

## **CAPÍTULO 2**

# **CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS SEGUNDO A PROPOSTA DO RILEM**

**POR:**

**Joaquim António Oliveira de Barros**

**Prof. do Dep. Eng<sup>a</sup> Civil da UM, email: [barros@eng.uminho.pt](mailto:barros@eng.uminho.pt)**

**José Armindo de Simas Bettencourt e Abreu Amorim**

**Aluno de Mestrado da UM, [baa.projectos@mail.telepac.pt](mailto:baa.projectos@mail.telepac.pt)**

**Joaquim Alexandre Braga Antunes**

**Investigador do DEC, email: [jantunes@civil.uminho.pt](mailto:jantunes@civil.uminho.pt)**

**Resumo:** Neste trabalho descreve-se a proposta da RILEM para caracterizar experimentalmente o comportamento à flexão do betão reforçado com fibras de aço. Resultados obtidos numa campanha de ensaios que se está a realizar no Laboratório do Departamento de Engenharia da Universidade do Minho são apresentados e analisados.

**Abstract:** This work describes the recommendation proposed by RILEM for assessing, by experimental approach, the bending behavior of the steel fiber reinforced concrete. The results obtained in a research plan that is carrying out in the Laboratory of the Civil Eng. Department of Minho University are presented and discussed.

## 2.1 – INTRODUÇÃO

Diversos trabalhos (ver o primeiro capítulo desta publicação e algumas das publicações aí referidas) têm revelado 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 um esforço no sentido da normalização dos ensaios e do 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, sendo descrita toda a envolvimento associada ao ensaio de flexão e apresentados os resultados obtidos numa campanha de ensaios que se está a realizar no Laboratório do Departamento de Eng<sup>a</sup> Civil da Escola de Eng<sup>a</sup> da Universidade do Minho.

## 2.2 – ENSAIO DE FLEXÃO SEGUNDO O RILEM

### 2.2.1 - 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.

### 2.2.2 - Provete

Na Figura 2.1 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 550mm ou 600mm, altura e largura de 150mm e vão de 500mm. Com este tipo de provete, o comprimento das fibras,  $\ell_f$ , não deve ser superior a 60mm e a dimensão máxima dos inertes deve ser inferior a 32mm.

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  $\text{H.R.} \geq 95\%$  até à preparação do teste.

A meio vão da viga, numa das suas faces laterais, deve ser aplicado um entalhe com 2 a 3mm de largura e  $25\text{mm} \pm 1\text{mm}$  de profundidade, utilizando -se um disco de corte apropriado (ver Figura 2.2).

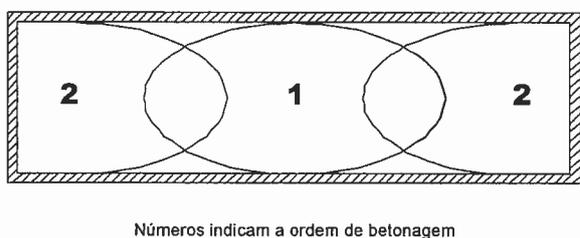


Figura 2.1 – Procedimento para encher um molde de provete para ensaio de flexão.

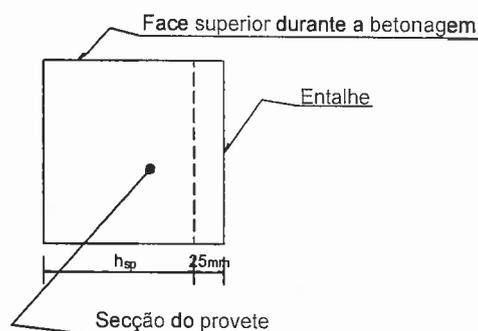


Figura 2.2 – Entalhe na secção do meio vão do provete.

### 2.2.3 – Sistema de ensaio

Na Figura 2.3 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 2.4. 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.

A foto da Figura 2.5 ilustra um sistema de ensaio de flexão de acordo com as recomendações do RILEM.

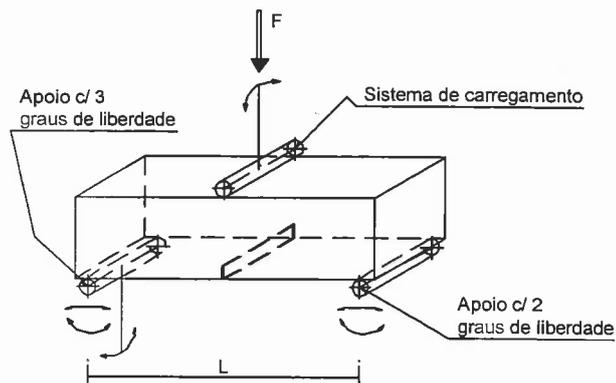


Figura 2.3 – Esquema de suporte e de aplicação da carga no ensaio de flexão.

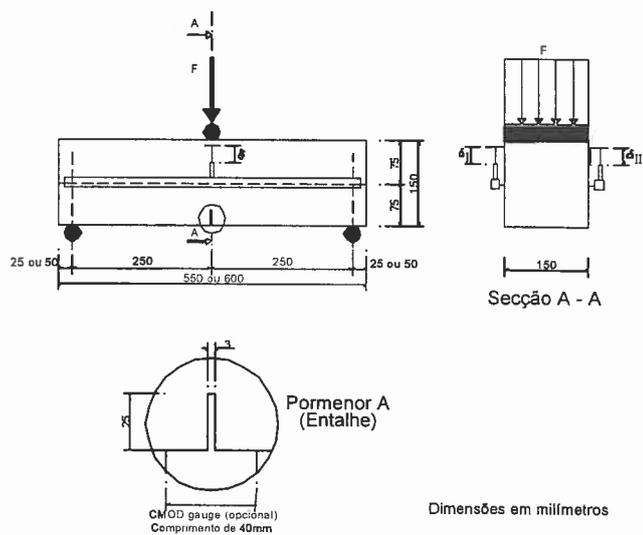


Figura 2.4 – Disposição dos transdutores.

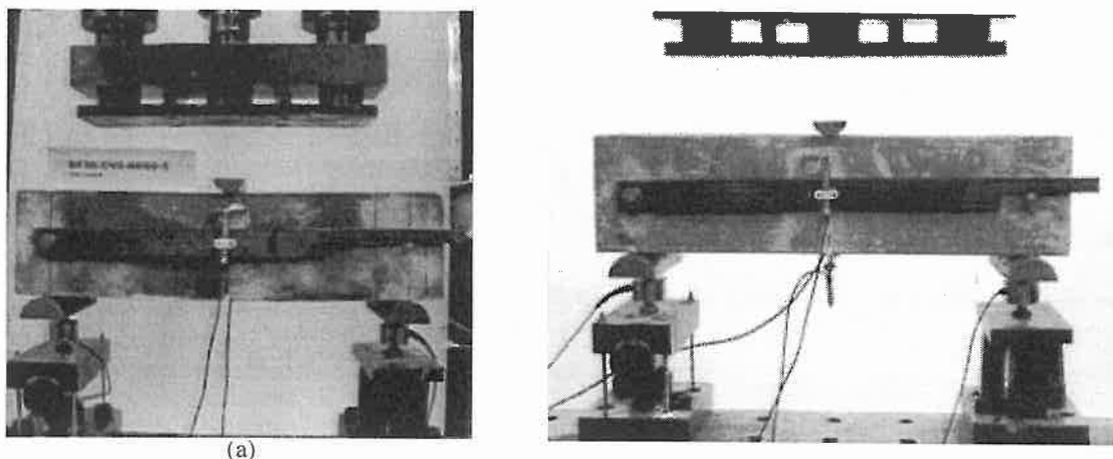


Figura 2.5 – Sistema de ensaio segundo a RILEM sem (a) e com (b) clip gauge.

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 2.6 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.

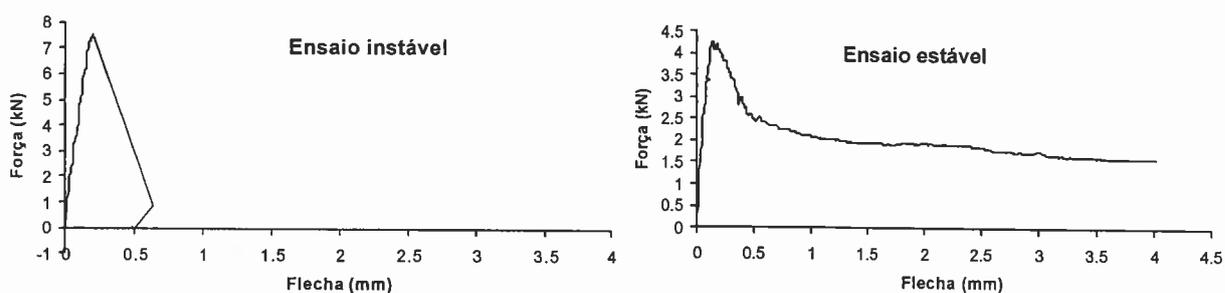


Figura 6 – Relação força-flecha em ensaio instável (a) e estável (b) em provetes de betão simples.

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 (ou em malha fechada), ver foto da Figura 2.7, (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. Ensaios 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 2.4);
- O transdutor de força deve ser capaz de ler forças de 0.1kN com precisão;
- Os transdutores de deslocamento devem ser capazes de ler, com precisão, deslocamentos de  $10 \mu m$ ;
- Se a fenda não se iniciar na boca do entalhe, o teste deve ser rejeitado.



Figura 2.7 – 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 0.2mm/min, em que a deformação é a média dos deslocamentos registados nos dois transdutores dispostos paralelamente às faces laterais do provete, pelo que:

$$\delta = \frac{\delta_I + \delta_{II}}{2} . \quad (2.1)$$

Devem ser ensaiados, pelo menos, 3 provetes.

### 2.2.5 – Resultados a extrair

Relações típicas que se obtêm no ensaio de flexão estão representadas na Figura 2.8. Na Figura 2.8,  $F_u$  [N] é a carga correspondente ao limite de proporcionalidade, que consiste na máxima força registada até uma deformação  $\delta_p$  (ver Figura 2.8b), obtida traçando-se por  $\delta=0.05$ 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:

$$M_{LOP} = \frac{F_u}{2} \frac{L}{2} \text{ [Nmm]} \quad (2.2)$$

em que  $L$  é o vão do provete. Admitindo a distribuição de tensões representada na Figura 2.9, a resistência à tracção em flexão (ou tensão correspondente ao limite de proporcionalidade),  $f_{fct,fl}$ , obtém-se da seguinte relação:

$$f_{fct,fl} = \frac{3 F_u L}{2 b h_{sp}^2} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.3)$$

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 2.2).

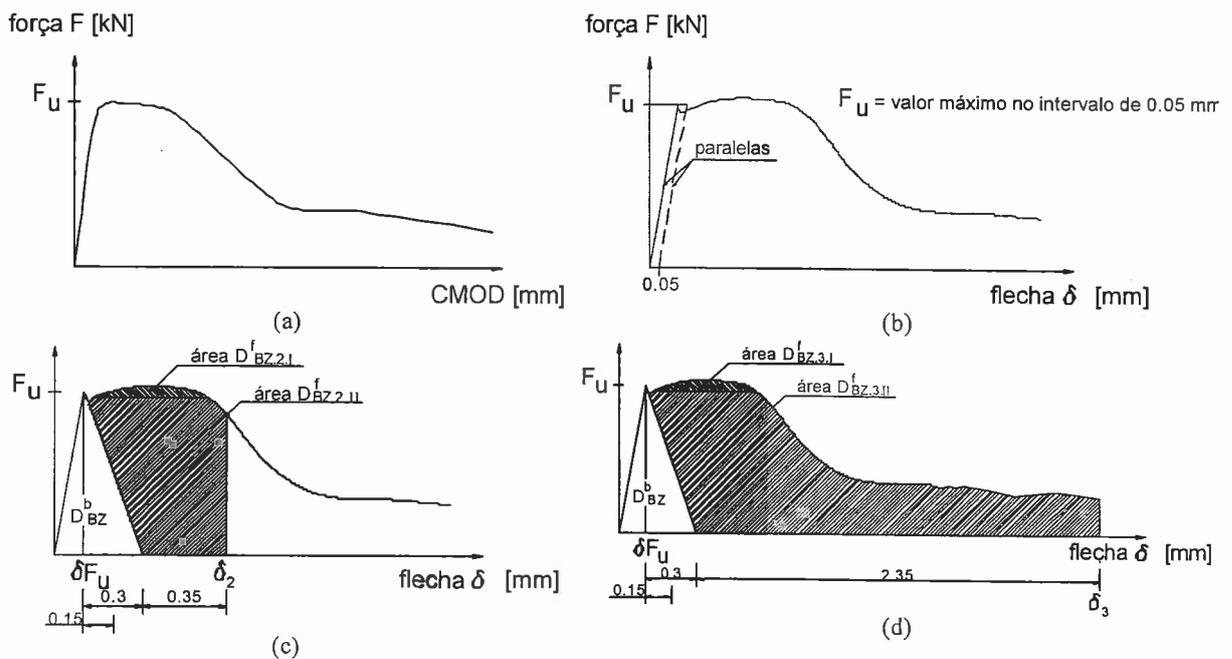


Figura 2.8 – Relações típicas força-flecha.

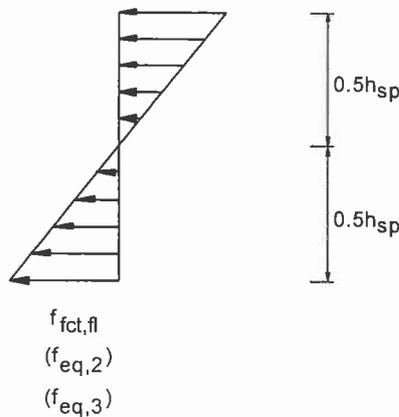


Figura 2.9 – Distribuição de tensões admitida na secção do provete.

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:

$$\begin{aligned} D_{BZ,2}^f &= D_{BZ,2,I}^f + D_{BZ,2,II}^f \text{ [Nmm]}. \\ D_{BZ,3}^f &= D_{BZ,3,I}^f + D_{BZ,3,II}^f \end{aligned} \quad (2.4)$$

Na Figura 2.8,  $\delta_{F_u}$  é a flecha correspondente ao limite de proporcionalidade. As flechas  $\delta_2$  e  $\delta_3$  são definidas como:

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \delta_{F_u} + 0.65 \\ \delta_3 &= \delta_{F_u} + 2.65 \end{aligned} \text{ [mm]}. \quad (2.5)$$

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:

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \text{ [N]} \\ F_3 &= \frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \text{ [N]} \end{aligned} \quad (2.6)$$

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

$$\begin{aligned} M_2 &= \frac{F_2}{2} \frac{L}{2} = \left( \frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \right) \frac{L}{4} \text{ [Nmm]} \\ M_3 &= \frac{F_3}{2} \frac{L}{2} = \left( \frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \right) \frac{L}{4} \text{ [Nmm]} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Admitindo a distribuição de tensões da Figura 2.9, a resistência equivalente à tracção em flexão  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  pode ser determinada por meio das seguintes expressões:

$$\begin{aligned} f_{eq,2} &= \frac{3}{2} \left( \frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \text{ [N/mm}^2\text{]} \\ f_{eq,3} &= \frac{3}{2} \left( \frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \text{ [N/mm}^2\text{]} \end{aligned} \quad (2.8)$$

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).

## 2.2.6 – Resistência à tracção em flexão

Quando apenas se conhece a resistência característica à compressão,  $f_{ck}$ , 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:

$$f_{fctm,ax} = 0.3 (f_{ck})^{2/3} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.9)$$

$$f_{fctk,ax} = 0.7 f_{fctm,ax} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.10)$$

$$f_{fct,ax} = 0.6 f_{fct,fl} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.11)$$

$$f_{fctk,fl} = 0.393 (f_{ck})^{2/3} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.12)$$

$$f_{fctm,fl} = 0.8 f_{fctm,ax} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.13)$$

Para ter em conta a altura da secção do provete, o Eurocódigo (CEB-FIP Model Code, 1993) propõe para relacionar a resistência à tracção em flexão com a resistência à tracção uniaxial a expressão:

$$f_{fctm,fl} = f_{fctm,ax} \frac{1 + 1.5(h/h_o)^{0.7}}{1.5(h/h_o)^{0.7}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.14)$$

em que  $h_o = 100\text{mm}$ .

Os valores médios e característicos para as classes de resistência de betão correntemente utilizado em aplicações de BRFA estão apresentados no Quadro 2.1.

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:

$$f_{fctk,fl} = f_{fctms,fl} - \frac{s_p t_{10}}{\sqrt{n}} - 1.645 s_p \left( 1 + \frac{s_p t_{10}}{f_{fctms,fl} \sqrt{n}} \right) \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.15)$$

$$f_{fctm,fl} = f_{fctms,fl} - \frac{s_p t_{10}}{\sqrt{n}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.16)$$

em que  $f_{fctk,fl}$  [N/mm<sup>2</sup>] é o valor característico da tensão de limite de proporcionalidade,  $f_{fctms,fl}$  [N/mm<sup>2</sup>] é o valor médio da tensão de limite de proporcionalidade da série de testes,  $f_{fctm,fl}$  [N/mm<sup>2</sup>] 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 no Quadro 2.2 alguns valores para  $n$ , e  $s_p$  é o desvio padrão:

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum (f_{fctms,fl} - f_{fct,fl})^2}{(n-1)}} \quad [\text{N/mm}^2]. \quad (2.17)$$

Quadro 2.1 – Classes de resistência do BRFA: resistência característica à compressão,  $f_{ck}$  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
$f_{ck}$	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

Quadro 2.2 – 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 (2.12), (2.13) e (2.14) pode ser tomado como a resistência à tracção em flexão do BRFA. As expressões (2.15) e (2.16) também podem ser utilizadas para determinar a resistência equivalente em flexão, característica ( $f_{eqk,2}$  e  $f_{eqk,3}$ ) e média ( $f_{eqm,2}$  e  $f_{eqm,3}$ ) do BRFA.

## 2.3 – ENSAIOS DE FLEXÃO EFECTUADOS SEGUNDO A PROPOSTA DO RILEM

### 2.3.1 - Introdução

Os ensaios de flexão descritos na presente secção inserem-se num projecto de investigação, cujo objectivo fundamental é desenvolver e caracterizar betões de custo competitivo reforçados com fibras de aço para pavimentos industriais. Neste sentido, estão a ser efectuados ensaios de flexão, segundo a proposta do RILEM, com composições reforçadas com três dos tipos de fibras mais utilizadas em pavimentos de edifícios industriais, e em quantidades que variam dos 10 aos 35Kg/m<sup>3</sup>, i.e., da menor à maior percentagem correntemente utilizadas neste tipo de aplicação.

Numa anterior fase do projecto foi desenvolvido um betão com resistência à compressão aos 28 dias entre 25 a 35MPa (aferida em cilindros), com slump superior a 150mm (apesar de o ensaio do Cone de Abrams não ser o mais adequado para avaliar a trabalhabilidade do BRFA, é ainda o mais utilizado em obra). Trata-se, por isso, de um betão com resistência suficiente para este tipo de aplicação e com a trabalhabilidade necessária (Amorim et al, 2000). Nos betões desenvolvidos a quantidade de ligante (cimento mais cinzas volantes) é de 300Kg/m<sup>3</sup>, estando -se a estudar composições com 0%, 12.5% e 25% de substituição de cimento por cinzas volantes. A campanha de ensaios envolve testes aos 7, 28 e 90 dias, pelo que o número de ensaios é bastante elevado. No presente trabalho apenas se apresentarão

os resultados relativos à série de ensaios com betões reforçados com 30Kg/m<sup>3</sup> de fibras Dramix 80/60-BN (Bekaert, 2000), às idades de 7 e 28 dias.

### 2.3.2 – Composições e algumas propriedades

O Quadro 2.3 inclui as composições dos betões desta série.

Quadro 2.3 – Composição típica dos betões da série de ensaios analisada no presente trabalho.

Componente	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
Cimento Cimpor tipo I 42.5 R	300	262.5	225
Cinzas volantes do Pego	0	37.5	75
Areia Fina	243.9	232.4	152.3
Areia Grossa	815.1	815.6	869.1
Brita Fina (5-15)	350.9	351.8	319.1
Brita Grossa (15-25)	448.5	448.2	467.0
Água	163.8	163.8	163.8
Rheobuild 1000	7.5	7.5	7.5
Fibras Dramix 80/60-BN	30	30	30
Designação da composição	<b>F80/60Qf30Cv0.0</b>	<b>F80/60Qf30Cv12.5</b>	<b>F80/60Qf30Cv25</b>

A trabalhabilidade das misturas avaliada por intermédio do ensaio de cone de Abrams, do VêBê teste e do cone invertido (ver secção 1.4.1) é indicada no Quadro 2.4, assim como a resistência média registada aos 7 e 28 dias, por intermédio de ensaios de compressão uniaxial efectuados com provetes de 150mm de diâmetro e 300mm de altura.

Quadro 2.4 – Trabalhabilidade das misturas e resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

	<b>F80/60Qf30Cv0.0</b>		<b>F80/60Qf30Cv12.5</b>		<b>F80/60Qf30Cv25</b>	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
$f_{cm}$ (MPa)	27.2	27.3	20.1	23	15.8	21.8
Slump (cm)	S/F <sup>(1)</sup> : 22 C/F <sup>(2)</sup> : 20.8		S/F <sup>(1)</sup> : 23 C/F <sup>(2)</sup> : 20.8		S/F <sup>(1)</sup> : 23.7 C/F <sup>(2)</sup> : 21.8	
VêBê (s)	C/F: 1.5		C/F: 1		-	
Cone invertido (s)	9.5		12		-	

(1) – Sem Fibras; (2) – Com Fibras.

Como seria de esperar, em regra geral, aumentando a percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes diminui a resistência à compressão e aumenta a trabalhabilidade. Regista-se ainda o aumento da resistência com a idade do betão. Para 0% de Cinzas Volantes (CV) este aumento é marginal, tal devendo-se ao facto de num dos três ensaios a resistência (22.8MPa) ter sido significativamente inferior à resistência obtida nos outros dois ensaios (29 e 30MPa). O valor anormalmente baixo deve ter ocorrido motivado por deficiência na rectificação das faces do cilindro, tendo conduzido a um modo de rotura não característico deste tipo de ensaio.

### 2.3.3 – Influência da idade dos betões

Nas Figura 2.10, 2.11 e 2.12 representa-se a relação entre a tensão na secção do entalhe (ver expressão (2.3)) e o deslocamento médio registado na secção a meio vão dos provetes (flecha) em que 0%, 12.5% e 25% de cimento foi substituído por cinzas volantes, respectivamente.

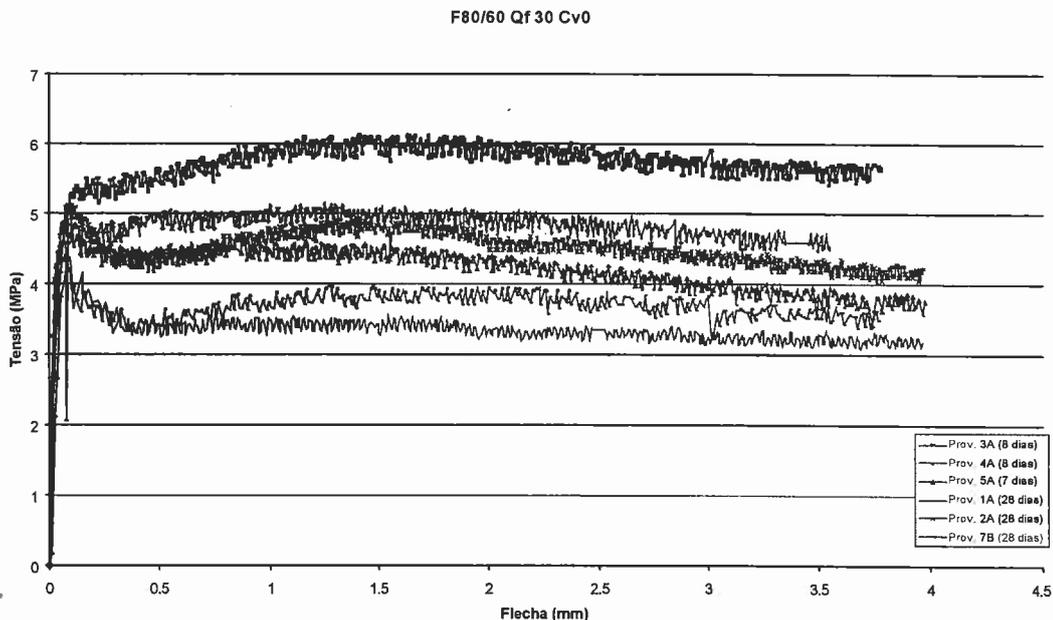


Figura 2.10 – Relação entre a tensão e a flecha nos provetes em que não se utilizou cinzas volantes.

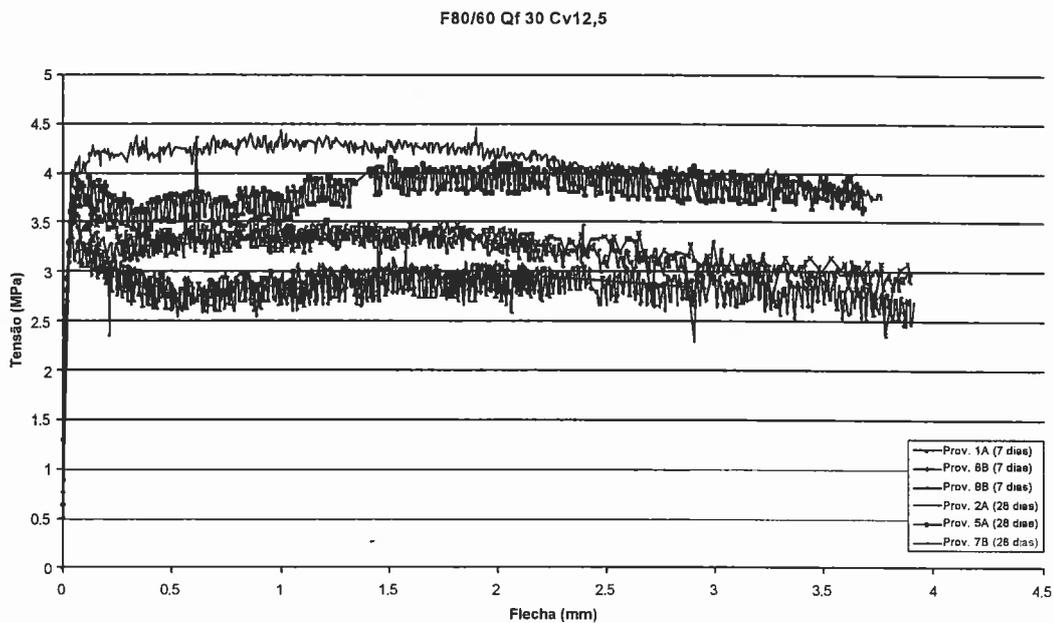


Figura 2.11 – Relação entre a tensão e a flecha nos provetes em que 12.5% do cimento foi substituído por cinzas volantes.

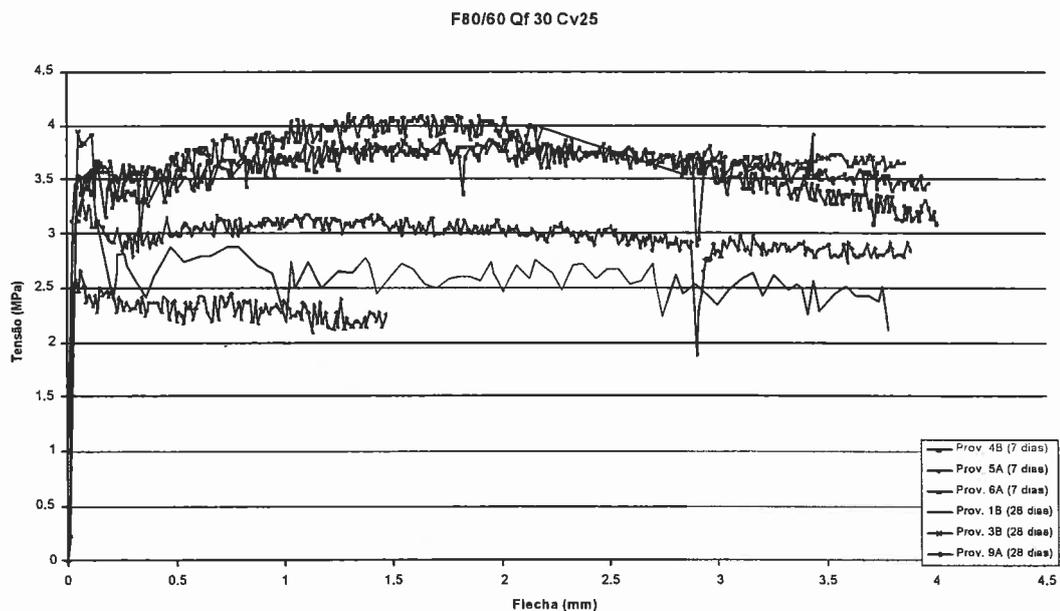


Figura 2.12 – Relação entre a tensão e a flecha nos provetes em que 25% do cimento foi substituído por cinzas volantes.

Verifica-se que, em termos gerais, a resistência quer máxima quer residual (tensão após máxima carga) é maior aos 28 dias que aos 7 dias, como seria de esperar. Os casos em que isto não acontece devem estar relacionados com deficiente funcionamento do equipamento de realização do entalhe dado que nos primeiros ensaios não foi possível assegurar, com rigor, um entalhe de 25mm.

Da análise dos gráficos verifica-se que a tensão residual é uma percentagem significativamente elevada da tensão máxima, revelando que este betão, reforçado com  $30\text{Kg/m}^3$  de fibras 80/60, é bastante dúctil.

#### 2.3.4 – Influência da percentagem de cinzas volantes

Nas Figuras 2.13 e 2.14 representa-se a relação entre a tensão e a flecha nos provetes com 7 e 28 dias de idade, respectivamente.

Da análise destas figuras verifica-se que aos 7 dias o comportamento do material é praticamente elástico-rígido plástico, com a tensão máxima e residual maior nas composições com menor percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes. Esta última tendência também se constata nos provetes ensaiados aos 28 dias, mas agora ocorre uma queda mais acentuada na capacidade de carga logo após ter sido alcançada a máxima carga.

F80/60 Qf 30 (7 dias)

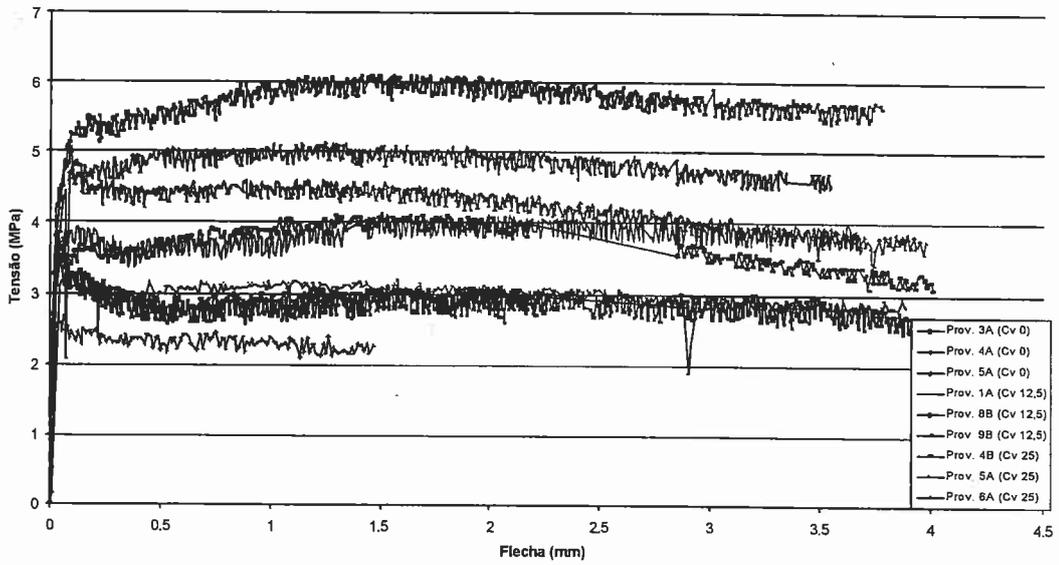


Figura 2.13 – Relação entre a tensão e a flecha nos provetes com 7 dias de idade.

F80/60 Qf 30 (28 dias)

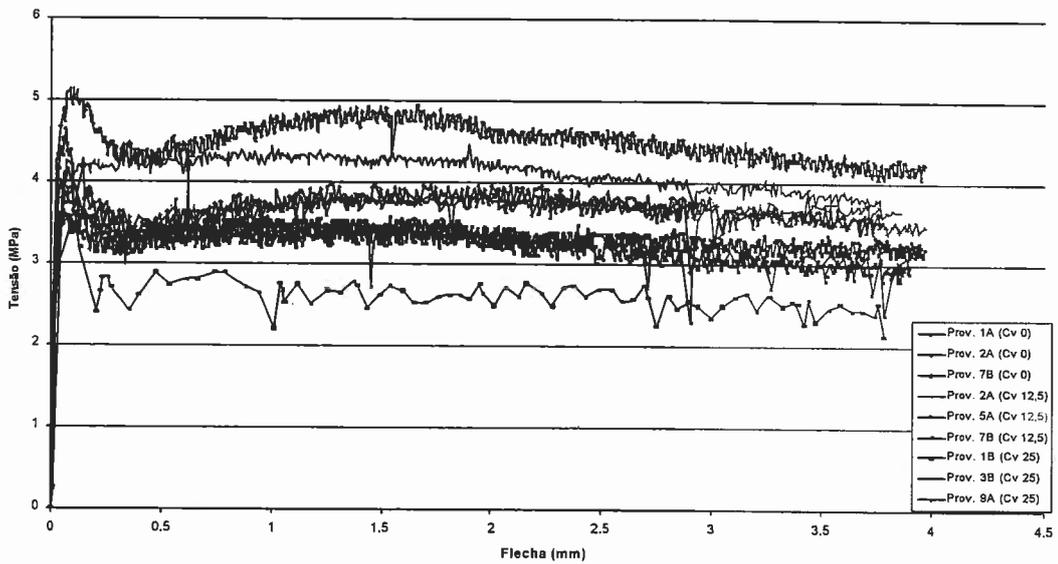


Figura 2.14 – Relação entre a tensão e a flecha nos provetes com 28 dias de idade.

## 2.4 - 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.

Amorim, J.A.S.B.A, Barros, J.A.O., Said, J., "Desenvolvimento de betão de custo competitivo reforçado com fibras de aço Dramix para pavimentos industriais", Publicação confidencial, 2000

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. "Normalização nos ensaios de caracterização experimental dos betões reforçados com fibras de aço. Dimensionamento e execução de pavimentos", *Dep. Eng<sup>a</sup> Civil, Escola de Eng<sup>a</sup> da UM*, 70 pags., 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.

Bekaert "Catálogos das fibras de aço Dramix", 2000.

CEB-FIP Model Code 1990. *Comite Euro-International du Beton*, Bulletin d'Information n° 213/214, Ed. Thomas Telford, 1993.

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

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.

