

## Aplicação da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão de baixa resistência



Salvador Dias<sup>1</sup>



Joaquim Barros<sup>2</sup>

### RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um programa experimental que foi realizado por forma a avaliar a viabilidade da aplicação da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão de baixa resistência. Concretamente, as vigas de betão armado de secção em T que foram ensaiadas à rotura tinham um betão de 18.6 MPa de resistência à compressão. Foram analisadas três orientações para os laminados (vertical, inclinado a 45° e a 60°) e, para as soluções de reforço com laminados inclinados, foram consideradas duas percentagens de CFRP. As cinco soluções de reforço de CFRP testadas foram aplicadas a vigas com uma percentagem de armadura transversal de 0.10% ( $\rho_{sw} = 0.10\%$ ) e a vigas com  $\rho_{sw} = 0.17\%$ . Desta forma, também foi possível avaliar o efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica de reforço ao corte em estudo quando aplicada a vigas com betão de baixa resistência. Os resultados obtidos são apresentados e analisados em termos do comportamento estrutural das vigas ensaiadas, modos de rotura e desempenho do CFRP.

### PALAVRAS-CHAVE

Inserção de laminados de CFRP; Reforço ao corte; Betão de baixa resistência.

<sup>1</sup> ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800 Guimarães, Portugal. sdias@civil.uminho.pt

<sup>2</sup> ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800 Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

## 1. INTRODUÇÃO

A técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono), inseridos em finos entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas, é uma alternativa viável, quer às técnicas de reforço tradicionalmente adoptadas (utilização de armaduras exteriores e encamisamento das secções) quer à técnica da colagem externa de CFRP nas faces laterais dos elementos a reforçar. No âmbito da aplicação destes materiais de elevado desempenho (CFRP) no reforço ao corte de vigas de betão armado, ensaios experimentais já realizados permitiram concluir sobre a maior eficácia do CFRP inserido (técnica da inserção) em relação ao CFRP colado externamente (técnica da colagem externa) [1, 2].

A necessidade de avaliar o comportamento de vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos em que o betão apresenta baixa resistência é justificada por um conjunto variado de circunstâncias: i) existem estruturas de betão armado concebidas com betões de baixa resistência, nomeadamente as estruturas mais antigas; ii) a qualidade do betão pode degradar-se com o evoluir do tempo; iii) os resultados experimentais referentes ao comportamento de vigas de betão armado reforçadas ao corte utilizando a técnica da inserção de laminados de CFRP indicam que o betão tem um papel crucial no nível da eficácia desta técnica de reforço [2].

Neste trabalho apresenta-se um programa experimental que foi realizado por forma a avaliar a viabilidade da aplicação da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão de baixa resistência. 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 treze 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 de 6 mm de diâmetro afastados de 75 mm ( $\phi 6@75\text{mm}$ ). 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  $\rho_{sw} = 0.10\%$ ); cinco vigas contendo estribos  $\phi 6@300\text{mm}$  e reforçadas ao corte com distintas soluções de CFRP; uma viga com estribos  $\phi 6@180\text{mm}$  (viga 4S-R com  $\rho_{sw} = 0.17\%$ ); cinco vigas contendo estribos  $\phi 6@180\text{mm}$  reforçadas ao corte com as mesmas soluções de CFRP adoptadas nas vigas com  $\rho_{sw} = 0.10\%$ . Desta forma, para a gama do betão analisada no presente programa experimental, foi também possível avaliar o efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica de reforço ao corte em estudo.

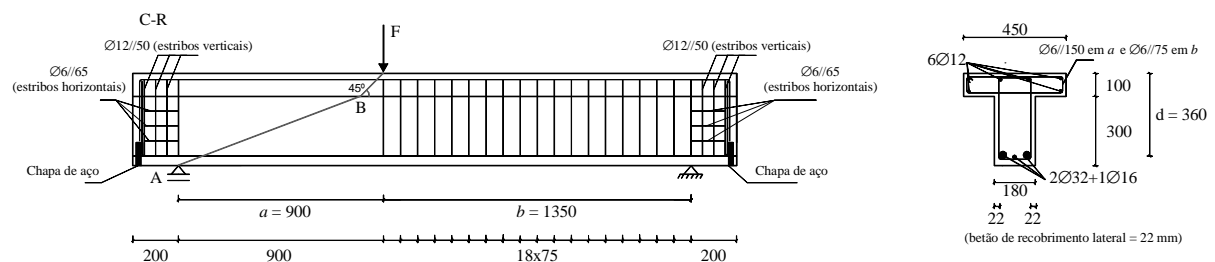


Figura 1. Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço comuns a todas as vigas ensaiadas (dimensões em mm).

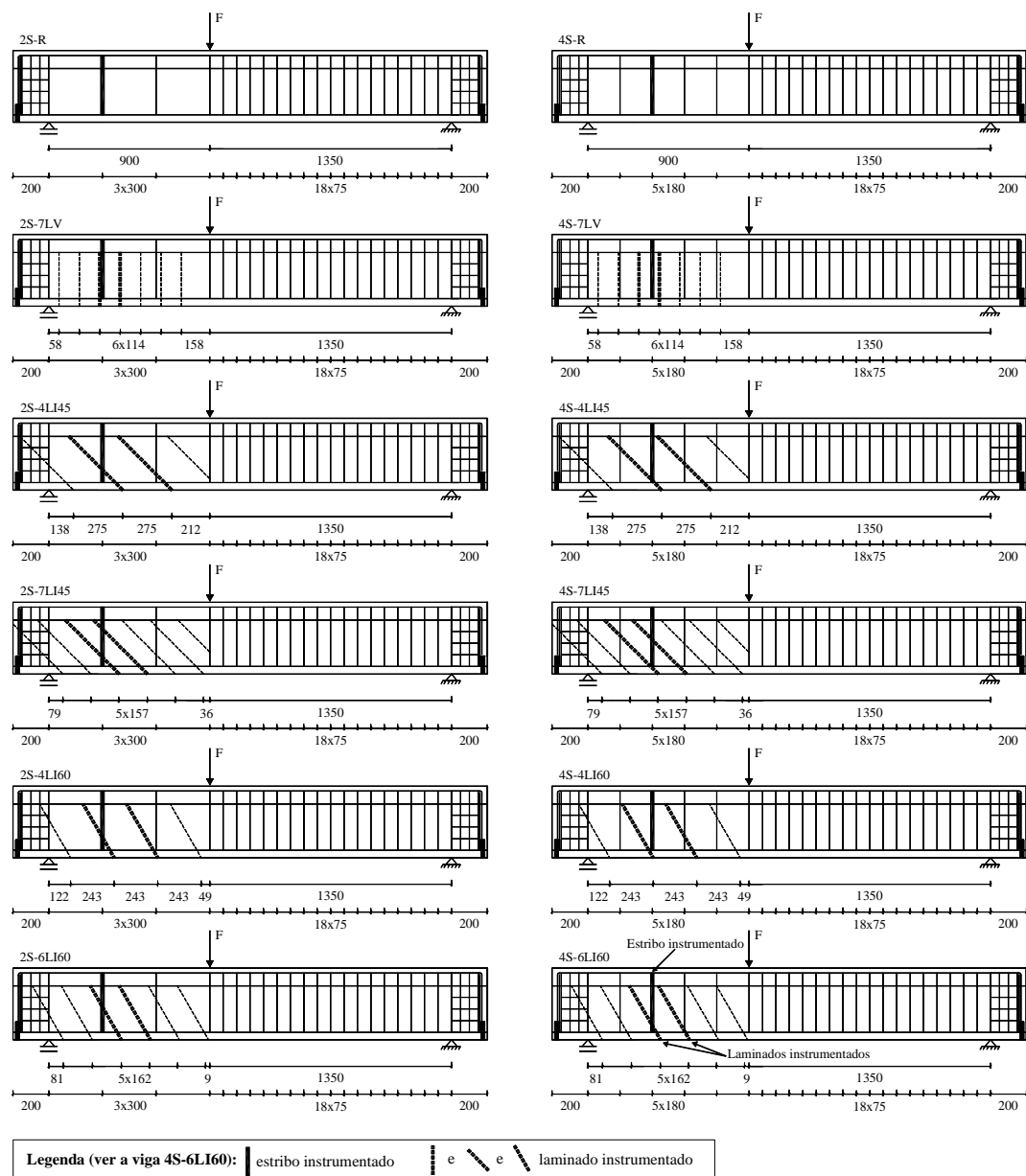


Figura 2. Localização dos estribos de aço (traço cheio) e dos laminados (tracejado) de CFRP (dimensões em mm).

As soluções de reforço de CFRP testadas englobaram três orientações para os laminados (45°, 60° e 90°) e para o caso dos reforços inclinados foram testadas duas percentagens de CFRP. O pré-dimensionamento das vigas foi efectuado de forma a terem rotura por corte [2]. 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 [3] para a técnica da colagem externa (4%) e o valor de 5.9% obtido em ensaios de arranque em flexão usando laminados de CFRP aplicados segundo a técnica da inserção [4]. As soluções de reforço, por face do vão de corte  $a$ , referentes à menor e à maior percentagem de CFRP testada foram as seguintes: quatro laminados para a menor percentagem de reforço (laminados a 45° e laminados a 60°); sete laminados (inclinação de 90° e 45°) e seis laminados (inclinação de 60°) para a maior percentagem de reforço. Quer para a menor percentagem de CFRP testada como para a maior percentagem de CFRP testada, o espaçamento dos laminados para cada uma das orientações foi obtido por forma a que as respectivas vigas tivessem uma capacidade máxima resistente semelhante.

Quadro 1. Soluções de reforço de CFRP testadas.

| Vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ <sup>a</sup> | Vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$ <sup>b</sup> | Sistema de reforço de CFRP no vão de corte $a$ |   |                          |                                      |
|---|---|--|---|--------------------------|--------------------------------------|
|   |   | Quantidade                                     | Percentagem $[\rho_f]$ (%) <sup>c</sup> | Espaçamento $[s_f]$ (mm) | Ângulo $[\theta_f]$ (°) <sup>d</sup> |
| 2S-7LV                                      | 4S-7LV                                      | 2×7 laminados (1.4×9.5 mm <sup>2</sup> )       | 0.13                                    | 114                      | 90                                   |
| 2S-4LI45                                    | 4S-4LI45                                    | 2×4 laminados (1.4×9.5 mm <sup>2</sup> )       | 0.08                                    | 275                      | 45                                   |
| 2S-7LI45                                    | 4S-7LI45                                    | 2×7 laminados (1.4×9.5 mm <sup>2</sup> )       | 0.13                                    | 157                      | 45                                   |
| 2S-4LI60                                    | 4S-4LI60                                    | 2×4 laminados (1.4×9.5 mm <sup>2</sup> )       | 0.07                                    | 243                      | 60                                   |
| 2S-6LI60                                    | 4S-6LI60                                    | 2×6 laminados (1.4×9.5 mm <sup>2</sup> )       | 0.11                                    | 162                      | 60                                   |

<sup>a</sup> A viga 2S-R é a viga de referência sem CFRP (Fig. 2); <sup>b</sup> A viga 4S-R é a viga de referência sem CFRP (Fig. 2); <sup>c</sup> A percentagem de CFRP foi obtida usando a expressão  $\rho_f = \frac{2a_f b_f}{b_w s_f \sin \theta_f}$  sendo  $a_f = 1.4$  mm e  $b_f = 9.5$  mm as dimensões da secção transversal dos laminados e  $b_w = 180$  mm a largura da alma da viga; <sup>d</sup> Orientação das fibras do CFRP em relação à direcção do eixo da viga.

Nas Figuras 1 e 2 e no Quadro 1 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°. Para evitar a ocorrência do destacamento do betão de recobrimento nos apoios, as extremidades das vigas foram reforçadas de acordo com o representado na Figura 1. 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 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, um dos estribos posicionados no vão de corte  $a$  foi instrumentado com três extensómetros eléctricos de acordo com o representado na Figura 3. A localização dos laminados e estribos instrumentados nas vigas ensaiadas está representada na Figura 2.

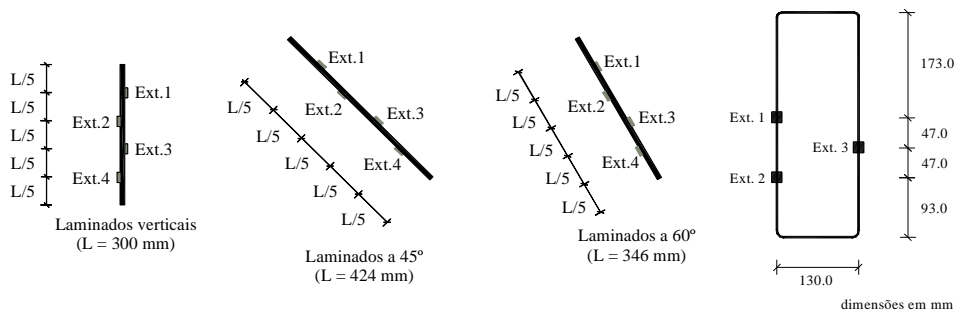


Figura 3. Posição dos extensómetros nos laminados e estribos de aço instrumentados.

## 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 51 dias. Para tal, de acordo com a norma EN 206-1 [5] 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 [6]. 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 [7]. No Quadro 2 estão registados os valores médios, obtidos experimentalmente, das propriedades mecânicas mais significativas do betão, do aço e dos laminados de CFRP.

Quadro 2. Valores das propriedades dos materiais.

| Betão                | Resistência à compressão [ $f_{cm}$ ] (MPa) |  |     |   |     |
|----------------------|---|--|-----|---|-----|
|                      | 15.9 MPa<br>(aos 28 dias)                   | 18.6 MPa<br>(aos 51 dias - idade das vigas à data dos ensaios) |     |   |     |
|                      | Diâmetro (mm)                               | φ6   | φ12 | φ16                                     | φ32 |
| Aço                  | Tensão de cedência [ $f_{sym}$ ] (MPa)      | 539  | 453 | 429                                     | 734 |
|                      | Tensão máxima [ $f_{sum}$ ] (MPa)           | 595  | 581 | 563                                     | 885 |
| Laminados<br>de CFRP | Tensão de rotura [ $f_{lum}$ ] (MPa)        | Módulo de Elasticidade [ $E_{lm}$ ] (GPa)                      |     | Extensão máxima [ $\epsilon_{lm}$ ] (%) |     |
|                      | 2847.9                                      | 174.3  |     | 1.63                                    |     |

### 2.3 Aplicação do reforço de CFRP

Os laminados de CFRP foram inseridos em entalhes, com cerca de 4-5 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 1.4×9.5 mm<sup>2</sup>, 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, [8]). 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. De forma a assegurar a adequada cura do adesivo, 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

No Quadro 3 apresenta-se o valor da força máxima obtida em cada uma das vigas ensaiadas ( $F_{max}$ ). Atribuindo a designação  $F_{max}^{ref}$  à carga máxima registada nas vigas de referência 2S-R (viga de referência das vigas 2S-7LV, 2S-4LI45, 2S-7LI45, 2S-4LI60 e 2S-6LI60) e 4S-R (viga de referência das vigas 4S-7LV, 4S-4LI45, 4S-7LI45, 4S-4LI60 e 4S-6LI60), determinaram-se os factores  $\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$  indicados Quadro 3 ( $\Delta F_{max} = F_{max} - F_{max}^{ref}$ ). Neste quadro também se apresenta o valor do parâmetro  $(\Delta F / F^{ref})_{max}$ , 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 (ver Figura 5b), e o valor da correspondente força na referida viga de referência ( $F^{ref}$ ). As flechas na secção de aplicação da carga correspondentes ao parâmetro  $(\Delta F / F^{ref})_{max}$ , designada por  $u_{(\Delta F / F^{ref})_{max}}$ , e à carga máxima ( $u_{F_{max}}$ ) também estão registadas no Quadro 3.

As respostas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas ensaiadas e a relação  $\Delta F / F^{ref}$  vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com CFRP estão apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente, para as vigas com  $\rho_{sw} = 0.10\%$  e para as vigas com  $\rho_{sw} = 0.17\%$ . O primeiro tipo de resposta (carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga) traduz o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente.

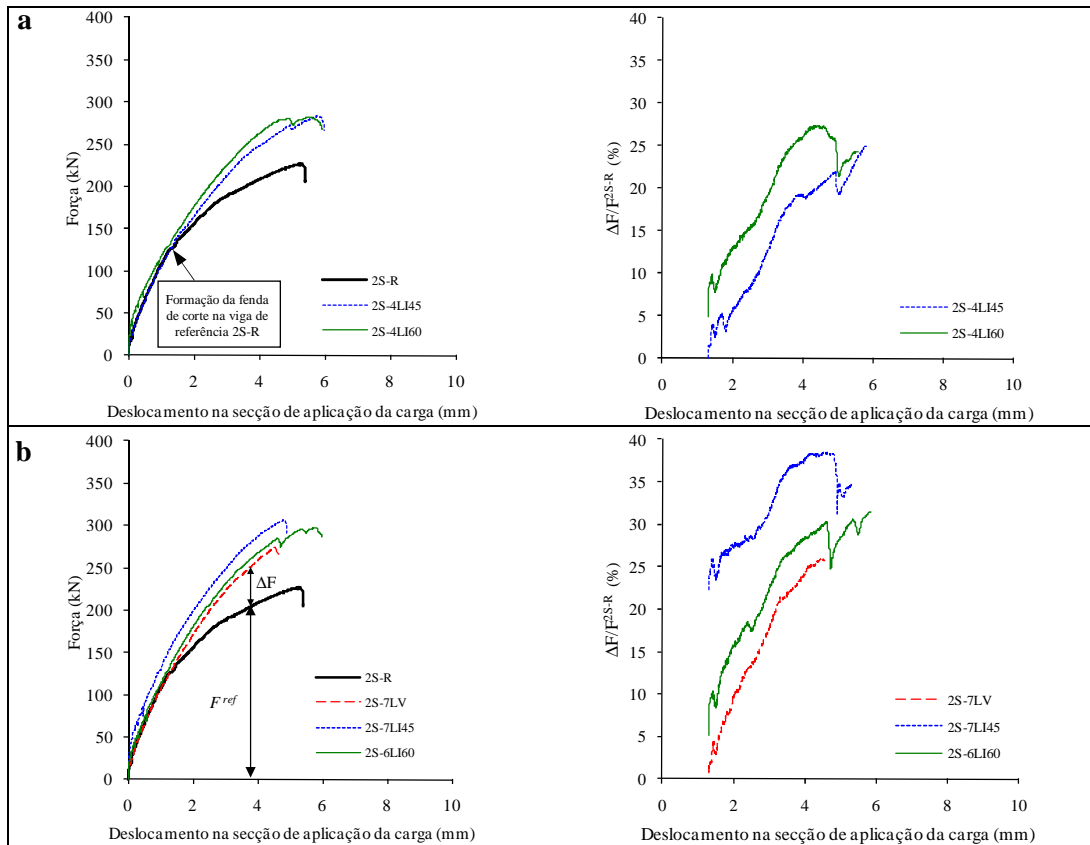


Fig. 5 - Força vs deslocamento na secção de aplicação da carga e  $\Delta F/F^{2S-R}$  vs deslocamento na secção de aplicação da carga para as vigas com  $\rho_{sw} = 0.10\%$  com a menor (a) e a maior (b) percentagem de CFRP.

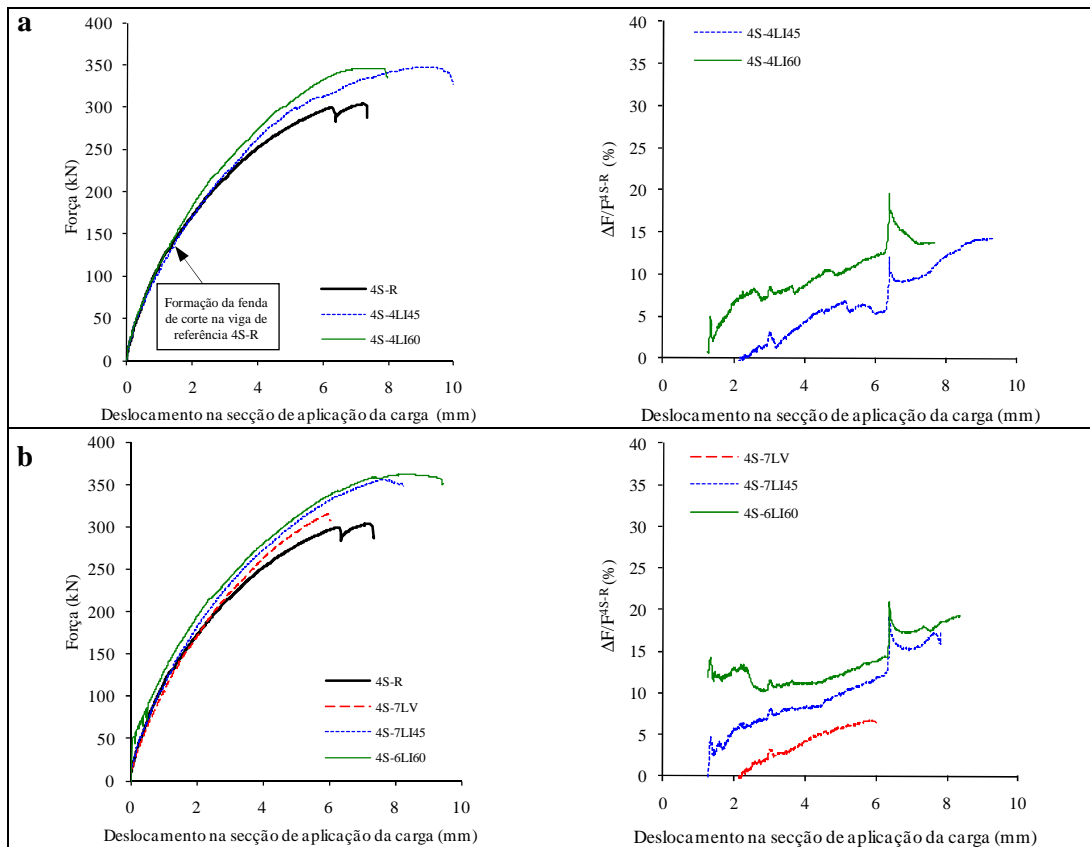


Fig. 6 - Força vs deslocamento na secção de aplicação da carga e  $\Delta F/F^{4S-R}$  vs deslocamento na secção de aplicação da carga para as vigas com  $\rho_{sw} = 0.17\%$  com a menor (a) e a maior (b) percentagem de CFRP.

Quadro 3. Principais resultados em termos de capacidade de carga das vigas e grau de mobilização do CFRP.

| Vigas                | $(\Delta F/F^{ref})_{max}$<br>(%) | $u(\Delta F/F^{ref})_{max}$<br>(mm) | $F_{max}$<br>(kN) | $\Delta F_{max}/F_{max}^{ref}$<br>(%) | $u_{F_{max}}$<br>(mm) | $\varepsilon_{CFRP}^{max}$<br>(%) | $(\varepsilon_{CFRP}^{max})_{med}$<br>(%) |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---|
| C-R                  | -                                 | -                                   | 147.0             | -                                     | 3.44                  | -                                 | -   |
| 2S-R                 | -                                 | -                                   | 226.5             | -                                     | 5.29                  | -                                 | -   |
| $\rho_{sw} = 0.10\%$ | 2S-7LV                            | 26.1                                | 273.7             | 20.8                                  | 4.55                  | 0.57                              | 0.49                                      |
|                      | 2S-4LI45                          | 24.9                                | 283.0             | 24.9                                  | 5.79                  | 0.94                              | 0.72                                      |
|                      | 2S-7LI45                          | 38.5                                | 306.5             | 35.3                                  | 4.79                  | 0.65                              | 0.53                                      |
|                      | 2S-4LI60                          | 27.4                                | 281.6             | 24.3                                  | 5.57                  | 0.70                              | 0.69                                      |
|                      | 2S-6LI60                          | 31.4                                | 297.7             | 31.4                                  | 5.84                  | 0.65                              | 0.59                                      |
|                      | 4S-R                              | -                                   | -                 | 303.8                                 | -                     | 7.20                              | -   |
| $\rho_{sw} = 0.17\%$ | 4S-7LV                            | 6.7                                 | 315.2             | 3.8                                   | 5.98                  | 0.71                              | 0.41                                      |
|                      | 4S-4LI45                          | 14.3                                | 347.2             | 14.3                                  | 9.28                  | 0.93                              | 0.88                                      |
|                      | 4S-7LI45                          | 19.3                                | 356.4             | 17.3                                  | 7.83                  | 0.71                              | 0.60                                      |
|                      | 4S-4LI60                          | 19.6                                | 345.6             | 13.8                                  | 7.67                  | 0.78                              | 0.75                                      |
|                      | 4S-6LI60                          | 20.9                                | 362.3             | 19.3                                  | 8.36                  | 0.54                              | 0.52                                      |

Uma análise geral aos dados do Quadro 3 e às Figuras 5 e 6 permite constatar que a presença dos laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado com um betão de fraca resistência, independentemente da percentagem de estribos de aço e da orientação e percentagem do CFRP, proporcionou aumentos de rigidez e de capacidade máxima de carga. Algumas das soluções de reforço testadas proporcionaram ainda acréscimos de deformação na rotura.

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. Com efeito, a perda de rigidez que se verificou na curva de comportamento da viga 2S-R (para uma carga de cerca de 126 kN e uma flecha na secção de aplicação da carga de 1.29 mm) e na viga 4S-R (para uma carga de cerca de 131 kN e uma flecha na secção de aplicação da carga de 1.26 mm) não ocorreu nas respectivas 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 5. Além disso, é possível verificar que o aumento de rigidez foi proporcional à percentagem de laminados de CFRP.

Tomando em consideração o valor da força máxima das vigas de referência (2S-R e 4S-R), as configurações de reforço referentes à menor percentagem de CFRP testada conduziram aos seguintes ganhos de capacidade máxima de carga: 24.9% (laminados a 45°) e 24.3% (laminados a 60°) para as vigas com dois estribos de aço no menor vão de corte; 14.3% (laminados a 45°) e 13.8% (laminados a 60°) para as vigas com quatro estribos de aço no menor vão de corte. Em relação ao parâmetro  $(\Delta F/F^{ref})_{max}$  apenas a contribuição das soluções de reforço das vigas com laminados a 60° foi maior do que em termos de contributo para o aumento da capacidade máxima de carga (27.4% no caso da viga 2S-4LI60 e 19.6% no caso da viga 4S-4LI60). Os valores apresentados permitem verificar que em termos de carga máxima as duas orientações de CFRP testadas conduziram a resultados muito próximos.

Tomando em consideração o valor da força máxima das vigas de referência (2S-R e 4S-R), as configurações de reforço referentes à maior percentagem de CFRP testada conduziram aos seguintes ganhos de capacidade máxima de carga: 20.8% (laminados verticais), 35.3% (laminados a 45°) e 31.4% (laminados a 60°) para as vigas com dois estribos de aço no menor vão de corte; 3.8% (laminados verticais), 17.3% (laminados a 45°) e 19.3% (laminados a 60°) para as vigas com quatro estribos de aço no menor vão de corte. Para esta gama de percentagem de reforço, os valores de  $(\Delta F/F^{ref})_{max}$  obtidos nas vigas 2S-7LV (26.1%), 2S-7LI45 (38.5%), 4S-7LV (6.7%), 4S-7LI45 (19.3%) e 4S-6LI60 (20.9%) foram ligeiramente superiores aos respectivos valores do aumento que

proporcionaram em termos de carga máxima. As soluções de laminados inclinados foram mais eficazes que as soluções de laminados verticais. Para as soluções de laminados a 45° e a 60° os valores de  $\Delta F_{max}/F_{max}^{ref}$  e  $(\Delta F/F_{max}^{ref})_{max}$  aumentaram com o aumento da percentagem de CFRP

Na Figura 7 apresenta-se, para cada solução de reforço de CFRP testada, o acréscimo de carga máxima obtido na viga com dois estribos de aço no menor vão de corte (coluna da esquerda) e o referido acréscimo quando o reforço foi aplicado numa viga com quatro estribos de aço no menor vão de corte (coluna da direita). Os valores apresentados revelam que a percentagem de estribos de aço tem um papel significativo nos ganhos de resistência proporcionados pelos reforços de CFRP. Nos resultados obtidos foi bastante evidente a diminuição do grau de eficácia das várias soluções de reforço testadas com o aumento da percentagem de estribos de aço. Em média, o ganho de resistência ( $\Delta F_{max}/F_{max}^{ref}$ ) proporcionado pelas soluções de reforço aplicadas nas vigas com  $\rho_{sw} = 0.17\%$  foi 55% do ganho de resistência proporcionado pelas mesmas soluções de reforço quando aplicadas a vigas com  $\rho_{sw} = 0.10\%$  (o valor referente à solução de laminados verticais foi excluído da análise).

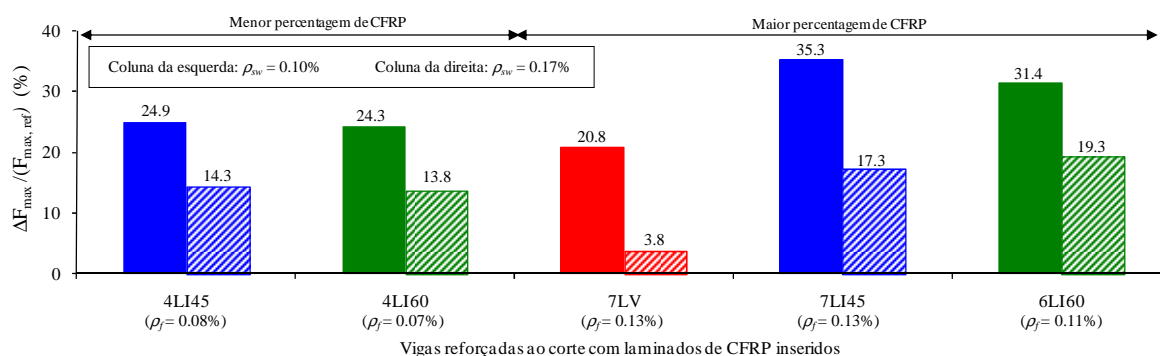


Figura 7. Efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia das soluções de reforço testadas.

### 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  $a$ . Na Figura 8 apresentam-se pormenores da zona de rotura das vigas ensaiadas. Nas fotografias desta figura as linhas verticais correspondem à localização dos estribos de aço e os círculos à 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 de corte que se formou ao longo do ensaio. Nas vigas 2S-R e 4S-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 ocorreu após a viga ter atingido a sua carga máxima. Os modos de rotura observados nas vigas com laminados inseridos permitiram constatar que a resistência do betão tem um papel fundamental no desempenho da técnica de reforço em estudo. 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). 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 um efeito de grupo na cedência dos laminados devido à sua proximidade, conduzindo ao destacamento de um volume considerável de betão contendo CFRP.

### 3.3 Extensões no CFRP

No Quadro 3 apresentam-se, para cada viga reforçada, o valor da extensão máxima registada nos CFRP instrumentados antes das vigas atingirem a rotura ( $\epsilon_{CFRP}^{max}$ ), assim como o valor médio das



extensões máximas registadas nos dois CFRP instrumentados ( $\epsilon_{CFRP}^{max}$ )<sub>m</sub>). Da análise dos dados da extensometria apresentados no Quadro 3 é possível verificar que o valor máximo das extensões registadas nas vigas reforçadas com CFRP variou entre os 0.54% e os 0.94%. No que diz respeito à extensão ( $\epsilon_{CFRP}^{max}$ )<sub>m</sub>, a variação foi entre os 0.41% e os 0.88%. A média dos valores máximos de  $\epsilon_{CFRP}^{max}$  e dos valores de ( $\epsilon_{CFRP}^{max}$ )<sub>m</sub> para as vigas com CFRP ensaiadas na presente série foi de 0.72% e 0.62%, respectivamente. Os valores mais elevados das extensões no CFRP registaram-se nas vigas com a menor percentagem de CFRP. Em termos de orientação do CFRP, a solução com laminados a 45° foi a que mais mobilizou a capacidade resistente do CFRP. Com efeito, considerando a máxima extensão  $\epsilon_{CFRP}^{max}$  por viga para as quatro soluções de laminados a 45° verifica-se que o seu valor médio foi de 0.81%, ou seja, 50% da extensão máxima obtida nos ensaios de tracção directa dos laminados (1.63% - Quadro 2). As soluções de laminados verticais e de laminados inclinados a 60° conduziram, em termos médios, a uma mobilização do reforço de cerca de 39% (extensão de 0.64%) e 41% (extensão de 0.67%), respectivamente.

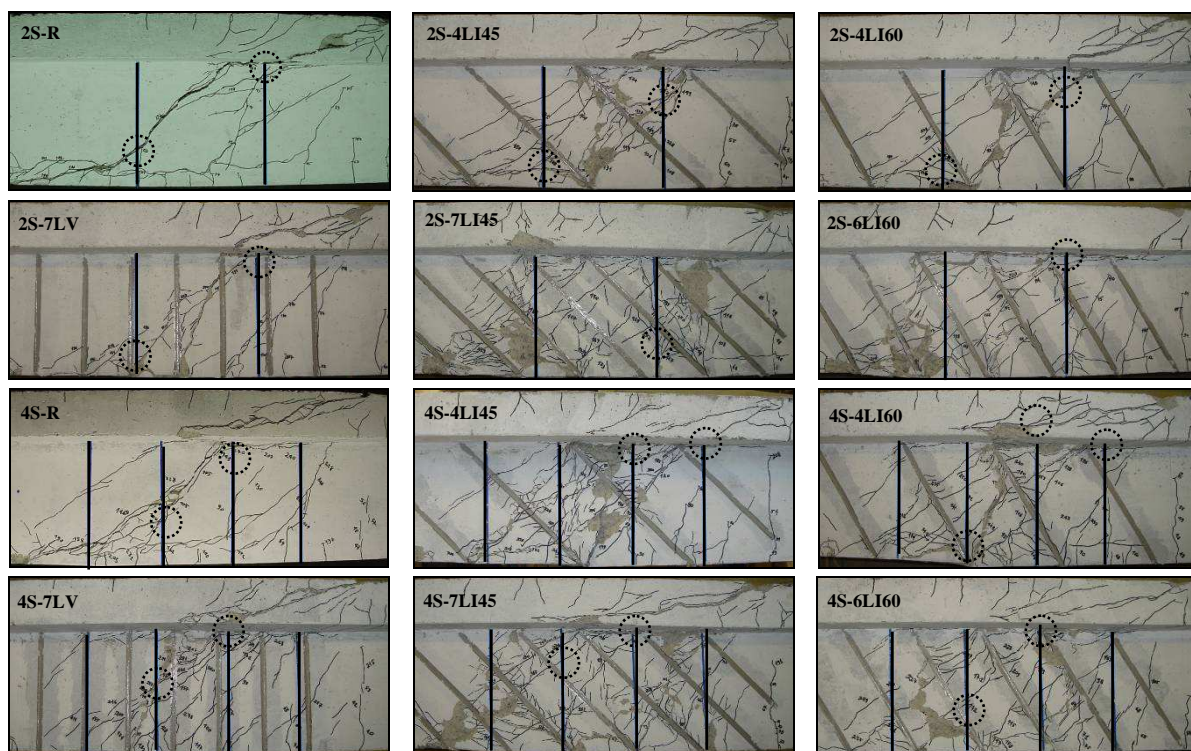


Fig. 8 - Modos de rotura das vigas ensaiadas.

#### 4. CONCLUSÕES

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

- O uso da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da percentagem de armadura transversal (estribos de aço) e da orientação e percentagem do CFRP, permitiu aumentar a capacidade de carga de vigas de betão armado caracterizadas por terem um betão de baixa resistência. As soluções de reforço de CFRP testadas, correspondentes a percentagens de CFRP que variaram entre os 0.07% e os 0.13%, proporcionaram, com a excepção de um modelo, um aumento da capacidade máxima de carga que variou entre os 14% e os 35%. Desta forma, verifica-se que é viável a aplicação da técnica de reforço ao corte em análise para os casos em que o betão apresente uma resistência baixa.

- Os ganhos de resistência proporcionados pelos sistemas de reforço em CFRP adoptados 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 dos laminados, as soluções com laminados inclinados tiveram desempenhos semelhantes e claramente superiores ao garantido pela solução de laminados verticais.
- A extensão máxima no CFRP registada nos laminados instrumentados variou entre os 0.54% e os 0.94%. Em termos médios o valor da referida extensão para as vigas testadas foi de 0.72%, o que correspondeu a um grau de mobilização do reforço de 44%. A cedência das armaduras transversais instrumentadas no momento em que as vigas atingiram a sua capacidade máxima de carga foi verificada nas vigas reforçadas com CFRP.
- A percentagem de armadura transversal influencia a eficácia da técnica de reforço ao corte com laminados inseridos. As soluções de CFRP aplicadas a vigas com uma percentagem de estribos de aço de 0.17% conduziram a acréscimos de carga máxima de valor igual a 55% do obtido pelas mesmas soluções de reforço mas aplicadas a vigas com uma percentagem de estribos de aço de 0.10%.

## 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

- [1] Barros, J.A.O. e Dias, S.J.E., 2006, *Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams*, Journal Cement & Concrete Composites, 28(3), March, 276-292.
- [2] Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2010, *Performance of reinforced concrete T beams strengthened in shear with NSM CFRP laminates*, Engineering Structures Journal, 32( 2), February, 373-384.
- [3] 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.
- [4] Sena-Cruz, J.M. e Barros, J.A.O., 2004, *Bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete in structural strengthening*, Journal of Composites for Construction, 8(6), 519-527.
- [5] EN 206-1, 2000, *Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*, European standard, CEN, 69 pp.
- [6] EN 10002-1, 1990, *Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)*, European standard, CEN, 35 pp.
- [7] 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.
- [8] Degussa Construction Chemicals Portugal, 2003, *Fichas técnicas MBrace Resin 220*”, Maio.