

Eficiência de diferentes técnicas de reforço à flexão de vigas de betão armado



José Sena Cruz¹



Joaquim Barros²



Luís Silva³



Mário Coelho⁴

RESUMO

A utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP) no contexto do reforço de estruturas de Engenharia Civil tem crescido nas últimas décadas. Propriedades como baixo peso, elevado rácio rigidez/peso, imunidade à corrosão e grande variedade de tamanhos e formatos disponíveis são algumas das razões que justificam a crescente utilização deste tipo de materiais. A sua aplicação tem sido realizada essencialmente através de duas técnicas de reforço: colagem externa (*Externally Bonded Reinforcement* – EBR) e inserção no betão de recobrimento (*Near-Surface Mounted* – NSM). A eficiência dessas técnicas depende, principalmente, do desempenho da ligação. Dado que este tipo de reforço é aplicado ao nível do betão de recobrimento, que é normalmente a região com as piores propriedades mecânicas do elemento a ser reforçado, é frequente a ocorrência de rotura precoce do reforço pelo seu destacamento. Na tentativa de solucionar esse problema, outras técnicas têm sido propostas. A técnica que aqui se apresenta utiliza laminados multi-direccionais de fibra de carbono simultaneamente colados e ancorados ao betão, tendo sido designada por técnica MF-EBR – *Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*. Com vista à comparação da eficiência da técnica proposta com as técnicas EBR e NSM procedeu-se à realização de um programa de ensaios experimentais com vigas de betão armado. Assim, no presente trabalho os ensaios realizados são descritos e os resultados mais significativos são apresentados e analisados.

PALAVRAS-CHAVE

Externally Bonded Reinforcement; Near-Surface Mounted; Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement; Fiber Reinforced Polymer; Multi-direccional laminate of carbon fiber reinforced polymer; Reforço à flexão.

¹ ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, jsena@civil.uminho.pt

² ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, barros@civil.uminho.pt

³ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, luis_t_silva@hotmail.com

⁴ ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, mcoelho@civil.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

No contexto do reforço de estruturas de betão com recurso a laminados de CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) unidireccionais têm sido usadas essencialmente duas técnicas: a que se baseia na colagem externa dos FRPs sobre a superfície do elemento a reforçar – EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) e a outra em que laminados de CFRP são inseridos em finos entalhes abertos no betão de recobrimento – NSM (*Near-Surface Mounted*). Habitualmente é usado um adesivo epoxy para efectuar a colagem dos FRPs. Vários estudos têm demonstrado a ocorrência frequente de descolagem do FRP. Este tipo de modo de rotura é bastante mais frequente na técnica EBR, e é relatado como sendo frágil e sem aviso, pondo em risco a viabilidade do reforço. Devido a este fenómeno, o material de reforço não é suficientemente explorado, ou seja, a tensão máxima instalada no CFRP é muito inferior à sua resistência última à tracção.

Várias tentativas têm sido efectuadas para contornar os problemas acima mencionados. A técnica de reforço com FRPs fixos mecanicamente (MF-FRP – *Mechanically Fastened Fiber Reinforced Polymer*) foi recentemente introduzida para reforçar estruturas de betão armado. Esta técnica é caracterizada pelo uso de laminados de FRP híbridos (com fibras de carbono e de vidro), que são fixados mecanicamente ao betão usando “pinos” de fixação com espaçamento entre eles muito reduzido ao longo do FRP. Para prevenir destacamento precoce do reforço, nas extremidades deste tipo de laminado podem ainda ser aplicadas ancoragens mecânicas correntes. Segundo a pesquisa efectuada pelos autores do presente trabalho, o conceito da MF-FRP foi inicialmente explorado na Universidade de Wisconsin [1]. Na última década, alguns trabalhos foram publicados em revistas científicas sobre esta técnica, a qual tem sido utilizada em algumas aplicações, como seja, no reforço de estruturas de betão, madeira e alvenaria, e vários benefícios foram apontados, nomeadamente, a rápida instalação com recurso a ferramentas manuais simples, a quase ausência da necessidade de mão-de-obra especializada, ausência da necessidade de preparação da superfície, bem como o facto da estrutura reforçada pode ser imediatamente carregada após a instalação do FRP [1-11]. Como anteriormente referido, a técnica MF-FRP é baseada na utilização de laminados de FRP fixos ao substrato utilizando pinos. Em quase todas as pesquisas realizadas foi utilizado um tipo de FRP chamado SAFSTRIP® [12]. De acordo com a ficha técnica, o SAFSTRIP® tem 102 mm de largura e 3,2 mm de espessura e é fornecido em rolos de até 30,5 m de comprimento. O laminado é composto por fibras de carbono ensanduichadas entre camadas de uma malha dispersa de fibra de vidro. Os materiais são ligados por uma resina vinylester. O SAFSTRIP® tem uma resistência média de tracção, módulo de elasticidade à tracção, resistência ao esmagamento com e sem pré-esforço de aperto iguais a 852 MPa, 62.2 GPa, 351 MPa e 214 MPa, respectivamente [12]. Os pinos de fixação são inseridos no betão usando um dispositivo de fixação por fulminantes (PAD – *Powder Actuated Device*). Com este PAD, os pinos são disparados contra o material de base. Alguns estudos efectuados procuraram avaliar a influência do tipo de pino/parafuso, da anilha, da profundidade de embebimento, do diâmetro, do comprimento e da pré-perfuração dos furos no sistema de reforço. Normalmente, os pinos fixadores apresentam espaçamentos variando entre 45 a 150 mm na direcção longitudinal do FRP. Foi encontrado na literatura, um mínimo de 25 mm para a distância transversal entre os pinos. O comprimento de embebimento dos pinos varia consideravelmente (entre 25 mm e 50 mm). De acordo com [1] se o betão e o laminado forem pré-perfurados com o espaçamento pré-definido, consegue-se obter uma redução significativa da fragmentação do betão durante a introdução do pino e um aumento da capacidade de resistente à tracção e ao corte. Vários trabalhos experimentais têm sido realizados com principal enfoque no reforço à flexão de vigas e lajes, sob carregamentos monotónicos e fadiga. Nestes trabalhos foi obtido, em alguns casos, um aumento de capacidade de carga de cerca de 40% quando comparada com o elemento de referência. Além disso, é referida a passagem de um modo de rotura frágil para um modo de rotura mais dúctil quando esta técnica é usada.

Com base na técnica MF-CFRP, no presente trabalho apresenta-se a técnica MF-EBR (*Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*). Esta combina os elementos de fixação da técnica MF-FRP com os benefícios derivados da colagem externa da técnica EBR. Além disso, todas as ancoragens são pré-esforçadas. Esta técnica utiliza um novo laminado multi-direccional fabricado exclusivamente com polímeros reforçados com fibras de carbono (MDL-CFRP) de elevada resistência

à tracção longitudinal, módulo de elasticidade e resistência ao esmagamento. Neste trabalho são apresentados os principais resultados dos ensaios realizados em vigas reforçadas à flexão de acordo com as técnicas EBR, NSM e MF-EBR, a fim de comparar a eficiência de cada uma.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para avaliar a eficácia da técnica MF-EBR, foi realizado um programa experimental constituído por uma viga de referência (REF) e três vigas reforçadas de acordo com as seguintes técnicas: reforço colado externamente (EBR), reforço inserido no betão de recobrimento (NSM) e reforço por fixação mecânica e colada na superfície da viga (MF-EBR). Estas quatro vigas de betão armado (BA) foram produzidas com a mesma geometria, o mesmo arranjo de armadura longitudinal e transversal e com o mesmo betão. As vigas têm uma secção transversal de 200 mm de largura, 300 mm de altura e 2200 mm de comprimento sendo 2000 mm a distância entre apoios. Todas as vigas têm como armaduras longitudinais 3Ø10, na parte inferior e 2Ø10 na parte superior (ver Fig. 1). A armadura transversal é composta por estribos Ø6 com um espaçamento de 100 mm. A Figura 2 inclui a secção transversal das vigas reforçadas.

O Quadro 1 apresenta as principais propriedades das vigas. Nesta tabela t_f , L_f e w_f é a espessura, o comprimento e a largura dos laminados, respectivamente, e $\rho_{s,eq}$ é a percentagem de armadura longitudinal equivalente definida pela seguinte Eq. (1) onde b é a largura da viga, e A_s e A_f são a área transversal da armadura longitudinal e do sistema de FRP, respectivamente, E_s e E_f é o módulo de elasticidade do aço e do FRP, respectivamente, d_s e d_f é a distância a partir da fibra de betão mais comprimida até ao baricentro dos varões de aço e do sistema de FRP, respectivamente.

$$\rho_{s,eq} = \frac{A_s}{bd_s} + \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{A_f}{bd_f} \quad (1)$$

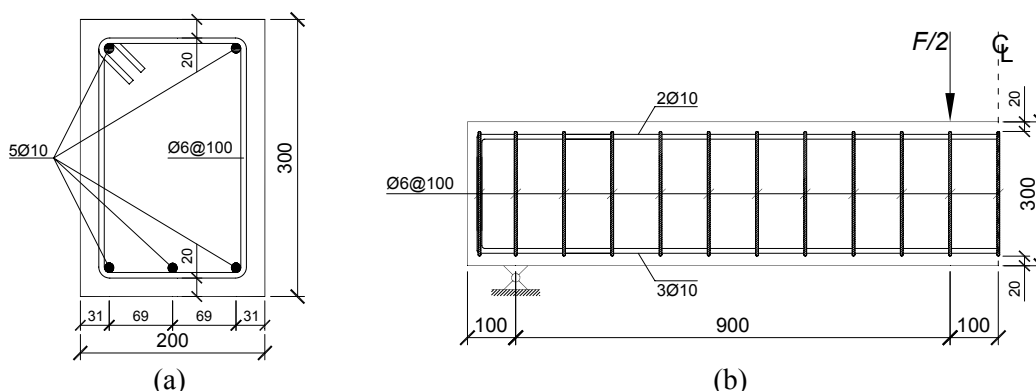


Figura 1. Vigas de betão armado: (a) Secção transversal; (b) Vista longitudinal.

Quadro 1. Propriedades das vigas.

Viga	Tipo de laminado	N.º laminados	t_f [mm]	L_f [mm]	w_f [mm]	$\rho_{s,eq}$ [%]
REF	-	-	-	-	-	0.439
EBR	Unidireccional	2	1.41	1400	30	0.550
MF-EBR	Multi-direccional	2	2.07	1400	30	0.553
NSM	Unidireccional	4	1.41	1400	15	0.561

No presente trabalho experimental foi adoptado uma configuração de ensaio de flexão com quatro pontos de carga (Fig. 3). Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamento, a uma velocidade de deslocamento a meio vão de 20 $\mu\text{m/s}$, utilizando, para esse efeito, o transdutor (LVDT – *Linear Variable Differential Transducer*), localizado a meio vão da viga (LVDT3 na Fig. 3). A carga foi aplicada através de um actuador hidráulico servo-controlado equipado com uma célula de carga de 500 kN.

Como se pode observar na Fig. 3, quatro LVDTs adicionais foram usados para medir os deslocamentos nas secções carregadas (*LVDT2* e *LVDT4*) e nas secções coincidentes com as extremidades livres dos sistemas de FRP (*LVDT1* e *LVDT5*). Além disso, foram usados extensómetros (*SG – Strain Gauges*) para medir as extensões na armadura longitudinal (*SGs1* e *SGs2*) e nos sistemas de FRP (*SGf1* a *SGf8*). A localização desta instrumentação está também incluída na Fig. 3.

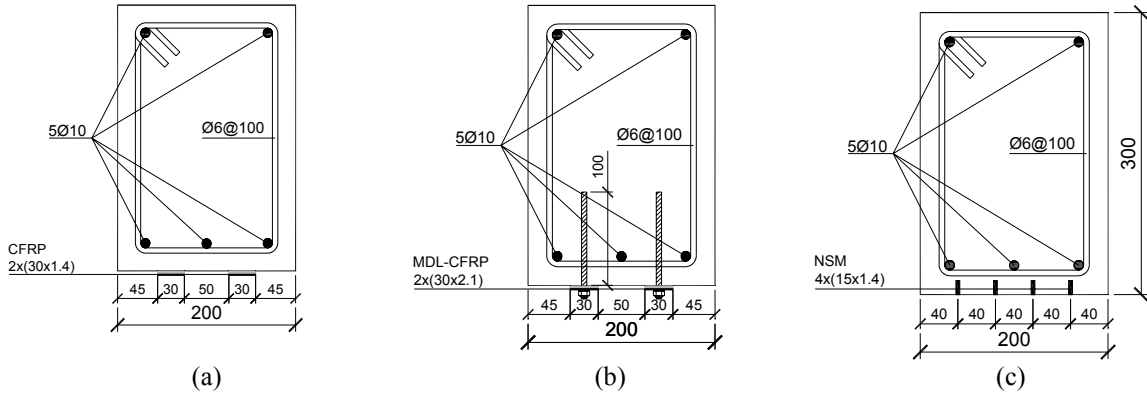


Figura 2. Secção transversal das vigas reforçadas: (a) EBR; (b) MF-EBR; (c) NSM.

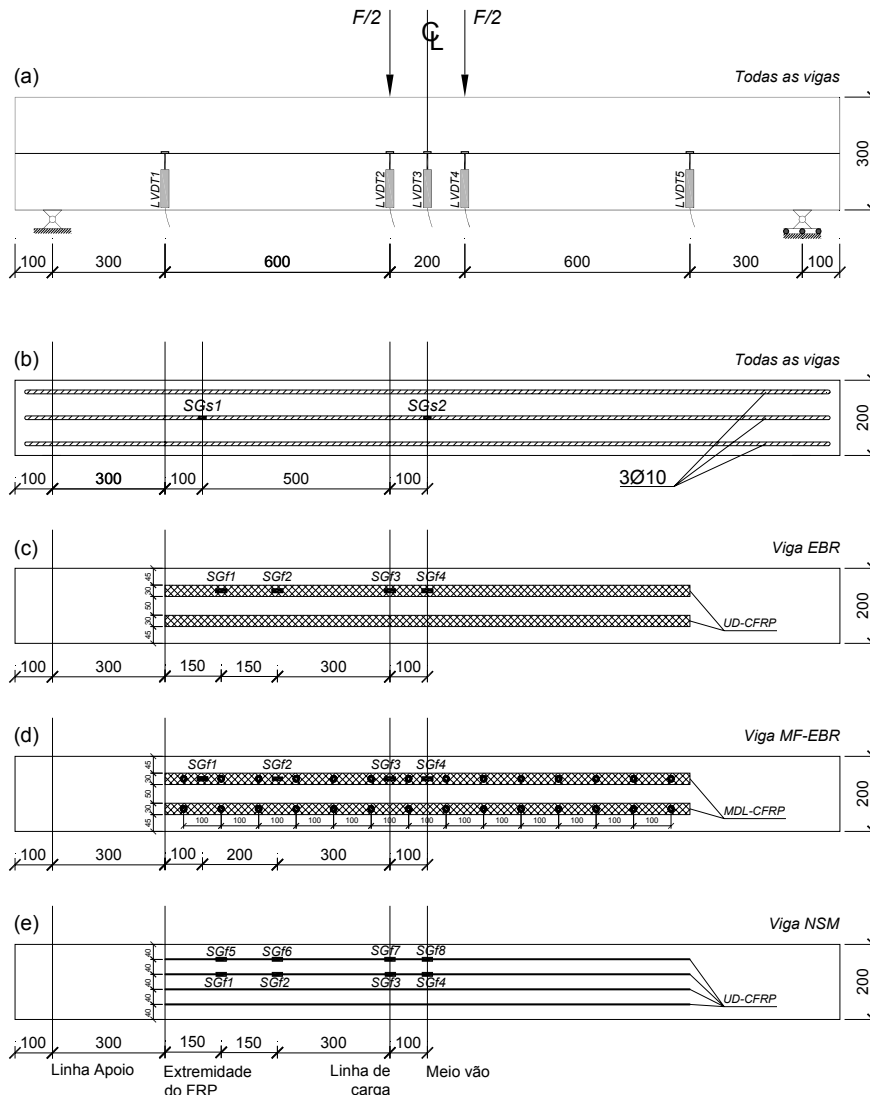


Figura 3. Instrumentação adoptada: (a) deslocamentos verticais; (b) extensões na armadura; (c) extensões nos laminados da viga EBR; (d) extensões nos laminados da viga MF-EBR; (e) extensões nos laminados da viga NSM.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização mecânica do betão foi avaliada através de ensaios de compressão. Para esse efeito, seis provetes cilíndricos de betão foram ensaiados para avaliar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de acordo com a NP EN 12390-3:2009 [13] e a LNEC E397-1993 [14], respectivamente. A partir dos ensaios de compressão foi obtido um valor de resistência média à compressão de 53.1 MPa, com um coeficiente de variação (CoV) de 4.0% e um valor médio de 31.2 GPa (CoV = 4.4%) para o módulo de elasticidade.

O laminado multi-direccional de CFRP (MDL-CFRP), utilizado na viga MF-EBR foi concebido e produzido para um projecto de investigação que pretende explorar as possibilidades do seu uso no reforço estrutural. O MDL-CFRP é composto por um laminado unidireccional pré-fabricado de fibras de carbono (CFRP) com a designação comercial CFK®150/2000 (CFK). A direcção principal das fibras do laminado CFK foi de 0° com a direcção da carga a ser aplicada (sentido longitudinal da viga). Em cada face do laminado CFK, foram coladas duas camadas de um *pre-preg* unidireccional de carbono com fibras orientadas a ±45°. Este *pre-preg* tem a designação comercial TEXIPREG® HS160 REM (HS) (ver Fig. 4). Foi utilizado um equipamento de autoclave para a produção do MDL-CFRP, ou seja, para a cura do HS. Os procedimentos para a produção de laminados são descritos noutra publicação [15]. Após a produção, o laminado multi-direccional apresentava uma espessura de 2.07 mm e um comprimento de 1400 mm.

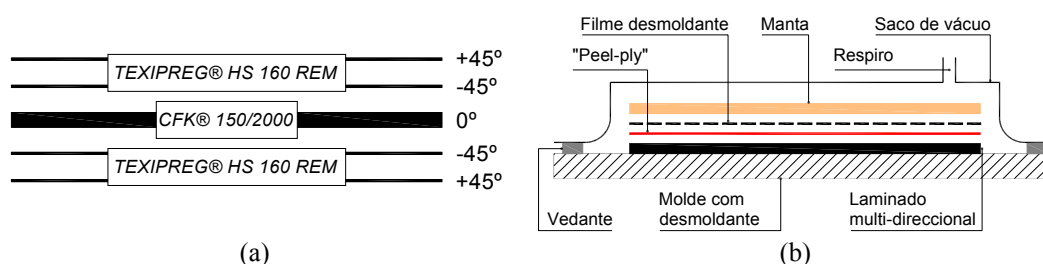


Figura 4. Produção do MDL-CFRP: (a) Sequência de empilhamento e materiais utilizados (secção transversal); (b) Setup usado no processo de cura em autoclave.

Para as outras duas vigas (EBR e NSM) foi usado o laminado unidireccional CFK®150/2000. Foram realizados ensaios de tracção de acordo com a norma ISSO 527-4:1997 [16] em ambos os laminados (CFK e MDL-CFRP) para avaliar suas propriedades de tracção. Destes ensaios obteve-se uma resistência à tracção, módulo de elasticidade e extensão última de 1866 MPa, 118 GPa e 1.58% para o MDL-CFRP, e de 2435 MPa, 158 GPa e 1.50% para o CFK, respectivamente [15]. A avaliação da resistência ao esmagamento do MDL-CFRP foi efectuada de acordo com a ASTM D5961/D5961M-05 [17]. Estes ensaios foram efectuados em duas séries, uma sem pré-esforço no parafuso e outro com um pré-esforço equivalente a um momento de aperto de 20 N×m. Dos testes realizados obteve-se uma resistência ao esmagamento de 316.4 MPa (CoV = 11.8%) e 604.4 MPa (CoV = 5.8%) para os casos das séries sem e com pré-esforço, respectivamente [15].

Para colar os laminados ao betão foi usado um adesivo epoxy. Para este efeito, foi seleccionada a resina epoxy S&P® Resin 220. De acordo com o fornecedor, esta resina epoxy tem uma resistência à tracção em flexão, resistência à compressão e tensão de aderência betão/laminado superiores a 30 MPa, 90 MPa e 3 MPa, respectivamente. Para fixar mecanicamente o laminado ao betão na viga MF-EBR foi adoptado um sistema de ancoragem química da Hilti. Este sistema é composto pela resina HIT-HY 150, varões roscados M10 de classe 5.8 e anilhas de aba larga DIN9021. De acordo com a ficha técnica do produto, com este sistema de ancoragem pode ser aplicado um momento de aperto máximo de 20 N×m (valor característico). Esse valor é muito conservador, porque introduz coeficientes de segurança muito elevados. Nesse contexto, foram realizados testes em provetes adicionais para avaliar o efeito da aplicação do máximo valor de momento de aperto recomendado para este sistema de ancoragem. Tendo por base os resultados obtidos nestes ensaios, optou-se por aplicar um momento de 40 N×m às ancoragens de viga MF-EBR.

3. PREPARAÇÃO DAS VIGAS

Os vários procedimentos necessários para a preparação das vigas reforçadas são descritos nos parágrafos seguintes.

Viga EBR

- a.** Com um martelo de agulhas é criada uma rugosidade na superfície do betão. Para limpar a superfície final utilizou-se ar comprimido;
- b.** Os laminados foram limpos com acetona;
- c.** O adesivo epoxy foi aplicado sobre a superfície do betão e na superfície do laminado que estará em contacto com este;
- d.** O laminado foi colado na superfície do betão e ligeiramente pressionado contra este para criar uma espessura uniforme de adesivo de 1 a 2 mm. O adesivo epoxy em excesso foi de seguida removido.

Viga NSM

- a.** Quatro ranhuras com 6 mm de largura e 20 mm de profundidade foram abertas no betão de recobrimento, usando uma máquina de corte, para receberem o laminado. De seguida as ranhuras foram limpas com ar comprimido;
- b.** Os laminados foram limpos com acetona;
- c.** As ranhuras foram preenchidas com adesivo epoxy;
- d.** As superfícies laterais do laminado foram cobertas com uma fina camada de epoxy;
- e.** Os laminados foram inseridos nas ranhuras, e ligeiramente pressionados para forçar o adesivo epoxy a fluir entre o CFRP e as paredes das ranhuras;
- f.** O adesivo epoxy em excesso foi removido e a superfície foi regularizada.

Viga MF-EBR

- a.** Furos de 11 mm de diâmetro e 100 mm de profundidade foram feitos no betão de recobrimento (ver Fig. 2b). Os furos foram limpos com recurso a ar comprimido e a uma escova de aço;
- b.** Os furos foram preenchidos com o adesivo químico e, em seguida, os parafusos foram inseridos neles até uma profundidade de 100 mm;
- c.** Foi criada uma rugosidade na superfície do betão usando um martelo de agulhas. No final os resíduos gerados foram limpos com ar comprimido;
- d.** Foi usada uma placa de acrílico transparente para marcar a posição parafusos e, em seguida, fazer os furos no laminado.
- e.** Os laminados foram limpos com acetona;
- f.** Foi aplicado adesivo epoxy sobre a área tratada na superfície do betão e na superfície do laminado que estará em contacto com o betão;
- g.** O laminado foi colocado sobre a superfície do betão e pressionado contra este para criar uma espessura uniforme de adesivo de 1 a 2 mm;
- h.** O adesivo em excesso foi removido, e os parafusos foram limpos de qualquer adesivo que pudesse ter entrado em contacto com estes;
- i.** Após o tempo de cura do adesivo epoxy foi aplicado um momento de aperto de 40 N×m nos parafusos. No dia do ensaio o mesmo momento de aperto foi aplicado de forma a ser garantido esse valor em todos os parafusos à data do ensaio.

Para todas as vigas reforçadas a preparação do adesivo epoxy seguiu as recomendações incluídas na ficha técnica do fabricante. As vigas foram mantidas em ambiente de laboratório antes de serem ensaiadas.

3. RESULTADOS

O Quadro 2 resume os principais resultados obtidos nos ensaios realizados, e a Fig. 6 mostra a relação entre a força e o deslocamento a meio vão, ao longo dos ensaios. Neste quadro, o significado dos símbolos é o seguinte:

δ_{cr} – flecha no início da fendilhação do betão;

- F_{cr} – carga no início da fendilhação do betão;
 δ_y – flecha na entrada em cedência da armadura longitudinal;
 F_y – carga correspondente à entrada em cedência da armadura longitudinal;
 δ_{max} – flecha na carga máxima;
 F_{max} – carga máxima;
 ε_{fu} – extensão última do laminado obtida nos ensaios de tracção;
 ε_{fy} – extensão máxima no laminado para F_y ;
 ε_{fmax} – extensão máxima no laminado para F_{max} .

A partir deste quadro e figura pode concluir-se que a técnica mais eficaz foi a MF-EBR, não só devido à carga máxima atingida ($F_{max} = 148.2$ kN), mas também em termos de flecha na rotura e do factor $\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$, este último indicador do nível de mobilização do FRP.

Quadro 2. Principais resultados obtidos.

Viga	Início fendilhação		Cedência		Última		δ_{max}/δ_y	$\varepsilon_{fy}/\varepsilon_{fu}$ [%]	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$ [%]	Modo de rotura do FRP
	δ_{cr} [mm]	F_{cr} [kN]	δ_y [mm]	F_y [kN]	F_{max} [kN]	δ_{max} [mm]				
REF	0.36	29	3.8	70	79.3	22.6	5.95	-	-	-
EBR	0.27	25	4.1	90	108.4 (37%)*	7.4	1.80	24.0	36.6	Descolagem
MF-EBR	0.38	32	4.2	96	148.2 (87%)*	18.3	4.35	15.8	69.3	Esmagamento
NSM	0.40	29	4.9	104	147.3 (86%)*	14.6	2.98	23.4	63.3	Destacamento

* $(F_{max} - F_{max,REF})/F_{max,REF}$ em que $F_{max,REF}$ é a carga máxima da viga de referência.

Quando comparado com a técnica EBR, o sistema MF-EBR permitiu um aumento de capacidade de carga de cerca de 37%. Esse comportamento superior não pode ser explicado pela maior rigidez axial, $E_f A_f$, uma vez que a relação entre o $E_f A_f$ do MDL-CFRP e o $E_f A_f$ do CFK (usado na viga EBR) é apenas 8% superior. As ancoragens pré-esforçadas contribuíram para a maior eficácia da técnica de reforço MF-EBR. De facto, enquanto o sistema EBR falhou por descolagem (Fig. 6) e o sistema NSM por *rip-off* (destacamento da camada de betão de recobrimento que inclui os laminados de CFRP, Fig. 7), o sistema MF-EBR rompeu por esmagamento do FRP (Fig. 8). A presença das ancoragens evitou a descolagem prematura dos laminados, assim como o destacamento da camada de betão de recobrimento (*rip-off*).

Aparentemente, na viga MF-EBR, a força correspondente ao início da fendilhação, F_{cr} , é maior do que nas outras vigas. Esse comportamento pode ser explicado pela existência de pré-esforço. Na verdade, a pré-tensão fornecida pelas ancoragens pode induzir um estado de compressão sobre a camada de betão que retarda o início da fendilhação. Este fenómeno também pode explicar a maior rigidez entre a iniciação da fendilhação do betão e o início da cedência do aço na viga MF-EBR. Após a cedência da armadura longitudinal, observa-se uma rigidez um pouco maior na viga NSM, quando comparado com a MF-EBR. Esse comportamento pode ser justificado pela maior eficiência da técnica NSM, uma vez que os laminados estão totalmente incorporados no betão.

As Figs. 9 a 12 apresentam as extensões no FRP para as quatro secções monitorizadas. A partir dessas figuras é visível que, em geral, até à rotura da viga EBR, para uma determinada carga aplicada, a máxima extensão ocorreu na viga EBR, enquanto as extensões mínimas foram registadas no MDL-CFRP da viga MF-EBR. Isso já era esperado devido ao maior braço interno do sistema EBR (d_f), quando comparado com o d_f do sistema NSM. Uma vez que os parafusos são restrições à perda de aderência do laminado, é natural a ocorrência de menores extensões entre os parafusos, onde foram instalados os SG, justificando assim as menores extensões registadas na viga MF-EBR, quando comparado com a EBR. No entanto, perto dos parafusos a concentração de tensões no laminado terá

sido bastante elevada, levando à rotura local do laminado pelo seu esmagamento (Fig. 8b). Quando esta rotura ocorreu, um aumento súbito da extensão foi registado, devido à transferência do campo de extensões da zona de tensão em torno do parafuso para a zona intermediária entre os parafusos. Estas figuras também mostram que a extensão máxima absoluta foi registada nos laminados da viga MF-EBR. Isso ocorreu no SG_{J2} , entre a terceira e a quarta linha de parafusos (Fig. 3d), devido à acção de uma escora diagonal de compressão do betão nesta zona (Fig. 8b).

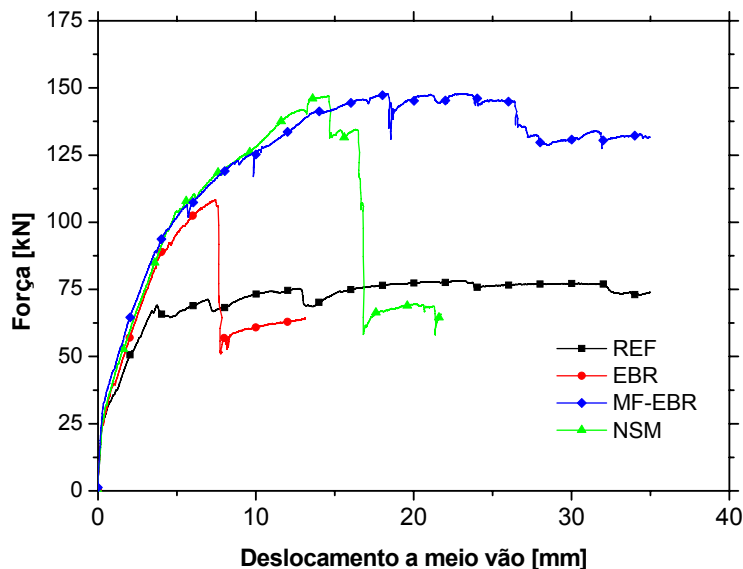


Figura 5. Relação força vs. deslocamento nas vigas ensaiadas.



Figura 6. Modo de rotura do laminado CFK na viga EBR.



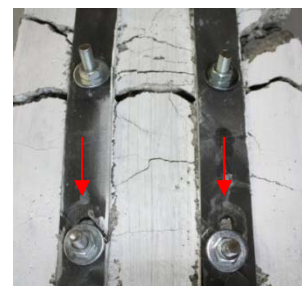
Figura 7. Modo de rotura do laminado CFK na viga NSM.



(a)



(b)



(c)

Figura 8. Modo de rotura do laminado MDL-CFRP na viga MF-EBR: (a) aspecto global da viga; (b) e (c) pormenores do esmagamento do laminado.

3. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma nova técnica de reforço à flexão designada de MF-EBR – *Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*. Esta técnica combina os benefícios derivados da aplicação de ancoragens usadas na técnica MF-FRP com os intrínsecos à ligação colada

segundo a técnica EBR. Além disso, todas as ancoragens são pré-esforçadas. Este novo sistema utiliza laminados multi-direccionais fabricados exclusivamente com polímeros reforçados com fibras de carbono, desenvolvidos no âmbito do presente projecto. Para avaliar a eficiência da técnica MF-EBR, quando comparada com outras técnicas existentes (EBR e NSM), foi realizado um programa experimental composto por quatro vigas: uma viga de referência (REF) e outras três reforçadas de acordo com cada uma das três técnicas de reforço em estudo: EBR, MF-EBR e NSM. As vigas foram submetidas a ensaios de flexão sob quatro pontos de carga. Quando comparado com a viga de referência, foi obtido um aumento na capacidade de carga de 37%, 87% e 86%, para as vigas EBR, MF-EBR e NSM, respectivamente. Quando comparado com a viga EBR, foi obtido um aumento na capacidade de carga de 37% para a técnica MF-EBR. No entanto, o aspecto mais favorável da técnica MF-EBR foi o nível de ductilidade (4.35), que foi muito superior ao registado nas outras duas vigas reforçadas, EBR (1.80) e NSM (2.98).

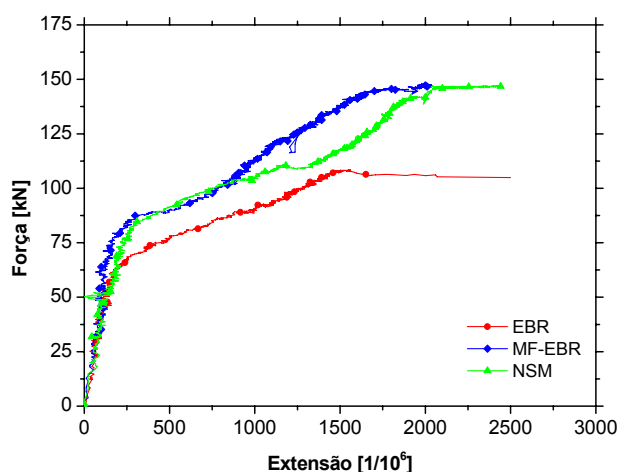


Figura 9. Relação força vs. extensão no laminado em $SGf1$ – a curva para a viga NSM corresponde à média entre $SGf1$ e $SGf5$, ver Fig. 3(c) to (e).

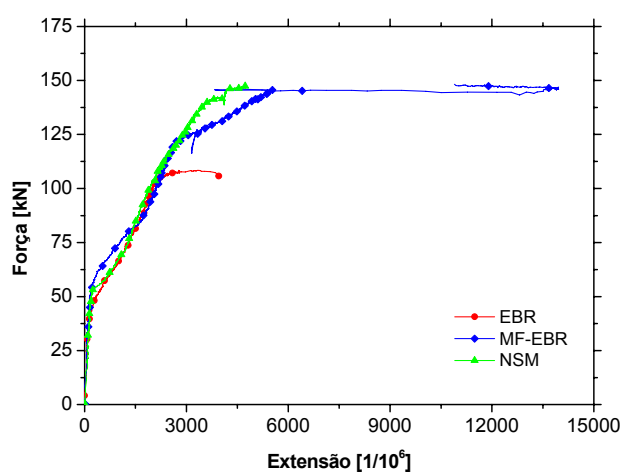


Figura 10. Relação força vs. extensão no laminado em $SGf2$ – a curva para a viga NSM corresponde à média entre $SGf2$ e $SGf6$, ver Fig. 3(c) to (e).

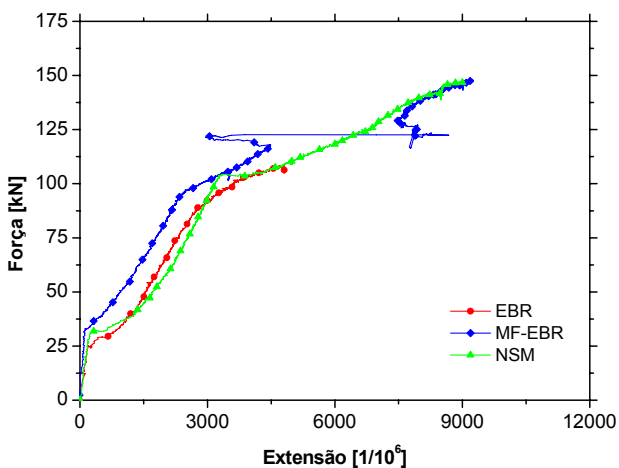


Figure 11. Relação força vs. extensão no laminado em $SGf3$ – a curva para a viga NSM corresponde à média entre $SGf3$ e $SGf7$, ver Fig. 3(c) to (e).

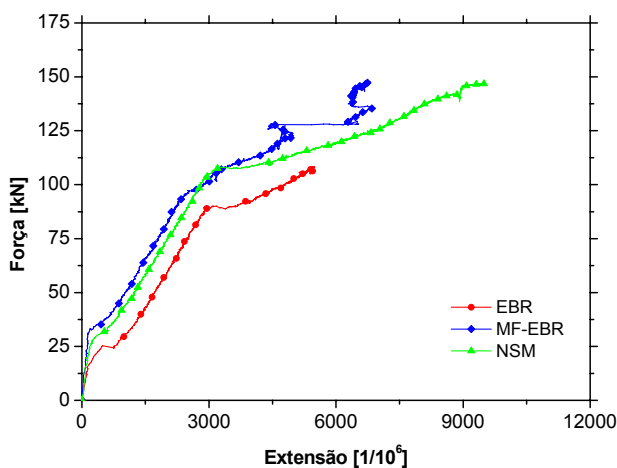


Figure 12. Relação força vs. extensão no laminado em $SGf4$ – a curva para a viga NSM corresponde à média entre $SGf4$ e $SGf8$, ver Fig. 3(c) to (e).

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado pelo programa PIDDAC, projecto no. PTDC/ECM/74337/ 2006 da FCT. Os autores agradecem os materiais generosamente fornecidos pela Hilti, S&P e SECIL e TSwaterjet pelo corte dos laminados utilizando a tecnologia de jacto de água.

REFERENCIAS

- [1] BANK, L.C. - Mechanically Fastened FRP (MF-FRP) Strips for Strengthening RC Structures – A Viable Alternative, Proceedings of CICE 2004, 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 2004, December 8-10, Adelaide, Australia, 12 pp.
- [2] ELSAYED, W. [et al.] - Mechanically Fastened FRP-Strengthened Two-Way Concrete Slabs with and without Cutouts, Journal of Composites for Construction, 2009a, 13(3), 198-207.
- [3] ELSAYED, W. [et al.] - Studies on Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Polymer Strengthening Systems, ACI Structural Journal, 2009b, 106(1), 49-59.
- [4] MARTIN, J.A.; LAMANNA, A.J. - Performance of Mechanically Fastened FRP Strengthened Concrete Beams in Flexure, Journal of Composites for Construction, 2008, 12(3), 257-265.
- [5] BANK, L.C.; ARORA, D. - Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips, Journal of Composite Structures, 2007, 79, 189-191.
- [6] AIDOO, J. [et al.] - Full-Scale Experimental Investigation of Repair of Reinforced Concrete Interstate Bridge Using CFRP Materials, Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(3), 350-358.
- [7] DEMPASEY, D.D.; SCOTT, D.W. - Wood Members Strengthened with Mechanically Fastened FRP Strips”, Journal of Composites for Construction, 2006, 10(5), 392-398.
- [8] EKENEL, M. [et al.] - Flexural Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Fabric and Precured Laminate Systems, Journal of Composites for Construction, 2006, 10(5), 433-442.
- [9] QUATTLEBAUM, J.B. [et al.] - Comparison of Three Flexural Retrofit Systems under Monotonic and Fatigue Loads, Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(6), 731-740.
- [10] LAMANNA, A.J. [et al.] - Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fasteners and Fiber-Reinforced Polymer Strips, ACI Structural Journal, 2001, 98(3), 368-376.
- [11] LAMANNA, A.J. [et al.] - Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-Reinforced Polymer Strips, Journal of Composites for Construction, 2004, 8(3), 204-209.
- [12] STRONGWELL - SAFSTRIP® - Fiber reinforced strengthening strip - Technical sheet, 2008.
- [13] NP EN 12390-3. 2009, Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [14] LNEC E397-1993. 1993, Concrete – Determination of the elasticity young modulus under compression.
- [15] COELHO, Mário Rui Freitas - Comportamento da ligação de laminados multi-direccionais colados e ancorados ao betão. Universidade do Minho, 2010. 125 p. Tese de Mestrado.
- [16] ISO 527-4. 1997, Plastics - Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fiber-reinforced plastic composites.
- [17] ASTM D 5961/D 5961M-05. 2005, Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.