

# Estado-da-arte dos betões reforçados com Fibras

Joaquim A. O. Barros<sup>1</sup>

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal*

## RESUMO

O betão reforçado com fibras (*BRF*) é um material compósito recente em aplicações de Engenharia Civil. A capacidade de absorção de energia, a ductilidade, o comportamento sob fendilhação e a resistência às acções dinâmicas e estáticas são melhoradas pela correcta adição de fibras à composição dos materiais de matriz cimentícia. As principais alterações introduzidas pelo reforço das fibras (principalmente fibras de aço e de vidro) no comportamento destes materiais são resumidamente descritas neste trabalho. São também apresentadas as principais aplicações dos *BRF*.

## ABSTRACT

The fiber reinforced concrete is a composite material with an increasing number of applications on engineering structures. The fracture energy, the ductility, the cracking behaviour and the strength characteristics under dynamic loads are significantly improved by adding fibers to the concrete composition. The main changes introduced by fiber reinforcement in the behaviour of the cement based materials are briefly described in this work. The principal applications of the fiber reinforced concrete are also presented.

## PREÂMBULO

Este artigo faz parte de uma série de trabalhos em que se descreve a análise experimental efectuada com betões reforçados com fibras (aço e vidro). Para uma melhor compreensão dos assuntos que serão discutidos nos próximos artigos, resolveu-se, neste primeiro trabalho, fazer um "*state-of-the-art*" do comportamento dos betões reforçados com fibras de vidro (*BRFV*) e de aço, curtas (não contínuas) e distribuídas aleatoriamente.

## 1 - INTRODUÇÃO

O comportamento dos *BRF* depende das propriedades dos elementos constituintes da matriz (betão propriamente dito), das propriedades mecânicas e características geométricas das fibras e da composição e processo de fabrico destes compósitos. Das propriedades mecânicas das fibras têm especial relevo a sua resistência e rigidez, enquanto a esbelteza ("*aspect-ratio*" na nomenclatura inglesa), a sua percentagem (em volume,  $V_f$ , ou em peso,  $W_f$ , da mistura) e as

---

1 - Professor Auxiliar

características da superfície são os parâmetros geométricos das fibras com maior importância na sua capacidade reforçante. A esbelteza da fibra é a razão entre o seu comprimento e o seu diâmetro ( $l_f/d_f$ ). Se a fibra não tem secção circular, determina-se o diâmetro de uma secção circular de área igual à área da secção real da fibra. No Quadro 1 apresenta-se valores característicos das propriedades principais das fibras de aço e de vidro utilizadas em aplicações correntes.

Quadro 1 - Valores característicos das propriedades principais de fibras de aço e vidro (Beaudoin 1990).

Fibra	Massa volúmica [g/cm <sup>3</sup> ]	Resistência à tracção [MPa]	Módulo de elasticidade [MPa]	Extensão última [%]
Aço	7.8	1000 a 3000	200000	3 a 4
Vidro	2.6	2000 a 3000	80000	2 a 3.5

As fibras podem apresentar dois modos de rotura: por cedência ou por deslizamento relativamente à matriz envolvente. Para se aumentar a resistência do compósito deve-se empregar fibras de elevada resistência e de esbelteza suficientemente elevada, por forma a que a rotura do compósito seja pela cedência das fibras. Todavia, aumentos significativos de resistência de compósitos reforçados com fibras curtas e distribuídas aleatoriamente só se alcançam a expensas de elevadas percentagens de fibras ( $V_f > 5\%$ ), de que é exemplo o *SIFCON* ("*Slurry Infiltrated Fiber Concrete*") (Balaguru 1992). Utilizando-se métodos convencionais de amassadura e não se adequando convenientemente a composição do compósito, a esbelteza e a percentagem de fibras devem ser limitadas por forma a que as propriedades do compósito não sejam adversamente afectadas pela diminuição da trabalhabilidade da mistura, que se observa com o aumento do valor daquelas características das fibras. Além disto, o modo de rotura dos compósitos por cedência das fibras impede que se obtenha o principal benefício do reforço das fibras, que é o considerável aumento da capacidade de absorção de energia do material. Por estes factos, a esbelteza das fibras não deve ultrapassar o valor de 100 e a percentagem de fibras de aço e de vidro não deve exceder os 3% e os 6% em volume da composição, respectivamente.

## 2 - FABRICAÇÃO E APLICAÇÃO

### 2.1 - Composições

A maior parte da metodologia convencional de fabricação e de aplicação dos betões simples, (*BS*), entendidos como não incluindo qualquer tipo de reforço, é aplicável aos betões reforçados com fibras, com pequenas adaptações. Para que as fibras sejam eficazes em termos de reforço é necessário que se impeça a sua aglomeração durante o processo de amassadura da mistura (ACI 1986b). O aumento da esbelteza e da percentagem de fibras, tamanho e quantidade de inertes graúdos intensifica a tendência para a aglomeração das fibras, diminuindo a trabalhabilidade da mistura (Swamy 1984, ACI 1986b). Caso se pretenda aumentar a percentagem de fibras sem comprometer a trabalhabilidade da mistura será necessário utilizar composições de granulometria mais fina, fibras de maior rigidez e de menor esbelteza.

A trabalhabilidade da mistura pode ser aferida por qualquer dos ensaios convencionais (ACI 1984a). Contudo, o ensaio do cone de Abrams só deve ser aplicado a misturas que desenvolvam um abaixamento superior a 50 mm (Balaguru 1992). Este ensaio pode ser ainda

usado para avaliar a trabalhabilidade entre diferentes composições de *BRF*. Os ensaios que medem o tempo de fluidez da mistura sob vibração, de que são exemplo o ensaio do cone invertido e o “*VB test*”, são mais adequados (ASTM 1991) para os *BRF*. Todavia, o ensaio do cone invertido só deve ser aplicado a misturas que apresentem um abaixamento inferior a 100 mm.

A granulometria dos inertes depende do produto a manufacturar. A forma e rugosidade dos inertes depende também das fibras a utilizar, devendo ser tão menos angulosos e rugosos quanto mais flexível for a fibra (PCI 1981, ACI 1986b, Barros 1992).

Composições típicas de betão reforçado com fibras são apresentadas no Quadro 2. Constata-se que se aplica um pouco mais de cimento e de inertes finos comparativamente com composições de *BS*.

Quadro 2 - Composições típicas para o betão de resistência normal reforçado com fibras (ACI 1986b, Balaguru 1992).

	Argamassa	Betão com inertes de dimensão máxima		
		10 mm	20 mm	
Cimento ( $\text{Kg/m}^3$ )	400 a 700	350 a 600	300 a 550	
Água/Cimento	0.30 a 0.45	0.35 a 0.45	0.40 a 0.50	
Rela. de inertes finos relativamente aos inertes grossos (%)	100	45 a 60	45 a 55	
Aditivo introdutor de ar (%)	7 a 10	4 a 7	4 a 6	
Volume de fibras (%)	Aço, deformadas	0.5 a 1.0	0.4 a 0.9	0.3 a 0.8
	Aço, lisas	1.0 a 2.0	0.9 a 1.8	0.8 a 1.6
	Vidro	2 a 5	0.3 a 1.2	

É normal utilizar-se também aditivos tais como pozolanas, escórias, cinzas volantes e outros plastificantes redutores de água, dado que permitem diminuir a percentagem de água e, conseqüentemente, aumentar a resistência do compósito, sem prejuízo da trabalhabilidade da mistura (ACI 1986b, Refai 1986). A microsilica é por vezes empregue, dado que além de aumentar a resistência da matriz, melhora os mecanismos de reforço das fibras, devido ao melhoramento das propriedades da zona de interface fibra-matriz (Balaguru 1992).

## 2.2 - Métodos de amassadura e de aplicação

Os métodos de amassadura poderão variar consoante o tipo de fibra a usar e as quantidades de betão a fabricar (Swamy 1984, ACI 1986b, Balaguru 1992). O importante é assegurar-se um boa dispersão das fibras, pelo que o tempo de amassadura é, normalmente, superior ao despendido na amassadura dos betões simples.

Para pequenas quantidades de *BRF* é normal misturar-se os componentes do betão segundo os métodos convencionais, sendo as fibras o último componente a ser introduzido na mistura. A introdução das fibras deve ser realizada lentamente, de forma a evitar a sua aglomeração. As fibras também podem ser adicionadas juntamente com os inertes maiores e uma percentagem da água, antes da introdução dos restantes constituintes da mistura. Desta forma, o efeito mecânico do atrito e choque entre os inertes e as fibras auxilia a desagregação e distribuição destas. Devido à flexibilidade da fibra de vidro, esta última metodologia não é recomendada para os betões reforçados com este tipo de fibras, dado que estas são danificadas durante a amassadura. Devido ao maior atrito interno das misturas de *BRF*, não se deve exceder os 80% da capacidade da betoneira.

Para grandes quantidades de betão pode-se recorrer à tecnologia do betão pronto transportado em autobetoneiras. As fibras são adicionadas ao betão pronto introduzindo-as na

autobetoneira pouco antes da aplicação do *BRF*. Sempre que tal seja possível, as fibras devem ser introduzidas na autobetoneira por intermédio de passadeiras rolantes, dado que estas facilitam a separação das fibras. Se no estaleiro da obra não estiverem disponíveis passadeiras rolantes, as fibras podem ser introduzidas na autobetoneira por meio do despejo de sacos de fibras. Em qualquer dos métodos a autobetoneira deve rodar na sua máxima velocidade durante a inserção das fibras, não se devendo introduzir mais do que 45 Kg de fibras por minuto. Após a adição das fibras, o tambor da autobetoneira deve rodar durante mais 50 rotações à velocidade normal (Balaguru 1992). Para elevadas quantidades de *BRF* recomenda-se que sejam realizadas algumas composições com diferentes metodologias de amassadura e determinar as suas propriedades, de forma a afinar o processo de amassadura indicado aos objectivos requeridos.

As técnicas de vibração e compactação a utilizar nos *BRF* estão, em princípio, submetidas aos mesmos condicionalismos exigidos aos betões convencionais. Verifica-se, porém, que as misturas de *BRF* requerem geralmente mais algum tempo de vibração para homogeneizar e consolidar as misturas nos moldes. Apesar do uso da vibração interna controlada ser aceitável, a vibração aplicada aos moldes e à superfície exposta é preferível para inibir a aglomeração das fibras (ACI 1986b).

No que se refere aos procedimentos de cura dos *BRF* utilizam-se os aplicados nos betões convencionais.

### 3 - CONCEITOS BÁSICOS

Nos materiais compósitos reforçados com fibras contínuas alinhadas segundo a direcção da carga e perfeitamente aderentes à matriz utiliza-se, usualmente, a lei das misturas da mecânica dos materiais compósitos para determinar algumas das propriedades do compósito não fendilhado, admitindo-se comportamento linear dos seus elementos constituintes (Beaudoin 1990, Balaguru 1992). Segundo esta lei, uma propriedade do compósito é função da correspondente propriedade dos seus elementos constituintes, na proporção das respectivas percentagens volumétricas. Contudo, na maior parte das aplicações de *BRF* utiliza-se fibras curtas, distribuídas aleatoriamente e não perfeitamente aderentes ao betão, pelo que o reforço efectivo das fibras não é proporcional à sua percentagem volumétrica. Para se adaptar a lei das misturas aos compósitos reforçados com este tipo de fibras, introduziu-se factores que atendem ao facto das fibras não se orientarem todas com a direcção da tensão principal de tracção ( $\eta_0$ ), serem descontínuas e, por isso mesmo, apresentarem concentração de tensões nas suas extremidades ( $\eta_l$ ) e têm ainda em conta a forma geométrica da fibra e suas propriedades de aderência ( $\eta_b$ ). Expressões com diferente grau de complexidade têm sido propostas para avaliar estes factores (Swamy 1981, Lim 1987, Beaudoin 1990, Majumdar 1991). Segundo Lim *et al.* (Lim 1987), o factor de comprimento da fibra,  $\eta_l$ , determina-se por intermédio da seguinte expressão:

$$\eta_l = \begin{cases} 0.5 & \text{para } l_f \leq l_c \\ 1 - \frac{l_c}{2l_f} & \text{para } l_f > l_c \end{cases} \quad (1)$$

em que  $l_f$  e  $l_c$  são o comprimento real e crítico da fibra, respectivamente. O comprimento crítico da fibra é o necessário para que, desenvolvendo-se tensões  $\tau_{fu}$  na interface fibra-matriz

ao longo do comprimento de embebimento da fibra ( $l/2$ ), seja alcançada a sua tensão de rotura,  $\sigma_{fu}$ , num ensaio de arranque, isto é,

$$l_c = 0.5 \frac{\sigma_{fu} d_f}{\tau_{fu}} \quad (2)$$

A tensão tangencial máxima que se desenvolve na interface fibra-matriz,  $\tau_{fu}$ , pode ser determinada por intermédio de ensaios de arranque (Stroeven 1979, Lim 1987, Gopalaratnam 1987b). Para Cox (Swamy 1981),  $\eta_l$  deve ter em conta, tanto as propriedades geométricas das fibras e sua distribuição na matriz, como as propriedades mecânicas das fibras, da matriz e da interface fibra-matriz, pelo que propõe a seguinte expressão:

$$\eta_l = 1 - \frac{\tanh(\beta l_f / 2)}{\beta l_f / 2} \quad (3a)$$

em que

$$\beta = \sqrt{\frac{2\pi G_m}{E_f A_f \ln(S_f / r_f)}} \quad (3b)$$

sendo  $G_m$  o módulo de elasticidade transversal da matriz,  $E_f$ ,  $A_f$  e  $r_f$  o módulo de elasticidade, a área da secção e o raio da fibra e  $S_f$  a distância média entre as fibras em *mm*,

$$S_f = 25 \left( \frac{d_f}{V_f l_f} \right)^{1/2} \quad (3c)$$

Quanto ao factor de orientação das fibras são propostas as duas expressões seguintes (Lim 1987):

$$\eta_\theta = \frac{1}{1024 \bar{\theta} \bar{\rho}} (12 \bar{\rho} + 8 \sin 2 \bar{\rho} + \sin 4 \bar{\rho}) (12 \bar{\theta} + 8 \sin 2 \bar{\theta} + \sin 4 \bar{\theta}) \quad (4a)$$

e

$$\eta_\theta = \sin \bar{\theta} \sin \bar{\rho} / (\bar{\theta} \bar{\rho}) \quad (4b)$$

em que,

$$\bar{\theta} = \sin^{-1} (h / l_f) \leq \frac{\pi}{2} \quad (4c)$$

$$\bar{\rho} = \sin^{-1} (b / l_f) \leq \frac{\pi}{2}$$

sendo  $h$  e  $b$  a altura e a largura da secção do elemento. A expressão (4a) utiliza-se na determinação do módulo de elasticidade do compósito, enquanto a expressão (4b) aplica-se na quantificação da extensão de início da fendilhação do compósito, sua resistência e na determinação da sua capacidade de retenção de tensões de tracção quando fendilhado. No que se refere ao parâmetro  $\eta_b$ , este varia entre 1.0 e 1.2. Swamy *et al.* (Swamy 1981) constataram que variando  $\eta_b$  de 1.0 para 1.2, a resistência última à flexão apenas variava em 2%, pelo que diversos autores não têm em conta a influência deste factor. Introduzindo-se os factores de comprimento e orientação da fibra (desprezando o factor de aderência da fibra) na lei das misturas, o módulo de elasticidade do compósito,  $E_{cp}$ , e sua resistência,  $\sigma_{cu}$ , obtêm-se por intermédio das seguintes expressões:

$$E_{cp} = \eta_l \eta_\theta V_f E_f + E_m (1 - V_f) \quad (5)$$

e

$$\sigma_{cu} = \eta_l \eta_0 V_f \sigma_{fu} + \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (6)$$

em que  $E_m$  e  $\sigma_{mu}$  são o módulo de elasticidade e a tensão resistente da matriz. Como a percentagem volumétrica de fibras não ultrapassa geralmente os 5%, o módulo de elasticidade e a resistência do compósito são da mesma grandeza das correspondentes propriedades apresentadas pela matriz. Após o início da fendilhação do betão, a capacidade resistente deste material diminui acentuadamente com a deformabilidade de tracção imposta. O volume crítico de fibras,  $V_f^{crit}$ , é o volume de fibras que permite sustentar a carga aplicada ao compósito no início da sua fendilhação, sendo determinado por intermédio da seguinte expressão (Balaguru 1992):

$$V_f^{crit} = \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_{mu} + \eta_l \eta_0 (\sigma_{fu} - \sigma'_{fu})} \quad (7)$$

em que  $\sigma'_{fu}$  é a tensão nas fibras no início da fendilhação. Para as fibras de aço e de vidro  $V_f^{crit}$  varia entre 1% a 3%.

## 4 - COMPORTAMENTO

### 4.1 - Capacidade de absorção de energia dum material de matriz cimentícia

Nos betões reforçados com fibras, a energia necessária para vencer os mecanismos de reforço das fibras, que se estabelecem após a fendilhação da matriz é muito superior à energia dissipada na fractura da matriz. Por este facto, a capacidade de absorção de energia é a principal propriedade beneficiada pelo reforço das fibras (Gopalaratnam 1987a, Wang 1989, Barros 1992). A capacidade de absorção de energia aumenta com a percentagem, esbelteza e grau de fixação das fibras à matriz. Contudo, o comprimento da fibra deve ser limitado, por forma a que durante a fendilhação do compósito as fibras cedam por deslizamento e não pela sua rotura.

#### 4.1.1 - Índices de tenacidade

Nos betões reforçados com fibras é corrente determinarem-se os denominados índices de tenacidade que traduzem a capacidade de absorção de energia do compósito até determinada deformabilidade. Na Figura 1 apresenta-se os métodos mais utilizados na quantificação deste índices. Em todos estes métodos a energia absorvida pelo provete é calculada por intermédio do diagrama carga-flecha registado em ensaio de flexão com provete prismático, sob quatro pontos de carga com controlo de deslocamentos. O primeiro índice a ser proposto foi o  $I_{(ACI)Old}$  (ver Figura 1a), que traduz a relação entre a energia absorvida até à deformação de 1.9 mm e a energia absorvida até ao início da fendilhação. Este índice tem, contudo, o inconveniente de ser necessário determinar, com rigor, a deformação correspondente ao início da fendilhação, sempre difícil de ser avaliada. Para evitar este inconveniente, o comité 544 do ACI propôs, mais tarde, o índice  $I_t$  que representa a capacidade de absorção de energia de determinado  $BRF$  relativamente à do correspondente betão simples e é determinado por intermédio do cociente entre a área  $F-\delta$  do  $BRF$  e a área  $F-\delta$  do correspondente betão simples. Contudo, para se determinar este índice é necessário levar o ensaio até ao completo esgotamento da capacidade de carga do provete, difícil de se conseguir nos provetes fibrosos, dado que apresentam uma longa cauda na fase de

amolecimento. Por sua vez o *ASTM C 1018* propõe para índices de tenacidade os  $I_5, I_{10}, I_{30}, I_{50}$  e  $I_{100}$  que representam a relação entre a capacidade de absorção de energia registrada até determinado limite de deformação, múltiplo da observada no início da fendilhação, e a capacidade de absorção de energia determinada até ao início da fendilhação (ver Figura 1b).

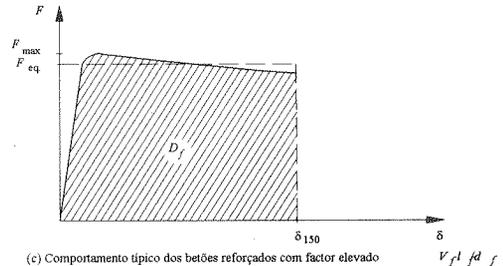
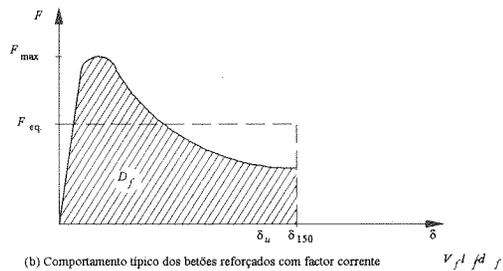
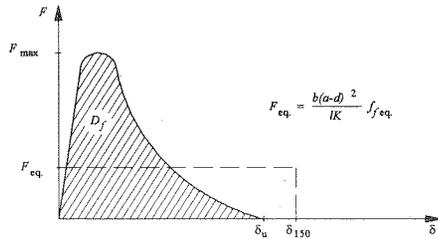
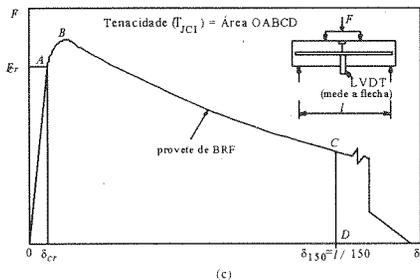
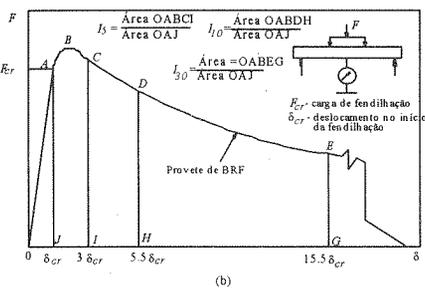
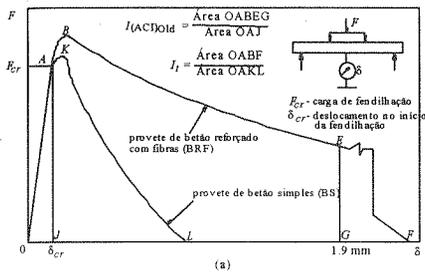


Figura 1 - Métodos propostos pelo comité 544 do *ACI* (a), *ASTM C1018* (b) e *JCI SF4* (c) para quantificar a capacidade de absorção de energia dos *BRF* (Gopalaratnam 1991).

Figura 2 - Resistência equivalente em flexão de compósitos que apresentaram diferentes tipos de resposta  $F-\delta$  em ensaios de flexão sob controlo de deslocamentos (Jalil 1994).

Se o material apresentar comportamento elasto-perfeitamente plástico, os índices  $I_5, I_{10}, I_{30}, I_{50}$  e  $I_{100}$  assumem valores de 5, 10, 30, 50 e 100, respectivamente, (ver Figura 3). Os  $I_{50}$  e  $I_{100}$  só são determinados em betões reforçados com elevada percentagem de fibras, como é o caso do *SIFCON*. Tal como o índice  $I_{(ACI)01a}$ , os índices  $I_5, I_{10}, I_{30}, I_{50}$  e  $I_{100}$  requerem que se determine, com rigor, a deformação correspondente ao início da fendilhação.

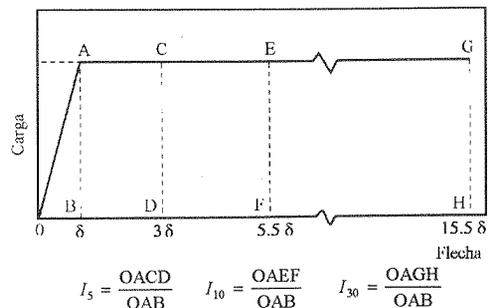


Figura 3 - Carga-deformação em material elasto-perfeitamente plástico.

Por este facto, a norma Japonesa (JSCE SF4) propõe o método representado na Figura 1c, segundo o qual a tenacidade do material é a área sob a curva  $F-\delta$  até ao deslocamento  $\delta_{150}$ , sendo  $\delta_{150} = l/150$  em que  $l$  é o vão do provete. Esta norma propõe, ainda, a quantificação de uma grandeza denominada de resistência equivalente em flexão,  $f_{feq}$ , que pode ser obtida por intermédio de ensaios de flexão sob três ou quatro pontos de carga e cuja expressão se traduz por,

$$f_{feq} = K \frac{l}{b(d-a)^2} \frac{D_f}{\delta_{150}} \quad (8)$$

em que  $K = 1.5$  e  $K = 1.0$  nos ensaios sob 3 e 4 pontos de carga, respectivamente, e  $D_f$  é a área sob a curva  $F-\delta$  até ao deslocamento  $\delta_{150}$  (ver Figura 2). Da expressão (8) e da Figura 2 constata-se que a resistência equivalente em flexão corresponde à altura dum rectângulo de área  $D_f$  e largura  $\delta_{150}$ . Quanto mais dúctil for o material maior será  $f_{feq}$ .

#### 4.2 - Compressão

Na maior parte dos casos a resistência à compressão aumenta ligeiramente com a percentagem e esbelteza das fibras, sendo mais significativo o aumento registado com a percentagem do que com a esbelteza. Verifica-se, ainda, que as fibras com melhores propriedades de fixação à matriz, de que são exemplo as fibras com extremidades dobradas ou alargadas, conduzem a maiores aumentos da resistência à compressão (Narayanan 1986, Otter 1986). A extensão correspondente à resistência à compressão também aumenta ligeiramente com estas características das fibras. É, contudo, após o pico de carga (ramo de amolecimento em compressão) que mais se nota o efeito do reforço das fibras, sendo a resposta deformacional tanto mais dúctil quanto maior for a percentagem de fibras, conforme se constata na Figura 4. Na fase de amolecimento em compressão a esbelteza e a forma geométrica da fibra têm menor efeito que a sua percentagem.

O aumento da ductilidade proporcionado pelo reforço das fibras depende também das propriedades da matriz, dado que a quantidade de fibras necessária para se garantir determinada ductilidade será tanto maior quanto mais resistente for a matriz. Quando as fibras se dispõem preferencialmente na direcção ortogonal à da carga, o aumento da ductilidade, da resistência à compressão e da sua correspondente extensão é mais significativo (Homrich 1987). Nos betões reforçados com elevada percentagem de fibras, de que é exemplo o *SIFCON*, o aumento da ductilidade e da resistência é bastante significativo (Mondragon 1987, Homrich 1987).

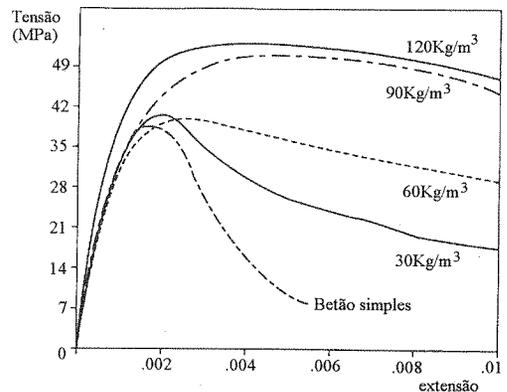


Figura 4 - Influência da percentagem de fibras na relação tensão-extensão, registada em ensaios de compressão em provetes de betão reforçado com fibras de aço *Dramix* 50/50 (Balaguru 1992).

### 4.3 - Tracção

Na Figura 5 representa-se a relação típica carga-deslocamento que se regista num ensaio de tracção uniaxial em provete de *BRF*. Comparativamente com a resposta de provetes de betão simples, a resposta de provetes de *BRF* apresenta um ramo descendente de menor declive (ramo III), uma deformação última ( $\delta_u$ ) mais elevada e uma maior amplitude do ramo não linear que se desenvolve entre o limite de proporcionalidade (*LP*) e o ponto de máxima carga (ramo II). Como as fibras que atravessam as microfendas, que se distribuem no material oferecem alguma resistência ao fecho destas, os *BRF* desenvolvem uma deformação residual maior que nos *BS*, conforme se constata na Figura 6.

A resistência à tracção aumenta com a percentagem, esbelteza e capacidade de fixação da fibra à matriz (Narayanan 1986). Todavia, para percentagem volumétrica de fibras de aço inferior a 2% a resistência à tracção não aumenta significativamente, excepto quando se utiliza microsilica, dado que nestes casos a resistência da interface fibra-matriz aumenta, melhorando os mecanismos de reforço das fibras (Dipsia 1987).

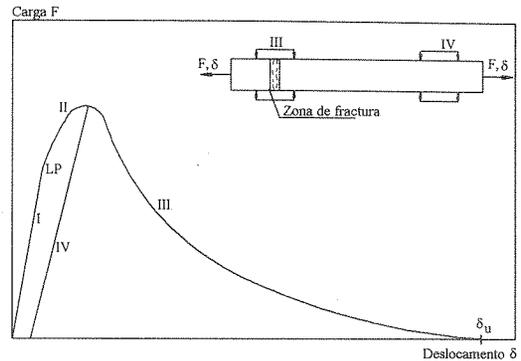
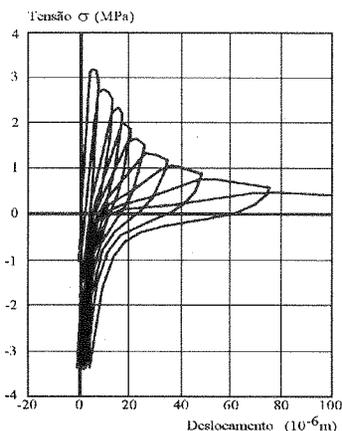
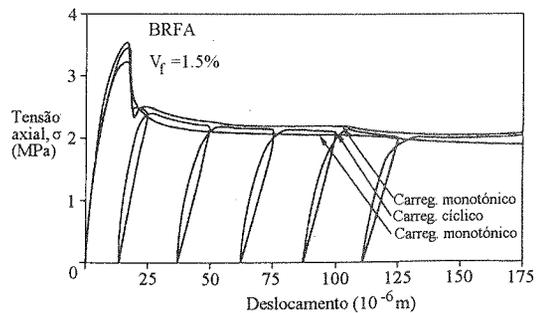


Figura 5 - Resposta carga-deslocamento num ensaio de tracção uniaxial sob controlo de deslocamentos.

A resistência à tracção depende consideravelmente do método de manufatura do compósito. Quanto mais eficaz for o método em termos de dispor a maior percentagem possível de fibras segundo a direcção das tensões de tracção, maior será o aumento da resistência à tracção. Valores da ordem dos 20 MPa são referidos para betões reforçados com 8% em volume de fibras de vidro manufacturados segundo o método do betão projectado (Majumdar 1991). Para provetes reforçados com percentagem de 5% em peso de fibras de vidro é corrente obterem-se resistências à tracção entre os 9 e 12 MPa (Bijen 1990).



(a)



(b)

Figura 6 - Relação tensão-deslocamento registada em ensaios cíclicos de tracção em provete de betão simples (Reinhardt 1986) (a) e de betão reforçado com fibras de aço (Gopalaratnam 1987a) (b).

#### 4.4 - Flexão

A Figura 7 inclui diagramas carga-flecha ( $F-\delta$ ) obtidos com ensaios de flexão em provetes de betão reforçados com diferente quantidade de fibras de aço *Dramix 50/50*.

Verifica-se que o aumento da resistência à flexão com a percentagem de fibras só é significativo para quantidades de fibras acima dos 60 Kg/m<sup>3</sup>. O uso de fibras em tais quantidades só é economicamente oportuno em zonas de elevada concentração de esforços, como sejam, por exemplo, os nós de pórticos e consolas curtas. Para quantidade de fibras inferior ao valor referido anteriormente, a resistência à flexão só aumenta significativamente se for adicionada microsilica à mistura. Todavia, o aumento da resistência à flexão é mais acentuado do que o aumento que ocorre na resistência à tracção e na resistência à compressão.

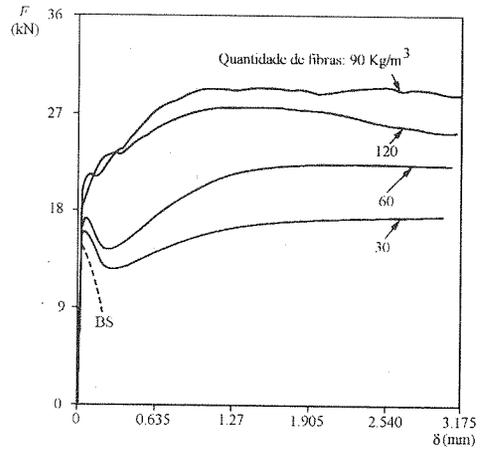


Figura 7 - Influência da quantidade de fibras na relação carga-flecha registada em ensaios de flexão sob três pontos de carga em prismas (350×100×100 mm<sup>3</sup>) de *BRFA* (Balaguru 1992).

Da Figura 7 constata-se que o comportamento pós-fendilhação é o mais beneficiado pelo reforço das fibras, justificando a utilização dos índices de tenacidade para evidenciar o efeito dos mecanismos de reforço das fibras. As fibras mais longas proporcionam maior aumento de resistência à flexão, dado que tendem a se alinhar segundo o eixo das peças.

Contudo, quanto mais comprida for a fibra mais difícil é a amassadura da mistura, pelo que acima de determinado limite do comprimento da fibra, a resistência pode ser adversamente afectada devido a deficiente compactação da mistura. Pode-se concluir que a resistência à flexão aumenta com a percentagem e esbelteza das fibras, isto é, com o factor  $V_f l_f / d_f$ , desde que se evite a aglomeração das fibras. Isto mesmo pode ser confirmado por intermédio da análise da Figura 8. Verifica-se que o aumento de  $V_f l_f / d_f$  de 40 para 120 proporciona um aumento da resistência à flexão de 25%. As fibras com extremidades dobradas proporcionam maior aumento de resistência à flexão do que o registado com fibras lisas (Balaguru 1992).

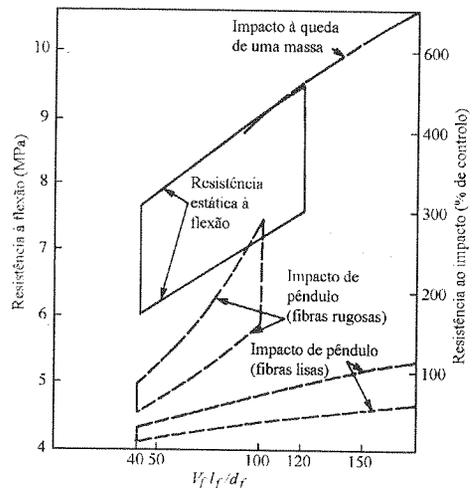


Figura 8 - Influência da percentagem volumétrica de fibras,  $V_f$  (%), e da esbelteza,  $l_f / d_f$ , na resistência à flexão e ao impacto dos *BRF* (Swamy 1984).

No cálculo orgânico de peças de betão armado submetidas a flexão despreza-se, usualmente, a resistência à tracção do betão. Se a peça for de betão armado reforçado com fibras, a resistência à tracção do *BRFA* poderá ser tida em conta, contribuindo para a maior capacidade de carga última da secção. Na Figura 9 representa-se, esquematicamente, alguns dos diagramas tipo usados na análise à flexão de peças de betão reforçado com fibras.

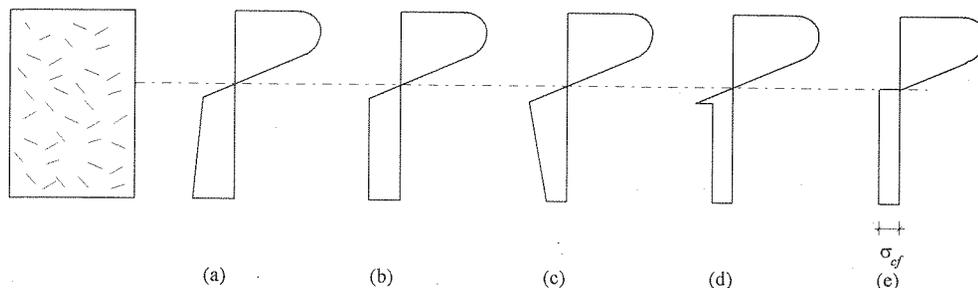


Figura 9 - Diagramas de distribuição de tensões em betões reforçados com fibras (Reinhardt 1979).

Para os betões reforçados com volume de fibras inferior ao volume crítico, o diagrama da Figura 9e é o mais recomendado. Contudo, a parcela de resistência à flexão devida à contribuição da resistência à tracção do betão fendilhado só deve ser tida em conta se  $V_f > 1\%$  (Balaguru 1992). No diagrama da Figura 9e,  $\sigma_{cf}$  é a resistência à tracção do betão fendilhado reforçado com fibras, determinada por intermédio da seguinte expressão (Swamy 1981):

$$\sigma_{cf} = \eta_0 \eta_l \eta_b 2\tau_{fu} \frac{l_f}{d_f} V_f \quad (9)$$

cujo significado das variáveis foi já apresentado.

A maior resistência à tracção e a maior integridade e atrito interno do *BRF* aumenta a resistência ao arranque dos varões, pelo que a capacidade flexional última de vigas armadas de *BRF* também aumenta. Contudo, nas vigas de betão armado reforçadas com percentagem de fibras correntemente utilizadas e apresentando modos de rotura por flexão, o aumento da capacidade de carga não ultrapassa, usualmente, 20% da registada nas correspondentes vigas de betão armado sem fibras. Os principais benefícios são a maior ductilidade, a menor deformabilidade, o menor espaçamento médio e de abertura das fendas sob determinada carga e a maior integridade dos elementos estruturais. Kormeling *et al.* (Kormeling 1980) constataram que o grau de redução da deformabilidade e do espaçamento médio e de abertura das fendas com o aumento do parâmetro  $V_f l_f / d_f$  diminui com o aumento da percentagem de armadura convencional. Swamy *et al.* (Swamy 1981) verificaram que a rigidez pós-fendilhação, observada na relação carga-deformação de vigas armadas reforçadas com fibras e submetidas a flexão, aumenta com a participação das fibras. Estes autores constataram que a maior capacidade de deformação à compressão do *BRFA* permite que as extensões na armadura longitudinal de tracção possam ser mais elevadas. Assim, a participação de fibras permite que vigas sobre-armadas ou vigas reforçadas com armaduras de elevada resistência desenvolvam um comportamento suficientemente dúctil, podendo a fendilhação e a deformabilidade serem controladas sob limites aceitáveis. As fibras inibem ainda a desintegração do betão comprimido e a encurvadura da armadura de compressão.

#### 4.5 - Corte

O modo de rotura por corte é frágil, sendo por isso de evitar. Para tal, utiliza-se correntemente estribos para absorver a maior parte dos esforços de corte instalados. Contudo, há situações em que é difícil e oneroso a aplicação de estribos. Zonas de elevada densidade de armadura em que a betonagem é difícil, estruturas de parede delgada em que é laboriosa a colocação de estribos sem dificultar a betonagem e elementos de reduzida altura em que os estribos são pouco eficazes são alguns dos exemplos em que as fibras podem substituir os estribos, pelo menos parcialmente.

Diversos trabalhos (Niyogi 1985, Swamy 1987, Ta'an 1990, Tan 1992, Swamy 1993, Casanova 1995) de análise experimental têm demonstrado que a resistência ao corte aumenta com a percentagem de fibras, especialmente com as de aço. Este aumento parece ser mais significativo nas vigas com  $s/d < 3$  do que para  $s/d > 3$  (ver Figura 10) em que  $s$  é o vão de corte, isto é, a distância entre o ponto de aplicação da carga e o apoio mais próximo do ponto de carga e  $d$  é a altura útil da secção da viga. De entre as fibras correntemente utilizadas, as de aço são as que garantem melhor comportamento sob acções de corte. De entre estas, as que melhor se fixam ao betão são as recomendadas (Bollana 1980).

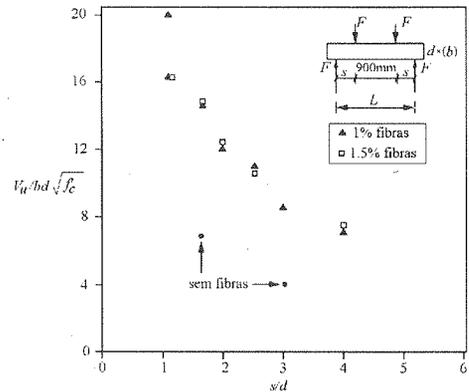


Figura 10 - Relação entre a resistência ao corte e o parâmetro  $s/d$  para vigas de BRFA de extremidades dobradas (Batson 1985).

O aumento da resistência ao corte com a participação das fibras deve-se, fundamentalmente, à maior resistência à tracção do BRF fendilhado. As fibras aumentam, ainda, a “resistência ao corte” das armaduras longitudinais de tracção (efeito de cavilha) (Swamy 1981). Uomoto *et al.* (Uomoto 1986) concluíram que a resistência residual à tracção do BRF fendilhado,  $\sigma_{cf}$  é o principal factor que deve ser tido em conta na simulação da contribuição das fibras para a resistência ao corte de vigas de betão armado só com armadura longitudinal e reforçado com fibras, pelo que sugerem a seguinte expressão:

$$\frac{\tau_u}{\sigma_{cf}} = 0.77 + \left( 0.90 - 9.6 \rho_s \right) \rho_s \frac{d f_{sy}}{s \sigma_{cf}} \quad (10)$$

em que  $\tau_u = V/(bd)$  é a tensão última de corte ( $V$  é o esforço de corte e  $b$  a largura da secção viga) e  $\rho_s, f_{sy}$  são a percentagem e tensão de cedência da armadura longitudinal, respectivamente.

#### 4.6 - Torção

A ductilidade e a resistência à torção aumentam com a percentagem e esbelteza das fibras, sendo o aumento mais significativo quando as peças incluem armaduras convencionais de resistência à torção (Craig 1984). Contudo, a esbelteza das fibras só desenvolve contributo significativo no aumento da ductilidade (Mansur 1982). A total substituição da armadura convencional de resistência à torção por fibras só é possível a expensas de elevada

percentagem de fibras, pelo que a participação destas em elementos submetidos a esforços de torção deve ter como principal objectivo aumentar a ductilidade e a resistência das peças armadas convencionalmente ou diminuir a percentagem de armadura de resistência à torção.

#### 4.7 - Resistência sob carregamento biaxial

São escassos os trabalhos relativos a ensaios experimentais com elementos de *BRF* submetidos a estado multiaxial de tensão (Kupfer 1969, Uyan 1986, Abdull 1989, Chern 1992).

No entanto, e tal como nos ensaios de compressão biaxial em provetes de *BS*, também nos provetes de *BRF* se verifica um aumento da capacidade resistente quando o material é submetido a estado biaxial de compressão, conforme se constata na Figura 11. Da análise desta figura verifica-se que, sob estado biaxial de compressão e para  $V_f=0.5\%$ , ocorre um considerável aumento da resistência do material, sendo insignificante o aumento da resistência acima desta percentagem de fibras. Tal como nos ensaios uniaxiais, nos multiaxiais também se regista um aumento significativo da ductilidade com a participação das fibras.

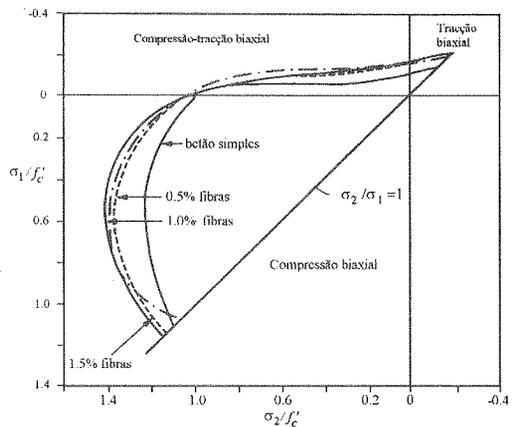


Figura 11 - Resistência biaxial de *BS* e de *BRFA*: fibras lisas de esbelteza de 100 (Abdull 1989).

#### 4.8 - Fadiga e impacto

O aumento da resistência à fadiga com a participação das fibras é uma das principais razões da aplicação de *BRF* em pavimentos que são submetidos a elevado número de ciclos de carga, como sejam, por exemplo, os pavimentos de edifícios industriais, de estradas e aeroportos.

A resistência à fadiga aumenta consideravelmente com a percentagem e esbelteza das fibras (Batson 1972, Kormeling 1980, Ramakrishnan 1987). As fibras devem ceder por deslizamento para se obter maior benefício do seu reforço. As fibras com extremidades dobradas são mais eficazes que as fibras lisas (Ramakrishnan 1987, Balaguru 1992). Na Figura 12 representa-se a relação entre a percentagem volumétrica de fibras de aço e a resistência à tracção em flexão, após 2 milhões de ciclos de carga.

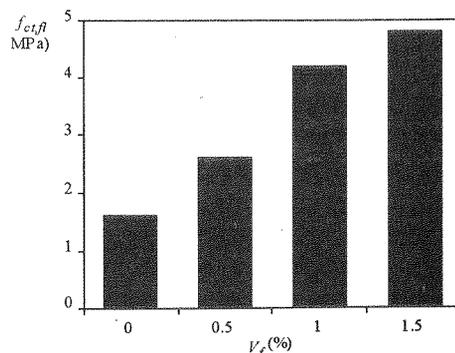


Figura 12 - Relação entre a percentagem de fibras de aço e a máxima resistência à flexão,  $f_{c1/f}$ , após 2 milhões de ciclos de carga (Wu 1989).

Em diversos trabalhos (Kormeling 1980, Tan 1992, Swamy 1993) foi constatado que a presença das fibras diminuía a tensão nas armaduras longitudinais de tracção, aumentando a resistência à fadiga das vigas ensaiadas. Kormeling *et al.* (Kormeling 1980) verificaram que este aumento era tanto mais significativo quanto menor era a percentagem de armadura longitudinal.

A resistência ao impacto dos materiais de matriz cimentícia também aumenta com a percentagem de fibras, principalmente se estas forem de aço e de extremidades dobradas (ver Figura 8) (Ramakrishnan 1981). A orientação das fibras é importante no aumento da resistência ao impacto. Por este facto, nos provetes manufacturados segundo o método do betão projectado (“*shotcrete*”) tem-se registado aumentos de resistência ao impacto muito superiores aos obtidos nos correspondentes provetes moldados (Ramakrishnan 1981).

#### 4.9 - Fluência e retracção

A deformação, tanto por fluência como por retracção, diminui com o aumento da percentagem de fibras (Mangat 1986, Chern 1989), sendo insignificante a influência da geometria da fibra. Para percentagens volumétricas de fibras inferiores a 1%, a influência das fibras na deformação por fluência é insignificante, tendo mesmo sido registado maiores deformações nos provetes fibrosos que nos correspondentes provetes de *BS* (Balaguru 1988). O efeito das fibras é tanto mais benéfico quanto mais susceptível for a matriz para desenvolver deformações por fluência ou retracção. A contribuição das fibras é mais significativa em fases mais avançadas do processo de retracção. Nos *BRF* e nos *BS* o efeito da idade, tamanho e condições de cura dos provetes na deformação por retracção é semelhante.

#### 4.10 - Durabilidade

A durabilidade dos *BRF* depende consideravelmente do tipo de fibra utilizada. As fibras metálicas e sintéticas garantem maior durabilidade que as fibras de vidro e as fibras naturais.

##### *Fibras de aço*

À excepção das fibras metálicas amorfas (Burgun 1987) e as galvanizadas, as restantes fibras metálicas devem ser protegidas dos agentes agressivos de forma idêntica à que se efectua com as armaduras convencionais de aço. Todavia, ensaios de avaliação da corrosão em fibras de aço e de sua implicação na resistência e ductilidade de provetes de *BRFA* submetidos a diferentes condições de agressividade revelaram boa resistência à corrosão das fibras, principalmente nos provetes com fendas de abertura menor que 0.2 mm (Mangat 1989). Acima desta abertura e sob ambientes agressivos a redução da resistência e da ductilidade do compósito é significativa devido à corrosão das fibras (Mangat 1987). Se o mecanismo de rotura dos *BRFA* ocorrer por deslizamento das fibras, o decréscimo da resistência e da ductilidade do compósito pelo motivo da corrosão das fibras é menor que nos casos, tanto dos compósitos que rompem por cedência das fibras, como nos casos dos betões reforçados com armaduras convencionais, dado que a diminuição do diâmetro das fibras, por corrosão destas, não diminui significativamente os mecanismos de reforço das fibras, desde que a corrosão não afecte, substancialmente, a capacidade resistente da interface fibra-matriz. A durabilidade dos *BRF* às acções de gelo-degelo é semelhante à dos betões convencionais (Balaguru 1986).

##### *Fibras de vidro*

A degradação ao longo do tempo das propriedades dos compósitos produzidos com fibras de vidro (Bentur 1986, Fyles 1986, Ruishan 1986, Barros 1992) tem sido atribuída à

combinação dos efeitos da agressividade química dos meios de alto teor alcalino, característicos das misturas à base de cimento Portland, exercidos sobre as fibras, com os efeitos do decréscimo de ductilidade do compósito em consequência da deposição e fixação de produtos hidratados do cimento, principalmente de hidróxidos de cálcio, na zona de transição entre a fibra e a matriz, resultando uma microestrutura rígida (Li 1991). Existem, fundamentalmente, três possibilidades de aumentar a durabilidade das propriedades dos *BRFV*: reduzir a agressividade da matriz cimentícia, proteger a superfície das fibras da agressividade do meio, melhorar a estabilidade química das fibras por intermédio da sua própria composição. A utilização de produtos posolânicos e, particularmente, de microsilica nas misturas contribui para o aumento da durabilidade destes compósitos. A adição de microsilica, além de consumir hidróxidos de cálcio, baixa substancialmente o conteúdo em  $\text{OH}^-$  e  $\text{K}^+$ , diminuindo o teor alcalino da mistura (Radjy 1986). A redução da alcalinidade do meio também pode ser obtida por intermédio da utilização de cimentos aluminosos e de cimentos especialmente desenvolvidos para os *BRFV* (Ruishan 1986, Akihama 1987, Takada 1987, Majumdar 1991) em vez do cimento Portland ordinário, ou ainda por via da substituição parcial deste cimento por sílica do fumo (Bentur 86). A inclusão de produtos poliméricos na composição dos *BRFV* também se tem revelado oportuna no aumento da durabilidade destes compósitos devido, principalmente, à penetração das pequenas partículas sólidas do polímero que preenchem, parcialmente, os espaços entre os filamentos das fibras (Daniel 1986, Majumdar 1991).

No que se refere ao aumento da durabilidade por intermédio da utilização de produtos de base polimérica que envolvem as fibras, a protecção à agressividade do meio alcalino pode ser, contudo, apenas parcial, dado que é difícil conseguir um completo envolvimento da fibra pelos materiais protectores (Fyles 1986, Majumdar 1991). Além disto, as propriedades de fixação e de aderência das fibras à matriz ficam diminuídas, reduzindo a capacidade resistente do compósito. Todavia, nos últimos anos tem-se feito consideráveis esforços no desenvolvimento quer de produtos que protegem as fibras da agressividade química quer de métodos de fabricação das fibras que lhes diminuem o número de microfalhas (Fyles 1986).

#### 4.11 - Outras propriedades

A participação das fibras, principalmente das de aço, aumenta a resistência ao punçoamento dos materiais cimentícios, devido à maior capacidade de absorção de energia e à maior resistência dos *BRF*, comparativamente com as dos correspondentes *BS* (Walraven 1986).

A resistência à abrasão dos *BRF* depende consideravelmente da velocidade de actuação dos agentes erosivos. Quando os agentes erosivos actuam sob elevadas velocidades e quando ocorre impacto de objectos de grande dimensão, a resistência ao desgaste é substancialmente aumentada por via da adição de fibras ao betão (ACI 1986b).

A condutividade térmica dos materiais de matriz cimentícia não é significativamente aumentada pelo efeito das fibras, principalmente das mais usadas (aço, vidro, polipropileno) (ACI 1986b, Balaguru 1992). Contudo, a capacidade resistente sob acções térmicas elevadas (menor que 350 graus Celsius) aumenta com o reforço das fibras (Faiyadh 1986).

A permeabilidade dos betões diminui com a presença das fibras, sendo esta diminuição mais significativa quando os materiais são submetidos a acções de gelo-degelo (Balaguru 1986).

## 5 - APLICAÇÕES

No Quadro 3 apresenta-se as principais aplicações de *BRF* (principalmente de aço e vidro) e os principais atributos que justificam o seu uso.

Quadro 3 - Aplicações de BRF (Henager 1981, PCI 1981, Swamy 1984, ACI 1984b, Burgun 1987, Ramakrishnan 1987, Takada 1987, Wu 1989, Vandewalle 1990, Balaguru 1992, Barros 1995)

Área de aplicação	Produto	Atributos
Pavimentos	Pavimentos de edificios industriais; auto-estradas; pistas de aeroportos; estações de abastecimento de combustíveis; piscinas; <i>courts</i> de ténis.	Aumento da resistência às acções de fadiga e impacto; aumento da resistência à tracção em flexão, o que permite diminuir a espessura dos pavimentos ou aumentar a sua vida útil; diminuir o número de juntas devido à maior resistência à tracção, à maior capacidade de absorção de energia e ao melhor controlo da fendilhação.
Estruturas hidráulicas	Barragens; canais; condutas; pilares submersos; estruturas offshore; elementos que servem de protecção de estruturas marítimas.	Maior resistência à cavitação, erosão e impacto.
Estruturas de betão projectado	Estabilização de taludes rochosos; estruturas subterrâneas; reparação e reabilitação de estruturas; construção de cascas delgadas; painéis de fachadas; reservatórios.	Economia de mão-de-obra e material; menor tempo de execução; execução de peças de geometria complexa.
Estruturas de betão refractário	Portas e paredes de fornos; compartimentos submetidos a elevadas temperaturas ou altos gradientes térmicos.	Maior resistência às tensões de origem térmica, ao choque térmico e às acções térmicas cíclicas.
Elementos préfabricados	Coberturas; canalizações; depósitos; fundações e estruturas de suporte de máquinas; paredes divisórias; lajes; muros de cerca ou vedação; varandas; estruturas resistentes de estufas e de pequenas arrecadações.	Manusiabilidade; facilidade de substituição; qualidade do acabamento; propriedades mecânicas físicas, e acústicas; economia.
Componentes estruturais	Nós de ligação viga-pilar; consolas curtas; vigas altas; zonas de amarração de cabos de pré-esforço; estruturas offshore; portas resistentes a acções explosivas; elementos estruturais em regiões de considerável intensidade sísmica; componentes estruturais de instalações da indústria de energia nuclear.	Diminuição do congestionamento de armaduras convencionais; decréscimo do espaçamento e abertura das fendas; aumento da ductilidade do modo de rotura; maior resistência às acções cíclicas e de impacto.
Reparação e reforço de estruturas	Grande diversidade de elementos estruturais.	Economia de tempo, mão-de-obra e material.

## 6 - REFERÊNCIAS

- Abdull-Ahad, R.B.; Abbas, J. M. (1989), "Behavior of steel fiber reinforced concrete under biaxial stresses", Fiber Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments, Elsevier, pp. 126-135.*  
*ACI (1984a), "Measurement of properties of fiber reinforced concrete", ACI Committee 544, Fiber Reinforced Concrete, SP 81, Detroit, MI, pp. 433-439.*

- ACI (1986b), "State-of-the-art report on fiber reinforced concrete", Reported by ACI Committee 544, IR-82, 22 pages.
- Akihama, S.; Suenga, T.; Tanaka, M.; Hayashi, M. (1987), "Properties of GFRC with low alkaline cement", Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105, ACI, pp. 189-210.
- ASTM (1991), "Concrete and aggregates", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 824 pages.
- Batson, G. (1985), "Use of steel fibers for shear reinforcement and ductility", Steel Fiber Concrete, Elsevier, pp. 337-419.
- Beaudoin, J.J. (1990), "Handbook of fiber-reinforced concrete, principles, properties, developments and applications", Noyes publications, 332 pages.
- Balaguru, P.N.; Ramakrishnan, V. (1986), "Freeze-thaw durability of fiber reinforced concrete" ACI Journal, pp. 374-382, May-June.
- Balaguru, P.N.; Ramakrishnam, V. (1988), "Properties of fiber reinforced concrete: workability, behavior under long-term loading, and air-void characteristics", ACI Materials Journal, Vol. 85, N° 3, pp. 189-196.
- Balaguru, P.N.; Shah, S.P. (1992), "Fiber reinforced cement composites", McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, 530 pages.
- Barros, J.A.O. (1992), "Behaviour of glass fibre reinforced concrete systems", Technical Report, Civil Eng. Departement, Faculty of Eng., University of Porto.
- Barros, J.A.O. (1995), "Comportamento do betão reforçado com fibras Análise experimental e simulação numérica", Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Batson, G. (1985), "Use of steel fibers for shear reinforcement and ductility", Steel Fiber Concrete, Elsevier, pp. 337-419.
- Batson, G.; Ball, C.; Bailey, L.; Landres, E.; Hooks, J. (1972b), "Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete beams", ACI Journal, Vol. 69, N° 11, pp. 673-677.
- Bentur, A. (1986), "Aging process of glass fibre reinforced cements with different cementitious matrices", RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, Vol. 2, paper 7.3.
- Bijen, J. (1990), "Improved mechanical properties of glass fibre reinforced cement by polymer modification", Cement & Concrete Composites, Vol. 12, pp. 95-101.
- Bollana, R.D. (1980), "Steel fibers as shear reinforcement in two span continuous reinforced concrete beams", M.S. Thesis, Clarkson University, Potsdam, New York, May.
- Burgun, D.; Guillebon, B. (1987), "Béton projeté renforcé de fibres de fonte. Application à la réhabilitation d'un collecteur d'assainissement à Nancy", Extrait de Techniques Sciences Méthodes, 82ème année, N° 1, Janvier.
- Casanova, P.; Rossi, P.; Schaller, I. (1995), "Les Fibres d'acier peuvent-elles remplacer les armatures transversales dans les poutres du béton-armé?", Bull. Liaison Lab. Central des Ponts et Chaussées, N° 195, Ref. 3879, pp. 49-60, Janvier-Février.
- Chern, J.C.; Young, C.H. (1989), "Compressive creep and shrinkage of steel fiber reinforced concrete", The Inter. Jour. of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 11, N° 4, pp. 205-214.
- Chern, J. C.; Yang, H.-J.; Chen, H.-W. (1992), "Behavior of steel fiber reinforced concrete in multiaxial loading", ACI Materials Journal, Vol. 89, N° 1, pp. 32-40, January-February.
- Craig, J.R.; Dunya, S.; Riaz, J.; Shirazi, H. (1984), "Torsional behavior of reinforced fibrous concrete beams", Fiber Reinforced Concrete, International Symposium SP-81, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, pp. 17-49.
- Daniel, J.I.; Schultz, D.M. (1986), "Long-term strength durability of glass fibre reinforced concrete", RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, Volume 2, paper 7.4.
- Dipsia, M. (1987), "Mechanical properties of superplasticized steel fiber high strength semi-lightweight concrete", M.S. Thesis, Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, 128 pp..
- Faiyadh, F.I.; Al-Ausi, M.A. (1986), "Effect of elevated temperature and method of recooling on the compressive strength of plain and fibre reinforced concrete", RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, Volume 1, paper 3.6.
- Fyles, K.; Litherland, K.L.; Proctor, B.A. (1986), "The effect of glass fibre compositions on the strength retention of GFC", RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, Volume 2, paper 7.5.
- Gopalaratnam, V.S.; Shah, S.P. (1987a), "Tensile failure of steel fibre-reinforced mortar", Jour. of Eng. Mech., ASCE, Vol. 113, N° 5, pp. 635-653, May.
- Gopalaratnam, V.S.; Shah, S.P. (1987b), "Failure mechanisms and fracture of fibre reinforced concrete", Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, edited by S.P. Shah and G.B. Batson, SP-105, ACI, pp.1-26.

- Gopalaratnam, V.S.; Shah, S.P.; Batson, G.B.; Criswell, M.E.; Ramakrishnan, V.; Wecharatana, M. (1991), "Fracture toughness of fiber reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 88, Nº. 4, pp. 339-353, July-August.
- Henager, C.H. (1981), "Worldwide fibrous concrete projects", *Concrete International*, pp. 13-18, September.
- Homrich, J.; Naaman, A. (1987), "Stress-strain properties of SIFCON in compression", *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, SP-105, ACI, pp. 283-304.
- Jalil, W. (1994), "Dallages en béton renforcé de fibres métalliques", *Annales de l'Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics, Béton Renforcé de Fibres: Applications aux Dallages Industriels*, Nº 522, Série: Technique Générale de la Construction, 149, pp. 96-111, Mars-April.
- The Japan Society of Civil Engineers (1984), "Part III - 2 method of tests for steel fiber reinforced concrete", *Concrete Library of JSCE-SF4*, Nº 3, 74 pages.
- Kormeling, H.A.; Reinhardt, H.W.; Shah, S.P. (1980), "Static fatigue properties of concrete Beams reinforced with continuous bars and fibers", *ACI Journal*, pp. 36-43, January-February.
- Kupfer, H.; Hilsdorf, H.K.; Rusch, H. (1969), "Behaviour of concrete under biaxial stresses", *ACI Journal*, pp. 656-666, August.
- Li, Z.; Mobasher, B.; Shah, S.P. (1991), "Evaluation of interfacial properties in fiber reinforced cementitious composites", *Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics*, edited by J.G.M. van Mier, J.G. Rots and A. Bakker. RILEM, Published by E. & F.N. Spon, pp. 317-326.
- Lim, T.Y.; Paramasivam, P.; Lee, S.L. (1987), "Analytical model for tensile behavior of steel-fiber concrete", *ACI Materials Journal*, pp. 286-298, July-August.
- Majumdar, A.J.; Laws, V. (1991), "Glass reinforced cement", *BSP professional books*, 197 pages.
- Mansur, M.A.; Paramasivam, P. (1982), "Fiber reinforced concrete beams in torsion, bending and shear", *ACI Journal*, Vol. 82, Nº 1, pp. 33-39.
- Mangat, P.S.; Azari, M.M. (1986), "Compression creep behavior of steel fiber reinforced cement composites", *Materials and Structures*, RILEM, Vol. 19, pp. 361-370.
- Mangat, P.S.; Gurusamy, K. (1987), "Permissible crack widths in steel fiber reinforced marine concrete", *Materials and Structures*, RILEM, Vol. 20, pp. 338-347.
- Mangat, P.S.; Molloy, B.T.; Gurusamy, K. (1989), "Marine durability of steel fiber reinforced concrete of high water-cement ratio", *Fiber Reinforced Cements and Concretes-Recent Developments*, Elsevier, pp. 553-562.
- Mondragon, R. (1987), "SIFCON in compression", *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, SP-105, ACI, pp. 269-282.
- Narayanan, R.; Palangian, A.S.K. (1986), "Factors influencing the strength of steel fibre reinforced concrete", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Volume 1, paper 3.1.
- Niyogi, S.K.; Dwarakanathan, G.I. (1985), "Fiber reinforced beams under moment and shear", *Jour. of Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 111, Nº 3, pp. 516-527, March.
- Otter, D.; Naaman, A.E. (1986), "Steel fibre reinforced concrete under static and cyclic compressive loading", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Volume 1, paper 3.10.
- PCI (1981), "Recommended practice for glass fiber reinforced concrete", Reported by PCI Committee on Glass Fiber Reinforced Concrete Panels, *PCI Journal*, Vol. 26, Nº 1, pp. 25-93, Jan./Fev..
- Radjy, F.F.; Sellevold, E.J.; Moell, S.M.; Danielssen, T. (1986), "Use of microsilica additives in asbestos free fibre reinforced cements", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*.
- Ramakrishnan, V.; Coyle, W.V.; Dahl, L.F.; Shrader, E.K. (1981), "A comparative evaluation of fiber shotcrete", *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 3, Nº 1, pp. 56-59.
- Ramakrishnan, V.; Oberling, G.; Tatnall, P. (1987), "Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete", *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, SP-105, ACI, pp. 225-245.
- El-Refai, F.E.; Morsy, E.H. (1986), "Some properties of fibre reinforced concrete with superplasticizer", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Volume 1, paper 3.2.
- Reinhardt, H.W. (1979), "A concrete beam reinforced with bars and steel fibres in pure bending", *HERON*, Vol. 24, Nº 4, pp.41-47.
- Reinhardt, H.W.; Cornelissen, H.A.W.; Hordijk, D.A. (1986), "Tensile tests and failure analysis of concrete", *Jour. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 112, Nº 11, pp. 2462-2477.
- Ruishan, Y. (1986), "Mechanical characteristics of AR glass fibre reinforced low alkalinity sulphoaluminate cement composite", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Volume 1, paper 4.2.
- Stroeven, P. (1979), "Micro- and macromechanical behaviour of steel fibre reinforced mortar in tension", *HERON, Fibre Concrete*, Vol. 24, Nº 4, pp. 7-40.

- Swamy, R.N.; Al-Ta'an S.A. (1981)*, "Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete", *ACI Journal*, pp. 395-405, September-October.
- Swamy, R.N. (1984)*, "New reinforced concretes", *Concrete Technology & Design*, Volume 2, Surrey University Press.
- Swamy, R.N.; Jones, R.; Chiam, A.T.P. (1987)*, "Shear transfer in steel fiber reinforced concrete", *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, SP-105, ACI, pp. 565-592.
- Swamy, R.N.; Jones, R.; Chiam, A.T.P. (1993)*, "Influence of steel fibers on the shear resistance of lightweight concrete I-beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 90, Nº 1, pp. 103-114, January-February.
- Al-Ta'an, S.A.; Al-Feel, J.R. (1990)*, "Evaluation of shear strength of fibre-reinforced concrete beams", *Cement & Concrete Composites*, Nº 12, pp. 87-94.
- Tan, K.H.; Murugappan, K.; Paramasivam, P. (1992)*, "Shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 89, Nº 6, pp. 3-11, November-December.
- Takada, H.; Uchida, I.; Sakurada, T. (1987)*, "Development of lightweight durable fiberglass-reinforced concrete (FRC)", *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, SP-105, ACI, pp. 179-188.
- Uomoto, T.; Weeraratne, R.K.; Furukoshi, H.; Fujino, H. (1986)*, "Shear strength of reinforced concrete beams with fibre reinforcement", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Volume 2, paper 8.7.
- Uyan, M.; Atan, Y.; Tasdemir, M. A. (1986)*, "Behavior of GFRC mortars under uni- and bi-axial loading", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Volume 1, paper 4.3.
- Vandewalle, M. (1990)*, "Tunnelling the world", *N. V. Bekaert S.A.*, 218 pages.
- Walraven, J.; Pat, T.; Markov, I. (1986)*, "The punching shear resistance of fibre reinforced concrete slabs", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Volume 2, paper 8.9.
- Wang, Y. (1989)*, "Mechanics of fiber reinforced cementitious composites", Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, May.
- Wu, G. Y.; Shivaraj, S. K.; Ramakrishnan, V. (1989)*, "Flexural fatigue strength, endurance limit, and impact strength of fiber reinforced refractory concretes", *Fiber Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments*, Elsevier, New York, pp. 261-273.