

### **3. Concreto com fibras**

#### **3.1. Considerações gerais**

O concreto tem uma série de características que lhe garantem o posto de material de construção mais utilizado no mundo, dentre essas: boa relação entre custo e alta durabilidade, boa resistência à compressão e ao fogo, possibilita pré-fabricação, versatilidade arquitetônica e bom controle acústico, entre outros. Apesar disso, o concreto tem uma série de limitações, como o comportamento marcadamente frágil e baixa capacidade de deformação do material antes da ruptura. Como consequência de sua fragilidade a sua resistência à tração é muito reduzida quando comparada à sua resistência à compressão. A combinação com armadura de aço provê aos elementos estruturais de concreto resistência à tração e ductilidade necessárias. Essa combinação pode também levar ao aumento da resistência e da ductilidade à compressão.

O aumento da resistência e da ductilidade do concreto submetido à tração direta, à tração na flexão e também à compressão pode ser obtido com a adição de fibras, que pode trazer outros benefícios ao concreto, como diminuição da retração, melhoria no comportamento pós-fissuração, à erosão e à fadiga, maior resistência ao impacto, dentre outros.

Os concretos com fibras podem ser definidos como compósitos: materiais constituídos de, pelo menos, duas fases distintas principais. O próprio concreto endurecido, sem fibras, já é um compósito cujas fases principais são a pasta, os poros e os agregados. No entanto consideram-se como fases principais do concreto com fibras o próprio concreto, denominado matriz e as fibras, que podem ser produzidas a partir de diferentes materiais como aço, vidro, polipropileno, náilon, carbono, entre outros.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) pode-se associar a reduzida capacidade de resistência à tração do concreto à sua grande dificuldade de interromper a propagação de fissuras, quando é submetido a este tipo de solicitação. Isso ocorre pelo fato de a direção de propagação das fissuras ser transversal à direção principal de tensão. Assim que se inicia cada nova fissura a

área disponível para resistir o carregamento atuante é reduzida, causando um aumento das tensões presentes nas extremidades das fissuras. Esse comprometimento da resistência é muito maior quando a sollicitação é de tração, do que quando o material é comprimido. Logo, a ruptura na tração é causada por algumas fissuras que se unem e não por numerosas fissuras como ocorre quando o concreto é comprimido.

Por apresentar uma superfície total de ruptura menor, o gasto energético associado à ruptura por tração no concreto também é reduzido. Logo, o trabalho de ponte de transferência de tensão que as fibras podem realizar através das fissuras no concreto é um mecanismo muito interessante de aumento da energia associada à ruptura do material e à restrição à propagação de fissuras.

No caso do concreto sem fibras uma fissura representa uma barreira à propagação de tensões, representadas simplificadaamente pelas linhas de tensão nas extremidades da fissura (Figura 3.1). No caso dessa tensão superar a resistência da matriz, ocorrerá a ruptura abrupta do material. Caso a sollicitação seja cíclica pode-se interpretar a ruptura por fadiga da mesma forma, para cada ciclo há uma pequena propagação das microfissuras, e um aumento progressivo na concentração de tensões em sua extremidade até que ocorra a ruptura completa do material. A partir do momento em que a fissura atinge um comprimento crítico no concreto, ocorre a ruptura abrupta do material, caracterizando um comportamento tipicamente frágil, onde não se pode contar com nenhuma capacidade resistente do concreto fissurado.

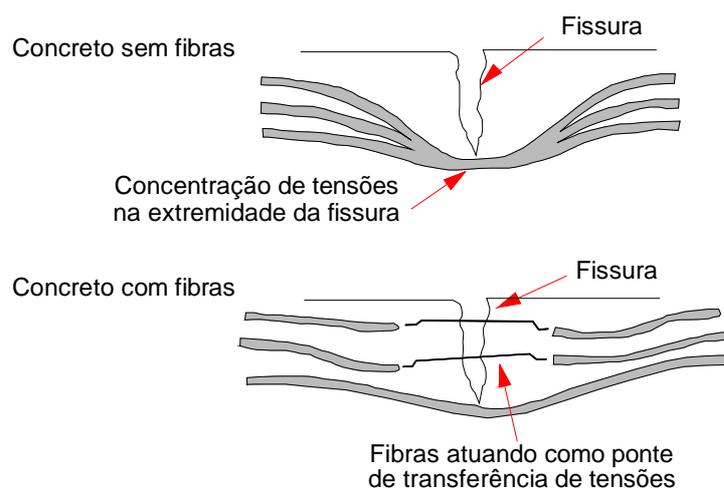


Figura 3.1 – Mecanismo de transferência de tensões entre a matriz e as fibras.

Quando se adicionam ao concreto fibras de resistência e módulo de elasticidade adequados, em um teor apropriado, esse material deixa de ter o

caráter marcadamente frágil. Isso ocorre pelo fato da fibra servir como ponte de transferência de tensões (Figura 3.1). Com isso tem-se uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no material que passa a ter um comportamento pseudodúctil ou não frágil, apresentando certa capacidade resistente após a fissuração. Com a utilização de fibras será assegurada uma menor fissuração do concreto. Esse fato pode vir a recomendar sua utilização mesmo para concretos convencionalmente armados, como uma armadura complementar para reduzir a fissuração do material.

As fibras no concreto podem atuar nas microfissuras durante o endurecimento da pasta de cimento, controlando o surgimento das microfissuras, e também atuar na pasta endurecida, funcionando como obstáculo ao desenvolvimento da abertura e do comprimento das fissuras.

Muitos fatores interferem nas propriedades do concreto com fibras. Os mais importantes são as características da matriz do concreto, as propriedades físicas e geométricas, os teores das fibras utilizadas, e a interação entre as fibras e a matriz. Os procedimentos de lançamento e adensamento também são aspectos relevantes, pois afetam a distribuição e a direção das fibras na matriz.

Grandes avanços nas pesquisas e aplicações dos concretos com fibras ocorreram nas últimas décadas. A utilização desse material é cada vez maior em todo o mundo e hoje existem vários tipos de fibras disponíveis no mercado: de aço (retas, onduladas, torcidas, deformadas nas extremidades com ganchos), poliméricas (de polipropileno, poliéster, náilon, aramida, etc.), de vidro, etc.

### **3.2. Aplicações**

Segundo Accetti e Pinheiro (2000) o uso de fibras em concreto surgiu em 1911, quando Grahan sugeriu o uso de fibras de aço em conjunto com a armadura convencional, com o objetivo de aumentar a resistência do concreto armado. Porém, somente na década de 60 começou o desenvolvimento de caráter técnico e científico e surgiram muitas aplicações práticas do concreto com fibras, e uma certa variedade de fibras apareceram no mercado.

Mehta e Monteiro (2008) relatam que o primeiro concreto com fibras utilizado com fim estrutural foi feito em 1971, para a produção de painéis desmontáveis de 3250 mm<sup>2</sup> e 65 mm de espessura. Esse concreto continha 3% em massa de fibras de aço estiradas a frio, com 0,25 mm de diâmetro e 25 mm

de comprimento. Os painéis foram utilizados na garagem do estacionamento do aeroporto de Heathrow, em Londres.

Desde então, concretos com fibras de aço têm tido aplicações diversas: pisos industriais, pavimentos, revestimento de túneis, blocos de ancoragens de cabos de protensão e outras regiões de concentração de tensões, tubos de água pluvial, esgoto e bueiros, cascas, telhas, elementos de contenção, estacas-prancha, elementos de estruturas submetidas a sismos, elementos submetidos a impacto, dormentes, elementos estruturais pré-fabricados em geral, reforço de elementos estruturais, dentre outras.

De acordo com Serna (2007), as fibras podem ser usadas com mais vantagem em elementos onde a distribuição de tensões é muito variável (pavimentos e revestimento de túneis, por exemplo), e/ou nas três dimensões; elementos muito armados em que as distâncias entre armaduras dificultam a concretagem; elementos de pouca espessura onde o posicionamento errado da armadura convencional pode modificar substancialmente a altura útil; em elementos pouco armados.

### **3.3. Fibras de aço**

As fibras de aço são as mais utilizadas em elementos estruturais de concreto, pois devido ao seu alto módulo de elasticidade melhoram características como tenacidade, controle de fissuras, resistência à flexão, resistência ao impacto e à fadiga (ACI 544.1R-96, 2006).

Existem vários processos de fabricação das fibras de aço, sendo o mais comum o corte de arame trefilado, de aço de baixo teor de carbono. Em sua maioria as fibras de aço são produzidas com aço-carbono ordinário, porém, as feitas de ligas metálicas são mais resistentes à corrosão, além disso, são as mais adequadas para aplicações em concretos refratários e em estruturas marítimas.

Quanto à geometria as fibras de aço são as que têm maior diversidade. As fibras de seção transversal circular têm diâmetros variando entre 0,25 mm a 1,0 mm e comprimentos da ordem de 6,4 mm a 76 mm. Já a fibra de aço achatada tem dimensões variando entre 0,15 mm e 0,64 mm (espessura) e entre 0,25 mm e 2,0 mm (largura). O fator de forma – ou esbeltez –, que consiste na razão entre comprimento e diâmetro equivalente, geralmente tem valores na faixa de 20 a 100 (ACI 544.1R-96, 2006). Ao se aumentar o comprimento da

fibra ou reduzir a seção transversal, a esbeltez será maior. Em geral, quanto maior for esbeltez da fibra, maior será a capacidade resistente após a fissuração do concreto.

As fibras de aço onduladas estão disponíveis tanto onduladas em todo o comprimento quanto somente nas extremidades. As fibras de aço podem ainda ser coladas umas nas outras com colas solúveis em água, formando feixes de 10 a 30 fibras, para facilitar seu manuseio e mistura no concreto (Bentur e Mindess, 2007).

Quanto às tensões máximas, de modo geral, as fibras de aço resistem a tensões entre 400 MPa a 1200 MPa (Kooiman, 2000), enquanto que as deformações específicas últimas variam de 3% a 4% (Oliveira, 2005).

A norma brasileira NBR 15530 (2007) classifica as fibras de aço de acordo com o processo de produção e forma. Essa norma considera três classes de fibras de aço, em função de serem feitas de arame trefilado a frio, de chapa laminada cortada a frio ou de arame trefilado e escarificado: classes I, II e III, respectivamente. Em relação à conformação geométrica, essa norma considera três tipos de fibras de aço: A (com ancoragens nas extremidades), C (corrugada) e R (reta).

### **3.4. Fibras de polipropileno**

O desenvolvimento de polímeros nos últimos cem anos foi impulsionado pelo crescimento da indústria do petróleo. Desde 1930 o petróleo tem sido a principal fonte de matéria prima para a fabricação de produtos químicos orgânicos, a partir dos quais são fabricados plásticos, fibras, borrachas e adesivos.

Para Taylor (1994) os materiais baseados em cimento, como o concreto, são uma opção natural para a aplicação de materiais fibrosos à base de fibras poliméricas, uma vez que são baratos, mas apresentam problemas relativos à ductilidade, resistência ao impacto e capacidade de absorção de energia de deformação. Segundo Johnston (1994), as fibras em uma matriz cimentada podem, em geral, ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito para resistir a todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração: retração restringida; tração direta; na flexão e cisalhamento; secundariamente estas melhoram a ductilidade e a tenacidade de uma matriz frágil.

Atualmente é possível relatar obras diversas que tiveram de alguma forma a incorporação de fibras de polipropileno: barragens, túneis, pontes, canais de irrigação, estações de tratamento de águas e esgoto e, principalmente, em pavimentos e pisos de concreto.

Vários são os motivos que explicam esta realidade. No plano técnico, pode-se citar a compatibilidade mecânica, física e química existente entre o concreto e as fibras de polipropileno. O polipropileno é quimicamente inerte, não absorve água, é imputrescível e não enferruja.

No plano econômico, o aumento do uso da fibra se justifica pelo baixo custo e fácil disponibilidade. A resina de polipropileno é mais barata que outros polímeros, além disso, o processo de fabricação das fibras de polipropileno também é mais barato. Soma-se a isto o fato de que o seu manuseio, tanto na fábrica como na obra, não oferece qualquer dano a saúde dos operários.

As fibras poliméricas, quanto a sua geometria são divididas em microfibras e macrofibras. O uso de microfibras de polipropileno (diâmetro equivalente micrométrico e esbeltez próxima da unidade) já é comum no Brasil para ajudar a reduzir a fissuração por retração e controle de exsudação, entretanto, essas microfibras não têm função estrutural. Enquanto que as macrofibras de polipropileno (diâmetro equivalente milimétrico e esbeltez variando entre 20 e 100) são definidas como fibras estruturais e competem com as fibras aço. No Brasil o uso de fibras de polipropileno com função estrutural ainda é incipiente e a comercialização dessas fibras no Brasil ainda é pequena. Nos Estados Unidos e Europa o uso dessas fibras já é bastante difundido.

Figueiredo, Tanesi e Nince (2002) explicam que a redução da fissuração e exsudação com a adição das fibras poliméricas se deve ao fato de que as fibras dificultam a movimentação da água no interior do concreto, aumentando a sua coesão. Esse aumento pode ser desejável para alguns usos específicos como o concreto projetado ou pré-moldado, minimizando os riscos de deslocamentos e garantindo a estabilidade dimensional do concreto recém desformado.

As fibras de aço são as mais usadas e mais eficientes para concreto, e as fibras poliméricas podem ser mais apropriadas para situações específicas. Por exemplo, concretos arquitetônicos ou decorativos requerem fibras com um mínimo impacto visual, neste caso fibras de polipropileno, de poliéster ou de náilon podem ser mais apropriadas.

A comparação do custo das fibras *versus* o desempenho esperado pode ser relevante na escolha das fibras. Entre as fibras estruturais poliméricas e as fibras de aço, o desempenho das fibras de aço é geralmente superior.

Entretanto, os custos das fibras poliméricas podem ser vantajosos quando não se requer um alto desempenho das fibras.

### **3.5. Propriedades do concreto com fibras**

O concreto com fibras contém cimento hidráulico, água, agregados miúdos, agregados graúdos e fibras discretas descontínuas, podendo também ter aditivos químicos e adições minerais para melhorar a sua resistência e/ou trabalhabilidade.

Não existe restrição quanto ao tipo de cimento para o concreto com fibras, porém, o tipo de cimento deve estar de acordo com a utilização e a resistência requerida. Os agregados são os mesmos utilizados no concreto comum, mas a dimensão máxima é de grande importância para o concreto com fibras, pois as partículas deste concreto não devem ser maiores que 20 mm e de preferência não maiores que 10 mm, para não prejudicar a distribuição uniforme das fibras (Oliveira, 2005). Existe o risco de reações deletérias entre alguns tipos de fibras e os álcalis do cimento.

De acordo com Figueiredo (2000), quanto maior a dimensão do agregado, maiores são os problemas de interferência fibra-agregado, o que compromete o efeito favorável do uso da fibra. Deve haver compatibilidade dimensional entre os agregados e as fibras, de modo que as fibras interceptem com maior frequência possível as fissuras que ocorrem no concreto. A compatibilidade dimensional, representada na Figura 3.2, possibilita a atuação da fibra como reforço do concreto e não como mero reforço da argamassa do concreto. Essa compatibilidade é importante, pois as fissuras se propagam preferencialmente na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta para concretos de baixa e moderada resistência mecânica.

O comprimento das fibras deve ser pelo menos duas vezes a dimensão máxima do agregado, sendo usual 2,5 a 3 vezes para que elas possam atuar como ponte de transferência de tensões nas fissuras (Aguado e Laranjeira, 2007).

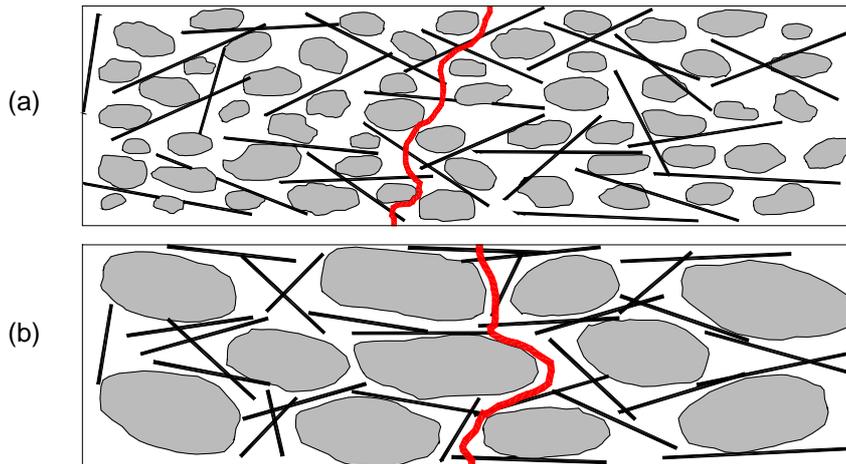


Figura 3.2 – Concreto com fibras onde há (a) e onde não há (b) compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo (Figueiredo, 2000).

A utilização de aditivos redutores de água é comum no concreto com fibras. A utilização de adições minerais, como a microsilica, também tem se tornado comum nesses concretos. A presença de microsilica torna a matriz mais densa, melhorando a interface fibra-matriz e as propriedades mecânicas do concreto.

Do ponto de vista material e estrutural há um delicado equilíbrio para se otimizar a aderência entre a fibra e a matriz. Se as fibras tiverem pouca aderência com a matriz podem escorregar sob carregamentos baixos e não contribuem muito para diminuir a fissuração. Nessa situação as fibras não aumentam a tenacidade do sistema. Por outro lado, se a aderência à matriz for muito alta, muitas das fibras podem se romper antes de dissipar energia escorregando. Nesse caso as fibras se comportam como inclusões inativas, produzindo apenas uma melhoria periférica das propriedades mecânicas.

A interação fibra-matriz depende de vários fatores, tais como: atrito fibra-matriz, ancoragem mecânica da fibra na matriz e adesão físico-química entre os materiais. Esses fatores são influenciados pelas características das fibras (volume, módulo de elasticidade, resistência, geometria e orientação) e características da própria matriz (composição, condição de fissuração e propriedades físicas e mecânicas).

Antes de a matriz fissurar o mecanismo dominante é a transferência de tensões elásticas e o deslocamento longitudinal da fibra e da matriz na interface são geometricamente compatíveis. Em estágios mais avançados de carregamento (solicitações de tração ou flexão), inúmeras microfissuras surgem e rapidamente as tensões se concentram nas extremidades dessas fissuras,

ocorrendo um rápido desenvolvimento e aumento da abertura, resultando numa ruptura frágil do material.

Quando a matriz de concreto tem fibras curtas, as fissuras são atravessadas pelas fibras, que acabam agindo como pontes de transferência de tensões, dificultando o desenvolvimento das microfissuras.

A ruptura por tração do concreto com fibras ocorre por alongamento elástico ou plástico das fibras, por degradação da matriz de concreto na zona de transição fibra-matriz, por arrancamento da fibra, ou por ruptura da fibra.

A resistência do concreto com fibras a um determinado tipo de solicitação depende da direção das fibras, que nem sempre é aleatória. No concreto vibrado as fibras tendem a ter orientação preferencial perpendicular à direção de concretagem (Gettu *et al.*, 2005; Schumacher, 2006; Akcay e Tasdemir, 2012). A compactação tende a levar a uma orientação preferencial, principalmente quando se usa vibração superficial (direção paralela à forma), mas esse efeito tende a ser local. No caso de adoção de vibradores internos pode-se ter excesso de pasta e poucas fibras na região da vibração (Aguado e Laranjeira, 2007).

Em resumo, os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas do concreto com fibras são:

- características geométricas das fibras;
- resistência mecânica do material empregado na fabricação das fibras;
- volume de fibras adicionadas ao concreto;
- orientação e distribuição das fibras dentro da matriz de concreto;
- resistência da matriz de concreto;
- tensão de aderência entre as fibras e a matriz;
- razão entre dimensão máxima do agregado e o comprimento da fibra.

Algumas das propriedades do concreto que são modificadas pela adição de fibras são abordadas a seguir.

### **3.5.1. Trabalhabilidade**

A perda de trabalhabilidade do concreto com fibras é influenciada principalmente pela concentração volumétrica de fibras. Contudo, a esbeltez das fibras, o tipo de misturador usado na fabricação da mistura, o tipo e a quantidade

de superplastificante empregados na mistura também influem na trabalhabilidade do concreto.

A adição de fibras altera as condições de consistência do concreto e a sua trabalhabilidade. Isto ocorre principalmente porque ao adicionar fibras ao concreto se está adicionando também uma grande área superficial que demanda água de molhagem. Quanto maior for a esbelteza das fibras maior será o impacto na trabalhabilidade do concreto (Figueiredo, 2000).

Mehta e Monteiro (2008) comentam que apesar da substancial perda de consistência do concreto com fibras, o lançamento e a compactação são muito melhores do que um concreto convencional sem fibras de baixa consistência.

De acordo com o ACI 554.3R-93 (2006) os três principais métodos para avaliar a trabalhabilidade do concreto com fibras no estado fresco são os seguintes:

- abatimento do tronco de cone;
- tronco de cone invertido;
- ensaio de Vebe, onde a medida de consistência do concreto é definida como sendo o tempo necessário para remoldar o concreto contido no equipamento da forma troncônica para forma cilíndrica, conforme mostra Figura 3.3. Quanto maior o índice Vebe menor é a trabalhabilidade.

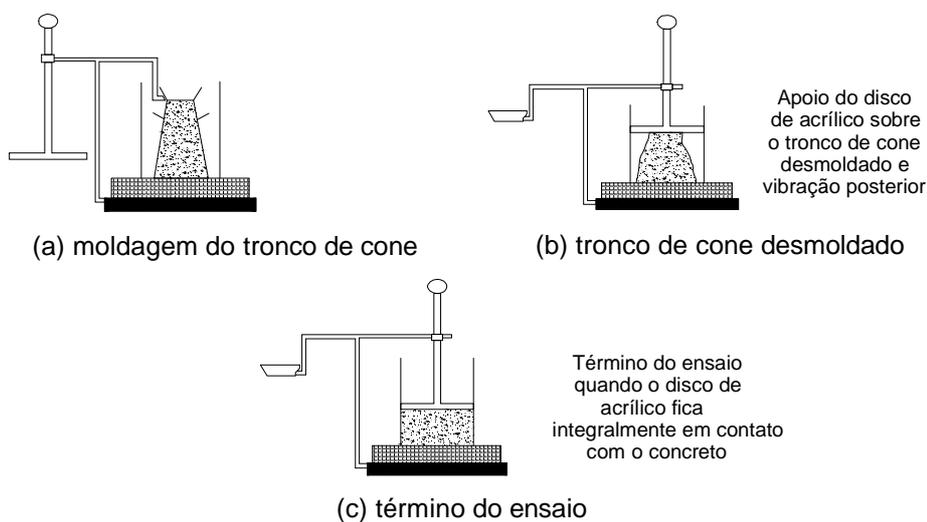


Figura 3.3 – Ensaio de Vebe (ACI 211.3-75, 2002).

### 3.5.2. Resistência à compressão

O objetivo da adição de fibras ao concreto não é alterar a sua resistência à compressão. No entanto, como as fibras atuam como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, sejam elas produzidas por solicitações de tração ou cisalhamento como ocorre no ensaio de compressão, o concreto também apresentará um acréscimo na tenacidade à compressão.

Estudos sobre concretos com fibras mostram que para os volumes de fibras usualmente utilizados (menores do que 2%), o comportamento à compressão (resistência, módulo de elasticidade, deformação específica relativa à tensão máxima) não é tão alterado quanto o comportamento à tração e à flexão. Maiores volumes de fibras podem resultar tanto em acréscimo quanto em decréscimo na resistência e no módulo de elasticidade. Os decréscimos são observados quando os aspectos negativos, como o aumento do teor de ar, acarretados pela adição de fibras na matriz são preponderantes. Porém, quando ocorre a otimização da matriz com relação ao empacotamento da mistura granular seca e a utilização de misturador e vibração apropriados, o aumento da resistência e de módulo pode ser observado mesmo para maiores volumes de fibras.

Segundo Balaguru e Shah (1992) e Bentur e Mindess (2007), o aumento da resistência à compressão devido às fibras não passa de cerca de 25%, para volumes de fibra de até 2,0%. O ACI 544.1R-96 (2006) cita um acréscimo de no máximo 15% na resistência à compressão para volumes de fibras de até 1,5%.

Araújo (2002) realizou ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm moldados com concretos de três dosagens diferentes, com fibras de aço com ganchos nas extremidades, comprimento de 30 mm, diâmetro de 0,62 mm e esbeltez 48, nos teores de 0%, 0,75% e 1,50% em volume. Os resultados mostram que a adição de fibras nem sempre levou ao aumento da resistência à compressão, e que quando houve aumento ele não passou de 16%.

Concretos de alta resistência precisam de um maior volume de fibras para alterar o ramo ascendente da curva tensão de compressão *versus* deformação específica (resistência, módulo de elasticidade, deformação relativa à tensão máxima) em relação ao concreto de resistência normal. Entretanto, tanto para o concreto de baixa resistência como para o de alta resistência, a resposta pós-pico é bastante diferente da do concreto sem fibras, apresentando maior

ductilidade, como pode ser observado nas curvas tensão *versus* deformação específica das Figuras 3.4 e 3.5, para concreto convencional e de alta resistência, respectivamente.

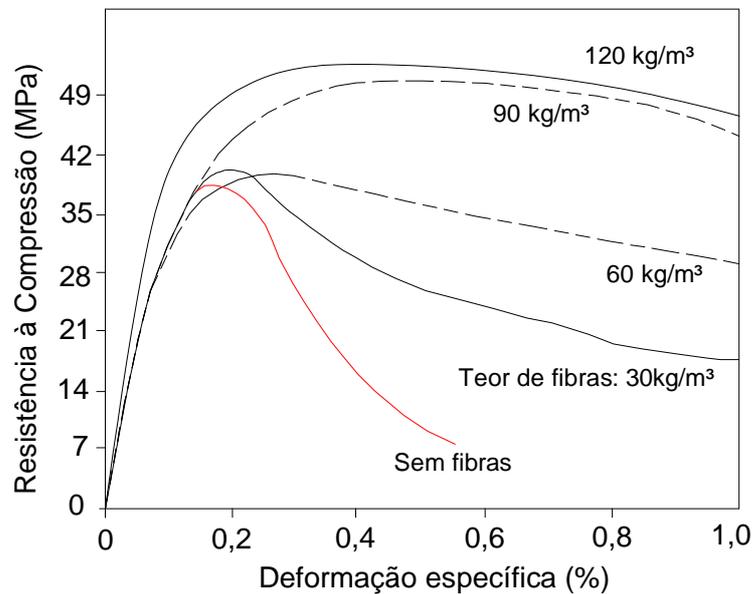


Figura 3.4 – Comportamento sob compressão do concreto de resistência normal com fibras de aço (Balaguru e Shah, 1992).

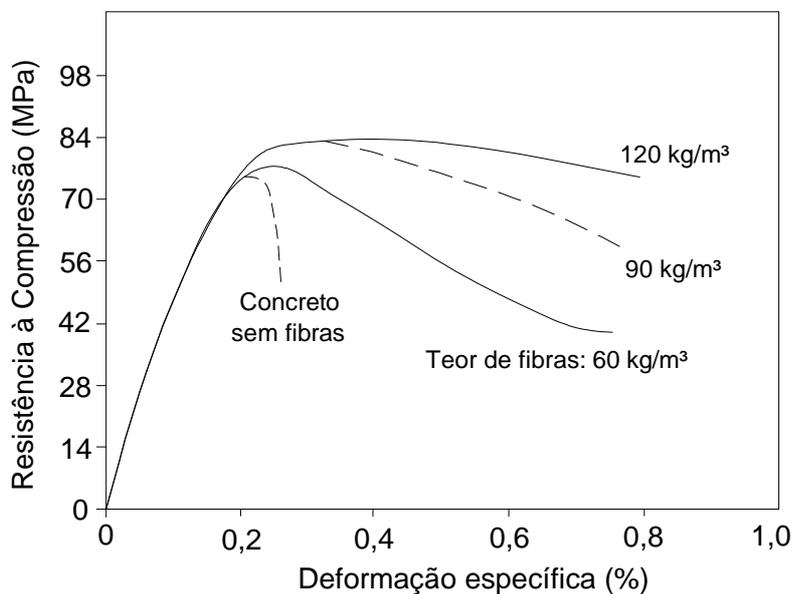


Figura 3.5 – Comportamento sob compressão do concreto de alta resistência com fibras de aço (Balaguru e Shah, 1992).

Os ensaios realizados por Mansur, Chin e Wee (1999) indicaram que a influência do teor de fibras no módulo de elasticidade tangente inicial, na resistência à compressão e na deformação específica correspondente a essa

tensão depende da quantidade de fibras na direção próxima da perpendicular à do carregamento, que por sua vez depende da direção de concretagem. Com o aumento dessa quantidade observou-se tendência de diminuição do módulo de elasticidade e de aumento das outras duas grandezas.

O gasto energético pós-fissuração por compressão da matriz também apresentará diferenças significativas em função de um direcionamento preferencial das fibras. Se o concreto for comprimido no sentido perpendicular à direção das fibras apresentará um maior gasto energético pós-fissuração do que o concreto comprimido no sentido paralelo à direção preferencial das fibras (Figueiredo, 2000).

### **3.5.3. Resistência à tração**

A resistência à tração no concreto pode ser obtida, geralmente, por meio de três ensaios distintos: ensaio de tração direta; ensaio de tração indireta que consiste no ensaio de tração por compressão diametral, denominado como ensaio brasileiro; o ensaio de tração na flexão.

O ensaio mais real para medir a resistência à tração do concreto seria o ensaio de tração direta, porém, esse ensaio requer o uso de colas de alta qualidade, é de execução mais difícil que os demais ensaios, por esse motivo geralmente só é realizado em trabalhos de pesquisa. Já os ensaios de tração por compressão diametral e de tração na flexão são mais simples de executar e são mais comuns.

Mesmo não existindo consenso sobre o melhor ensaio para se obter a resistência à tração do concreto, essa é tomada como referência em várias normas de cálculo de estruturas de concreto (NBR 6118:2007, por exemplo) para cálculo do momento de fissuração, da armadura mínima, da resistência à força cortante de elementos sem armadura transversal e da tensão de aderência, sendo essa avaliada a partir de expressões que a relacionam com a resistência à compressão.

#### **Resistência à tração direta**

Não existe um método padronizado para o ensaio de tração direta, havendo diferentes tipos de corpos de prova e condições de apoio em uso (Naaman, Fischer e Krstulovic-Opaca, 2007).

Segundo Bentur e Mindess (2007), com o emprego dos teores de fibras usados na prática (menores que 2% em volume), o aumento de resistência à tração direta não ultrapassa 20% e os maiores aumentos são verificados quando se usam fibras com maior esbeltez.

De acordo com ACI 544.1R-96 (2006), a adição de 1,5% de fibras em volume em matrizes à base de cimento leva a um aumento de 30 a 40% na resistência à tração direta.

As matrizes com maior aderência às fibras (concretos de alta resistência com adições de cinza volante, por exemplo) proporcionam maiores aumentos na resistência à tração (Balaguru e Shah, 1992).

As fibras alinhadas com a direção das tensões de tração produzem maiores incrementos na resistência à tração direta do que as fibras que estão aleatoriamente distribuídas na matriz de concreto.

### **Resistência à tração indireta**

A resistência à tração indireta por compressão diametral do concreto tem significativo aumento quando a esse se adicionam fibras. Segundo ACI 544.2R-89 (2006), os resultados de ensaio de tração por compressão diametral de concretos com fibras são difíceis de interpretar após o aparecimento da primeira fissura, pois a distribuição de tensões depois da fissuração não é conhecida. A identificação precisa da primeira fissura nesse ensaio é difícil sem o uso de extensômetros elétricos de resistência.

O aumento da resistência à tração por compressão diametral devido às fibras depende da compatibilidade entre o comprimento das fibras e a dimensão máxima dos agregados (Figueiredo, 2000) e também da aderência fibra-matriz, que pode ter um aumento considerável por meio da adição de cinza volante (Balaguru e Shah, 1992).

Araújo (2002) relata aumentos entre 87 e 130% da resistência à tração direta adicionando 1,5% de fibras com 30 mm de comprimento e esbeltez 45. Nunes (2006) obteve aumento de 67 a 104% adicionando 2,0% de fibras com 35 mm comprimento e esbeltez 65, e ainda verificou que a resistência à tração diminuiu com o aumento da dimensão máxima do agregado de 12,5 para 19 mm. Ao adicionar 1,25% de fibras com 60 mm de comprimento com esbeltez 60, Oliveira (2007) obteve 83% de aumento na resistência à tração.

## Resistência à tração na flexão

Antes da fissuração, durante fase de comportamento linear-elástico, as fibras não influenciam o comportamento do concreto. Essas, entretanto, melhoram o comportamento pós-fissuração. A curva carga *versus* deslocamento vertical de vigas de concreto com fibras mostra uma maior capacidade de deslocamento vertical antes da ruptura e ramo descendente com perda de capacidade resistente menos brusca que a de vigas de concreto sem fibras.

Não existe ainda um ensaio padronizado para a obtenção da resistência à tração na flexão, e os parâmetros a ser obtidos a partir destes ensaios para caracterizar o comportamento a flexão do concreto com fibras. Dentre as normas internacionais mais difundidas estão a RILEM TC 162 - TDF (2002), a ASTM C 1609/C (2005) e a UNE-EN 14651 (2007). As diferenças entre essas normas estão na forma de carregar os corpos de prova, com uma ou duas forças centradas – ensaio de flexão em três ou quatro pontos –, na execução de um entalhe central e como obter as tensões a partir do diagrama carga *versus* flecha ou carga *versus* abertura do entalhe.

Dependendo do tipo e teor das fibras, o comportamento do concreto com fibras pode ser dos tipos mostrados pelas curvas 1 a 4 da Figura 3.6, sendo que as curvas 1 a 3 são de concretos com abrandamento de deslocamento, e o da curva 1 é de concreto com pouca diferença de comportamento com relação ao sem fibras.

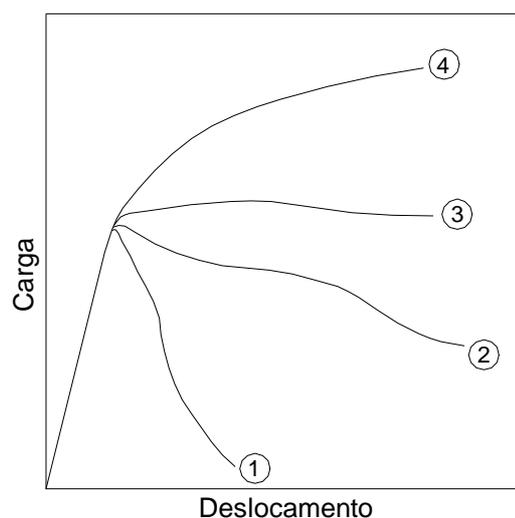


Figura 3.6 – Curvas carga *versus* deslocamento para concreto com fibras (Balaguru e Shah, 1992).

Segundo o ACI 544.1R-96 (2006) e o ACI 544.4R-88 (2006), em comparação com concretos sem fibras, os com teores de fibras de até cerca de 1,5% em volume podem ter um aumento da resistência à tração na flexão de até 100%. As resistências à tração obtidas de ensaios de flexão em três pontos são maiores que as obtidas nos ensaios de flexão em quatro pontos. As fibras mais longas, os corpos de prova com menores dimensões e o alinhamento das fibras na direção longitudinal tendem a levar a maiores resistências. O aumento da proporção e da dimensão máxima do agregado graúdo diminuem a resistência à tração na flexão.

Segundo a RILEM TC 162-TDF (2002), uma variabilidade nos resultados do ensaio à flexão da ordem de 10 a 30% pode ser esperada. Tendendo essa a ser maior em concretos com menores teores de fibras, pois nesses a variação na distribuição de fibras tende a ser maior e a variação do número de fibras no plano de ruptura também. A maior trabalhabilidade do concreto facilita o alinhamento das fibras na direção do comprimento do corpo de prova, o que leva ao aumento da resistência à tração.

De acordo com Bentur e Mindess (2007), os principais fatores que influenciam a melhoria da resistência à tração na flexão quando se adicionam fibras no concreto são o volume e a esbeltez das fibras. As fibras longas tendem a se posicionar na direção do comprimento do corpo de prova, resultando em maior aumento na resistência. Na Figura 3.7 pode-se observar a influência do teor de fibras na resistência à flexão, onde elevados teores de fibras podem ter desempenho inferior.

Yazici, Inan e Tabak (2007) observaram aumentos da resistência à tração na flexão de 30 a 80% ao adicionar 1,5% de fibras, sendo que o aumento foi maior para as fibras de maior esbeltez.

Thomas e Ramaswamy (2007) relatam aumentos da resistência à tração indireta e na flexão da ordem de 40% adicionando 1,5% de fibras. Esses autores afirmam que os aumentos de resistência à tração diminuem para os concretos de maiores resistências.

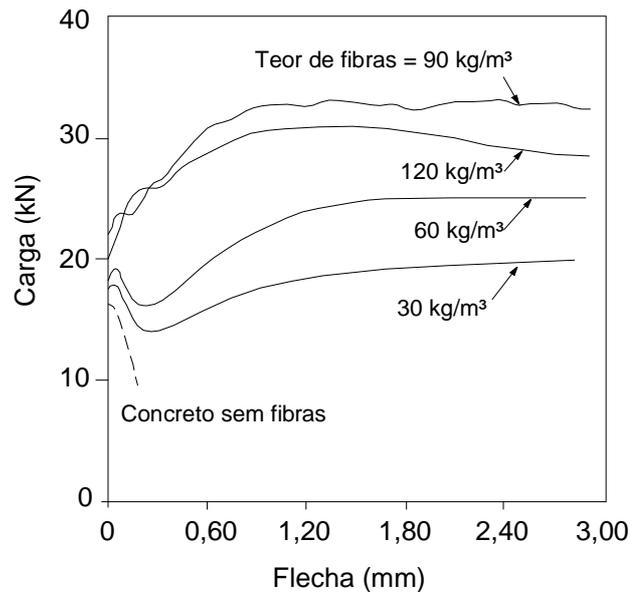


Figura 3.7 – Curvas carga *versus* flecha com diferentes teores de fibras (Balaguru e Shah, 1992).

#### 3.5.4. Tenacidade

Tenacidade é a quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar, sendo representada pela área abaixo da curva de carga *versus* deformação específica.

O concreto convencional se rompe repentinamente, assim que a flecha correspondente à resistência última é superada. Por outro lado, o concreto com fibras contínuas suporta tensões e deformações consideravelmente maiores que o concreto convencional após atingir a tensão máxima. A falha no concreto com fibras ocorre principalmente devido ao arrancamento ou escorregamento das fibras. Assim, ao contrário do concreto convencional, um corpo de prova de concreto com fibras não se rompe imediatamente após o início da primeira fissura, suportando ainda tensões e deformações, consumindo mais energia até a ruptura.

Ao explicar o mecanismo da tenacidade em compósitos reforçados com fibras, Shah (1984) *apud* Mehta e Monteiro (2008) relata o seguinte: o compósito suportará tensões cada vez maiores após a primeira fissura da matriz, caso a resistência das fibras ao arrancamento na primeira fissura for maior do que a tensão na primeira fissuração; em uma seção fissurada, a matriz não resiste a nenhuma tensão e as fibras suportam toda a carga do compósito. Com uma carga cada vez maior sobre o compósito, as fibras tendem a transferir as tensões adicionais para a matriz por meio de tensões de aderência. Se as

ensões de aderência não exercerem a resistência de aderência, então pode haver fissuração adicional da matriz. Esse processo de fissuração múltipla continuará até que haja o rompimento das fibras ou até que o escorregamento local acumulado leve ao arrancamento das fibras.

Para avaliar a tenacidade não existe consenso com relação a que valores limites de deformação específica ou deslocamento vertical a serem considerados. Para minimizar esse problema usam-se índices de tenacidade, que são a razão entre as tenacidades de um concreto com fibras e da sua matriz determinadas da mesma maneira.

Para um mesmo teor em volume, as fibras com melhores características de ancoragem e maior esbeltez levam a maiores valores de tenacidade do que fibras lisas e retas (Bentur e Mindess, 2007). Para um mesmo tipo de fibras, maiores teores de fibras levam a maior tenacidade.

### **3.5.5. Durabilidade**

As dúvidas com relação à durabilidade do concreto com fibras de aço são frequentes. Isso se deve ao fato de se observar fibras oxidadas na superfície de pavimentos e revestimento de túneis. As fibras de aço utilizadas no concreto não recebem nenhum tratamento para evitar a corrosão. Logo, a durabilidade da fibra está condicionada à matriz de concreto, que é um meio fortemente alcalino (pH em torno de 12,5). Porém, com a introdução das fibras ocorre diminuição da fissuração, o que pode influir na durabilidade do concreto com armadura de aço, pois se reduz o ingresso de agentes agressivos (umidade, oxigênio e cloretos) e a probabilidade de ocorrência de corrosão das armaduras (Mehta e Monteiro, 2008).

Um dos problemas relativos à corrosão das fibras é que essas levariam à perda de tenacidade e resistência do concreto, pois o mecanismo de ruptura do concreto com fibras deixaria de ser por arrancamento das fibras, passando a ser por ruptura das mesmas. Por outro lado, se for formada uma pequena oxidação superficial nas fibras, poderia haver aumento na aderência fibra-matriz. Assim, a corrosão das fibras nem sempre levaria a uma redução na resistência e tenacidade do concreto (Bentur e Mindess, 2007).

No tocante à corrosão das fibras na superfície do concreto Helene (1996) comenta que a mesma está associada à carbonatação superficial do concreto. No entanto, como a fibra tem um diâmetro reduzido, o volume de óxidos gerados

não é suficiente para produzir o lascamento da superfície; com isso garante-se a integridade do revestimento sem fissuras e a proteção de seu interior. Além disso, para que haja corrosão da armadura no concreto deve haver uma diferença de potencial na armadura, a qual pode ser originada por diferenças de concentração iônica, umidade, aeração, tensão no aço ou no concreto. Tanto maior será a dificuldade de se encontrar uma diferença de potencial numa armadura, quanto menores forem suas dimensões. Assim, as fibras são muito menos sujeitas à corrosão eletrolítica que as armaduras convencionais.

Segundo ACI 544.1R-96 (2006), abertura de fissura menor que 0,1 mm não leva à corrosão das fibras; fissura com abertura maior, mas com pouca profundidade, causa corrosão apenas localizada, que pode não ter importância estrutural relevante.

Ensaio realizado por Granju e Balouch (2005) em corpos de prova submetidos à névoa salina também mostraram que não há corrosão quando a abertura de fissura é menor que 0,1 mm. Em corpos de prova com entalhes de 0,5 mm de espessura, observou-se corrosão leve das fibras, sem redução de sua seção. Observou-se ainda que a resistência à flexão de corpos de prova fissurados submetidos à névoa salina por um ano não foi diminuída e sim aumentada, o que deve ter ocorrido devido à leve corrosão das fibras, que aumentou a aderência entre fibras e matriz, dificultando o arrancamento das fibras da matriz.

Deve-se tomar cuidado ao utilizar outros tipos de fibras no concreto no tocante a reações químicas deletérias entre a fibra e os álcalis da pasta de cimento como, por exemplo, fibra de vidro comum. As fibras de zircônio e as fibras de vidro resistentes aos álcalis têm melhor durabilidade em ambientes alcalinos, entretanto, essas fibras apresentam uma deterioração gradual com o passar do tempo.

### **3.6. Resistência a ações dinâmicas e à fadiga**

A resistência do concreto com fibras à solicitações dinâmicas e de impacto é de três a dez vezes maior do que a do concreto sem fibras (ACI 544.4R-88, 2006). Isso advém do fato de ser grande a quantidade de energia dissipada no concreto com fibras. O acréscimo na dissipação de energia é proveniente da necessidade de se arrancar a fibra da matriz para a ruptura do material. Todo material dúctil apresenta maior resistência ao impacto por proporcionar uma

maior dissipação de energia pelas deformações plásticas que é capaz de apresentar. De maneira análoga, o material pseudodúctil produzido pelo reforço de fibras de aço no concreto irá requerer um maior gasto energético para a sua ruptura por solitação dinâmica.

Na Figura 3.8 compara-se o número de impactos correspondentes à fissuração e à ruptura de concreto sem fibras e de concretos onde se adicionaram fibras de diferentes tipos e pozolana. Verifica-se que os concretos com fibras com ganchos resistiram a mais impactos do que os concretos com fibras lisas e maior teor de fibras, e que não houve diferença acentuada entre as resistências ao impacto dos concretos com 63 kg/m<sup>3</sup> e 48 kg/m<sup>3</sup> de fibras com ganchos. A menos do concreto com fibras lisas, o desempenho dos concretos com pozolana foi pior do que o daqueles que não a tinham.

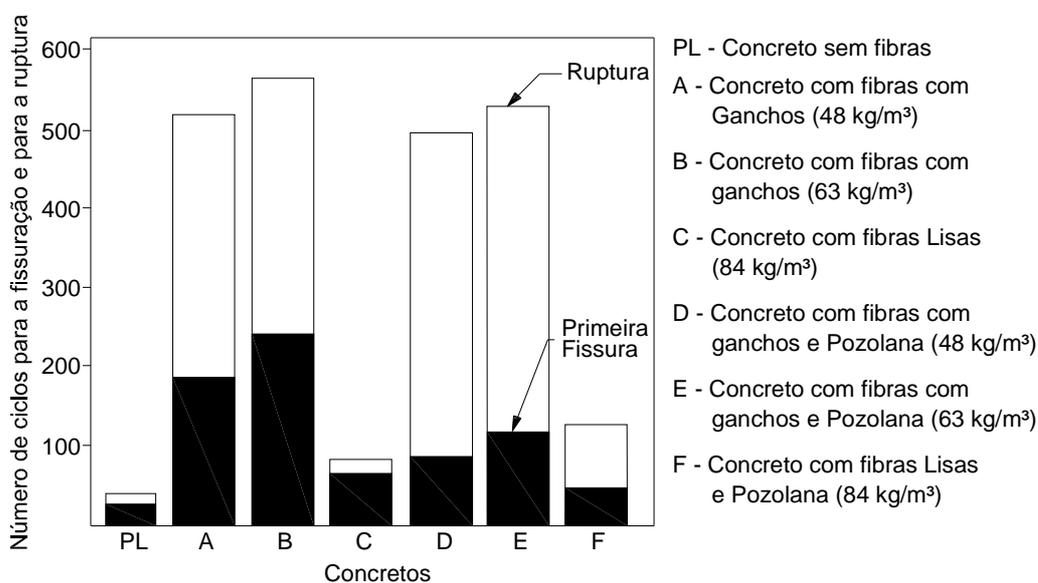


Figura 3.8 – Resistência ao impacto de concretos com e sem fibras (Balaguru e Shah, 1992).

Como as fibras diminuem a propagação de fissuras no concreto, possibilitam um maior número de ciclos de carregamento para determinado nível de tensão para a mesma vida útil ou um maior nível de tensão para certo número de ciclos.

Li e Matsumoto (1998) e Marangon (2011) comentam que mesmo pequenas quantidades de fibras adicionadas ao concreto representam um aumento com relação à fadiga. Além disso, afirmam que esse aumento é um dos maiores benefícios da adição de fibras ao concreto.

Lee e Barr (2004) buscaram fazer um panorama dos estudos anteriores de fadiga em concretos com e sem fibras; relatam que apesar de muitas informações conflitantes sobre o comportamento à fadiga do concreto descrito na literatura, a maioria dos pesquisadores mostrou que a adição de fibras beneficia o comportamento à fadiga do concreto. Ainda comentam que é difícil comparar resultados e conclusões de diferentes estudos, pois existem diversas combinações de frequência de carregamento, sequência de carregamento, dosagem dos concretos, configurações de ensaio e etc. que podem alterar o desempenho dos concretos com fibras sob cargas cíclicas. Por fim, esses autores comentam que os resultados apresentados na literatura até aquele momento apontavam que a adição de fibras não parecia melhorar o desempenho à fadiga do concreto em compressão. Por outro lado, a adição de fibras ao concreto beneficia o desempenho do concreto à fadiga em flexão.

### **3.6.1. Fadiga em flexão em concretos com fibras**

Nas últimas décadas são encontradas inúmeras publicações na literatura com respeito à fadiga em flexão de concretos com fibras. Na maioria os estudos buscam obter curvas  $SxN$  envolvendo diferentes variáveis: tipos de fibras, conteúdo de fibras, substituição de agregados naturais por reciclados, concretos autoadensáveis, compósitos cimentícios de ultra-alta resistência. Ou procurando determinar a resistência à fadiga para um determinado número de ciclos (em geral um ou dois milhões de ciclos sem a ruptura dos corpos de prova). Alguns desses estudos são apresentados a seguir.

Naaman e Hammoud (1998) estudaram o desempenho à fadiga em flexão de concretos de alta resistência, naquela época 35 MPa, utilizando 2% em volume de fibras de aço com ganchos nas extremidades. Esses autores observaram que a vida à fadiga do concreto com fibras foi pelo menos duas vezes maior do que a do concreto sem fibras, e que o limite de resistência à fadiga dos concretos com fibras poderia ser adotado com segurança como 65% da resistência à flexão estática.

Mailhot *et al.* (2001) desenvolveram uma técnica para detectar o início da fissuração, com o intuito de estudar a vida à fadiga antes e depois da fissuração em concretos com diferentes tipos de fibras de aço (com ganchos, ancoradas ou corrugadas), para dois fatores  $a/c$  (0,35 e 0,45) e variados níveis de tensão (70%, 75% e 85% da resistência na primeira fissura). Os ensaios de fadiga em

flexão foram realizados em corpos de prova prismáticos com seção transversal de 125 mm x 125 mm e comprimento de 425 mm e as diferentes fibras tinham comprimentos variando entre 56 e 60 mm. Os ensaios foram realizados por controle de carga, com um sinal senoidal com frequência de carregamento de 20 Hz. Esses autores concluíram que a grande dispersão dos resultados é função em parte da quantidade de fibras na seção de ruptura e em parte da orientação das fibras. Ainda sugerem que corpos de prova com dimensões maiores tentem a ter menor dispersão nos resultados de fadiga.

Lappa *et al.* (2006) estudaram o comportamento de concretos de alta e ultra-alta resistência à fadiga em flexão em quatro pontos, com resistências à compressão de 120 MPa e 200 MPa, respectivamente. Os concretos foram elaborados com a hibridização de fibras de aço lisas de 13 mm de comprimento, com 0,2 mm de diâmetro e fibras de aço com ganchos nas extremidades com diâmetro de 0,75 mm, 60 mm de comprimento. Também foram produzidos concretos sem fibras ou apenas com um tipo de fibra. Esses autores observaram que o melhor desempenho à fadiga ocorreu nos concretos com melhor trabalhabilidade, onde o melhor deles foi o concreto com 120 MPa de resistência à compressão apenas com fibras de aço de 13 mm de comprimento. Os concretos de ultra-alta resistência foram menos trabalháveis e tiveram desempenho à fadiga semelhante ao concreto sem fibras. Ainda comentaram que a envoltória dos ensaios estáticos de flexão serviu apenas para prever a vida à fadiga no concreto sem fibras.

Rossi e Parant (2008) avaliaram o desempenho à fadiga em flexão de compósitos cimentícios com enorme quantidade de fibras (11% em volume). Esse compósito foi patenteado sob o nome MSFRCC (*Multi-Scale Fibre Reinforced Cement-base Composite*) utilizando fibras de aço com diferentes comprimentos: microfibras com comprimento menor do que 2 mm; mesofibras com comprimento entre 2 mm e 7 mm; macrofibras com comprimento maior ou igual a 20 mm. Esses autores concluíram que as mesofibras não contribuíram para o desempenho à fadiga, mas contribuíram nos ensaios estáticos. Também observaram que os corpos de prova que não romperam com dois milhões de ciclos tiveram um aumento de 6,5% no comportamento residual à flexão, *i.e.*, após os dois milhões de ciclos de fadiga o ensaio foi parado e o corpo de prova foi levado à ruptura com as configurações de um ensaio estático.

O efeito da substituição do agregado natural por agregado reciclado no desempenho à fadiga em flexão de um concreto com fibras de aço foi estudado por Heeralal *et al.* (2009). As fibras tinham um diâmetro de 0,5 mm e esbeltez

72. O ensaio de fadiga foi realizado por meio de um sinal senoidal a uma frequência de carregamento de 2 Hz. Foi observado que quanto maior o percentual de substituição dos agregados naturais por artificiais pior foi o desempenho à fadiga, ocorrendo o mesmo com as resistências à compressão e à tração estáticas.

Nicolaidis *et al.* (2010) patentearam um compósito cimentício de ultra-alta desempenho reforçado com fibras (UHPFRCC *Ultra-high-performance fibre-reinforced cementitious composite*) desenvolvido na Universidade de Cardiff no Reino Unido, sob o nome de CARDIFRC. Esse compósito teve resistência à compressão superior a 200 MPa e resistência à tração na flexão acima de 30 MPa. Para atingir resistências tão elevadas foi necessário utilizar uma grande quantidade (acima de 8% em volume) de fibras de aço mistas (6 mm e 13 mm de comprimento com 0,16 mm de diâmetro) em uma matriz cimentícia densificada com microsilica. Esses autores realizaram ensaios de fadiga em flexão em três pontos em vigas de dimensões 35 mm x 90 mm x 360 mm, com uma frequência de carregamento de 6 Hz com de um sinal senoidal. A partir desses ensaios foi obtida uma resistência à fadiga de 85% da resistência à flexão estática para um limite de um milhão de ciclos.

Goel *et al.* (2012) procuraram obter a resistência à fadiga, onde não houvesse ruptura até dois milhões de ciclos, em concretos autoadensáveis contendo 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibras de aço em volume. As fibras eram do tipo corrugadas com diâmetro de 1 mm e comprimento de 30 mm. Os ensaios de fadiga em flexão em três pontos foram realizados por meio de um sinal senoidal a uma frequência de carregamento de 10 Hz. Esses autores obtiveram resistências à fadiga de 71%, 76% e 71% da resistência à flexão estática para os conteúdos de fibras de 0,5%, 1,0% e 1,5%, respectivamente. Também comentaram que essas resistências à fadiga são superiores às resistências encontradas na literatura para concretos com fibras equivalentes, porém, vibrados de maneira convencional (Singh e Kaushik, 2003 *apud* Goel *et al.*, 2012).

Bajat *et al.* (2012) avaliaram o comportamento à fadiga em flexão de concretos com a hibridização de fibras de aço e de polipropileno, para diversas combinações de teores de fibras. Esses autores observaram que a combinação de 50% de fibras de aço com 50% de fibras de polipropileno forneceu o melhor desempenho à fadiga e também a menor dispersão dos resultados.

Observando-se os estudos apresentados entende-se o que foi exposto por Lee e Barr (2004), que é difícil comparar os resultados de estudos de fadiga em

concretos com e sem fibras de diferentes pesquisadores, devido à grande variedade de parâmetros estudados: tipos de concreto, tipos e quantidades de fibras, configurações de ensaios, geometria dos corpos de prova, frequência de carregamento, dentre outros.

### 3.6.2.

#### Fadiga em compressão em concretos com fibras

O estudo da melhoria do desempenho do concreto com a adição de fibras estruturais tem se concentrado no desempenho à flexão ou à tração do concreto, onde o aumento é imediato e notório, como visto anteriormente. Contudo, no comportamento à compressão, foco deste trabalho, a melhora do desempenho não é tão marcante, e não tem fomentado tantas pesquisas no assunto. Além disso, o estudo de fadiga em compressão requer máquinas de ensaios mais potentes ou corpos de prova de dimensões reduzidas, comparado a ensaios de fadiga em flexão, o que por muitas vezes limita ou inviabiliza esse estudo.

A seguir serão descritos alguns estudos realizados em fadiga em compressão com concretos com fibras: Grzybowski e Meyer (1993), Paskova (1994) e Paskova e Meyer (1997) estudaram a influência do conteúdo de fibras de aço e de polipropileno; Cachim *et al.* (2001) compararam o desempenho de fibras de aço de diferentes comprimentos; Yin e Hsu (1995) compararam o comportamento à fadiga em concretos com fibras de aço em compressão uniaxial e biaxial.

Grzybowski e Meyer (1993) estudaram o acúmulo de dano em concretos com e sem o uso de fibras por meio de ensaios de fadiga em compressão em cubos de 102 mm de aresta. Foram ensaiadas nove diferentes dosagens de concreto: uma dosagem de referência sem fibras (48 MPa), quatro dosagens com fibras de aço com ganchos nas extremidades e 30 mm de comprimento, e quatro dosagens com fibras de polipropileno com 19 mm de comprimento, variando a quantidade de fibras (0,00; 0,25; 0,50; 0,75 e 1,00%).

Os ensaios foram realizados uniaxialmente com amplitude de tensões constante, onde a frequência de carregamento foi de 1 Hz. Três razões entre tensões  $S_{m\acute{a}x}/f_c$  foram ensaiadas (0,75; 0,80 e 0,90).

Para cada dosagem e relação entre tensões foram ensaiados cinco corpos de prova cúbicos. Os dados armazenados a cada ensaio foram: o número de ciclos até a ruptura  $N_f$ , a energia dissipada a cada ciclo  $E_n$ , e a energia total dissipada  $E_{tot}$ .

O efeito benéfico das fibras na vida à fadiga e energia total dissipada foi mais acentuado nos traços com 0,25% de fibras, independente da amplitude de tensões. Tanto a energia dissipada quanto o número de ciclos decresceu com o aumento da razão entre tensões, e esse decréscimo foi mais acentuado nos concretos com fibras de polipropileno.

A energia dissipada, normalizada com relação à energia total dissipada, foi definida pelos autores como índice de dano  $D$ . As Figuras 3.9 e 3.10 mostram os histogramas do índice de dano em função da razão entre o número de ciclos e o número de ciclos até a ruptura  $N/N_f$  para o concreto com fibras de polipropileno e com fibras de aço, respectivamente.

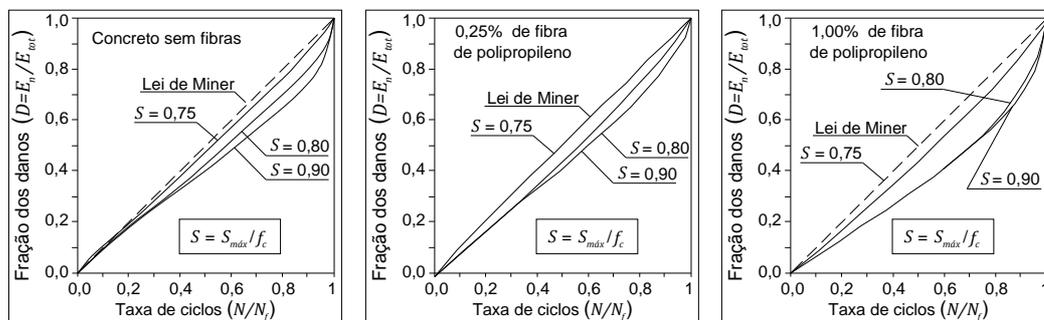


Figura 3.9 – Dano acumulado para o concreto com fibras de polipropileno (Grzybowski e Meyer, 1993).

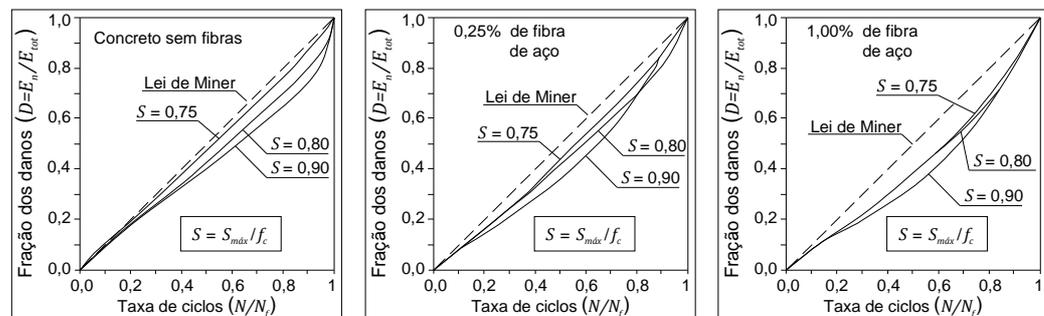


Figura 3.10 – Dano acumulado para o concreto com fibras de aço (Grzybowski e Meyer, 1993).

A partir desses histogramas pode-se observar que o grau de não linearidade aumenta com o aumento da relação entre tensões, independente do tipo ou volume de fibras. Inicialmente o dano acumula a uma taxa pequena, ao se aproximar da ruptura o dano acumulado aumenta rapidamente. A não linearidade aumenta com o aumento da quantidade de fibras e é mais acentuada nos concretos com fibras de aço.

Paskova e Meyer (1997) apresentaram uma continuação do estudo de Grzybowski e Meyer (1993), onde as variáveis estudadas foram a resistência à compressão (28, 34 e 48 MPa), o tipo de fibra, aço ou polipropileno, o volume de fibras (0,00; 0,25; 0,50; 0,75 e 1,00%) e a razão entre tensões  $S_{m\acute{a}x}/f_c$  que variou de 0,80 a 0,95. Para cada ponto de ensaio cinco corpos de prova cúbicos, de 102 mm de aresta, foram ensaiados sob idênticas condições. Os ensaios foram realizados com controle de carga com a aplicação de um sinal triangular a uma frequência de 1 Hz. Algumas observações podem ser tomadas, tais como o número de ciclos até a ruptura e a energia total dissipada.

A resistência à compressão e a quantidade de fibras melhoram o desempenho à fadiga do concreto. As fibras de aço aumentam significativamente a capacidade de absorção de energia. Os resultados mostram que para volumes de fibras de até 1% as fibras de aço melhoram o desempenho do concreto à fadiga até duas vezes mais do que as fibras de polipropileno.

As diferenças entre o estudo de Grzybowski e Meyer (1993) e o de Paskova e Meyer (1997), no tocante à melhoria do desempenho à fadiga quanto ao conteúdo de fibras, onde para os primeiros autores nos maiores conteúdos o desempenho à fadiga piorou, no estudo seguinte quanto maior o conteúdo de fibras, melhor o desempenho. A explicação encontrada pelos autores para o desempenho pior, com maior conteúdo de fibras, no primeiro estudo, se deve a dificuldade de compactação dos corpos de prova com maiores quantidade de fibras, provavelmente gerando imperfeições iniciais.

Ainda sobre o estudo de Paskova e Meyer (1997), os resultados para a capacidade de dissipação de energia apresentam uma dispersão estatística muito menor em comparação ao número de ciclos. Os resultados para os concretos com fibras foram menos dispersos que os do concreto sem fibras, assim como os resultados para as fibras de aço foram menos dispersos do que para as fibras de polipropileno.

O melhor desempenho das fibras de aço em comparação ao das fibras de polipropileno tem algumas explicações. Primeiro, as fibras de aço com ganchos nas extremidades promovem uma aderência melhor do que as fibras de polipropileno podem promover por meio da sua área específica maior. Segundo, durante o arrancamento de uma fibra de polipropileno o único aumento de resistência é devido à força de atrito. O arrancamento de uma fibra de aço envolve também a deformação plástica da fibra, o que requer um trabalho consideravelmente maior. O terceiro fator e provavelmente mais significativo que diferencia o desempenho de ambas as fibras é seu diferente módulo de

elasticidade. Levando-se em conta que o módulo de elasticidade da fibra de polipropileno é consideravelmente menor que o da matriz de concreto, as fibras desenvolvem apenas uma parte do seu potencial total, mesmo quando o material se aproxima da ruptura. As fibras de aço por sua vez se tornam mais eficientes imediatamente após o início da fissuração na matriz, desde que haja um volume percentual de fibras suficiente e que estas estejam bem aderidas ao concreto.

As fibras têm um efeito semelhante ao do confinamento lateral, contribuindo para a não fissuração, retardando o acumulo de dano. As fibras podem transferir mais tensões, desse modo retardando os processos de arrancamento e descolamento, e melhorando o comportamento do compósito sob cargas repetitivas. O aumento do volume de fibras também afeta negativamente a trabalhabilidade, requerendo uma maior compactação a fim de evitar uma queda na qualidade do concreto. Essa tendência é mais pronunciada nas fibras de polipropileno do que nas de aço para um mesmo volume de fibras. A explicação se deve ao diâmetro muito pequeno e grande área de superfície das fibras de polipropileno que consomem mais água livre.

Paskova (1994) explica a influência do nível de tensão no desempenho à fadiga do concreto com fibras. Primeiramente o aumento da energia para menores níveis de tensão ocorre com o processo de descolamento do agregado (fissuração da zona de transição) aliado à fissuração da argamassa. Na presença de fibras a energia absorvida também aumenta com o decréscimo do nível de tensão. Sob um período curto a fadiga ( $N < 10^3$ ) a baixos níveis de tensão as fibras conduzem a uma dissipação de energia muito maior do que a altos níveis de tensão. Esse fato pode ser explicado levando-se em consideração a deterioração física do material durante os ciclos de carregamento.

Em altos níveis de tensão a intensidade da carga aplicada excede a tensão de tração da argamassa. Nos primeiros ciclos de carregamento se inicia a fissuração da argamassa. A tensão na ponta da fissura geralmente é suficiente para superar a resistência das fibras em um curto ciclo de cargas, desse modo reduzindo-se a eficiência das fibras em altos níveis de tensão. Nos baixos níveis de tensão o processo de dano inicia-se com a fissuração da argamassa em conjunto com a fissuração da zona de transição. Se nesse caso a ponta de uma fissura é interceptada por uma fibra cuja resistência excede a tensão na ponta da fissura, a fissura será interrompida e mais ciclos de carregamento serão necessários para permitir que algumas fissuras atravessem as fibras. Desse modo para baixos níveis de tensão há uma maior eficiência da resistência

promovida pelas fibras e por consequência a quantidade de energia dissipada aumenta.

Cachim *et al.* (2001) avaliaram o desempenho de concretos com e sem fibras, submetidos à fadiga em compressão com a intenção de prever a vida à fadiga usando o histórico de deformação obtido dos ensaios. Os concretos com dois tipos de fibras com 30 e 60 mm de comprimento e com ganchos nas extremidades, com 0,5% de volume foram ensaiados e seus desempenhos foram comparados. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm. Os ensaios foram realizados com controle de carga aplicando-se um sinal senoidal e a frequência de carregamento utilizada foi de 2,5 Hz. A razão entre tensões  $S_{m\acute{a}x}/f_c$  utilizadas variou de 0,60 a 0,90.

O programa experimental apresentado pelos autores aponta algumas características importantes do comportamento do concreto com e sem fibras submetido à fadiga em compressão. Foi observado que as fibras de 30 mm de comprimento aumentaram a vida à fadiga – o número de ciclos até a ruptura – do concreto, enquanto que as de 60 mm reduziram comparadas ao concreto sem fibras. A menor vida à fadiga para o concreto com fibras mais longas pode ser explicada por dois fatores: o primeiro estaria relacionado com o fato de que o fenômeno da fadiga é função de imperfeições iniciais, tais como microfissuras ou vazios existentes no concreto. Então, a presença de fibras, em especial as de maior comprimento, podem ser uma causa adicional de imperfeições criando pontes entre os agregados e uma tensão residual inicial. Um efeito do comprimento das fibras relativo às dimensões do corpo de prova pode haver ocorrido, visto que para as fibras com 60 mm a razão entre o diâmetro do corpo de prova e o comprimento da fibra foi de 2,5, o que é um valor relativamente baixo. Outro fator surge do fato de que as fibras utilizadas inicialmente estavam coladas em grumos que deveriam se separar durante a mistura do concreto. Contudo, foi observado que algumas das fibras permaneceram coladas criando uma “fibra muito larga”, aumentando o problema da formação de ponte entre os agregados.

A existência de uma envoltória de deformações específica também foi observada, o que significa que a curva monotônica de tensão *versus* deformação específica pode ser usada como um critério de ruptura por deformação para concreto submetido à fadiga (Figura 3.11). A adição das fibras promoveu um aumento na deformação de ruptura.

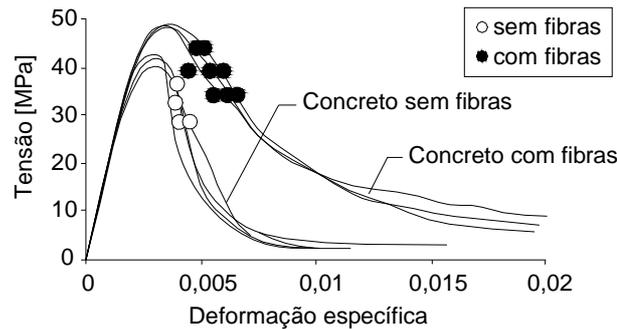


Figura 3.11 – Comparação da máxima deformação específica de ruptura dentro de uma envoltória devida a carregamento monotônico (Cachim *et al.*, 2002).

Esses autores (Cachim *et al.*, 2002) também observaram que o módulo de fadiga, definido como a razão entre a faixa de tensões e a correspondente deformação específica dentro de um ciclo de carregamento, pode ser uma propriedade interessante para modelar ciclos individuais de carga e descarga. A taxa de variação do módulo de fadiga durante o ensaio está fortemente correlacionada com o número de ciclos até a ruptura, de maneira análoga à taxa de fluência secundária  $\dot{\epsilon}_{sec}$ .

Yin e Hsu (1995) realizaram ensaios de fadiga em compressão uniaxial e biaxial em placas de concretos com fibras de aço (15 cm x 15 cm x 3,8 cm), onde o comprimento das fibras foi de 25 mm e esbeltez 60. As variáveis estudadas foram a razão entre as tensões principais ( $\sigma_2 / \sigma_3 = 0,0; 0,2; 0,5; 1,0$ ) e a tensão máxima. A frequência de carregamento foi de 1 Hz com um sinal triangular. Esses autores reportaram que a vida à fadiga de concreto com fibras na compressão biaxial é maior do que na compressão uniaxial para todas as variáveis estudadas, e a adição de fibras altera o modo de ruptura do concreto: ruptura vertical (*splitting*) para os concretos sem fibras e ruptura cisalhante (*faulting*) para os concretos com fibras.

### 3.7. Comentários finais

Foi constatado que nas décadas de 80 e 90 houve uma evolução nos estudos de fadiga em compressão do concreto convencional, sem fibras, onde foi levado em consideração o efeito da frequência de carregamento.

Em paralelo, o uso de fibras no concreto desenvolveu-se bastante nas últimas décadas, visto que a adição de fibras pode melhorar significativamente o

comportamento do concreto à tração. Além de um melhor desempenho à fadiga e controle de fissuração.

Inúmeros estudos buscaram avaliar o desempenho à fadiga em flexão de concretos com fibras em comparação a um número limitado de estudos de fadiga em compressão de concretos com fibras. Além disso, a influência da frequência de carregamento pouco foi abordada nos estudos de fadiga de concretos com fibras, especialmente com respeito à fadiga em compressão.

O foco deste trabalho foi o estudo concomitante de cinco parâmetros: concreto, compressão, fadiga, fibras e frequência.