

BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO PARA O REFORÇO À FLEXÃO DE ESTRUTURAS LAMINARES



Simão Santos
Investigador
Univ. Minho
Guimarães



Joaquim Barros
Prof. Asso. c/Agr
Univ. Minho
Guimarães



Miguel Freitas
Téc. Laboratório
CiviTEST, Lda
Braga

SUMÁRIO

Com o objectivo de avaliar a influência da adição de fibras discretas de aço no reforço à flexão de estruturas laminares de betão auto-compactável, foi realizado um programa experimental que consistiu no ensaio de faixas de laje armadas com distinta percentagem de armadura longitudinal, mantendo-se constante uma percentagem de fibras de aço julgada adequada para estruturas com elevado grau de hiperestaticidade.

Palavras-chave: Betão auto-compactável, fibras de aço, estruturas laminares, reforço à flexão

1. INTRODUÇÃO

É escassa a informação sobre o comportamento de estruturas laminares de betão armado reforçado com fibras de aço (BRFA) [1]. Por este facto, não é, ainda, possível saber qual é a percentagem de armadura convencional equivalente que determinada quantidade de fibras permite substituir. O tipo e a percentagem de fibras e a resistência do betão são dos parâmetros mais influentes num estudo que pretenda definir esta eventual equivalência.

Com o programa experimental apresentado neste trabalho pretende-se avaliar a possibilidade de substituir uma determinada percentagem de armaduras convencionais por uma dada percentagem de fibras de aço, principalmente em elementos pré-fabricados que constituam estruturas com elevado grau de hiperestaticidade, como é o caso das *Box-Culvert*. Neste âmbito, foram construídas 12 faixas de laje com distinta percentagem de armadura longitudinal. Apesar dos ensaios terem sido realizados segundo uma configuração de isostaticidade, os resultados obtidos em termos de incremento de rigidez e de capacidade de carga que a adição de fibras possa proporcionar a este tipo de estruturas serão um limite inferior dos incrementos

que poderão ser alcançados em estruturas hiperestáticas. De facto, a capacidade de redistribuição de esforços internos assegurada pelos mecanismos de reforço das fibras que atravessam as fendas permite que a capacidade de carga de estruturas hiperestáticas seja significativamente superior à carga de início de fendilhação [2].

A primeira fase deste programa experimental consistiu no desenvolvimento de uma composição de BACRFA específica para este fim. Investigação anterior [3] demonstrou que a eficiência das fibras de aço é tanto maior, quanto mais resistente for a micro-estrutura da interface matriz-fibra, desde que não ocorra a rotura da fibra. Níveis de resistência pretendidos para essa micro-estrutura podem ser alcançados por intermédio da concepção de betão de elevada compacidade. Neste contexto foi desenvolvido um betão de elevada compacidade reforçado com fibras, capaz de fluir no interior da cofragem e de passar por intermédio das armaduras unicamente sob acção do seu peso próprio. A composição de BACRFA foi desenvolvida e optimizada para a quantidade, por m^3 de betão, de 45 kg de uma fibra de aço de elevada esbelteza (comprimento/diâmetro) e resistência à tracção.

Neste trabalho é descrito o programa experimental e são apresentados e analisados os resultados obtidos. Com base nestes resultados, a percentagem utilizada de fibras é convertida numa percentagem de armadura fictícia.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Série de Ensaios

O programa experimental é constituído por três séries de faixas de laje. As faixas têm um vão de corte ($a = 450$) sensivelmente igual a três vezes e meia a altura útil da secção ($a/d = 3.5$), um comprimento de 1600 mm, distância entre apoios de 1350 mm e uma secção transversal (350×150) mm^2 (ver Figura 1). Para cada uma das séries foi adoptada uma percentagem distinta de armadura longitudinal: $3\phi 6$ ($\rho_{sl} = 0.2$), $3\phi 8$ ($\rho_{sl} = 0.36$) e $3\phi 10$ ($\rho_{sl} = 0.56$), tendo sido atribuída a designação de A, B e C a estas séries, respectivamente. Em todas as faixas foi utilizada uma armadura de compressão constituída por $3 \phi 6$. No total foram ensaiadas doze faixas de laje, seis das quais com betão reforçado com fibras de aço, tendo as restantes seis servido de referência.

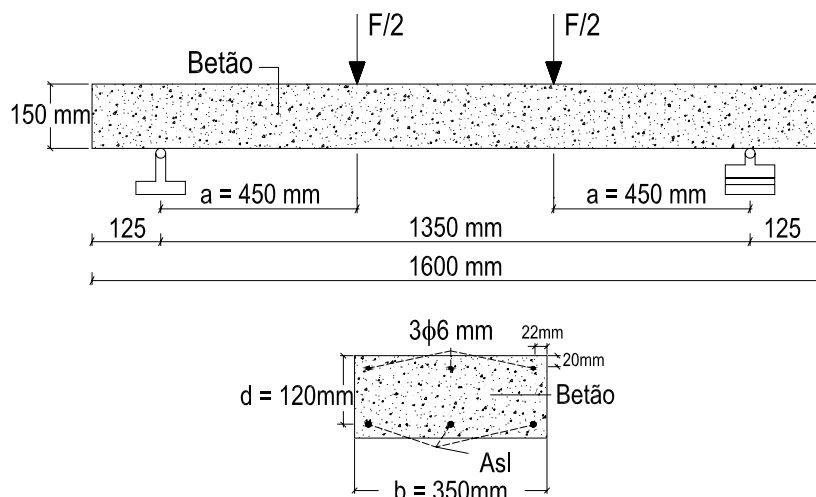


Figura 1: Representação das secções longitudinal e transversal da faixa de laje tipo a ensaiar

2.2 Composição do Betão Auto-Compactável

A composição adoptada para o fabrico do betão foi optimizada para um esqueleto sólido onde figura uma quantidade de fibras equivalente a 45 kg de fibras por m^3 de betão (BACRFA), pelo que esta composição não deverá ser aplicada no caso de se utilizarem outros tipos ou outras quantidades de fibras. No Quadro 1 apresenta-se a composição utilizada, constatando-se que a relação $A/C=0.29$. À quantidade de água indicada neste quadro, definida como água livre a adicionar aos inertes já saturados, foi retirada a quantidade de $11.43 dm^3$, dado que o teor de água era superior ao de saturação dos inertes no momento da sua colocação na central de betonagem. Nas faixas de laje somente armadas com armadura convencional, a composição foi praticamente igual à utilizada nas faixas de laje reforçadas com fibras, diferindo apenas pelo facto de a primeira, designada por BAC, não possuir fibras. Apesar deste procedimento não ser o mais adequado, dado que a composição depende da participação, ou não, de fibras, a adopção de composições praticamente iguais deve-se ao facto de se ter admitido que, para 45 kg de fibras por m^3 de betão, as alterações a introduzir na composição sem fibras não alterariam o comportamento mecânico do betão a ponto de comprometer as principais conclusões do presente trabalho.

Quadro 1: Composições adoptadas (por m^3 de BACRFA)

Composições	Cimento (C) (kg)	Água (A) (kg)	SP (dm^3)	Filler (kg)	Areia Fina (kg)	Areia Média (kg)	Brita 6/14 (kg)	Brita 14/20 (kg)	Fibras de Aço (kg)
BACRFA	380.5	114.1	12.5	360.0	391.4	429.1	336.9	298.2	45.0

As fibras de aço utilizadas têm a designação comercial de DRAMIX[®] RC-80/60-BN, tendo 60 mm de comprimento (l), 0.75 mm de diâmetro (d), esbelteza (l/d) de 80 e tensão de cedência de 1100 MPa.

2.3 Propriedades dos Materiais

2.3.1 Betão

A caracterização do comportamento uniaxial do BAC e do BACRFA em compressão foi realizada a partir de ensaios em provetes cúbicos (150×150×150) mm³, aos 35 dias de idade. No Quadro 2 são apresentados os resultados individuais, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial.

Quadro 2: Valores da tensão máxima de compressão obtidos em provetes de BAC e BACRFA.

Designação	$\sigma_{\text{máx.}}$ (MPa)	
	$Q_f = 0 \text{ kg/m}^3$	$Q_f = 45 \text{ kg/m}^3$
C ₁	94.27	97.70
C ₂	97.42	106.04
C ₃	98.90	101.90
Média	96.86	101.88
(Desvio Padrão)	(2.36)	(4.17)
[Coeficiente de Variação] %	[2.44]	[4.09]

Partindo do valor de f_{cm} aos 28 dias e adoptando as recomendações do CEB-FIP 1993 [4] obteve-se o correspondente valor de f_{ck} , com o qual se pode atribuir uma classe de resistência aos BAC e BACRFA ensaiados. Estes valores são apresentados no Quadro 3, sendo relativos a cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

Quadro 3: Valor de resistência média e característica dos BAC e BACRFA ensaiados.

Designação	Valores médios		
	f_{cm} (t=28 dias) (MPa)	f_{ck} (MPa)	Classe de resistência
BAC	94.34	86.34	C70/85
BACRFA	99.22	91.22	C70/85

2.3.2 Armaduras

O comportamento do aço das armaduras foi avaliado por intermédio de ensaios de tracção uniaxial. A típica relação tensão-deslocamento para este tipo de aço encontra-se representada na Figura 2.

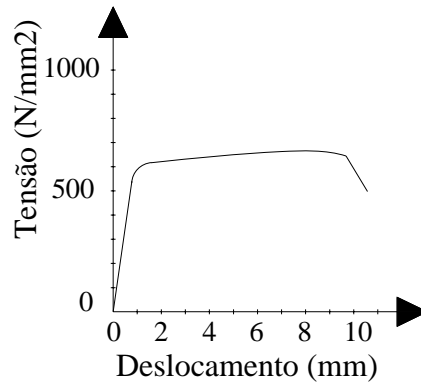


Figura 2: Resposta típica obtida em varões de 6, 8, e 10 mm

Com base nas curvas tensão-deslocamento obtiveram-se, para as propriedades avaliadas, os valores indicados no Quadro 4. O módulo de elasticidade foi da ordem dos 200 GPa.

Quadro 4: Principais características mecânicas dos varões ensaiados.

Diâmetro (mm)	ϵ_{sy} (‰)	σ_{sy} (MPa)	ϵ_{su} (‰)	σ_{su} (MPa)
6	2.8	568	10.0	605
8	3.0	585	14.3	635
10	3.0	591	11.5	625

3. ENSAIOS E RESULTADOS

3.1 Configuração do Ensaio

As faixas de laje foram submetidas a um ensaio sob quatro linhas de carga (Figura 3). A força aplicada foi registada por intermédio de uma célula de carga com capacidade máxima de 300 kN, enquanto a deformabilidade da laje foi obtida pela utilização de cinco LVDT's (*Linear Voltage Differential Transducer*), dois com campos lineares de leitura (l_{meas}) de 25 mm colocados nas extremidades e 3 com $l_{meas}=50$ mm colocados na zona central da laje. Os ensaios foram controlados por intermédio do deslocamento registado no LVDT colocado a meio vão, à velocidade de 30 $\mu\text{m/s}$, utilizando-se, para tal, um equipamento servo-controlado.

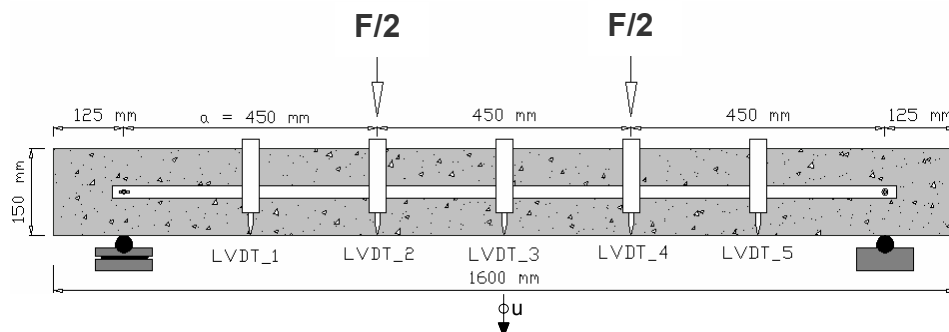


Figura 3: Condições de apoio e carregamento, e sistema de monitorização

3.2 Resultados Obtidos

Procurando diferenciar os modelos com base na quantidade de fibras e na armadura longitudinal, foi criada uma nomenclatura, cuja designação genérica é Li_j_k , em que:

- a letra L assume os caracteres A, B ou C, conforme a série a que a faixa de laje pertence;
- o número “i” identifica o número do ensaio na correspondente sub-série (foram ensaiadas duas lajes por cada percentagem de armadura longitudinal);
- o número “j” representa o diâmetro do varão utilizado na armadura longitudinal;
- o número “k” representa a quantidade de fibras utilizada (valor em kg/m^3 de betão).

A omissão do algarismo “i” representa um resultado que é a média dos obtidos numa dada série de lajes. A título exemplificativo o provete “A2_6_45” indica que se trata da segunda faixa de laje da série A com armadura longitudinal constituída por varões de 6 mm de diâmetro, reforçada com 45 kg de fibras por m^3 de betão. No Quadro 5 resumem-se as principais características de cada faixa de laje, em função da sua designação.

Quadro 5: Propriedades das faixas de laje ensaiadas

Designação	Armadura longitudinal de tracção (A_{sl}^+)	Percentagem de armadura longitudinal, ρ_{sl}^*	Quantidade de fibras Q_f (kg/m^3)	Série
A1_6_0	3 ϕ 6	0.2	0	A
A2_6_0				
A1_6_45	3 ϕ 6	0.2	45	
A2_6_45				
B1_8_0	3 ϕ 8	0.36	0	B
B2_8_0				
B1_8_45	3 ϕ 8	0.36	45	
B2_8_45				
C1_10_0	3 ϕ 10	0.56	0	C
C2_10_0				
C1_10_45	3 ϕ 10	0.56	45	
C2_10_45				

$$\rho_{si} = A_{sl} / (b \cdot d)$$

Na Figura 4 estão representadas as curvas força-deslocamento a meio vão, $F-u$, obtidas nos ensaios das faixas de laje das séries ensaiadas. As curvas das figuras correspondem à média da relação $F-u$ obtida nas duas faixas da laje que constituem cada sub-série. Da análise da Figura 4 é possível constatar que, após o início da fendilhação do betão, a capacidade de carga das faixas de laje reforçadas com fibras de aço é superior à registada nas faixas de laje apenas reforçadas com armadura longitudinal. Essa diferença de capacidade de carga aumenta desde o início da fendilhação do betão até à carga máxima na laje reforçada com fibras. No entanto, essa diferença de capacidade de carga diminui com o aumento da percentagem de armadura longitudinal de tracção.

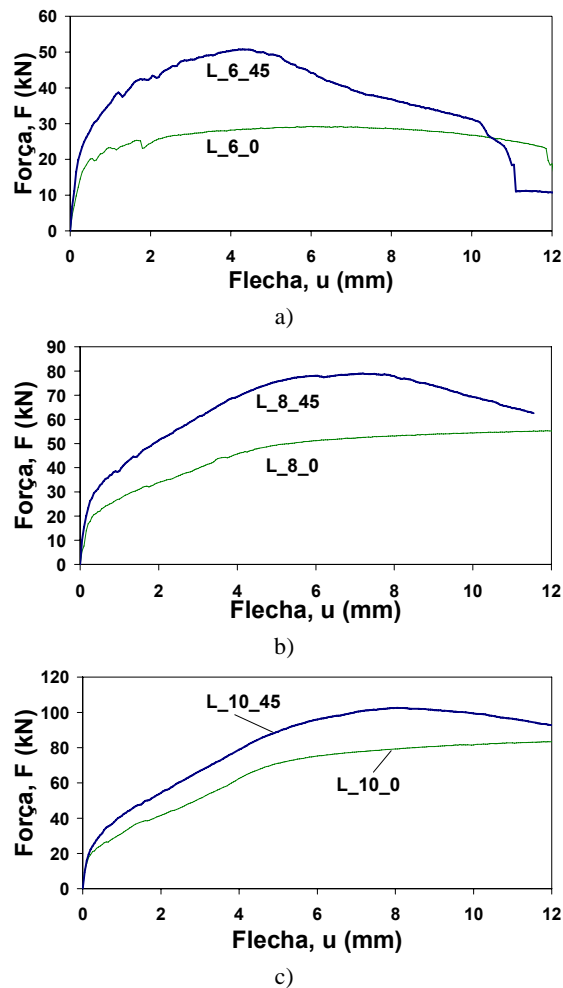


Figura 4: Relações força-flecha das faixas de laje das séries: a) A; b) B e c) C.

No Quadro 6 apresentam-se, para cada uma das séries e para cada percentagem de fibras, os valores das forças registadas para o deslocamento $u=L/400=3.375$ mm (F_{ELUt}), em que L é o vão da faixa de laje (em mm), valor este que corresponde à flecha máxima admissível para Estados Limites de Utilização (ELUt), segundo o Eurocódigo 2 [5]. Constatou-se que as fibras proporcionaram um aumento de F_{ELUt} de 1.29 a 1.77, tendo este sido tão mais elevado quanto menor ρ_{sl} . Neste mesmo quadro apresentam-se os valores das forças máximas (F_{max}) alcançadas nos ensaios das faixas de laje. Da análise destes valores constatou-se que F_{ELUt}/F_{max} variou de 0.66 a 0.95 nas lajes não reforçadas com fibras, enquanto nas lajes reforçadas com fibras F_{ELUt}/F_{max} variou de 0.70 a 0.97. Quer para as lajes com fibras como para as lajes sem fibras F_{ELUt}/F_{max} aumentou com a diminuição de ρ_{sl} . Tal facto prova que as fibras são bastante eficazes na verificação aos estados limites de utilização, sendo este facto tão mais significativo quanto menor é a percentagem de armadura longitudinal de tracção.

Quadro 6: Valores de força correspondentes a flecha para estados limites de utilização por deformação e valores de força máxima

Séries	F_{ELUt}		F_{max}	
	$Q_f = 0 \text{ kg/m}^3$	$Q_f = 45 \text{ kg/m}^3$	$Q_f = 0 \text{ kg/m}^3$	$Q_f = 45 \text{ kg/m}^3$
A	27.68	49.03	29.19	50.76
B	42.46	64.45	55.42	78.96
C	55.53	71.60	83.53	102.59

Para avaliar o aumento de capacidade de carga durante a deformação da laje introduzido pela adição de fibras ao betão determinou-se, para cada valor da flecha, a diferença entre a capacidade de carga da laje reforçada com fibras e a capacidade de carga da laje somente reforçada com armadura convencional, ΔF . As relações obtidas encontram-se representadas na Figura 5, verificando-se que o aumento relativo de carga proporcionado pela adição de fibras faz-se sentir desde valores de flecha bastante reduzidos, que correspondem ao início da microfendilhação do betão. Constatou-se que $\Delta F/F$ aumenta até à flecha correspondente ao F_{max} das lajes reforçadas com fibras, tendo o incremento máximo sido da ordem dos 80%. Verifica-se ainda que $\Delta F/F$ diminui com o aumento de ρ_{sl} . Nas faixas reforçadas com a menor ρ_{sl} (L_6) o $\Delta F/F$ máximo ocorre para um flecha próxima da correspondente a estados limites de utilização por deformação ($u_{ELUt}=L/400$). Nas lajes reforçadas com as outras duas percentagens de armadura longitudinal, $\Delta F/F$ manteve-se sensivelmente constante entre, aproximadamente, 20% e 200% de u_{ELUt} . Significa isto que os benefícios do reforço das fibras para os estados limites de utilização por deformação são mais eficazes em peças armadas com reduzida ρ_{sl} . No entanto, se houver interesse em aumentar $\Delta F/F$ em peças com elevada percentagem de armadura longitudinal, será necessário utilizar percentagens mais elevadas de fibras, devendo-se, porém, considerar aspectos do foro económico, pois além do maior custo das fibras (quando comparado com o das armaduras convencionais), é preciso ter ainda em conta a necessidade de aumentar o teor em finos da composição, o que conduz a um acréscimo suplementar de custos.

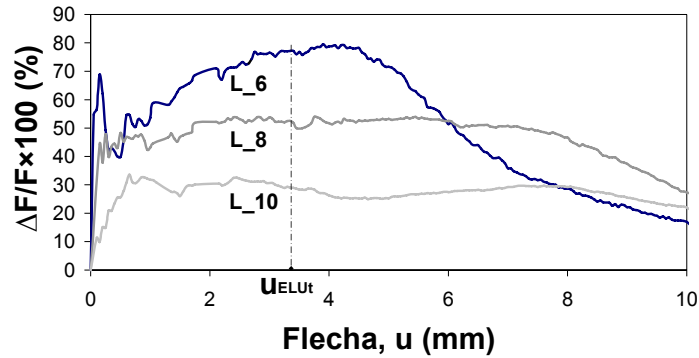


Figura 5: Relação entre a flecha e o aumento relativo de capacidade de carga introduzido pela adição de fibras nas faixas de laje das séries A (L_6), B (L_8) e C (L_10).

No Quadro 7 apresentam-se os valores de um índice, designado por $I_{F(ELUI)}$, que representa o aumento relativo de capacidade de carga das faixas de laje proporcionado pelo reforço das fibras, para os níveis de força relativos à flecha correspondente a estados limites de utilização por deformação ($u_{ELUI}=L/400$). Este índice foi obtido por intermédio da seguinte equação,

$$I_F = \frac{F_{Qf} - F_{ref}}{F_{ref}} \times 100 \quad (1)$$

em que F_{Qf} e F_{ref} são, respectivamente, a força na laje reforçada com fibras e somente reforçada com armadura longitudinal (laje de referência), correspondentes à flecha para estados limites de utilização por deformação. No Quadro 7 também se apresenta o índice designado por $I_{F(Max)}$, que representa o ganho que permitiu o reforço das fibras em termos de capacidade máxima de carga das faixas de laje. Este índice também foi obtido por intermédio da aplicação da equação (1), no entanto, F_{Qf} e F_{ref} representam, agora, a força máxima nas faixas de laje reforçadas com fibras e somente com armadura longitudinal, respectivamente.

Quadro 7: Índices de representação do ganho em termos de capacidade de carga permitido pela reforço das fibras, para estados limites de utilização ($I_{F(ELUI)}$) e para capacidade máxima de carga ($I_{F(Max)}$).

Designação	$I_{F(ELUI)}$ (%)	$I_{F(Max)}$ (%)
L_6	77.13	73.90
L_8	51.79	42.48
L_10	28.94	22.82

Da análise dos valores incluídos no Quadro 7 verifica-se que o ganho de capacidade de carga para estados limites de utilização por deformação, permitido pela adição de 45 kg de fibras por

m³ de betão, variou entre os 29% e os 77%, tendo esse ganho diminuído com o aumento da percentagem de armadura longitudinal. No caso do aumento da capacidade máxima de carga das faixas de laje, mantém-se a tendência: esse aumento variou entre 23% e 74%, tendo aumentado com a diminuição de ρ_{sl} .

4. QUANTIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NO REFORÇO À FLEXÃO

Para quantificar o efeito do reforço das fibras em termos de aumento do momento resistente das faixas de laje, adoptou-se uma metodologia próxima da adoptada na prática do engenheiro projectista de estruturas de betão armado. Esta metodologia consiste no cálculo do valor do momento-flector resistente, obtido por via analítica, M_{Rd}^{anal} , e na sua comparação com o momento-flector resistente obtido por via experimental que, neste caso, será denominado por M_{Rd}^{exp} . Adoptando as recomendações do REBAP [6], o valor de M_{Rd}^{anal} foi obtido por intermédio da seguinte equação,

$$M_{Rd}^{anal} = \mu \times b \times d^2 \times f_{cd} \quad ([N/mm^2]) \quad (2)$$

em que μ é o valor do momento reduzido da secção, o qual pode ser obtido por intermédio do valor da percentagem mecânica de armadura,

$$\omega = \frac{A_{sl} f_{syd}}{b d f_{cd}} \quad (3)$$

recorrendo-se para tal às tabelas da flexão simples para secções rectangulares, duplamente armadas do documento “Betão Armado – Esforços Normais e de Flexão (REBAP-83) [7]. Nas equações (2) e (3), b é a largura da secção do elemento estrutural, d é a altura útil da secção transversal, f_{cd} é o valor de cálculo da resistência do betão à compressão, A_{sl} é a área da armadura longitudinal de tracção e f_{syd} é o valor de cálculo da tensão de cedência desta armadura. Os valores de f_{cd} e de f_{syd} foram obtidos por intermédio dos resultados determinados nos ensaios executados com os betões e os aços (ver Quadros 2 e 3). Na determinação do μ foi considerada a relação A'/A existente na secção da laje em avaliação, sendo A' a armadura de compressão.

O valor de M_{Rd}^{anal} foi comparado com o valor do momento correspondente à máxima carga registada nos ensaios experimentais, $M_{R,max}^{exp}$, obtendo-se o valor do ganho de resistência à flexão (ΔM_{flex}), dado pela equação,

$$\Delta M_{flex} = \frac{M_{R,max}^{exp} - M_{Rd}^{anal}}{M_{Rd}^{anal}} \times 100 \quad (4)$$

Os valores de ΔM_{flex} e o correspondente factor $M_{R,max}^{exp} / M_{Rd}^{anal}$ encontram-se no Quadro 8.

Quadro 8: Influência da quantidade de fibras na resistência à flexão

ρ_{sl} (%)	M_{Rd}^{anal} (kN.m)	M_{Rd}^{exp} (kN.m)	ΔM_{flex} (%)	$M_{R,max}^{exp} / M_{Rd}^{anal}$
0.2	4.90	11.42	133	2.33
0.36	9.20	17.77	92	1.93
0.56	14.10	23.08	63	1.64

Da análise dos valores incluídos no Quadro 8 pode concluir-se que 45 kg de fibras por m³ de betão permitiram aumentos de momento resistente entre os 63% e os 133 %, quando se tomam por comparação os valores obtidos segundo a formulação analítica proposta pela regulamentação em vigor para os elementos estruturais de betão armado. O ΔM_{flex} diminui com o aumento de ρ_{sl} . No entanto, mesmo para as faixas reforçadas com o máximo ρ_{sl} , o aumento foi, ainda, bastante significativo.

Adoptando metodologia similar à acabada de descrever, os 45 kg de fibras por m³ de betão utilizados neste programa experimental podem ser convertidos numa determinada percentagem de armadura ficticiamente colocada ao nível da existente. Este exercício foi efectuado, quer para a capacidade de carga máxima das faixas de laje, quer para a força correspondente aos estados limites de utilização por deformação. Os resultados obtidos estão incluídos no Quadro 9, em que: $A_{f,eq(s)}^{max}$ é a área de armadura equivalente para o momento

$M_{R,max}^{exp}$, isto é, para o momento em correspondência com a máxima capacidade de carga;

$A_{f,eq(s)}^{ELUt}$ é a área de armadura equivalente para o momento $M_{R,ELUt}^{exp}$, sendo $M_{R,ELUt}^{exp}$ o momento para a carga correspondente à flecha para estados limites de utilização por deformação.

Quadro 9: Transformação do reforço das fibras em armadura longitudinal equivalente.

ρ_{sl} (%)	Estados limites últimos (ELU)				Estados limites de utilização (ELUt)		
	M_{Rd}^{anal} (kN.m)	$M_{R,max}^{exp}$ (kN.m)	$A_{f,eq(s)}^{max}$ (mm ²)	$\frac{A_{f,eq(s)}^{max}}{A_{sl}} \times 100$ (%)	$M_{R,ELUt}^{exp}$ (kN.m)	$A_{f,eq(s)}^{ELUt}$ (mm ²)	$\frac{A_{f,eq(s)}^{ELUt}}{A_{sl}} \times 100$ (%)
0.2	4.90	11.40	110	130	11.03	103	122
0.36	9.20	17.70	142	94	14.50	84	56
0.56	14.10	23.08	157	67	16.11	34	15

Da análise destes resultados pode concluir-se que, para os estados limites últimos, 45 kg das fibras utilizadas no presente programa experimental, por m³ de betão, equivalem a uma percentagem equivalente de armadura longitudinal, em relação à armadura longitudinal realmente aplicada nas séries testadas, variando entre 130%, nas séries de $\rho_{sl}=0.20$ até 67% nas séries de $\rho_{sl}=0.56$. Para os estados limites de utilização, este exercício pode ser de questionável interesse prático (dado que as armaduras são calculadas para os estados limites últimos). No entanto, a percentagem equivalente de armadura obtida, em relação à realmente aplicada, varia entre os 112% e os 15%, o que indica que, mesmo para a carga correspondente à flecha devida a estados limites de utilização por deformação, as fibras

introduzem um acréscimo significativo de momento resistente, tendo-se por base de comparação o momento resistente das armaduras convencionais existentes nas faixas de laje.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho resume os principais resultados obtidos num programa experimental no qual foram testadas, sob quatro pontos de carga, faixas de laje de betão auto-compactável armadas com distintas percentagens de armadura longitudinal. O programa experimental foi composto por seis faixas de laje armadas e reforçadas com 45 kg/m^3 de fibras de aço e seis faixas de laje não incluindo fibras, que serviram de referência para avaliar o desempenho das fibras no que respeita ao contributo para a resistência à flexão de estruturas laminares em betão auto-compactável.

Na composição foi utilizada uma quantidade de cimento de 380 kg por m^3 de betão, tendo-se obtido resistências médias em cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, da ordem dos 100 MPa aos 35 dias de idade, o que demonstra a qualidade do trabalho prévio efectuado ao nível da optimização da composição.

As respostas força-flecha registadas evidenciaram contributo das fibras de aço para o aumento significativo da capacidade de carga das faixas de laje ensaiadas. Este aumento revelou-se desde a fase correspondente ao início da fendilhação no betão, isto é, para flechas inferiores a $1/10$ da flecha correspondente a estado limite de utilização por deformação, tendo sido tão mais significativo quanto menor foi a percentagem de armadura longitudinal. Para forças correspondentes à flecha para estado limite de utilização por deformação, os 45 kg de fibras por m^3 de betão permitiram aumentos de capacidade de carga das faixas de laje ensaiadas que variaram entre 77% (nas lajes reforçadas com $\rho_{sl}=0.2$) e 29% (nas lajes reforçadas com $\rho_{sl}=0.56$).

Quanto aos aumentos da capacidade de carga máxima das lajes para estados limite últimos, eles variaram entre 74% nas faixas de laje com $\rho_{sl}=0.36$ e 23% nas faixas de laje com $\rho_{sl}=0.56$.

No que respeita à transformação do reforço das fibras em armadura longitudinal equivalente, verificou-se que nas lajes com $\rho_{sl}=0.20$, 0.36 e 0.56 , 45 kg de fibras por m^3 de betão equivalem a uma armadura longitudinal fictícia, colocada ao nível da existente, de 110 mm^2 , 142 mm^2 e 157 mm^2 , respectivamente, o que equivale a 130% , 94% e 67% da armadura realmente aplicada nas de faixas de laje correspondentes.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FCT por intermédio do Projecto FICOFIRE - POCTI/ECM/57518/2004 e da empresa Maprel – Empresa de Pavimentos e materiais Pré-Esforçados, Lda. O 1º Autor agradece o apoio financeiro obtido por intermédio da bolsa, ao abrigo do projecto acima referido. À Empresa Bekaert S.A. um reconhecimento pelas fibras gentilmente oferecidas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Barros, J.A.O., *Behaviour of fibre reinforced concrete – experimental analysis and numerical simulation*, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 502 p, Dezembro 1995
- [2] Barros, J.A.O.; Figueiras, J.A. “Experimental behaviour of fiber concrete slabs on soil”, *Journal Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 3, p. 277-290, 1998.
- [3] Gopalaratnam, V.S.; Shah, S.P. (1987b), “Failure mechanisms and fracture of fibre reinforced concrete”, *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, edited by S.P. Shah and G.B. Batson, SP-105, ACI, pp.1-26.
- [4] *CEB-FIP Model Code 1993 Comite Euro-International du Beton, Bulletin d’Information n° 213/214*
- [5] *Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1: General rules and rules for buildings* Outubro de 2001
- [6] *REBAP - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado* Decreto-Lei N.º 349-C/83, de 30 de Julho
- [7] LIMA, J.D. et al, *Betão Armado – Esforços Normais e de Flexão (REBAP 83)* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1999