

## APLICAÇÃO DA TÉCNICA DA INSERÇÃO DE LAMINADOS DE CFRP NO REFORÇO AO CORTE DE VIGAS DE BETÃO ARMADO

Dias, S.; Barros, J.

ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho



### RESUMO

*Uma das possibilidades existentes para reforçar ao corte vigas de betão armado usando materiais compósitos é recorrer à técnica que consiste na inserção de laminados de CFRP em finos entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. Esta técnica é designada na literatura internacional por Near Surface Mounted (NSM). Neste trabalho apresenta-se um programa experimental realizado para avaliar o desempenho desta técnica no reforço de vigas T de betão armado que continham uma determinada percentagem de armadura transversal ( $\rho_{sw} = 0.10\%$ ). O desempenho das vigas reforçadas com a técnica NSM foi avaliado comparando o seu comportamento com o de: i) uma viga de referência sem reforço; ii) vigas reforçadas com mantas de CFRP coladas externamente; iii) uma viga em betão armado em que o reforço ao corte foi garantido por um acréscimo de estribos verticais de aço (viga com  $\rho_{sw} = 0.28\%$ ). Além disso, foi avaliada a influência da percentagem e orientação de laminados de CFRP no comportamento de vigas T de betão armado reforçadas ao corte usando a técnica NSM.*

### 1- INTRODUÇÃO

O sucesso de uma determinada técnica de reforço está directamente associado às propriedades dos materiais que utiliza, às questões estéticas relacionadas com a arquitectura das construções e à viabilidade económica, onde devem ser correlacionados aspectos como o preço dos materiais, a simplicidade e a rapidez de execução do reforço, a minimização dos efeitos no normal funcionamento da estrutura na altura da aplicação do reforço e os custos de manutenção após a estrutura reforçada entrar em serviço. Neste contexto, actualmente, é unanimemente aceite que as

técnicas de reforço com compósitos de CFRP proporcionam soluções globalmente tão ou mais eficazes que as técnicas de reforço tradicionais.

Os primeiros estudos efectuados sobre a utilização de materiais compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado dizem respeito à utilização da técnica da colagem externa (o reforço de CFRP é colado nas faces dos elementos a reforçar com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte). Os resultados experimentais da investigação já realizada (Bousselham e Chaallal, 2004) demonstram que a aplicação desta técnica permite aumentar a

capacidade resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado. No entanto, como resultado de um modo de rotura, que tipicamente é caracterizado pelo destacamento prematuro do CFRP, o nível máximo de tensão mobilizado no reforço é, em geral, bastante inferior à resistência última do compósito, o que conduz a um desaproveitamento considerável das elevadas potencialidades do CFRP.

Com o objectivo de aumentar o nível de desempenho do CFRP, quando este é aplicado por forma a ser incrementada a capacidade resistente ao esforço transversal de vigas de betão armado, foi proposta uma técnica de reforço, alternativa à da colagem externa, que se baseia na inserção de laminados de CFRP em finos entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas (Dias e Barros, 2004). Esta técnica é designada na literatura internacional por Near Surface Mounted (NSM). A duplicação da área de colagem (aumento do grau de fixação do CFRP) e a maior protecção do reforço, por estar inserido no betão e não colado externamente, são mais-valias da técnica NSM em relação à técnica EBR (colagem externa).

Neste trabalho apresenta-se o programa experimental realizado para avaliar a influência da percentagem e orientação de laminados de CFRP no comportamento de vigas T de betão armado reforçadas ao corte usando a técnica NSM. Com o objectivo de simular situações próximas dos cenários reais no reforço estrutural, as vigas tinham uma determinada percentagem de estribos de aço ( $\rho_{sw} = 0.10\%$ ). O desempenho da técnica NSM com laminados de CFRP foi avaliado em três vertentes comparando o comportamento das vigas reforçadas usando a técnica NSM com o comportamento: i) da viga de referência sem reforço; ii) de vigas reforçadas usando a técnica EBR (faixas discretas de manta de CFRP unidireccional, em forma de U, coladas externamente); iii) de uma viga em betão armado em que o reforço ao corte foi garantido por um acréscimo de estribos

verticais de aço ( $\rho_{sw} = 0.28\%$ ). Os resultados obtidos são apresentados e analisados em termos do comportamento estrutural das vigas ensaiadas, modos de rotura e desempenho do CFRP.

## 2- PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 - Concepção dos modelos e tipo de ensaio

O programa experimental realizado envolveu a concepção de quinze modelos de vigas de betão armado de secção transversal em T com as dimensões apresentadas na Figura 1. Com o objectivo de circunscrever a zona de rotura das vigas, os ensaios foram efectuados sob três pontos de carga e com vãos de corte diferentes, de acordo com o representado na Figura 1. De forma a evitar que a rotura por corte ocorresse no maior vão de corte foram aí colocados estribos  $\phi 6@75\text{mm}$ . As diferenças entre modelos ficaram restritas ao menor vão de corte  $a$ , concretamente na forma como foi aí garantida a resistência ao esforço transversal (Figuras 1 e 2).

O grupo de modelos ensaiados englobou uma viga sem qualquer reforço ao corte (viga C-R), uma viga com estribos  $\phi 6@300\text{mm}$  (viga 2S-R com  $\rho_{sw} = 0.10\%$ ), uma viga com estribos  $\phi 6@112.5\text{mm}$  (viga 7S-R com  $\rho_{sw} = 0.28\%$ ) e doze vigas com estribos  $\phi 6@300\text{mm}$  e reforçadas ao corte com distintas soluções de CFRP.

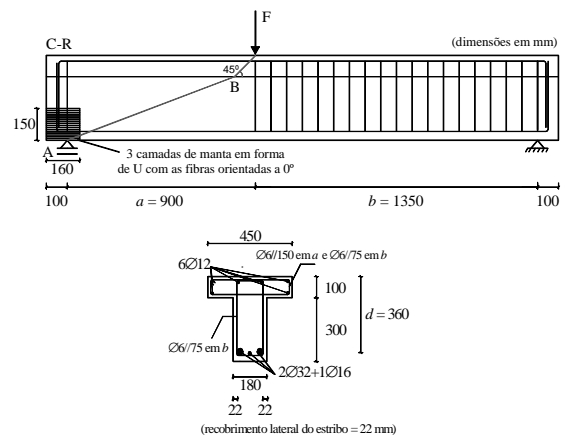


Fig. 1 – Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço presentes em todos os modelos ensaiados.

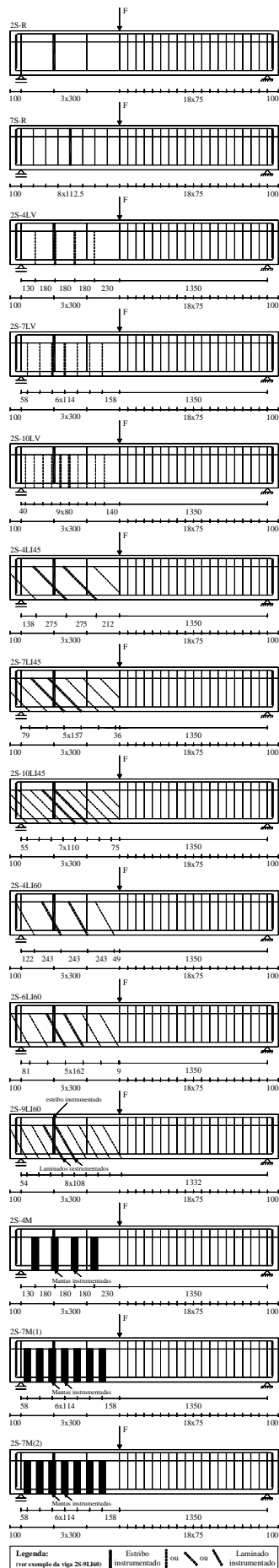


Fig. 2 – Localização dos estribos de aço (traço cheio), laminados (tracejado) e mantas de CFRP.

Das doze vigas com estribos  $\phi 6@300\text{mm}$  ( $\rho_{sw} = 0.10\%$ ) reforçadas ao corte com CFRP, em nove o reforço foi aplicado usando a técnica NSM com laminados de CFRP (foram testadas três percentagens de CFRP ( $\rho_f$ ) e, para cada uma destas, foram analisadas três orientações dos laminados:  $(45^\circ, 60^\circ$  e  $90^\circ)$ ) e nas restantes três o reforço foi aplicado usando a técnica da colagem externa (EBR) com mantas de CFRP. Para cada percentagem testada de laminados de CFRP inseridos foi concebida uma solução de reforço de CFRP colado externamente.

Tal como representado na Figura 1, o betão de recobrimento lateral dos estribos era de 22 mm. Os laminados utilizados tinham uma secção transversal de  $1.4 \times 9.5 \text{ mm}^2$ , enquanto com mantas de CFRP foi adoptada a solução de faixas discretas em forma de U, com as fibras orientadas a  $90^\circ$  relativamente ao eixo da viga, e com dimensões de 0.176 mm de espessura e 60 mm de largura.

O pré-dimensionamento das vigas foi efectuado de forma a terem rotura por corte. A obtenção da quantidade de laminados de CFRP (técnica NSM) referente às vigas com o valor mais elevado de  $\rho_f$ , independentemente da orientação dos laminados, teve como princípio impor que as referidas vigas tivessem uma capacidade de carga máxima semelhante à da viga de betão armado com a maior percentagem de estribos de aço considerada ( $\phi 6@112.5\text{mm}$  no vão de corte  $a$ ). Para tal, foi estabelecido que o funcionamento dos laminados era similar ao dos estribos de aço, mas em vez de se considerar a tensão de cedência da armadura foi adoptada uma tensão no laminado correspondente a uma extensão de 5%. Este valor corresponde a um compromisso entre o valor máximo recomendado pelo Comité Técnico 440 do ACI (2002) para a técnica EBR (4%) e o valor de 5.9% obtido em ensaios de arranque em flexão usando laminados de CFRP aplicados segundo a técnica NSM (Sena-Cruz e Barros, 2004). O resultado do pré-dimensionamento traduziu-se nas seguintes soluções de reforço com CFRP

para o menor vão de corte  $a$ : dez laminados em cada face da viga, para os casos dos reforços dispostos na vertical e com uma inclinação de  $45^\circ$ , e nove laminados em cada face da viga para o caso do reforço inclinado a  $60^\circ$ . Para as três orientações de CFRP analisadas, as soluções de reforço, por face do vão de corte  $a$ , referentes à percentagem mínima e intermédia de CFRP foram as seguintes: quatro laminados para a percentagem mínima de reforço; sete laminados (inclinação de  $90^\circ$  e  $45^\circ$ ) e seis laminados (inclinação de  $60^\circ$ ) para a percentagem intermédia de reforço. Quer para a percentagem mínima como para a percentagem intermédia de CFRP, o espaçamento dos laminados para cada uma das orientações foi obtido por forma a que as respectivas vigas tivessem uma capacidade máxima resistente semelhante.

Tal como foi referido anteriormente, para cada uma das três percentagens de laminados testadas foi concebida uma solução de reforço com faixas de manta de CFRP coladas externamente. O pré-dimensionamento dos reforços referentes à técnica EBR foi efectuado considerando as disposições do Comité Técnico 440 do ACI (2002) e, teve como princípio, a imposição da semelhança entre o valor da capacidade máxima de carga das vigas reforçadas usando a técnica NSM e o valor da capacidade máxima de carga das respectivas vigas reforçadas usando a técnica EBR. As soluções para mantas de CFRP foram as seguintes: quatro faixas de uma camada espaçadas de 180 mm para a menor percentagem de CFRP; sete faixas de uma camada espaçadas de 114 mm para a percentagem intermédia de CFRP; sete faixas de duas camadas espaçadas de 114 mm para a maior percentagem de CFRP.

Na Tabela 1 e nas Figuras 1 e 2 apresentam-se os dados relativos às vigas ensaiadas. Os reforços de CFRP foram distribuídos ao longo da linha AB, representada na Figura 1, tendo o ponto B sido obtido admitindo-se uma degradação da carga a  $45^\circ$ . Para evitar a ocorrência do destacamento do betão de recobrimento no apoio mais solicitado, este canto foi

reforçado localmente com três camadas de manta de CFRP unidireccional, ficando as fibras dispostas segundo a direcção do eixo da viga (ver Figura 1).

Tabela 1 – Soluções de reforço de CFRP testadas.

Viga	Sistema de reforço de CFRP no vão de corte $a$			
	Quantidade	Percentagem (%)	Espaçamento (mm)	Ângulo ( $^\circ$ ) <sup>c</sup>
2S-4LV	2×4 laminados	0.08	180	90
2S-7LV	2×7 laminados	0.13	114	90
2S-10LV	2×10 laminados	0.18	80	90
2S-4LI45	2×4 laminados	0.08	275	45
2S-7LI45	2×7 laminados	0.13	157	45
2S-10LI45	2×10 laminados	0.19	110	45
2S-4LI60	2×4 laminados	0.07	243	60
2S-6LI60	2×6 laminados	0.11	162	60
2S-9LI60	2×9 laminados	0.16	108	60
2S-4M <sup>a</sup>	4 faixas de manta	0.07	180	90
2S-7M(1) <sup>a</sup>	7 faixas de manta	0.10	114	90
2S-7M(2) <sup>b</sup>	7 faixas de manta	0.21	114	90

<sup>a</sup> Cada faixa tem uma camada de manta.

<sup>b</sup> Cada faixa tem duas camadas de manta.

<sup>c</sup> Orientação do CFRP relativamente à direcção do eixo da viga.

As vigas foram submetidas a ensaios de flexão sob três pontos de carga até à sua rotura (Figuras 1 e 2). Os ensaios foram controlados por intermédio de um transdutor de deslocamento (LVDT) colocado na secção de aplicação da carga, tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de 0.01 mm/s.

As extensões nos dois laminados (NSM) e nas duas mantas de CFRP (EBR) com maior probabilidade de serem os mais solicitados pela fenda de rotura de corte foram obtidas por intermédio de extensómetros eléctricos (quatro por CFRP) colados de acordo com o esquema representado na Figura 3. Para avaliar o comportamento da armadura transversal no decorrer da formação da fenda de rotura de corte, o estribo mais próximo do apoio foi instrumentado com três extensómetros eléctricos de acordo com o representado na Figura 3. A localização dos laminados,

mantas e estribos instrumentados nas vigas ensaiadas está representada na Figura 2.

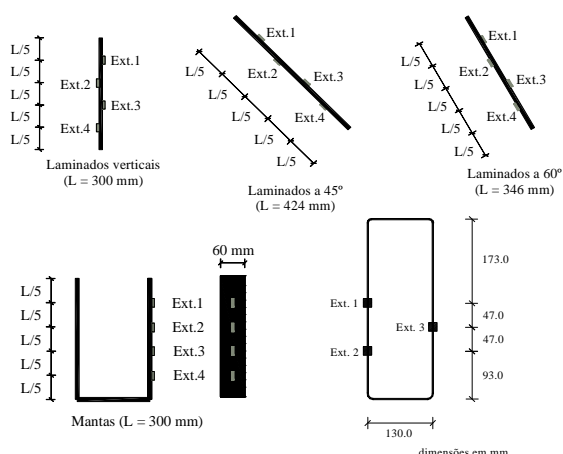


Fig. 3 – Posição dos extensómetros nos laminados, mantas e estribos de aço instrumentados.

## 2.2 - Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão das vigas foi efectuada experimentalmente aos 28 dias e à data da realização dos ensaios das vigas, à qual correspondeu uma idade média de 106 dias. Para tal, de acordo com a norma EN 206-1 (2000) efectuaram-se ensaios de compressão uniaxial sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de varões de aço nervurado de 6 mm, 12 mm, 16 mm e de 32 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção uniaxial efectuados seguindo o estipulado na norma EN 10002-1 (1990).

A caracterização dos laminados de CFRP utilizados (S&P Laminates CFK 150/2000) foi efectuada por intermédio da realização de ensaios de tracção uniaxial, segundo a ISO 527-5 (1997). Para aquisição das extensões no CFRP ao longo do ensaio foram utilizados dois sistemas posicionados a meio do comprimento e da largura do laminado (um em cada face do CFRP): um extensómetro eléctrico e um sensor de fibra óptica. Na Figura 4 apresenta-se o diagrama tensão vs extensão obtido no ensaio de um dos provetes de CFRP onde é possível observar que os resultados obtidos com os dois sistemas de medida de extensões foram semelhantes.

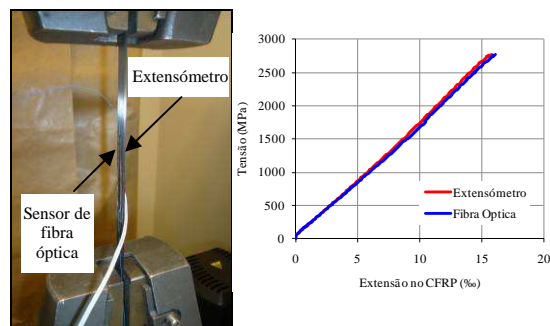


Fig. 4 – Ensaio de tracção uniaxial de um laminado e relação tensão vs extensão no CFRP obtida.

A manta de CFRP unidireccional que foi utilizada para o reforço ao corte usando a técnica da colagem externa, assim como para o reforço do canto inferior das vigas, tinha a designação comercial de S&P C-Sheet 240 - 300 gr/m<sup>2</sup>. As propriedades mecânicas deste material foram avaliadas por Barros *et al.* (2007). Na Tabela 2 estão registados os valores médios, obtidos experimentalmente, das propriedades mecânicas mais significativas do betão, do aço, dos laminados e das mantas de CFRP.

Tabela 2 – Valores das propriedades dos materiais.

Betão	Resistência à compressão do betão				
	$f_{cm} = 31.7$ MPa (28 dias)	$f_{cm} = 39.7$ MPa (aos 106 dias)			
Aço	Tensão (MPa)	φ6	φ12	φ16	φ32
	Cedência	542	453	447	759
	Máxima	594	591	566	902
Laminado de CFRP	Tensão de rotura	Módulo de elasticidade	Extensão máxima		
	2741.7 MPa	170.9 GPa	16.0‰		
Manta de CFRP	Tensão de rotura	Módulo de elasticidade	Extensão máxima		
	2862.9 MPa	218.4 GPa	13.3‰		

No caso da técnica da colagem externa foi efectuada a caracterização da ligação betão-CFRP por intermédio da realização de ensaios de arrancamento por tracção (“pull-off”), de acordo com o representado na Figura 5. Os valores médios da tensão de aderência ( $f_{cm,p}$ ) obtidos foram de 3.5 MPa, 3.2 MPa e 3.1 MPa para as pastilhas coladas, respectivamente, nas vigas 2S-4M, 2S-7M(1) e 2S-7M(2). A média dos referidos valores foi 3.3 MPa, verificando-se ser superior ao valor mínimo recomendável para a aplicação da técnica da colagem externa de compósitos de CFRP no reforço

de estruturas de betão, que deve ser de 1.4 MPa (ACI 440, 2002). Posteriormente à realização dos ensaios de arrancamento, verificou-se que todas as pastilhas continham uma camada de betão, o que permitiu concluir que ~~o modo de~~ a rotura ocorreu por corte-destacamento por corte no betão.



Fig. 5 – Ensaios de pull-off.

### 2.3 - Técnicas de reforço

Os laminados de CFRP foram inseridos em entalhes, com cerca de 5 mm de largura e 12-15 mm de profundidade, efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da alma das vigas. Após a abertura dos entalhes, procedeu-se à sua limpeza por intermédio da aplicação de jactos de ar. Os estribos de aço foram colocados de forma a terem um betão de recobrimento lateral com espessura de 22 mm, tendo-se assegurado que nenhum estribo foi danificado pela abertura dos entalhes. Os laminados, fornecidos em rolos de 150 m com a secção transversal de  $1.4 \times 9.5 \text{ mm}^2$ , foram cortados com o comprimento desejado e, posteriormente, foram limpos com um desengordurante. A fixação dos laminados foi efectuada por intermédio de um adesivo epoxídico (MBrace Resin 220, (Degussa, 2003)). Primeiro, o entalhe foi preenchido com adesivo e, depois, o laminado, também com adesivo aplicado nas superfícies laterais, foi inserido no entalhe. A operação de reforço terminou com a remoção do adesivo em excesso e a execução do acabamento final.

A aplicação do reforço com mantas de CFRP envolveu as seguintes tarefas: 1) preparação da superfície de betão a reforçar por intermédio da passagem de um esmeril, de forma a retirar a leitada superficial e a arredondar as arestas; 2)

aplicação de jactos de ar para limpeza da superfície a reforçar; 3) aplicação de uma camada de primário (MBrace Resin 50, (Degussa, 2003)) para melhorar a aderência betão-CFRP; 4) corte das mantas com a largura e o comprimento desejado; 5) colagem das faixas de manta (uma camada nas vigas 2S-4M e 2S-7M(1) e duas camadas na viga 2S-7M(2)) em forma de U recorrendo a uma resina epoxídica (MBrace Resin 55, (Degussa, 2003)).

De forma a assegurar a adequada cura do adesivo/resina, pelo menos uma semana mediou entre a aplicação do CFRP e a realização do ensaio das vigas.

## 3- RESULTADOS

### 3.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura

Na Tabela 3 apresenta-se o valor da força máxima ( $F_{max}$ ) obtida em cada uma das vigas ensaiadas. Atribuindo as designações  $F_{max}^{2S-R}$  e  $F_{max}^{7S-R}$  à carga máxima registada, respectivamente, na viga 2S-R e na viga 7S-R, determinaram-se os factores  $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R}$  e  $F_{max} / F_{max}^{7S-R}$  indicados na Tabela 3, em que  $\Delta F_{max} = F_{max} - F_{max}^{2S-R}$ . Nesta tabela também se apresenta o valor do parâmetro  $(\Delta F / F^{2S-R})_{max}$ , que corresponde ao valor máximo da relação entre o incremento de carga proporcionado pelo reforço de CFRP ( $\Delta F$ ), após a formação da fenda diagonal de corte na viga de referência 2S-R, e o valor da correspondente força na referida viga de referência  $F^{2S-R}$  (ver Figura 6b).

Nas Figuras 6 e 7 apresentam-se, respectivamente, a resposta carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas ensaiadas e a relação  $\Delta F / F^{2S-R}$  vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com CFRP. O primeiro tipo de resposta traduz o comportamento das vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de

carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente.

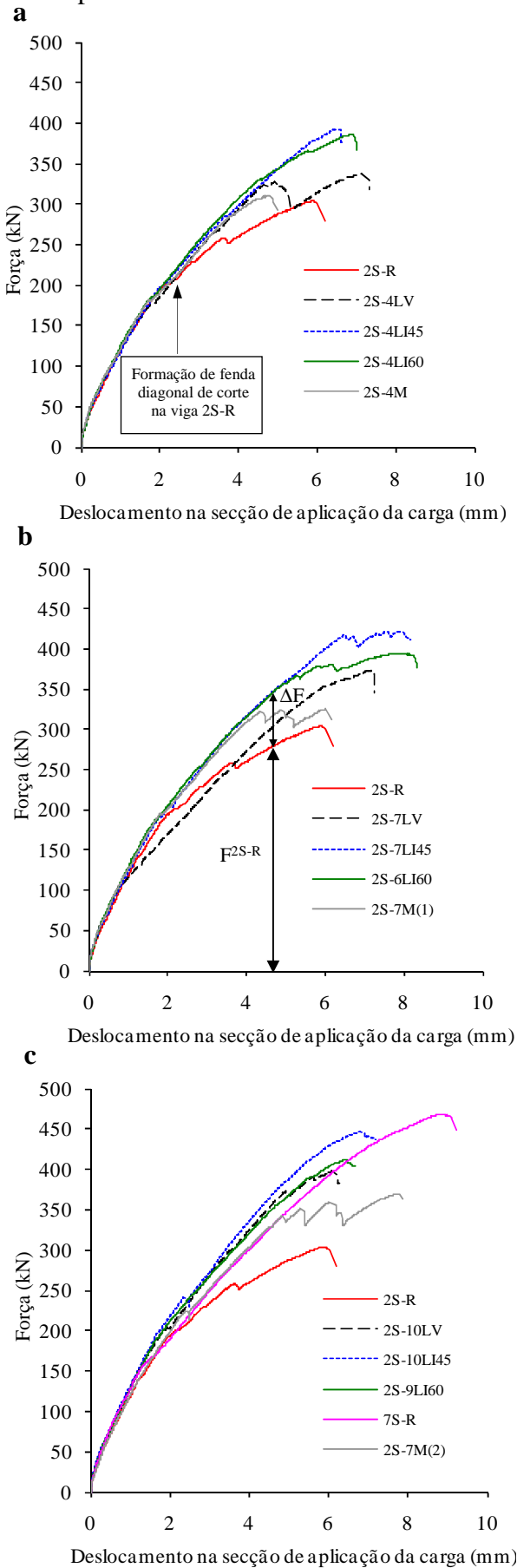


Fig. 6 – Comportamento das vigas ensaiadas (relação carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga).

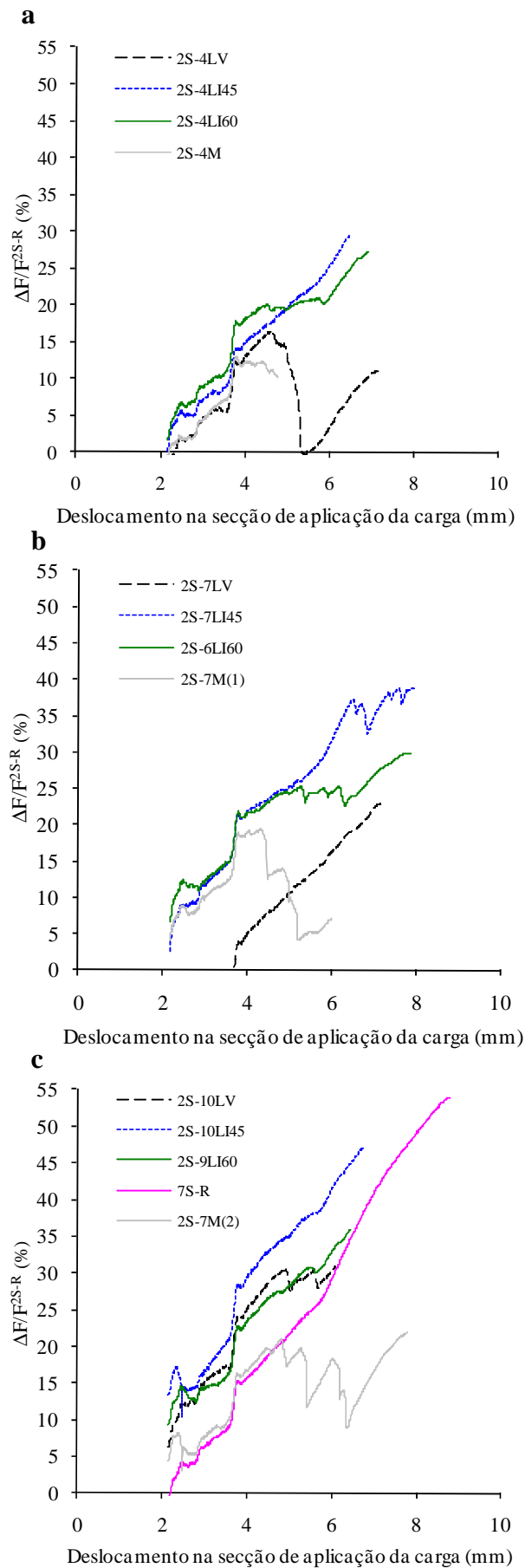


Fig. 7 – Relação  $\Delta F/F^{2S-R}$  vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com CFRP.

Tabela 3 – Principais resultados em termos de capacidade de carga das vigas.

Viga	$F_{max}$ (kN)	$\Delta F_{max}/F_{max}^{2S-R}$ (%)	$F_{max}/F_{max}^{7S-R}$	$(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$ (%)
C-R	207.0	-	0.44	-
2S-R	303.8	-	0.65	0.0
7S-R	467.5	53.9	1.00	53.9
2S-4LV	337.4	11.1	0.72	16.4
2S-7LV	374.1	23.1	0.80	23.1
2S-10LV	397.5	30.8	0.85	30.8
2S-4LI45	392.8	29.3	0.84	29.3
2S-7LI45	421.7	38.8	0.90	38.8
2S-10LI45	446.5	47.0	0.96	47.0
2S-4LI60	386.4	27.2	0.83	27.2
2S-6LI60	394.4	29.8	0.84	29.8
2S-9LI60	412.7	35.8	0.88	35.8
2S-4M	311.1	2.4	0.67	13.0
2S-7M(1)	325.1	7.0	0.70	19.4
2S-7M(2)	370.1	21.8	0.79	21.8

A análise dos resultados incluídos na Tabela 3 e os gráficos das Figuras 6 e 7 permite constatar que a presença dos laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da sua percentagem e orientação, proporcionou um aumento da capacidade de carga das vigas. A presença do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal tornou-se evidente a partir do momento associado à formação da fenda diagonal de corte na viga de referência 2S-R. Com efeito, a perda de rigidez que se verificou na curva de comportamento da viga 2S-R, para uma carga de cerca de 201 kN e uma flecha na secção de aplicação da carga de 2.15 mm, não ocorreu nas vigas reforçadas com CFRP, o que permite constatar que o CFRP ofereceu resistência efectiva à abertura das fendas de corte que os interceptaram, proporcionando um aumento de rigidez, conforme se pode verificar da análise da Figura 6. Além disso, é possível verificar que, de um modo geral, o aumento de rigidez foi proporcional à percentagem de laminados de CFRP.

As soluções de reforço com laminados inseridos que foram testadas conduziram a aumentos da capacidade máxima de carga ( $\Delta F_{max}/F_{max}^{2S-R}$ ) que variaram entre os 11.1% e os 47.0%. Nas vigas com laminados o valor do parâmetro  $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$  coincidiu com o de  $\Delta F_{max}/F_{max}^{2S-R}$  (a única excepção foi a viga 2S-4LV).

A análise comparativa dos resultados obtidos nas vigas com laminados (técnica NSM) e nas vigas com mantas (técnica EBR) permitiu que se façam as seguintes considerações:

i) tendo por base o valor de  $F_{max}$  da viga não reforçada (viga 2S-R), as soluções com laminados conduziram a um aumento médio da capacidade máxima de carga de 30.3%. Para as soluções com mantas, o referido aumento foi de 10.4%, ou seja, 34% do aumento proporcionado pelas soluções de laminados inseridos.

ii) o valor médio de  $F_{max}$  para as três vigas reforçadas com a máxima percentagem de laminados inseridos (2S-10LV, 2S-10LI45 e 2S-9LI60) foi 90% do valor de  $F_{max}$  da viga 7S-R ( $F_{max}^{7S-R}$ ), enquanto que o valor de  $F_{max}$  da viga 2S-7M(2) foi 79% de  $F_{max}^{7S-R}$ .

iii) o valor médio do parâmetro  $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$  registado nas vigas com laminados e nas vigas com mantas foi, respectivamente, 30.9% e 18.1%.

iv) de um modo geral as soluções de reforço com laminados de CFRP proporcionaram acréscimos de rigidez superiores aos conferidos pelas soluções de reforço com mantas de CFRP. Este facto reflecte o melhor controlo das fendas de corte por parte dos laminados inseridos.

Em face das considerações que se acabam de expor é possível concluir que a técnica NSM com laminados de CFRP inseridos, quando comparada directamente com a da colagem externa de mantas de



CFRP, proporcionou um melhor comportamento estrutural às vigas reforçadas.

### 3.2 - Modos de rotura

Como era esperado, a rotura por corte acabou por se registar em todas as vigas ensaiadas, tendo ocorrido no vão de corte *a*. Nas Figuras 8, 9 e 10 apresentam-se pormenores da zona de rotura das vigas ensaiadas. Nas referidas figuras as linhas verticais indicam a localização dos estribos de aço e os círculos a posição das secções onde ocorreu a rotura dos estribos durante o ensaio.

A viga C-R atingiu a sua capacidade máxima com a abertura excessiva da fenda diagonal de corte que se formou ao longo do ensaio. Nas vigas 2S-R e 7S-R a capacidade máxima de carga foi atingida quando ocorreu a rotura de um dos estribos que atravessavam a fenda de rotura de corte. A rotura dos restantes estribos deu-se após as vigas terem atingido a sua carga máxima.

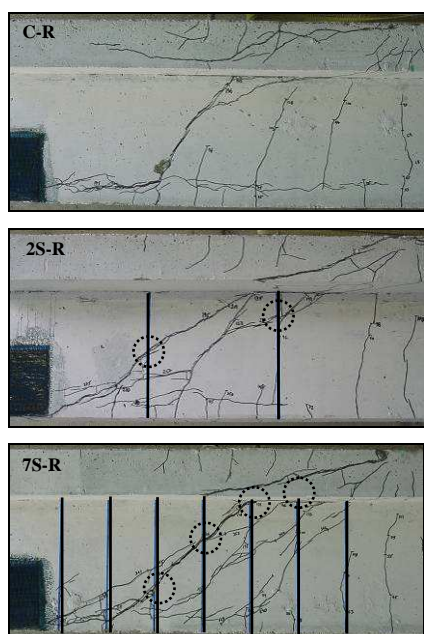


Fig. 8 – Modos de rotura das vigas sem CFRP.

Os modos de rotura observados nas vigas com laminados inseridos (Figura 9) permitiram constatar que a resistência do betão tem um papel fundamental no desempenho da técnica NSM. De facto, de um modo geral os laminados que cederam, e que, por consequência provocaram o esgotamento da capacidade máxima das

vigas, continham betão adjacente ao comprimento destacado do laminado (sem rotura do CFRP).

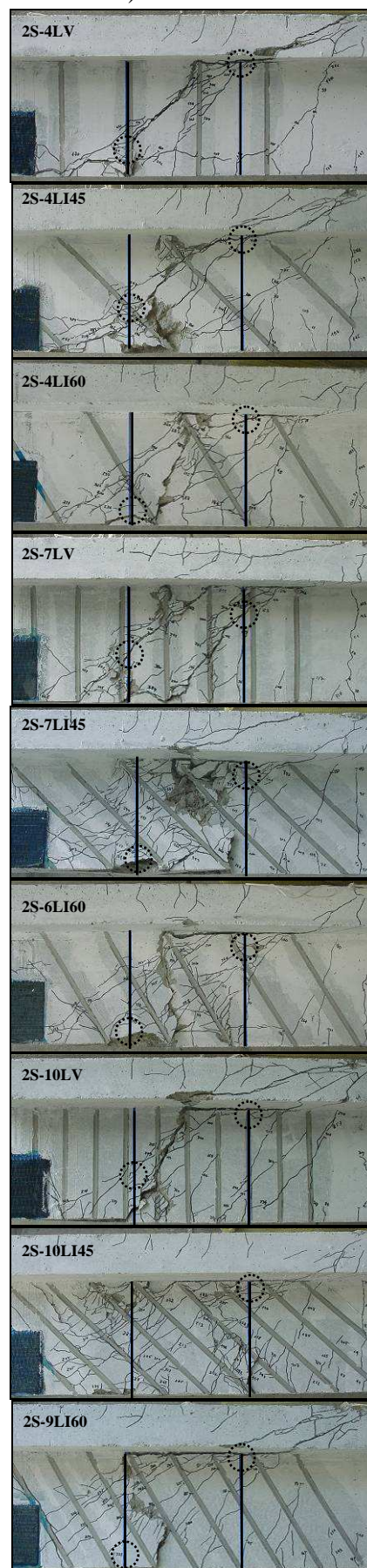


Fig. 9 – Modos de rotura das vigas com CFRP (NSM).

Para a menor percentagem de CFRP, os laminados cederam individualmente, sem qualquer interferência com os laminados vizinhos. Com o aumentar da percentagem de CFRP verificou-se, em alguns casos, um efeito de grupo na cedência dos laminados devido à sua proximidade, conduzindo ao destacamento de um volume considerável de betão contendo CFRP.

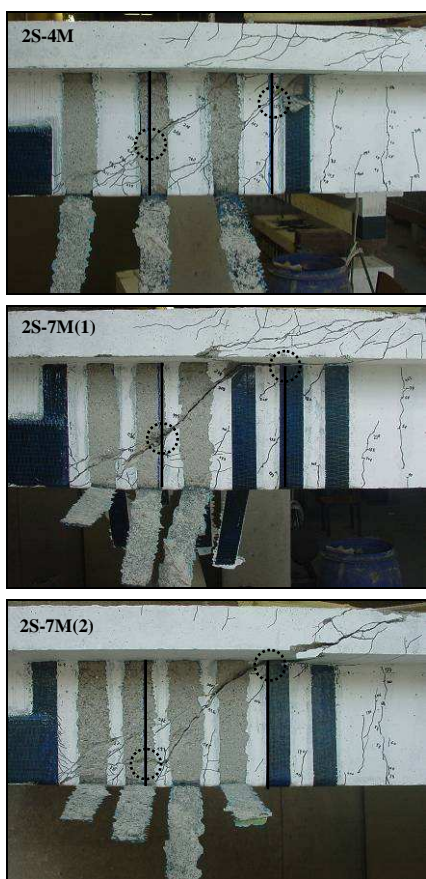


Fig. 10 – Modos de rotura das vigas com CFRP (EBR).

Relativamente às vigas reforçadas ao corte com mantas coladas externamente, o modo de rotura foi o destacamento do CFRP (Figura 10). A carga máxima da viga com a menor percentagem de reforço (2S-4M) foi atingida imediatamente antes de se dar o destacamento da segunda faixa de manta a contar da secção de aplicação da carga. No caso das vigas 2S-7M(1) e 2S-7M(2) a capacidade de carga máxima ocorreu imediatamente antes do

destacamento da sexta faixa de manta a contar da secção de aplicação da carga. Antes desta ocorrência, em ambas as vigas, verificou-se o destacamento de duas faixas de manta. Nas curvas de comportamento destas vigas (Figura 6b e 6c) é possível observar o efeito do destacamento de faixas de manta ocorridos previamente ao instante em que se atingiu a carga máxima.

### 3.3 - Efeito da percentagem e orientação do CFRP

Na Figura 11 apresenta-se, para as várias soluções de reforços com CFRP (NSM e EBR) aplicadas nas vigas ensaiadas, a relação entre a percentagem de CFRP ( $\rho_f$ ) e a eficácia do reforço em termos de acréscimo de carga máxima ( $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R}$ ).

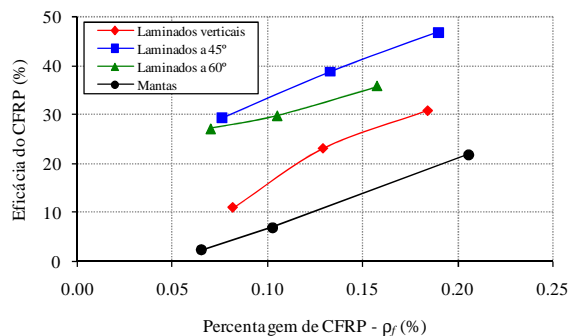


Fig. 11 – Eficácia do reforço em termos de  $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R}$  vs percentagem de CFRP.

A análise da Figura 11 permite constatar que, independentemente da percentagem de laminados de CFRP, a solução a 45° foi a mais eficaz das três orientações testadas. Além disso, é possível verificar que as soluções com laminados a 60° tiveram melhor desempenho que as soluções de laminados verticais. A maior eficácia das soluções de laminados inclinados esteve directamente associada à inclinação da fenda de rotura de corte (aproximadamente ortogonal aos laminados inclinados). Além disso, de um modo geral, as soluções de laminados inclinados, quando comparadas com as de laminados verticais, destacam-se por potenciarem maiores comprimentos de amarração do CFRP, ou seja, melhores

condições de aderência proporcionando assim um melhor rendimento do CFRP.

Independentemente da orientação dos laminados de CFRP, os valores de  $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R}$  aumentaram com o aumento da percentagem de CFRP. Esta tendência também se registou nas vigas reforçadas com a técnica da colagem externa. Na Figura 11 verifica-se que das nove soluções de reforço NSM testadas, apenas a referente à menor percentagem de laminados verticais é que não conseguiu proporcionar ao reforço um grau de eficácia superior ao originado pela solução de mantas coladas externamente com melhor desempenho (a referente à maior percentagem de CFRP).

### 3.4 - Extensões no CFRP e nas armaduras transversais

Na Figura 12 apresenta-se a relação entre a percentagem de CFRP ( $\rho_f$ ) e o valor da extensão máxima registada nos CFRP instrumentados antes das vigas atingirem a rotura (linha contínua), assim como, a relação entre a percentagem de CFRP ( $\rho_f$ ) e o valor médio das extensões máximas registadas nos dois CFRP instrumentados (linha a tracejado). Da análise da extensometria verificou-se que o valor máximo das extensões registadas nas vigas reforçadas usando a técnica NSM variou entre os 5.6% e os 10.8%. O valor médio das extensões máximas registadas nos dois laminados instrumentados variou entre os 5.5% e os 10.3%. De um modo geral, tal como pode ser observado na Figura 12, os valores mais elevados das extensões no CFRP registaram-se nas vigas com a menor percentagem de CFRP, enquanto os valores mais baixos ocorreram nas vigas reforçadas com as percentagens mais elevadas de CFRP. De entre as técnicas de reforço ao corte com CFRP testadas, a técnica NSM foi aquela que conduziu a uma maior mobilização do CFRP, ou seja, a um melhor aproveitamento do material de reforço.

A análise da extensometria nos estribos de aço permitiu constatar a cedência das armaduras transversais instrumentadas no momento em que as

vigas reforçadas com CFRP atingiram a sua capacidade máxima de carga.

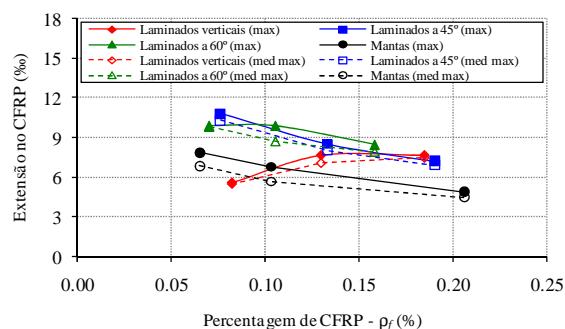


Fig. 12 – Extensões no CFRP vs percentagem de CFRP.

## 4- CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no programa experimental apresentado neste trabalho permitiram extrair as seguintes conclusões:

- O uso da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da percentagem e da orientação do CFRP, permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga de vigas de betão armado de secção em T com rotura por corte. As soluções de reforço testadas, relativas a percentagens de CFRP que variaram entre os 0.07% e os 0.19%, proporcionaram um aumento da capacidade máxima de carga que variou entre os 11.1% e os 47.0%. Os ganhos de resistência conferidos pelos sistemas de reforço em CFRP testados foram proporcionais à percentagem de CFRP ( $\rho_f$ ), ou seja, maiores valores de  $\rho_f$  garantiram maiores aumentos da capacidade resistente. Em termos de orientação do CFRP a solução com laminados a 45° foi mais eficaz que a solução de laminados a 60°. A solução de laminados a 60° foi mais eficaz que a solução com laminados verticais. Os modos de rotura das vigas reforçadas ao corte com laminados inseridos permitiram concluir que a resistência do betão é um parâmetro fundamental na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP.
- Os modelos reforçados com a maior percentagem de laminados de CFRP

apresentaram um valor médio da carga máxima igual a 90% da verificada no modelo de viga “equivalente” em termos de betão armado (viga 7S-R). O modelo de viga “equivalente” com o reforço aplicado usando a técnica da colagem externa (viga 2S-7M(2)) teve uma carga máxima igual a 79% da alcançada pela viga 7S-R. A capacidade de carga alcançada pelas vigas com a máxima percentagem de laminados de CFRP, a partir do momento em que os reforços foram activados (formação de fendas corte), foi maior do que a registada nas vigas 7S-R e 2S-7M(2). Esta constatação evidencia as potencialidades das soluções de reforço com laminados de CFRP inseridos em termos de rigidez, ou seja, em termos de comportamento em serviço da estrutura reforçada.

- A técnica de reforço com laminados inseridos (NSM) foi mais eficaz que a técnica da colagem externa com faixas de manta em forma de U (EBR). O aumento médio da capacidade máxima de carga proporcionado pelos reforços de CFRP aplicados segundo a técnica EBR foi 34% do proporcionado pelas soluções de reforço com laminados inseridos. O valor médio do parâmetro  $\left(\Delta F / F^{2S-R}\right)_{max}$  registado nas vigas com mantas foi 59% do verificado nas vigas com laminados inseridos. O valor médio da extensão máxima registada nos CFRP instrumentados foi de 8.4% para o caso das vigas reforçadas com a técnica NSM e 6.5% para o caso das vigas reforçadas com a técnica EBR.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento à empresa Casais pela colaboração prestada na construção das vigas e na aplicação dos reforços de CFRP. Os agradecimentos são estendidos à S&P Reinforcement pelo fornecimento dos laminados e mantas de CFRP, à Unibetão (Braga) pelo fornecimento do betão e à Degussa Construction Chemicals Portugal

pelo fornecimento do adesivo e das resinas. A investigação desenvolvida neste trabalho faz parte do projecto SmartReinforcement financiado pelo Programa POCI 2010 – IDEIA.

## REFERÊNCIAS

- ACI Committee 440, 2002, “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 440, 118 pp.
- Barros, J.A.O., Bonaldo, E. and Oliveira, J.T., 2007, “*Composite materials for the structural strengthening of reinforced masonry shells*”, Proceedings of ACIC 07, Advanced Composites in Construction, University of Bath, UK.
- Bousselham, A. and Chaallal, O., 2004, “*Shear strengthening reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer: assessment of influencing parameters and required research*”, ACI Structural Journal, vol. 101, nº 2, March-April, pp. 219-227.
- Degussa Construction Chemicals Portugal, 2003, “*Fichas técnicas MBrace Resin 50, MBrace Resin 55 e MBrace Resin 220*”, Maio.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2004, “*Proposta de uma técnica de reforço ao corte com CFRP*”, Revista Engenharia Civil • UM, Universidade do Minho, nº 21, Dezembro, pp.11-23.
- EN 206-1, 2000, “*Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*”, European standard, CEN, 69 pp.
- EN 10002-1, 1990, “*Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)*”, European standard, CEN, 35 pp.
- ISO 527-5, 1997, “*Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*”, International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp.
- Sena-Cruz, J.M. and Barros, J.A.O., 2004, “*Bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete in structural strengthening*”, Journal of Composites for Construction, vol. 8, nº 6, pp. 519-527.