

LAMINADOS MULTI-DIRECCIONAIS DE CFRP PARA APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL

Sena Cruz, J. ¹; Barros, J. ²; Coelho, M. ³; Fernandes, P. ⁴

¹Professor Auxiliar, ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Universidade do Minho

²Professor Associado, ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Universidade do Minho

³Investigador, ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Universidade do Minho

⁴Investigador, ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Universidade do Minho



RESUMO

Recentemente tem vindo a ser proposta uma nova técnica de reforço utilizando polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) na reabilitação estrutural de estruturas de betão, que consiste na aplicação de laminados multi-direccionais de CFRP (MDL-CFRP). Estes laminados são simultaneamente colados e fixados mecanicamente através de ancoragens. Neste contexto, foi desenvolvido um MDL-CFRP e, para avaliar as suas potencialidades no reforço de estruturas de betão foram realizados ensaios de arranque directo. O presente trabalho descreve os ensaios realizados e analisa os principais resultados obtidos.

1 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem vindo a verificar-se um crescimento sustentado na utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP's) com vista à reabilitação de estruturas de betão. Estes materiais, quando comparados com os convencionalmente utilizados na construção, nomeadamente o aço, são mais leves, apresentam elevado rácio rigidez/peso e são imunes à corrosão. Adicionalmente, a redução dos seus custos de produção tem contribuído para a crescente procura deste tipo de materiais.

As técnicas mais comuns para aplicação de FRP's são, em geral, baseadas na utilização de laminados unidireccionais de através da: (i) aplicação de mantas (sistemas curados *in situ*) ou laminados (sistemas pré-fabricados) colados externamente sobre a superfície do elemento estrutural a reforçar (EBR – *Externally Bonded*

Reinforcement); (ii) inserção de laminados (ou varões) em ranhuras abertas no betão de recobrimento (NSM – *Near-Surface Mounted*). A ligação entre os FRP's e o betão é normalmente assegurada por adesivos epoxy (ACI, 2008; CNR, 2004).

O desempenho do reforço está fortemente dependente da resistência da camada de betão superficial que, normalmente, é a região mais degradada do betão numa estrutura, devido à sua maior exposição às condições ambientais e, consequentemente, a agentes de deterioração, resultando numa diminuição do seu desempenho mecânico. Como resultado, a rotura precoce do reforço em FRP pode ocorrer e, geralmente, a capacidade mecânica deste não é mobilizada na sua totalidade, principalmente quando se adopta a técnica EBR. Na tentativa de solucionar este

problema, têm sido aplicados alguns complementos às técnicas de reforço anteriormente mencionadas, como sejam a aplicação de sistemas de ancoragem compostos por chapas de aço aparafusadas nas extremidades do reforço, ou o uso de cintas em manta de FRP. Para além da concentração de tensões que este tipo de intervenção localizada introduz nos elementos a reforçar, são necessários trabalhos de preparação diferenciados e morosos que podem comprometer a competitividade destas técnicas.

Recentemente têm surgido algumas propostas de reforço alternativas à técnica EBR com laminados unidireccionais, as quais recorrem a laminados multidireccionais híbridos com fibras de vidro e de carbono apenas ancorados ao betão – MF-FRP (*Mechanically Fastened*, na nomenclatura inglesa). O conceito MF-FRP não é novo, uma vez que a sua génese está associada ao reforço de estruturas de betão armado utilizando chapas de aço. Na técnica MF-FRP os laminados de FRP substituem as chapas de aço.

De acordo com a informação apurada pelos autores, o conceito MF-FRP foi inicialmente explorado na Universidade de Wisconsin sob a supervisão de Lawrence Bank, em 1998 (Bank, 2004). Na última década, mais de 10 trabalhos foram publicados em revistas científicas, abordando algumas aplicações com recurso a esta técnica “reinventada”, por exemplo, em betão armado, madeira e estruturas de alvenaria, e vários benefícios têm sido apontados, nomeadamente, a rápida instalação com ferramentas manuais simples, sem necessidade de recorrer a mão-de-obra especializada, não necessitando da preparação da superfície sendo que, imediatamente após o reforço da estrutura, esta pode ser utilizada (Lamanna et al., 2001; Lamanna et al., 2004; Quattlebaum et al., 2005; Aidoo et al., 2006; Dempsey e Scott, 2006; Ekenel et al., 2006; Bank e Arora, 2007; Martin e Lamanna, 2008; Elsayed et al., 2009; Lee et al., 2009).

Como foi referido anteriormente, a técnica MF-FRP é baseada na utilização de

laminados de FRP e parafusos/ancoragens mecânicas. Em todas as pesquisas efectuadas constatou-se que, em geral, foi utilizado um tipo de laminado designado SAFSTRIP® (Strongwell, 2008). De acordo com a ficha técnica deste, o SAFSTRIP® tem 102 mm de largura e 3.2 mm de espessura, e é fornecido em rolos de comprimento até 30.5 m. O laminado resulta do empilhamento de camadas de fibras de carbono com fibras de vidro. Os materiais são ligados através de uma resina vinylester. Como características mecânicas o SAFSTRIP® apresenta resistência média à tracção, módulo de elasticidade à tracção de 852 MPa e 62.2 GPa, e resistência ao esmagamento, com e sem pré-esforço, igual a 351 MPa e 214 MPa, respectivamente (Strongwell, 2008). Quando usados pinos, estes são inseridos no betão através de uma pistola de fulminantes designada por *powder actuated fastening* (PAD). Têm sido realizadas várias pesquisas com o objectivo de estudar os efeitos do tipo de elemento de fixação, da anilha, da profundidade de embebimento, do diâmetro, do comprimento e da utilização, ou não, de furos previamente executados.

Da pesquisa bibliográfica realizada verificou-se que, normalmente, as distâncias entre os elementos de fixação variam entre os 45 e os 150 mm, na direcção longitudinal, enquanto na direcção transversal a distância mínima entre os pinos é de 25 mm. A profundidade de embebimento dos elementos de fixação varia entre 25 mm e 50 mm. Segundo Bank (Bank, 2004), devem ser previamente furados o betão e o FRP, com o objectivo de reduzir significativamente o dano na superfície do betão de recobrimento (*spalling*) durante aplicação dos elementos de fixação com recurso ao PAD, e também para aumentar a resistência à tracção e ao corte do FRP.

Vários trabalhos experimentais têm sido conduzidos, com principal enfoque no reforço à flexão de vigas e lajes, sob carregamento monotónico e de fadiga. Em alguns casos, a partir destes ensaios foi

obtido um aumento de cerca de 40% de resistência, quando comparada com a estrutura de referência. Além disso é referida a ocorrência de um modo de rotura mais dúctil para a estrutura reforçada com recurso a esta técnica.

Neste trabalho é estudada a técnica MF-EBR (*Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*) baseada nas técnicas EBR e MF-FRP. A técnica MF-EBR procura explorar os pontos fortes das técnicas MF-FRP e EBR. Desta forma a ligação FRP-betão resulta da combinação de um sistema de ancoragens proveniente da técnica MF-FRP e da colagem do laminado à superfície do betão, decorrente da técnica EBR. Adicionalmente, é aplicado pré-esforço em todas as ancoragens.

Esta técnica de reforço utiliza um tipo de laminado multi-direccional constituído exclusivamente por fibras de carbono (MDL-CFRP), com elevada resistência à tracção longitudinal, módulo de elasticidade e resistência ao esmagamento. Neste artigo apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios realizados para caracterização do MDL-CFRP desenvolvido e também o programa experimental definido para avaliação do comportamento da ligação entre estes laminados multi-direccionais e o betão.

2 - LAMINADO MULTIDIRECCIONAL DE CFRP

No âmbito da construção aeronáutica, a utilização de laminados multi-direccionais de CFRP ancorados/ aparafusados não é nova. Um dos primeiros trabalhos realizados nesta área foi o trabalho de investigação desenvolvido por Collings (1977), onde foi avaliada a influência do diâmetro do furo, da distância ao bordo e largura do provete no comportamento da ligação. Além disso, também foi analisada a influência da pressão lateral devido ao momento de aperto aplicado nos parafusos na resistência ao esmagamento. De acordo com a informação apurada pelos autores, no contexto da aplicação em Engenharia Civil, a utilização de laminados multi-direccionais de CFRP é reduzida. Por conseguinte, com

o objectivo de estudar o uso de laminados multi-direccionais de CFRP (MDL-CFRP) no reforço e reabilitação de estruturas, foi desenvolvido um MDL-CFRP, devendo este apresentar elevadas propriedades mecânicas na direcção longitudinal e uma resistência ao esmagamento aceitável, que o mantenha competitivo. Assim, o MDL-CFRP desenvolvido é constituído por um laminado pré-fabricado unidireccional de carbono/epoxy com a designação comercial CFK® 150/2000 (CFK). A direcção principal das fibras do laminado CFK coincide com a direcção da carga aplicada. Em cada face deste laminado foi aplicada uma camada de um pré-impregnado unidireccional de carbono/epoxy com as fibras orientadas a $\pm 45^\circ$ em relação à orientação das fibras do CFK (ver Figura 1(a)). Este material pré-impregnado tem a designação comercial TEXIPREG® HS 160 REM (HS).

De acordo com o fabricante, o CFK tem espessura de 1.4 mm, resistência à tracção e módulo de elasticidade de 2000 MPa e 165 GPa, respectivamente. O HS tem 0.15 mm de espessura, resistência à tracção de 1700 MPa e módulo de elasticidade longitudinal de 150 GPa. Para a produção do MDL-CFRP foi utilizada uma máquina de autoclave, estando a sequência de empilhamento dos seus elementos representada na Figura 1(b).

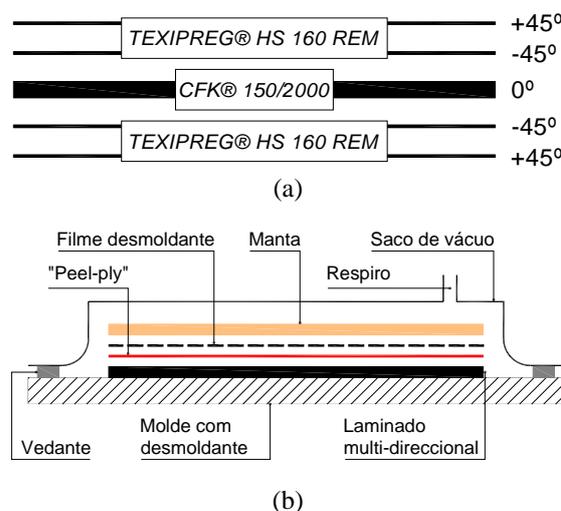


Fig 1: (a) Sequência de empilhamento e materiais utilizados (secção transversal) (b) Setup utilizado na produção do MDL-CFRP.

O processo de cura em autoclave compreendeu as seguintes etapas:

- Aplicação de uma pressão de 2 bar;
- Aquecimento à taxa de 3° C/min até 140° C;
- Patamar de 2 horas a 140° C com 2 bar de pressão;
- Arrefecimento à taxa de 3° C/min até à temperatura de laboratório (cerca de 22° C).

Após a produção, o MDL-CFRP foi caracterizado geometricamente e mecanicamente, de forma semelhante ao efectuado para os materiais CFK e HS.

O MDL-CFRP ficou com uma espessura de 2.07 mm (sendo 68% do seu volume composto por CFK). A caracterização mecânica envolveu a determinação das propriedades à tracção e ao esmagamento, de acordo com as normas ISO 527-4 (1997) e ASTM D5961/ D5961M-05 (2005), respectivamente. Estas propriedades foram avaliadas apenas na direcção principal, ou seja, 0° (direcção de orientação das fibras do CFK), por intermédio de ensaios realizados num sistema servo-controlado dispondo de *clip-gauge* para a determinação rigorosa das extensões. O programa de ensaios incluiu a determinação do módulo de elasticidade longitudinal (E_f), da tensão máxima (f_{fmax}) e correspondente extensão

Na Tabela 1 apresentam-se os valores médios e respectivos coeficientes de variação, entre parênteses, obtidos nos ensaios de tracção, sendo de salientar os valores relativamente pequenos dos coeficientes de variação para os materiais ensaiados. Sendo F_{MDL} , F_{CFK} e F_{HS} a força máxima que o MDL-CFRP, o CFK e o HS

podem sustentar, respectivamente, pode-se observar que $F_{CFK} + F_{HS} = 88\% F_{MDL}$, o que significa que o produto final tem um desempenho superior quando comparado com a soma da contribuição de cada um dos constituintes do MDL-CFRP. Da observação dos modos de rotura, foi possível obter, qualitativamente, idêntica conclusão. De facto, o CFK apresentou sempre uma rotura explosiva das fibras, preponderantemente localizada a meio vão do provete. Já no MDL-CFRP, a rotura das fibras de CFK não foi explosiva.

Foram realizados dois tipos de ensaios de esmagamento distintos com o laminado MDL-CFRP: um sem aplicação de pré-esforço nos parafusos (T0) e outro com aplicação de pré-esforço (T20), em resultado da aplicação de um momento de aperto 20 N×m (ver Figura 2). Para avaliar a resistência ao esmagamento utilizam-se parafusos de 10 mm de diâmetro (M10) inseridos em furos com o mesmo diâmetro. Para os casos em que foi aplicado o pré-esforço utilizaram-se anilhas de aba larga DIN 9021. Nas séries de provetes sem e com pré-esforço, T0 e T20, a resistência ao esmagamento obtida foi de 365.4 MPa com um coeficiente de variação (CoV) de 11.8% e 604.4 MPa (CoV=5.8%), respectivamente. A Figura 3(a) apresenta os resultados dos ensaios de esmagamento, em que as curvas representadas traduzem a relação entre a força aplicada e o deslocamento medido (Figura 2) para a série T0 (provetes MDL_BS_1 a MDL_BS_3), e para a série T20 (provetes MDL_BS_4 a MDL_BS_6). Os modos de rotura típicos podem ser observados nas Figuras 3(b) e 3(c) para as séries T0 e T20, respectivamente

Tabela 1: Resultados da caracterização mecânica em termos de propriedades à tracção (valores médios).

Material	f_{fmax} [MPa]	ϵ_{fmax} [%]	E_f [GPa]
CFK	2434.6 (5.3%)	1.50 (4.7%)	157.9 (3.9%)
HS	128.5 (5.1%)	1.04 (4.0%)	9.08 (7.2%)
MDL-CFRP	1866.2 (5.2%)	1.58 (5.1%)	118.1 (2.8%)

Nota: os valores dentro de parênteses correspondem aos respectivos coeficientes de variação.

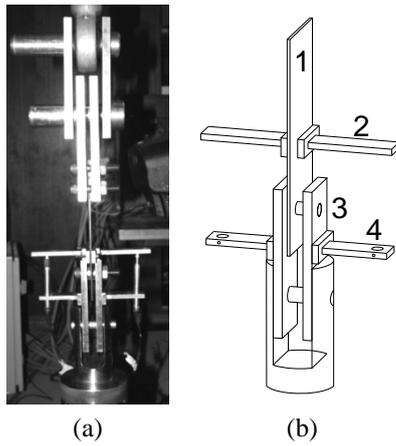


Fig 2: (a) Fotografia do ensaio de esmagamento realizado; (b) Setup do ensaio : 1 – laminado; 2 – batentes dos LVDTs; 3 – Parafuso M10; 4 – Peças que suportam os LVDTs.

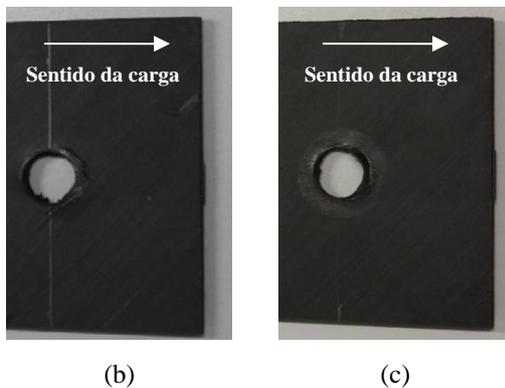
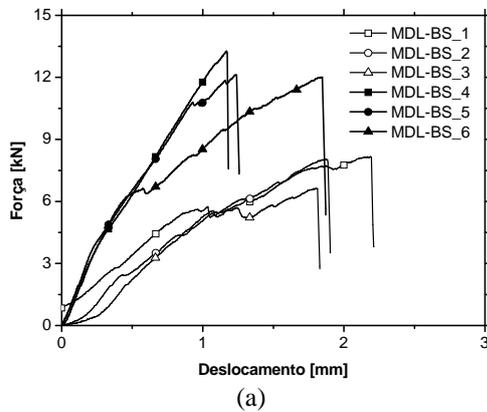


Fig 3: (a) Relação força vs. deslocamento de esmagamento; (b) modo de rotura típico na série T0; (c) modo de rotura típico na série T20.

Na Figura 3(a) pode observar-se um comportamento distinto para a série sem pré-esforço (T0) e com pré-esforço (T20), verificando-se um aumento de rigidez e de resistência ao esmagamento em resultado da aplicação do pré-esforço. Em todos os ensaios efectuados, observou-se um modo de rotura misto *shear-out + bearing* (ver

Figuras 3(b) e (c)). Contudo, o início do modo de rotura *shear-out* acontece quando a força aplicada é próxima da capacidade máxima ao esmagamento. Para a série com aplicação de pré-esforço (T20), a zona onde ocorre o corte/esmagamento é mais larga quando comparada com a da série T0, facto este que contribuiu para o melhor desempenho da série de provetes com pré-esforço (ver Figuras 3(b) e (c)).

3 - ENSAIOS DE ARRANQUE

3.1 - Programa experimental

Com o objectivo de estudar o comportamento da ligação entre o MDL-CFRP e o betão utilizando a técnica MF-EBR, realizaram-se ensaios de arrancamento directo. No âmbito deste trabalho, os principais parâmetros analisados foram a disposição das ancoragens e o nível de pré-esforço aplicado nestas, bem como a técnica de reforço a aplicar. A Tabela 2 descreve o programa experimental realizado. Foram utilizados provetes cúbicos de betão com 200 mm de lado reforçados de acordo com as técnicas EBR e MF-EBR (ver Figura 4). As ancoragens adoptadas tinham um diâmetro de 10 mm (varões roscados M10 de classe 5.8). Foi adoptado um comprimento de ligação constante de 200 mm para todos os provetes. Os ensaios foram realizados com um sistema servo-controlado, sob controlo de deslocamentos à velocidade de 1 $\mu\text{m/s}$, tendo para tal sido utilizado um transdutor de deslocamento acoplado ao actuador. A força aplicada ao longo do ensaio foi registada por uma célula de carga de 300 kN. Em cada provete foi medido o deslocamento relativo entre o laminado e o betão (deslizamento), quer na zona solicitada (LVDT1) quer na extremidade livre do FRP (LVDT2) (ver Figura 4).

Adicionalmente, nas séries MF1 e MF2, com uma e duas ancoragens, respectivamente, também foram registados os deslocamentos relativos nas secções do laminado ao nível dos pontos de ancoragem (LVDT3 e LVDT4). Para os casos em que se usou ancoragens com pré-esforço foi aplicado um momento de aperto de 20 N×m.

Tabela 2: Programa experimental do ensaio de arranque.

Designação	Técnica de reforço	Número de ancoragens	Momento de aperto [N×m]	Número de provetes
EBR	EBR	0	-	2
MF1-T0	MF-EBR	1	0	3
MF1-T20		1	20	3
MF2-T0		2	0	1
MF2-T20		2	20	1

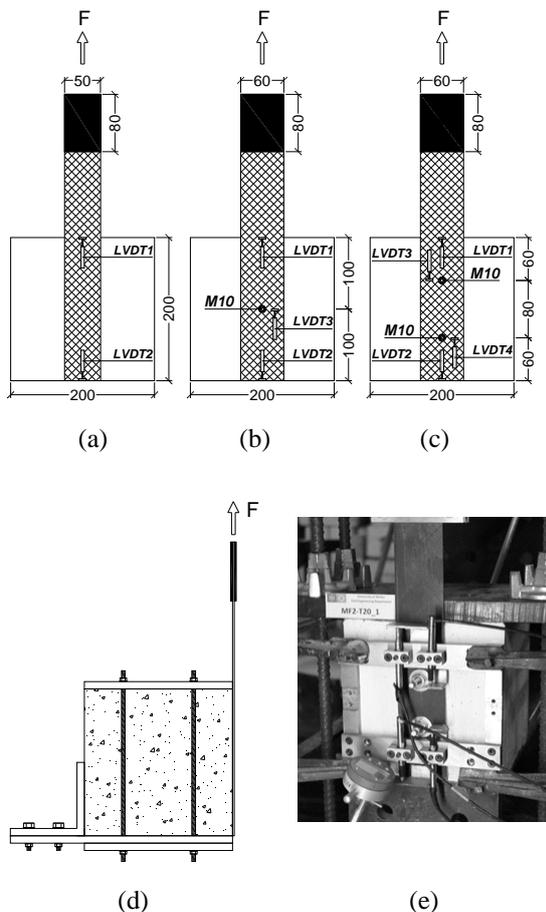


Fig 4: Configuração do ensaio de arranque: (a) série EBR ; (b) série MF1; (c) série MF2; (d) sistema de suporte dos provetes (vista lateral); (e) foto do provete MF2-T20. Nota: todas as dimensões estão em [mm].

3.2 - Caracterização dos materiais

Os provetes eram constituídos por um betão da classe de resistência C20/25. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade foram avaliados aos 28 dias de idade do betão de acordo com as indicações da norma NP EN 12390-3:2009 (2009) e

especificação LNEC E397-1993 (1993), respectivamente. Os ensaios de caracterização do betão à compressão revelaram valores médios de 28.4 MPa (CoV=5.6%), e 29.8 GPa (CoV=1.0%) para a resistência à compressão e módulo de elasticidade, respectivamente. Na data dos ensaios de arranque, a resistência à compressão foi estimada com base nas expressões (3.1) e (3.2) da EN 1992-1-1:2004 (2004), tendo-se obtido o valor de 32.8 MPa.

A colagem dos laminados aos provetes de betão foi efectuada com recurso a um adesivo epoxy, com a designação comercial “S&P Resin 220 epoxy adhesive®”. De acordo com a ficha técnica do fabricante, o valor médio da resistência à tracção em flexão, a resistência à compressão e a tensão de aderência betão/laminado deste adesivo é de igual a 30 MPa, 90 MPa e 3 MPa, respectivamente.

Para ancorar mecanicamente o laminado aos provetes de betão foi utilizado um sistema de ancoragens químicas Hilti®. O sistema de ancoragem era constituído pelo químico HIT-HY 150, varões roscados M10 de classe 5.8 e anilhas de aba larga DIN 9.021. De acordo com a ficha técnica do fabricante, este sistema de ancoragem permite aplicar um momento de aperto máximo de 28 N×m (valor característico).

3.3 - Preparação dos provetes

Após a cura dos provetes de betão foram executados os seguintes principais procedimentos para a preparação e reforço dos provetes:

- i. Marcação e realização dos furos com uma broca de 12 mm de diâmetro até uma profundidade de 100 mm medida a partir da superfície do betão. Os furos foram limpos com recurso a ar comprimido e escova de aço;
- ii. Os furos foram preenchidos com o adesivo químico Hilti® de acordo com a dosagem definida pelo fornecedor do mesmo. Em seguida os parafusos foram inseridos nos furos até uma profundidade de 100 mm;
- iii. Tratamento da zona de colagem com recurso a um martelo de agulhas de modo a criar uma superfície rugosa e melhorar a aderência. Efectuou-se depois a limpeza da superfície com ar comprimido;
- iv. Marcação do furo com 10 mm de diâmetro no MDL, em função da posição final do furo no betão. A furação do MDL foi realizada com broca simples. Após inspecção visual verificou-se que os furos não causaram dano no MDL;
- v. Os laminados foram limpos com acetona;
- vi. Aplicação do adesivo epoxy na área tratada da superfície do betão e na superfície do laminado que ficaria em contacto com o betão;
- vii. Colocação do MDL na zona de colagem com aplicação de uma pressão manual de modo a que este ficasse nivelado, criando uma espessura uniforme de 1 a 2 mm (camada de epoxy);
- viii. O adesivo em excesso foi removido e foram limpos os parafusos para não dificultar a etapa seguinte;
- ix. Para a série de provetes T20, o pré-esforço foi aplicado em duas fases: um dia antes da realização do respectivo ensaio foi aplicado um primeiro aperto de 20 N×m às ancoragens; no dia do ensaio foi dado um segundo aperto com o mesmo valor. Para tal recorreu-se a uma chave dinamométrica com amplitude de 10 a 110 N×m.

Para todos os provetes a preparação do adesivo epoxy seguiu as recomendações presentes na ficha técnica do produto.

Para o caso do reforço com a técnica EBR, das etapas acima referidas apenas as iii, v, vi, vii e viii foram executadas.

Os provetes foram mantidos em ambiente de laboratório até serem ensaiados.

3.4 - Resultados

Na Tabela 3 sintetizam-se os principais resultados obtidos a partir dos ensaios de arranque efectuados.

Tabela 3: Principais resultados obtidos no programa de ensaios de arranque.

<i>Provete</i>	F_{max} [kN]	F_r/F_{max} [%]	<i>Modo de rotura</i>
EBR_1	22.88	0.0	D
EBR_2	20.34	0.0	D
MF1-T0_1	26.08	5.8	D+E
MF1-T0_2	23.56	18.1	D+E
MF1-T0_3	28.36	15.9	D+E
MF1-T20_1	28.50	59.8	D+E
MF1-T20_2	27.76	26.8	D+E
MF1-T20_3	23.57	53.6	D+E
MF2-T0	35.76	72.0	D+E
MF2-T20	33.51	85.5	D+E

Notas: F_{max} = força máxima; F_r = força residual (após o pico); *D* = destacamento ao nível da interface betão/epoxy; *E* = esmagamento do MDL-CFRP ao nível da ancoragem.

Assim, para cada provete inclui-se a força máxima obtida, F_{max} , o rácio F_{max}/F_r , sendo F_r a força residual (após o pico), e os modos de rotura. Tal como seria de esperar, a inclusão de ancoragens conduziu a um acréscimo da capacidade de carga do sistema de reforço e também a um aumento significativo da resistência pós-pico. Os acréscimos médios de capacidade resistente, quando comparados com a técnica EBR, são de 20%, 23% e 65% e 55% para o caso das séries MF1_T0, MF1_T20, MF2_T0 e MF2_T20, respectivamente.

Nestes ensaios a aplicação de ancoragens pré-esforçadas conduziu a um acréscimo marginal da resistência. A razão principal para tal pode ser atribuída à dificuldade em controlar, com elevada precisão, o valor do momento de aperto aplicado. Por outro lado, após a conclusão dos ensaios os provetes foram alvo de uma inspeção visual, tendo-se verificado que o adesivo epoxy não ficou uniformemente distribuído.

Na Figura 5 apresenta-se uma resposta típica da relação entre a força de arranque e o deslizamento para o caso das séries MF1_T0 e MF1_T20 até ao pico da carga. De referir, que após o pico de carga observa-se um patamar de carga para correspondente à força residual.

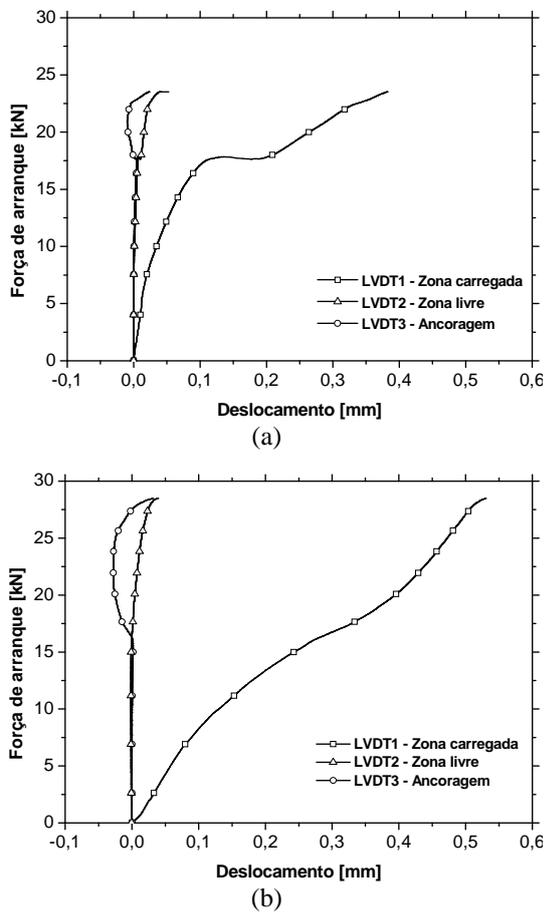


Fig 5: Relação força de arranque vs deslizamento para o provete (a) MF1_T0_2 e (b) MF1_T20_1.

A partir destes gráficos podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- As duas séries apresentam uma resposta não-linear até ao pico. Esse comportamento não-linear é mais

pronunciado para a série sem pré-esforço;

- Enquanto o processo de descolagem não atingiu a zona das ancoragens, os deslizamentos na vizinhança destas e na extremidade livre são marginais;
- Uma vez que o laminado é multi-direccional, foi observado na fase inicial um deslizamento negativo na vizinhança da ancoragem, seguido de um deslizamento positivo.

O modo de rotura verificado para os provetes EBR foi o destacamento ao nível da interface betão-epoxy. O termo destacamento é adoptado para designar a perda de ligação, o que corresponde a uma rotura no interior da camada de adesivo ou apenas em alguns milímetros no interior do betão. Para o caso dos provetes com ancoragens, verificou-se o destacamento da zona colada, seguido de esmagamento no MDL na zona das ancoragens (ver Figura 6).

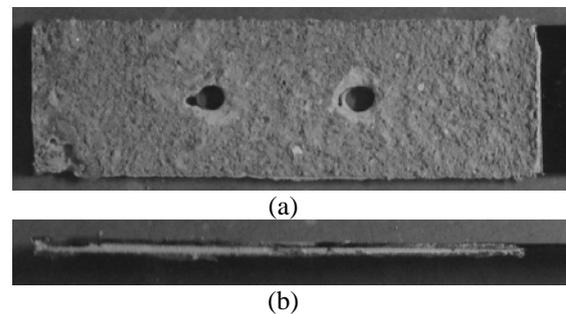


Fig 6: Modo de rotura do provete MF2_T0: (a) vista de frente; (b) vista de lado

4- SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

4.1 - Laminado Multi-direccional de CFRP

Para a simulação dos ensaios à tracção do MDL-CFRP, foi utilizado um modelo constitutivo simples. Para tal foi necessário implementar no FEMIX 4.0 o critério de rotura de Tsai-Wu (Sena-Cruz et al., 2007). No sistema coordenado material (SCM) e para um estado plano de tensão o critério de rotura de Tsai-Wu é definido pela equação:

$$\frac{1}{F_{1t}F_{1c}}\sigma_1^2 + \frac{1}{F_{2t}F_{2c}}\sigma_2^2 + \frac{1}{F_6^2}\tau_{12}^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 + \left(\frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}}\right)\sigma_2 = 1 \quad (1)$$

onde F_{1t} , F_{1c} , F_{2t} , F_{2c} são as resistências elementares do material à tracção (t) e à compressão (c) na direcção da orientação das fibras (1) e na direcção transversal a esta (2), em cada camada, respectivamente; F_6 é a resistência ao corte; no SCM σ_1 e σ_2 , correspondem às tensões normais e τ_{12} à tensão de corte. Na presente comunicação, o valor de f_{12} , foi obtido assumindo a seguinte aproximação (Daniel e Ishai, 1994):

$$f_{12} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{F_{1t}F_{1c}} \cdot \frac{1}{F_{2t}F_{2c}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Os valores adoptados para as propriedades mecânicas requeridas pelo critério de rotura de Tsai Wu encontram-se na Tabela 4, tendo sido determinados com base nos resultados dos ensaios de tracção realizados. Os restantes valores foram obtidos a partir de resultados descritos na bibliografia existente em que foram efectuados ensaios com materiais de características similares (Daniel e Ishai, 1994; Coelho, 2010; Tavares, 2003).

Na simulação numérica foi adoptado um modelo de elementos de casca plana (formulação de Reissner Mindlin), tendo-se utilizado elementos finitos de quatro nós, e integração numérica de Gauss Legendre 2x2 pontos de integração.

Na Figura 1(a) pode observar-se a sequ-

Tabela 4: Parâmetros adoptados na modelação numérica dos ensaios de tracção do MDL-CFRP.

Material	F_{1t} [MPa]	F_{1c} [MPa]	F_{2t} [MPa]	F_{2c} [MPa]	F_6 [MPa]	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	ν_{12} [-]	G_{12} [GPa]
CFK	2435	1440	57	228	71	158	3	0.28	7
HS	2406	697	80	141	43	132	8	0.33	3

sequência de empilhamento das camadas que constituem o MDL que foi adoptada no modelo numérico. A Figura 7 mostra a malha de elementos finitos utilizada na simulação numérica.

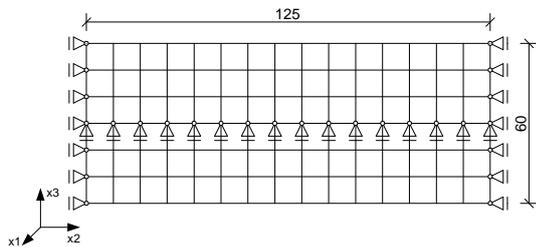


Fig 7: Malha e condições de apoio adoptadas para a simulação dos ensaios de tracção. Nota: todas as dimensões estão em [mm].

Devido à dificuldade em avaliar com rigor as condições reais de apoio dos prove-tes, nomeadamente os “end-tabs”, foi adoptada a simplificação para condições de apoio representada na Figura 7, pelo argumento suplementar dos resultados numéricos serem

apenas comparados com os valores obtidos pelo *clip gauge*, colocado na zona central do prove-te, pelo que as condições de apoio não afectam significativamente as entidades comparadas.

Na Figura 8 compara-se a relação tensão-extensão obtida numérica e experimentalmente. Em termos de resistência à tracção e extensão última foram obtidos boas previsões com um erro de 9% e 3%, respectivamente, quando comparados com os valores médios obtidos nos ensaios experimentais.

4.2 - Ensaios de arranque

Para avaliar o desempenho dos modelos analíticos disponíveis para o cálculo da força de arranque, foi adoptada a recomendação CNR-DT 200/2004 (2004). Para a técnica de reforço EBR a resistência última, em termos de força, pode ser calculado por:

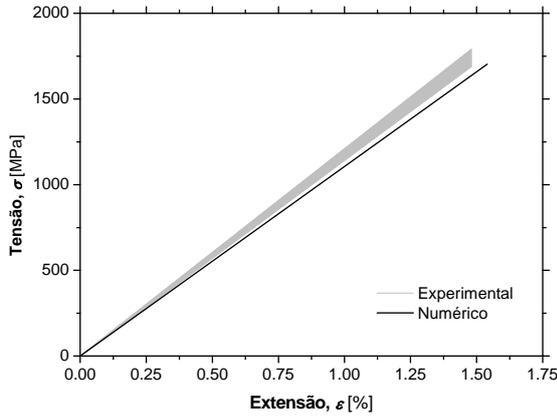


Fig 8: Resultados da simulação numérica do laminado MDL-CFRP.

$$F_{\max,EBR} = f_{fdd,rid} t_f b_f \quad (3)$$

onde t_f e b_f correspondem à espessura e largura do laminado, respectivamente, e a resistência última, $f_{fdd,rid}$, é definida por

$$f_{fdd,rid} = \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{Fk}}{t_f} \cdot \left[\frac{l_b}{l_e} \left(2 - \frac{l_b}{l_e} \right) \right]} \quad (4)$$

em que E_f é o módulo de elasticidade do laminado, l_b é o comprimento de ligação, admitido como sendo menor que o comprimento óptimo de ligação, l_e (CNR, 2004):

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{ctm}}} \quad (5)$$

em que f_{ctm} é o valor médio da resistência à tracção do betão. Na Eq. (4) o valor específico da energia de fractura, Γ_{Fk} , pode ser estimada por (CNR, 2004)

$$\Gamma_{Fk} = 0.03 k_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \quad (6)$$

onde f_{ck} é o valor característico da resistência à compressão do betão. Por último, k_b é um coeficiente geométrico que depende da largura do provete reforçado, b , e da largura do sistema FRP, b_f , ou seja,

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad (7)$$

$$(b_f/b < 0.33 \Rightarrow b_f/b = 0.33)$$

Para o caso da série MF-EBR sem ancoragens pré-esforçadas, é sugerida a seguinte expressão

$$F_{\max,MF-EBR} = f_{fdd,rid} t_f b_f + n_{anc} f_{f,br} t_f D \quad (8)$$

onde n_{anc} , $f_{f,br}$ e D representam o número de ancoragens, a resistência ao esmagamento e o diâmetro do furo, respectivamente.

Foi realizada uma avaliação analítica assumindo que $E_f=118.1$ GPa, $t_f=2.07$ mm, $f_{ck}=20$ MPa, $f_{ctm}=2.2$ MPa, $l_b=200$ mm, $b_f=60$ mm e $b=200$ mm, $n_{anc}=1$ (para as séries MF1), $n_{anc}=2$ (para as séries MF2), $f_{f,br}=365.4$ MPa e $D=10$ mm. A Tabela 5 apresenta os valores médios das resistências obtidas experimentalmente nas séries analisadas (F_{exp}), bem como os resultados obtidos através da previsão analítica (F_{num}) e os correspondentes erros. Por comparação dos resultados numéricos com os experimentais, pode observar-se uma boa estimativa tanto para a série EBR como para a série MF-EBR.

Tabela 5: Previsão analítica dos ensaios de arranque.

Série	F_{exp} [kN]	F_{num} [kN]	Erro [%]
EBR	21.61	20.07	7.1%
MF1-T0	26.00	27.63	6.5%
MF2-T0	35.76	35.20	1.3%

5 - CONCLUSÕES

No presente trabalho é apresentada a técnica de reforço MF-EBR - *Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*, a qual utiliza laminados multi-direccionais de polímeros reforçados com fibras de carbono (MDL-CFRP) simultaneamente ancorados e colados ao betão. Este laminado foi produzido especialmente para o presente trabalho de investigação, sendo composto por um laminado pré-fabricado de fibras de carbono unidireccionais (CFK) com 1.4 mm de espessura, envolvido por quatro camadas de fibras de carbono unidireccionais orientadas a $\pm 45^\circ$, duas em cada face do CFK e simetricamente colocadas em relação a este. Foi realizada uma caracterização geométrica e mecânica do MDL-CFRP. A partir da caracterização

experimental obtiveram-se valores médios de resistência à tracção, extensão última, módulo de elasticidade e resistência ao esmagamento com e sem pré-esforço nos parafusos de 1866 MPa, 1.58%, 118 GPa, 365 MPa e 604 MPa, respectivamente.

Para avaliar o comportamento/desempenho da ligação foram realizados ensaios de arranque directo.

Deste programa experimental foi analisada a influência da localização geométrica das ancoragens e o nível de pré-esforço aplicado nestas, em termos do comportamento da ligação. Para esse efeito foram ensaiadas séries de provetes sem ancoragens (EBR), com uma ancoragem (MF1) e com duas ancoragens (MF2), sem pré-esforço (T0) e com pré-esforço (T20). Quando comparado com a técnica EBR, a utilização de ancoragens conduziu a aumentos de capacidade de carga que variaram entre os 20% (para uma única ancoragem) e os 60% (para duas ancoragens). A aplicação de pré-esforço às ancoragens não conduziu a aumentos significativos da capacidade de carga comparativamente ao uso de ancoragens sem pré-esforço. Contudo, com pré-esforço observou-se um aumento significativo da resistência residual (carga pós-pico). A resposta do sistema em termos de força de arranque *versus* deslizamento é vincadamente não-linear até ao pico. Em todos os provetes ensaiados com ancoragens ocorreu um modo de rotura misto composto por destacamento na interface betão/epoxy e esmagamento do MDL-CFRP.

Os ensaios de tracção realizados com o MDL-CFRP foram simulados numericamente utilizando um software baseado no método dos elementos finitos. Para tal foi implementado um modelo constitutivo no software FEMIX 4.0 para a simulação de FRP's, tendo-se verificado ser possível prever com rigor elevado a resistência à tracção e a extensão última nos laminados ensaiados.

Os resultados experimentais permitiram constatar que o modelo analítico recomendado pela CNR-DT 200/2004 estima com boa precisão a resistência ao

arrancamento para os sistemas EBR. Para permitir a aplicabilidade deste modelo ao sistema MF-EBR foi proposta uma nova equação cuja boa capacidade preditiva foi confirmada.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado pelos programas COMPETE e FEDER, projecto no. PTDC/ECM/74337/ 2006 da FCT. Os autores manifestam os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais, nomeadamente, à Hilti, à S&P, à SECIL e à TSwaterjet, Lda. pelo corte dos laminados usando a tecnologia por corte a jacto de água. As contribuições técnicas do Prof. Pedro Camanho (FEUP), Eng. Célia Novo (INEGI), o Eng. Sérgio Rodrigues e Eng. Jorge Gramaxo (Hilti) são também altamente reconhecidas.

REFERÊNCIAS

- ACI 440.2R-08, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Reported by ACI Committee 440, American Concrete Institute, 80 pp, 2008.
- CNR-DT 200/2004, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*. CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Italy, 154 pp, 2004.
- Bank, L. C., *Mechanically-Fastened FRP (MF-FRP) – A Viable Alternative for Strengthening RC Members*. Proceedings of CICE 2004, Adelaide, Australia, pp. 12, 2004.
- Lamanna, A.J., Bank, L.C., Scott, D.W., *Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fasteners and Fiber-Reinforced Polymer Strips*. ACI Structural Journal, 98(3), 368-376, 2001.
- Lamanna, A.J., Bank, L.C., Scott, D.W., *Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-Reinforced Polymer*

- Strips. *Journal of Composites for Construction*, 8(3), 204-209, 2004.
- Quattlebaum, J.B., Harries, K.A., Petrou, M.F., *Comparison of Three Flexural Retrofit Systems under Monotonic and Fatigue Loads*. *Journal of Bridge Engineering*, 10(6), 731-740, 2005.
- Aidoo, J, Harries, K.A., Petrou, M.F., *Full-Scale Experimental Investigation of Repair of Reinforced Concrete Interstate Bridge Using CFRP Materials*. *Journal of Bridge Engineering*, 11(3), 350-358, 2006.
- Dempsey, D.D., Scott, D.W., *Wood Members Strengthened with Mechanically Fastened FRP Strips*. *Journal of Composites for Construction*, 10(5), 392-398, 2006.
- Ekenel, M., Rizzo, A., Nanny, A., Myer, J.J., *Flexural Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Fabric and Precured Laminate Systems*. *Journal of Composites for Construction*, 10(5), 433-442, 2006.
- Bank, L.C., Arora, D., *Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips*. *Journal of Composite Structures*, 79, 189-191, 2007.
- Martin, J.A., Lamanna, A.J., *Performance of Mechanically Fastened FRP Strengthened Concrete Beams in Flexure*. *Journal of Composites for Construction*, 12(3), 257-265, 2008.
- Elsayed, W., Neale, K., Ebead, U., *Mechanically Fastened FRP-Strengthened Two-Way Concrete Slabs with and without Cutouts*. *Journal of Composites for Construction*, 13(3), 198-207, 2009.
- Elsayed, W., Neale, K., Ebead, U., *Studies on Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Polymer Strengthening Systems*. *ACI Structural Journal*, 106(1), 49-59, 2009.
- Lee, J.H., Lopez, M.M., Bakis, C.E., *Slip effects in reinforced concrete beams with mechanically fastened FRP strip*. *Journal of Cement & Concrete Composites*, 31, 496-504, 2009.
- Strongwell, SAFSTRIP® - *Fiber reinforced strengthening strip*. Technical sheet, 2008.
- Collings, T. A., *The Strength of Bolted Joints in Multi-Directional CFRP Laminates*. *Composites*, 8, 43-54, 1977.
- ISO 527-4, *Plastics – Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*, 1997.
- ASTM D 5961/D 5961M-05, *Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates*, 2005.
- NP EN 12390-3, *Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens*, 2009.
- LNEC E397-1993, *Concrete - Determination of the elasticity young modulus under compression*. Portuguese specification from LNEC, 1993.
- EN 1992-1-1, *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 2004.
- Daniel, M.I.; Ishai, O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, pp. 395, 1994.
- Sena-Cruz, J.M. Barros, J.A.O. Azevedo, A.F.M. Ventura Gouveia, A., *Numerical simulation of the nonlinear behaviour of RC beams strengthened with NSM CFRP strips*. CMNE/CILAMCE 2007, Article nº 485 published in CD – FEUP, Porto, 20 pp, 2007.
- Coelho, M.R.F., *Comportamento da ligação de laminados multi-direccionais colados e ancorados ao betão*. Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 125 pp, 2010.
- Tavares, C.M.L., *Efeito da utilização de insertos metálicos nas características de juntas aparafusadas em compósitos*. Tese de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal, 132 pp, 2003.