

# **CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS – PROPOSTAS RECENTES**

Joaquim António Oliveira de Barros  
Prof. Auxiliar do Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil da Escola de Eng<sup>a</sup> da Universidade do Minho  
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães  
Tel: 253 510 210, Fax: 253 510 217, Email: barros@eng.uminho.pt

## **1 – INTRODUÇÃO**

O presente trabalho é a continuação do artigo publicado no número anterior desta revista. Nesse artigo foram apresentados os conceitos fundamentais do betão reforçado com fibras de aço (BRFA), tendo-se referido que o comportamento em flexão é o mais beneficiado pelo reforço proporcionado pelas fibras. Por este facto, diversas metodologias de ensaio de flexão têm sido propostas no sentido de quantificar o acréscimo de ductilidade que se observa quando se adiciona fibras ao betão [Balaguru e Shah 1992, ACI 1993,1997]. As diferentes abordagens do problema, desde as dimensões do provete, condições de carregamento, processo de aquisição de dados, até às características do equipamento têm conduzido ao surgimento de vários parâmetros relacionados com a capacidade de absorção de energia do compósito, mas de difícil relação entre eles. Contudo, o controlo de qualidade do BRFA aplicado e o dimensionamento de estruturas constituídas por este material exige a normalização dos ensaios e o estabelecimento de parâmetros únicos indicadores da ductilidade acrescida introduzida no betão por determinado tipo e percentagem de fibras.

Neste sentido o RILEM (2000a) propôs recentemente uma metodologia de ensaio de flexão para o BRFA, assim como parâmetros que pretendem caracterizar a ductilidade deste material. O presente trabalho é dedicado à proposta do RILEM.

O ensaio proposto pelo RILEM é dirigido, fundamentalmente, ao betão aplicado por métodos tradicionais. Num próximo número desta revista serão discutidas as metodologias de ensaio propostas pela EFNARC para caracterizar o betão projectado reforçado com fibras de aço.

## **2 – ENSAIO DE FLEXÃO SEGUNDO O RILEM**

### **2.1 - Objectivos**

Com este ensaio o RILEM pretende normalizar toda a envolvente associada à caracterização do comportamento em flexão do BRFA, desde as características do provete até às especificidades do equipamento de ensaio e aquisição de resultados, vindo mesmo a propor determinados conceitos que podem ser utilizados nos modelos de cálculo (Barros 2000, Barros et al. 2001).

Com base na resposta força-flecha obtida neste ensaio pretende-se avaliar o limite de proporcionalidade (LOP), i.e., o ponto a partir do qual a relação entre a força e a flecha passa a ser não linear. A partir da relação força-flecha serão determinados dois parâmetros, designados de resistência equivalente em flexão, que pretendem caracterizar o comportamento do material até determinada flecha. Pode-se ainda traçar a relação entre a abertura de fenda (CMOD – Crack Mouth Opening Displacement) e a flecha e a relação entre a tensão e a abertura de fenda.

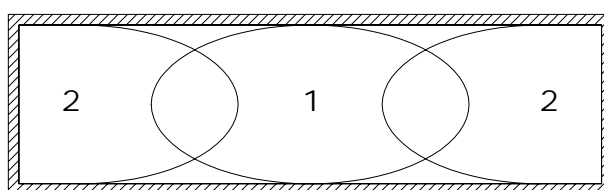
## 2.2 - Proвете

Na Figura 1 representa-se o procedimento de enchimento do molde do provete para ensaio de flexão. A porção correspondente a 1 deve ser o dobro da correspondente a 2. O provete deve ter comprimento de 550 mm ou 600 mm, altura e largura de 150 mm e vão de 500 mm. Com este tipo de provete, o comprimento das fibras,  $\ell_f$ , não deve ser superior a 60 mm e a dimensão máxima dos inertes deve ser inferior a 32 mm.

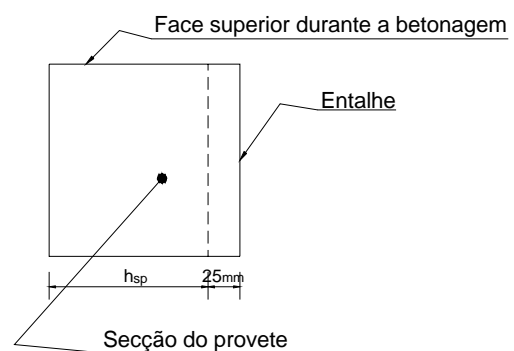
O betão deve ser compactado por intermédio de vibração externa. A vibração deve ter em conta o tipo de aplicação em vista, de forma a que a disposição das fibras, e consequentemente, a sua eficácia em termos de reforço seja a mais representativa possível da aplicação real.

Os provetes devem ser desmoldados entre 24 a 48 horas após a betonagem e mantidos a  $+20^{\circ}\text{C}$  e H.R.  $\geq 95\%$  até à preparação do teste.

A meio vão da viga, numa das suas faces laterais, deve ser aplicado um entalhe com 2 a 3 mm de largura e  $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  de profundidade, utilizando-se um disco de corte apropriado (ver Figura 2).



Números indicam a ordem de betonagem



Secção do provete

Figura 1 – Procedimento para encher um molde de provete para ensaio de flexão.

Figura 2 – Entalhe na secção do meio vão do provete.

### 2.3 – Sistema de ensaio

Na Figura 3 representa-se o esquema de suporte e de aplicação de carga que se propõe para o ensaio de flexão. A disposição dos transdutores é a representada na Figura 4. Na boca do entalhe pode-se aplicar um “clip gauge” de forma a estimar a abertura de fenda e assegurar, com maior estabilidade, o controlo do ensaio.

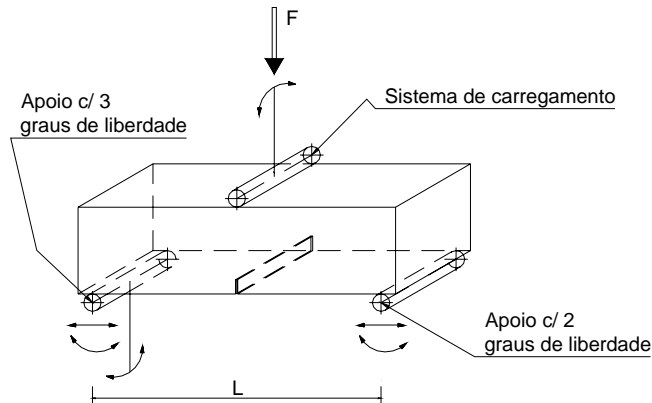


Figura 3 – Esquema de suporte e de aplicação da carga no ensaio de flexão.

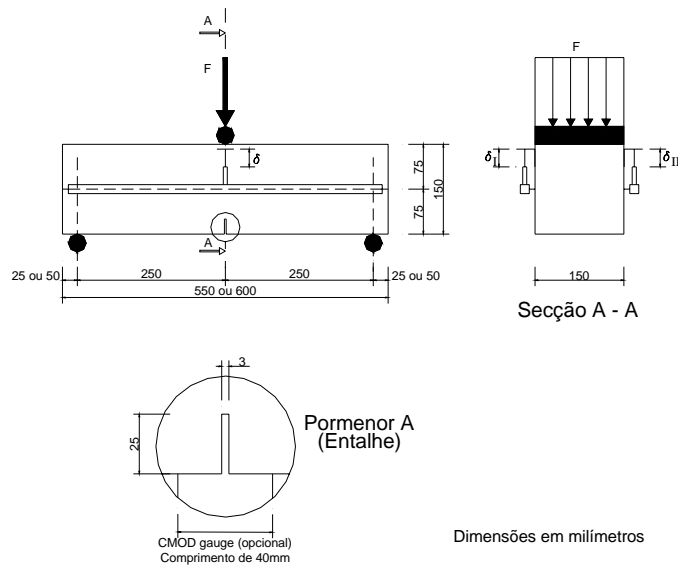
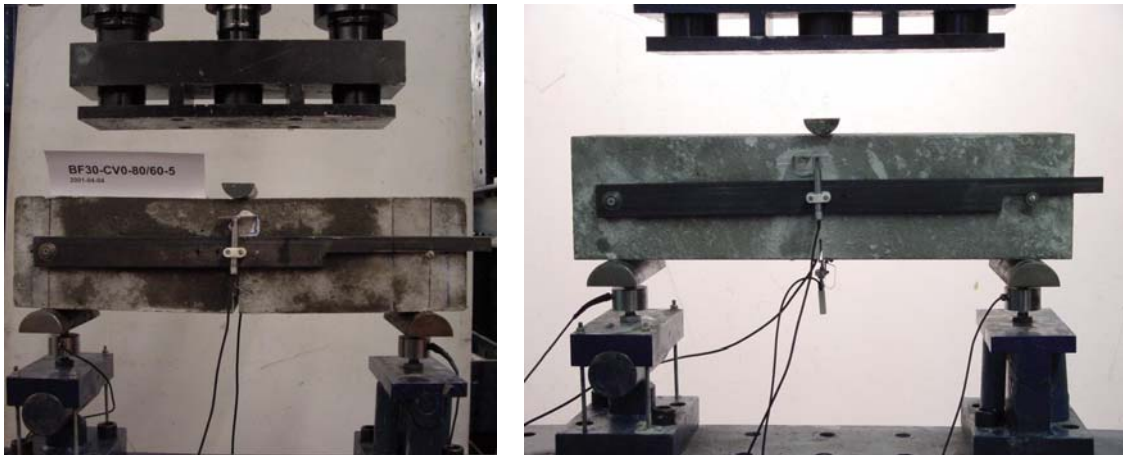


Figura 4 – Disposição dos transdutores.

A foto da Figura 5 ilustra um sistema de ensaio de flexão de acordo com as recomendações do RILEM.



(a)  
 Figura 5 – Sistema de ensaio segundo a RILEM sem (a) e com (b) clip gauge.

As barras nas quais se fixam os transdutores de deslocamento devem ficar ligadas a dois pontos do provete que não se deslocam, de forma a não serem registados deslocamentos parasitas nos referidos transdutores. A barra deve poder rodar em torno de um desses pontos e deslizar sobre o outro ponto de apoio. A estrutura de reacção deve ser suficientemente rígida de forma a evitar a ocorrência de ensaios instáveis. A instabilidade está associada a uma queda acentuada e brusca no início da fase de amolecimento do material, i.e., no ramo em que a força decresce e a deformação aumenta. A utilização de elementos deformáveis entre o sistema de aplicação de carga/reacção e o provete contribui geralmente para a ocorrência de ensaios instáveis. Na Figura 6 representa-se a relação força-flecha registada em ensaio instável em provete de betão simples, motivado pelo simples facto da caixa de suporte da célula de carga ser excessivamente deformável, quando comparada com a deformabilidade do provete. Nesta figura também se inclui a resposta observada num ensaio estável.

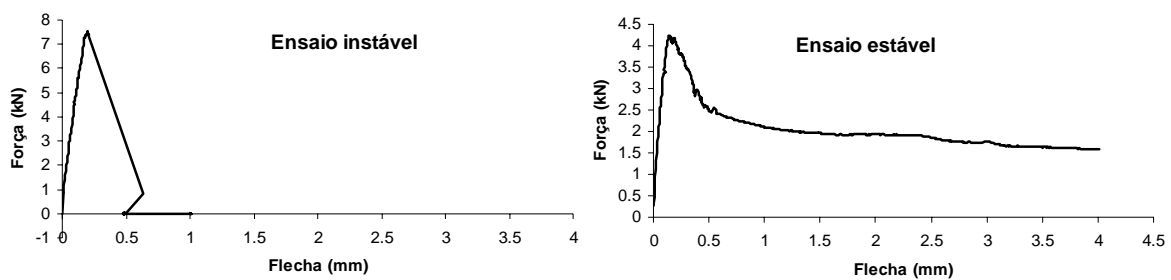


Figura 6 – Relação força-flecha em ensaio instável (a) e estável (b) em provetes de betão simples.

O equipamento a utilizar nos ensaios deve ter os seguintes requisitos:

- Deve possibilitar a realização do ensaio sob controlo de deslocamentos, de forma a ser possível obter a resposta para além do pico de carga, pelo que são geralmente

equipamentos servocontrolados, ver foto da Figura 7, (Freitas et al. 1988, Barros e Sena 2001);

- A rigidez do sistema de reacção deve ser suficientemente elevada de forma a assegurar a estabilidade do ensaio. Ensaio em que ocorram instabilidades devem ser rejeitados;
- A deformação deve ser medida em ambas as faces do provete ( $\delta_I$  e  $\delta_{II}$  - ver Figura 4);
- O transdutor de força deve ser capaz de ler forças de 0.1 kN com precisão;
- Os transdutores de deslocamento devem ser capazes de ler deslocamentos de 10  $\mu m$  com precisão;
- Se a fenda não se iniciar na boca do entalhe, o teste deve ser rejeitado.



Figura 7 – Equipamento e sistema de reacção utilizado nos ensaios de flexão propostos pelo RILEM.

## 2.4 – Procedimentos de ensaio

O ensaio de flexão deve ser executado a uma velocidade de deformação de 0.2 mm/min, em que a deformação é a média dos deslocamentos registados nos dois transdutores dispostos paralelamente às faces laterais do provete, pelo que:

$$\delta = \frac{\delta_I + \delta_{II}}{2} . \quad (1)$$

Devem ser ensaiados, pelo menos, 3 provetes.

## 2.5 – Resultados a extrair

Relações típicas que se obtêm no ensaio de flexão estão representadas na Figura 8.

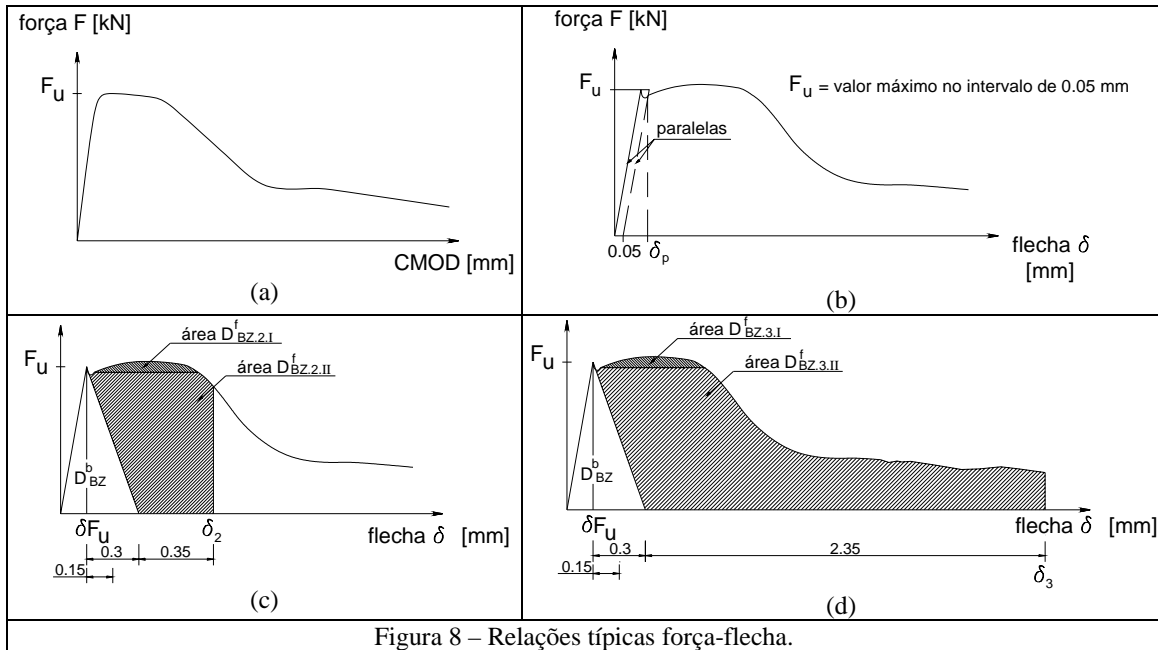


Figura 8 – Relações típicas força-flecha.

Na Figura 8,  $F_u$  [N] é a carga correspondente ao limite de proporcionalidade, que consiste na máxima força registada até uma deformação  $\delta_p$  (ver Figura 8b), obtida traçando-se por  $\delta=0.05\text{mm}$  uma paralela ao ramo linear. O  $\delta_p$  é o deslocamento de intercepção desse ramo com a curva obtida nos ensaios experimentais.

O momento de início da fendilhação (ou o momento correspondente ao limite de proporcionalidade) obtém-se de:

$$M_{LOP} = \frac{F_u}{2} \frac{L}{2} \quad [\text{Nmm}] \quad (2)$$

em que  $L$  é o vão do provete. Admitindo a distribuição de tensões representada na Figura 9, a resistência à tracção em flexão (ou tensão correspondente ao limite de proporcionalidade),  $f_{fct,fl}$ , obtém-se da seguinte relação:

$$f_{fct,fl} = \frac{3}{2} \frac{F_u}{b} \frac{L}{h_{sp}^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3)$$

em que  $b$  [mm] é a largura do provete e  $h_{sp}$  [mm] é a distância da extremidade interior do entalhe à superfície superior do provete (ver Figura 2).

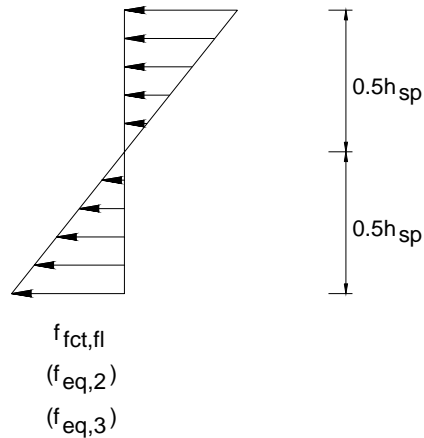


Figura 9 – Distribuição de tensões admitida na seção do provete.

A capacidade de absorção de energia  $D_{BZ,2}$  ( $D_{BZ,3}$ ) é igual à área sob a curva carga-flecha até à flecha de  $\delta_2$  ( $\delta_3$ ), e é constituída por duas partes, correspondentes à contribuição do betão simples:

$$D_{BZ}^b \text{ [Nmm]}$$

e das fibras:

$$\begin{aligned} D_{BZ,2}^f &= D_{BZ,2,I}^f + D_{BZ,2,II}^f \text{ [Nmm]}. \\ D_{BZ,3}^f &= D_{BZ,3,I}^f + D_{BZ,3,II}^f \end{aligned} \quad (4)$$

Na Figura 8,  $\delta_{F_u}$  é a flecha correspondente ao limite de proporcionalidade. As flechas  $\delta_2$  e  $\delta_3$  são definidos como:

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \delta_{F_u} + 0.65 \\ \delta_3 &= \delta_{F_u} + 2.65 \end{aligned} \text{ [mm]}. \quad (5)$$

A força  $F_2$  ( $F_3$ ) é igual à força média na área tracejada  $D_{BZ,2}^f$  ( $D_{BZ,3}^f$ ) podendo ser calculada da forma seguinte:

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \text{ [N]} \\ F_3 &= \frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \text{ [N]} \end{aligned} \quad (6)$$

O momento a meio vão correspondente a  $F_2$  ( $F_3$ ) é:

$$M_2 = \frac{F_2}{2} \frac{L}{2} = \left( \frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \right) \frac{L}{4} \quad [Nmm] \quad (7)$$

$$M_3 = \frac{F_3}{2} \frac{L}{2} = \left( \frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \right) \frac{L}{4} \quad [Nmm]$$

Admitindo a distribuição de tensões da Figura 9, a resistência equivalente à tracção em flexão  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  pode ser determinada por meio das seguintes expressões:

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \left( \frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad [N/mm^2] \quad (8)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \left( \frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad [N/mm^2]$$

Os parâmetros  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  estão relacionados com a capacidade de absorção de energia do material até à flecha  $\delta_2$  e  $\delta_3$ , respectivamente, sendo utilizados na simulação do comportamento do material à tracção nas verificações aos estados limites de utilização (o  $f_{eq,2}$ ) e últimos (o  $f_{eq,3}$ ), (RILEM 2000b)

## 2.6 – Resistência à tracção em flexão

Quando apenas se conhece a resistência característica à compressão,  $f_{fck}$ , os valores médio e característico da resistência à tracção uniaxial (com o subíndice  $ax$ ) e em flexão (com o subíndice  $fl$ ) podem ser estimados a partir das seguintes relações:

$$f_{fctm,ax} = 0.3 (f_{fck})^{2/3} \quad [N/mm^2] \quad (9)$$

$$f_{fctk,ax} = 0.7 f_{fctm,ax} \quad [N/mm^2] \quad (10)$$

$$f_{fct,ax} = 0.6 f_{fct,fl} \quad [N/mm^2] \quad (11)$$

$$f_{fctk,fl} = 0.393 (f_{fck})^{2/3} \quad [N/mm^2] \quad (12)$$

$$f_{fctk,fl} = 0.8 f_{fctm,fl} \quad [N/mm^2] \quad (13)$$

Os valores médios e característicos para as classes de resistência de betão correntemente utilizado em aplicações de BRFA estão apresentados na Tabela 1.

Se forem efectuados ensaios de flexão, a formulação seguinte pode ser aplicada na determinação do valor característico e médio da tensão correspondente ao limite de proporcionalidade:

$$f_{fctk,fl} = f_{fctms,fl} - \frac{s_p t_{10}}{\sqrt{n}} - 1.645 s_p \left( 1 + \frac{s_p t_{10}}{f_{fctms,fl} \sqrt{n}} \right) \quad [N/mm^2] \quad (14)$$



$$f_{fctm,fl} = f_{fctms,fl} - \frac{s_p t_{10}}{\sqrt{n}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (15)$$

em que  $f_{fctk,fl}$   $[\text{N/mm}^2]$  é o valor característico da tensão de limite de proporcionalidade,  $f_{fctms,fl}$   $[\text{N/mm}^2]$  é o valor médio da tensão de limite de proporcionalidade da série de testes,  $f_{fctm,fl}$   $[\text{N/mm}^2]$  é o valor médio da tensão de limite de proporcionalidade,  $n$  é o número de provetes,  $t_{10}$  é o valor da distribuição de “Student” para o quantilho de 10%, apresentando-se na Tabela 2 alguns valores para  $n$ , e  $s_p$  é o desvio padrão:

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum (f_{fctms,fl} - f_{fct,fl})^2}{(n-1)}} \quad [\text{N/mm}^2]. \quad (16)$$

Tabela 1 – Classes de resistência do BRFA: resistência característica à compressão,  $f_{fck}$ , em MPa (cilindros); resistência média,  $f_{fctm,fl}$ , e característica,  $f_{fctk,fl}$ , à tracção em flexão em MPa; valores médios do módulo de elasticidade secante em GPa.

| Classe de resistência do BRFA | C20/25 | C25/30 | C30/37 | C35/45 | C40/50 | C45/55 | C50/60 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $f_{fck}$                     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     |
| $f_{fctm,fl}$                 | 3.7    | 4.3    | 4.8    | 5.3    | 5.8    | 6.3    | 6.8    |
| $f_{fctk,fl}$                 | 2.9    | 3.4    | 3.9    | 4.3    | 4.7    | 5.1    | 5.5    |
| $E_{fcm}$                     | 29     | 30.5   | 32     | 33.5   | 35     | 36     | 37     |

Tabela 2 – Valores da distribuição de “Student” para o quantilho de 10%.

| $n$      | 3    | 4    | 5    | 6    | 8    | 10   | 12   | 15   |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t_{10}$ | 1.89 | 1.64 | 1.53 | 1.48 | 1.42 | 1.38 | 1.36 | 1.34 |

O valor máximo entre (12), (13) e (14) pode ser tomado como a resistência à tracção em flexão do BRFA.

## 2.7 – Aplicação do conceito de resistência equivalente em flexão

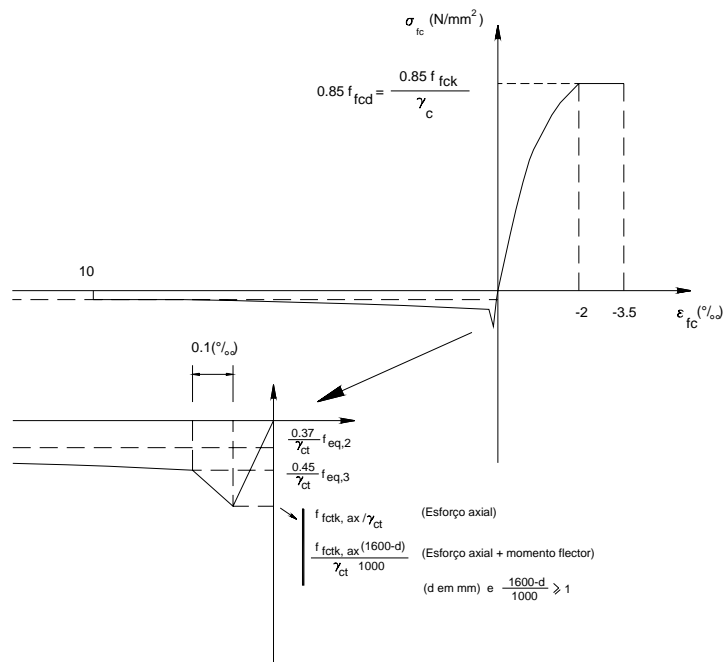
Na determinação da resistência última de uma secção admitem-se as hipóteses seguintes:

- As secção mantêm-se planas (Bernoulli);
- As tensões em compressão e em tracção derivam do diagrama representado na Figura 10;
- As tensões nas armaduras convencionais obtêm-se a partir de um diagrama bilinear idealizado,  $\sigma_s - \varepsilon_s$ ;

- Para secções submetidas integralmente a compressões, a extensão de compressão deve ser limitada a  $-2\%$ . Para secções parcialmente comprimidas este limite é de  $-3.5\%$ . Para situações intermédias o diagrama de extensões define-se assumindo que a  $3/7$  da altura da secção ( $h$ ) a partir da face mais comprimida, a extensão é de  $-2\%$ ;
- Para betão armado reforçado com fibras de aço a extensão no betão ao nível da armadura de tracção é limitada a  $10\%$  (ver Figura 11);
- Para assegurar uma suficiente capacidade de ancoragem das fibras, a máxima deformação em estado limite último deve ser limitada a 1.5 mm. Analisando a Figura 8 conclui-se que para  $\delta=1.5$  mm mobiliza-se uma força próxima de  $F_3$  (ver expressão 6a) a partir da qual  $f_{eq,3}$  é calculada. Para esta ordem de flecha, a abertura de fenda na boca do entalhe é da mesma ordem da flecha (Barros *et al.* 2001). Para abertura de fenda superior a 1.5 mm deve-se determinar a correspondente tensão a partir da relação tensão-abertura de fenda, que pode ser obtida no ensaio de flexão. O valor médio desta tensão, que substitui  $f_{eq,3}$ , não deve ser inferior a 1 MPa;
- Em alguns casos a contribuição das fibras perto da superfície deve ser reduzida. Por esta razão, não se deve ter em conta a influência das fibras numa camada perto da superfície:

*Para classe de exposição 2 (NP ENV 206) - se a fenda é superior a 0.2 mm (estados limites de serviço), a altura da zona fendilhada deve ser reduzida em 15 mm. Esta regra somente é aplicada em estado limite último.*

*Para classes de exposição 3 ou superior - devem ser tomados cuidados especiais.*



$\gamma_c$  : factor de segurança parcial para o BRFA em compressão

$\gamma_{ct}$  : factor de segurança parcial para o BRFA em tracção

Figura 10 – Diagrama tensão-extensão para o betão reforçado com fibras de aço.

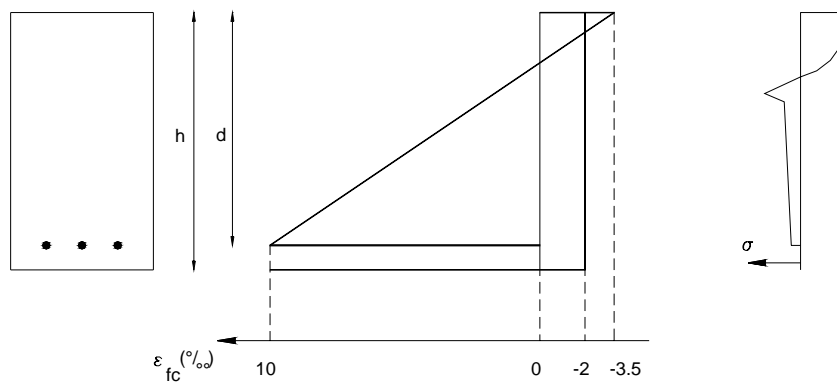


Figura 11 – Extensões limite no BRFA.

### 3 - BIBLIOGRAFIA

ACI Committee 544, 'Guide for specifying, proportioning, mixing, placing and finishing SFRC', ACI Materials Journal, Jan.-Feb., pp.94-101, 1993.

ACI Committee 544.1R-96, 'State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete', ACI Manual of Concrete Practice – Part 5 – ACI International, 66 pages, 1997.

Balaguru, P.N.; Shah, S.P., “Fiber reinforced cement composites”, *McGraw-Hill International Editions*, Civil Engineering Series, 530 pages, 1992.

Barros, J.A.O., “Pavimentos industriais – materiais, dimensionamento e processos construtivos”, *Relatório 00-DEC/E-5*, 118 pags., Junho 2000.

Barros et al. “Betão reforçado com fibras de aço – recentes desenvolvimentos nas áreas da caracterização experimental, cálculo e aplicação. Dimensionamento e execução de pavimentos”, *Dep. Eng<sup>a</sup> Civil, Escola de Eng<sup>a</sup> da UM*, 100 pags., LNEC, Junho 2001.

Barros, J.A.O., Sena Cruz, J. “Fracture energy of steel fibre reinforced concrete”, *Journal of Mechanics of Composite Materials and Structures*, Vol. 8, No. 1 pp.29-45, January-March 2001.

F. Freitas, J.A.O. Barros and P. Fonseca, *Manual de utilizador do equipamento SENTUR - release 1.0*, Dep. De Eng. Civil, Escola de Eng. Universidade do Minho pags., 1998.

NP ENV 206, “BETÃO comportamento, produção e critérios de conformidade”, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 54pags, 1993.

RILEM TC 162 – TDF, *Materials and Structures*, Vol. 33, pp 3-5 January-February 2000a.

RILEM TC 162 – TDF, *Materials and Structures*, Vol. 33, pp 75-81, March 2000b.