

COMPORTAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE BETÃO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO

Barros, J. A. O. *; Figueiras, J. A. **

* Dept. Eng. Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho

** Dept. Eng. Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto

SUMÁRIO

O betão reforçado com fibras (BRF) é um material compósito relativamente recente em aplicações de Engenharia Civil. A capacidade de absorção de energia, a ductilidade, o comportamento sob fendilhação e a resistência às ações dinâmicas e estáticas são melhoradas pela correcta adição de fibras à composição dos materiais de matriz cimentícia.

Neste trabalho são analisados os aspectos essenciais das técnicas de fabrico e as propriedades dos betões reforçados com fibras de aço (BRFA). Ensaios de compressão e flexão com controle de deformações sobre provetes reforçados com fibras de aço permitiram verificar um aumento substancial da capacidade de absorção de energia. Ensaios sobre vigas e faixas de laje revelaram que os mecanismos de reforço introduzidos pelas fibras aumentam a ductilidade e a resistência à flexão e corte do material. É efectuada uma análise comparativa entre resultados experimentais e numéricos com vista à aferição do modelo numérico desenvolvido.

ABSTRACT

The fibre reinforced concrete is a composite material with a increasing number of applications on engineering structures. The fracture energy, the ductility, the cracking behaviour and the strength characteristics under dynamic loads are significantly improved by adding steel fibres to the concrete composition.

In the present work, the mix techniques and the properties of fibre reinforced concrete are analysed. Uniaxial compression tests and three-point bending notched tests carried out with displacement control have shown a significative improvement in the fracture energy when steel fibres are present. The ductility and strength characteristics of beams and slabs experimentally tested were also improved with the presence of fibres. The experimental results obtained are used to appraise a numerical model developed for the analysis of fibre reinforced concrete structures.

1 - Introdução

Os materiais de matriz cimentícia são compósitos que apresentam comportamento essencialmente frágil sob estados de tensão que lhes induzem fendilhação. O modo de rotura é tanto mais explosivo quanto maior for a resistência do material, conclusão esta fundamentada na análise do comportamento de betões de baixa e alta resistência. Para aumentar a ductilidade do material, este é normalmente reforçado com armaduras convencionais. Sob o aspecto técnico e económico, as fibras revelam potencial para substituir a armadura convencional em determinadas aplicações. Mesmo que esta substituição possa não ser total, o reforço proporcionado pelas fibras melhora consideravelmente o comportamento do compósito, dado que a capacidade de absorção de energia, a ductilidade, o comportamento sob fendilhação e a resistência às acções dinâmicas e estáticas são melhoradas. A utilização de betões reforçados com fibras de aço (BRFA) têm vindo a aumentar nos últimos anos e o seu uso tem-se alargado a aplicações estruturais, sendo os pavimentos industriais uma das mais importantes aplicações. No presente trabalho são analisadas algumas propriedades de compósitos reforçados com fibras de aço tendo-se utilizado as denominadas comercialmente por *Dramix ZP30/.50* e *ZX60/.80*. Nesta nomenclatura as letras estão associadas ao tipo de aço e os algarismos ao comprimento (dois primeiros) e ao diâmetro (dois últimos) da fibra.

O objectivo final da presente investigação é desenvolver um modelo numérico que permita analisar e servir de base ao dimensionamento de estruturas laminares constituídas por betões reforçados com fibras (BRF). Para tal, tem-se seguido o plano de trabalhos descrito no organigrama representado na figura 1.

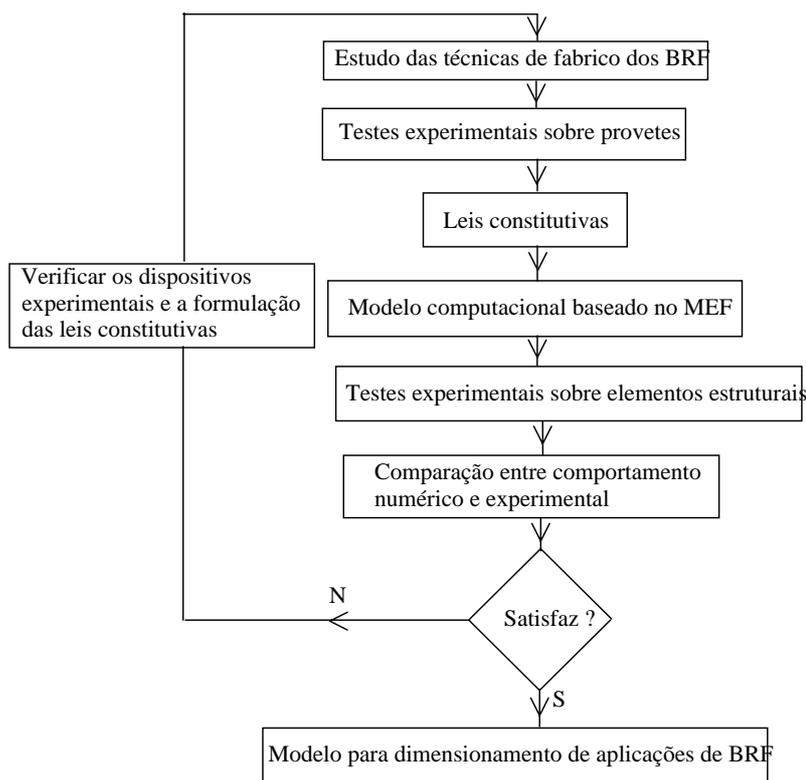


Figura 1 - Organigrama do plano de investigação.

O estudo das técnicas de fabrico dos BRF foi a primeira fase do projecto de investigação. Comparativamente com as composições de betões convencionais, as composições de BRF caracterizam-se por maiores percentagens de cimento e de inertes finos [1]. As fibras devem ser adicionadas à mistura de forma lenta com o objectivo de evitar a segregação das fibras. O tempo de amassadura deve ser o estritamente necessário às fibras ficarem embebidas pela matriz. Nas fibras de aço tipo *Dramix*, dado que são fornecidas em pentes com o objectivo de melhorar a trabalhabilidade da mistura, o tempo de amassadura deve ser o suficiente para que as fibras se desagregem e se dispersem

homogeneamente na mistura. As fibras devem ser o último elemento a ser adicionado à amassadura. O ensaio de abaixamento do cone de Abrams não é recomendado para aferir a trabalhabilidade da mistura. O ensaio de vibração e compactação Vêbê ou o ensaio de abaixamento do cone invertido são mais aconselhados [2].

Para se definir as leis constitutivas do BRF tem-se desenvolvido trabalho de investigação experimental sobre provetes. No Laboratório da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) tem-se realizado ensaios de compressão em cilindros e ensaios de flexão em prismas. Dado que o benefício do reforço das fibras se revela fundamentalmente após a fendilhação da matriz será necessário analisar-se o comportamento pós-fendilhação do compósito. Para tal, os ensaios são realizados sob controle de deformações, obtendo-se a resposta total do provete..

Definidas as leis constitutivas, estas foram integradas num código computacional baseado nas técnicas dos elementos finitos. Este código permite analisar o comportamento não linear de estruturas laminares constituídas por materiais de matriz cimentícia, quer sejam ou não reforçados com armaduras convencionais e/ou fibras. Este modelo permite simular também estruturas constituídas por betões reforçados com fibras de vidro [3]. A aferição do modelo constitutivo tem sido realizada através da comparação entre resultados obtidos por via experimental e numérica. Para tal tem-se ensaiado vigas, faixas de lajes e lajes apoiadas em solo, sendo estes elementos estruturais reforçados com diferentes percentagens de fibras. Neste trabalho apresenta-se alguns dos aspectos relevantes da investigação desenvolvida no domínio dos BRFA.

2 - Ensaio em provetes

2.1 - Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão em provetes cilíndricos de 300 mm de diâmetro foram efectuados numa prensa da MTS com capacidade máxima de 2700 kN (figura 2).

Foram ensaiados provetes com diferentes composições, percentagem e tipo de fibras de aço. Por limitação de espaço, apresenta-se apenas a relação $\sigma-\varepsilon$, aos 28 dias, obtida em provete reforçado com 0, 30, 45 e 60 Kg/m³ de fibras ZX 60/.80 (figura 3), sendo a composição caracterizada pelos seguintes principais parâmetros: a/c=0.35; i/c=3.84; 1% em peso do cimento de aditivo redutor de água; máxima dimensão dos inertes igual a 15 mm (d_{max}=15 mm).

Figura 2 - Prensa utilizada nos ensaios de compressão de provetes cilíndricos.

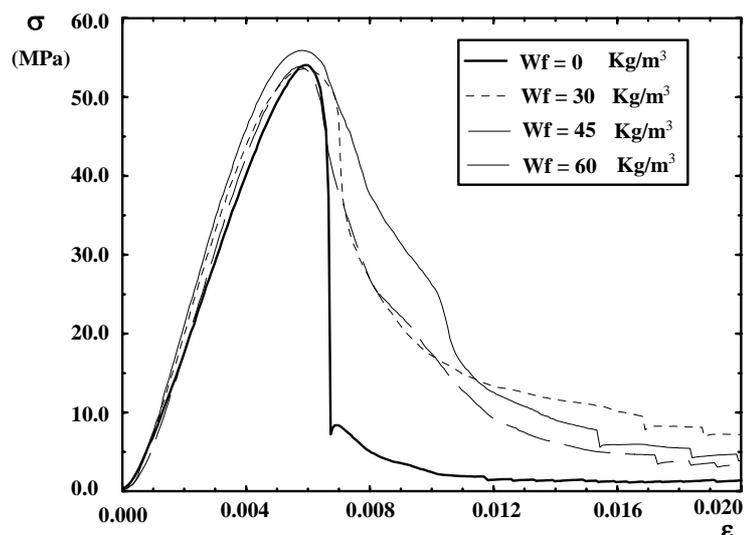


Figura 3 - Relação σ - ϵ obtida em ensaios de compressão de provetes cilíndricos de BRFA.

Os ensaios foram efectuados sob controle de deslocamentos por forma a obter-se a resposta pós-pico. A velocidade de deformação utilizada foi de 25 $\mu\text{m/s}$. Da comparação entre respostas obtidas constata-se que os provetes fibrosos apresentam um comportamento bastante mais dúctil que os provetes de betão simples. Os mecanismos de reforço das fibras transformam a rotura frágil dos betões simples em rotura dúctil nos provetes reforçados com fibras. Para simular o comportamento em compressão uniaxial dos BRFA parece ser suficiente alterar o ramo descendente, pós-pico, sendo o declive deste ramo tanto mais suave quanto maior for a percentagem e a esbelteza das fibras.

2.2 - Ensaios de flexão

A quantificação da energia de fractura através de ensaios de tracção uniaxial com controle de deformações exigem equipamentos bastante rígidos [4,5] que não são ainda economicamente acessíveis à maior parte dos Laboratórios de Engenharia Civil. Uma forma de ultrapassar o problema, conquanto de forma aproximada, é ensaiar à flexão prismas com entalhe a meio vão, sob controle de deslocamentos, tal como se representa na figura 4. A energia de fractura obtém-se através da seguinte expressão [6],

$$G_f = \frac{W_F + W_{pp} + W_o}{A_{SF}} = \frac{W_F + \gamma b h \delta_o}{b(h-a)} \quad (1)$$

em que W_F é o trabalho produzido pela força aplicada ao provete, $W_{pp} + W_o$ ($W_o \approx W_{pp}$) é o trabalho realizado pelo peso próprio do provete entre apoios, A_{SF} é a área da superfície de fractura e γ é a massa específica do material. Para não serem registados deslocamentos parasitas, a leitura dos deslocamentos faz-se através dum transdutor de deslocamentos acoplado a uma barra apoiada em dois pontos que se encontram na intercepção do eixo longitudinal do prisma com os alinhamentos verticais sobre os apoios, conforme ilustra a figura 4. Os provetes ensaiados têm as seguintes dimensões: $L=600$, $l=450$, $b=h=150$ mm. A profundidade relativa do entalhe, isto é, a relação a/h deve ser tal que o trabalho produzido seja somente o associado à progressão da fenda. Contudo, devido aos mecanismos de reforço das fibras, os provetes fibrosos têm elevada capacidade de transferência de tensões entre as faces da fenda, pelo que normalmente ocorrerá microfendilhação fora da zona de fractura e desenvolver-se-á na parte superior do provete elevados estados de tensão por compressão. Assim, a parcela W_F incluirá, principalmente nos provetes fibrosos, energia absorvida na deformação irreversível por compressão e na microfendilhação fora da superfície de fractura.

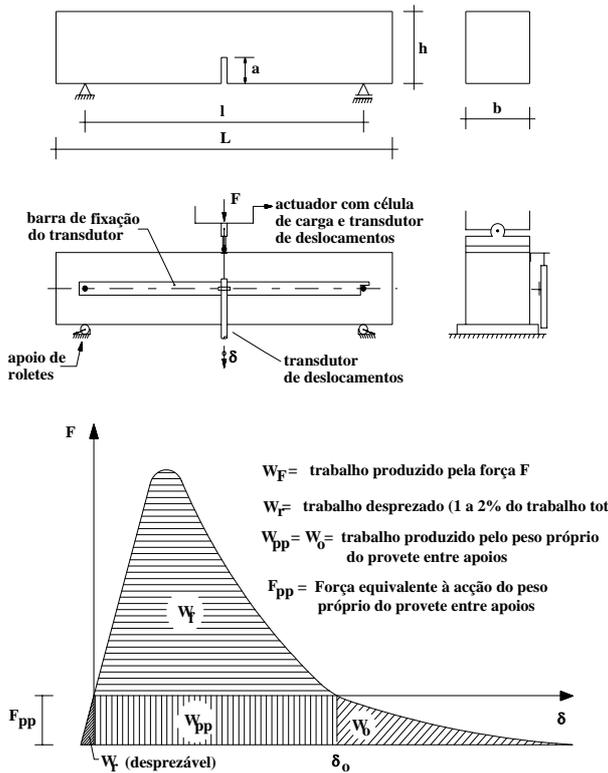


Figura 4 - Ensaio de flexão em prisma entalhado.

Para evitar tal contabilização, o RILEM [6] recomenda para os provetes de betão simples $a/h=0.5$. Todavia, para assegurar a estabilidade dos ensaios adoptou-se no presente trabalho $a/h=1/3$ e $a/h=1/4$, pelo que a W_F , principalmente a dos provetes fibrosos, poderá incluir outras parcelas de energia além da relativa à energia absorvida na fractura da superfície acima do entalhe. A estabilidade do ensaio depende também da velocidade de deformação utilizada no ensaio. No presente trabalho aos provetes de betão simples aplicou-se a velocidade de $2.5 \mu\text{m/s}$ até aos 0.5 mm de flecha, isto é, até ultrapassar a parte mais abrupta da resposta pós-pico, seguida da velocidade de $5 \mu\text{m/s}$ até aos 3 mm . Dada a maior ductilidade dos provetes fibrosos, estes foram ensaiados à velocidade de $5 \mu\text{m/s}$ até aos 3 mm , seguida da velocidade de $10 \mu\text{m/s}$ até aos 20 mm . Estes são valores que se enquadram nos limites recomendados pela norma Japonesa [7]. Na figura 5 apresenta-se respostas características tensão-deslocamento a meio vão, $\sigma-\delta$, obtidas em provetes reforçados com $0, 30$ e 45 Kg/m^3 de fibras de aço *ZP30/.50*. Inclui-se ainda a resposta dum provete reforçado com fibras de aço *ZX60/.80*. Para evidenciar o acréscimo de ductilidade com o aumento da percentagem de fibras, estas respostas são, na figura 5b), representadas até apenas $\delta=3 \text{ mm}$. As principais características da composição do material destes provetes são as seguintes: $a/c=0.45$, $i/c=3.84$ e $d_{\text{max}}=10 \text{ mm}$ para os provetes reforçados com fibras *ZP30/.50*; $a/c=0.35$, $i/c=3.84$, $d_{\text{max}}=15 \text{ mm}$ e 1% em peso do cimento de aditivo redutor de água para os provetes reforçados com fibras *ZP60/.80*. A tensão é calculada segundo a seguinte expressão,

$$f_f = \frac{3}{2} \frac{Pl + \gamma b h l^2}{b(h-a)} \quad (2)$$

que tem em conta a participação do peso próprio do prisma entre apoios.

Da análise das respostas representadas na figura 5 conclui-se que a capacidade de absorção de energia do material e a resistência em flexão aumentam consideravelmente com o reforço das fibras. Este aumento é tanto maior quanto mais elevado for o factor V_{f1}/d_f (limitado superiormente por questões de trabalhabilidade da mistura [1]).

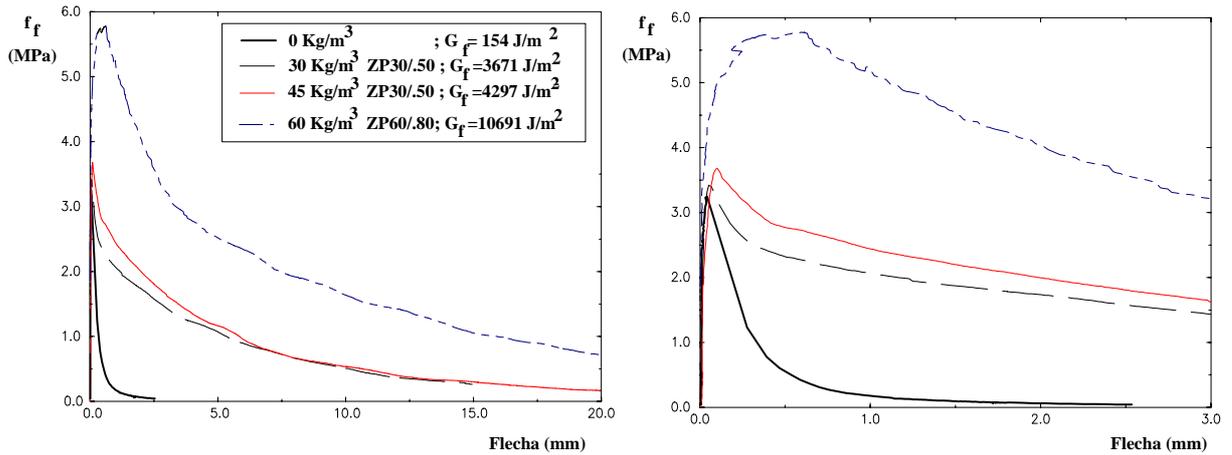


Figura 5 - Resposta σ - δ em provetes de BRFA.

3 - Modelo constitutivo

Na presente secção o modelo constitutivo introduzido no código computacional desenvolvido é resumidamente apresentado, dando-se especial relevo às especificidades associadas à influência das fibras. No modelo de fendilhação que se propõe, o comportamento dum material fendilhado de matriz cimentícia baseia-se no princípio da decomposição das deformações esquematicamente representado na figura 6.

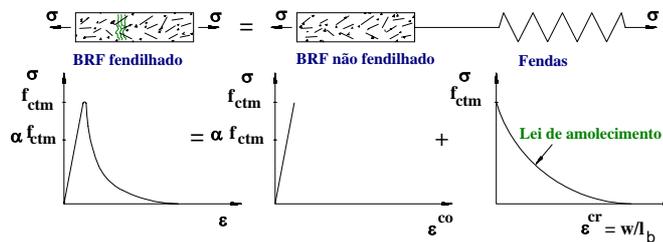


Figura 6 - Princípio da decomposição das deformações utilizado no presente modelo de fendilhação.

Após algum tratamento numérico [8], este princípio conduz à seguinte lei constitutiva,

$$\Delta\sigma = \underline{D}^{ef} \Delta\varepsilon \quad (4)$$

em que

$$\underline{D}^{ef} = \underline{D}^b - \underline{D}^b \underline{N} \left[\underline{D}^f + \underline{N}^T \underline{D}^b \underline{N} \right]^{-1} \underline{N}^T \underline{D}^b \quad (5)$$

é a matriz constitutiva. Nesta relação \underline{D}^b caracteriza o comportamento do betão entre fendas, pelo que se este estiver em regime linear \underline{D}^b será a matriz de elasticidade linear. Se o material se encontrar em regime não linear por compressão \underline{D}^b representará a matriz elasto-plástica [9]. A matriz \underline{N} define a orientação das fendas relativamente ao referencial global e \underline{D}^f simula a lei constitutiva das fendas existentes por ponto de amostragem, sendo esta lei caracterizada pelos módulos de rigidez correspondentes aos modos I e II de fractura [10]. No código computacional desenvolvido estão disponíveis um modelo de fendas distribuídas rotativas e um modelo de fendas distribuídas fixas não necessariamente ortogonais.

Pretendendo-se adaptar um modelo constitutivo vocacionado à análise de estruturas de materiais convencionais de matriz cimentícia, por forma a simular, com suficiente rigor, o comportamento de BRF, dever-se-á alterar, fundamentalmente, a lei constitutiva que rege o

comportamento da fenda, D^f . Para simular a capacidade de retenção de tensões de tracção do betão convencional, não armado e fendilhado, o código computacional tem disponíveis diagramas linear, bilinear e exponencial. Estes diagramas vêm em função dos parâmetros de fractura, que são a energia de fractura, G_f , a resistência à tracção, f_{ctm} e a largura da banda de fendilhação, l_b [10,11]. Os referidos diagramas poderão, em princípio, ser também utilizados na simulação do modo I de fractura dos materiais fibrosos, desde que se conheça os valores dos parâmetros de fractura para estes compósitos. Para tal será importante definir a energia de fractura, não somente em função da máxima dimensão dos inertes, como é feito para os betões convencionais pelo código modelo CEB-FIP 1990 [14], mas fazer também intervir na expressão que permite calcular a energia de fractura, pelo menos a percentagem e a esbelteza das fibras. A geometria da fibra, as propriedades da sua superfície, a forma como se distribuem na matriz e as suas propriedades mecânicas devem, na realidade, também intervir, de alguma forma, na capacidade de transferência de tensões entre as faces da fenda. É contudo bastante difícil quantificar o valor da influência destas propriedades, dado que para tal seria necessário desenvolver exaustivo e variado trabalho de investigação experimental. Face ao estado actual de conhecimento relativo ao comportamento dos BRF, optou-se no presente modelo constitutivo por apenas se fazer intervir as propriedades que parecem ser as relevantes para os fenómenos em estudo e que a saber são a percentagem de fibras e sua esbelteza.

Da comparação entre resultados numéricos e experimentais conclui-se que o diagrama trilinear representado na figura 7 simula o comportamento em amolecimento de BFRA com maior rigor que os anteriores diagramas.

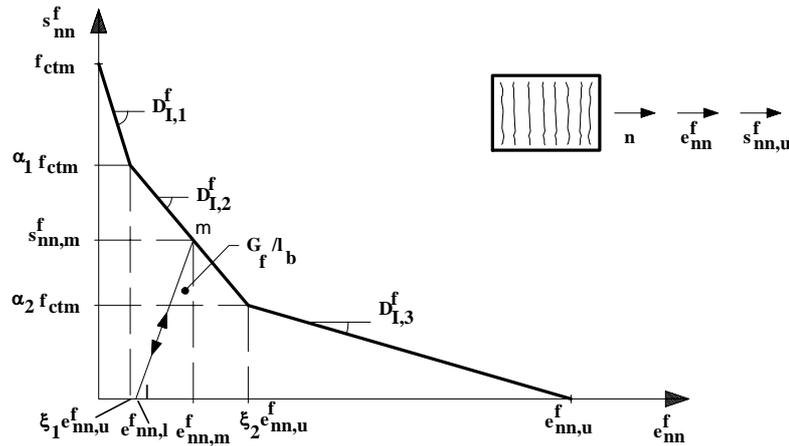


Figura 7 - Diagrama de amolecimento proposto para os BRFA.

A inclinação dos ramos do diagrama de amolecimento vem expressa em função dos parâmetros de fractura e das coordenadas dos pontos característicos, traduzindo-se por

$$D_{I,1}^f = -k_1 \frac{l_b f_{ct}^2}{G_f} \quad \text{com} \quad k_1 = \frac{(1 - \alpha_1)(\xi_1 + \alpha_1 \xi_2 - \alpha_2 \xi_1 + \alpha_2)}{2\xi_1}, \quad (6.a)$$

$$D_{I,2}^f = -k_2 \frac{l_b f_{ct}^2}{G_f} \quad \text{com} \quad k_2 = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)(\xi_1 + \alpha_1 \xi_2 - \alpha_2 \xi_1 + \alpha_2)}{2(\xi_2 - \xi_1)}, \quad (6.b)$$

$$D_{I,3}^f = -k_3 \frac{l_b f_{ct}^2}{G_f} \quad \text{com} \quad k_3 = \frac{\alpha_2(\xi_1 + \alpha_1 \xi_2 - \alpha_2 \xi_1 + \alpha_2)}{2(1 - \xi_2)} \quad (6.c)$$

e

$$e_{nn,u}^f = k_4 \frac{G_f}{f_{ctm} l_b} \quad \text{com} \quad k_4 = \frac{2}{\xi_1 + \alpha_1 \xi_2 - \alpha_2 \xi_1 + \alpha_2}. \quad (6.d)$$

Os parâmetros α_i e ξ_i são também função dos parâmetros de reforço da fibra, V_f e l_f/d_f . Tan [13] introduziu numa expressão que simula a capacidade de retenção de tensões de tracção do BRFA fendilhado, a influência tanto da tensão tangencial entre a fibra e o betão como da orientação e comprimento da fibra. Contudo esta expressão é a que melhor aproxima os resultados experimentais obtidos por Vecchio e Collins [14] sobre painéis de betão armado, pelo que a sofisticação introduzida na referida expressão parece não ser compatível com a base de dedução da expressão original. O comportamento em descarga-recarga (ver figura 7) deve também sofrer a influência das propriedades das fibras. No presente modelo é proposta a lei

$$e_{nn,l}^f = \eta e_{nn,m}^f, \quad (7)$$

em que

$$\eta = \left[1 - \exp\left(-e_{nn}^f\right) \right] \left[1 - \exp\left(-k \frac{l_f}{d_f} V_f\right) \right] \quad (8)$$

entrando e_{nn}^f em % e V_f em % e sendo K uma constante. Segundo esta expressão, quanto maior for e_{nn}^f , l_f/d_f e V_f maior será a deformação residual em descarga, o que está em consonância com o comportamento observado em ensaios experimentais. O valor da constante K vem sendo aferido através da análise comparativa entre resultados experimentais e numéricos, verificando-se que $K=0.02$ permite obter resultados satisfatórios.

A influência das fibras altera também o comportamento em corte dos materiais de matriz cimentícia. Esta influência é simulada na equação que traduz o modo II de fractura. Usualmente é atribuído ao betão fendilhado uma rigidez de corte que é uma percentagem da rigidez do material não fendilhado [15]. Esta percentagem é definida por um parâmetro denominado de factor de retenção de rigidez de corte, β . No presente trabalho este factor recebe a influência dos parâmetros que se julga ser os mais importantes para o fenómeno em abordagem

$$\beta = \exp\left(-CV_f \frac{l_f}{d_f} \left(\frac{e_{nn}^f}{e_{nn,u}^f}\right)\right) \quad (9)$$

em que C é uma constante que vem sendo aferida a partir da análise comparativa entre as respostas experimentais e numéricas.

4 - Ensaios em elementos estruturais

Para avaliar-se o desempenho do modelo constitutivo desenvolvido tem-se realizado ensaios experimentais sobre vigas, faixas de laje e lajes apoiadas em solo, sendo as respostas experimentais comparadas com as obtidas com o código numérico. Na presente secção apresenta-se, sucintamente, os aspectos mais relevantes associados ao trabalho de investigação experimental desenvolvido sobre vigas e faixas de laje.

Vigas

Vigas armadas longitudinalmente na face traccionada (ver figura 8) foram reforçadas com 0, 30, 40 e 50 Kg/m³ de fibras ZP30/.50, sendo a composição do BRFA caracterizada pelos seguintes principais parâmetros: $a/c=0.45$; $i/c=3.84$ e $d_{max}=10$ mm. O objectivo destes ensaios é avaliar a influência das fibras no comportamento de estruturas que apresentem rotura violenta por corte. A capacidade de carga registada para as vigas de BRFA variou de 26 a 31 kN não se podendo contudo afirmar, conclusivamente, que para estes elementos estruturais a capacidade de carga aumenta com o aumento da percentagem de fibras (ver figura 9). Contudo e comparativamente com vigas ligeiramente estribadas ($\phi 3$ a 0.125 m) [16] e principalmente com as vigas só reforçadas com a armadura longitudinal, a capacidade de carga aumentou. Todavia, o modo de rotura foi essencialmente o mesmo. Assim e apesar do maior número de fissuras que ocorreram com o aumento da percentagem de fibras, estas não parecem ter capacidade para substituir totalmente os estribos necessários ao dimensionamento da viga ao corte. O modo de rotura ocorrido na viga reforçada com 30 Kg/m³ de

fibras é ilustrado na figura 14 e foi idêntico em todas as vigas ensaiadas (duas por cada percentagem de fibras).

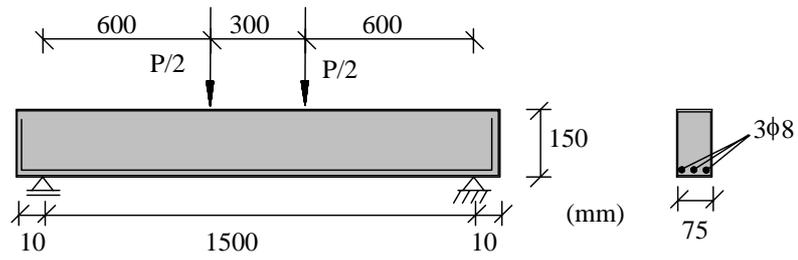


Figura 8 - Ensaio de viga armada longitudinalmente e reforçada com 30 Kg/m³ de fibras de aço ZP30/50.

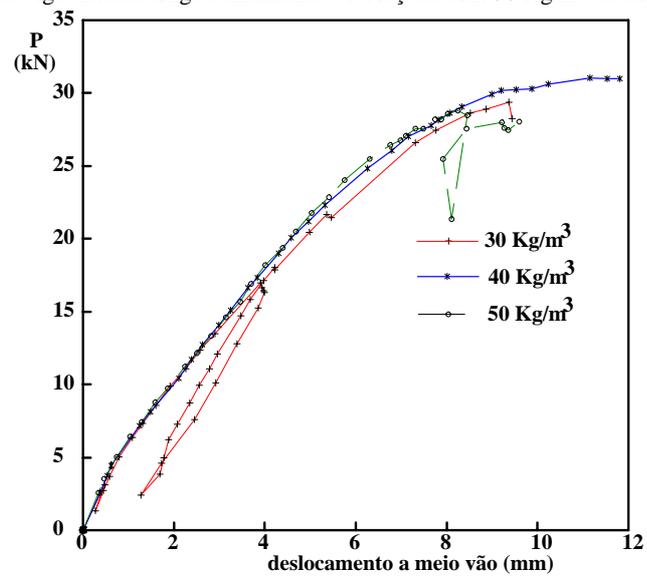


Figura 9 - Resposta carga-deslocamento a meio vão em vigas com diferente percentagem de fibras.

Faixas de laje

Para se aferir a lei de simulação do modo I de fractura proposta no presente trabalho foram ensaiadas faixas de laje sob quatro pontos de carga, tal como é representado no esquema da figura 10. A composição do betão utilizado é igual ao das vigas, exceptuando a percentagem de fibras que nas faixas de laje foi de 0, 30, 45 e 60 Kg/m³.

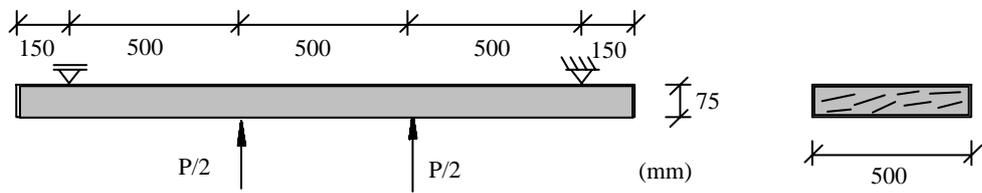


Figura 10 - Ensaio de faixa de laje de BRFA.

Na figura 11 inclui-se respostas típicas força-deslocamento sob o ponto de carga, obtidas em faixas de laje reforçadas com diferentes percentagens de fibras ZP30/.50. Saliente-se que na laje de betão simples o ensaio terminou no momento do início da fendilhação, dado que ocorreu rotura violenta logo após o aparecimento da primeira e única macrofenda.

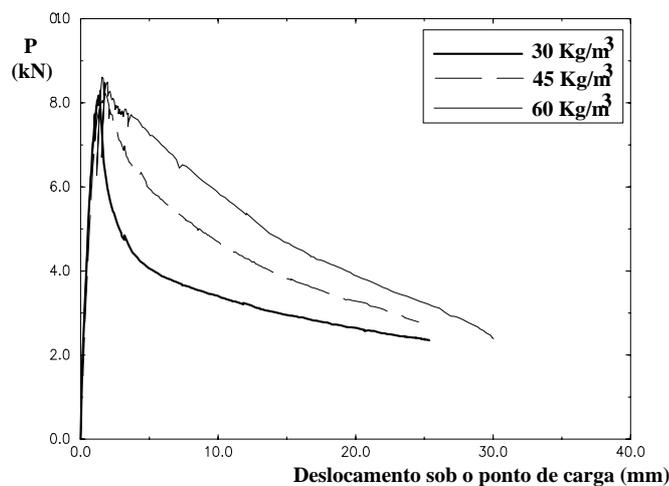


Figura 11 - Relação força-deslocamento sob o ponto de carga em faixas de laje de betão reforçado com fibras ZP30/.50.

Da análise da figura 11 conclui-se que a principal propriedade beneficiada pelo reforço das fibras é a capacidade de absorção de energia do material, que aumenta com o aumento da percentagem de fibras.

Em faixas de laje iguais às anteriores, mas pré-fendilhadas, realizaram-se também ensaios cíclicos de carga-descarga. O objectivo destes ensaios é avaliar a lei de descarga-recarga proposta para o betão fendilhado reforçado com fibras de aço. Os resultados estão neste momento a ser analisados e brevemente serão publicados.

Faixas de laje de dimensões iguais às anteriores, armadas na face traccionada (3 mm de recobrimento) com uma rede electrosoldada de 49.5 mm^2 de área de reforço longitudinal e reforçadas com 0, 30, 45 e 60 Kg/m^3 de fibras ZX60/.80 foram ensaiadas segundo dispositivos de ensaio semelhantes aos utilizados nas anteriores lajes. A composição do BRFA destas lajes é caracterizada pelos seguintes principais parâmetros: $a/c=0.35$; $i/c=3.84$; 1% em peso do cimento de aditivo redutor de água e $d_{\text{max}}=15 \text{ mm}$. O objectivo destes ensaios é avaliar o modelo de retenção de tensões de tracção para o betão fendilhado armado e reforçado com fibras. Pretende-se ainda avaliar o comportamento deste tipo de estruturas, dado que é uma solução estrutural que apresenta alguns benefícios económicos devido aos menores encargos com a mão de obra, necessária em soluções convencionais em que se utiliza armadura em varões. Nas figuras 12 e 13 apresenta-se, respectivamente, a resposta força-deslocamento a meio vão e a fendilhação registada em faixas de laje armadas com rede eletrosoldada e reforçadas com diferente percentagem de fibras ZX60/.80. Da análise destas figuras conclui-se que o reforço das fibras aumenta consideravelmente a capacidade de carga da estrutura. Tal deve-se ao facto do espaçamento entre fendas ter diminuído com o aumento da percentagem de fibras, pelo que maior número de secções resistentes são activadas. Para as lajes reforçadas com 60 Kg/m^3 de fibras, a capacidade de carga aumentou aproximadamente para o dobro da correspondente à laje reforçada unicamente com rede electrosoldada. Assim, a aplicação de fibras com elevada esbelteza ($l_f/d_f=60/.80=75$) revelam potencial para aumentar consideravelmente a capacidade de carga e a ductilidade de estruturas laminares em que não ocorram elevadas cargas concentradas que potenciem roturas por corte ou punçoamento.

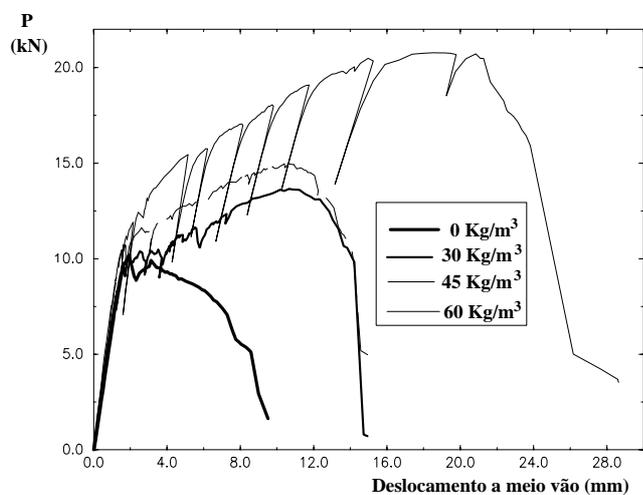


Figura 12 - Relação força-deslocamento a meio vão, em faixas de laje armadas com rede electrosoldada e reforçadas com diferente percentagem de fibras ZX60/.80.

a)

b)

c)

d)

Figura 13 - Fendilhação desenvolvida em faixas de laje armadas com rede electrosoldada e reforçadas com diferente percentagem de fibras ZX60/.80: a) 0 Kg/m³ ; b) 30 Kg/m³; c) 45 Kg/m³ e d) 60 Kg/m³.

5 - Exemplos

Por limitação de espaço, a comparação entre resultados experimentais e numéricos restringe-se a dois exemplos: viga reforçada com 30 Kg/m³ de fibras ZP30/.50 (figura 14) e faixa de laje reforçada com 30 Kg/m³ de fibras ZP30/.50 (figura 15).

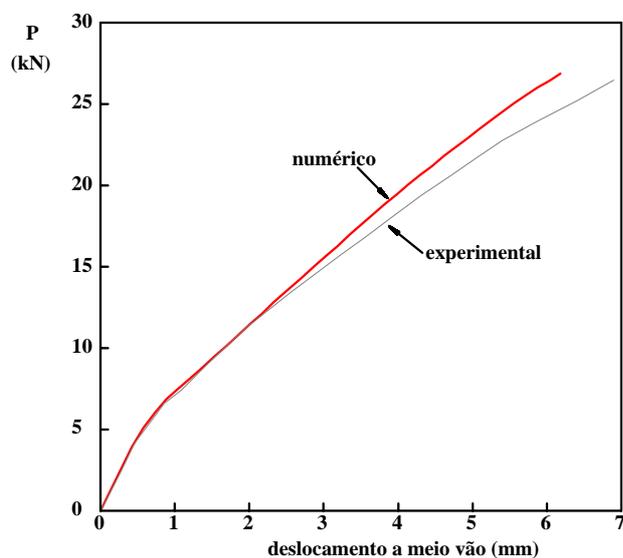


Figura 14 - Resposta experimental e numérica força-deslocamento a meio vão, em viga reforçada com 30 Kg/m³ de fibras ZP30/.50.

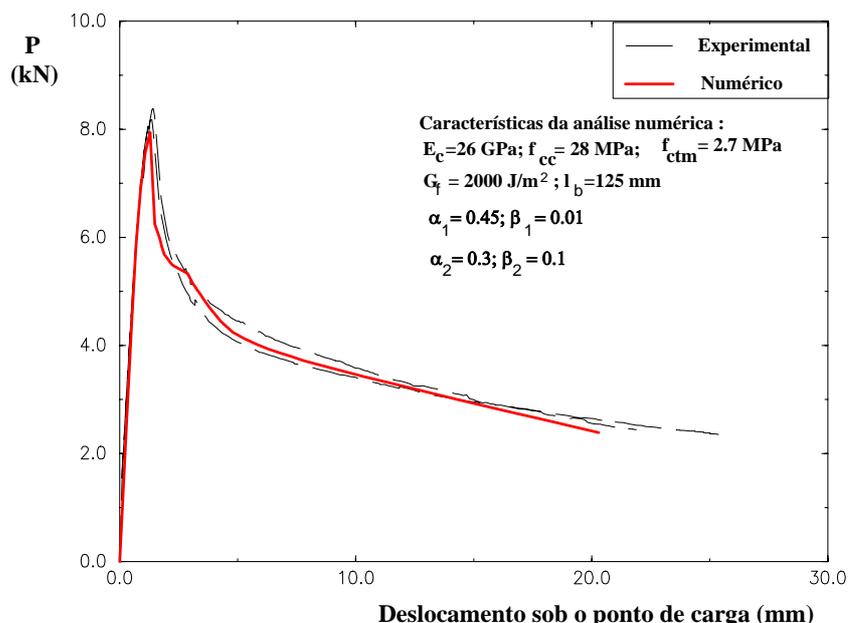


Figura 15 - Resposta experimental e numérica, força-deslocamento sob o ponto de carga da faixa de laje.

A qualidade dos resultados apresentados e os que se tem obtido permitem concluir que o modelo constitutivo desenvolvido é bastante promissor para simular o comportamento de estruturas laminares reforçadas com fibras.

6 - Conclusões

Neste artigo foi descrito o trabalho de investigação experimental e numérico que tem sido realizado no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia do Porto com o objectivo de caracterizar o comportamento e desenvolver um código computacional que permita, com suficiente rigor, analisar e dimensionar estruturas de materiais de matriz cimentícia reforçados com fibras. Estes materiais poderão ainda incluir armaduras convencionais discretas e/ou distribuídas. Ensaios de compressão e flexão com controle de deformações sobre provetes permitiram adaptar algumas das leis constitutivas do material, introduzindo-se-lhes as que se julgam ser as principais propriedades das fibras que influenciam o comportamento deste compósito, que são a percentagem e a esbelteza das fibras. O modelo constitutivo resultante foi introduzido num código computacional, sendo a sua validação aferida através da análise comparativa entre os resultados que se obtém com o referido código e os registados em ensaios experimentais realizados sobre vigas e lajes reforçadas com diferentes percentagens e esbelteza de fibras de aço. O comportamento experimental observado evidencia que a capacidade de absorção de energia é a principal propriedade beneficiada pelo reforço das fibras. A resistência à flexão aumenta também, sendo este aumento mais pronunciado quando se utiliza fibras de elevada esbelteza. A carga de colapso de lajes fracamente reforçadas com rede electrosoldada foi duplicada com a introdução de 60Kg/m^3 de fibras *Dramix ZX60/80*, o que revela que estes dois tipos de reforço pode ser utilizado em aplicações, com grande benefício técnico e económico. As propriedades reveladas pelos BRFA indicam que se trata de um compósito adequado a aplicações em que acções dinâmicas e de impacto são as dominantes no seu dimensionamento.

7 - Agradecimentos

Às empresas Bekaert N.V. e sua representante portuguesa, à SEOP (pedreira da Madalena) e à Master Builders Technologies agradece-se a oferta das fibras, brita e aditivo, respectivamente, utilizados no presente trabalho.

8 - Referências

- [1] - "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", Reported by **ACI Committee 544**, 1R-82, 22 pages, **1986**.
- [2] - "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", Reported by **ACI Committee 544**, ACI Materials Journal, pp. 583-593, November-December, **1988**.
- [3] - **Barros, J.A.O.; Figueiras, J.A.; Veen, C.V.D.**, "Tensile Behaviour of Glass Fibre Reinforced Concrete", Proceedings of the 10th international conference on experimental mechanics: Recent advances in experimental mechanics, eds. J.F. Silva Gomes et al., Vol. 2, pp.1073-1080, **1994**.
- [4] - **Barros, J.A.O.**, "Behaviour of Glass Fibre Reinforced Concrete systems", Faculdade de Engenharia Civil da Universidade do Porto, relatório técnico, **1992**.
- [5] - **Hordijk, D.A.**, "Local Approach to fatigue of concrete", PhD thesis, Delft University of Tech., **1991**.
- [6] - **RILEM** Draft Recommendation, 50-FMC Committee Fracture Mechanics of Concrete, "Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bending tests on notched beams", pp.285-290, **1985**.
- [7] - "Part III-2 Method of Tests for Steel Fiber Reinforced Concrete", **Concrete Library of JSCE**, N. 3 June **1984**.
- [8] - **de Borst, R.**, "Non-linear Analysis of Frictional Materials", Ph.D. Dissertation, Delft Univ. of Tech., **1986**.
- [9] - **Figueiras, J.A.**, "Ultimate Load Analysis of Anisotropic and Reinforced Concrete Plates and Shells", Ph.D. Thesis, C/Ph/72/83, Univ. College of Swansea, **1983**.
- [10] - **Rots, J.G.**, "Mixed-mode fracture of concrete: an experimental approach", Dissertation, Delft Univ. of Technology, (**1988**).
- [11] - **Bazant, Z.P.; Oh, B.H.**, "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", RILEM Materials and Structures, 16(93), 155-177, **1983**.
- [12] - **CEB-FIP Model Code 1990**, Comité Euro-International du Béton, Published by Thomas Telford Services Ltd.
- [13] - **Tan, K.H.; Murugappan, K.; Paramasivam, P.**, "Shear Behaviour of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams", ACI Structural Journal, V. 89, No.6, November-December, pag. 3-11, **1992**.
- [14] - **Vecchio, F.J.; Collins, M.P.**, "The Response of Reinforced Concrete to In-Plane and Normal Stresses", Pub. No. 82-03, Depart. of Civil Engineering, University of Toronto, 323p., **1982**.
- [15] - **Póvoas, R.H.C.F.**, "Modelos não-lineares de Análise e dimensionamento de estruturas laminares de betão incluindo efeitos diferidos", Tese de Doutoramento, Depart. Eng^a Civil da Faculdade de Eng^a Civil da U.P., **1991**.
- [16] - **Lourenço, P.J.B.B.**, "Observação Experimental do Comportamento de Vigas de Betão", Relatório da aula teórica-prática, provas de apurção pedagógica e capacidade científica, Depart. Eng^a Civil, Escola de Eng^a U. M., **1992**.