

## **Estruturas Fibrosas Orientadas no Reforço de Elementos de Betão**



**Paula Pina  
Marques<sup>1</sup>**



**Raul Figueiro<sup>2</sup>**



**Cristiana Gonilho  
Pereira<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

O presente trabalho de pesquisa tem como principal objectivo desenvolver estruturas fibrosas orientadas para aplicações na construção civil, nomeadamente para o reforço de elementos leves de betão, de forma a substituir o aço. Foram desenvolvidas seis estruturas fibrosas orientadas (EFO) variando o reforço no sentido transversal e longitudinal. Lajes de betão auto-compactável foram reforçadas com as EFO e testes de flexão foram realizados de forma a avaliar o seu desempenho mecânico e identificar a influência da quantidade e distribuição dos reforços em estruturas abertas 0/90°. O comportamento mecânico das lajes reforçadas com as estruturas fibrosas foi comparado com o comportamento mecânico de lajes reforçadas com aço e com lajes sem reforço. As amostras reforçadas com EFO apresentaram uma maior capacidade de absorção de energia após rotura que as lajes não reforçadas. Conclui-se que quer a massa linear quer a densidade das mechas tem uma influência significativa no desempenho mecânico do elemento reforçado.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Compósito; Corrosão; Estruturas fibrosas orientadas direccionalmente; Elementos leves de betão; Lajes reforçadas por estruturas têxteis.

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Têxtil, 4800-058 Guimarães, Portugal. paula@det.uminho.pt

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Têxtil, 4800-058 Guimarães, Portugal. rfang@det.uminho.pt

<sup>3</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal.  
cristiana.pereira@civil.uminho.pt

## **1. INTRODUÇÃO**

Os recentes desenvolvimentos, ocorridos na tecnologia das fibras e nas estruturas fibrosas, permitiram produzir materiais fibrosos avançados para inúmeras aplicações não convencionais. As elevadas exigências pelos diversos sectores em termos de elevado desempenho, nomeadamente, razão força/peso e módulo/peso, durabilidade, estabilidade dimensional e, em termos de funcionalidades como a monitorização, entre outras, tem tornado estes materiais/estruturas fibrosas adequadas para várias aplicações no sector da engenharia civil. Assim, nos últimos anos, o desenvolvimento de diversos materiais fibrosos para aplicação na área da engenharia civil, nomeadamente na substituição de materiais convencionais de construção, tem recebido grande atenção não apenas por parte da comunidade científica, mas também por ambos os sectores, têxtil e construção civil. O uso de materiais fibrosos como material de reforço de matrizes cimentícias é uma das inúmeras aplicações que na última década tem sofrido vários desenvolvimentos.

Devido à ausência de uma adequada resistência à tracção, os elementos de betão necessitam de reforço, de forma a maximizar a sua capacidade de fazer face às solicitações mecânicas. Um dos materiais mais utilizados para reforço do betão, é o aço, sendo por isso actualmente o mais aceite como forma de reforço. No entanto, devido à corrosão, fadiga e aos efeitos nefastos da presença de agentes agressivos, a rotura das estruturas de betão reforçadas com aço, são uma consequência inevitável. Assim, como material de reforço, o aço, apresenta vários inconvenientes sendo o principal a corrosão, que conduz não só à diminuição do tempo de vida útil das estruturas, como também à diminuição da sua durabilidade, acarretando elevados custos de manutenção, pelo que, o desenvolvimento de materiais alternativos ao aço no reforço do betão tem sido nas últimas décadas uma prioridade. [1,2]

De forma a transpor os problemas associados às estruturas de betão reforçadas com aço, nomeadamente a corrosão, e simultaneamente melhorar e aumentar o tempo de vida útil das estruturas e sua durabilidade, uma nova abordagem ao reforço do betão tem sido alvo de desenvolvimentos – Textile Reinforced Concrete (TRC) – betão reforçado com estruturas fibrosas. Assim, o TRC é um material de construção inovador no qual os materiais fibrosos são utilizados para reforçar matrizes cimentícias de forma a eliminar o problema da corrosão do aço e a fornecer a resistência à tracção adequada ao elemento de betão. [3,4] Os materiais fibrosos parecem ser um material alternativo adequado e a sua aplicação na área da engenharia civil tem crescido ao longo dos anos devido às suas vantagens tais como a conformabilidade, possibilidade de pré-forma durante a sua produção, fácil manuseio, transporte e colocação, elevada resistência à corrosão, elevada razão carga/peso, flexibilidade, durabilidade, resistência ao calor e fogo, possibilidade de orientação das fibras na direcção das solicitações mecânicas de acordo com a aplicação final, entre outras. Assim, estas mais valias tornam os materiais fibrosos um material atractivo e colocam-nos por isso em posição para substituírem materiais de construção tradicionais. Além disso, estes materiais e estruturas permitem a produção de elementos leves de betão. [5,6]

## **2. OBJECTIVOS**

O principal objectivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de estruturas fibrosas, nomeadamente estruturas fibrosas orientadas (EFO) enquanto material de reforço de elementos de betão, substituindo o aço e ultrapassando as suas principais desvantagens – a corrosão. Assim, recorrendo a técnicas têxteis convencionais e a fibras de elevado desempenho, pretende-se produzir diferentes tipos de EFO, com diferentes orientações das mechas de fibras, de forma a que estas estruturas apresentem os requisitos necessários que lhes permitam competir com o aço no reforço de elementos leves de betão.

### 3. TRABALHO EXPERIMENTAL

Os objectivos gerais do presente trabalho consistiram:

- no desenvolvimento e aplicação de estruturas fibrosas orientadas (EFO), 0/90°, com fibra de vidro - E;
- na avaliação e comparação do comportamento mecânico dos vários elementos de betão reforçados com EFO, nomeadamente a influência da quantidade (massa linear) e distribuição (densidade) das mechas de fibras das diferentes EFO;
- na avaliação e comparação do comportamento mecânico entre os elementos de betão reforçado com EFO e elementos de betão reforçados aço;
- na análise da técnica de produção das estruturas fibrosas bem como dos elementos de betão.

#### 3.1 Materiais

A fibra de vidro - E foi a fibra seleccionada para produzir as EFO. A sua selecção deveu-se às suas características inerentes tais como boa resistência à tracção, baixa condutividade térmica e boa relação qualidade/preço. Ainda que as fibras de vidro – E sejam agredidas pelos alcalis do cimento e, por isso, não devam ser utilizadas no reforço de matrizes cimentícias, a escolha deste tipo de fibra justifica-se pela elevada razão qualidade/preço e pelo objectivo do estudo – avaliação do desempenho mecânico das EFO.

De forma a avaliar o desempenho mecânico das EFO foi produzido um betão auto-compactável (BAC). A selecção recaiu neste tipo de betão essencialmente devido às suas características específicas tais como: elevada resistência mecânica e não requer vibração para colocação e compactação.. A composição do BAC é apresentada no quadro 1. Foi utilizado Cimento do tipo I 42,4 R e um *filler* calcário. Como adjuvante recorreu-se a um super-plastificante de 3ª geração.

Quadro 1. Composição do betão auto-compactável (BAC); \* pelo menos 95% dos agregados possuem dimensões superiores a 4 mm; pelo menos 90% das partículas dos agregados possuem dimensões inferiores a 10mm

<i>Componentes</i>	<i>Quantidade</i>
CEM I 42,5 R	289,33 kg/m <sup>3</sup>
<i>Filler</i> Calcário Micro 100A	376,00 kg/m <sup>3</sup>
Água	161,27 l/m <sup>3</sup>
Super-plastificante Viscocrete 3006	5,07 l/m <sup>3</sup>
Areia	738,20kg/m <sup>3</sup>
Agregados 4/10*	756,00 kg/m <sup>3</sup>

#### 3.2 Produção das estruturas fibrosas orientadas direcionalmente (EFOD)

As EFO consistem em estruturas biaxiais (2D) com orientação de 0/90° (teia e trama) de mechas de fibra de vidro. As diferentes EFO apresentam diferentes números de mechas independentes e entrelaçadas, na teia e na trama, sendo caracterizadas por uma estrutura aberta (Fig.1) na qual as mechas de fibra são orientadas na direcção das solicitações mecânicas, aumentando assim a sua capacidade de suportar cargas de tracção e de flexão. A geometria das EFO é de extrema importância, uma vez que esta irá não só influenciar a impregnação da estrutura têxtil pela matriz cimentícia, como irá evitar a retenção dos agregados (efeito de peneiração).

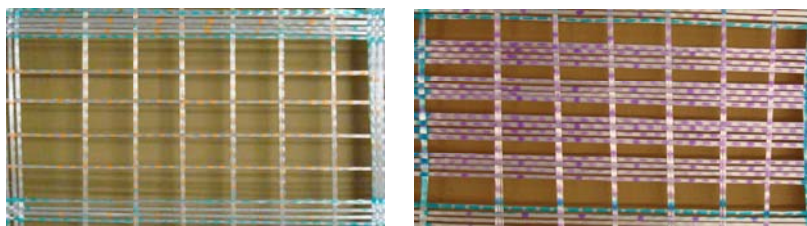


Figura 1. Exemplo de duas estruturas fibrosas orientadas.

Foram produzidos dois grupos de estruturas fibrosas orientadas: Grupo 1: variação da quantidade de mechas (massa linear) e a sua distribuição (densidade) na direcção longitudinal; 6 mechas/15 cm na direcção transversal; Grupo 2: variação da quantidade de mechas (massa linear) e a sua distribuição (densidade) na direcção longitudinal; 3 mechas/15 cm na direcção transversal

A massa linear de cada mecha de teia é de 2130 Tex enquanto a da trama possui o valor de 2140Tex

Quadro 2. Caracterização das EFOD

Grupo	ID EFO	Reforço longitudinal		Reforço transversal	
		Massa linear (Tex)	Densidade (nºmechas/30cm)	Massa linear (Tex)	Densidade (nºmechas/15cm)
1	1	8520 Tex	4	12840 Tex	6
	2	17040 Tex	8	12840 Tex	6
	3	17040 Tex	4	12840 Tex	6
	4	34080 Tex	4	12840 Tex	6
2	5	17040 Tex	4	6420 Tex	3
	6	17040 Tex	8	6420 Tex	3

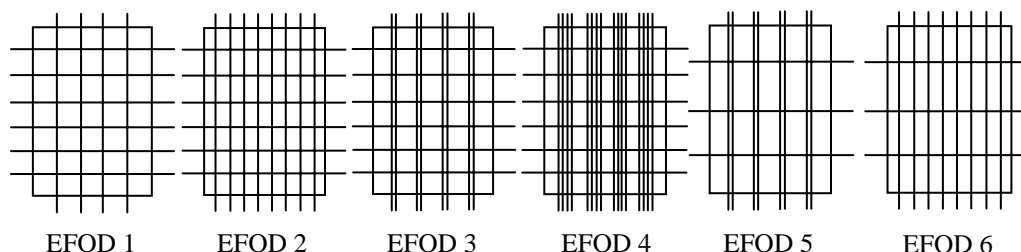
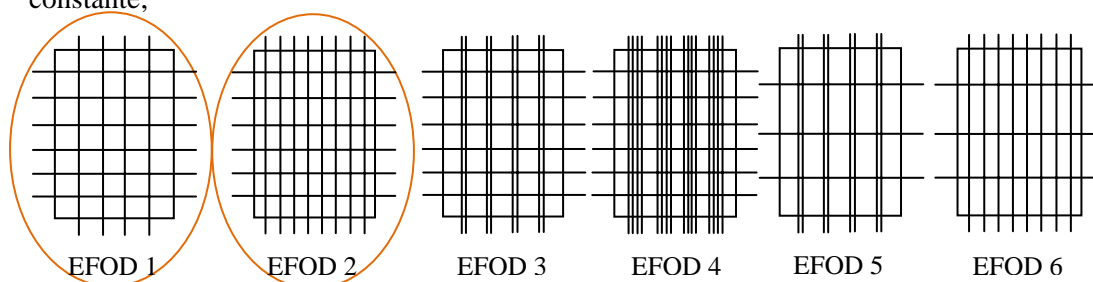


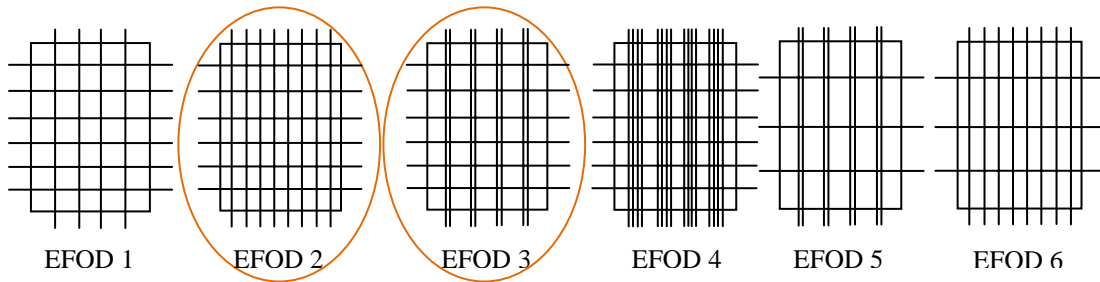
Figura 2. Esquema das EFOD

Várias são as relações que se podem estabelecer de forma a comparar e avaliar a influência da quantidade (massa linear) e forma como se distribuem (densidade) as mechas de reforço, em ambas as direcções, nas propriedades mecânicas das lajes reforçadas por EFO, nomeadamente:

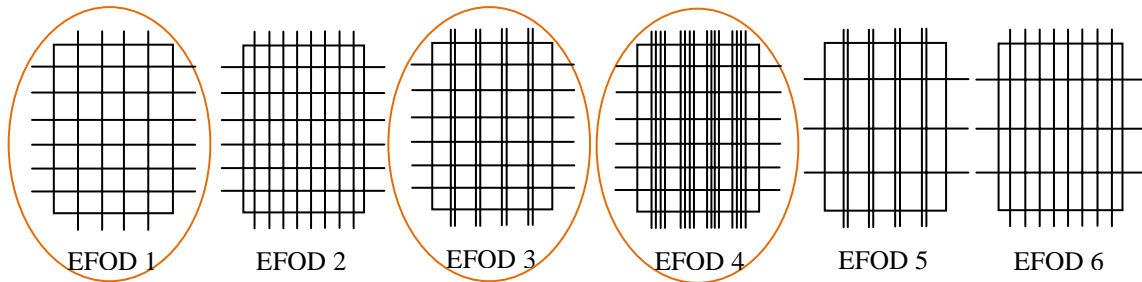
- EFO 1 e 2, avaliação da influência do aumento da densidade de mechas e sua distribuição ao longo do elemento reforçado. na direcção longitudinal, mantendo o reforço transversal constante;



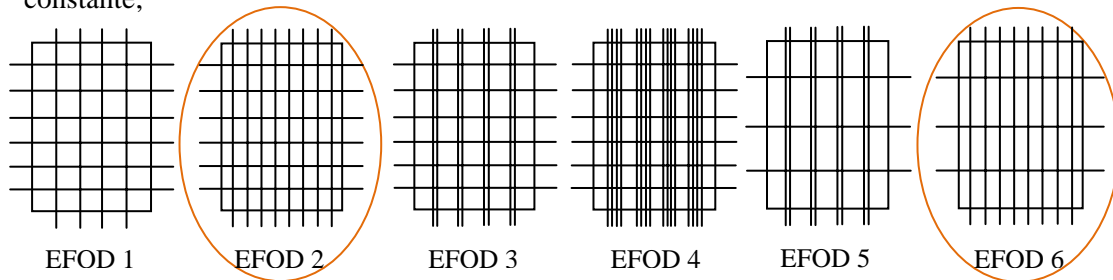
- EFO 2 e 3, avaliação da influência da distribuição de mechas ao longo do elemento reforçado, na direcção longitudinal, mantendo o reforço transversal constante;



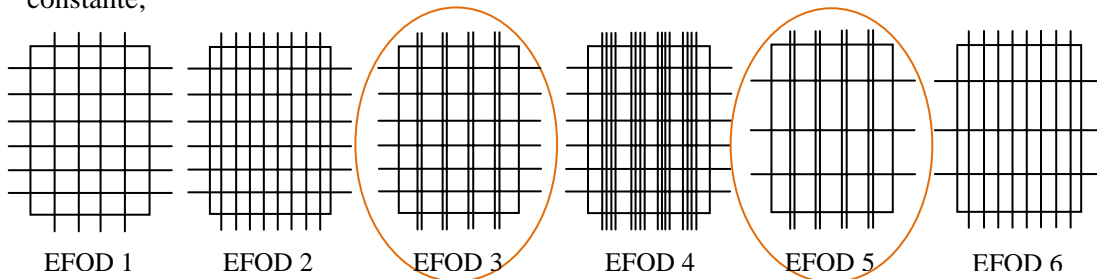
- EFO 1, 3 e 4, avaliação da influência do aumento da quantidade (massa linear) de reforço longitudinal mantendo a sua distribuição constante bem como o reforço transversal;



- EFO 2 e 6, avaliação da influência da diminuição da densidade de mechas e sua distribuição ao longo do elemento reforçado, na direcção transversal, mantendo o reforço longitudinal constante;



- EFO 3 e 5, avaliação da influência da diminuição da densidade de mechas e sua distribuição ao longo do elemento reforçado, na direcção transversal, mantendo o reforço longitudinal constante;



Outras relações podem ser identificadas contudo com menor relevância para o estudo.

### 3.3 Produção de lajes reforçadas com EFO

Os elementos de betão produzidos e reforçados com as diferentes EFO são pequenas lajes de betão auto-compactável (30cmx15cm). As EFO são colocadas numa armação de aço rígida de forma a ficarem tensionadas em ambas as direcções, longitudinal e transversal (Fig. 2a). Uma camada de BAC de 1cm de altura é colocada no interior do molde. A estrutura fibrosa orientada é então colocada por cima da camada de BAC sobre a qual é colocada uma camada de BAC de 3cm de altura (Fig. 2b e 2c). As amostras de BAC reforçadas com EFO são desmoldadas após 24h e colocadas num ambiente controlado (20° C e 65% RH) para cura do betão. Para cada tipo de betão reforçado com EFO foram produzidas 3 amostras. Na totalidade foram produzidas, 18 amostras reforçadas com 6 EFO diferentes, um conjunto de amostras de betão sem reforço e um conjunto de amostras de betão reforçado com aço. A análise do comportamento mecânico dos elementos de betão reforçado com aço prende-se com a necessidade de comparar o desempenho das EFO e do aço, elemento de reforço convencional de elementos de betão.

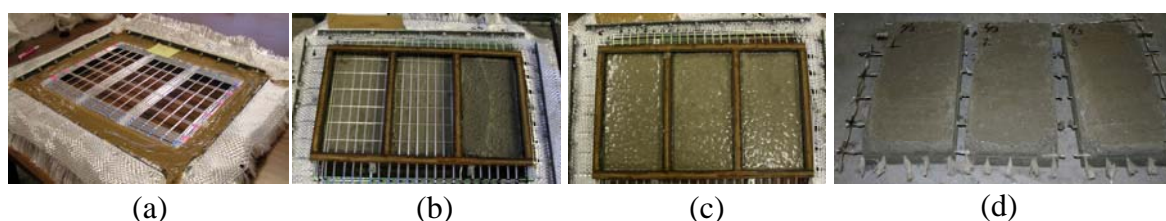


Figura 3. Processo de produção de lajes reforçadas com EFO.

### 3.4 Resultados e discussão

De acordo com a Norma Europeia EN 1339:2003 Anexo F [7], foram realizados testes de flexão em três pontos de forma a avaliar o comportamento mecânico das lajes reforçadas com EFO.

As lajes reforçadas com EFO são identificadas por 3 letras, BAC, que significa laje de betão auto-compactável, seguida de um número que corresponde à EFO utilizada. Relativamente às lajes de betão não reforçado a abreviação utilizada é BAC enquanto a laje reforçada com aço tem como identificação a abreviatura, BAC aço. O quadro 3 apresenta os resultados obtidos no teste de flexão para cada uma das amostras:

Quadro 3. Valores máximos obtidos

<i>Grupo</i>	<i>Id lajes</i>	<i>Tensão de rotura à flexão [MPa]</i>	<i>Carga de rotura [N]</i>
1	BAC <sub>1</sub>	7,41	3950
	BAC <sub>2</sub>	7,37	3984
	BAC <sub>3</sub>	7,20	3840
	BAC <sub>4</sub>	8,34	4450
2	BAC <sub>5</sub>	7,85	4187
	BAC <sub>6</sub>	7,89	4208
3	BAC	6,03	3216
	BAC <sub>aço</sub>	13,89	7410

De acordo com o quadro 3, a laje de betão não reforçado apresenta o valor mais baixo de tensão de rotura à flexão. A laje reforçada com aço apresenta o valor mais elevado, como esperado. Relativamente às amostras reforçadas com EFO, a que apresenta melhor desempenho à flexão é a amostra BAC<sub>4</sub>. As amostras reforçadas com EFO possuem um melhor desempenho à flexão quando comparadas com a amostra não reforçada podendo concluir-se que, estas melhoram o comportamento

mecânico dos elementos de betão. No entanto, apresentam um desempenho inferior à laje reforçada por aço.

Observando a figura 4, verifica-se a existência de algumas diferenças no comportamento mecânico dos três tipos de elementos de betão. Na laje reforçada com EFO ( $BAC_4$ ) e, na não reforçada ( $BAC$ ) podem identificar-se 2 fases distintas enquanto a laje reforçada com aço apresenta 3 fases.

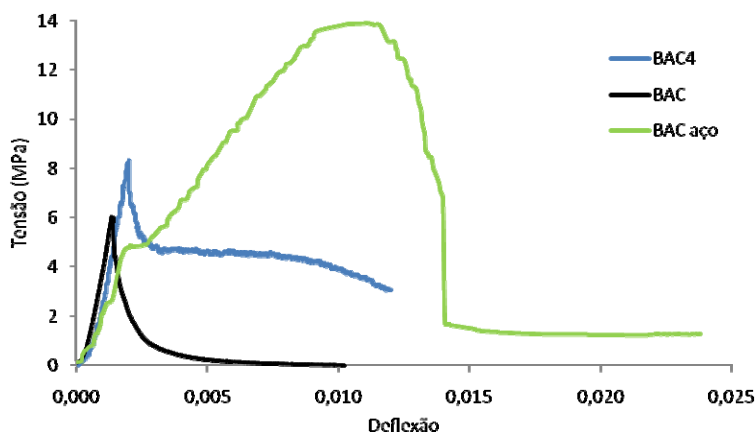


Figura 4. Curva tensão vs deflexão da estrutura reforçada com aço ( $BAC_{aço}$ ), da estrutura reforçada com EFO ( $BAC_4$ ) e da estrutura não reforçada ( $BAC$ ).

Na fase inicial, as duas lajes, não reforçada e reforçada com EFO, apresentam um comportamento linear suportando cargas até à carga de rotura. Esta fase, e em ambas as estruturas, é caracterizada pela formação de desenvolvimento de fissuras. Na última fase a laje de betão não reforçada apresenta uma baixa capacidade de absorção de energia mas, o oposto ocorre no elemento de betão reforçado com a estrutura fibrosa, cuja capacidade de absorção de energia é muito superior. A capacidade de suportar carga diminui e as deformações aumentam até à rotura propriamente. Relativamente à laje reforçada com aço ( $BAC_{aço}$ ), esta apresenta um comportamento diferente das outras estruturas. Na fase inicial apresenta um comportamento linear e elástico até atingir o patamar de cedência. A partir deste ponto, verificam-se as deformações plásticas. A fase seguinte caracteriza-se pelo aumento da capacidade de carga acompanhada pela deformação da estrutura. É então atingida a tensão de rotura. Finalmente, ocorre a rotura propriamente dita caracterizada pelo decréscimo acentuado da capacidade de carga.

A figura 5 apresenta o comportamento à flexão do grupo 1, no qual o reforço transversal se mantém constante. Considerando as relações estabelecidas anteriormente verifica-se o seguinte:

- $BAC_1$  e  $BAC_2$ : a primeira apresenta pior comportamento pois apresenta menor densidade de mechas havendo por isso menos filamentos a suportar as cargas aplicadas;
- $BAC_2$  e  $BAC_3$ : o comportamento dos dois elementos é muito semelhante embora a amostra  $BAC_2$  apresenta um comportamento ligeiramente superior, pelo que a distribuição parece não ter uma grande influência no desempenho mecânico;
- $BAC_1$ ,  $BAC_3$  e  $BAC_4$ : a amostra  $BAC_4$  é a que apresenta melhor comportamento comparativamente às outras, uma vez que, possui maior massa linear, i.e., cada mecha possui maior número de filamentos, pelo que poderá suportar maiores cargas; contrariamente, a amostra  $BAC_1$  apresenta o pior comportamento pois é a que possui menor massa linear;

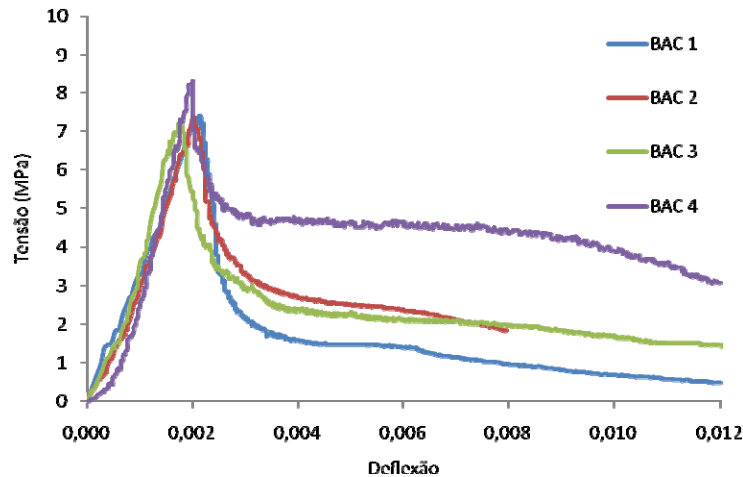


Figura 5. Curva tensão vs deflexão da estrutura reforçada com EFOD<sub>1</sub> (BAC<sub>4</sub>), EFOD<sub>2</sub> (BAC<sub>2</sub>), EFOD<sub>3</sub> (BAC<sub>3</sub>) e EFOD<sub>4</sub> (BAC<sub>4</sub>).

Relativamente ao grupo 2 (fig.6), no qual o reforço transversal também é constante porém as amostras apresentam metade das mechas (3mechas/30cm) quando comparado com o grupo 1 (6mechas/30cm), pode-se concluir que, o comportamento entre as amostras BAC<sub>5</sub> e BAC<sub>6</sub> é muito similar. Assim, o aumento da densidade das mechas parece não ter grande influência no comportamento mecânico dos elementos de betão.

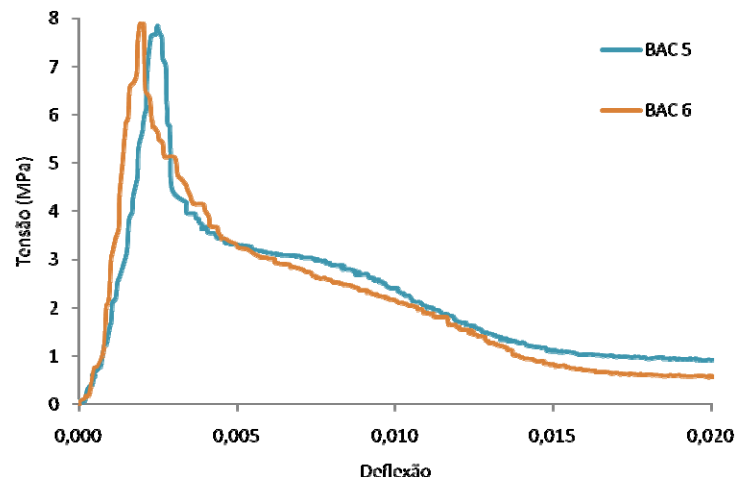


Figura 6. Curva tensão vs deflexão da estrutura reforçada com EFOD<sub>5</sub> (BAC<sub>5</sub>) e EFOD<sub>6</sub> (BAC<sub>6</sub>).

Considerando as relações estabelecidas previamente entre o grupo 1 e 2 constata-se que em ambos os casos BAC<sub>2</sub> vs BAC<sub>6</sub> e BAC<sub>3</sub> vs BAC<sub>5</sub> (fig. 7), as amostras 5 e 6 com metade do reforço transversal apresentam melhor comportamento mecânico. Assim, a diminuição da densidade de mechas, na direcção transversal, parece influenciar o comportamento mecânico dos elementos.

Analisando a fig. 8, podemos verificar que a amostra que apresenta comportamento mecânico menos interessante é a laje de betão não reforçada (BAC), devido à ausência de qualquer tipo de reforço, e a que apresenta melhor comportamento é efectivamente a laje reforçada com aço (BAC<sub>aço</sub>). Das amostras reforçadas com EFO, destaca-se a reforçada com a EFO<sub>4</sub> que apresenta o melhor comportamento mecânico, uma vez que tem maior número de filamentos no sentido das solicitações mecânicas, enquanto a amostra reforçada com EFO<sub>1</sub> possui o pior comportamento devido ao menor número de filamentos presentes.



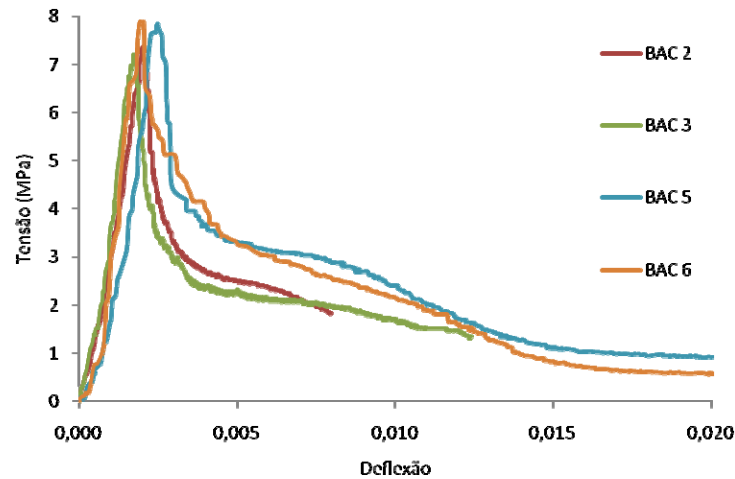


Figura 7. Curva tensão vs deflexão da estrutura reforçada com EFOD<sub>2</sub> (BAC<sub>2</sub>), EFOD<sub>3</sub> (BAC<sub>3</sub>), EFOD<sub>5</sub> (BAC<sub>5</sub>) e EFOD<sub>6</sub> (BAC<sub>6</sub>).

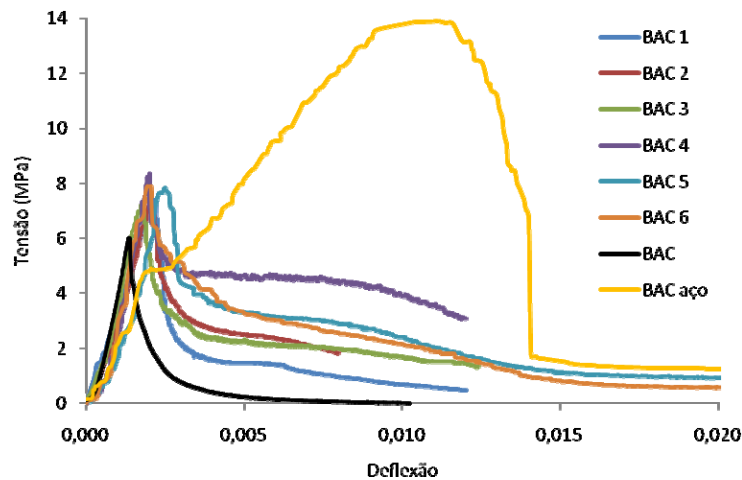


Figura 7. Curva tensão vs deflexão de todos os elementos de betão.

#### 4. CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos pode concluir-se que:

- as estruturas fibrosas melhoram o comportamento mecânico dos elementos de betão;
- das amostras reforçadas com estruturas fibrosas a que apresenta melhor comportamento é a BAC<sub>4</sub>, dado que é que possui maior massa linear de reforço no sentido das solicitações mecânicas, permitindo-lhe assim suportar maiores cargas;
- das amostras reforçadas com estruturas fibrosas a que apresenta um comportamento menos interessante é a BAC<sub>1</sub>, dado que, é que possui menor massa linear de reforço no sentido das solicitações mecânicas;
- quanto maior for a massa linear das mechas melhor desempenho tem o elemento de betão, aproximando-se do comportamento mecânico do betão reforçado com aço (grupo 1);
- a diminuição da densidade das mechas, no sentido longitudinal, parece não ter influência no desempenho mecânico do elemento reforçado (grupo 1) quando o sentido transversal se mantém constante;

- o aumento da densidade das mechas, no sentido transversal, parece não ter influência no desempenho mecânico do elemento reforçado (grupo 2) quando o longitudinal se mantém constante;
- a diminuição da densidade das mechas, no sentido transversal, parece ter influência no comportamento mecânico dos elementos reforçados concluindo que, com menor densidade o desempenho mecânico é melhor possibilitando assim a redução do material utilizado para reforçar o betão; mais, esta diminuição pode ser justificada pelo efeito do entrelaçamento das mechas nas direcções 0/90°, dando origem a estruturas que sofrem maiores deformações quando solicitadas;
- quer a massa linear quer a densidade das mechas mostram ter uma influência significativa na capacidade de absorção de energia do elemento reforçado;
- nenhuma das amostras reforçadas com EFO apresenta o mesmo comportamento que a amostra reforçada com aço;
- o uso do BAC apresenta várias vantagens nomeadamente a capacidade de fluir, a capacidade de passar através do reforço e permite a possibilidade de se produzir elementos finos leves de betão.

Trabalhos experimentais estão em curso por forma a ultrapassar os problemas encontrados, nomeadamente no que respeita à produção de lajes e na melhoria do desempenho mecânico dos elementos reforçados com estruturas fibrosas. A sua melhoria depende não só do desempenho mecânico das estruturas fibrosas como também do seu comportamento no elemento reforçado, nomeadamente no que respeita ao interface estrutura fibrosa/betão.

## REFERÊNCIAS

- [1] PILLAI, S.U. [et al.] - Reinforced concrete design. 3rd ed. Tata McGraw-Hill. 2003, ISBN 0070495041.
- [2] BENZAID, R. [et al] - Applications of fibre reinforced polymer composites in structural and civil engineering : 12 th European Conference on Composites Materials: Biarritz, 29 August-1September, 2006.
- [3] BRAMESHUBER, W. – State-of-art Report of Rilem Technical Committee 201 – TRC Textile Reinforced Concrete. 1nd ed. RILEM Publications S.A.R.L, France. Report 36: 3<sup>rd</sup> trimester 2006, ISBN 0070495041.
- [4] DILTHEY, U. [et al] – Composite Improvement of textile reinforced concrete by polymeric impregnation of textiles. Proceedings of the International Symposium Polymers in Concrete. 2-4 April 2006, Guimarães, Portugal.
- [5] GRIES, T. [et al] – New development on manufacturing fibres and textiles structures for technical textiles. Proceedings of the International Textile Congress, 2004 Terrassa.
- [6] COMMITTEE ON HIGH PERFORMANCE SYNTHETIC FIBERS FOR COMPOSITES: High performance synthetic fibres for composites. [On line]. 2nd ed. National academies Press. [Consult. 12 January 2008]. Available on the WWW:<URL:[http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=1858](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=1858)>. ISBN-13: 978-0-309-04337-3
- [7] EN 1339:2003 Annex F European Standard -1. 2000, Construção - Betão e a sua aplicação. Lisboa : IPQ. 67 p.