

## CAPÍTULO 4

### CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO

*Este capítulo apresenta inicialmente os principais conceitos relativos aos compósitos com fibras. As características mais importantes dos concretos reforçados com fibras de aço são apresentadas na parte final do capítulo. Para a determinação da tenacidade dos compósitos, são descritos três diferentes critérios: da ASTM C 1018, da JSCE - SF 4 e uma nova proposição de BANTHIA & TROTTIER.*

#### 4.1 INTRODUÇÃO

O ACI 544.1R (1986) define concreto reforçado com fibras (*fiber reinforced concrete*) como o “concreto feito de cimentos hidráulicos contendo agregados miúdos ou miúdos e graúdos e fibras discretas e descontínuas”.

Materiais cimentícios como o concreto apresentam pequena resistência à tração, baixa capacidade de deformação e energia de fratura, fissuras internas e externas, ou seja, o concreto é um material frágil. Para diminuir essas deficiências, fibras curtas com alta resistência à tração e ductilidade podem ser adicionadas ao concreto para melhorar a sua tenacidade, melhorar a resistência ao impacto e à fadiga, controlar a fissuração e o

comportamento na etapa posterior à fissuração inicial. Mas a aderência e/ou ancoragem entre as fibras e a matriz (pasta, argamassa ou concreto) é essencial.

As fibras inibem o início e a propagação das fissuras, ou seja, aumentam a tensão correspondente à primeira fissura da matriz. Mas é no estado de pós-fissuração inicial que as fibras exercem o seu principal efeito, que é o de “costurar” e interceptar a progressão das microfissuras, evitando assim a ruptura brusca. Em consequência, a abertura e o comprimento das fissuras na matriz endurecida são menores, o que melhora consideravelmente a impermeabilidade e a durabilidade dos compósitos expostos ao ambiente.

No concreto armado comum, as armaduras são dispostas em posições convenientes para resistir às tensões de tração, compressão e cisalhamento. De modo similar, a eficiência das fibras nos compósitos será maior se elas ficarem alinhadas na direção das tensões de tração. Entretanto, o alinhamento de fibras curtas é difícil e, na prática, as fibras incorporadas ao concreto ficam descontínuas, com pequeno espaçamento e distribuídas aleatoriamente. Isso resulta que as fibras são mais efetivas no controle da fissuração e no aumento da tenacidade do que no aumento da resistência.

De modo geral, as fibras não substituem a armadura convencional de barras de aço, mas normalmente ambos os materiais são usados em conjunto. Ao inibir e “costurar” as fissuras, as fibras melhoram a aderência da matriz com a armadura, por diminuir a fissuração na região de transferência de tensões. Em certas aplicações, segundo BENTUR & MINDESS (1990), o reforço com fibras é melhor do que a armadura convencional com barras e fios; exemplos:

- a) chapas delgadas que não comportam armaduras na forma de barras. As fibras neste caso constituem a armadura principal, a taxa é alta, excedendo a 5 % do volume;
- b) componentes que devem suportar altas ações ou deformações localizadas, como revestimento de túnel, explosões, tubos pré-fabricados, etc;
- c) componentes em que as fibras são acrescentadas ao concreto para controlar a fissuração oriunda da umidade, variações de temperatura ou outras causas. Nesses casos, as fibras são chamadas “armadura secundária”.

Nas aplicações **b** e **c**, as fibras não são utilizadas para aumentar a resistência do concreto, embora algum ganho possa ocorrer, mas sim para controlar a fissuração e alterar o comportamento do concreto após a ocorrência de fissuras na matriz.

A característica mecânica mais importante que as fibras introduzem nos compósitos é o aumento da tenacidade ou capacidade de absorção de energia (fig. 4.1). Após a tensão máxima, o decréscimo da tensão é acompanhado por uma grande deformação e, segundo o ACI 544.1R (1986), a energia total absorvida por uma viga é de 10 a 40 vezes maior para concreto com fibra do que para concreto sem fibra. A energia é

absorvida durante a ruptura da adesão entre as fibras e a matriz, na deformação da fibra e no atrito provocado pelo escorregamento da fibra durante o seu arrancamento da matriz.

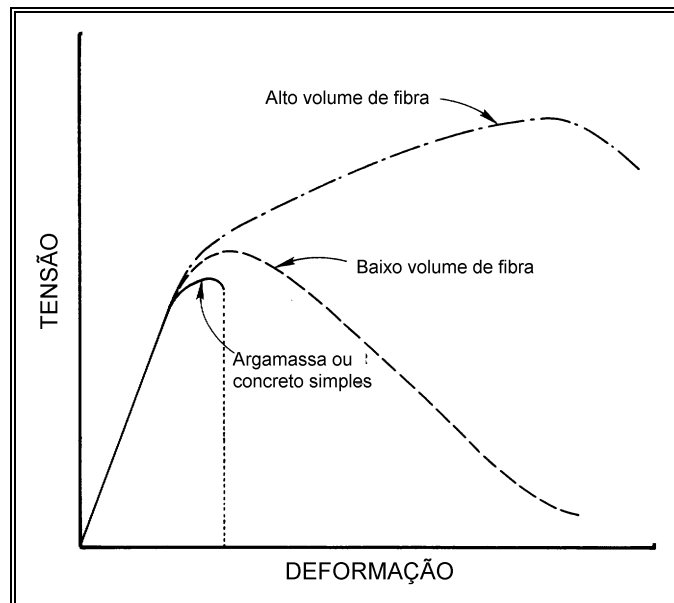


Fig. 4.1 - Típicas curvas tensão-deformação para concreto com fibras.

(FONTE: BENTUR & MINDESS - 1990).

A compatibilidade entre o processo de produção do concreto com o tipo de fibra e a sua eficiência no estado endurecido é um grande problema. Por exemplo, fibras longas de pequeno diâmetro são mais eficientes no estado endurecido, mas dificultam a mistura e a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, além disso, há uma tendência à diminuição da fluidez do concreto.

Para atenuar esses problemas, três alternativas são possíveis: modificação da fibra (na geometria e superfície, para melhorar a aderência e a mistura), modificação das propriedades da matriz (com a utilização de aditivos superplastificantes, pozolanas, sílicas ativas, etc.) e desenvolvimento de técnicas especiais de produção (o que normalmente exige equipamentos e processos mais dispendiosos).

As aplicações dos compósitos com fibras são variadas. Fibras de amianto são utilizadas há muito tempo na fabricação de tubos, telhas e painéis. Fibras de vidro são usadas primariamente em painéis não-estruturais pré-fabricados; fibras de aço são usadas em pavimentos, concreto projetado (*shotcrete*), barragens e várias outras estruturas; fibras de polipropileno fibrilada estão sendo usadas como armadura secundária; fibras vegetais vêm sendo usadas em materiais de construção de baixo custo (BENTUR & MINDESS - 1990). Na atualidade, vários tipos de fibras de diferentes materiais estão sendo criados e pesquisados para o desenvolvimento de compósitos com melhor desempenho.

## 4.2 TIPOS DE FIBRAS

Desde que as primeiras fibras de amianto (*asbesto*) surgiram, por volta de 1900, vários tipos de fibras de diferentes propriedades mecânicas, físicas e químicas vêm sendo utilizadas em adição às matrizes cimentícias, tais como: fibras de aço, vidro, carbono, “*kevlar*”, polipropileno, polietileno, acrílicas, nylon e naturais (celulose, sisal, juta, etc.). Os vários tipos de fibras apresentam propriedades, eficiência e custos variados. Em BENTUR & MINDESS (1990) encontram-se as características das fibras mais comuns.

As fibras individuais são fabricadas segundo duas configurações: como monofilamentos discretos, geralmente com deformações ao longo do comprimento ou ganchos nas extremidades para melhorar a interação com a matriz e criar uma ancoragem mecânica, e em forma de feixes de filamentos finos (exemplos: fibras de vidro, carbono, “*kevlar*”, amianto, polipropileno, etc.). Os feixes freqüentemente mantêm a sua forma na mistura e não se dispersam em filamentos individuais. As fibras ocorrem ainda como filmes de filamentos, como um tecido entrelaçado ou emaranhado.

O ACI 544.1R (1986) define um parâmetro chamado **razão de aspecto** ou **fator de forma** como um valor numérico conveniente para descrever as fibras. Razão de aspecto é definida como o comprimento da fibra dividido pelo seu diâmetro equivalente (diâmetro do círculo com área igual à área da seção transversal da fibra). Valores típicos da razão de aspecto variam de 30 a 150 para fibras com comprimentos de 6,4 a 76 mm.

O arranjo das fibras nos compósitos pode assumir várias geometrias em função da forma das fibras individuais e da sua dispersão na matriz (fig. 4.2). Pode-se apresentar segundo três formas distintas: arranjo unidimensional, arranjo bidimensional e arranjo tridimensional. Conforme se observa na fig. 4.2, o arranjo das fibras pode ser contínuo, com fibras longas (a, c) ou discreto, com fibras curtas ( $\leq 50$  mm de comprimento) (b, d).

Nos concretos, as fibras normalmente utilizadas são discretas e curtas e tendem a se orientar de forma dispersa e não-uniforme. A uniformidade da distribuição das fibras depende muito do processo de mistura, lançamento e adensamento e, na prática, a distribuição uniforme é raramente obtida.

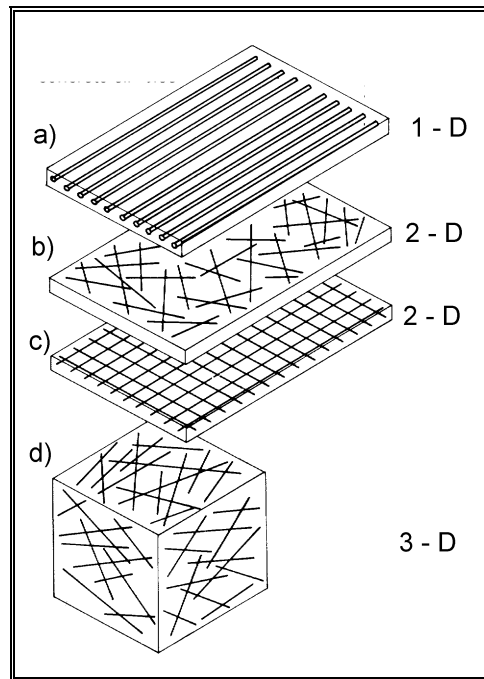


Fig. 4.2 - Arranjos possíveis das fibras nos compósitos.  
(FONTE: BENTUR & MINDESS - 1990).

### 4.3 INTERFACE FIBRA-MATRIZ

As proximidades das fibras nos compósitos cimentícios é chamada **zona de transição**, onde a microestrutura da matriz é consideravelmente diferente da matriz além da interface. A natureza e o tamanho da zona de transição depende do tipo de fibra e do processo de produção, e podem variar com o tempo. As características da zona de transição são decisivas no comportamento mecânico dos compósitos e na aderência entre a fibra e a matriz. Nas vizinhanças da fibra, a matriz é muito mais porosa do que nas outras partes. Isto resulta que a zona de transição é relativamente fraca e leva à propagação preferencial das fissuras ao longo da interface fibra-matriz.

Em fibras de monofilamentos (fibra de aço por exemplo), a zona de transição é muito porosa e rica em CH (hidróxido de cálcio ou portlandita -  $\text{Ca(OH)}_2$ ) em contato direto com a superfície da fibra, o que resulta uma zona de transição frágil (fig. 4.3).

Para fibras em forma de feixes de filamentos que não se dispersam durante o processo de produção (fibra de vidro por exemplo), o tamanho do espaço entre os filamentos não excede a alguns  $\mu\text{m}$ . Em consequência, como há dificuldade para os grãos de cimento penetrarem dentro dos espaços, somente os filamentos externos tendem a ter contato direto com a matriz. A microestrutura resultante após algumas semanas de hidratação caracteriza-se por espaços vazios entre os filamentos, ou a formação localizada dos produtos de hidratação em algumas zonas dos filamentos.

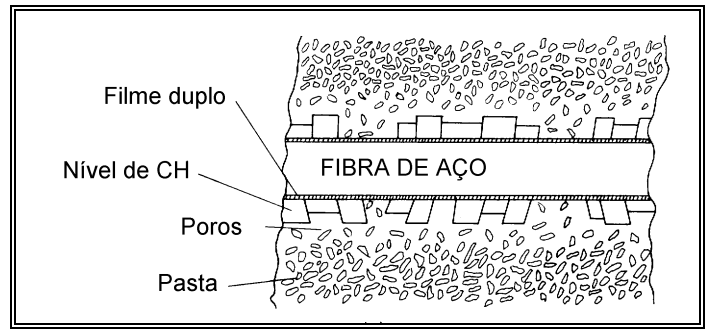


Fig. 4.3 - Interface matriz-fibra de monofilamentos (FONTE: BENTUR & MINDESS - 1990).

#### 4.4 INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

A interação fibra-matriz, ou seja, a transferência de tensões entre a matriz e as fibras, vem sendo pesquisada por meio de modelos analíticos simples (fibras lisas e retas com seção circular) que analisam apenas as tensões de cisalhamento que se desenvolvem paralelas à interface fibra-matriz. Esses modelos simulam a interação por meio do arrancamento da fibra da matriz (fig. 4.4). O estudo do arrancamento das fibras é fundamental para se entender o aumento da tenacidade nos compósitos, pois o arrancamento leva à ruptura da aderência e/ou ancoragem e deformação das fibras, que aumentam a capacidade de deformação do compósito. Modelos reais são extremamente complexos e não foram ainda desenvolvidos, pois teriam que considerar simultaneamente os seguintes efeitos: transferência de tensões elásticas, transferência por atrito, ruptura da aderência por adesão (*debonding*), tensões e deformações normais, além das características reais das fibras (ondulações, ganchos, feixes de filamentos etc.). Porém, a simplicidade dos modelos disponíveis impede que os resultados possam ser aplicados quantitativamente e qualitativamente aos compósitos reais (BENTUR & MINDESS - 1990).

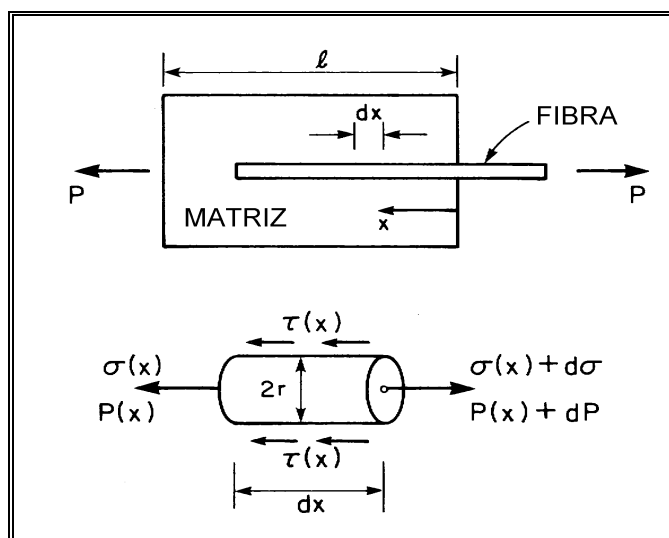


Fig. 4.4 - Geometria do arrancamento da fibra para simular a interação fibra-matriz. (FONTE: BENTUR & MINDESS - 1990).

A importância do entendimento dos mecanismos responsáveis pela transferência de tensões entre a matriz e as fibras está na possibilidade de previsão da eficiência das fibras, previsão da curva tensão-deformação e modo de ruptura do compósito (se dúctil ou frágil). Pode auxiliar também no desenvolvimento de compósitos de melhor desempenho por meio de modificações na interface fibra-matriz.

BENTUR & MINDESS (1990) informam que, no caso do concreto (matriz frágil), a transferência de tensões deve ser estudada nos estados pré e pós-fissuração inicial, pois os efeitos são muito diferentes. No estado de pré-fissuração, a transferência de tensões é de natureza elástica e as deformações na interface são iguais para a fibra e a matriz. A transferência das tensões elásticas de cisalhamento é o principal mecanismo para prever o limite de proporcionalidade e a tensão correspondente à primeira fissura no compósito.

No estado pós-fissuração, ou seja, nos estágios mais avançados do carregamento, há a ruptura da adesão entre as fibras e a matriz, e o processo de transferência de tensões na interface entre os dois componentes passa a ser controlado pelas tensões de atrito. Neste caso aparecem deslocamentos longitudinais relativos entre as fibras e a matriz. A tensão de atrito desenvolvida é de cisalhamento e usualmente adotada como uniformemente distribuída ao longo da interface fibra-matriz. Por meio do estudo deste modo de transferência de tensões, são avaliadas a resistência e a deformação últimas do compósito.

A transição da transferência de tensões elásticas para tensões de atrito ocorre quando a tensão tangencial na interface, devida ao carregamento, excede a resistência de aderência por adesão entre a fibra e a matriz ( $\tau_{au}$ ). Neste momento é iniciada a ruptura da adesão e as tensões tangenciais de atrito começam a atuar na interface. Na realidade, a transição é um processo gradual, onde os dois mecanismos de transferência de tensões ocorrem simultaneamente.

Se a resistência à tração da matriz é alta, a ruptura da adesão ocorre antes da fissuração da matriz. Por outro lado, se a resistência à tração da matriz é baixa, a fissuração acontece antes da ruptura da adesão entre a fibra e a matriz. Esses diferentes comportamentos influenciam a forma da curva tensão-deformação.

Na prática, a forma geométrica complexa de algumas fibras (ganchos nas extremidades, superfícies onduladas, deformações, etc.), leva a modos de ruptura da adesão e arrancamento das fibras bastante diferentes daqueles previstos por modelos analíticos simples, de forma que estes modelos não podem ser válidos (fig. 4.4). Por exemplo, no caso do arrancamento de fibras com ganchos, um volume muito maior de matriz é ativado para resistir à extração da fibra (fig. 4.5).



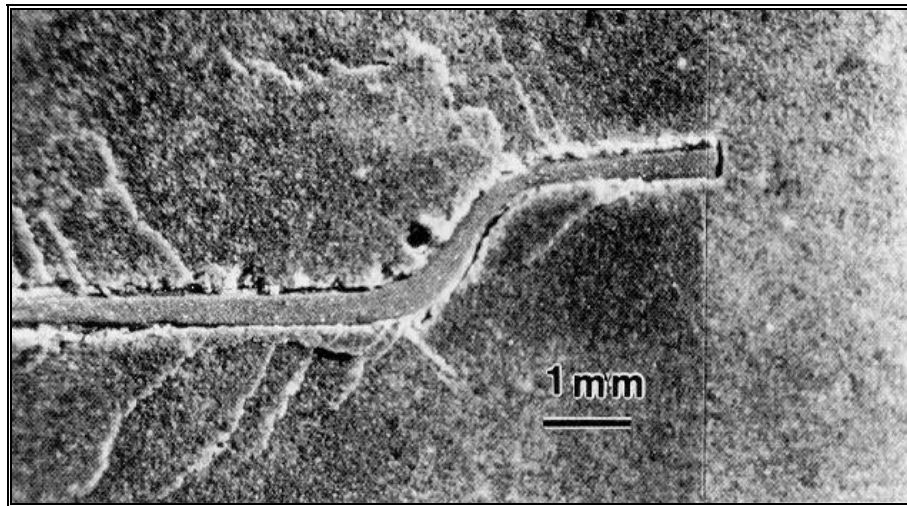


Fig. 4.5 - Arrancamento de uma fibra de aço com gancho na extremidade.  
(FONTE: BENTUR & MINDESS - 1990).

#### 4.5 EFICIÊNCIA DAS FIBRAS

A eficiência das fibras em melhorar as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias frágeis depende da transferência de tensões da matriz para as fibras, ou seja, quanto maior a tensão de tração transferida para as fibras, maior a eficiência. Depende também da transposição transversal das fissuras pelas fibras (*bridging effect*), nos estágios mais avançados do carregamento. Por sua vez, esses fatores dependem principalmente do comprimento e da orientação das fibras e da resistência da aderência fibra-matriz. Neste item analisam-se apenas os efeitos do comprimento da fibra.

A contribuição de fibras longas orientadas paralelas às ações às propriedades mecânicas dos compósitos é maior do que no caso de fibras curtas, inclinadas e dispersas aleatoriamente na matriz. Como normalmente os compósitos são constituídos por fibras curtas e inclinadas, a eficiência das fibras neste caso é menor.

Os efeitos do comprimento das fibras nos compósitos são analisados com base nos mecanismos de transferência de tensões, comentados resumidamente no item 4.3. Um **comprimento crítico** ( $\ell_c$ ) pode ser definido como o comprimento mínimo necessário para desenvolver na fibra a tensão (ou força) igual à sua resistência (ou força de ruptura). Se o comprimento da fibra ( $\ell$ ) é menor que o comprimento crítico  $\ell_c$ , a fibra não é utilizada eficientemente, pois não há comprimento suficiente para gerar uma tensão igual à resistência da fibra à tração. Por outro lado, se o comprimento da fibra é maior que o comprimento crítico, as tensões ao longo da maior parte do comprimento alcançam a sua resistência à tração (ou ao escoamento), e assim todo o potencial da fibra é utilizado.



Além do aumento da eficiência da resistência, o aumento do comprimento da fibra resulta também na mudança do modo de ruptura (fratura). Em matrizes fissuradas, quando  $l \gg 2 l_c$ , o comprimento da fibra é suficiente para o desenvolvimento de tensões iguais à resistência da fibra e, neste caso, a ruptura ocorre predominantemente por fratura da fibra. Quando  $l \ll 2 l_c$ , as fibras são tão curtas que são arrancadas antes que ocorra o desenvolvimento de tensões suficientes para causar a fratura da fibra.

O gráfico apresentado na fig. 4.6a mostra o efeito do comprimento da fibra sobre a tenacidade (trabalho de arrancamento da fibra). A tenacidade máxima é obtida para  $l = l_c$ . Com o aumento no comprimento, mais fibras rompem antes do arrancamento e a energia consumida na ruptura é reduzida, resultando um compósito mais frágil. Desse modo, surge um conceito muito importante: fibras com comprimentos maiores do que o comprimento crítico aumentam a resistência dos compósitos, por outro lado diminuem a tenacidade.

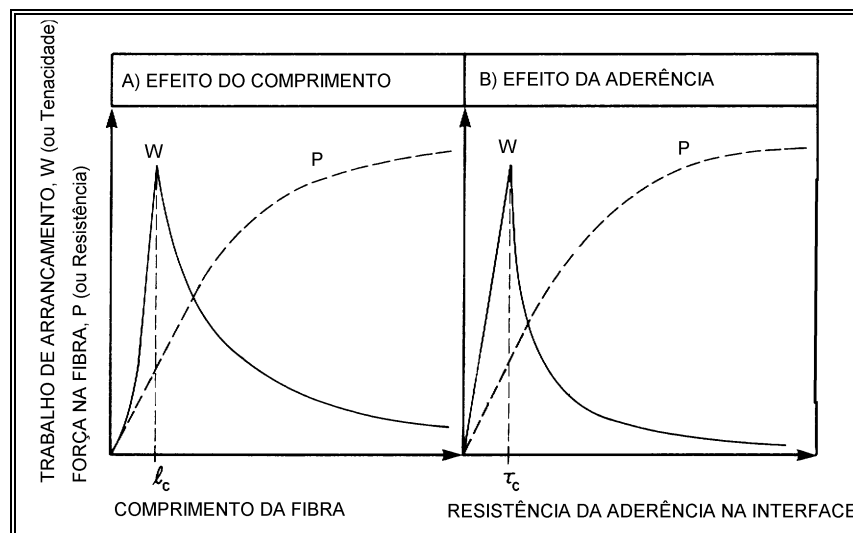


Fig. 4.6 - Contribuição da fibra à resistência e à tenacidade: a) efeito do comprimento; b) efeito da aderência (FONTE: BENTUR & MINDESS - 1990).

Do mesmo modo, pode-se relacionar o efeito da tensão de aderência por atrito ( $\tau_{fu}$ ) entre a fibra e a matriz sobre a resistência e a tenacidade do compósito. A análise do gráfico da fig. 4.6b permite concluir que o aumento da tensão de aderência aumenta a resistência do compósito, mas diminui a tenacidade quando a tensão de aderência por atrito ( $\tau_{fu}$ ) supera a resistência da aderência crítica ( $\tau_c$ ).

Finalmente, pode-se concluir que, no desenvolvimento dos compósitos, a resistência e a tenacidade podem ser otimizados pela modificação do comprimento da fibra e da tensão de aderência fibra-matriz.

#### 4.6 FISSURAÇÃO MÚLTIPLA E TENACIDADE

A contribuição principal das fibras ocorre no estado pós-fissuração, onde podem desempenhar duas funções: aumentar a resistência do compósito, por transferir as tensões ou forças através das fissuras, e aumentar a tenacidade do compósito, por fornecer mecanismos de maior absorção de energia (alongamento e descolamento das fibras).

A curva tensão-deformação dos compósitos de matriz frágil reforçados com fibras sob solitação de tração pode ser prevista por meio do modelo chamado ACK. São três os estágios (fig. 4.7):

- trecho elástico, até o ponto da primeira fissura; neste trecho as fibras não influenciam o comportamento do compósito;
- trecho de fissuração múltipla; a deformação do compósito é maior que a deformação última da matriz;
- pós-fissuração múltipla; as fibras estão sendo alongadas ou arrancadas fora da matriz fissurada.

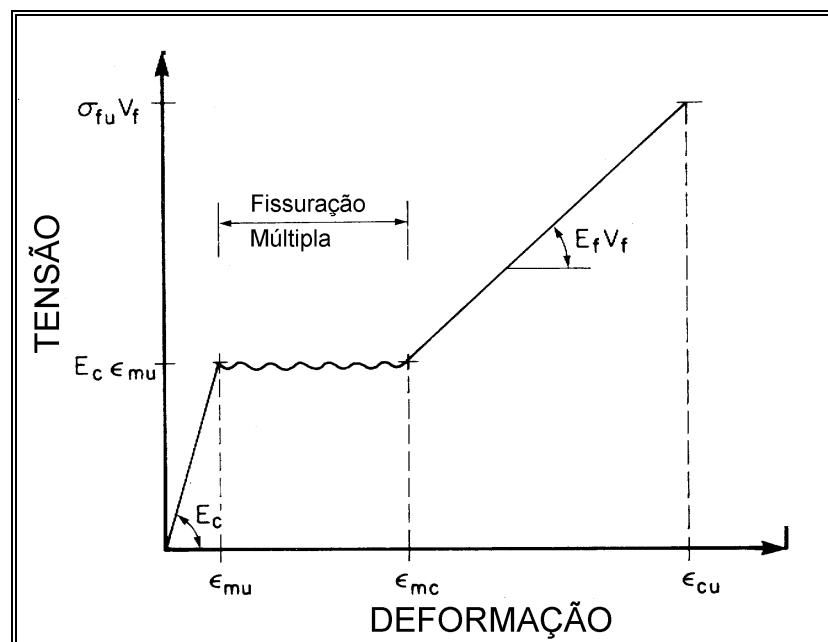


Fig. 4.7 - Curva esquemática tensão de tração-deformação.

(FONTE: BENTUR & MINDESS - 1990).

É chamada *fissuração múltipla* o processo de fissuração sucessiva que ocorre na matriz logo após o aparecimento da primeira fissura, dividindo-a em segmentos similares. A tensão é aproximadamente constante e igual à tensão da primeira fissura. O processo da fissuração múltipla é extremamente importante, porque ele controla o mecanismo da tenacidade do compósito.

Segundo o modelo ACK, a influência das fibras é importante apenas após a ocorrência da primeira fissura, quando começa a atuar a fissuração múltipla na matriz, que é responsável pela transferência de forças da matriz para as fibras, as quais transferem parcialmente as forças para as regiões íntegras da matriz, reiniciando o processo de transferência das forças. Este processo leva ao aumento da resistência do compósito, porém mais importante é o acréscimo de tenacidade proporcionado pela deformação e arrancamento das fibras após a ruptura da ligação ou adesão entre as fibras e a matriz.

Após o estágio da fissuração múltipla, o comportamento é dirigido pelas fibras e o acréscimo de tensão de tração levará à ruptura ou ao arrancamento das fibras.

*“Além da resistência da aderência fibra-matriz, os principais parâmetros que influem no comportamento do compósito são a resistência e o módulo de deformação longitudinal da fibra. Fibras de baixo módulo de elasticidade apresentam a etapa da fissuração múltipla mais extensa. Quando a aderência é boa, aumenta a deformação correspondente à fissuração múltipla e diminuem as deformações na etapa pós-fissuração múltipla. Neste caso, o compósito pode se tornar mais frágil. Isto ressalta a importância do controle da aderência na otimização dos compósitos, em relação a sua resistência e tenacidade, por meio da modificação das propriedades da matriz, da superfície ou da geometria da fibra” (FURLAN - 1995).*

A tenacidade é definida pelo ACI 544.1R (1986) como a energia total absorvida antes da completa separação do corpo-de-prova. Pode ser medida tomando-se a área completa sob a curva tensão de tração ou compressão x deformação ou pela área completa sob a curva força x flecha no ensaio à flexão (fig. 4.8). A tenacidade também pode ser medida por testes de impacto.

Na fig. 4.8 pode-se verificar que em ensaio de flexão, é considerável o acréscimo de tenacidade do concreto reforçado com fibras em relação ao concreto simples. Em relação à resistência, o aumento é pouco significativo.

Os principais parâmetros que influenciam a tenacidade são o tipo, o volume, a razão de aspecto, a natureza da deformação e a orientação das fibras (ACI 544.1R - 1986).

*“Nos compósitos, a flexão necessita um tratamento teórico especial porque há uma grande diferença entre a resistência à flexão, representada pelo módulo de ruptura no ensaio de flexão, e a resistência à tração axial, as quais, conforme a Teoria da Elasticidade, representariam a medida do mesmo valor. Esta diferença é mais significativa no caso do concreto com fibras do que no concreto normal, devido ao comportamento quase-plástico do compósito na tração, decorrente principalmente do arrancamento das fibras após a fissuração do concreto” (FURLAN - 1995).*

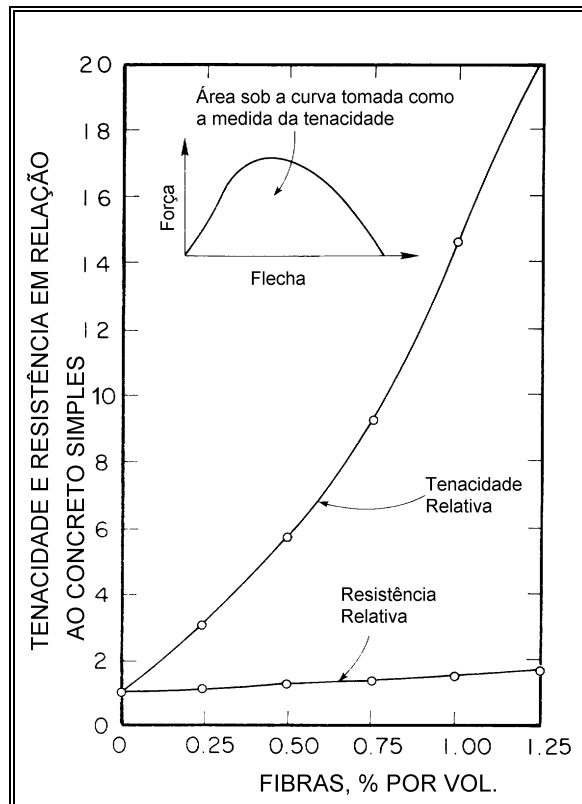


Fig. 4.8 - Efeito do volume de fibras sobre a tenacidade em ensaio de flexão (FONTE: ACI 544.1R - 1986).

## 4.7 COMPORTAMENTO À FLEXÃO

A distribuição de tensões na flexão é muito sensível ao aumento da tenacidade proporcionado pelas fibras. O comportamento à flexão de dois materiais com a mesma resistência à tração, um idealmente elastrofrágil e o outro idealmente elastoplástico, está mostrado na fig. 4.9.

Quando o limite elástico à flexão do material idealmente elástico é atingido, ocorre a ruptura (fig. 4.9b). Já o material elastoplástico tem capacidade de suportar forças adicionais além do limite elástico, como mostra a curva força-flecha da fig. 4.9c. Esta capacidade adicional é explicada pela tenacidade associada ao comportamento pseudo-plástico.

Para um material idealmente elástico, a resistência à flexão ( $\sigma_b$ ) é igual à resistência última à tração. Entretanto, como mostra a fig. 4.9b, para o material ideal elastoplástico,  $\sigma_b$  é maior do que a resistência última à tração. Assim, na flexão de material dúctil e pseudo-plástico, a resistência à flexão  $\sigma_b$  não representa a resistência à tração do material. Nos compósitos,  $\sigma_b$  depende da resistência última à tração e também da tenacidade, sendo esta às vezes mais importante.

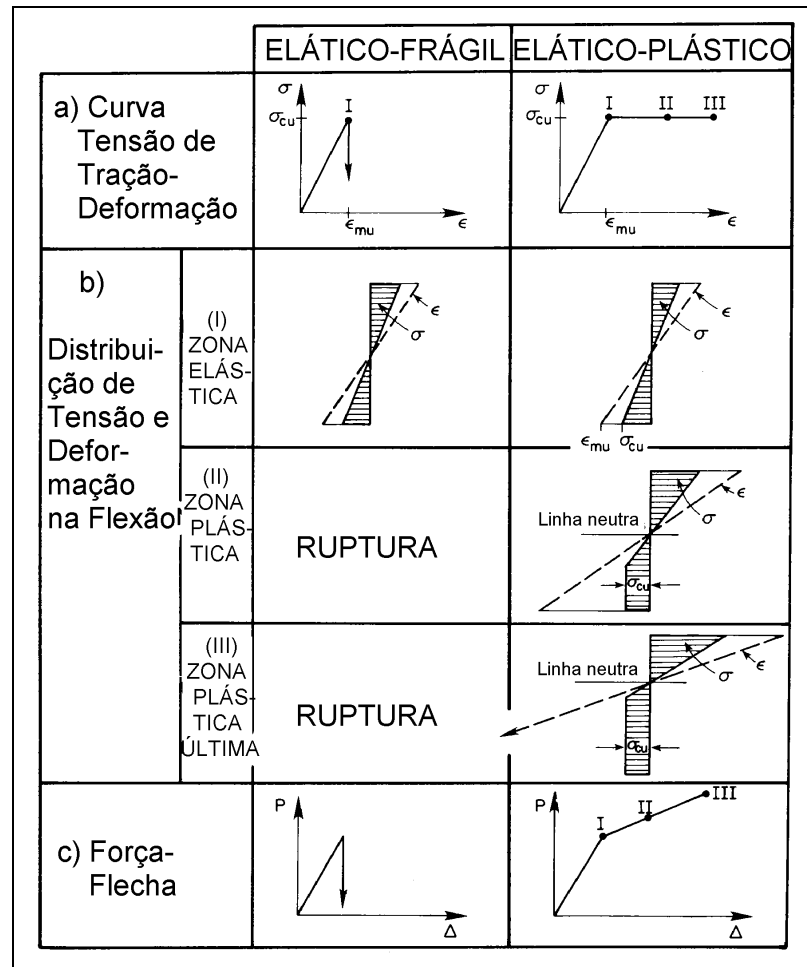


Fig. 4.9 - Comportamento à flexão de materiais idealmente elásticos e idealmente elasto-plásticos e curva carga-flecha (FONTE: BENTUR & MINDESS - 1990).

### 4.8 TRABALHABILIDADE

Algumas propriedades dos compósitos podem ser avaliadas por métodos utilizados no concreto convencional. O ACI 544.2R (1989) descreve os procedimentos ou normas a serem utilizadas em ensaios de compressão, flexão, tenacidade, fadiga na flexão, tração, impacto, retração, deformação lenta, módulo de elasticidade, cavitação e abrasão.

A adição de qualquer tipo de fibra reduz a trabalhabilidade do concreto, na proporção do volume de fibras adicionado. Por exemplo, um concreto com 1,5 % por volume de fibras de aço ou vidro reduz o abatimento de 200 mm do concreto sem fibras para 25 mm, sem no entanto prejudicar consideravelmente o seu lançamento e adensamento (MEHTA & MONTEIRO - 1994).

Normalmente, as fibras tendem a endurecer a mistura fresca. Mas sob vibração, este endurecimento pode desaparecer. Dessa forma, testes de trabalhabilidade estáticos

como o de abatimento (*slump*) podem ser enganosos. Recomenda-se que os ensaios de trabalhabilidade sejam realizados com procedimentos dinâmicos, mas, segundo o ACI 544.2R (1989), uma vez que se tenha estabelecido que um particular compósito apresente manuseio e lançamento satisfatórios para um dado abatimento, o ensaio de abatimento pode ser utilizado como um teste de controle de qualidade para o monitoramento da consistência do compósito.

Um outro ensaio é o que mede o tempo de fluxo através do cone de abatimento invertido (ASTM C 995). O ensaio com o cone invertido foi desenvolvido para medir a trabalhabilidade dos compósitos e principalmente para aplicações locais. O ensaio consiste em inverter o cone de abatimento sobre um balde e preenchê-lo com o concreto sem compactação. Um vibrador de agulha é então imerso verticalmente no concreto no centro do cone, e é determinado o tempo necessário para o concreto sair do cone pela sua base.

O ensaio denominado Vebe, descrito na norma BS 1881 - *Methods of Testing Concrete, Part 2*, determina a trabalhabilidade e a mobilidade do compósito sob vibração, mas tem o tamanho e a massa dos equipamentos como desvantagens em relação ao ensaio com o cone invertido.

## 4.9 DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE E DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

São dois os métodos de ensaio mais conhecidos e utilizados mundialmente para a determinação da tenacidade e da resistência à tração na flexão: o ASTM C 1018 (1994), proposto pela *American Society for Testing and Materials*, e o JSCE - SF 4 (1984), proposto pela *Japan Society of Civil Engineers*. Ambos os métodos são semelhantes, apenas diferindo nos critérios para a medida da tenacidade.

BANTHIA & TROTTIER (1995) propuseram um novo critério para a medida da tenacidade, objetivando eliminar possíveis erros de julgamento humano do aparecimento da primeira fissura no compósito. Esta nova proposição, juntamente com os critérios da ASTM e JSCE, são apresentados resumidamente a seguir. Deficiências, dificuldades, instabilidade pós-pico e outros problemas da metodologia proposta pelas duas normas não estão descritos, mas podem ser encontrados em BANTHIA & TROTTIER (1995) e FIGUEIREDO (1997).

### 4.9.1 ASTM C 1018

O ensaio deve ser executado de acordo com a metodologia prescrita na norma ASTM C 78 (1984). A máquina de ensaio deve ser capaz de produzir um deslocamento controlado e constante do corpo-de-prova.

A largura da viga prismática deve ser de ao menos três vezes o comprimento da fibra. Para fibras de comprimento 50 a 75 mm, pode ser utilizada a viga com largura de 15 cm. São duas as dimensões mais comuns utilizadas para as vigas prismáticas: 10 x 10 x 35 cm e 15 x 15 x 50 cm.

A tenacidade é medida pelos chamados **índices de tenacidade**, definidos como a área sob a curva até uma flecha especificada, relativa à área até a flecha correspondente à primeira fissura, ou seja, a energia total consumida relativa à energia elástica. Devido à incerteza do ponto correspondente à primeira fissura, três valores de área são medidos, correspondentes às flechas de 3, 5,5 e 15,5 vezes a flecha da primeira fissura, definindo assim três índices de tenacidade:  $I_5$ ,  $I_{10}$  e  $I_{30}$  (fig. 4.10).

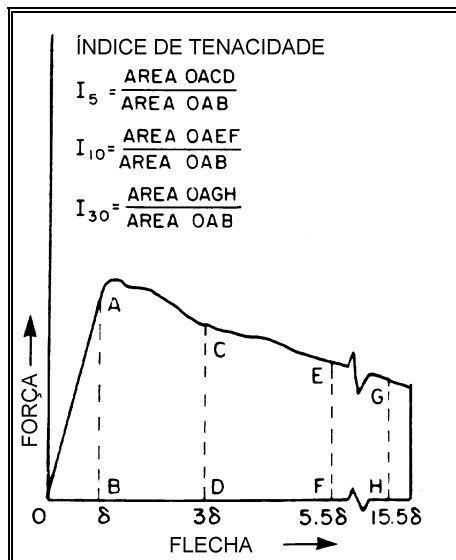


Fig. 4.10 - Curva esquemática força-flecha para definição de índices de tenacidade segundo a ASTM C 1018 (FONTE: BENTUR & MINDESS - 1990).

Os índices  $I_5$ ,  $I_{10}$  e  $I_{30}$  são comparados com o índice de um material de referência elastoplástico perfeito, que com as mesmas flechas resultariam índices de tenacidade de 5, 10 e 30. Para um material com curva ascendente na etapa pós-fissuração, os índices são maiores. O índice de tenacidade é um parâmetro extremamente dependente apenas das características das fibras.

Os índices apresentam o aspecto positivo de avaliar o comportamento conjunto da fibra com a matriz, e o aspecto negativo de dependerem excessivamente da flecha correspondente à primeira fissura do corpo-de-prova. Os índices não dependem da resistência da matriz à tração.

Obtidos os índices de tenacidade, podem ser determinados os fatores residuais de resistência ( $R$ ), expressos como:



$$R_{a,b} = \frac{100}{b-a} (I_b - I_a) \quad (4.1)$$

onde:

$R_{a,b}$  = relação de tenacidade entre os índices  $a$  e  $b$ ;

$I_a$ ,  $I_b$  = índices de tenacidade.

Para um material elastoplástico perfeito, os valores de  $R$  serão sempre iguais a 100.

#### 4.9.2 JSCE SF - 4

Os corpos-de-prova e a metodologia de ensaio são semelhantes aos da ASTM C 1018. A tenacidade é medida por meio da tenacidade à flexão ( $T_b$ ), que é a área total da curva até a flecha de  $L/150$ . O fator de tenacidade, também chamado resistência equivalente, é:

$$f_{ct,eq} = \frac{T_b L}{\delta_{tb} b h^2} \quad (4.2)$$

onde:

$f_{ct,eq}$  = fator de tenacidade na flexão ( $\text{N/mm}^2$ );

$T_b$  = tenacidade na flexão ( $\text{N.mm}$  ou  $\text{J}$ );

$\delta_{tb}$  = flecha equivalente a  $L/150$  ( $\text{mm}$ );

$b$ ,  $h$  = largura e altura da viga prismática ( $\text{mm}$ );

$L$  = vão da viga prismática durante o ensaio ( $\text{mm}$ ).

A resistência máxima à tração na flexão ou na primeira fissura é calculada pela expressão:

$$\sigma_b = \frac{P L}{b h^2} \quad (4.3)$$

onde:

$\sigma_b$  = resistência à flexão ( $\text{N/mm}^2$ );

$P$  = força máxima ou na primeira fissura ( $\text{N}$ );

$L$  = vão da viga durante o ensaio ( $\text{mm}$ );

$b$ ,  $h$  = largura e altura da viga prismática ( $\text{mm}$ ).

#### 4.9.3 Proposição de BANTHIA & TROTTIER

O critério de avaliação da tenacidade do compósito, proposto em BANTHIA & TROTTIER (1995), supõe a obtenção da curva força x flecha, como descrito nas normas ASTM e JSCE.

A curva força x flecha (fig. 4.11) deve ser subdividida em duas regiões: a região pré-pico (área da curva até a força máxima alcançada) e região pós-pico (área da força máxima até uma flecha correspondente a uma fração ( $m$ ) do vão  $L$ ). A região pré-pico corresponde à energia pré-pico ( $E_{pre}$ ).

Obtidas as áreas (energias) pré e pós-pico, determinam-se as resistências pós-fissura (*post-crack strengths* -  $PCS_m$ ) nas várias flechas. Os valores de  $PCS_m$  para uma determinada flecha  $L/m$  é definida como:

$$PCS_m = \frac{(E_{pos,m}) L}{\left(\frac{L}{m} - d_{pico}\right) b h^2} \quad (4.4)$$

onde:

$PCS_m$  = resistência pós fissuração correspondente à fração  $m$  do vão  $L$  (N/mm<sup>2</sup>);

$E_{pos,m}$  = energia pós-pico (N.mm ou J);

$L$  = vão da viga durante o ensaio (mm);

$m$  = fração do vão  $L$ ;

$\delta_{pico}$  = flecha correspondente à força máxima (mm);

$b$ ,  $h$  = largura e altura da viga prismática (mm).

A flecha a ser considerada é indicada estar entre  $L/3.000$  e  $L/150$ . Os valores indicados para  $m$  são: 3.000, 1.500, 1.000, 750, 600, 400, 300, 200 e 150. A vantagem deste critério sobre os índices da ASTM é que a energia  $E_{pos,m}$  é obtida subtraindo  $E_{pre}$  da energia total  $E_{total,m}$ , ao invés da divisão pela energia até a primeira fissura. Isto elimina erros de julgamento humano da primeira fissura e o valor  $m$  pode ser escolhido em função da aplicação e pode coincidir com o valor de 150 da JSCE.

No Capítulo 5, mostra-se a aplicação dos três critérios descritos anteriormente, onde dois diferentes concretos, com dois teores de fibras de aço, são comparados e analisados.

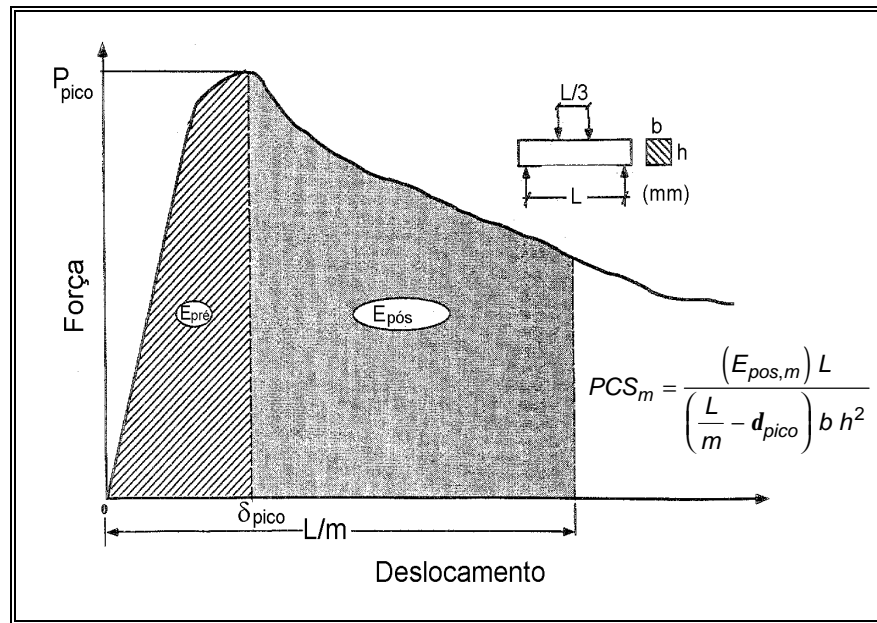


Fig. 4.11 - Critério proposto por BANTHIA & TROTTIER (1995).

#### 4.10 FIBRAS DE AÇO

As fibras de aço de seção circular são produzidas com o corte de fios, sendo de 0,45 a 1,0 mm os diâmetros típicos. Em geral, os comprimentos das fibras variam de 12,7 mm a 63,5 mm (ACI 544.3R - 1993). Fibras lisas são produzidas com seção típica variando de 0,15 a 0,41 mm na espessura por 0,25 a 0,90 mm na largura (ACI 544.1R - 1986). Alguns tipos têm sido produzidos com ondulações ou deformações em todo o comprimento, ou dobrados apenas nas extremidades. A resistência à tração das fibras de aço varia de 345 a 2100 MPa e a deformação última de 0,5 a 35 %. O volume usual de fibras de aço varia de 0,25 % (20 kg/m<sup>3</sup>) a 2 % (157 kg/m<sup>3</sup>), embora o limite superior seja usualmente de 95 a 118 kg/m<sup>3</sup> (ACI 544.3R - 1993).

As fibras de aço melhoram acentuadamente muitas das propriedades de argamassas e concretos, principalmente a resistência ao impacto e a tenacidade. Em aplicações estruturais, as fibras de aço podem ser utilizadas para substituir as armaduras secundárias e suplementar a armadura principal. Podem também ser utilizadas para inibir a fissuração e melhorar a resistência à deterioração do material, como resultado de fadiga, impacto, retração, variações de temperatura ou umidade e explosão (ACI 544.4R - 1988).

As propriedades mecânicas do concreto com fibras de aço são influenciadas pelo tipo de fibra, razão de aspecto, conteúdo de fibras, resistência da matriz, tamanho, forma e método de preparação do corpo-de-prova e dimensão dos agregados. Por esta razão, as misturas propostas para uso em projeto devem ser testadas, preferencialmente em

corpos-de-prova que representem o uso final, para verificar os valores das propriedades assumidos no projeto (ACI 544.4R - 1988).

O compósito com fibra de aço é usualmente especificado pela resistência e conteúdo de fibra. Em certas aplicações onde a absorção de energia ou resistência à ruptura após a fissuração são importantes (estruturas sujeitas a impactos, explosões, cavitação, choques térmicos e outras ações dinâmicas), a tenacidade ou índice de tenacidade podem ser especificados para ajudar a definir o desempenho necessário do compósito. A resistência à flexão é normalmente especificada para aplicações em pavimentação e a resistência à compressão é normalmente especificada para outras aplicações estruturais. A resistência à compressão é útil para a correta proporção dos componentes, porém não serve para caracterizar a intensificação das propriedades mecânicas dos compósitos. Resistências à tração na flexão de 4,8 a 6,9 MPa e à compressão de 34,5 a 48,3 MPa aos 28 dias são valores típicos. O código ASTM C 1116 fornece os detalhes para a especificação e a fabricação de compósitos com fibras de aço (ACI 544.3R - 1993).

#### 4.10.1 Tecnologia de Produção

Três diferentes métodos de fabricação são comumente usados para produzir os compósitos com fibras de aço: mistura convencional, concreto projetado e "SIFCON". Em FIGUEIREDO (1997), encontra-se amplo estudo do concreto projetado.

O guia ACI 544.3R (1993) descreve com detalhes a mistura, o lançamento e o adensamento do concreto com fibras de aço. O processo de produção deve garantir uma dispersão uniforme das fibras e trabalhabilidade suficiente no estado fresco. Embora uma maior razão de aspecto melhore as propriedades do concreto endurecido, esta dificulta a trabalhabilidade no estado fresco. Em resumo, pode-se afirmar que o aumento no comprimento e no volume das fibras dificulta a trabalhabilidade e a dispersão uniforme. Mesmo para fibras de comprimentos pequenos (12-50 mm), apenas 1 a 2 % de fibras podem ser utilizadas com processos convencionais de mistura. Conteúdos de fibras acima de 2 % geralmente resultam em pobre trabalhabilidade e dispersão das fibras.

Segundo o ACI 544.3R (1993), em muitos projetos, as fibras de aço têm sido incorporadas aos concretos convencionais sem qualquer alteração. Onde um muito grande número de fibras por volume é usado, é necessário melhorar a trabalhabilidade por meio de uma maior quantidade de pasta, ou o uso de pozolanas (cinza volante, escória, sílica ativa) em adição ou substituição parcial do cimento.

O maior uso de compósitos convencionalmente misturados é em pavimentos de aeroportos, pisos industriais e estruturas hidráulicas.

#### 4.10.2 Resistência à Compressão

As fibras têm pequeno efeito sobre a resistência do concreto à compressão, aumentando ou diminuindo levemente o resultado do teste. Entretanto, as fibras aumentam bastante a tenacidade no estado pós-fissuração (fig. 4.12). Com maiores conteúdos de fibras usando a tecnologia de fabricação do "SIFCON", aumentos consideráveis na resistência à compressão última foram obtidos (acima de 500 %).

Para a execução do ensaio à compressão, podem ser utilizadas as normas comuns do concreto convencional. Os cilindros (15 x 30 cm) devem ser moldados com vibração externa a fim de não influenciar a distribuição das fibras.

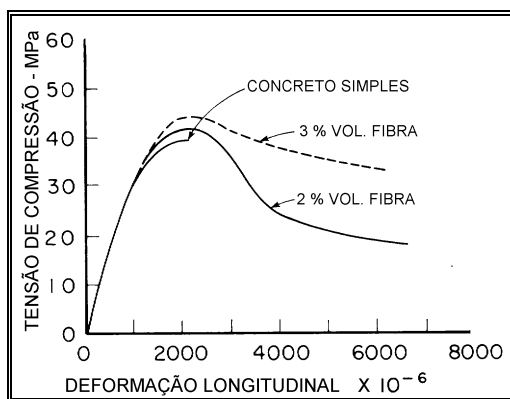


Fig. 4.12 - Curvas tensão de compressão-deformação de concretos com fibras de aço (FONTE: BENTUR & MINDESS -1990).

### 4.10.3 Resistência à Tração

Compósitos com fibras alinhadas na direção das tensões de tração podem exibir grandes aumentos na resistência à tração direta. Com fibras dispersas aleatoriamente, o aumento varia de valores muito pequenos a até 60 %, sendo os valores intermediários mais prováveis. Ensaio à tração direta de concretos com fibras de aço realizados por ZHAN et al. (1992) apresentaram maior resistência à tração (~ 18 %) em relação ao concreto sem fibras. Como na compressão, as fibras de aço aumentam consideravelmente a absorção de energia (tenacidade), (BENTUR & MINDESS - 1990).

Segundo o ACI 544.4R (1988) não existe qualquer ensaio à tração direta padronizado para determinar a curva tensão de tração-deformação. A curva depende das dimensões do corpo-de-prova, método de ensaio e rigidez da máquina, e os resultados apresentam grande variação.

### 4.10.4 Resistência à Flexão

A influência das fibras de aço sobre a resistência à flexão de concretos e argamassas é muito maior do que sobre a tração e a compressão direta. O aumento da resistência à flexão chega até a 100 % e é influenciado pelo volume de fibras e razão de aspecto, sendo que maiores razões de aspecto resultam em aumentos maiores da resistência à flexão.

A tenacidade na flexão também aumenta consideravelmente, conforme se aumenta o volume de fibras e a razão de aspecto. Fibras com melhores características de aderência e ancoragem também aumentam a tenacidade e a resistência à flexão.

A resistência última à flexão (módulo de ruptura) geralmente aumenta com o maior volume e razão de aspecto das fibras. Concentrações menores do que 0,5 % e baixa razão de aspecto (menores que 50) têm efeitos desprezíveis sobre as propriedades da resistência estática. A resistência última à flexão aos 28 dias, para concretos contendo de 0,5 a 1,5 % por volume de fibra com agregados de 8 a 19 mm, varia tipicamente de 5,5 a 7,5 MPa, dependendo da relação  $v_f/d$ , tipo de fibra e relação água/cimento (ACI 544.4R - 1988).

#### 4.10.5 Fadiga

Conforme o ACI 544.2R (1989) a *“capacidade de suportar ações dinâmicas e cíclicas à flexão é uma importante propriedade dos compósitos com fibras, particularmente em aplicações envolvendo ações repetidas, tais como pavimentos e lajes de pisos industriais.”* RAMAKRISHNAN & LOKVIK (1992) afirmam: *“em muitas aplicações, particularmente em pavimentos, piso de pontes, revestimentos de túneis e estruturas marítimas (offshore), a resistência à fadiga na flexão e a resistência limite (endurance limit) são importantes parâmetros de projeto, porque essas estruturas são projetadas com base na resistência à fadiga. O conhecimento da relação entre o número de ciclos para ruptura e tensões aplicadas é essencial.”*

Como descrito em BATSON et al. (1972), o mecanismo de ruptura por fadiga de materiais frágeis como o concreto é um processo complexo, o qual envolve três estágios:

- 1º - Iniciação das microfissuras;
- 2º - Lento crescimento das microfissuras a um tamanho crítico;
- 3º - Rápida propagação das fissuras de tamanho crítico.

Num grande volume de concreto, os três estágios estariam ativos em qualquer instante de tempo, mas para um pequeno volume os estágios devem ser seqüenciais. A iniciação de microfissuras é uma característica inerente do concreto devido à presença de vazios de ar e regiões fracas ou sem aderência entre os agregados e a pasta. Haverá

alguma microfissura com forma, dimensão e orientação que crescerá de maneira lenta e estável a um tamanho crítico, e então aumentará rapidamente. Quando um suficiente número de fissuras se unem para formar uma fissura contínua, a ruptura da viga ocorre rapidamente.

Pouco pode ser feito de maneira prática para controlar os estágios um e três do mecanismo de ruptura. Há a possibilidade de retardar ou inibir o crescimento das microfissuras do estágio dois, aplicando fibras de aço randomicamente dispersas e intimamente espaçadas.

NAAMAN et al. (1993) executaram um extenso programa de pesquisa sobre concreto com fibras de aço (Dramix 30/50 e 50/50), no teor de 2 % por volume. Estudaram dois compósitos à fadiga na flexão, o primeiro com a fibra 30/50 e o segundo com a fibra 30/50 combinada com a fibra 50/50. Os ensaios de fadiga na flexão foram realizados após as vigas prismáticas estarem fissuradas. Concluíram que as vigas mostraram uma resistência média à fadiga da ordem de 10 ciclos para o carregamento variando entre 10 e 90 % da sua resistência estática última, 8.000 ciclos para o carregamento variando entre 10 e 80 %, e mais do que 2.700.000 ciclos para o carregamento variando entre 10 e 70 %. Os dois compósitos apresentaram comportamento similar sob o carregamento de fadiga.

RAMAKRISHNAN, OBERLING & TATNALL (1987) realizaram uma pesquisa de fadiga à flexão em compósitos com as fibras ZP 50/.50 e ZP 60/.80, nas quantidades de 40 e 60 kg/m<sup>3</sup>. O concreto de controle apresentou resistência à compressão aos 28 dias de 38 MPa e módulo de ruptura de 5 MPa. Os ensaios de fadiga foram feitos em vigas prismáticas 10 x 10 x 35 cm, com frequência de 20 Hz. Para o concreto de controle, a resistência limite (*endurance limit*) para 2.000.000 de ciclos foi de 50 a 55 % do módulo de ruptura. Os concretos com fibras alcançaram o valor de 90 % do seu módulo de ruptura. Comparados ao concreto de controle, os compósitos com fibras tiveram aumentos de 200 a 250 % da resistência à fadiga na flexão.

Resultados de fadiga em vigas de concreto armado reforçadas com fibras de aço podem ser encontrados em KORMELING, REINHARDT & SHAH (1980).

A capacidade de resistir à iniciação de fissuras, reduzir o número e o tamanho de fontes de fissuras antes e no processo de fadiga, e a capacidade de resistir à propagação e à extensão das fissuras no processo de fadiga produzirá um profundo efeito sobre a resistência à fadiga. A chave para aumentar a resistência à fadiga de concretos de alta resistência é o aumento da habilidade de deter ou reprimir a propagação das fissuras (*crack-arresting ability*). Isso pode ser obtido segundo duas vias: redução do tamanho e quantidade de fontes originais de fissuras e capacidade de inibir iniciação e extensão de fissuras (WEI, JIANMING & YUN - 1996).



### 4.10.6 Impacto

A propriedade mais importante e necessária para um material sujeito a ações dinâmicas é a sua capacidade de absorção de energia ou tenacidade e esta é uma das mais importantes características que as fibras incorporam ao concreto. A adição de fibras de aço ao concreto aumenta substancialmente a resistência do concreto ao impacto. Para o compósito com fibras de aço, o número de golpes para levar à ruptura é tipicamente de várias centenas, comparado aos 30 a 50 para o concreto simples. A energia de fratura para vigas com fibras de aço sob impacto é de 40 a 100 vezes maior do que para vigas de concreto simples.

A maior energia necessária para o arrancamento das fibras da matriz proporciona a resistência ao impacto e a resistência ao lascamento e fragmentação sob ação rápida (ACI 544.4R - 1988).

Em ampla pesquisa realizada sobre dormente de concreto sob ação de impacto, WANG (1996) estudou um modelo de dormente de concreto com: a) 1 % por volume de fibras de aço com comprimentos de 30 e 50 mm e diâmetro de 0,5 mm; b) sete estribos  $\phi$  5 mm cada 8 cm apenas nas regiões do dormente sob cada trilho; c) redução da resistência à compressão de 65 para 40 MPa e d) redução da força de protensão de 400 para 227 kN. As conclusões foram: *a) a adição de fibras de aço ao concreto melhorou enormemente o comportamento do dormente, resultando em fissuras mais curtas e mais finas; b) sob pulsos repetidos de curta duração, as fissuras verticais no dormente podem ser acompanhadas por fissuras horizontais; estribos podem, particularmente quando usados com fibras, efetivamente retardar a deterioração do dormente de concreto; c) análises teóricas e experimentais mostram que o fator de impacto é proporcional à raiz quadrada da altura de queda do martelo e da rigidez de uma viga à flexão. Reduzindo a resistência do concreto à compressão ou o nível de protensão do dormente, pode resultar em uma redução da rigidez à flexão dinâmica (dynamic flexural stiffness) e assim a magnitude das forças de impacto. Acredita-se que se essas medidas forem combinadas com o uso de fibras de aço no concreto, um novo tipo de dormente de concreto pode ser obtido, com melhorada ductilidade e alta resistência à ação de impacto.*

Na mesma pesquisa, o dormente com resistência à compressão de 40 MPa e fibras de aço curtas (30 mm) comportou-se de modo excelente, muito melhor que o mesmo dormente com resistência à compressão de 65 MPa; o dormente com menor nível de protensão combinado com fibras curtas comportou-se muito melhor que o dormente original (sem fibras) e similar ao dormente com o nível de protensão normal e acrescido de fibras.

#### 4.10.7 Outras Características Resistentes

Segundo o ACI 544.4R (1988) as fibras de aço melhoram substancialmente a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto. Podem ser usadas para substituir ou suplementar os estribos verticais. WILLIAMSON apud ACI 544.4R (1988)<sup>1</sup> concluiu que, com base no uso de fibras de aço com as extremidades deformadas, as fibras podem aumentar a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto o suficiente para prevenir a ruptura catastrófica por tração diagonal e forçar a ruptura por flexão.

Aumentos da resistência à torção variaram de 27 a 100 %, devidos aos diferentes procedimentos de testes.

O efeito das fibras sobre a retração e a deformação lenta é pequeno, entretanto, fibras deformadas podem reduzir a retração livre por até 40 %.

Embora a diferença seja pequena, o concreto com fibras de aço é mais resistente à abrasão do que o concreto comum. Quanto à cavitação, o concreto com fibras apresenta melhor resistência que o concreto comum, se o fluxo é veloz e introduz cavitação ou impactos.

As fibras aumentam o momento último e a deformação última das vigas. Reduzem também as tensões de tração nas barras de armadura, por reduzir a largura das fissuras.

Sob carregamentos cíclicos reversos, as fibras melhoraram muito as características de ancoragem por aderência entre as barras contínuas e a matriz.

#### 4.10.8 Durabilidade

A corrosão das fibras de aço próximas à superfície não tem apresentado problemas, ao contrário do que se poderia esperar. Foi observado que quando algumas fibras próximas à superfície são corroídas, não há qualquer efeito sobre a integridade estrutural do concreto e não há o lascamento da superfície.

Em testes com ambientes marítimos, não houve corrosão das fibras em componentes de concreto não fissurados. Em componentes fissurados, houve a tendência à corrosão somente das fibras próximas à superfície.

MANGAT, MOLLOY & GURUSAMY (1989) realizaram uma pesquisa experimental para investigar a durabilidade, em ambiente marítimo, de um compósito com fibra de aço, 428 kg/m<sup>3</sup> de cimento e uma relação água/cimento relativamente alta, 0,58. Os resultados mostraram que a resistência das fibras à corrosão induzida é igualmente satisfatória em

---

<sup>1</sup> WILLIAMSON, G. R. (1978). *Steel Fibers as Web Reinforcement in Reinforced Concrete*. Proceedings, U.S. Army Science Conference, West Point, v.3, p.363-377 apud American Concrete Institute Committee 544 (1988). *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4R)*, Detroit, 18p.

misturas com relativamente baixo consumo de cimento e alta relação água/cimento, como é em misturas ricas ( $590 \text{ kg/m}^3$ ) em cimento e baixa relação a/c (0,4).

#### 4.10.9 Vigas de Concreto Protendido

São poucas as pesquisas sobre vigas de concreto protendido reforçadas com fibras de aço, porém os limitados resultados permitem concluir que as fibras podem ser usadas para melhorar o desempenho de vigas protendidas (BALAGURU & SHAH -1992).

BALAGURU & EZELDIN (1987) realizaram uma pesquisa sobre viga de seção T protendida, com a resistência do concreto à compressão de 60 MPa. Utilizaram a fibra de aço com gancho na extremidade, com 30 mm de comprimento e 0,5 mm de diâmetro, nas taxas de 29,5, 59, 88,5, 118 e  $147,5 \text{ kg/m}^3$ . Segundo suas conclusões, a adição de fibras de aço resultou em: aumento do momento de fissuração, aumento da rigidez, decréscimo do deslocamento vertical, redução da abertura e espaçamento das fissuras, redução da tensão na armadura e melhora significativa da ductilidade.

FURLAN (1995) executou uma pesquisa experimental para analisar o desempenho dos elementos de concreto protendido de seção delgada com fibras, com pouca ou nenhuma armadura transversal, e a melhoria do comportamento resistente ao cisalhamento decorrente da adição de fibras curtas ao concreto e da aplicação da protensão. Algumas conclusões foram: a) as fibras aumentam a resistência ao cisalhamento; b) a protensão propicia o aumento da etapa elástico-linear, retardando o aparecimento das fissuras de flexão e de cisalhamento; c) a protensão também provoca o abatimento das bielas e aumenta a extensão da zona não fissurada; d) as tensões nos estribos são menores do que prevê a analogia clássica de treliça. A inclinação preferencial das bielas próximo da ruptura situou-se entre 25 e 35 graus.

#### 4.10.10 Aplicações

O ACI 544.3R (1993) diz que *“geralmente, quando usado em aplicações estruturais, o concreto reforçado com fibras de aço deve somente ser usado em uma função suplementar para inibir a fissuração, melhorar a resistência ao impacto ou carregamento dinâmico e para resistir à desintegração do material. Em elementos estruturais onde tensões de tração axial ou de flexão irão ocorrer, tal como em vigas, colunas, lajes suspensas, a armadura de aço deve ser capaz de resistir às tensões de tração ... Em aplicações onde a presença de armaduras contínuas não é essencial para a segurança e a integridade da estrutura, a melhora da resistência à flexão pode ser usada para reduzir a espessura das seções, melhorar o desempenho ou ambas”*.

As fibras de aço vêm sendo aplicadas em usos estruturais e não-estruturais, como por exemplo: estruturas hidráulicas (barragens, vertedouros e para resistir à cavitação), pavimentos de aeroportos e rodovias, pisos industriais, fundações de máquinas, concreto refratário, pisos de pontes, revestimentos de túneis e minas, revestimentos lançados para estabilização de taludes em rodovias e ferrovias, cascas finas, estruturas resistentes à explosão, reservatórios de líquidos e elementos pré-fabricados (ACI 544.3R - 1993). O ACI 544.1R (1986) fornece em detalhes diversas aplicações de compósitos com fibras de aço.

Há inúmeros exemplos de pavimentos de aeroportos e rodovias e pisos industriais onde o concreto reforçado com fibras de aço foi usado por apresentar a melhor solução técnica e também econômica. A melhor resistência à flexão dos compósitos proporcionam um acréscimo de vida ao pavimento e redução da sua espessura, chegando, em alguns casos, de 30 a 50 % (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION - 1991).

A aplicação de compósitos aos pavimentos aumenta o espaçamento das juntas e diminui a abertura das fissuras, o que reduz a penetração de água e conseqüentemente os custos de manutenção. Grande resistência ao impacto é também uma outra razão para o uso desses compósitos nos pavimentos. *“A inerente tenacidade juntamente com a maior resistência à flexão leva a um melhor desempenho do pavimento sob carregamentos rapidamente aplicados, condições características de pavimentos de aeroportos e rodovias”* (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION - 1991).