

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DE BETÕES REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO

J.A.O. Barros⁽¹⁾, J. Sena Cruz⁽²⁾ e Erik Ulrix⁽³⁾

⁽¹⁾ Professor Auxiliar; Dep. de Eng^a Civil - Universidade do Minho

⁽²⁾ Professor Auxiliar; Dep. de Eng^a Civil - Universidade do Minho

⁽³⁾ Arquitecto/Eng^o Civil - Biu Internacional



Resumo: O betão reforçado com fibras de aço (BRFA) é um material de matriz cimentícia a cuja composição é adicionada determinada percentagem de fibras discretas. A capacidade de absorção de energia é a principal propriedade beneficiada pelo reforço das fibras. Neste trabalho descreve-se os ensaios de flexão efectuados em vigas de BRFA com entalhe a meio vão e submetidas a três pontos de carga. Os ensaios foram efectuados sob controlo de deslocamento. Realizaram-se ensaios com séries de provetes reforçados com 30, 60 e 90 kg/m³ de fibras de aço. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos. É proposto um conceito com potencial utilização no dimensionamento de peças de BRFA.

1 – INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas tem-se desenvolvido esforços na procura de um substituto total ou parcial da armadura convencional utilizada no betão. Nesse sentido tem-se assistido ao surgimento de diversas fibras discretas que são introduzidas no betão como se tratasse de um inerte suplementar (Balaguru et al., 1992), designadamente as fibras de aço, vidro, sintéticas, minerais e naturais. Quer por motivo de resistência à agressividade do meio ambiente, quer pelo seu preço, quer ainda pelo grau de reforço que proporcionam, as fibras de aço são as mais utilizadas em aplicações estruturais de betão. Os pavimentos industriais, os túneis e a pré-fabricação são as principais aplicações de betão reforçado com fibras de aço (BRFA), em que as armaduras convencionais são substituídas por dada percentagem de fibras (Nanni et al., 1989;

Tatnall et al., 1992; Vandewalle, 1990; Barros, 1998; Barros, 1998a).

A adição de fibras ao betão melhora significativamente o comportamento frágil deste material, sendo a capacidade de absorção de energia do material a propriedade mais beneficiada (Barros, 1995; Barros et al., 1998). Para quantidades de fibras utilizadas em aplicações correntes, o aumento da resistência não é significativo (Barros, 1996). Em estruturas com elevado grau de hiperstaticidade, o aumento da capacidade de absorção de energia permite aumentar a capacidade de carga dessas estruturas e melhorar o seu comportamento à fendilhação (Barros, 1998). Dada a importância da capacidade de absorção de energia nos betões reforçados com fibras, diversos têm sido os procedimentos propostos para avaliar esta propriedade (Gopalaratnam et al., 1991; JSCE, 1984),

sendo de destacar os índices de tenacidade, a resistência equivalente em flexão e a energia de fractura. Contudo, nenhuma destas grandezas se afirmou ainda como entidade universal de avaliação da capacidade de absorção de energia do betão reforçado com fibras, pelo que não são correntemente utilizados no dimensionamento de peças de *BRFA*.

O rigor da simulação numérica do comportamento não linear material de estruturas de betão (Barros, 1995; Barros, 1999) depende significativamente da energia de fractura do material, G_f , que se define como sendo a energia dissipada na formação de uma fenda de área unitária (RILEM, 1985). A energia de fractura pode ser quantificada por meio de ensaios de tracção uniaxial ou de flexão, ambos sob controlo de deslocamento. O ensaio de tracção uniaxial é o teste mais adequado para quantificar a energia de fractura (Hordijk et al., 1991). Contudo, a estabilidade destes ensaios exige equipamentos bastante rígidos. Dado que este tipo de equipamento não está disponível na maior parte dos laboratórios, tem-se recorrido ensaios de flexão para avaliar a capacidade de absorção de energia do *BRFA*.

Com o presente trabalho pretende-se contribuir para o aumento do conhecimento relativo à capacidade de absorção de energia do *BRFA*. Para tal foram efectuados ensaios de flexão sob três pontos de carga em prismas com entalhe a meio vão. Os ensaios foram realizados com equipamento servo-controlado desenvolvido recentemente (Freitas et al., 1998). Com base na resposta força-flecha registada nos ensaios, determinou-se a tensão na secção do entalhe, a energia absorvida e a energia de fractura. É proposta uma grandeza com potencial aplicação no calculo orgânico de peças de betão reforçado com fibras. Esta

grandeza baseia-se na resposta carga-flecha, designa-se de resistência equivalente de tracção em flexão, sendo determinada para diferentes flechas. Assim, para determinada flecha, que pode ser relacionada com a abertura de fenda, determina-se a tensão de tracção que o *BRFA* pode garantir.

2 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E DOS PROVETES ENSAIADOS

2.1 - Fibras

Neste trabalho utilizou-se fibras de aço (ver Figura 1) designadas comercialmente (Bekaert, 1991) por *Dramix* ZP30/.50. As duas letras da designação comercial caracterizam a geometria e a forma como as fibras se apresentam (coladas ou soltas). Por sua vez, os dois números estão associados ao comprimento, $l_f = 30$ mm, e diâmetro, $d_f = 0.5$ mm, o que significa que as fibras têm uma esbeltez de $l_f/d_f = 30/0.5 = 60$. Estas fibras apresentam-se com as extremidades dobradas e são fornecidas em plaquetas de aproximadamente 30 fibras (ver Figura 2). As extremidades dobradas garantem uma superior eficiência em termos de ancoragem das fibras no betão.

O fornecimento das fibras em plaquetas evita a aglomeração das fibras durante a amassadura, o que melhora a trabalhabilidade da mistura e contribui para a homogeneidade da mistura. A cola que agrega as fibras dissolve-se durante o processo de amassadura, pelo que as fibras recuperam a sua própria esbeltez, conferindo eficácia ao reforço pretendido. As principais características das fibras utilizadas são apresentadas no Quadro 1.

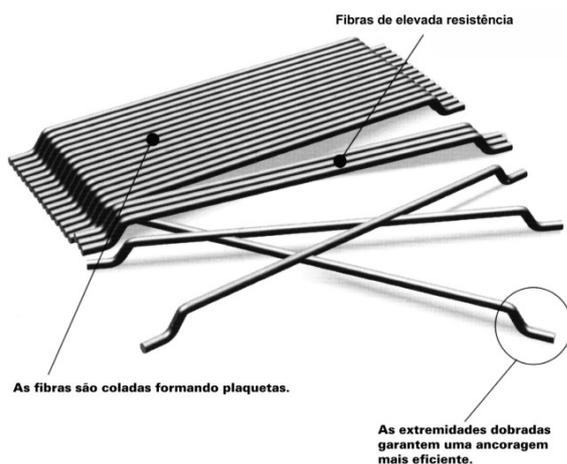


Figura 1 – Pormenores das fibras *Dramix*.

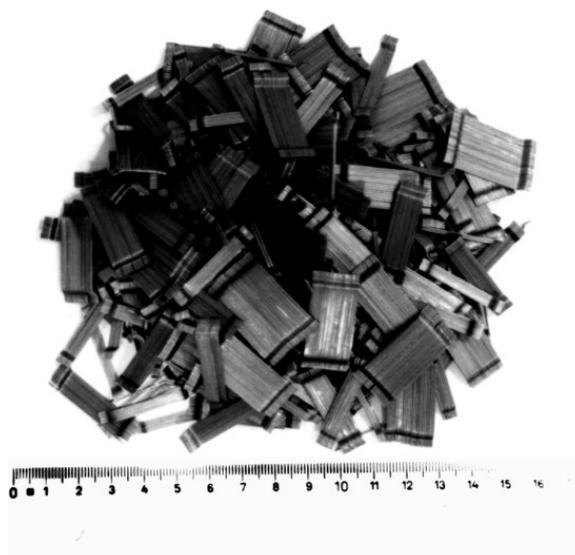


Figura 2 – Plaquetas de fibras *Dramix* ZP30/.50.

O fornecimento das fibras em plaquetas evita a aglomeração das fibras durante a amassadura, o que melhora a trabalhabilidade da mistura e contribui para a homogeneidade da mistura. A cola que agrega as fibras dissolve-se durante o processo de amassadura, pelo que as fibras recuperam a sua própria esbeltez, conferindo eficácia ao reforço pretendido. As principais características das fibras utilizadas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais características das fibras *Dramix* ZP30/.50.

Tipo de fibras	Massa volúmica (g/cm ³)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Extensão última (%)
ZP30/.50	7.8	1250	200	3 a 4

2.2 - Betões

No Quadro 2 apresenta-se a composição utilizada. Mais pormenores sobre a composição e o método de amassadura podem ser encontrados noutra publicação (Sena Cruz, 1998).

Quadro 2 - Composição dos betões.

Elemento	Composição (kg/m ³ de betão)
Cimento	450
Areia (0-3mm)	729
Brita (0-15mm)	1000
Fibras	0, 30, 60, 90

Com o intuito de avaliar a trabalhabilidade dos betões (Coutinho, 1988) efectuou-se o ensaio de abaixamento com o cone de Abrams (designado também por “*Slump Test*”) e o “*VB Test*”. Os resultados obtidos para as diferentes composições incluem-se no Quadro 3. É possível verificar um decréscimo dos valores do abaixamento com o aumento da quantidade de fibras. Constata-se ainda um aumento do tempo de leitura do “*VB Test*” com o acréscimo da quantidade de fibras, embora este aumento seja menos pronunciado que o registado no abaixamento, o que revela que, sob vibração, o *BRFA* desenvolve boa trabalhabilidade.

Quadro 3 - Resultados dos ensaios de avaliação da trabalhabilidade dos betões.

Tipo de Composição	"Slump Test" (mm)		"VB Test" (segundos)	
	Antes da adição de fibras	Após adição de fibras	Antes da adição de fibras	Após adição de fibras
Betão sem Fibras	185	-	4.1	-
Betão com 30 kg/m ³ de fibras	192	121	4.1	8.4
Betão com 60 kg/m ³ de fibras	196	65	5.4	8.6
Betão com 90 kg/m ³ de fibras	185	34	4.1	11.0

No Quadro 4 apresenta-se a resistência à compressão, f_{cm} , o módulo de elasticidade inicial, E_{ci} , e o módulo de elasticidade secante, E_{c1} , registados nos ensaios de compressão com cilindros de 150 mm de

diâmetro e 300 mm de altura. A descrição da confecção dos provetes, do equipamento e dos procedimentos de ensaio foi efectuada noutra publicação (Sena Cruz, 1998).

Quadro 4 – Resistência à compressão e módulos de elasticidade nas séries ensaiadas.

Propriedade	0 kg/m ³	30 kg/m ³	60 kg/m ³	90 kg/m ³
f_{cm} (MPa)	36.1	33.9	34.4	33.5
E_{ci} (GPa)	31.9	25.1	26.0	27.2
E_{c1} (GPa)	20.9	16.6	15.4	15.0

2.3 - Provetes

A betonagem dos provetes foi feita retirando-se betão da betoneira e colocando-o nos moldes de aço com auxílio de colheres de trolha. Todos os provetes foram compactados em mesa vibradora com o objectivo de eliminar “chochos”, expelir “bolhas” de ar e contribuir para uma distribuição homogénea das fibras na mistura. Os provetes para os ensaios de flexão tinham dimensões de 800×100×100 mm³. Estas dimensões são recomendadas pelo RILEM para avaliação da energia de fractura (RILEM, 1985) em provetes de betão simples. Admite-se que estas dimensões são ainda adequadas para provetes de betão reforçado com reduzida percentagem de fibras, como é o caso dos provetes ensaiados no presente trabalho.

O processo de cura dos provetes envolveu os seguintes passos: após serem betonados, os provetes foram colocados durante uma semana em câmara húmida; ao fim dessa semana os provetes foram descofrados e foram imersos em água até aos 28 dias; findo este tempo, os provetes foram retirados da água, tendo sido colocados em câmara húmida até uma semana antes de serem ensaiados. Durante essa semana os provetes eram entalhados com serra adiamantada e preparados para fixação dos elementos de leitura dos deslocamentos. A meio vão dos provetes, na face oposta à da betonagem, foi efectuada um entalhe com 5 mm de espessura e 25 mm de altura, a toda a largura do provete (ver Figura 3). Os ensaios foram efectuados entre os 400 e os 500 dias de vida dos provetes.

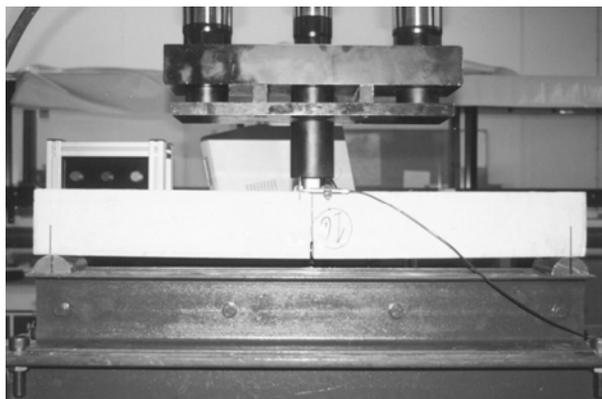
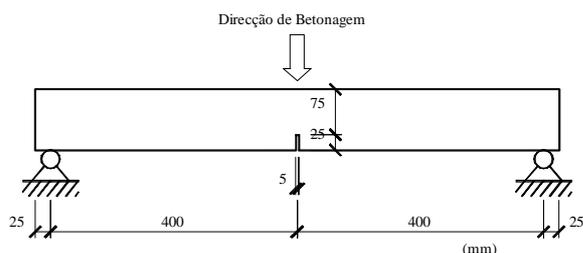


Figura 3 – Provete entalhado.

3 – EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Durante o ano de 1998 foi desenvolvido um equipamento servo-controlado que permite efectuar ensaios estáticos, de fadiga e dinâmicos em elementos estruturais (Freitas et al., 1998). O comando do sistema, a definição e a execução dos procedimentos de ensaio são efectuados por intermédio de software. O equipamento tem capacidade máxima de carga de aproximadamente 400 kN. Na fase actual, o equipamento dispõe de dois actuadores triplos de 250 kN de capacidade máxima de carga e 200 mm de curso, e pode ler até um máximo de 8 canais de transdutores de deslocamento e 4 canais de transdutores de força. Qualquer destes transdutores pode ser seleccionado para controlar o ensaio.

Um actuador triplo é constituído por três cilindros, sendo os laterais de 100 kN de capacidade máxima de carga e o central de 50 kN de capacidade máxima de carga (ver Figura 4). Este actuador pode trabalhar para

limites de carga máxima de 250 kN, 200 kN e 50 kN, activando os três cilindros, apenas os dois cilindros laterais ou apenas o cilindro central, respectivamente. Desta forma pode-se efectuar ensaios com maior estabilidade e rigor de controlo, dado ser possível seleccionar o nível de carga do actuador em face da carga máxima que se estima alcançar no ensaio. A concepção deste actuador triplo teve ainda em atenção o facto de se pretender garantir a necessária estabilidade em ensaios onde a força é bastante reduzida, como é o caso dos ensaios de avaliação da energia de fractura em provetes de betão. Fazendo deslocar os cilindros laterais é possível aplicar uma pré-carga ao cilindro central (ver Figura 5a). De forma semelhante, deslocando o cilindro central é possível aplicar uma pré-carga nos cilindros laterais (ver Figura 5b). Assim, os actuadores activos poderão ter sempre uma força não nula, o que contribui para a estabilidade do ensaio. A aplicação de regimes de pré-carga efectua-se de forma automática por intermédio do software desenvolvido.

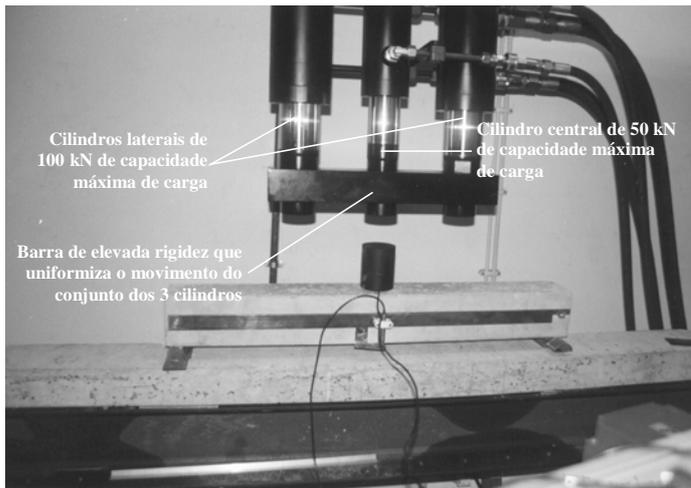
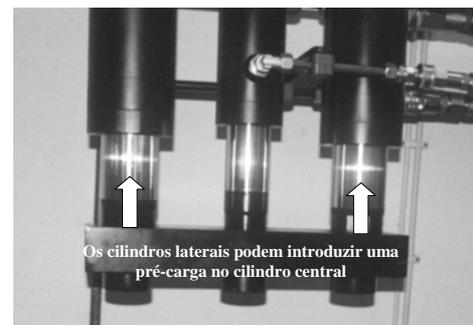


Figura 4 – Foto do actuador triplo.

Para se obter a resposta total carga-flecha, os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamento. Para esse efeito utilizou-se um transdutor com 25 mm de campo de medida linear, com 0.1% de precisão, acoplado a uma barra apoiada em dois pontos que se encontravam na intercepção do eixo longitudinal do provete com os alinhamentos verticais sobre os apoios, conforme se ilustra na Figura 6. Com este procedimento pretendia-se evitar o registo de deslocamentos parasitas (Barros, 1995).

A força foi registada por intermédio de um transdutor de força de tracção-compressão de 20 kN de capacidade máxima de carga de 0.5% de precisão. Foi construído um envólucro de forma a fixar o transdutor de força ao actuador, permitindo rotações entre o transdutor e o provete. A carga aplicada pelo transdutor era distribuída por toda a largura do provete por intermédio de uma barra de aço de $95 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$.

Para efectuar o ensaio utilizou-se um pórtico de reacção constituído por perfis HEB200 (ver Figura 7). A configuração final do pórtico de reacção foi estabelecida após alguns ensaios preliminares que



(a)



(b)

Figura 5 – Pré-cargas que podem ser aplicadas nos cilindros.

revelaram ser necessário utilizar estruturas de reacção bastante rígidas para se poder efectuar, com estabilidade, este tipo de ensaios. O ganho da placa de aquisição de dados foi também um outro parâmetro que foi calibrado durante os ensaios preliminares, dado se ter constatado que a resposta do sistema é bastante sensível a este parâmetro.

Os ensaios foram efectuados segundo o seguinte regime de velocidades de deformação: $2.5 \mu\text{m/s}$ até à flecha de $100 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m/s}$ entre os 100 e os $200 \mu\text{m}$ de flecha; $10 \mu\text{m/s}$ entre os 200 e os $2300 \mu\text{m}$ de flecha. Das três gamas de carga disponibilizadas pelo actuador triplo, seleccionou-se a mais baixa, correspondente a 50 kN, pelo que o cilindro activo era o central. Para melhorar a estabilidade dos ensaios aplicou-se uma pré-carga de 16 kN ao cilindro central. As leituras dos deslocamentos e das forças eram registados em cada segundo e gravados em ficheiro.

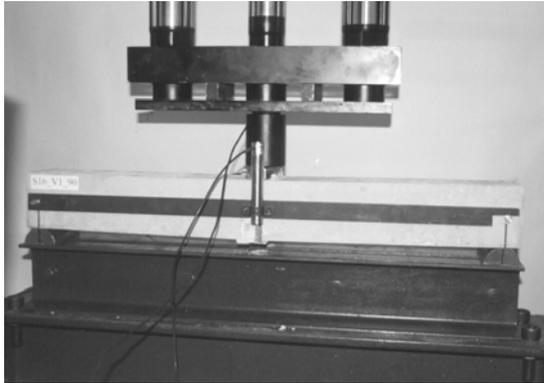


Figura 6 – Esquema de apoio do transdutor de deslocamento que controla o ensaio.



Figura 7 – Equipamento e estrutura de reacção.

4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS

A força e os deslocamentos obtidos nos ensaios foram tratados por software desenvolvido de forma a obter-se um conjunto de resultados e de relações com interesse para a interpretação do comportamento do betão reforçado com fibras de aço.

Nas Figuras 8 a 10 apresenta-se a relação força-flecha registada nos provetes reforçados com 30, 60 e 90 kg/m^3 de fibras. Na Figura 11 representa-se a curva “média” correspondente a cada uma destas séries. A curva média de determinada série foi obtida calculando-se, para cada deslocamento, a média das forças registadas nos ensaios dessa série.

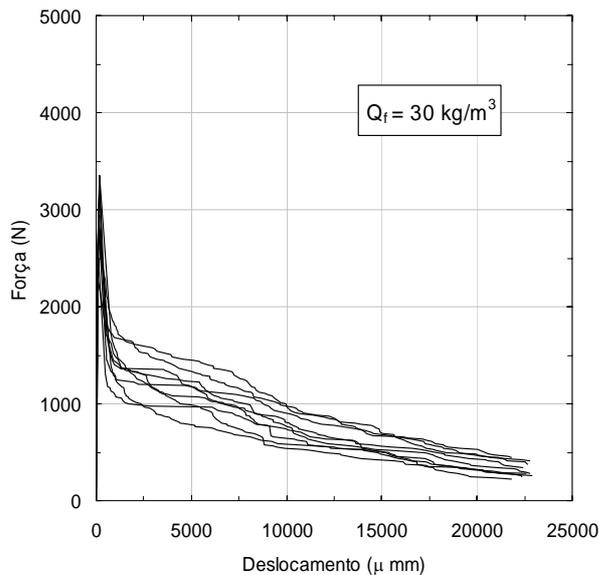


Figura 8 – Relação força-flecha nos provetes reforçados com 30 kg/m^3 de fibras.

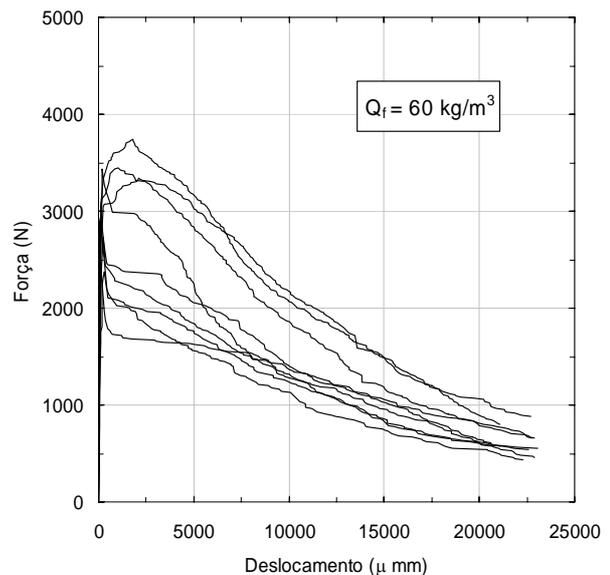


Figura 9 – Relação força-flecha nos provetes reforçados com 60 kg/m^3 de fibras.

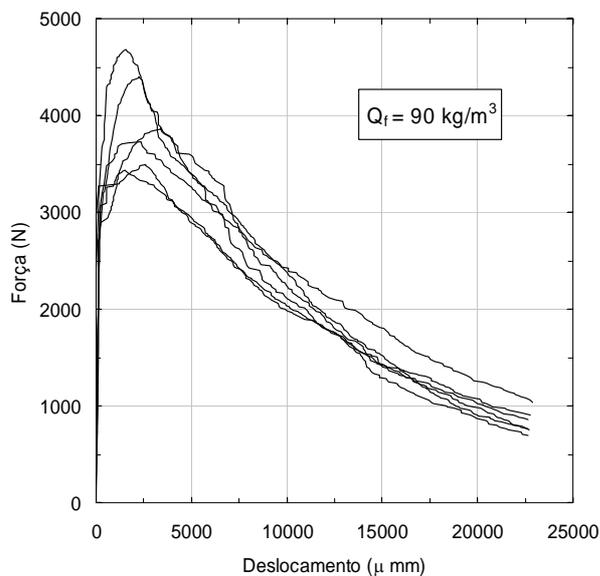


Figura 10 – Relação força-flecha nos provetes reforçados com 90 kg/m³ de fibras.

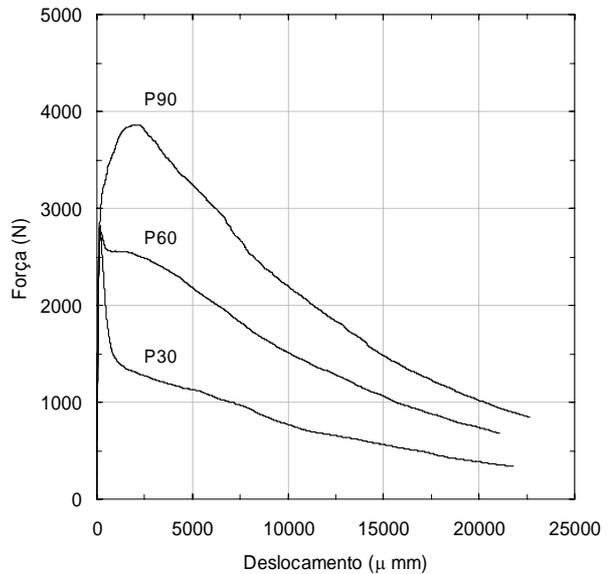


Figura 11 – Relação força média-flecha nas séries reforçados com 30, 60 e 90 kg/m³ de fibras.

A força máxima e a tensão máxima na secção do entalhe para as três quantidades de fibras analisadas estão representadas nas Figuras 12 e 13. A tensão máxima na secção do entalhe obteve-se por intermédio da relação

$$\sigma_{max} = \frac{3 F \ell}{2 b(h - a)^2} \quad (1)$$

em que F é a carga máxima, ℓ é o vão do provete (= 800 mm), b e h são a largura e a altura do provete (=100 mm) e a é a altura do entalhe (=25 mm).

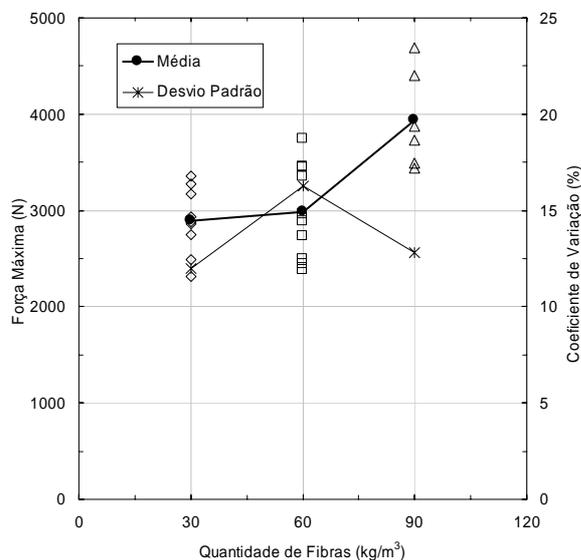


Figura 12 – Força máxima nas séries ensaiadas.

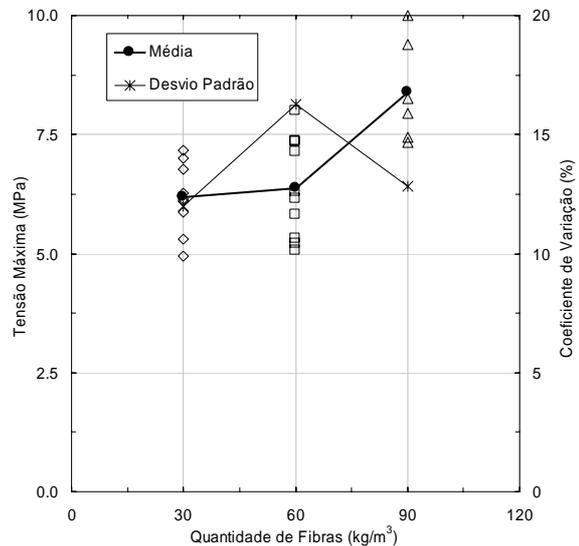


Figura 13 – Tensão máxima na secção do entalhe nas séries ensaiadas.

Dos resultados obtidos constata-se o seguinte:

- ♦ Há uma dispersão significativa nos resultados, principalmente nos provetes reforçados com 60 kg/m³ de fibras, o

que revela ser ainda necessário desenvolver investigação nos domínios da composição das misturas e do processo de amassadura;

- ◆ A carga máxima nas séries reforçadas com 30 e 60 kg/m³ de fibras é praticamente a mesma;
- ◆ A carga máxima aumenta significativamente nos provetes reforçados com 90 kg/m³ de fibras;
- ◆ A queda de força após o pico de carga diminui com o aumento da percentagem de fibras;
- ◆ Nos provetes reforçados com 90 kg/m³ de fibras, após a fendilhação da matriz, ocorre uma fase de endurecimento até ao pico de carga, motivada pela elevada

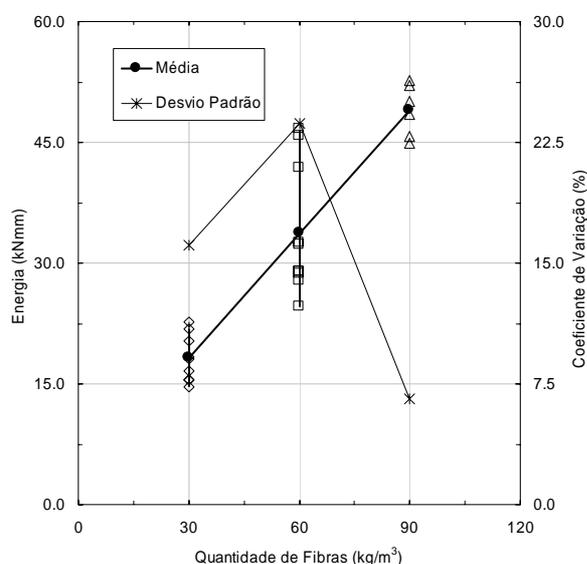


Figura 14 – Energia dissipada nas séries ensaiadas.

Constata-se que, para quantidades de fibras ZP30/.50 entre 30 a 90 kg/m³, o aumento da energia é praticamente linear, o que confirma resultados previamente obtidos (Barros, 1995). Notar porém que a dispersão dos valores obtidos é significativa, principalmente na série reforçada com 60 kg/m³ de fibras. No Quadro 5 resume-se os principais resultados obtidos.

Quadro 5 – Resultados mais significativos.

Quantidade de fibras (kg/m ³)	Força máxima (N)	Tensão máxima (MPa)	Energia de fractura (N/mm) ^{***}
30	2894.0	6.2	2.44
60	2983.0	6.4	4.54
90	3935.0	8.4	6.58

*** até à flecha de 23 mm

percentagem de fibras que “cozem” a superfície de fractura.

Na Figura 14 representa-se a energia dissipada nas séries analisadas. A energia é a área sob a curva força-flecha até ao deslocamento último (23 mm). A energia de fractura representada na Figura 15 obteve-se desta última relação dividindo a energia pela superfície de fractura (100×75 mm²). Note-se que não foi possível levar os ensaios até à deformação última, pelo que a energia determinada é inferior à que o material possui.

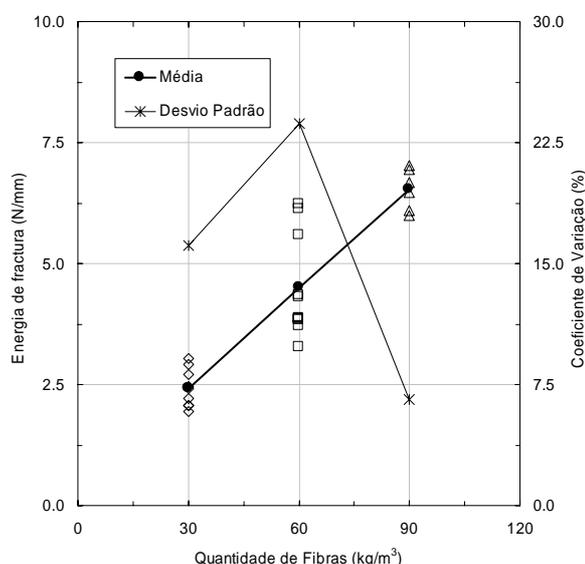


Figura 15 – Energia de fractura das séries ensaiadas.

Em provetes de betão simples com composição igual à do quadro 2 obteve-se (Barros, 1995) energia de fractura da ordem dos 0.15 N/mm e tensão máxima de tracção em flexão de 4.6 MPa.

5 – RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DE TRACÇÃO EM FLEXÃO

Conforme revelam os resultados obtidos, a capacidade de absorção de energia é a principal propriedade beneficiada pelo reforço das fibras. Por este facto diversos têm sido os procedimentos para avaliar e caracterizar esta propriedade (Gopalaratnam et al., 1991). Os mais correntes baseiam-se na definição de índices de tenacidade e na avaliação da energia de fractura. Os primeiros dão

indicação da maior ou menor capacidade de absorção de energia, mas dependem de variáveis de difícil avaliação como é o caso da flecha correspondente ao início da fendilhação do betão. São escassos os modelos de dimensionamento que utilizam os índices de tenacidade (Bekaert, 1997). Por sua vez a energia de fractura é uma propriedade aceite pela maior parte dos investigadores da ciência dos materiais. Todavia, apenas é utilizada em modelos de elevada sofisticação numérica (Barros, 1995; Barros, 1999). Em termos práticos seria importante saber qual a tensão de tracção que determinado *BRFA* garante para dada abertura de fenda (Casanova, 1996). Se esta relação for estabelecida pode-se determinar a contribuição da resistência à tracção do *BRFA* na capacidade resistente de determinada secção de um elemento estrutural. Neste sentido, propõe-se uma grandeza baseada na relação força-flecha obtida nos ensaios efectuados. Esta grandeza, denominada de resistência equivalente à tracção em flexão é, em termos conceptuais, semelhante à proposta pelo JSCE (JSCE, 1984). Contudo, enquanto no JSCE a resistência equivalente está associada a um determinado provete, a uma configuração de carga e a uma flecha, no conceito que se propõe a resistência equivalente depende somente da flecha, que por sua vez pode ser relacionada com a

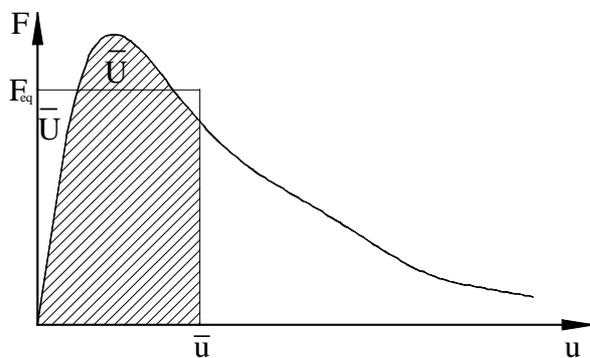


Figura 16 – Esquema de definição da resistência equivalente de tracção em flexão.

abertura máxima de fenda que se pretende limitar em termos de projecto.

A resistência equivalente de tracção em flexão, para determinada flecha, é a resistência à tracção que teria um material com comportamento rígido-perfeitamente plástico que desenvolve uma capacidade de absorção de energia igual à registada experimentalmente. Na Figura 16 representa-se esquematicamente este conceito. Assim, a resistência equivalente de tracção em flexão para determinada flecha, \bar{u} , é obtida a partir de (ver Figura 16)

$$F_{eq} \bar{u} = \bar{U} \quad (2)$$

em que \bar{U} é a energia dissipada até à flecha \bar{u} . Substituindo (1) em (2) obtém-se a resistência equivalente de tracção em flexão,

$$\sigma_{cf, \bar{u}}^{eq} = \frac{3}{2} \frac{\ell}{b(h-a)^2} \frac{\bar{U}}{\bar{u}} \quad (3)$$

Na Figura 17 representa-se a relação entre a resistência equivalente de tracção em flexão e a flecha registada nos ensaios experimentais.

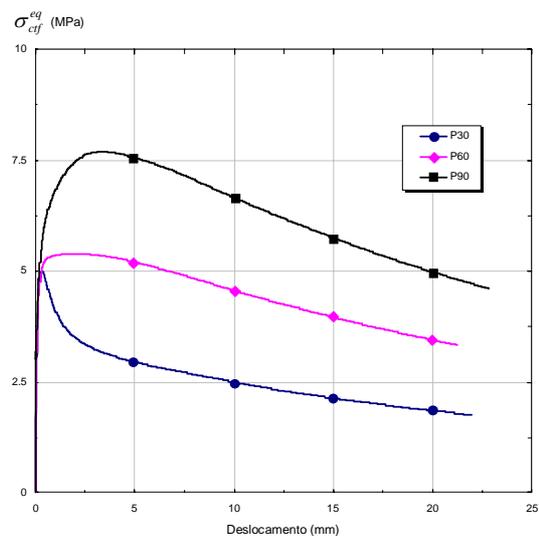


Figura 17 – Relação entre a resistência equivalente de tracção em flexão e a flecha nas séries ensaiadas.

Na presente fase da investigação está-se a trabalhar no estabelecimento da relação entre a flecha e a abertura de fenda que permitirá relacionar a resistência equivalente de tracção em flexão com a abertura de fenda.

6 – CONCLUSÕES

Neste trabalho descreve-se os ensaios de flexão efectuados com provetes de betão reforçado com 30, 60 e 90 kg/m³ de fibras de aço Dramix ZP30/.50 (30 mm de comprimento e 0.5 mm de diâmetro). Os ensaios foram realizados sob três pontos de carga, com equipamento servo-controlado e sob controlo de deslocamento. Estes ensaios tiveram como principal objectivo avaliar a capacidade de absorção de energia dos betões reforçados com estas fibras.

Dos resultados obtidos constatou-se que a força máxima aumentou significativamente apenas nos provetes reforçados com 90 kg/m³ de fibras. Contudo, a capacidade de absorção de energia aumentou consideravelmente com a percentagem de fibras, sendo este aumento praticamente linear, o que confirma resultados obtidos em trabalhos anteriores. É também de salientar a elevada dispersão de resultados, revelando a dificuldade em assegurar-se uma distribuição homogénea das fibras. Esta dispersão é bastante significativa nos deslocamentos correspondentes ao início da fendilhação e ao pico de carga, pelo que os parâmetros que caracterizam a capacidade de absorção de energia recorrendo a estes deslocamentos, como é o caso dos índices de tenacidade, são muito susceptíveis aos erros na leitura desses deslocamentos, devendo ser evitados em projecto.

Com base na relação força-deslocamento definiu-se um parâmetro denominado de resistência equivalente de tracção em flexão que representa a tensão de tracção que determinado betão fendilhado reforçado com fibras garante para dada deformação. Assim, no cálculo orgânico de peças de betão reforçado com fibras de aço, a

contribuição da resistência à tracção do betão fendilhado reforçado com fibras pode ser simulada por intermédio do parâmetro que se propõe. No seguimento deste trabalho pretende-se determinar a abertura de fenda para dada flecha, de forma a obter-se a relação entre a resistência equivalente de tracção em flexão e a abertura de fenda, de forma a ser possível determinar a tensão à tracção para dado limite máximo de abertura de fenda.

7 – BIBLIOGRAFIA

- P.N. Balaguru, S.P. Shah, *Fiber reinforced cement composites*, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, 1992.
- A. Nanni and A. Johari, “RCC pavement reinforced with steel fibers”, *Concrete International*, 64-69, April, 1989.
- P.C. Tatnall and L. Kuitenbrouwer, “Steel fiber reinforced concrete in industrial floors”, *Concrete International*, 43-47, December, 1992.
- M. Vandewalle, *Tunnelling the world*, N. V. Bekaert S.A., 1990.
- J.A.O. Barros, J.A. Figueiras “Experimental behaviour of fiber concrete slabs on soil”, *Journal Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, Vol. 3, 277-290, 1998.
- J.A.O. Barros, “Experimental behavior of mesh reinforced shotcrete and steel fiber reinforced shotcrete panels”, *International Conference of the European Ready Mixed Concrete Organization, ERMCO'98*, Lisboa, 23-27 Junho, 1998a.
- J.A.O. Barros, *Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica* Tese de Doutoramento, Faculdade de Eng. da Univ. do Porto, 1995.
- J.A.O. Barros, J. Sena Cruz, R.M. Delgado, A.G. Costa, “Análise experimental de elementos de betão armado reforçado com fibras sob acções cíclicas”,

- JPEE'98 Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Lisboa, LNEC, 421-430, Novembro, 1998b.
- J.A.O. Barros, "Caracterização do comportamento do betão reforçado com fibras de aço por intermédio de ensaios experimentais", *Ias Jornadas de Estruturas de Betão, Betões de Elevado Desempenho, Novos Compósitos*, 151-170, Outubro, 1996.
- V.S. Gopalaratnam, S.P. Shah, G.B. Batson, M.E. Criswell, V. Ramakrishnan, M. Wecharatana, "Fracture toughness of fiber reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, 88(4), 339-353, July-August, 1991.
- JSCE - The Japan Society of Civil Engineers, *Part III - 2 method of tests for steel fiber reinforced concrete*, Concrete Library of JSCE, N° 3, 1984.
- J.A.O. Barros, "Analysis of concrete slabs supported on soil", *IV Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Sevilla, Junho, 1999 (invited paper).
- RILEM TC 50-FMC, "Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams", *Materials and Structures*, 18(106), 285-290, 1985.
- D.A. Hordijk, *Local approach to fatigue of concrete*, PhD Thesis, Delft University of Technology 1991.
- F. Freitas, J.A.O. Barros, P. Fonseca, *Manual de utilizador do equipamento SENTUR - versão 1.0*, Departamento de Eng^a Civil da Escola de Eng^a da Universidade do Minho, 1998.
- Bekaert Specification, *Dramix fibres hors fils d'acier pour renforcement de béton et mortier*, Bekaert N.V., 1991.
- J.M. Sena Cruz, *Comportamento cíclico de estruturas porticadas de betão armado reforçadas com fibras de aço*, Tese de Mestrado, FEUP, 1998.
- A.S. Coutinho, *Fabrico e propriedades do betão*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2 volumes, 1988.
- Dramix *Steel fibre reinforced industrial floor design in accordance with the Concrete Society TR34*, N.V. Bekaert S.A., Responsible editor: H. Thooft - Zingem 1997.
- P. Casanova, *Bétons renforcés de fibres métalliques – du matériau à la structure*, Tese de Doutoramento, LCPC, 1996.