

COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO - CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E CONCEITOS PARA USO EM PROJECTO

FLEXURAL BEHAVIOR OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE - EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION AND CONCEPTS FOR THE DESIGN USE

Joaquim Barros

Prof. Auxiliar, Dep. Eng^a Civil, Escola de Eng^a da Universidade do Minho, barros@civil.uminho.pt

Resumo: *Neste trabalho descreve-se a proposta da RILEM para caracterizar experimentalmente o comportamento em flexão do betão reforçado com fibras de aço. Com base na resposta força-flecha obtida nos ensaios experimentais são propostos conceitos de tensão equivalente e tensão residual para representar a resistência do BRFA fendilhado.*

Palavras chave: *Betão reforçado com fibras, flexão, tensão de tracção em flexão, ensaio de flexão*

Abstract: *This work describes the recommendations proposed by RILEM to assess, by experimental approach, the bending behavior of the steel fiber reinforced concrete. Based on the force-deflection relationship recorded from experiments, concepts of equivalent and residual flexural stress are proposed to represent the resistance of cracked SFRC.*

Keywords: Steel fibre reinforced concrete, bending, flexural tensile stress, bending test

1. INTRODUÇÃO

Num número significativo de aplicações, a participação de fibras de aço na composição do betão tem-se revelado oportuna do ponto de vista técnico e económico, dado ser possível conceber soluções mais económicas e de segurança estrutural mais elevada. No entanto, a utilização de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) em aplicações estruturais tem sido reduzida, dado que os principais benefícios proporcionados pela adição de fibras ao betão têm sido avaliados por distintos procedimentos, sendo propostos diversos parâmetros e formulações que, na maior parte dos casos, atribuem diferentes graus de desempenho à propriedade que pretendem representar (ASTM C1018-89, 1991; JSCE-SF4, 1984; ACI 544.1R-96, 1997; RILEM, 2000a). Além disto, esses benefícios não têm sido formulados no quadro de recomendações de projecto de elevada divulgação, pelo que os projectistas sentem fundamentadas dificuldades no dimensionamento de estruturas de BRFA. Para tentar alterar este estado, a RILEM nomeou um grupo de trabalho, designado por TC 162-TDF, que publicou documentos no âmbito da caracterização experimental, da análise e do dimensionamento de estruturas de BRFA (RILEM, 2002b; RILEM, 2003). Assim, tendo em conta que a capacidade de absorção de energia durante a fase de fendilhação do betão é a propriedade mais beneficiada pela adição de fibras ao betão (Barros 1995), o RILEM centrou esforços no sentido de serem encontrados parâmetros, de simples determinação experimental, que pudessem caracterizar o comportamento pós fendilhação do BRFA. Este trabalho reporta os procedimentos recomendados pela RILEM para se determinar, experimentalmente, os parâmetros que caracterizam o comportamento fendilhado do BRFA.

2. ENSAIO DE FLEXÃO SEGUNDO A RILEM

2.1 Objectivos

Com este ensaio, a 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 de aquisição de resultados, vindo mesmo a propor determinados conceitos que podem ser utilizados nos modelos de dimensionamento de estruturas de BRFA (RILEM, 2000b)

Com base na resposta força-flecha obtida neste ensaio, avaliam-se o limite de proporcionalidade (LOP) e quatro parâmetros, designados de resistência equivalente e residual em flexão, que pretendem caracterizar o comportamento do material até determinada flecha. Podem-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, esta última de primordial importância na calibração de modelos de simulação numérica do comportamento do BRFA, baseados na mecânica da fractura (RILEM, 2002a; Olesen, 2001).

2.2 Provete

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. Aproximadamente 90% da altura do molde deve ser enchido com uma só camada. O preenchimento do molde deve ser concluído durante a fase da sua compactação, bem como a regularização da sua face exposta.

O provete deve ter comprimento de 550 mm a 600 mm, altura e largura de 150 mm e vão de 500 mm. Com este tipo de provete, o comprimento das fibras, ℓ_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, conseqüentemente, a sua eficácia em termos de reforço seja a mais representativa possível da aplicação real. No caso do betão autocompactável reforçado com fibras de aço, o molde deve ser preenchido e a sua face exposta regularizada sem qualquer compactação.

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 (paralela à direcção de betonagem), 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). Em seguida os provetes devem ser acondicionados às condições de cura atrás referidas, pelo menos durante três dias, antes da fase da sua preparação para ensaio. Esta fase não deve ser superior a três horas, tempo suficiente para realizar todas as tarefas associadas à preparação do provete para ensaio.

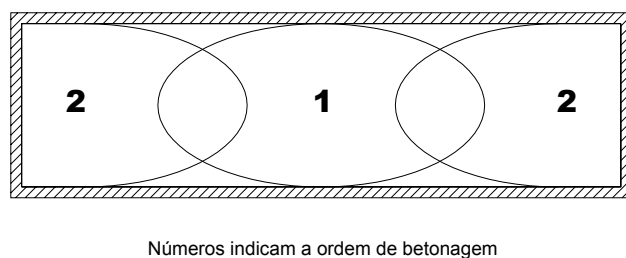


Figura 1 – Procedimento para encher um molde de provete para ensaio de flexão.

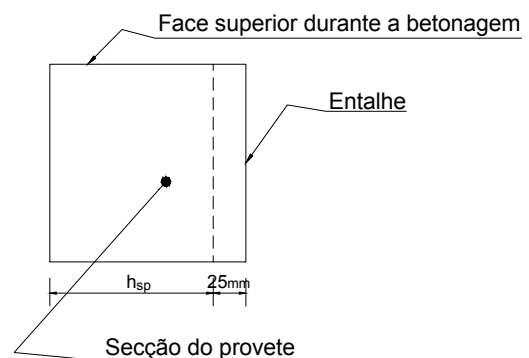


Figura 2 – Entalhe na secção do meio vão do provete.

O aparelho utilizado na determinação das dimensões do provete deve ter precisão superior ou

igual a 0.1 mm. As dimensões das faces paralelas do provete não devem diferir entre si em mais do que 3 mm.

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, no alinhamento do eixo do provete, pode-se aplicar um “clip gauge” de forma a registar a abertura de fenda e assegurar, com maior estabilidade, o controlo do ensaio (caso o ensaio seja controlado por este transdutor de deslocamentos).

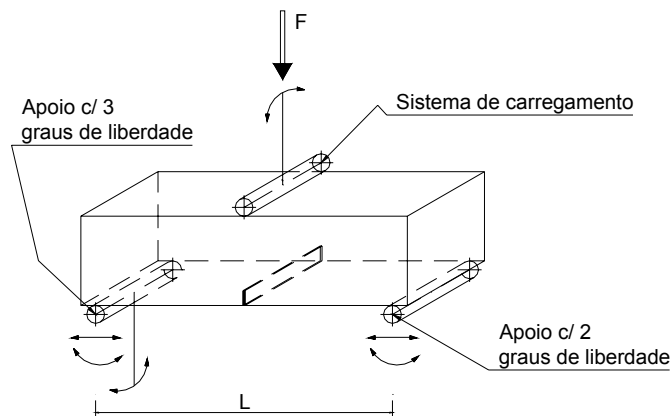


Figura 3 – Esquema de suporte e de aplicação da carga no ensaio de flexão.

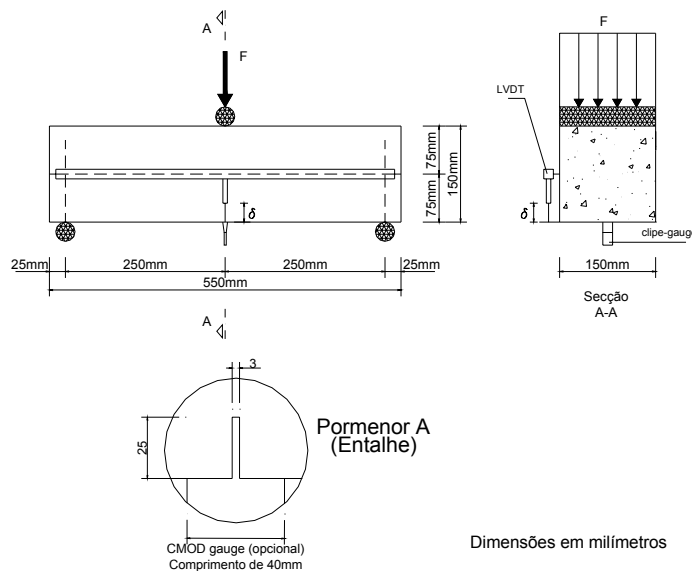


Figura 4 – Disposição dos transdutores.

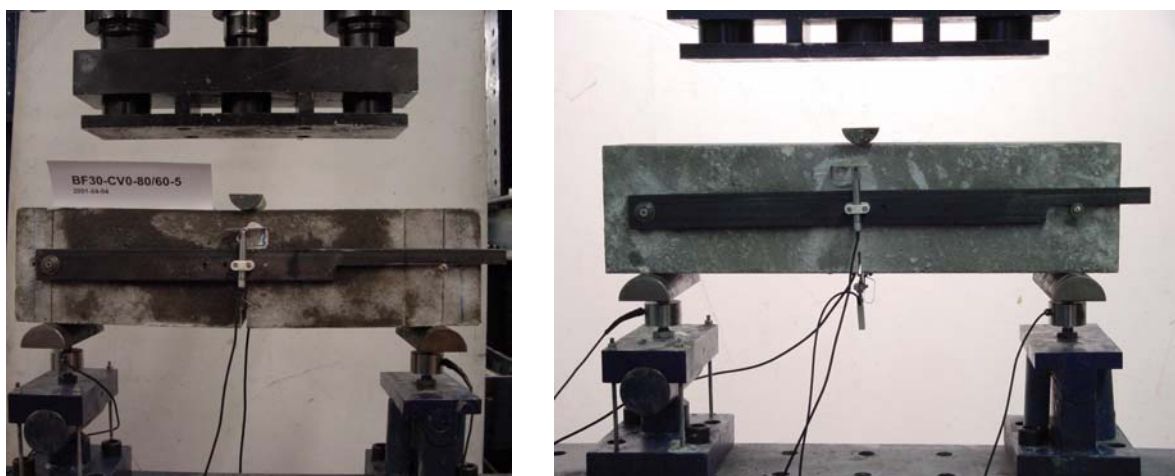
Os pontos de fixação dos elementos de suporte do "clip gauge" não devem ficar a mais do

que 5 mm da face inferior do provete (ver Figura 4) por forma a que a diferença entre a abertura de fenda medida e real seja marginal. No âmbito do TC 162-TDF foi obtida a seguinte relação,

$$CMOD=1.18\delta+\beta \quad \text{com } \beta = -0.0416 \quad (1)$$

a ser aplicada somente na região pós pico da relação F - $CMOD$ ($F - \delta$).

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



(a)

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

A barra na qual se fixa o transdutor de deslocamentos deve ficar ligada a dois pontos do provete que não se deslocam, de forma a não serem registados deslocamentos parasitas no referido transdutor.

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 flecha 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.

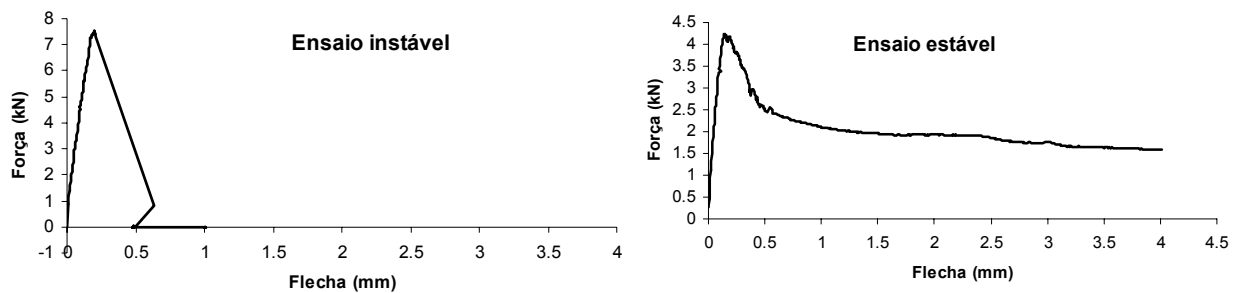


Figura 6 – Relação força-flecha em ensaio instável (a) e estável (b) em provetes de betão simples.

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

- Deve possibilitar a realização do ensaio sob controlo de flecha ou de abertura de fenda, 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 7;
- 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 por intermédio de um transdutor de deslocamento com precisão superior a $10 \mu m$ (δ - ver Figura 4);
- O transdutor de força deve ser capaz de ler forças de 0.1 kN 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 deslocamento de 0.2 mm/min, controlado pelo transdutor de deslocamento fixo no "Japanese Yoke", a meio vão do provete (Barros e Sena 2001), ou pelo "clipe gauge" colocado na boca do entalhe. Por cada composição devem ser ensaiados, pelo menos, 6 provetes.

2.5 Resultados a extrair

Relações típicas que se obtêm no ensaio de flexão estão representadas na Figura 8. Nesta Figura, F_L é a carga correspondente ao LOP, consistindo na máxima força registada até uma flecha (δ) de 0.05 mm.

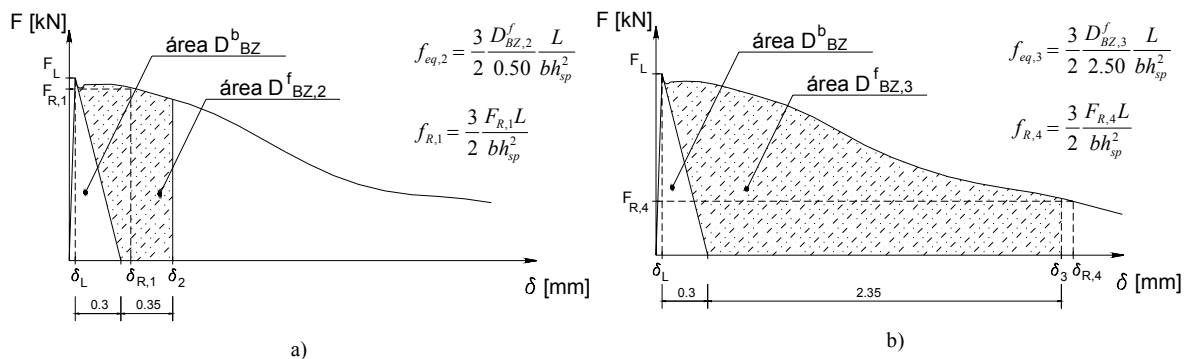


Figura 8 – Resistência equivalente e residual à tracção em flexão: a) $f_{eq,2}$ e $f_{R,1}$; b) $f_{eq,3}$ e $f_{R,4}$ ($\delta_L=0.05$ mm).

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

$$M_{LOP} = \frac{F_L L}{2} \quad (2)$$

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:

$$f_{fct,fl} = \frac{3 F_L L}{2 b h_{sp}^2} \quad (3)$$

em que b é a largura do provete e h_{sp} é a distância da extremidade interior do entalhe à superfície superior do provete (ver Figura 4).

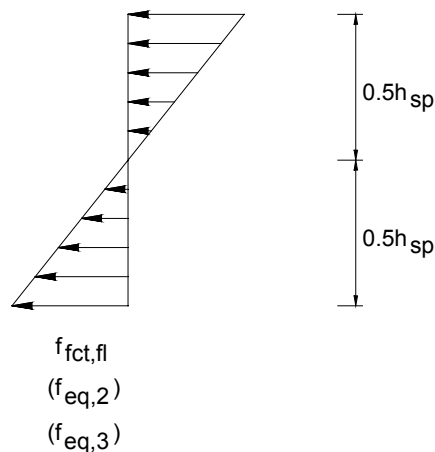


Figura 9 – Distribuição de tensões admitida na secção do provete.

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 $\delta = \delta_2 = 0.5$ mm ($\delta = \delta_3 = 2.5$ mm), sendo constituída por duas partes, uma correspondente à contribuição do betão simples, D_{BZ}^b , e outra à das fibras, $D_{BZ,2}^f$ ($D_{BZ,3}^f$). Admitindo uma distribuição linear de tensões na secção de fractura (plano de simetria da viga) e desprezando a parcela de energia afecta à fracturação do betão simples, a resistência equivalente à tracção em flexão $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ pode ser determinada por meio das seguintes expressões:

$$f_{eq,2} = \frac{3 D_{BZ,2}^f L}{2 \cdot 0.50 b h_{sp}^2} \quad (4)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3 D_{BZ,3}^f L}{2 \cdot 2.50 b h_{sp}^2}$$

Por sua vez, $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$ são a tensão para a flecha de $\delta = \delta_{R,1} = 0.46$ mm e $\delta = \delta_{R,4} = 3.0$ mm, ou CMOD=0.5 mm e CMOD=3.5 mm, respectivamente (ver Figura 8), sendo designadas por resistência residual à tracção em flexão 1 e 4, e obtidas por intermédio das expressões:

$$f_{R,1} = \frac{3 F_{R,1} L}{2 b h_{sp}^2} \quad (5)$$

$$f_{R,4} = \frac{3 F_{R,4} L}{2 b h_{sp}^2}$$

em que $F_{R,1}$ e $F_{R,4}$ são as forças registadas para $\delta_{R,1}$ e $\delta_{R,4}$. A contribuição do betão simples D_{BZ}^b no modelo proposto pela RILEM é traduzida, em termos gráficos, pelo triângulo isósceles representado na Figura 8, com $0.3 + \delta_L$ de base e F_L de altura. Este triângulo está representado na Figura 10, juntamente com a relação F- δ registada experimentalmente num provete de betão simples. Consta-se que a área sob o triângulo proposto é próxima da área sob a curva real F- δ , apesar de, quase sempre, ser inferior.

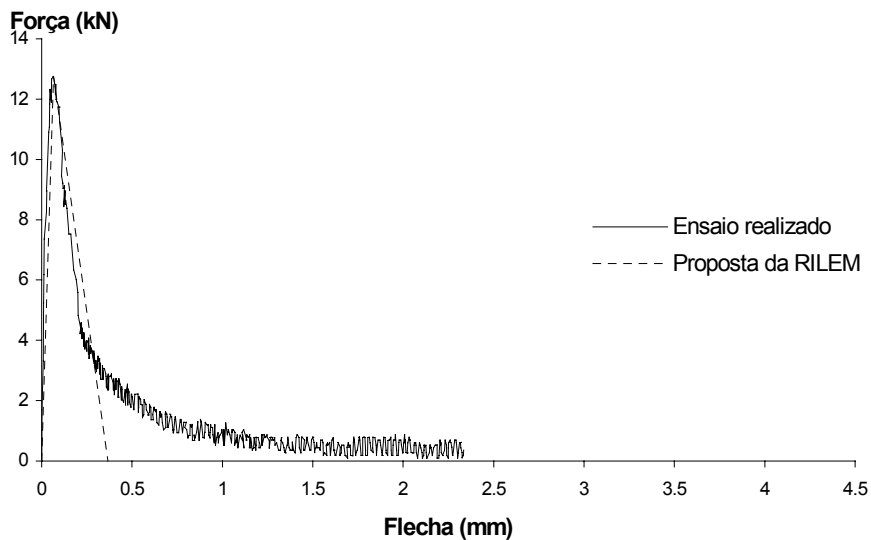


Figura 10 - Relação força-flecha registada num provete de betão simples.

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:

$$f_{fctm,ax} = 0.3 (f_{fck})^{2/3} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (6)$$

$$f_{fctk,ax} = 0.7 f_{fctm,ax} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (7)$$

$$f_{fct,ax} = 0.6 f_{fct,fl} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (8)$$

$$f_{fctk,fl} = 0.7 f_{fctm,fl} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (9)$$

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:

$$f_{fctm,fl} = f_{fctm,ax} \frac{1 + 1.5(h/h_o)^{0.7}}{1.5(h/h_o)^{0.7}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (10)$$

em que $h_o = 100$ mm e h [mm] é a altura do provete.

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:

$$f_{fctk,L} = f_{fctms,L} - \frac{S_p t_{10}}{\sqrt{n}} - 1.645 S_p \left(1 + \frac{S_p t_{10}}{f_{fctms,L} \sqrt{n}} \right) \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (11)$$

$$f_{fctm,L} = f_{fctms,L} - \frac{S_p t_{10}}{\sqrt{n}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (12)$$

em que $f_{fctk,L}$ é o valor característico da tensão de limite de proporcionalidade, $f_{fctms,L}$ é o

valor médio da tensão de limite de proporcionalidade da série de testes, $f_{fctm,L}$ 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:

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum (f_{fctm,L} - f_{fct,L})^2}{(n-1)}} \quad [\text{N/mm}^2]. \quad (13)$$

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 (9) e (11) pode ser tomado como a resistência à tracção em flexão do BRFA.

2.7 Classes de resistência residual

Os betões reforçados com fibras de aço serão classificados não somente em termos de classe de resistência a compressão, mas também em termos de classes de resistência residual, designadas por FL0.5 e FL3.5. A classe de resistência residual FL0.5 indica o valor de $f_{R,1}$, podendo variar de 1 a 6 MPa, enquanto a classe de resistência residual FL3.5 indica o valor de $f_{R,4}$, podendo variar de 0 a 4 MPa, com incrementos de 0.5 MPa. As classes de resistência residual indicam o mínimo valor característico da resistência residual à tracção em flexão, f_R , para 0.5 ($f_{Rk,1}$) e 3.5 mm ($f_{Rk,4}$) de CMOD. Por exemplo, C30/37 FL2.0/1.5 representa um BRFA de classe de resistência à compressão C30/37 e de classes de resistência residual 2.0 MPa ($f_{Rk,1} \geq 2.0$ MPa) 1.5 MPa ($f_{Rk,4} \geq 2.0$ MPa).

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho descreveram-se os procedimentos recomendados pela RILEM TC 162-TDF para caracterizar o comportamento à flexão do betão reforçado com fibras de aço.

4 - AGRADECIMENTOS

O autor agradece o financiamento atribuído pelo programa POCTI, “POCTI/34793/99 – Cost competitive steel fibre reinforced concrete for industrial pavements” da FCT, e a bolsa SFRH/BSAB/291/2002-POCTI concedida pela FCT e FSE.

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.
- “ASTM C1018-89: standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading).” (1991). *Book of ASTM Standards: Part 04.02*. ASTM, Philadelphia, Pa.
- Barros, J.A.O., “Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica”, PhD Thesis, Dep. of Civil Engineer of Oporto University, Dezembro de (1995).
- 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.
- CEB-FIP Model Code 1990. Comite Euro-International du Beton, Bulletin d’Information n° 213/214, Ed. Thomas Telford, 1993.
- The Japan Society of Civil Engineers, “Part III - 2 method of tests for steel fiber reinforced concrete”, *Concrete Library of JSCE*, N° 3, 74 pages, 1984.
- Olesen, J. F., Fictitious crack propagation in fiber-reinforced concrete beams, *Journal of Engineering Mechanics*, 272-280, March 2001.
- RILEM TC 162-TDF Committee, “RILEM 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Recommendations for bending test”, *Materials and Structures*, Vol. 33, pp 3-5 January-February 2000a.
- RILEM TC 162-TDF, “RILEM 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Recommendations for σ - ε design method”, *Materials and Structures*, Vol. 33, pp 75-81, March 2000b.

RILEM TC 162-TDF, “RILEM 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Design of steel fibre reinforced using σ -w method: principles and applications”, Materials and Structures, Vol. 35, pp. 262-278, June 2002a.

RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Final Recommendation, Materials and Structures, Vol.35, pp. 579-582, November 2002b.

RILEM TC 162-TDF, “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - σ - ϵ design method - Final Recommendation”, Materials and Structures, Vol.36, pp. 560-567, October 2003.