

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



Salvador Dias¹



Joaquim Barros²

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um programa experimental que foi realizado para avaliar a viabilidade da aplicação da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão de elevada resistência (59.4 MPa). Seis soluções de reforço de CFRP, referentes a três tipos de orientação dos laminados (45°, 60° e 90°) e a duas percentagens de CFRP, foram aplicadas a vigas com uma percentagem de armadura transversal de 0.10% ($\rho_{sw} = 0.10\%$). As soluções de reforço com laminados inclinados (45° e 60°) foram também aplicadas a vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$. 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 elevada 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: Reforço ao corte; Laminados de CFRP inseridos; Betão de elevada resistência.

1. INTRODUÇÃO

Uma das possibilidades de reforçar ao corte vigas de betão armado é recorrer à inserção de laminados de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono) em finos entalhes efetuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. 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].

Dias e Barros [3] mostraram que a qualidade do betão tem um papel fundamental na eficácia da técnica de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos. Com efeito, ao aplicar as mesmas soluções de CFRP em vigas de betão de baixa ($f_{cm} = 18.6$ MPa) e média ($f_{cm} = 39.7$ MPa) resistência, os referidos autores verificaram que os reforços de CFRP foram mais eficazes no caso das vigas com maior valor de f_{cm} . Este facto indicia que a técnica de reforço ao corte em estudo pode ter um elevado

¹ ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. sdias@civil.uminho.pt

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

desempenho quando aplicada para o caso de estruturas de betão armado com betão de elevada resistência.

Neste trabalho apresenta-se um programa experimental que foi realizado para avaliar o grau de eficácia da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão de elevada 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 Conceção dos modelos e tipo de ensaio

O programa experimental realizado envolveu a conceção de doze modelos de vigas de betão armado de secção transversal em T com as dimensões apresentadas na Fig. 1. O modo de rotura por corte, no vão de corte a , foi imposto a todas as vigas. Neste contexto, por forma a evitar que a rotura por corte ocorresse no vão de corte b , foram aí colocados estribos de 8 mm de diâmetro afastados de 80 mm ($\phi 8@80$ 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 (Fig. 2).

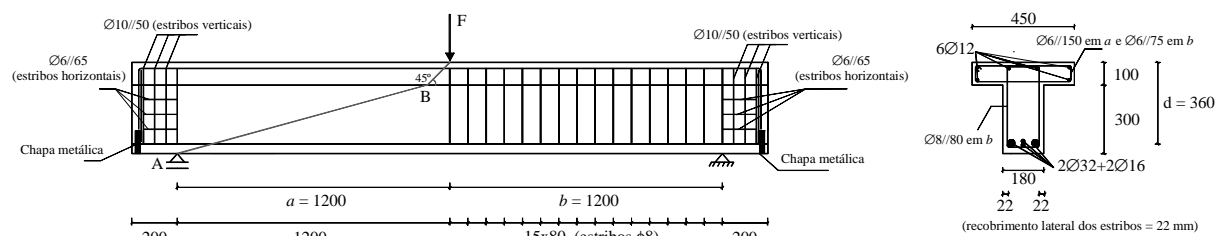


Figura 1. Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço comuns a todas as vigas ensaiadas (dimensões em mm).

O grupo de modelos ensaiados englobou sete vigas com estribos $\phi 6@300$ mm ($\rho_{sw} = 0.10\%$) e cinco vigas com estribos $\phi 6@200$ mm ($\rho_{sw} = 0.16\%$). De acordo com o Quadro 1, seis soluções de reforço de CFRP foram aplicadas em vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ (vigas 3S-6LV, 3S-10LV, 3S-5LI45, 3S-9LI45, 3S-5LI60 e 3S-8LI60). Assim, foram testados dois níveis de percentagem de CFRP e, para cada percentagem de CFRP (ρ_f), foram testadas três orientações para os laminados de CFRP (45° , 60° e 90°) de acordo com o Quadro 1 e a Fig. 2. Quer para a menor percentagem de CFRP como para a maior percentagem de CFRP, o espaçamento dos laminados para cada uma das orientações testadas foi obtido por forma a que as respetivas vigas tivessem uma capacidade máxima resistente semelhante [2].

Quatro das soluções de reforço de CFRP anteriormente referidas (ver Quadro 1 e Fig. 2) foram também aplicadas em vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$ (vigas 5S-5LI45, 5S-9LI45, 5S-5LI60 e 5S-8LI60). Desta forma, para o tipo de betão analisado no presente programa experimental (betão com um valor médio de resistência à compressão à data do ensaio das vigas igual a $f_{cm} = 59.4$ MPa), foi também possível avaliar o efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica de reforço ao corte em estudo.

Os reforços de CFRP foram distribuídos ao longo da linha AB, representada na Fig. 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 Fig. 1. As vigas foram submetidas a ensaios de flexão sob três pontos de carga até à sua rotura (Fig. 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.

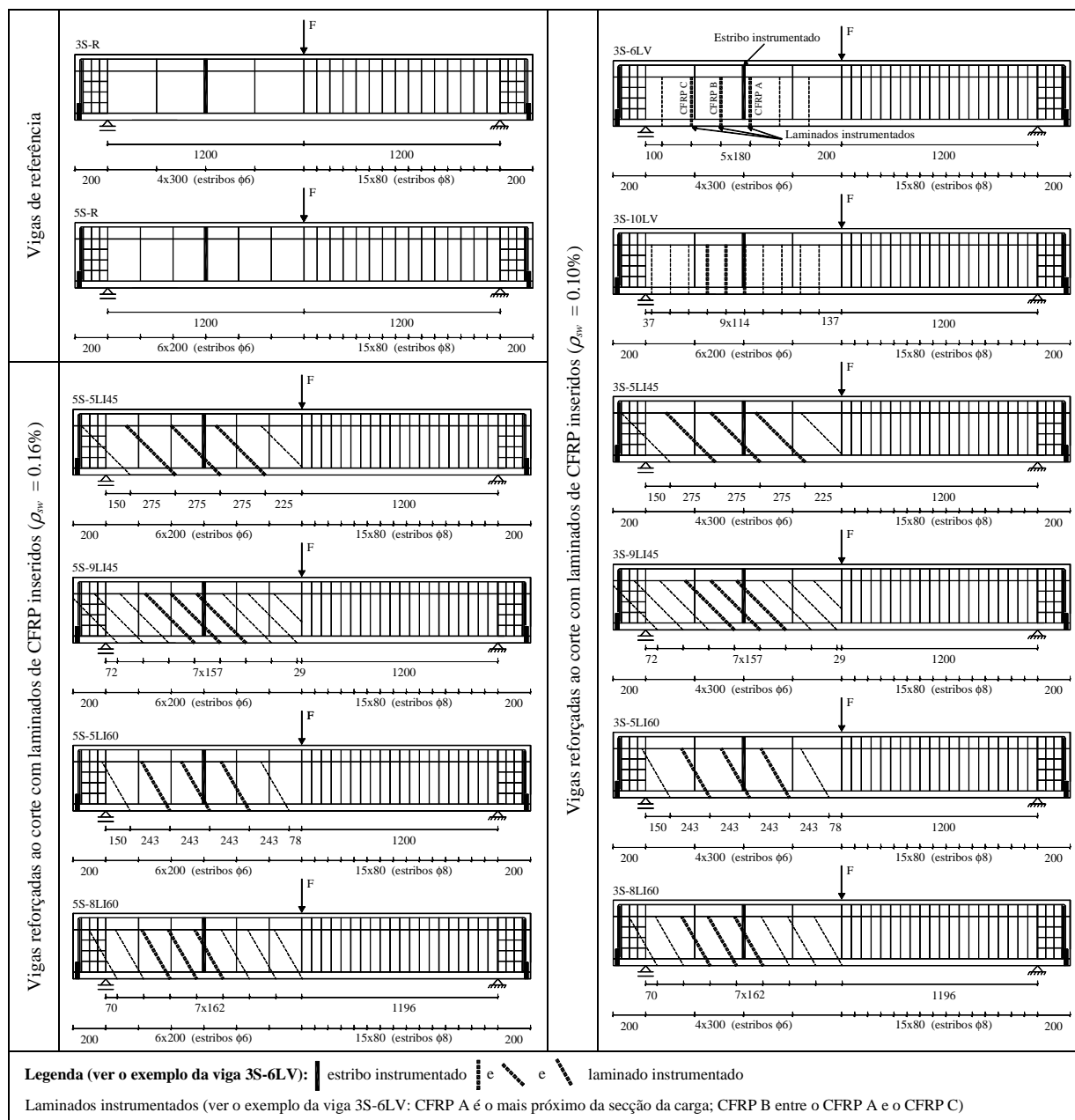


Figura 2. Localização dos estribos de aço (traço cheio) e dos laminados (tracejado) de CFRP (dimensões em mm).

Quadro 1. Soluções de reforço de CFRP testadas.

Vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ ^a	Vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$ ^b	Sistema de reforço de CFRP no vão de corte <i>a</i>			
		Quantidade	Porcentagem $[\rho_f]$ (%) ^c	Espaçamento $[s_f]$ (mm)	Ângulo $[\theta_f]$ (°) ^d
3S-6LV	-	2×6 laminados	0.08	180	90
3S-10LV	-	2×10 laminados	0.13	114	90
3S-5LI45	5S-5LI45	2×5 laminados	0.08	275	45
3S-9LI45	5S-9LI45	2×9 laminados	0.13	157	45
3S-5LI60	5S-5LI60	2×5 laminados	0.07	243	60
3S-8LI60	5S-8LI60	2×8 laminados	0.11	162	60

^a A viga 3S-R é a viga de referência sem CFRP (Fig. 2); ^b A viga 5S-R é a viga de referência sem CFRP (Fig. 2); ^c 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; ^d Orientação das fibras do CFRP em relação à direção do eixo da viga.

As extensões nos três laminados (CFRP A, CFRP B e CFRP C – ver a viga 3S-6LV na Fig. 2) com maior probabilidade de serem os mais solicitados pela fenda de rotura de corte foram obtidas por intermédio de extensómetros eléctricos colados de acordo com o esquema representado na Fig. 3a). 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 Fig. 3b). A localização dos laminados e estribos instrumentados nas vigas ensaiadas está representada na Fig. 2.

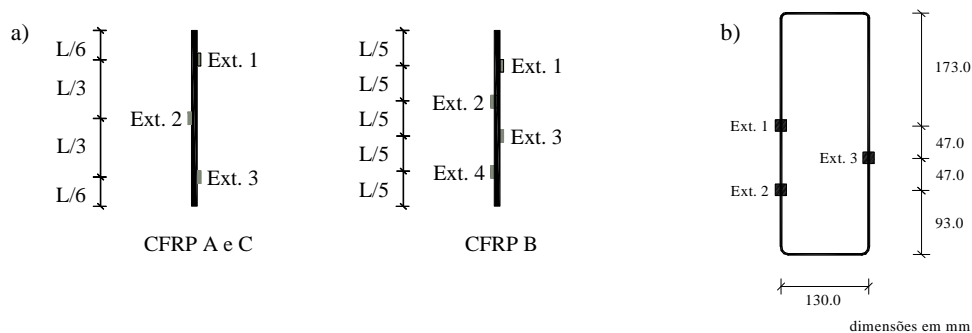


Figura 3. Posição dos extensómetros nos laminados de CFRP e nos estribos de aço instrumentados.

2.2 Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão das vigas foi efetuada experimentalmente à data da realização dos ensaios das vigas, à qual correspondeu uma idade média de 51 dias. Para tal, ensaios de compressão uniaxial sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura foram efetuados segundo as recomendações da norma EN 206-1 [4]. O valor médio da resistência à compressão obtido foi de 59.4 MPa ($f_{cm} = 59.4$ MPa). Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de varões de aço nervurado de 6 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm (dois tipos) e de 32 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tração uniaxial efetuados seguindo o estipulado na norma EN 10002-1 [5]. A caracterização dos laminados de CFRP utilizados (S&P Laminates CFK 150/2000) foi efetuada por intermédio da realização de ensaios de tração uniaxial, segundo a ISO 527-5 [6]. No Quadro 2 estão registados os valores médios, obtidos experimentalmente, das propriedades mecânicas mais significativas do aço e dos laminados de CFRP. A fixação dos laminados ao betão foi efetuada por intermédio de um adesivo epoxídico (MBrace Resin 220). Este tipo de adesivo foi testado por Bonaldo *et al.* [7] e os valores médios obtidos em termos de resistência última à tração, extensão máxima e módulo de elasticidade foram 33 MPa, 4.83% e 7.47 GPa, respetivamente.

Quadro 2. Valores das propriedades do aço e dos laminados de CFRP

	Diâmetro (mm)	$\phi 6$	$\phi 8$	$\phi 12$	$\phi 16$ (tipo I)	$\phi 16$ (tipo II)	$\phi 32$
Aço	Tensão de cedência [f_{sym}] (MPa)	551	470	450	434	544	716
	Tensão máxima [f_{sum}] (MPa)	602	611	579	572	658	908
Laminado de CFRP	Tensão de rotura	Módulo de elasticidade		Extensão máxima			
	$f_{fum} = 2847.9$ MPa	$E_{fm} = 174.3$ GPa		$\varepsilon_{fum} = 1.63\%$			

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, efetuados 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 jatos 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 mm², foram cortados com o comprimento desejado e, posteriormente, foram limpos com um desengordurante. Tal como

referido anteriormente, a fixação dos laminados foi efetuada por intermédio de um adesivo epoxídico. 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

As respostas força (F) vs deslocamento (u) na secção de aplicação da carga das vigas ensaiadas estão representadas na Fig. 4. Estas respostas traduzem 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.

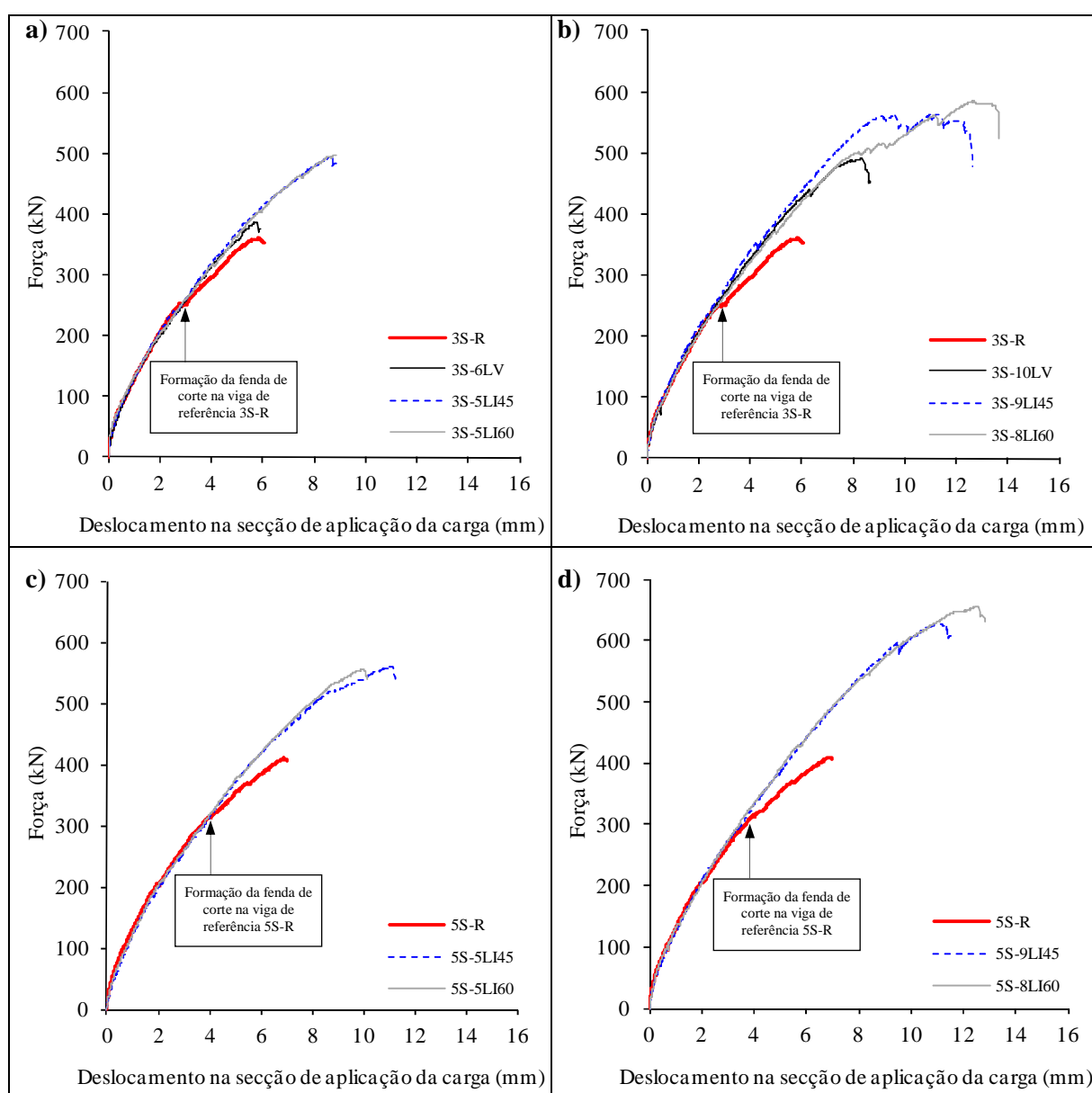


Figura 4. Vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$: Força vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com a menor (a) e a maior (b) percentagem de CFRP. Vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$: Força vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com a menor (c) e a maior (d) percentagem de CFRP.

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 força máxima registada nas vigas de referência 3S-R (viga de referência das vigas 3S-6LV, 3S-10LV, 3S-5LI45, 3S-9LI45, 3S-5LI60 e 3S-8LI60) e 5S-R (viga de referência das vigas 5S-5LI45, 5S-9LI45, 5S-5LI60 e 5S-8LI60), determinou-se o factor $\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ indicado Quadro 3 ($\Delta F_{max} = F_{max} - F_{max}^{ref}$). A flecha na secção de aplicação da carga correspondente à força máxima, designada por $u_{F_{max}}$, também está registada no Quadro 3.

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

	Vigas	F_{max} (kN)	$\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ (%)	$u_{F_{max}}$ (mm)	ε_{CFRP}^{max} (%)
$\rho_{sw} = 0.10\%$	3S-R	359.9	-	5.86	-
	3S-6LV	387.0	7.5	5.78	0.82
	3S-10LV	491.7	36.6	8.32	0.85
	3S-5LI45	492.1	36.7	8.54	1.20
	3S-9LI45	563.6	56.6	11.40	1.04
	3S-5LI60	497.9	38.3	8.83	1.50
	3S-8LI60	584.5	62.4	12.69	0.90
$\rho_{sw} = 0.16\%$	5S-R	409.7	-	6.86	-
	5S-5LI45	559.5	36.6	11.09	1.28
	5S-9LI45	627.5	53.2	11.18	0.84
	5S-5LI60	556.4	35.8	9.98	1.41
	5S-8LI60	654.6	59.8	12.47	0.88

A análise da resposta força vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas ensaiadas (Fig. 4) permite verificar que, tipicamente, o comportamento de uma viga reforçada ao corte com CFRP apresenta duas fases. A primeira em que o diagrama de comportamento da viga reforçada acompanha o da viga não reforçada até ao momento associado à formação da fenda diagonal de corte na viga de referência. A partir deste nível de carregamento (início da referida segunda fase), o reforço de CFRP oferece resistência ao desenvolvimento das fendas de corte, o que proporciona um aumento de rigidez relativamente ao que acontece na viga não reforçada. A segunda fase do comportamento de uma viga reforçada ao corte com CFRP culmina quando esta atinge a sua capacidade máxima resistente. Face ao exposto, e de acordo com o representado na Fig. 4, nesta segunda fase do comportamento, para cada nível de deslocamento, as vigas reforçadas apresentam capacidade de carga superior à da viga sem CFRP. Além disso, o deslocamento associado à carga máxima das vigas reforçadas é superior ao da viga sem CFRP (a exceção foi a viga 3S-6LV).

As soluções com a menor percentagem de laminados de CFRP (maior espaçamento entre os laminados consecutivos) foram as que conduziram a menores ganhos de capacidade máxima de carga, independentemente da percentagem de estribos. Assim, tomando em consideração o valor da carga máxima das vigas de referência (vigas 3S-R e 5S-R), as configurações de reforço referentes à menor percentagem de CFRP aplicada conduziram aos seguintes acréscimos da capacidade máxima de carga ($\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$): 36.7% (laminados a 45°) e 38.3% (laminados a 60°) para as vigas com três estribos de aço no vão de corte a ($\rho_{sw} = 0.10\%$); 36.6% (laminados a 45°) e 35.8% (laminados a 60°) para as vigas com cinco estribos de aço no vão de corte a ($\rho_{sw} = 0.16\%$).

O aumento da percentagem de CFRP nas soluções de reforço com laminados a 45° e a 60° conduziu a maiores aumentos da capacidade máxima de carga. Tomando em consideração o valor da carga máxima das vigas de referência (vigas 3S-R e 5S-R), as configurações de reforço referentes à maior percentagem de CFRP aplicada conduziram aos seguintes acréscimos da capacidade máxima de carga ($\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$): 56.6% (laminados a 45°) e 62.4% (laminados a 60°) para as vigas com três estribos de aço no vão de corte a ; 53.2% (laminados a 45°) e 59.8% (laminados a 60°) para as vigas com cinco estribos de aço no vão de corte a .

As soluções de reforço com laminados verticais, apenas aplicadas a vigas com três estribos de aço no vão de corte a , proporcionaram um acréscimo da capacidade máxima de carga ($\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$) de 7.5% e 36.6%, respetivamente, para a menor e maior percentagem de CFRP testada.

Independentemente da percentagem de CFRP, as soluções com laminados inclinados tiveram desempenhos claramente superiores ao garantido pelas soluções de laminados verticais. Refira-se que o acréscimo de capacidade máxima de carga proporcionado pela solução de reforço com a maior percentagem de laminados verticais (36.6%) foi da mesma ordem de grandeza do obtido pelas soluções de laminados inclinados referente à menor percentagem de CFRP: 36.7% (laminados a 45°) e 38.3% (laminados a 60°). Independentemente da orientação dos laminados, os ganhos de resistência proporcionados pelos sistemas de reforço em CFRP adotados foram proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, maiores valores de ρ_f garantiram maiores aumentos da capacidade resistente.

A eficácia do reforço de CFRP ($\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$) foi maior quando aplicado nas vigas com a menor percentagem de estribos de aço (Fig. 5). De acordo com os resultados obtidos, aumentando a percentagem de estribos de 0.10% para 0.16%, a eficácia do reforço de CFRP diminuiu, em termos médios, 4%.

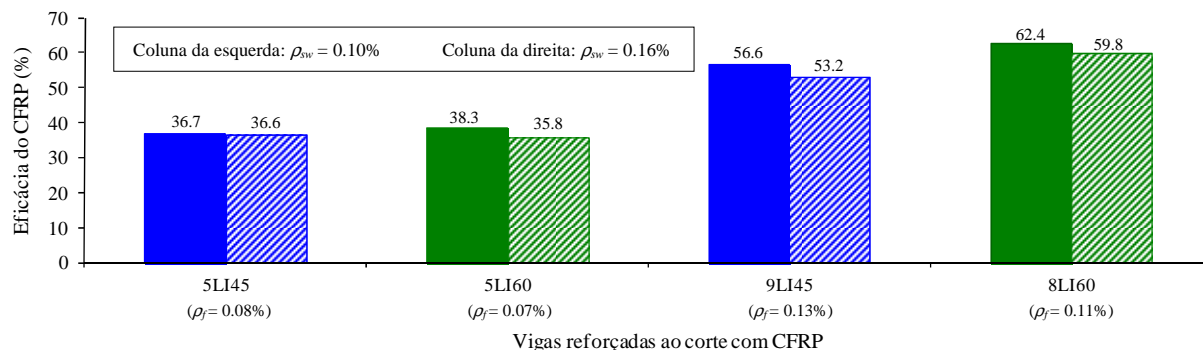


Figura 5. Efeito da percentagem de estribos de aço na eficácia do reforço de CFRP.

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 vigas de referência 3S-R e 5S-R a capacidade máxima de carga foi alcançada imediatamente antes de ocorrer a rotura de um dos estribos que atravessavam a fenda de rotura de corte.

Nas vigas reforçadas com a menor percentagem de CFRP registaram-se dois modos de rotura: o deslizamento do CFRP (interface adesivo-CFRP) atravessado pela fenda de rotura de corte (Fig. 6a) que ocorreu nas vigas 3S-6LV, 3S-5LI45, 5S-5LI45 e 5S-5LI60; rotura do CFRP que ocorreu na viga 3S-6LI60 (Fig. 6b). O deslizamento do CFRP na interface adesivo-CFRP foi o modo de rotura predominante nas vigas reforçadas com a maior percentagem de CFRP. Nas vigas em que se registou um pequeno comprimento de amarração dos laminados atravessados pela fenda de corte (Fig. 6c), a rotura ocorreu devido à cedência do CFRP (sem rotura do CFRP), tendo-se verificado que os

laminados continham betão adjacente (rotura pelo betão). Na viga 5S-9LI45 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 (Fig. 6c).

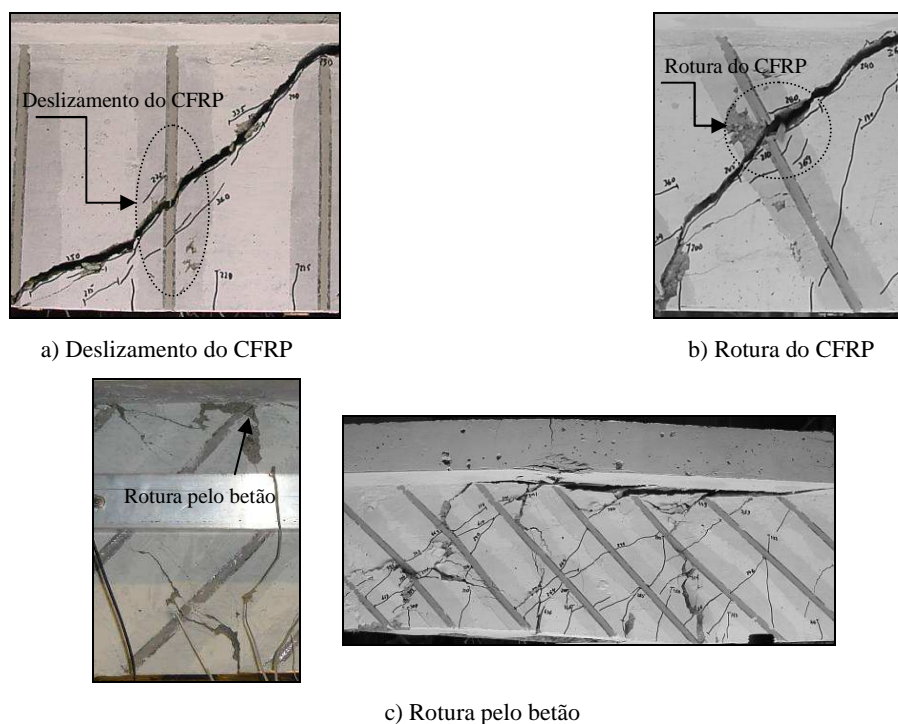


Figura 6. Modos de rotura ocorridos nas vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos.

3.3 Extensões no CFRP

No Quadro 3 apresenta-se, para cada viga reforçada, o valor da extensão máxima registada nos CFRP instrumentados antes das vigas atingirem a rotura (ε_{CFRP}^{max}). 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 0.82% (viga 3S-6LV) e 1.50% (3S-5LI60). A média dos valores de ε_{CFRP}^{max} para as vigas com CFRP ensaiadas no presente programa experimental foi de 1.07%. Em termos de orientação do CFRP, a média dos valores de ε_{CFRP}^{max} para as soluções de laminados verticais, de laminados inclinados a 45° e de laminados inclinados a 60° foi de 0.84%, 1.09% e 1.17%, respetivamente. Estes valores variam entre 51% a 72% da extensão máxima obtida nos ensaios de tração direta dos laminados (1.63% - Quadro 2).

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 elevada resistência (59.4 MPa de resistência à compressão). As soluções de reforço de CFRP testadas, correspondentes a percentagens de CFRP que variaram entre 0.07% e 0.13%, proporcionaram, com a exceção de um modelo, um aumento da capacidade máxima de carga que variou entre 36% e 62%.

- Os ganhos de resistência proporcionados pelos sistemas de reforço em CFRP adotados foram proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, maiores valores de ρ_f garantiram maiores aumentos da capacidade resistente. Em termos de orientação dos laminados, as soluções com laminados inclinados tiveram desempenhos claramente superiores ao garantido pelas soluções de laminados verticais.
- A extensão máxima no CFRP registada nos laminados instrumentados variou entre os 0.82% e os 1.50%. Em termos médios o valor da referida extensão para as vigas testadas foi de 1.07%, o que correspondeu a um grau de mobilização médio do reforço de 66%. 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.
- As soluções de CFRP aplicadas a vigas com uma percentagem de estribos de aço de 0.16% conduziram a acréscimos de carga máxima de valor igual a 96% 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 de CFRP, à Unibetão (Braga) pelo fornecimento do betão e à Degussa Construction Chemicals Portugal pelo fornecimento do adesivo. A investigação desenvolvida neste trabalho faz parte do projeto PTDC/ECM/114511/2009.

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] Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2011, “*Shear strengthening of RC T-section beams with low strength concrete using NSM CFRP laminates*”, *Journal Cement & Concrete Composites*, Volume 33, Issue 2, February, pp. 334-345.
- [4] EN 206-1, 2000, *Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*, European standard, CEN, 69 pp.
- [5] EN 10002-1, 1990, *Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)*, European standard, CEN, 35 pp.
- [6] 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.
- [7] Bonaldo, E., Barros, J.A.O. and Lourenço, P.J.B., 2005, “*Steel fibre reinforced concrete and CFRP laminate strips for high effective flexural strengthening of RC slabs*”, Relatório Técnico 05-DEC/E-14, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Outubro, 103 pp.