

ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICÁCIA DE DOIS TIPOS DE FIBRAS DE AÇO NO REFORÇO DE ELEMENTOS DE BETÃO



J. A. O. Barros
Prof. Auxiliar
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do
Minho
Guimarães



J. A. B. Antunes
Aluno de Mestrado
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do
Minho
Guimarães



J. A.S.B.A. Amorim
Aluno de Mestrado
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do
Minho
Guimarães



H. M.R. Fernandes
Aluno de Mestrado
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do
Minho
Guimarães

SUMÁRIO

Duas extensas campanhas de ensaios experimentais foram efectuadas no sentido de se avaliar o desempenho de dois tipos de fibras de aço no comportamento à flexão e à compressão de betões de custo competitivo reforçados com fibras de aço para pavimentos de edificios industriais. Os resultados obtidos são apresentados e analisados.

1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos três anos o Comité Internacional “TC 162-TDF” nomeado pela RILEM tem vindo a trabalhar no sentido de estabelecer regras e procedimentos de caracterização do betão reforçado com fibras de aço (BRFA). Com base nos ensaios propostos, aquele grupo recomenda a determinação de alguns parâmetros representativos da ductilidade introduzida pelas fibras quando adicionadas ao betão [1]. Pretende-se que estes parâmetros sejam utilizados no dimensionamento de peças de BRFA, sob o formato do Código Modelo CEB-FIP 1993 [2].

Duas campanhas de ensaios de flexão foram efectuadas segundo as recomendações da RILEM. Em cada campanha utilizou-se um tipo distinto de fibra, tendo-se analisado a influência da quantidade de fibras (Q_f), da percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes (C_v) e a idade (I_d) do betão. Nas duas campanhas utilizou-se um betão de composição otimizada para aplicação em pavimentos de edificios industriais. Neste trabalho seleccionaram-se os resultados obtidos em provetes com 28 dias de idade, tendo-se comparado o desempenho dos dois tipos de fibras em termos dos parâmetros que representam a ductilidade introduzida pela adição de fibras ao betão.

2. MATERIAIS E SISTEMA DE ENSAIO

A investigação em curso foi iniciada com o desenvolvimento de um BRFA de custo competitivo, com propriedades apropriadas para pavimentos de edifícios industriais, cumprindo as seguintes condições: resistência característica à compressão superior a 25 MPa aos 28 dias; quantidade de ligante (cimento + cinzas volantes) igual a 300 kg/m³; abaixamento (*slump*) superior a 15 cm; recurso a agregados disponíveis na região Norte do País. Foram utilizados dois tipos de fibras de aço Dramix®, comercialmente designadas, uma por RC-80/60-BN e outra por RC-65/60-BN [3]. A fibra RC-80/60-BN tem 60 mm de comprimento (l_f), 0.75 mm de diâmetro (d_f) e 80 de esbelteza (l/d_f), tendo-se realizado amassaduras com 0, 10, 20 e 30 kg/m³ com este tipo de fibras. A fibra RC-65/60-BN tem 60 mm de comprimento, 0.92 mm de diâmetro e 65 de esbelteza, tendo-se realizado amassaduras com 0, 15, 25 e 35 e 45 kg/m³ com este tipo de fibras. Ambas as fibras apresentam uma tensão de cedência da ordem dos 1100 MPa. A concepção das composições está descrita em outro trabalho [4].

Nas Figuras 1 e 2 representa-se a geometria, carregamento e disposição do transdutor de deslocamentos (LVDT) e de abertura de fenda (“clip-gauge”). As características quer da estrutura de reacção utilizada nos ensaios, quer dos aparelhos que registaram os deslocamentos e as forças, estão descritas em outro trabalho [5].

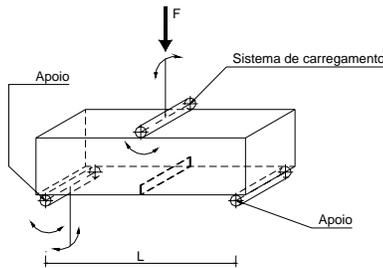


Figura 1 – Esquema de suporte e de aplicação da carga.

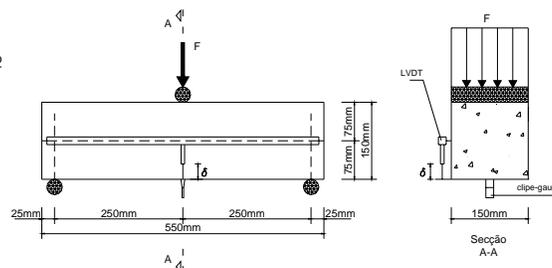


Figura 2 – Disposição dos sistemas de leitura.

Na Figura 3 apresenta-se uma resposta típica que se obtém neste ensaio. Com base na relação força-flecha determinam-se quatro parâmetros: dois designados de resistências equivalentes à flexão, $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, os quais estão relacionadas com a capacidade de absorção de energia $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$ proporcionada pelo reforço das fibras [5]; os outros dois designam-se de resistências residuais em flexão, f_{R1} e f_{R4} , representando a tensão para a flecha de $\delta_{R,1}=0.46$ mm e $\delta_{R,4}=3.0$ mm, respectivamente. As expressões que permitem determinar $f_{eq,2}$, $f_{eq,3}$, f_{R1} e f_{R4} estão incluídas na Figura 3. Em algumas das expressões propostas no Código Modelo CEB-FIP 1993 para verificação aos estados limites de utilização e últimos, o grupo TC 162-TDF introduziu a contribuição das fibras por intermédio dos parâmetros $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$. Na última reunião desse grupo, que se realizou em Bochum, Alemanha, foi incentivada a realização de pesquisa no sentido de se relacionar $f_{eq,2}$ com f_{R1} e $f_{eq,3}$ com f_{R4} , por forma a verificar a possibilidade das tensões residuais poderem vir a substituir as tensões equivalentes. A razão prende-se com o facto de f_{R1} e f_{R4} terem a vantagem de informar acerca da forma da relação força-flecha após o pico de carga, i.e., quando os mecanismos de reforço das fibras são activados, enquanto $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ apenas traduzem a maior ou menor capacidade de absorção do compósito até determinada flecha.

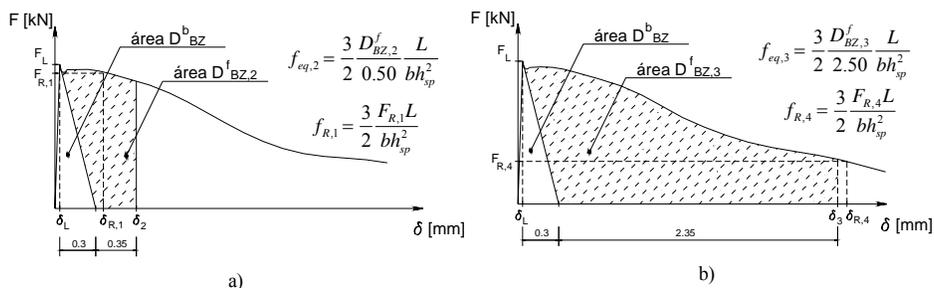


Figura 3 – Resistência equivalente à flexão a) $f_{eq,2}$ b) $f_{eq,3}$ ($\delta_L=0.05$ mm).

3. DISTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS NA SECÇÃO DE FRACTURA

Excluindo as aplicações que induzem orientações preferenciais das fibras (p.ex. betão projectado), a proposta do TC 162-TDF [1] recomenda que a direcção do carregamento no ensaio de flexão seja ortogonal à direcção de betonagem do provete (ver Fig. 4). Dado que o betão desenvolvido no âmbito do presente projecto de investigação tem elevada fluidez (abaixamento superior a 150 mm), poderá ocorrer alguma segregação de fibras durante o processo de vibração do provete, na fase da sua confecção. Esta segregação poderá induzir abertura não uniforme da fenda na superfície de fractura, aumentando os riscos de ocorrência de instabilidades durante os ensaios. Para avaliar este efeito, a secção de fractura do provete foi discretizada em 4 linhas e 5 colunas, constituindo 20 células (ver Fig. 4). Em todos os provetes foram contadas as fibras detectadas nestas células, segundo o critério descrito em [4], estando na Fig. 5 indicados os resultados obtidos (em ordenadas estão representadas as colunas que discretizam a secção de fractura do provete). Da análise desta figura pode-se verificar que, para os dois tipos de fibras, ocorreu um aumento da concentração de fibras no sentido da betonagem, justificando o facto de, em alguns provetes, se ter observado desenvolvimento não uniforme da superfície de fractura [4,5].

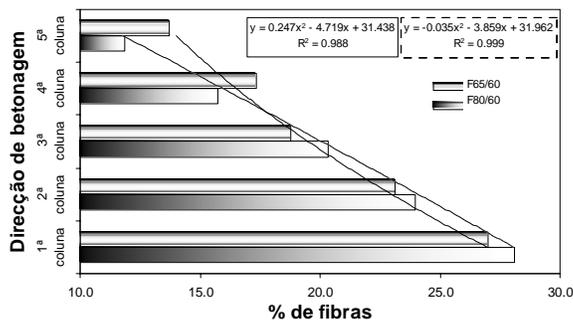


Figura 4 – Discretização da secção de fractura dos provetes para avaliação da distribuição das fibras.

Figura 5 – Distribuição das fibras pelas colunas que discretizam a secção de fractura.

4. INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE FIBRAS E DA PERCENTAGEM DE SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR CINZAS VOLANTES

4.1 – Introdução

Nesta secção os resultados obtidos são apresentados de forma a avaliar-se a influência da quantidade de fibras (Q_f) na resposta deformacional dos provetes, nas resistências equivalentes dois e três ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) e na resistência à compressão. Foram efectuados ensaios em provetes com 7, 28 e 90 dias de idade. Contudo, por limitação de espaço, neste trabalho apenas se fará referência aos provetes ensaiados aos 28 dias de idade.

4.2 – Respostas deformacionais

Na figura 6 apresentam-se as respostas força-flecha para as três percentagens de substituição de cimento por Cv. Cada série tem a designação FXX/YYQfZZ em que F significa fibra, XX/YY o tipo de fibra (80/60 ou 65/60) e ZZ a quantidade de fibras em kg/m^3 de betão. Nos gráficos ainda aparecem as siglas CvAA e IdBB em que AA é a quantidade de substituição de cimento por Cv e BB a idade. Cada gráfico inclui as respostas médias observadas em três provetes, registadas nas séries com os dois tipos de fibras estudados. A resposta genérica é caracterizada por um ramo linear até à ocorrência da fendilhação, que coincide praticamente com a carga de pico. Após esta, ocorre uma queda de carga, tão mais significativa quanto menor for a quantidade de fibras na secção de fractura do provete, principalmente na camada acima do entalhe (1ª linha, ver Fig. 1). Em algumas respostas durante a fase de amolecimento surge um ramo de endurecimento, i.e., um aumento da tensão residual com a flecha, fenómeno que está associado com a distribuição de fibras na secção de fractura [4].

Da análise dos gráficos da Fig. 6 constata-se que:

- algumas séries desenvolveram resistências residuais (forças resistentes pós-pico) similares ou mesmo superiores aos registados em outras séries, apesar de nestas últimas o número de fibras na secção de fractura ter sido maior. Por exemplo, nas composições sem Cv as séries F65/60Qf15 e F80/60Qf20 apresentaram resistências residuais semelhantes apesar de nesta última série o número de fibras na secção de fractura ter sido significativamente superior (43) ao registado na série F65/60Qf15 (27 fibras). Situação análoga ocorreu entre as séries F65/60Qf15 (28 fibras) e F80/60Qf20 (36 fibras) e entre as séries F65/60Qf25 (56 fibras) e F80/60Qf30 (75 fibras) nas composições com 12.5% de substituição de cimento por Cv;
- a resistência residual das séries F65/60Qf45 foi significativamente superior à das restantes séries devido ao facto de o número de fibras na secção de fractura dos provetes dessas séries ser consideravelmente superior.

Da análise das curvas relativas às composições sem Cv podem-se extrair as seguintes observações:

- acima de aproximadamente 1 mm de flecha a série reforçada com 25 kg/m^3 de fibras 65/60 (F65/60Qf25) apresenta resistência residual mais elevada do que a série reforçada com 35 kg/m^3 desta fibra (F65/60Qf35). Tal ocorrência deve estar relacionada com o facto de na 2ª e 3ª linhas de células da secção de fractura (ver Fig. 4) a percentagem de fibras nos provetes da série F65/60Qf25 ter sido superior à dos provetes da série F65/60Qf35. No entanto, entre a carga de pico e a flecha de 1 mm a resistência residual é maior nos provetes

F65/60Qf35, dado existir maior percentagem de fibras na 1ª linha da secção de fractura. Estas duas séries desenvolveram um comportamento similar à série reforçada com 30 kg/m³ de fibras 80/60 (F80/60Qf30) dado que nesta última o número de fibras na secção de fractura é apenas ligeiramente superior (72 fibras) à das outras duas séries (62 e 68);

- Na série F65/60Qf45 regista-se um ramo de endurecimento, com desenvolvimento significativo entre o início da fendilhação e a carga máxima, devido à maior percentagem de fibras na 1ª linha da secção de fractura.

Da análise das curvas relativas às composições com 12.5% de substituição de cimento por Cv verifica-se que as séries F65/60Qf25 e F65/60Qf35 tiveram um comportamento muito semelhante, dado que o número de fibras na secção de fractura foi idêntico (56 e 58, respectivamente);

Da análise das curvas relativas às composições com 25% de substituição de cimento por Cv constata-se que a ductilidade é proporcional ao número de fibras encontrado na secção de fractura (F80/60Qf10=21, F65/60Qf15=25, F65/60Qf25=47, F80/60Qf20=51, F65/60Qf35=53, F80/60Qf30=84, F65/60Qf45=87). Acima de aproximadamente 1 mm de flecha, a série F65/60Qf15 apresenta um aumento de tensão residual devido ao facto da percentagem de fibras ser superior nas três últimas camadas da secção de fractura (2ª, 3ª e 4ª linhas – ver Fig. 4).

4.3 – Resistência média à compressão

Na Fig. 7 inclui-se a variação da resistência média à compressão com a variação da quantidade de fibras, para as três percentagens de substituição de cimento por Cv. Constata-se que, exceptuando os provetes reforçados com 30 kg/m³ de fibras 80/60, as restantes séries apresentaram níveis similares de resistência, indicando que a quantidade e o tipo de fibras não influencia significativamente a resistência à compressão do BRFA. A justificação relativa ao comportamento anómalo registado na série reforçada com 30 kg/m³ de fibras 80/60 está descrita em outro trabalho [4]. Na tabela 1 apresentam-se os valores da resistência média, desvio padrão e coeficiente de variação das séries ensaiadas aos 28 dias. Da análise dos resultados verifica-se que até 12.5% de substituição de cimento por Cv a variação da resistência média é marginal, descendo de aproximadamente 10% quando essa substituição é de 25%, revelando que a estratégia de reduzir a quantidade de água com o aumento da percentagem de substituição de cimento por Cv foi correcta, já que permitiu assegurar níveis similares de resistência e de trabalhabilidade.

Tabela 1 – Resistência média à compressão, desvio padrão e coeficiente de variação em provetes com 28 dias de idade.

Cv [%]	F80/60*			F65/60		
	f _{cm} [MPa]	s _{pm} [MPa]	Coef. Var	f _{cm} [MPa]	s _{pm} [MPa]	Coef. Var
0	41.75	7.47	0.18	42.62	3.26	0.08
12.5	43.05	3.14	0.07	41.22	3.48	0.08
25	37.46	2.45	0.07	37.99	1.58	0.04

* - não contém os dados relativos à série F80/60Qf30

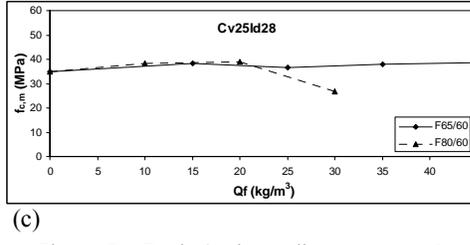
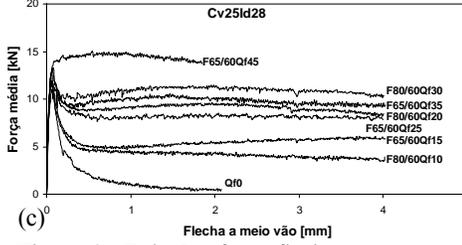
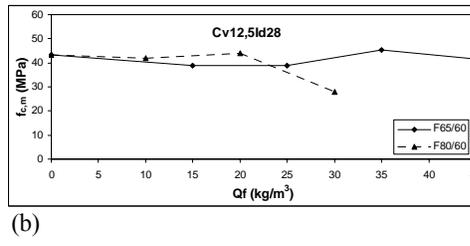
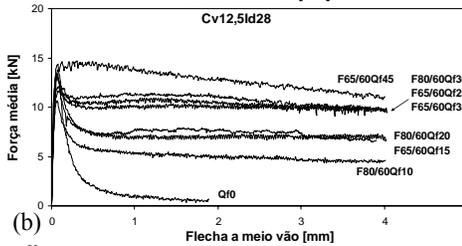
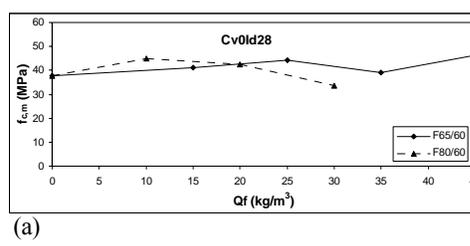
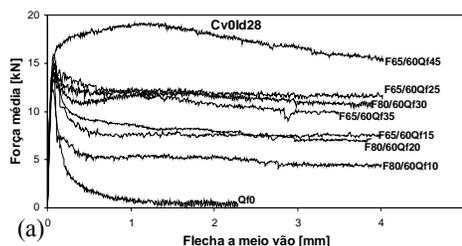


Figura 6 – Relações força-flecha em provetes com 0% (a), 12.5% (b) e 25% (c) de Cv.

Figura 7 – Resistência média à compressão versus quantidade de fibras em provetes com 0% (a), 12.5% (b) e 25% (c) de Cv.

4.4 – Resistências equivalentes

As Figs. 8 e 9 representam a variação dos valores médios das resistências equivalentes ($f_{eqm,2}$ e $f_{eqm,3}$) com a quantidade de fibras, donde se verifica que até 12.5% de substituição de cimento por Cv a fibra 65/60 garante $f_{eqm,2}$ e $f_{eqm,3}$ mais elevados que a fibra 80/60. Acima desta percentagem de Cv a situação inverte-se, sendo a fibra 80/60 a assegurar valores mais elevados. Para se explicar este comportamento vai-se admitir que na secção de fractura o comprimento médio de aderência (L_b) de ambas as fibras é igual (ver Fig. 10) e que a tensão que se desenvolve na interface entre a superfície da fibra e a matriz envolvente (τ) é independente do tipo de fibra, o que é aceitável dado tratar-se de fibras com iguais propriedades materiais e de superfície. Considerando o equilíbrio de uma fibra durante o seu arranque (ver Figura 10) constata-se que a força F de arranque de todas as fibras existentes na superfície de fractura do provete depende do diâmetro da fibra (d_f) e do número de fibras (n_f) nesta superfície. Os valores do produto destes dois últimos parâmetros ($d_f \times n_f$), que se designa por parâmetro de reforço, estão incluídos na tabela 2, para as quantidades de fibras consideradas neste trabalho. Para quantidades intermédias às analisadas para uma mesma série ($Q_f=15, 25, 35$ e 45 kg/m^3 para as fibras 80/60, e $Q_f=10, 20$ e 30 kg/m^3 para as fibras 65/60) o número de fibras foi determinado com base em expressões que foram obtidas por intermédio de regressão linear. Da análise dos resultados afectos às séries com

0% de Cv verifica-se que a fibra 65/60 apresenta maiores valores de parâmetro de reforço, praticamente para todas as Qf consideradas. Nas séries com 12.5% de Cv o parâmetro de reforço é maior na fibra 65/60 até $Q_f \approx 27 \text{ kg/m}^3$ de fibras. Acima deste valor, o parâmetro de reforço é maior na fibra 80/60. Nas séries com 25% de Cv o parâmetro de reforço é maior na fibra 80/60. Esta análise justifica o formato das curvas representadas nas Figs. 8 e 9. O aumento do número de fibras 80/60 na secção de fractura com o aumento da percentagem de substituição de cimento por Cv não está ainda devidamente interpretado.

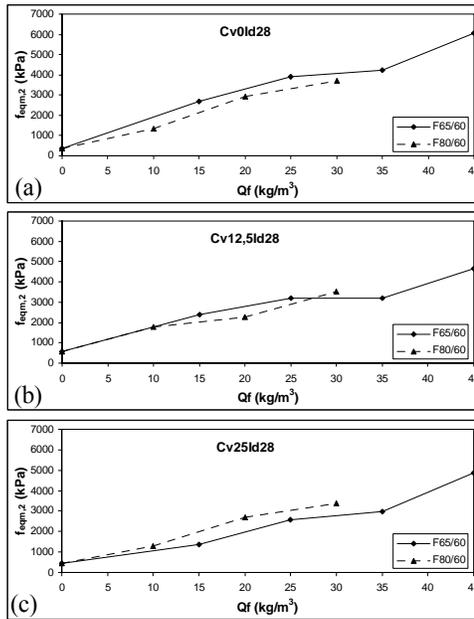


Figura 8 – $f_{eq,2}$ versus quantidade de fibras em provetes com 0% (a), 12.5% (b) e 25% (c) de Cv.

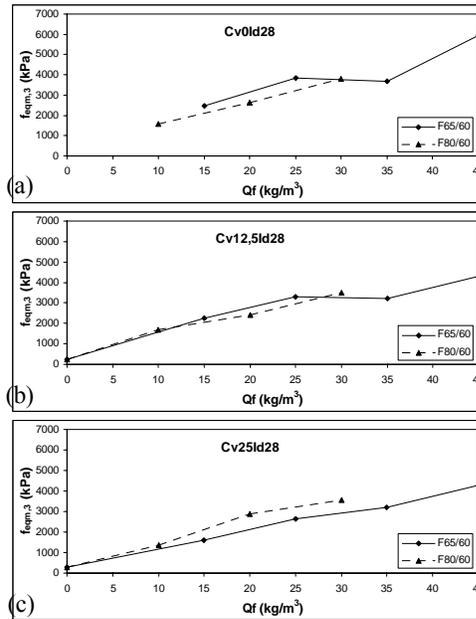


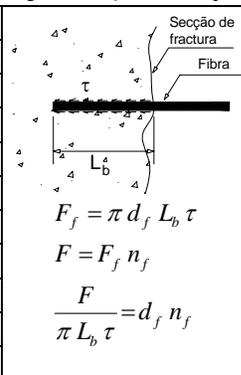
Figura 9 – $f_{eq,3}$ versus quantidade de fibras em provetes com 0% (a), 12.5% (b) e 25% (c) de Cv.

Tab. 2: Número médio de fibras na secção de fractura das séries ensaiadas.

Qf [kg/m ³]	Percentagem de substituição de cimento por Cv											
	0				12.5				25			
	F80/60		F65/60		F80/60		F65/60		F80/60		F65/60	
	n_f	$n_f d_f$	n_f	$n_f d_f$	n_f	$n_f d_f$	n_f	$n_f d_f$	n_f	$n_f d_f$	n_f	$n_f d_f$
10	20	15	21*	19	26	20*	20	18	22	16	17*	16
15	35*	26	27	25	35*	26	28	26	41*	31	25	23
20	43	32	42*	39	36	27	38*	35	53	40	35*	32
25	59*	44	62	57	59*	49	56	52	70*	52	47	43
30	75	56	64*	59	78	58	56*	52	88	66	43*	49
35	84*	63	68	63	84*	63	58	54	100*	75	53	49
45	109*	82	98	90	108*	81	84	78	129*	97	87	80

* - valor determinado através de regressão linear com $R^2 \approx 1$

Fig. 10: Força de arranque.



5. RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES VERSUS RESISTÊNCIAS RESIDUAIS

Nas Figs. 11 e 12 apresenta-se a relação entre $f_{eq,2}$ e f_{R1} , e entre $f_{eq,3}$ e f_{R4} registadas nos provetes reforçados com fibras 80/60 e 65/60, respectivamente. Da análise destes resultados constata-se que, para ambas as fibras, existe uma boa correlação entre estes parâmetros. A correlação é melhor entre $f_{eq,2}$ e f_{R1} do que entre $f_{eq,3}$ e f_{R4} , dado que para esta última é significativa a contribuição da energia dissipada sob elevada abertura de fenda, i.e., na fase em que é marcante a influência do comprimento de aderência da fibra e da sua orientação, que geralmente assumem grande dispersão.

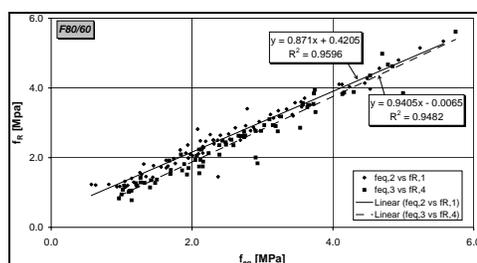


Figura 18 – Correlação entre f_{eq} e f_R nas fibras F80/60.

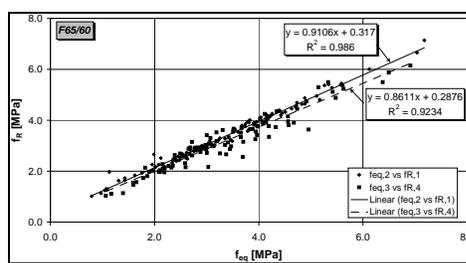


Figura 19 – Correlação entre f_{eq} e f_R nas fibras F65/60.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho as resistências equivalentes e as resistências residuais foram determinadas em séries de provetes de betão reforçados com dois tipos de fibras de aço. Os ensaios foram efectuados segundo as recomendações do TC 162-TDF da RILEM, tendo-se avaliado a influência, no comportamento em flexão, do tipo e da percentagem de fibras, do número e da distribuição de fibras na secção de fractura dos provetes, e da percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes (Cv). A influência do tipo e percentagem de fibras, e da percentagem de substituição de cimento por Cv na resistência à compressão uniaxial foi também avaliada.

Dos resultados obtidos verificou-se a ocorrência de um aumento da percentagem de fibras no sentido da betonagem, indicando que em amassaduras com abaixamento superior a 15 cm e aplicadas sob vibração ocorre segregação de fibras, pelo que o comportamentos do provete depende marcadamente da direcção de carregamento. A resposta deformacional de provetes de BRFA depende não somente da quantidade teórica de fibras por unidade de volume de betão, mas também, e de forma especial, do número de fibras que atravessam a secção de fractura. A forma pós-pico da relação força flecha depende significativamente da distribuição de fibras na secção de fractura.

As fibras RC-65/60-BN asseguraram valores de resistências equivalentes superiores nas composições até 12.5% de substituição de cimento por Cv. Acima deste valor as fibras RC-80/60-BN foram mais eficazes em termos de assegurar maiores valores de resistências equivalentes.

Existe uma elevada correlação linear ($R^2 > 0.92$) entre as resistências equivalentes e as resistências residuais, sendo essa correlação mais elevada entre $f_{eq,2}$ e f_{R1} .

Dos ensaios de compressão verificou-se que a resistência à compressão não depende nem do tipo nem da quantidade de fibra empregues. A resistência foi similar até 12.5% de substituição de cimento por Cv, diminuindo de aproximadamente 10% quanto esta percentagem passou para 25%.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento concedido pela FCT ao projecto “Cost competitive steel fibre reinforced concrete for industrial pavements”, com referência POCTI/34793/99, à Pisonort – pavimentos industriais, Lda, Secil e MBT, pelo fornecimento de materiais utilizados na confecção dos betões e à Civitest pela colaboração prestada ao nível de equipamento de laboratório.

8. REFERÊNCIAS

- [1] RILEM TC 162 – TDF, “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete”, *Materials and Structures*, Vol. 33, January-February 2000, p. 3-5.
- [2] RILEM TC 162 – TDF, “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete”, *Materials and Structures*, Vol. 33, March 2000, p. 75-81.
- [3] Dramix - *Product data sheet*. N.V.Bekaert S.A., 1998.
- [4] - Barros, J.A.O., Antunes, J.A.B., Amorim, J.A.S.B.A., “Influência da quantidade de fibras, percentagem de cinzas volantes e idade no comportamento à flexão de betão reforçado com fibras de aço Dramix RC-80/60-BN”, Dep. Eng^a Civil, Escola de Eng^a da Univ. Minho, *Relatório 02-DEC/E-11*, 87 pags., Julho 2002.
- [5] - Barros, J.A.O., Antunes, J.A.B., Amorim, J.A.S.B.A., “Eficácia de fibras discretas de aço no reforço à flexão de elementos de betão”, *Congresso Nacional da Engenharia de Estruturas*, a realizar-se no LNEC, Lisboa, pp. 283-292, de 10 a 13 de Julho de 2002.