

ESTUDO DA LIGAÇÃO ENTRE LAMINADOS MULTI-DIRECCIONAIS E O BETÃO



José Sena-Cruz

Professor Auxiliar
Universidade do Minho
Guimarães
jsena@civil.uminho.pt



Joaquim Barros

Professor Associado
Universidade do Minho
Guimarães
barros@civil.uminho.pt



Mário Coelho

Investigador
Universidade do Minho
Guimarães
mcoelho@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

Na presente comunicação são apresentados os principais resultados obtidos num programa de ensaios de arranque realizados em provetes de betão simples reforçados com MDL-CFRP (laminado multi-direccional de polímeros reforçados com fibras de carbono). O sistema de reforço apresentado inclui como inovações, o tipo de material utilizado e a aplicação deste com recurso a adesivo epoxy e ancoragens metálicas.

Palavras-chave: Laminados multi-direccionais de CFRP; ancoragens; ensaios de arranque.

1. INTRODUÇÃO

O reforço de estruturas de betão com recurso à colagem externa (EBR – *externally bonded reinforcement*) de laminados de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) tem sido essencialmente realizado com recurso a laminados unidireccionais. No entanto, devido ao facto da camada de betão superficial dos elementos a reforçar apresentar menores características mecânicas, como consequência, em parte, da sua exposição a agentes de deterioração, a sua desintegração é a rotura mais frequente. Assim, o desempenho do reforço está dependente do comportamento do betão superficial, pelo que, de forma geral, a

elevada capacidade mecânica dos CFRP's não é mobilizada em plenitude, exigindo a adopção de factores que, no quadro do projecto destes sistemas de reforço, reduzem significativamente a extensão última a ser adoptada no seu dimensionamento.

Na tentativa de contrariar a rotura precoce dos reforços com FRP's têm sido aplicados alguns complementos às técnicas anteriormente referidas, como sejam a aplicação, nas extremidades do reforço, de chapas metálicas aparafusadas, ou cintas com manta de FRP. Esta intervenção localizada exige trabalhos de preparação diferenciados e morosos que podem comprometer a sua viabilidade em determinadas aplicações.

Mais recentemente têm surgido algumas propostas de reforço alternativas à técnica EBR com laminados unidireccionais, as quais recorrem a laminados multi-direccionais híbridos com fibras de vidro e de carbono apenas ancorados ao betão – MF, *Mechanically Fastened* [1;2]. O projecto de investigação, no qual este trabalho se insere, inclui dois aspectos inovadores, um relacionado com o facto da ligação FRP/betão ser assegurada, simultaneamente, por adesivo e ancoragens, e o outro, pelo motivo de ser utilizado um novo tipo de laminado multi-direccional constituído exclusivamente por fibras de carbono, o qual tem propriedades mecânicas superiores às dos laminados multi-direccionais existentes actualmente.

Neste trabalho descrevem-se os ensaios realizados com vista à caracterização mecânica dos laminados multi-direccionais de CFRP e os ensaios usados para avaliar o comportamento da ligação entre estes laminados e o betão. Os principais resultados obtidos são analisados e a principais conclusões obtidas são apresentadas.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

No contexto do presente trabalho, os principais parâmetros analisados foram a técnica de reforço utilizada, a configuração geométrica das ancoragens e o nível de pré-esforço aplicado nestas. No Quadro 1 apresenta-se o programa de ensaios realizado. Foram utilizados provetes cúbicos de betão com 200 mm de lado reforçados de acordo com a técnica EBR e segundo a técnica EBR+MF (ver Fig. 1). Nas séries MF1 apenas se utilizou uma ancoragem, enquanto que nas séries MF2 utilizaram-se duas. As ancoragens usadas têm 10 mm de diâmetro (M10). O comprimento de ligação (laminado/betão) foi mantido constante e igual 200 mm em todos os provetes.

Quadro 1. Programa experimental.

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

Os ensaios foram realizados à velocidade de deformação de $1 \mu\text{m/s}$ num equipamento dotado de um servo-actuador ao qual foi acoplado um transdutor de deslocamento (LVDT) com o qual foi realizado o controlo do ensaio. Para além da força medida pela célula de carga de 300 kN, a aquisição efectuada durante o ensaio consistiu no registo dos deslocamentos relativos (deslizamento) entre o betão e o MDL-CFRP por intermédio de dois LVDT colocados no início da zona carregada (LVDT1) e livre (LVDT2) da ligação (ver Fig. 1). Adicionalmente, nas séries MF1 e MF2 foi registado o deslizamento na zona das ancoragens através da colocação de mais transdutores (Fig. 1b,c). Nos casos em que as ancoragens eram pré-esforçadas foi aplicado um momento de aperto de $20 \text{ N}\times\text{m}$.

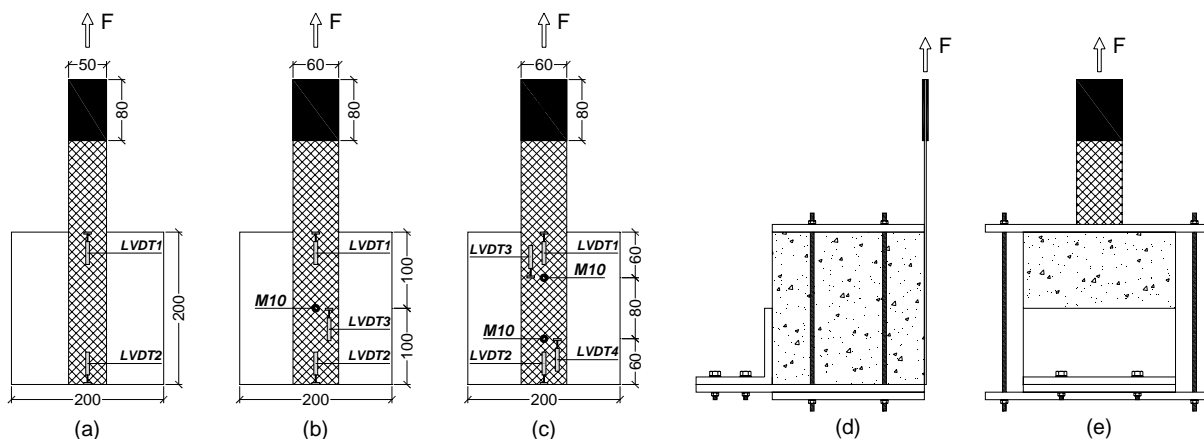


Figura 1. (a) Série EBR; (b) Série MF1; (c) Série MF2; (d) Configuração de suporte (vista lateral); (e) Configuração de suporte (vista posterior).

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os laminados de MDL-CFRP usados neste trabalho foram dimensionados e produzidos no âmbito de um projecto de investigação cujo objectivo é explorar a possibilidade de os usar no reforço estrutural. O MDL-CFRP é constituído por uma camada de laminado unidireccional de CFRP do tipo CFK[®] 150/2000 (CFK). Esta camada foi disposta de modo a que a orientação das fibras coincidisse com a direcção de carregamento. Em cada face do CFK foram aplicadas duas camadas de pré-impregnado unidireccional de CFRP do tipo TEXIPREG[®] HS160REM (HS), a $\pm 45^\circ$ com a direcção do carregamento (ver Fig. 2a). De acordo com o fabricante, o CFK tem 1.4 mm de espessura, 2000 MPa de resistência à tracção e 165 GPa, de módulo de elasticidade. O HS tem 0.15 mm de espessura, 1700 MPa de resistência à tracção e 150 GPa, de módulo de elasticidade. A produção do MDL-CFRP foi realizada com recurso a autoclave, cujo *setup* se apresenta na Fig. 2 (b).

Após produzido, foi realizada a caracterização geométrica e mecânica do MDL-CFRP. Este tem 2.07 mm de espessura (69% deste valor em CFK). A caracterização mecânica consistiu na realização de ensaios de determinação das propriedades deste em tracção e flexão, bem como da sua resistência ao esmagamento, de acordo com as normas ISO 527-4:1997 [3], ASTM D790-03 [4] e ASTM D5961/D5961M-05 [5], respectivamente. Estas propriedades foram avaliadas apenas para a direcção principal (0°). Os resultados obtidos nos ensaios de tracção conduziram a 1866.2 MPa (com um coeficiente de variação, CoV, de 5.1%) para resistência à tracção, 118.1 GPa (com CoV=2.8%) para módulo de elasticidade e 1.58%

(com $CoV=5.1\%$) para extensão última. Dos ensaios de flexão obteve-se uma resistência à tracção em flexão de 865.6 MPa (com $CoV=1.4\%$). Os ensaios de esmagamento foram divididos em ensaios sem (T0) e com (T20) pré-esforço. Nos casos em que havia pré-esforço este foi o que resultou de um momento de aperto de 20 N×m. Usaram-se anilhas M10 de acordo com a DIN9021. Os resultados destes ensaios revelaram uma resistência ao esmagamento de 316.4 MPa (com $CoV=11.8\%$) e 604.4 MPa (com $CoV=5.8\%$) para as séries T0 e T20, respectivamente.

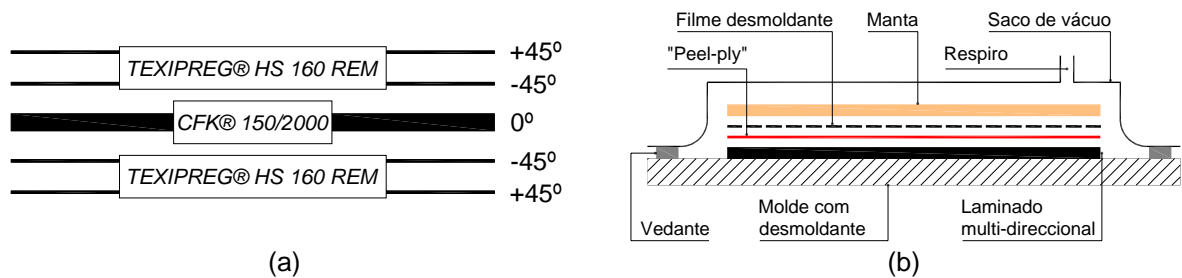


Figura 2. (a) Sequência de empilhamento e materiais usados (secção transversal);
(b) Setup usado na produção dos laminados.

Na Fig. 3 apresentam-se as curvas força *versus* deslocamento para as séries T0 (provetes T0_1 a T0_3) e T20 (provetes T20_1 a T20_3). São também apresentados os modos de rotura típicos de cada série. Pela análise da Fig. 2(a) pode-se constatar a diferença de comportamento entre as duas séries, tanto em termos de rigidez como de resistência última. Apesar de a série T20 ter apresentado uma maior capacidade última, a ductilidade da resposta é, no entanto, menor. Em todos os provetes foi observado um modo de rotura híbrido (corte e esmagamento), como se ilustra nas Figs 3 (b) e (c). Contudo, na série T20 a zona de rotura é maior do que na série T0, justificando assim o melhor comportamento da série pré-esforçada.

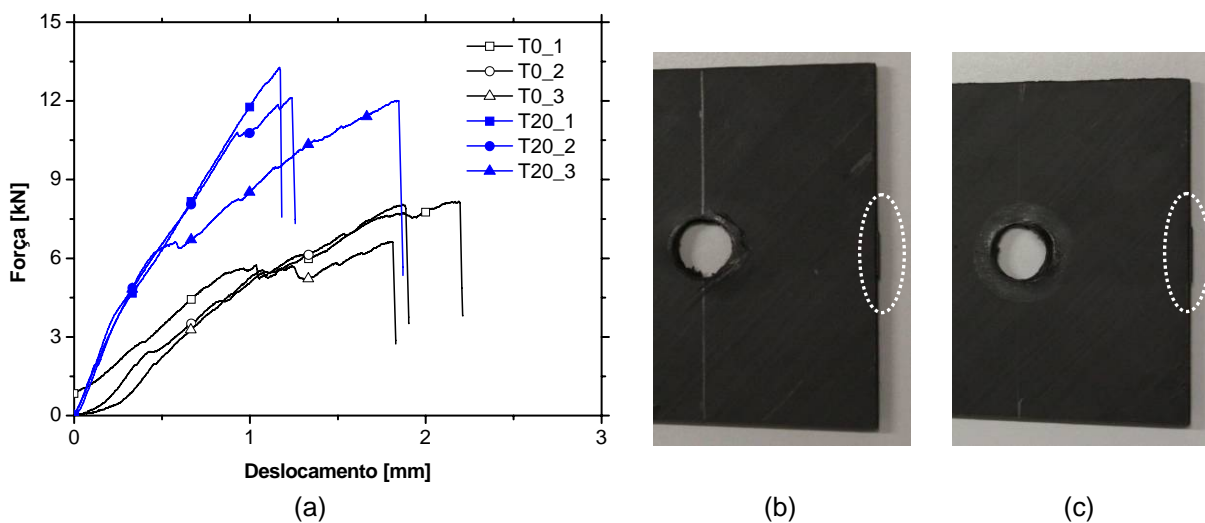


Figura 3: (a) Curva força *versus* deslocamento; (b) Modo de rotura típico na série T0;
(c) Modo de rotura típico na série T20.

No âmbito dos ensaios de arranque directo foi feita a caracterização mecânica do betão utilizado. Assim, aos 28 dias de idade do betão foram determinados a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de acordo com as normas NP EN 12390-3:2009 [6] e LNEC E397-1993 [7], respectivamente, tendo sido obtidos os valores médios de 28.4 MPa (com CoV=5.6%) e 29.8 GPa (com CoV=1.0%), respectivamente. À data da realização dos ensaios de arranque, estimou-se a resistência à compressão do betão de acordo com as expressões (3.1) e (3.2) do Eurocódigo 2 [8], tendo-se obtido o valor de 32.8 MPa. Para efectuar a colagem do MDL-CFRP ao betão foi usado o adesivo epoxy S&P[®] Resin220 Epoxy Adhesive. De acordo com o fabricante este adesivo tem 30 MPa de resistência à tracção em flexão, 90 MPa de resistência à compressão e 3 MPa de tensão máxima de aderência betão/laminado.

A ligação mecânica foi materializada com um sistema de ancoragem química da Hilti[®]. O químico usado foi o HIT-HY 150, os varões roscados M10 são da classe 5.8 e as anilhas DIN9021. De acordo com o fabricante, com este sistema de ancoragem, o máximo valor característico do momento de aperto que pode ser aplicado é 28 N×m.

4. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

A preparação dos provetes envolveu diversas etapas que se descrevem de forma sucinta nos próximos parágrafos.

Numa primeira fase procedeu-se à betonagem dos cubos de betão de 200 mm de aresta. Seguiu-se a preparação das superfícies do betão e dos laminados MDL-CFRP através dos seguintes procedimentos:

1. Nos provetes de betão foi criada uma superfície irregular com recurso a um martelo de agulhas. Efectuou-se depois a limpeza dos provetes com ar comprimido;
2. Nas séries em que foram aplicadas ancoragens, realizaram-se os correspondentes furos nos provetes de betão com recurso a berbequim e broca correntes. A limpeza dos furos foi efectuada com ar comprimido e escova de aço;
3. Todos os laminados foram limpos com acetona;
4. Nas séries com aplicação de ancoragens procedeu-se à furação dos laminados. Esta foi efectuada com uma broca corrente. Da inspecção visual realizada concluiu-se que esta solução de furação não conduziu a danos visíveis nos provetes.

A terceira fase consistiu, para as séries MF1 e MF2, na fixação dos varões roscados em conformidade com as instruções do fabricante, tendo sido cumpridos os tempos de cura indicados (ver Fig. 4a).

Seguiu-se a colagem dos laminados. Para tal, o adesivo epoxy foi preparado e aplicado em correspondência com o indicado na respectiva ficha técnica. Procurou garantir-se que a camada de epoxy tivesse uma espessura entre 1 e 2 mm. Todo o adesivo em excesso foi removido. A realização dos ensaios teve início um mês após a aplicação do adesivo epoxy, garantindo-se assim o tempo de cura exigido (ver Fig. 4b).



Figura 4. (a) Aspecto dos provetes após aplicação das ancoragens; (b) Aspecto dos provetes após aplicação do MDL-CFRP.

Nas séries em que houve necessidade de aplicação de pré-esforço, este foi aplicado em duas fases. Um primeiro aperto ($20 \text{ N}\times\text{m}$) foi efectuado um dia antes da realização do ensaio e um segundo aperto foi dado no dia do ensaio com o mesmo valor de momento de aperto. Para tal recorreu-se a uma chave dinamométrica com amplitude de 10 a $110 \text{ N}\times\text{m}$.

5. RESULTADOS

No Quadro 2 sintetizam-se os principais resultados obtidos a partir dos ensaios efectuados. Assim, para cada provete inclui-se a força máxima obtida, F_{\max} , a força residual (após o deslizamento correspondente a F_{\max}), F_r , e o modo de rotura. A totalidade dos resultados obtidos poderá ser consultada numa outra publicação [9].

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 35%, 39% e 80% para o caso das séries MF1-T0, MF1-T20 e MF2, respectivamente.

A partir destes resultados não é conclusivo que a aplicação de ancoragens pré-esforçadas conduza a maiores valores de resistência máxima, pois em termos médios verifica-se um acréscimo marginal. Tal facto poderá estar associado ao facto de haver alguma dificuldade em controlar, com rigor suficiente, o valor do momento de aperto aplicado. Por outro lado, após a conclusão dos ensaios os provetes foram analisados, tendo-se verificado que a aplicação do adesivo epoxy não foi feita de forma uniforme, o que poderá ter contribuído para uma maior dispersão dos resultados.

A título ilustrativo, na Fig. 5 apresenta-se o modo de rotura típico observado em todos os ensaios efectuados com ancoragens. Da observação dos provetes constatou-se que a rotura ocorre na interface betão/epoxy. Para o caso das séries MF, na vizinhança das ancoragens é possível observar uma cor distinta das restantes zonas (ver Fig. 5a). Trata-se do químico HIT-HY 150 usado nas ancoragens. Refira-se ainda que se observou o esmagamento do laminado junto às zonas de ancoragem.

Quadro 2. Principais resultados obtidos dos ensaios de arranque directo.

Provete	F_{\max} [kN]	F_r / F_{\max} [%]	Modo de rotura
EBR_1	17.6	0.0	D
EBR_2	20.8	0.0	D
MF1-T0_1	26.1	5.8	D+B
MF1-T0_2	23.6	18.1	D+B
MF1-T0_3	28.4	15.9	D+B
MF1-T20_1	28.5	59.8	D+B
MF1-T20_2	27.8	26.8	D+B
MF1-T20_3	23.6	53.6	D+B
MF2-T0	35.8	72.0	D+B
MF2-T20	33.5	85.5	D+B

Notas: F_{\max} = máxima força de arranque; F_r = força residual (pós-pico); D = destacamento ao nível da interface betão/epoxy; D+B = destacamento ao nível da interface betão/epoxy + esmagamento do laminado ao nível da ancoragem.

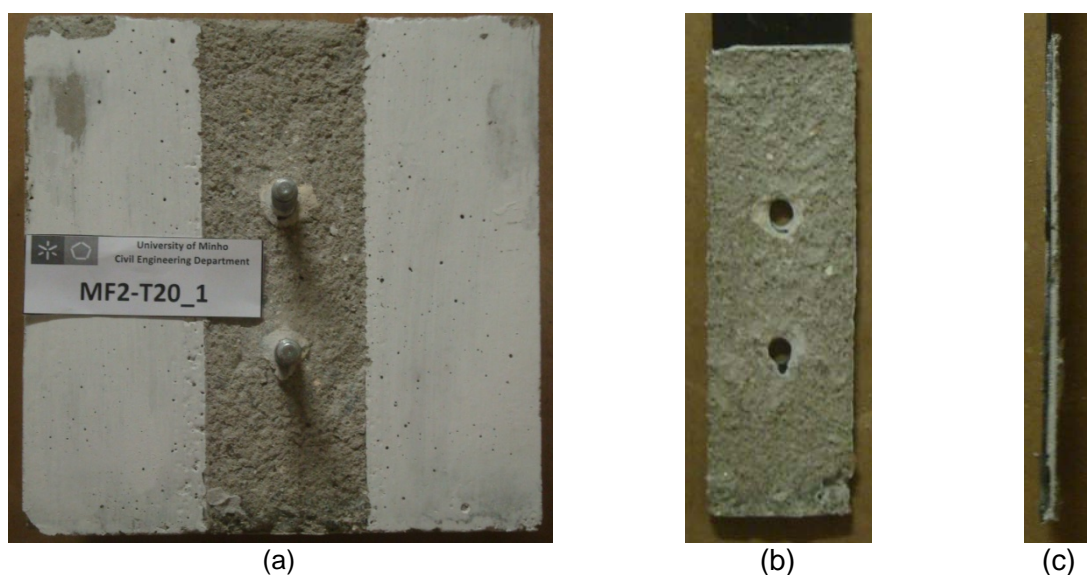


Figura 5. Modo de rotura ocorrido no provete MF2-T20: (a) provete de betão; (b) laminado MDL-CFRP – vista de frente; (c) laminado MDL-CFRP – vista de lado.

Na Fig. 6 apresenta-se a resposta típica em termos de força de arranque *versus* deslizamento ($F-s$) para as séries MF1-T0 e MF1-T20. Da análise das curvas podem-se retirar as seguintes conclusões:

- Em ambos os casos a resposta é iminentemente não linear até ao pico, sendo mais acentuada esta não linearidade na série MF1-T0;
- O deslizamento nas zonas livre e da ancoragem é residual até ao instante em que o destacamento progressivo atinge a ancoragem;
- Como o laminado é multi-direccional, observa-se um deslizamento “negativo” na zona da ancoragem numa fase inicial, seguindo depois no sentido positivo;

- Comparando as respostas das séries MF1-T0 e MF1-T20, verifica-se que a última série apresenta uma resposta mais “suave”, devido à existência do pré-esforço.

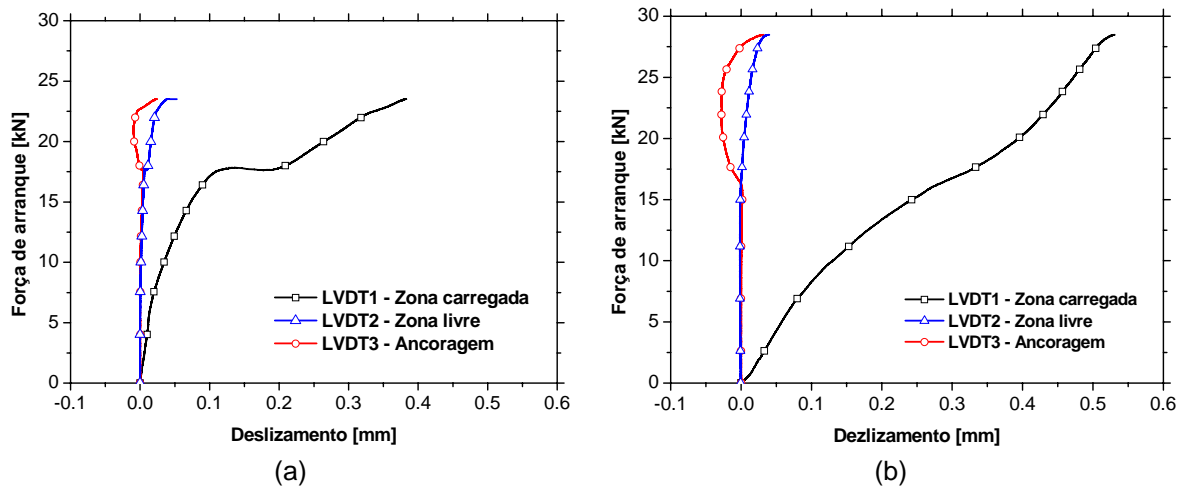


Figura 6. Curvas F-s tipo: (a) MF1-T0_2; (b) MF1-T20_1.

No que respeita à série MF2, em que foram utilizadas duas ancoragens, observou-se que para esta configuração ocorre, para além do aumento da capacidade de carga, um deslizamento no início da zona carregada com variações consideráveis. Tal comportamento poderá ser devido a singularidades provocadas pelas ancoragens, bem como ao facto do laminado MDL-CFRP ser constituído por diferentes camadas e direcções, com eventuais distintas deformações.

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho apresentaram-se os principais aspectos associados ao programa experimental desenvolvido. Este teve como principal objectivo o estudo da ligação entre laminados multi-direccionais de CFRP ancorados e o betão. Procurou estudar-se a influência da disposição e do nível de pré-esforço aplicado na ancoragem.

De uma forma geral poder-se-á dizer que, quando comparada com a técnica EBR, a utilização de ancoragens conduz a aumentos significativos da capacidade resistente que variam entre os 35% (para uma única ancoragem) e os 80% (para duas ancoragens). A aplicação de pré-esforço às ancoragens não conduziu a aumentos significativos de carga comparativamente ao uso de ancoragens sem pré-esforço. Contudo, com pré-esforço observou-se um aumento significativo da resistência pós-pico.

A resposta do sistema de reforço em termos de curvas força de arranque *versus* deslizamento, $F-s$, é vincadamente marcada pela existência de ancoragens, observando-se aquando da entrada em serviço destas um ligeiro patamar nas curvas $F-s$. Tal patamar é muito menos expressivo nos casos em que a ancoragem é pré-esforçada.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho expressam nesta secção o agradecimento às seguintes pessoas e empresas:

- À Empresa Hilti Portugal Produtos e Serviços, Lda. pelo fornecimento dos sistemas de ancoragem e aos Engs. Sérgio Rodrigues e Jorge Gramaxo pela assistência técnica fornecida;
- À Eng.^a Célia Novo, responsável de produção da Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas do INEGI a especial atenção dada ao presente projecto de investigação;
- À Empresa S&P pelo fornecimento dos laminados unidireccionais e do adesivo epoxy;
- À TSwaterjet, Lda. pela realização do corte dos provetes de MDL-CFRP a jacto de água;
- À SECIL pelo fornecimento do betão utilizado no fabrico dos provetes.

Por último refere-se que o presente trabalho é financiado pelo programa PIDDAC, projecto no. PTDC/ECM/74337/ 2006 da FCT.

REFERÊNCIAS

- [1] Bank, L. e Arora, D. – “Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips”, *Composite Structures*, 2007, 79, p. 180–191.
- [2] Elsayed, W., Ebead, U., Neale, K. – “Studies on Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Polymer Strengthening Systems”, *ACI Structural Journal*, 2009, 106-206, p. 49-59.
- [3] ISO 527-4:1997 – “Plastics - Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites”, *International Organization for Standardization – ISO*, 1997, 14 pp.
- [4] ASTM D 790-03 – “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”, *American Society for Testing and Materials – ASTM*, 2003, 11 pp.
- [5] ASTM D 5961/D 5961M-05 – “Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates”, *American Society for Testing and Materials – ASTM*, 2005, 26 pp.
- [6] NP EN 12390-3:2009 – “Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes”, *Instituto Português da Qualidade*, 2009, 22 pp.
- [7] LNEC E397-1993 – “Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão”, *Especificação LNEC*, 1993, 2 pp.
- [8] EN 1992-1-1:2004 – “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”, *EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION*, 255 pp.
- [9] Coelho, M. et al. – “Caracterização geométrica e mecânica de laminados multidireccionais”, *Relatório no. 08-DEC/E-33*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2009, 50 pp.