem exatamente aos valores das cargas impostas à placa.

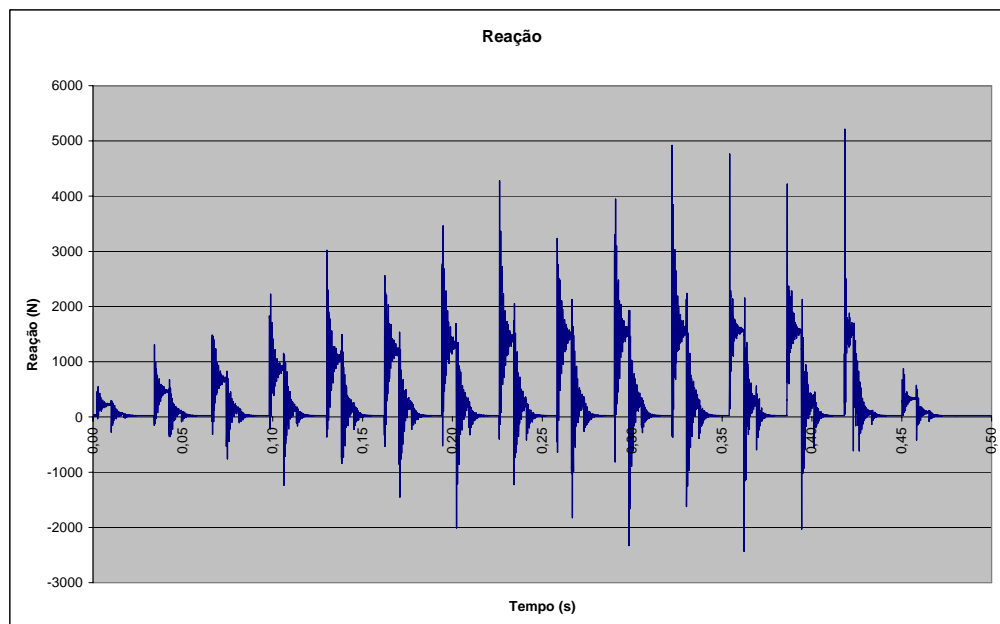


Figura 6.16 - Gráfico reação x tempo para as diversas aplicações de carga.

#### 6.4.5 Considerações Finais

Os resultados encontrados na simulação não foram capazes de representar fielmente o comportamento do concreto reforçado com fibras sujeito as cargas de impacto impostas no laboratório, principalmente no que diz respeito ao processo de evolução da fissura.

Em termos de padrão de fissuração, resultados aproximados foram encontrados, como pode ser observado comparando as simulações apresentadas nas Figuras 6.12 a 6.14 e os registros fotográficos obtidos nos ensaios de laboratório, como mostrado na seqüência de fotos da Figura 6.17.



Figura 6.17 – Padrão de fissuração das placas submetidas a cargas de impacto.

Acredita-se que uma das causas mais prováveis para esta discordância está associada à questão da discretização adotada para o modelo, principalmente na região de aplicação das cargas. A pequena área de contato resulta em poucos pontos para distribuição da carga, ocorrendo uma concentração elevada da mesma, o que causa deformações muito concentradas no centro da placa.

Esses problemas não foram encontrados em Rios (2002a) pois as cargas aplicadas nas placas e cascas simuladas tinham áreas de contato maiores. Possivelmente, se fosse empregado um número maior de elementos, o acompanhamento da fissuração seria mais adequado, uma vez que o esquema de aplicação de cargas seria melhorado. Entretanto, a discretização do modelo, com um número maior de elementos, resultaria em esforço computacional superior ao que seria viável com os equipamentos disponíveis.

Outras mudanças relevantes, para melhor aproximação dos resultados, seriam a escolha de um esquema de vinculação teórico mais próximo ao realmente empregado nos ensaios de laboratório. Isto poderia ser obtido, por exemplo, com a inclusão de molas nos apoios, para simular o neoprene. Além disto, seria interessante promover um melhor estudo das características de amortecimento do modelo.

Em resumo, considera-se que o método de modelagem se mostrou promissor, porém estudos adicionais são necessários para adaptar o modelo para uso com concretos reforçados com fibras de aço.



## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões extraídas desta pesquisa, obtidas a partir da análise dos ensaios de comportamento mecânico dos concretos reforçados com fibras de aço, e das simulações computacionais realizadas. Serão também apresentadas sugestões para trabalhos futuros na área de interesse.

#### 7.1 CONSIDERAÇÕES

Como enfatizado no Capítulo 1, o emprego do concreto reforçado com fibras vem incrementando-se, progressivamente, ao longo das últimas décadas. Atualmente, uma variedade de fibras comercialmente viáveis está disponível no mercado, inclusive brasileiro, para uso como reforço de matrizes cimentícias, com destaque para as fibras de aço. Em consequência deste crescimento, os concretos reforçados com fibras de aço tornaram-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 projeto e fabricação deste material.

No Brasil, a utilização das fibras de aço no concreto deu-se mais recentemente, a partir do momento em que se passou a dispor de fibras produzidas especialmente para o reforço do concreto (Figueiredo, 1997). Atualmente, existem três fabricantes de fibras de aço no mercado nacional. Mesmo sem normas ou especificações nacionais que forneçam algum tipo de controle para a utilização destas, sua aplicação no concreto vem crescendo rapidamente (Guimarães *et. al*, 2001).

Tendo em vista esta realidade, o entendimento do comportamento dos compósitos reforçados com fibras aço, o controle de produção e a quantificação das propriedades tornam-se necessárias, para que suas potencialidades sejam aproveitadas e o consumo se expanda ainda mais, inclusive com redução de custos.

O presente estudo buscou contribuir nesta direção, coletando dados para esclarecer como fibras de aço com características diferentes, disponíveis no mercado, se comportam, em termos de desempenho mecânico.

Além disto, o mesmo buscou determinar quais as fibras mais eficientes para melhoria da resistência ao impacto e avaliar uma alternativa de modelagem via método dos elementos discretos, que fornecesse uma base teórica para prever o comportamento dos concretos reforçados.

Os ensaios realizados confirmaram que as fibras de aço exercem maior influência no estágio de pós-fissuração dos compósitos do que nas demais propriedades mecânicas estudadas.

O ensaio de impacto empregado mostrou-se sensível à presença das fibras, sendo capaz de detectar a influência das variáveis de estudo através das diferenças de comportamento dos compósitos em níveis energéticos.

Os ensaios estáticos com placas indicaram que os teores de fibra empregados não atingiram o volume crítico de fibras, embora tenham aumentado significativamente a tenacidade dos compósitos. Os dados de trabalhabilidade, contudo, mostram que a inclusão de teores mais elevados exigiria o emprego de técnicas especiais de mistura e moldagem ou emprego de altos teores de aditivos.

Quanto à análise numérica, verificou-se que o modelo adotado na simulação do comportamento dos compósitos reforçados com fibras de aço não conseguiu representar adequadamente a resposta das placas de concretos com fibras submetidas aos esforços de impacto, principalmente quanto à previsão da energia de ruptura, embora tenha apresentado boa resposta para as placas testemunho em estudos anteriores. Isto indica que é necessário um esforço maior no sentido de modelar o comportamento dos materiais compósitos, determinando parâmetros de entrada, algoritmos de cálculo e esquemas de discretização adequados para representar a dispersão de energia no mesmo.

A partir destas constatações, e levando em conta os objetivos e hipóteses de trabalho, propostas no Capítulo 1, foram estabelecidas algumas conclusões, apresentadas a seguir.

## 7.2 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 ensaiadas neste trabalho. Eventuais generalizações destas tendências devem ser efetuadas com a devida cautela.

*Em relação às variáveis de estudo:*

- A incorporação das fibras interfere nas propriedades dos compósitos no estado fresco e endurecido. No estado fresco, a incorporação de fibras provoca perdas significativas de trabalhabilidade. No estado endurecido, a influência é mais significativa no desempenho dos compósitos frente às solicitações de impacto do que às solicitações estáticas;
- O uso de teores de fibra mais elevados, apesar de interferir na trabalhabilidade das misturas, provoca incrementos significativos no desempenho dos compósitos, especialmente quando os teores superam  $30 \text{ kg/m}^3$ . Medidas que garantam a trabalhabilidade devem, no entanto, ser tomadas quando se planeja a incorporação de fibras em teores elevados. Em termos da resistência ao impacto, expressa pela demanda de energia para a primeira fissura e ruptura dos compósitos, a tendência de melhora derivada do aumento do teor de fibras tende a um comportamento exponencial.
- De forma geral, o comprimento das fibras não foi identificado como um parâmetro estatisticamente significativo, que afetasse a eficiência dos compósitos. Até um determinado volume de fibras, o simples número de fibras, que determina quantas delas tem chances de interceptar a fissura, parece ser o fator dominante no controle da fissuração. A partir de um determinado volume, o controle passa a ser determinado pelo comprimento das fibras incorporadas à matriz. Comprimentos maiores resultam então em melhor ancoragem e permitem que cada fibra atue de forma mais eficiente;

- A mudança do tamanho do agregado não acarretou mudanças significativas no desempenho do compósito, sendo mantidas as energias necessárias para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura dos compósitos. Este comportamento contradiz, para os tipos de compósito ensaiados, as recomendações da literatura sobre a necessidade de compatibilizar o tamanho das fibras e do agregado;

- Quando são usadas fibras de comprimento similar, o fator de forma passa a ser um parâmetro bastante influente, sendo que os compósitos elaborados com fibras de fator de forma mais elevado tendem a apresentar melhores resultados na prevenção da fissuração;

*Em relação ao desempenho dos compósitos:*

- O módulo de elasticidade não é afetado positivamente pela adição de fibras, sendo levemente reduzido quando são empregados agregados maiores ou fibras mais compridas;

- A resistência à compressão é levemente incrementada quando se usam teores elevados e fibras longas, pois a restrição à deformação transversal provocada pela presença das fibras impede que o concreto rompa prematuramente por perda de monoliticidade;

- A resistência à tração por compressão diametral é afetada positivamente pelo uso de agregados maiores e elevados teores de fibra, possivelmente devido à maior resistência à deformação e tenacidade dos compósitos com estas características;

- O comportamento ao impacto dos compósitos ensaiados foi incrementado de forma significativa com o aumento do teor de fibras e de seu fator de forma. De acordo com as tendências observadas, mostradas no item 4.5.3, são necessárias cerca de 100.000 fibras longas ou 400.000 fibras curtas, por metro cúbico, para provocar mudanças mais significativas neste tipo de comportamento;

- A tenacidade dos compósitos com fibras de aço foi muito mais elevada do que a do concreto simples, crescendo com o aumento do teor de fibras, como mostrado no item 5.7;

*Em relação à modelagem via método dos elementos discretos:*

- o modelo empregado, com dados de entrada estimados de forma tradicional, não conseguiu representar adequadamente o comportamento ao impacto dos compósitos reforçados com fibras de aço, embora tenha mostrado excelente resultado para os concretos simples;
- o modelo conseguiu reproduzir, em termos gerais, o padrão de fissuração dos corpos de prova submetidos ao tipo de ensaio de impacto empregado. Entretanto, verificou-se que, quando se utiliza a estimativa teórica de aumento da energia de fratura dos compósitos com fibras de aço, aparece uma tendência de perfuração das placas que não condiz com os resultados experimentais. Estudos adicionais sobre a determinação da energia de fratura e a forma de ruptura empregada no modelo, para representação mais adequada do comportamento pós-fissuração de compósitos com fibras, são necessários;

*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 incremento da resistência ao impacto é viável e eficiente;
- Preferencialmente devem-se utilizar teores de fibras mais elevados, desde que sejam tomados os devidos cuidados com a trabalhabilidade;
- Fibras mais longas e com maior fator de forma tendem a serem mais eficientes, desde que o volume de fibras seja considerável. Estudos são necessários para analisar qual o volume mínimo eficiente para cada tipo de fibra e matriz cimentícia utilizada;
- Não é necessário considerar o efeito do tamanho do agregado para os intervalos de granulometria e tipos de fibras empregados;

- Deve-se atentar sempre para a compatibilização do tamanho da fibra com a seção da peça reforçada, a fim de evitar dificuldades de posicionamento das fibras na seção, que prejudicam a dispersão tridimensional dos elementos de reforço ou a dispersão na direção desejada;
- É necessário continuar com o desenvolvimento do modelo teórico, a partir de estudos específicos para caracterização dos parâmetros de fratura e comportamento pós-fissuração de compósitos com fibras de aço, além de adaptações no esquema de aplicação das cargas;

### **1.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O presente estudo apresenta diversas possibilidades de continuidade. Considera-se que as seguintes sugestões de trabalhos poderiam ser implementadas em estudos posteriores:

- determinação de teores e comprimentos críticos para os diversos tipos de fibras de aço, a fim de validar as equações apresentadas no Capítulo 2 e buscar a eficiência máxima dos compósitos gerados;
- realização de uma análise do efeito da variação do tamanho dos corpos de prova de ensaio, com vistas a detectar a real interferência provocada pela incompatibilidade de dimensões entre as seções utilizadas e o comprimento das fibras;
- avaliação dos efeitos da adição das fibras no comportamento de concretos submetidos a carregamentos cíclicos;
- realização de análises comparativas de desempenho com outros tipos de fibras, em busca de materiais com desempenhos equivalentes ou superiores ao dos compósitos com fibras de aço;
- análises de combinações binárias de fibras, projetadas com o intuito de modificar determinadas propriedades dos compósitos, como por exemplo, o incremento da energia necessária para o aparecimento da primeira fissura, uma vez que as fibras de aço não apresentam melhoras significativas neste critério, principalmente para baixos teores de adição;

- quanto à simulação numérica, a continuação do ajuste do modelo poderia levar a resultados mais significativos, inclusive com a determinação mais precisa dos parâmetros de entrada, como a energia específica de fratura, através de ensaios padronizados para quantificação da tenacidade dos compósitos. Além disto, estudo das variações no coeficiente de amortecimento provocadas pela adição de fibras seriam interessantes.

## REFERÊNCIAS

- ACCETTI, K. M.; PINHEIRO, L. M. Tipos de Fibras e Propriedades do Concreto com Fibras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42.,2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: IBRACON, 2000.
- ALWAN, J. M.; NAAMAN, A. E.; GUERRERO, P. Effect of Mechanical Clamping on the Pull-out Response of Hooked Steel Fibers Embedded in Cementitious Matrices, 1999. Disponível em:< <http://www.rilem.net/cse01.pdf> >. Acessado em: 27/04/2004.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.1R-96**: state-of-the-art report on fiber reinforced concrete. Detroit, MI, 1996.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.2R-89**: measurement for properties of fiber reinforced concrete. Detroit, MI, 1999a.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.3R-96**: considerations for steel Fiber reinforced concrete. Detroit, MI, 1999b.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.4R-96**: design considerations for steel fiber reinforced concrete. Detroit, MI, 1999b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-1018 – 97**: Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.733**: cimento Portland de alta resistência inicial, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.738**: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.739**: concreto – ensaio de compressão de corpos cilíndricos, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.118**: projeto de estruturas de concreto, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.217**: agregados – determinação da composição granulométrica, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.222**: argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, 1994.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.522**: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.818**: placas cerâmicas para revestimento – especificações e métodos de ensaio, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone, 1998.

BANTHIA, N. P.; MINDESS, S.; BENTUR, A. Impact Behavior of Concrete Beams. **Materiaux et Constructions**, Paris: RILEN, n. 20, p. 293-302, 1987.

BANTHIA, N.; YAN, C.; SAKAI, K. Impact Resistance of Concrete Plates Reinforced with a Fiber Reinforced Plastic Grid. **ACI Materials Journal**, Detroit, Mich.: v. 95, n. 1, jan./feb. 1998.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: MAKRON Books, 1925.

BELGO. Disponível em : <<http://www.belgomineira.com.br/produtos/imp/dramix.pdf>>. Acessado em: 20/02/2004.

BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. New York: Elsevier Science Publishers, 1990.

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

BILLINGTON, S. L.; YONN, J. K. Cyclic Response of Unbonded Posttensioned Precast Columns with Ductile Fiber-Reinforced Concrete. **Journal of Bridge Engineering**, Reston, Virginia., v. 9, n. 4, 2004.

BIZ, C. E. **Concreto de Pós Reativos**, 2001. 101f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, 2001.

BONALDO, E.; PINTO Jr., N. O. **Análise de Cisalhamento em Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Fibras de Aço Sujeitas a Cargas Invertidas**. Disponível em:< <http://www.dec.uem.br/eventos/enteca2000/artigos/E2000-2-08.PDF>>. Acessado em: 20/3/2004.

CHEN, W. F. **Plasticity in Reinforced Concrete**. West Lafayette, Indiana: McGraw-Hill, 1982.

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

CONCRETO: REVISTA OFICIAL DO INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. São Paulo: IBRACON, jun. 2004, n. 35, 2004.

DANCYGIER, A. N.; YANKELEVSKY, D. Z. High Strength Concrete Response to Hard Projectile Impact. **Int. J. Impact Engng.**, v. 18, n. 6, p. 583 – 599, 1996.

D'AVILA, V. M. R. **Estudo sobre Modelos de Fissuração de Peças de concreto Armado Via Método dos Elementos Finitos**, 2003. 259 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, 2003. EL-NIEMA, E. I. Reinforced Concrete Beams with Steel Fibers under Shear. **ACI Structural Journal**, Detroit, Mich., v. 88, n. 2, mar./april. 1991.

EL-NIEMA, E. I. Fiber Reinforced Concrete Beams under Torsion. **ACI Structural Journal**, Detroit, Mich., v. 90, n. 5, sep./oct. 1993.

FERREIRA, L. E. T. **Sobre a Resistência ao Fraturamento do Concreto e do Concreto Reforçado com Fibras de Aço**, 2002. 261 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras de Aço**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. Boletim Técnico.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de Controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de Aço**, 1997. 342 f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FIORELLI, J. **Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para Reforço de Vigas de Madeira**, 2002. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

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

GOPALARATNAM, V. S.; SHAH, S. P. Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading. **Journal American Concrete Institute**, Detroit, Mich., v. 83. p. 117 – 126.

GUIMARÃES, A. E. P; *et al.* **Análise Experimental de Pilares de Concreto de Alta Resistência com Adição de Fibras Metálicas**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001. Disponível em <http://www.lmc.ep.usp.br/people/tbitten/gmec/publicacoes.htm>. Acessado em 18/06/2004. Boletim Técnico.

GUIMARÃES, M. C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; AGOPYAN, V. Análise da Repetibilidade do Ensaio de Tenacidade à Flexão para Concretos Reforçados com Fibras de Aço. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: IBRACON, 2000.

FITESA (2004), disponível em:< <http://www.fitesa.com.br> >. Acessado em: 20/05/2004.

HANNANT, D. J. **Fiber Cements and Fiber Concretes**. Guildford, United Kingdom: John Wiley & Sons, 1978.

HOLANDA, K. M. A. **Análise dos Mecanismos Resistentes e da Similaridade dos Efeitos de Adição de Fibras de Aço na Resistência e na Ductilidade à Punção de Lajes-Cogumelo e ao Cisalhamento de Vigas de Concreto**, 2002. 278 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

ITURRIOZ, I. **Aplicação do Método dos Elementos Discretos ao Estudo de Estruturas Laminadas de Concreto Armado**, 1995. 156 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, 1995.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4**: Method of tests for steel fiber reinforced concrete. Concrete Library of JSCE. Part 111-2. n. 3. June 1984b. p.58-61

KORMANN, A. C. M.; *et. al* **Desempenho de Fibras de Aço em Concretos Sujeitos à Abrasão Hidráulica**. Disponível em: <[http://www.lactec.org.br/publicações/2002/007\\_2002.pdf](http://www.lactec.org.br/publicações/2002/007_2002.pdf)>. Acessado em 07/05/2004.

KÜTZING, L. **Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Beams and Plates**. Disponível em: <[http://www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer/lacer02/102\\_25.pdf](http://www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer/lacer02/102_25.pdf)>. Acessado em 28/04/2004.

MAJI, A. K.; *et. al* Evaluation of Pultruded FRP Composites for Structural Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 9, n. 3, p. 154 – 158, aug. 1997.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MINDESS, S.; YAN, C. Perforation of Plain and Fiber Reinforced Concretes Subjected to Low-velocity Impact Loading. **Cement and Concrete Research**, v. 23, 1993.

NUNES, L. N.; AGOPYAN, V. **A Influência do Fator de Forma da Fibra na Tenacidade à Flexão do Concreto Reforçado com Fibras de Aço**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998. Boletim Técnico.

OTTER, D.; NAAMAN, A. Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete under Cyclic Loading. **ACI Materials Journal**, Detroit, Mich., july/aug. 1998.

RESENDE, F. M. **Influência das Fibras de Aço, Polipropileno e Sisal no Amortecimento de Concretos de Resistência Normal e de Alto Desempenho**, 2003. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

- RIOS, R. D. **Aplicações do Método dos Elementos Discretos em Estruturas de Concreto**, 2002a. 151 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, 2002<sup>a</sup>.
- RIOS, R. D.; RIERA, J. D.; ITURRIOZ, I. Uma Contribuição ao Entendimento do Efeito de Escala em Estruturas de Concreto. In: MECÂNICA COMPUTACIONAL, Santa Fe-Paraná, Argentina, 2002b. v. 21, p. 979-991.
- ROCHA, M. M. **Ruptura e Efeito de Escala em Materiais Não-Homogêneos**, 1989. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, 1989.
- SAINT-GOBAIN. Disponível em: < <http://www.saint-gobain.com.br>>. Acessado em 11/06/2004.
- SAWAN, J.; ABDEL-ROHMAN, M. Impact Effect on R.C. Slabs: experimental approach. **Journal of Structural Engineering**, v. 111, n. 7, sep. 1984.
- SAWAN, J.; ABDEL-ROHMAN, M. Impact Effect on R.C. Slabs: Experimental Approach. **Journal of Structural Engineering**, v. 112, n. 9, sep. 1986.
- SOROUSHIAN, P.; BAYASI, Z. Fiber-Type on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, v.88, n. 2, mar./apr. 1991.
- TANESI, J.; AGOPYAN, V. Compósitos reforçados com fibras plásticas para construção civil. In: ENCONTRO TECNOLOGIA DE SISTEMAS PLÁSTICOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., São Paulo, 1997. **Anais**. São Paulo : EPUSP, 1997. p. 219-252.
- TEZUKA, Y. **Concreto Armado com Fibras**, São Paulo: ABCT.1997, 1989.
- WEILER, B.; GROSSE, C. Pull-out Behavior of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete. Disponível em: < [http://www.iwb.uni-stuttgart.de/grosse/ogj\\_7\\_1.pdf](http://www.iwb.uni-stuttgart.de/grosse/ogj_7_1.pdf)>. Acessado em: 27/04/2004.

## **ANEXO 1**

**Planilha geral para análise da influência do número de fibras por m<sup>3</sup> de concreto**

Fibra	Agregado	Teor	Fibras/kg de fibra	Fibras/m <sup>3</sup> concreto	Fator de Forma	Comprimento	Resistência à Compressão	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade	Energia acumulada 1. <sup>a</sup> fissura	Energia acumulada ruptura
Testemunho	19	0	0	0	0	0	0	0	0	94	108,4
Testemunho	19	0		0	0	0	0	0	0	94	123,9
Testemunho	19	0		0	0	0	0	0	0	80,5	108,4
45/30	19	30	13000	390000	45	30	36,26	2,85	36,42	80,5	261,2
45/30	19	30		390000	45	30	37,32	3,00	35,29	80,5	272,8
45/30	19	30		390000	45	30	34,78	3,15	34,30	140,4	284,4
45/30	19	45	13000	585000	45	30	38,66	3,34	34,28	123,9	216,8
45/30	19	45		585000	45	30	38,09	3,71	31,73	160,05	329,4
45/30	19	45		585000	45	30	41,41	3,56	34,54	196,2	284
45/30	19	60	13000	780000	45	30	42,82	3,99	38,46	158	488,4
45/30	19	60		780000	45	30	43,45	4,48	33,76	158	306,7
45/30	19	60		780000	45	30	41,97	4,63	37,91	176,6	488,4
80/60	19	10	4600	46000	80	60	38,23	2,55	32,41	123,9	176,6
80/60	19	10		46000	80	60	33,65	2,39	35,72	108,4	158
80/60	19	10		46000	80	60	35,55	2,92	37,91	108,4	176,6
80/60	19	30	4600	138000	80	60	33,51	2,80	33,61	123,9	284
80/60	19	30		138000	80	60	36,05	2,76	32,33	123,9	261,2
80/60	19	30		138000	80	60	38,44	3,25	31,74	140,4	284
80/60	19	45	4600	207000	80	60	33,72	3,43	36,07	261,2	397,5
80/60	19	45		207000	80	60	35,98	4,27	40,49	238,5	579,3
80/60	19	45		207000	80	60	34,42	3,72	36,13	216,8	556,6
65/60	19	10	3200	32000	65	60	36,68	2,61	36,06	80,5	176,6
65/60	19	10		32000	65	60	32,80	2,96	32,48	123,9	196,2
65/60	19	10		32000	65	60	29,49	3,18	32,61	80,5	158
65/60	19	30	3200	96000	65	60	30,54	2,58	37,99	108,4	216,8
65/60	19	30		96000	65	60	34,63	2,85	31,75	108,4	306,7
65/60	19	30		96000	65	60	33,79	2,95	34,87	108,4	176,6
65/60	19	45	3200	144000	65	60	34,78	3,76	31,08	196,2	533,8
65/60	19	45		144000	65	60	34,71	3,93	30,77	108,4	216,8
65/60	19	45		144000	65	60	32,66	3,97	34,48	94	397,5
45/50	19	30	2800	84000	45	50	43,73	3,39	32,31	108,4	306,7
45/50	19	30		84000	45	50	43,24	3,20	37,07	140,4	352,1
45/50	19	30		84000	45	50	39,71	3,75	33,23	140,4	284
45/50	19	45	2800	126000	45	50	38,09	3,82	29,25	123,9	306,7
45/50	19	45		126000	45	50	34,71	3,84	30,77	140,4	306,7
45/50	19	45		126000	45	50	33,72	3,31	30,01	140,4	397,5
45/50	19	60	2800	168000	45	50	45,71	4,38	32,80	158	397,5
45/50	19	60		168000	45	50	39,78	3,24	31,26	158	397,5
45/50	19	60		168000	45	50	45,57	3,92	32,03	196,2	397,5

**Planilha para análise da influência do tamanho do agregado**

<b>Fibra</b>	<b>Agregado</b>	<b>Teor</b>	<b>Fator de Forma</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Resistência à Compressão</b>	<b>Resistência à tração</b>	<b>Módulo de Elasticidade</b>	<b>Energia acumulada 1.ª fissura</b>	<b>Energia acumulada ruptura</b>	<b>Delta Energia</b>	<b>Deslocamentos acumulados 1.ª fissura</b>	<b>Deslocamentos acumulados ruptura</b>	<b>Delta Deslocamento</b>
Testemunho	19	0	0	0	37,46	3,19	37,48	94	108,4	14,4	35	88,5	53,5
Testemunho	19	0	0	0	32,87	2,83	35,82	94	123,9	29,9	25	85,75	60,75
Testemunho	19	0	0	0	35,55	3,43	39,82	80,5	108,4	27,9	15	83	68
45/30	19	30	45	30	36,26	2,85	36,42	80,5	261,2	180,7	6,5	64,5	58
45/30	19	30	45	30	37,32	3,00	35,29	80,5	272,8	192,3	-3	82,5	85,5
45/30	19	30	45	30	34,78	3,15	34,30	140,4	284,4	144	4	84	80
45/30	19	45	45	30	38,66	3,34	34,28	123,9	216,8	92,9	31,5	75	43,5
45/30	19	45	45	30	38,09	3,71	31,73	160,05	329,4	169,35	49,5	73,5	24
45/30	19	45	45	30	41,41	3,56	34,54	196,2	284	87,8	28,5	78	49,5
45/30	19	60	45	30	42,82	3,99	38,46	158	488,4	330,4	58,5	82,5	24
45/30	19	60	45	30	43,45	4,48	33,76	158	306,7	148,7	32	105	73
45/30	19	60	45	30	41,97	4,63	37,91	176,6	488,4	311,8	7	76	69
45/30	12,5	30	45	30	40,28	3,69	39,06	108,4	261,2	152,8	17	63,5	46,5
45/30	12,5	30	45	30	43,88	3,16	35,42	108,4	261,2	152,8	8,5	81	72,5
45/30	12,5	30	45	30	39,85	3,67	39,95	123,9	261,2	137,3	4	78	74
45/30	12,5	45	45	30	37,03	3,29	38,20	94	352,1	258,1	16	118	102
45/30	12,5	45	45	30	42,39	2,69	37,64	140,4	374,8	234,4	13	60	47
45/30	12,5	45	45	30	42,68	2,84	38,27	180,4	284	103,6	13	81	68
45/30	12,5	60	45	30	34,14	3,75	28,64	158	511,1	353,1	-1	69,5	70,5
45/30	12,5	60	45	30	28,64	3,42	27,88	140,4	397,5	257,1	-0,5	93,5	94
45/30	12,5	60	45	30	25,82	3,18	28,26	140,4	420,3	279,9	-1,5	45,5	47

Planilha para análise da influência do comprimento das fibras

Fibra	Agregado	Teor	Fator de Forma	Comprimento	Resistência à Compressão	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade	Energia acumulada 1.ª fissura	Energia acumulada ruptura	Delta Energia	Deslocamentos acumulados 1.ª fissura	Deslocamentos acumulados ruptura	Delta Deslocamento
Testemunho	19	0	0	0	37,46	3,19	37,48	94	108,4	14,4	35	88,5	53,5
Testemunho	19	0	0	0	32,87	2,83	35,82	94	123,9	29,9	25	85,75	60,75
Testemunho	19	0	0	0	35,55	3,43	39,82	80,5	108,4	27,9	15	83	68
45/30	19	30	45	30	36,26	2,85	36,42	80,5	261,2	180,7	6,5	64,5	58
45/30	19	30	45	30	37,32	3,00	35,29	80,5	272,8	192,3	-3	82,5	85,5
45/30	19	30	45	30	34,78	3,15	34,30	140,4	284,4	144	4	84	80
45/30	19	45	45	30	38,66	3,34	34,28	123,9	216,8	92,9	31,5	75	43,5
45/30	19	45	45	30	38,09	3,71	31,73	160,05	329,4	169,35	49,5	73,5	24
45/30	19	45	45	30	41,41	3,56	34,54	196,2	284	87,8	28,5	78	49,5
45/30	19	60	45	30	42,82	3,99	38,46	158	488,4	330,4	58,5	82,5	24
45/30	19	60	45	30	43,45	4,48	33,76	158	306,7	148,7	32	105	73
45/30	19	60	45	30	41,97	4,63	37,91	176,6	488,4	311,8	7	76	69
45/50	19	30	45	50	43,73	3,39	32,31	108,4	306,7	198,3	24	172	148
45/50	19	30	45	50	43,24	3,20	37,07	140,4	352,1	211,7	36	129,5	93,5
45/50	19	30	45	50	39,71	3,75	33,23	140,4	284	143,6	36	95	59
45/50	19	45	45	50	38,09	3,82	29,25	123,9	306,7	182,8	17	107	90
45/50	19	45	45	50	34,71	3,84	30,77	140,4	306,7	166,3	23	62	39
45/50	19	45	45	50	33,72	3,31	30,01	140,4	397,5	257,1	5	71	66
45/50	19	60	45	50	45,71	4,38	32,80	158	397,5	239,5	14	42	28
45/50	19	60	45	50	39,78	3,24	31,26	158	397,5	239,5	17	55	38
45/50	19	60	45	50	45,57	3,92	32,03	196,2	397,5	201,3	16	40,5	24,5



Planilha para análise da influência do fator de forma das fibras

Fibra	Agregado	Teor	Fator de Forma	Comprimento	Resistência à Compressão	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade	Energia acumulada 1.ª fissura	Energia acumulada ruptura	Delta Energia	Deslocamentos acumulados 1.ª fissura	Deslocamentos acumulados ruptura	Delta Deslocamento
Testemunho	19	0	0	0	37,46	3,19	37,48	94	108,4	14,4	35	88,5	53,5
Testemunho	19	0	0	0	32,87	2,83	35,82	94	123,9	29,9	25	85,75	60,75
Testemunho	19	0	0	0	35,55	3,43	39,82	80,5	108,4	27,9	15	83	68
80/60	19	10	80	60	38,23	2,55	32,41	123,9	176,6	52,7	22	31,5	9,5
80/60	19	10	80	60	33,65	2,39	35,72	108,4	158	49,6	26	33	7
80/60	19	10	80	60	35,55	2,92	37,91	108,4	176,6	68,2	13	49	36
80/60	19	30	80	60	33,51	2,80	33,61	123,9	284	160,1	-1	40	41
80/60	19	30	80	60	36,05	2,76	32,33	123,9	261,2	137,3	10	50,5	40,5
80/60	19	30	80	60	38,44	3,25	31,74	140,4	284	143,6	1	27,5	26,5
80/60	19	45	80	60	33,72	3,43	36,07	261,2	397,5	136,3	22,5	43,5	21
80/60	19	45	80	60	35,98	4,27	40,49	238,5	579,3	340,8	12	43,5	31,5
80/60	19	45	80	60	34,42	3,72	36,13	216,8	556,6	339,8	17,25	43,5	26,25
65/60	19	10	65	60	36,68	2,61	36,06	80,5	176,6	96,1	25,5	115,5	90
65/60	19	10	65	60	32,80	2,96	32,48	123,9	196,2	72,3	32,5	129,5	97
65/60	19	10	65	60	29,49	3,18	32,61	80,5	158	77,5	12	106	94
65/60	19	30	65	60	30,54	2,58	37,99	108,4	216,8	108,4	13	58	45
65/60	19	30	65	60	34,63	2,85	31,75	108,4	306,7	198,3	1	66	65
65/60	19	30	65	60	33,79	2,95	34,87	108,4	176,6	68,2	8	26,5	18,5
65/60	19	45	65	60	34,78	3,76	31,08	196,2	533,8	337,6	36	100	64
65/60	19	45	65	60	34,71	3,93	30,77	108,4	216,8	108,4	39	69,5	30,5
65/60	19	45	65	60	32,66	3,97	34,48	94	397,5	303,5	65	203	138

Planilha geral para análise da influência do teor de fibras

Fibra	Agregado	Teor	Fator de Forma	Comprimento	Resistência à Compressão	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade	Energia acumulada 1.ª fissura	Energia acumulada ruptura	Delta Energia	Deslocamentos acumulados 1.ª fissura	Deslocamentos acumulados ruptura	Delta Deslocamento
Testemunho	19	0	0	0	37,46	3,19	37,48	94	108,4	14,4	35	88,5	53,5
Testemunho	19	0	0	0	32,87	2,83	35,82	94	123,9	29,9	25	85,75	60,75
Testemunho	19	0	0	0	35,55	3,43	39,82	80,5	108,4	27,9	15	83	68
45/30	19	30	45	30	36,26	2,85	36,42	80,5	261,2	180,7	6,5	64,5	58
45/30	19	30	45	30	37,32	3,00	35,29	80,5	272,8	192,3	-3	82,5	85,5
45/30	19	30	45	30	34,78	3,15	34,30	140,4	284,4	144	4	84	80
45/30	19	45	45	30	38,66	3,34	34,28	123,9	216,8	92,9	31,5	75	43,5
45/30	19	45	45	30	38,09	3,71	31,73	160,05	329,4	169,35	49,5	73,5	24
45/30	19	45	45	30	41,41	3,56	34,54	196,2	284	87,8	28,5	78	49,5
45/30	19	60	45	30	42,82	3,99	38,46	158	488,4	330,4	58,5	82,5	24
45/30	19	60	45	30	43,45	4,48	33,76	158	306,7	148,7	32	105	73
45/30	19	60	45	30	41,97	4,63	37,91	176,6	488,4	311,8	7	76	69
80/60	19	10	80	60	38,23	2,55	32,41	123,9	176,6	52,7	22	31,5	9,5
80/60	19	10	80	60	33,65	2,39	35,72	108,4	158	49,6	26	33	7
80/60	19	10	80	60	35,55	2,92	37,91	108,4	176,6	68,2	13	49	36
80/60	19	30	80	60	33,51	2,80	33,61	123,9	284	160,1	-1	40	41
80/60	19	30	80	60	36,05	2,76	32,33	123,9	261,2	137,3	10	50,5	40,5
80/60	19	30	80	60	38,44	3,25	31,74	140,4	284	143,6	1	27,5	26,5
80/60	19	45	80	60	33,72	3,43	36,07	261,2	397,5	136,3	22,5	43,5	21
80/60	19	45	80	60	35,98	4,27	40,49	238,5	579,3	340,8	12	43,5	31,5
80/60	19	45	80	60	34,42	3,72	36,13	216,8	556,6	339,8	17,25	43,5	26,25
65/60	19	10	65	60	36,68	2,61	36,06	80,5	176,6	96,1	25,5	115,5	90
65/60	19	10	65	60	32,80	2,96	32,48	123,9	196,2	72,3	32,5	129,5	97
65/60	19	10	65	60	29,49	3,18	32,61	80,5	158	77,5	12	106	94
65/60	19	30	65	60	30,54	2,58	37,99	108,4	216,8	108,4	13	58	45
65/60	19	30	65	60	34,63	2,85	31,75	108,4	306,7	198,3	1	66	65
65/60	19	30	65	60	33,79	2,95	34,87	108,4	176,6	68,2	8	26,5	18,5
65/60	19	45	65	60	34,78	3,76	31,08	196,2	533,8	337,6	36	100	64
65/60	19	45	65	60	34,71	3,93	30,77	108,4	216,8	108,4	39	69,5	30,5
65/60	19	45	65	60	32,66	3,97	34,48	94	397,5	303,5	65	203	138
45/50	19	30	45	50	43,73	3,39	32,31	108,4	306,7	198,3	24	172	148
45/50	19	30	45	50	43,24	3,20	37,07	140,4	352,1	211,7	36	129,5	93,5
45/50	19	30	45	50	39,71	3,75	33,23	140,4	284	143,6	36	95	59
45/50	19	45	45	50	38,09	3,82	29,25	123,9	306,7	182,8	17	107	90
45/50	19	45	45	50	34,71	3,84	30,77	140,4	306,7	166,3	23	62	39
45/50	19	45	45	50	33,72	3,31	30,01	140,4	397,5	257,1	5	71	66
45/50	19	60	45	50	45,71	4,38	32,80	158	397,5	239,5	14	42	28
45/50	19	60	45	50	39,78	3,24	31,26	158	397,5	239,5	17	55	38
45/50	19	60	45	50	45,57	3,92	32,03	196,2	397,5	201,3	16	40,5	24,5

## **ANEXO 2**

## ANEXO 2

O projeto de estruturas de concreto e ou concreto armado é baseado numa classificação dos mesmos que em geral corresponde a um valor específico da resistência característica à compressão  $f_k$ , a qual é determinada mediante ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos, prismáticos e/ou cúbicos. Para fins da simulação numérica e para determinar indiretamente outros parâmetros do concreto, o valor médio da tensão de compressão  $f_m$  é necessário, neste trabalho quando isso foi necessário, a mesma foi estimada com a seguinte fórmula (CEB-FIP,1990)

$$f_{cm}=f_{ck}+8 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{A.1})$$

O comportamento inicial do concreto é modelado usando uma relação constitutiva elástica linear a qual é completamente definida pelo módulo de elasticidade E e pelo coeficiente de Poisson  $\nu$ . Para concretos de características normais, tal módulo pode ser determinado com a seguinte expressão (CEB-FIP,1990)

$$E_c = 10^4 f_{cm}^{1/3} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{A.2})$$

O coeficiente de Poisson do concreto é variável entre 0,10 e 0,25.

De acordo com o código modelo CEB-FIP (1990), a resistência à tração do concreto está relacionada com a resistência à compressão. Para fins práticos, a mesma pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$f_{tm} = 0,30 f_{ck}^{2/3} \text{ [ N/mm}^2\text{]} \quad (\text{A.3})$$

Para a forma da curva de “strain softening” à tração, acostuma -se se encontrar nas referentes referências bibliográficas, modelos como a relação linear, a bilinear (Hilleborg) e outras como, por exemplo, a exponencial. A energia dissipada pelo processo de fratura é determinada pela área sob o diagrama tensão deslocamento. A energia específica de fratura é considerada como uma propriedade do material, está relacionada com a tensão máxima de compressão e com o tamanho máximo do agregado, de acordo com o CEB-FIP (1990), pode ser estimado como:

$$G_f = G_{F0} ( f_{cm} / f_{cm0} )^{0.7} \text{ [Nmm/mm}^2\text{]} \quad (\text{A.4})$$

Onde  $f_{m0} = 10 \text{ [Nmm/mm}^2\text{]}$ . O valor básico para a energia de fratura  $G_{F0}$ , depende do tamanho máximo do agregado, e está indicado na Tabela 1.

Tabela 1: Valores básicos da energia de fratura  $G_{F0}$  [Nmm/mm<sup>2</sup>]  
CEB-FIP (1990)

$d_{m\acute{a}x}$ (mm)	$G_{F0}$ (Nmm/mm <sup>2</sup> )
8	0,025
16	0,030
32	0,058