

COMPORTAMENTO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS AO CORTE POR INSERÇÃO DE LAMINADOS DE CFRP



Salvador Dias
Assistente
UM
Guimarães



Joaquim Barros
Professor Associado
UM
Guimarães

SUMÁRIO

Neste trabalho apresenta-se o programa experimental realizado para avaliar a influência da percentagem e orientação de laminados de CFRP quando aplicados no reforço ao corte de vigas de betão armado usando a técnica da inserção de laminados em entalhes efectuados no betão de recobrimento. Os resultados obtidos são apresentados e analisados em termos do comportamento estrutural das vigas ensaiadas, modos de rotura e desempenho do CFRP.

Palavras-chave: Vigas de betão; Laminados de CFRP; Reforço ao corte; Técnica da montagem à superfície

1. INTRODUÇÃO

A investigação realizada até ao momento, no que diz respeito ao reforço ao corte de vigas de betão armado com CFRP, tem-se centrado em duas técnicas de reforço: a da colagem externa de mantas, tecidos ou laminados de CFRP (uma síntese de vários estudos já realizados pode ser lida em [1]) e a da inserção de varões [2] ou laminados de CFRP [3] em entalhes efectuados no betão de recobrimento. A primeira é designada na literatura internacional por “*Externally Bonded Reinforcement*” (EBR) e a segunda por “*Near Surface Mounted*” (NSM).

No que respeita à técnica NSM com laminados de CFRP foi já efectuada a sua validação por comparação directa com a técnica EBR usando mantas de CFRP em forma de U [4]. A técnica NSM conduziu a um melhor comportamento estrutural das vigas, tendo-se também verificado ser de mais fácil e rápida aplicação que a técnica EBR. Posteriormente à referida validação,

efectuada em vigas de betão armado de pequenas dimensões, com secção transversal rectangular e sem conterem qualquer percentagem de estribos de aço, foi iniciada uma vasta campanha de ensaios experimentais de forma a avaliar o efeito dos vários parâmetros que podem influenciar o comportamento de uma viga de betão armado reforçada ao corte usando a técnica NSM com laminados de CFRP (percentagem e orientação do CFRP, percentagem de estribos de aço, tipo de betão e a relação a/d , em que a é o vão de corte e d a altura útil da secção transversal). Neste trabalho será apresentado um programa experimental com vigas T de betão armado em que a percentagem e orientação de CFRP foram os parâmetros avaliados. Foram analisadas três orientações para os laminados e, para cada umas destas orientações, foram consideradas três percentagens de CFRP. Com o objectivo de simular situações próximas dos cenários reais no reforço estrutural, as vigas tinham uma secção transversal em T e apresentavam uma determinada percentagem de armadura transversal (estribos de aço).

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Concepção dos modelos e tipo de ensaio

O programa experimental realizado envolveu a concepção de doze 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, concretamente na forma como foi aí garantida a resistência ao esforço transversal (Figura 2).

O grupo de modelos ensaiados englobou uma viga sem qualquer reforço ao corte (C-R) uma viga com estribos $\phi 6@300\text{mm}$ (viga 2S-R com ρ_{sw} de 0.10%), uma viga com estribos $\phi 6@130\text{mm}$ (viga 6S-R com ρ_{sw} de 0.24%) e nove vigas, contendo estribos $\phi 6@300\text{mm}$, reforçadas ao corte com distintas soluções em termos de distribuição de CFRP. Assim, foram testadas três formas de configuração de reforço ao corte em termos de orientação do CFRP relativamente à direcção do eixo da viga (laminados inseridos em entalhes verticais (90°), inclinados a 45° e inclinados a 60°) e, para cada umas destas orientações, foram analisadas três percentagens de CFRP (ρ_{fw}). A percentagem de reforço de CFRP foi obtida por:

$$\rho_{fw} = \frac{2 \cdot a_f \cdot b_f}{b_w \cdot s_f \cdot \text{sen} \theta_f} \quad (1)$$

em que $a_f = 1.4 \text{ mm}$ e $b_f = 10 \text{ mm}$ são as dimensões da secção transversal do laminado, $b_w = 180 \text{ mm}$ é a largura da alma da viga, s_f é o espaçamento consecutivo entre laminados e θ_f é a inclinação dos laminados.

O pré-dimensionamento dos modelos ensaiados foi efectuado de forma a terem rotura por corte. A obtenção da quantidade de CFRP referente às vigas com o valor mais elevado de ρ_{fw} , independentemente da orientação dos laminados (θ_f), 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 ($\phi 6@130\text{mm}$ no menor vão de corte). 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 ACI Committe 440 [5] para a técnica EBR (4‰) e o valor de 5.9‰ obtido em ensaios de pull-out usando laminados de CFRP aplicados segundo a técnica NSM [6]. Estas condições traduziram-se nas seguintes soluções de reforço com CFRP para o menor vão de corte (a): oito laminados em cada face da viga, para os casos dos reforços dispostos na vertical e com uma inclinação de 45°, e sete laminados em cada face da viga para o caso do reforço inclinado a 60°. Para as três orientações de reforço analisadas (90°, 45° e 60°), as soluções de reforço referentes à percentagem mínima e intermédia de CFRP foram as seguintes: três laminados de CFRP para a percentagem mínima de reforço e cinco laminados de CFRP 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 de forma a que as respectivas vigas tivessem uma capacidade máxima resistente semelhante.

No Quadro 1 e nas Figuras 1 e 2 apresentam-se os dados relativos às vigas ensaiadas. Os laminados 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 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).

Quadro 1: Informações gerais sobre os modelos ensaiados

Viga	Sistema de reforço ao corte no menor vão de corte (a)				
	Material	Quantidade	Percentagem (%)	Espaçamento (mm)	Ângulo (°)
C-R	-	-	-	-	-
2S-R	Estribos de aço	2 $\phi 6$ de dois ramos	0.10	300	90
6S-R	Estribos de aço	6 $\phi 6$ de dois ramos	0.24	130	90
2S-3LV	Estribos de aço	2 $\phi 6$ de dois ramos	0.10	300	90
	CFRP	2x3 laminados	0.06	267	90
2S-5LV	Estribos de aço	2 $\phi 6$ de dois ramos	0.10	300	90
	CFRP	2x5 laminados	0.10	160	90
2S-8LV	Estribos de aço	2 $\phi 6$ de dois ramos	0.10	300	90
	CFRP	2x8 laminados	0.16	100	90
2S-3LI45	Estribos de aço	2 $\phi 6$ de dois ramos	0.10	300	90
	CFRP	2x3 laminados	0.06	367	45
2S-5LI45	Estribos de aço	2 $\phi 6$ de dois ramos	0.10	300	90
	CFRP	2x5 laminados	0.10	220	45
2S-8LI45	Estribos de aço	2 $\phi 6$ de dois ramos	0.10	300	90
	CFRP	2x8 laminados	0.16	138	45
2S-3LI60	Estribos de aço	2 $\phi 6$ de dois ramos	0.10	300	90
	CFRP	2x3 laminados	0.06	325	60
2S-5LI60	Estribos de aço	2 $\phi 6$ de dois ramos	0.10	300	90
	CFRP	2x5 laminados	0.09	195	60
2S-7LI60	Estribos de aço	2 $\phi 6$ de dois ramos	0.10	300	90
	CFRP	2x7 laminados	0.13	139	60

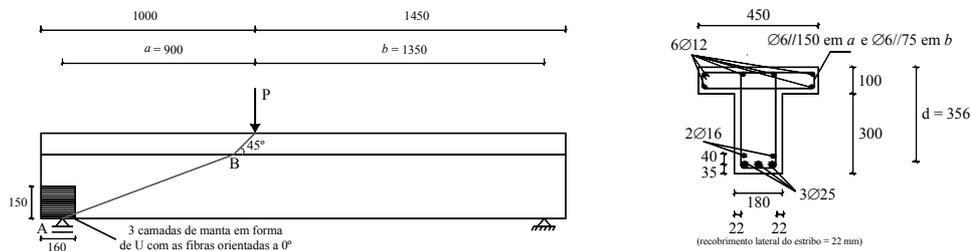


Figura 1: Modelos ensaiados e tipo de ensaio (medidas em mm)

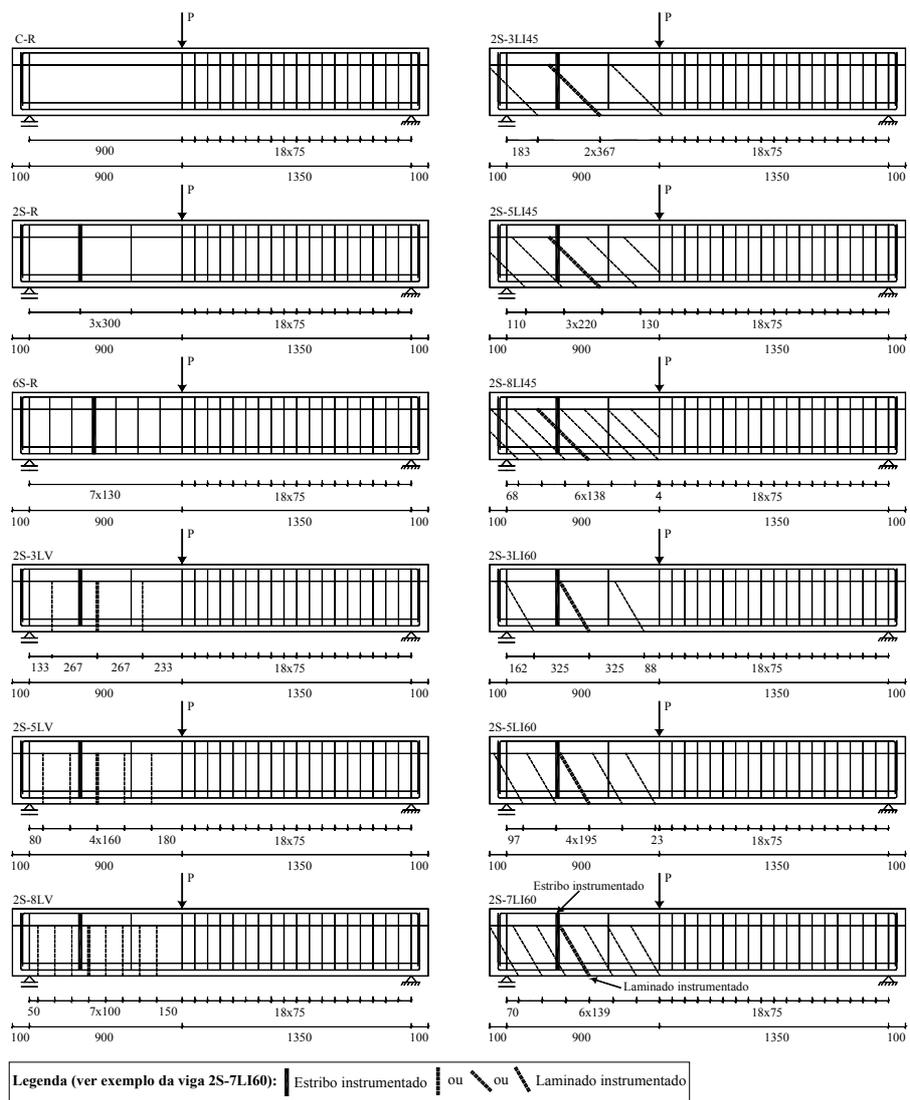


Figura 2: Modelos ensaiados: localização dos estribos de aço verticais (traço cheio) e dos laminados (a tracejado) e respectiva instrumentação (medidas em mm)

As vigas foram submetidas a três pontos de carga até à sua rotura, de acordo com o representado na Figura 1. 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 no laminado com maior probabilidade de ser o mais solicitado pela fenda de rotura de corte foram obtidas por intermédio de quatro extensómetros eléctricos colados de acordo com o esquema representado na Figura 3. Adoptando o mesmo princípio, o estribo mais próximo do apoio foi instrumentado com três extensómetros eléctricos de acordo com a configuração representada na Figura 3. A localização dos laminados e estribos instrumentados para cada uma das vigas ensaiadas está representada na Figura 2.

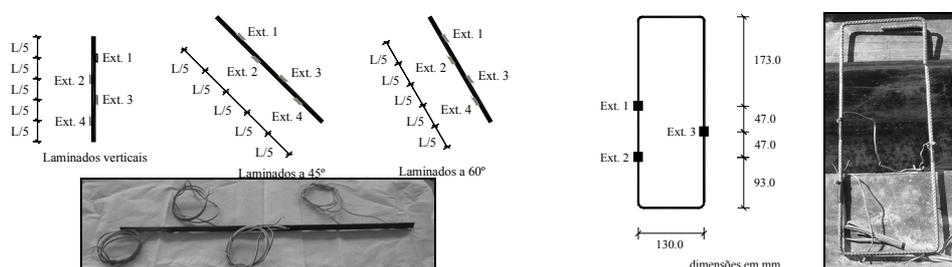


Figura 3: Instrumentação dos laminados e dos estribos de aço

2.2 Caracterização dos materiais

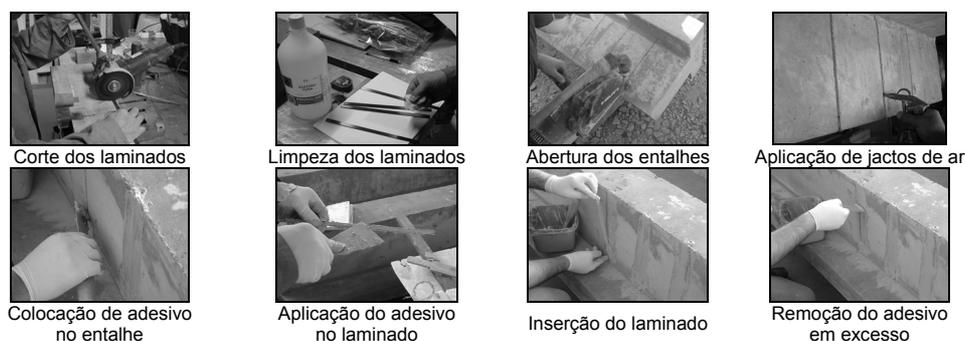
No Quadro 2 apresentam-se os resultados dos ensaios efectuados para caracterizar o betão, os aços e o laminado de CFRP. A resistência média à compressão do betão, f_{cm} , foi obtida por intermédio da realização de ensaios de compressão uniaxial em cilindros segundo o estipulado na NP-ENV206, aos 28 dias de idade e à data da realização dos ensaios das vigas. Para caracterizar as armaduras utilizadas (aço nervurado de 6 mm, 12 mm, 16 mm e de 25 mm de diâmetro) foram efectuados ensaios de tracção uniaxial segundo a EN 10002-1. A caracterização dos laminados de CFRP utilizados (S&P Laminates CFK 150/2000), com secção transversal de $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ foi efectuada por intermédio da realização de ensaios de tracção uniaxial, segundo a ISO 527-5.

Quadro 2: Características dos materiais utilizados (valores experimentais)

Betão	Resistência à compressão				
	$f_{cm} = 26.0 \text{ MPa}$ (aos 28 dias)	$f_{cm} = 31.1 \text{ MPa}$ (aos 70 dias - idade à data dos ensaios das vigas)			
Aço	Resistência à tracção	$\phi 6$	$\phi 12$	$\phi 16$	$\phi 25$
	f_{sym} (Tensão de cedência)	533 MPa	446 MPa	447 MPa	444 MPa
	f_{sum} (Tensão última)	592 MPa	564 MPa	561 MPa	574 MPa
Laminado de CFRP	Resistência à tracção	Módulo de Elasticidade	Extensão máxima	Espessura	
	$f_{lum} = 2952 \text{ MPa}$ (Tensão última)	$E_{fm} = 166.6 \text{ GPa}$	$\epsilon_{lum} = 17.7 \text{ ‰}$	1.4 mm	

2.3 Reforço dos modelos

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 com espessura de cerca de 22 mm, tendo-se assegurado que nenhum estribo foi danificado pela abertura dos entalhes. Os laminados de CFRP, fornecidos em rolos de 150 m com as dimensões anteriormente referidas, foram cortados com o comprimento desejado e, posteriormente, foram limpos com um desengordurante. A fixação dos laminados de CFRP foi efectuada por intermédio de um adesivo epoxídico (MBrace Resin 220). 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 termina com a remoção do adesivo em excesso e a execução do acabamento final. Na Figura 4 ilustram-se algumas das fases da aplicação do reforço.



<p>ABERTURA DOS ENTALHES</p> <ul style="list-style-type: none"> — Necessidade de garantir o alinhamento e as dimensões dos entalhes (largura e profundidade) — Necessidade de garantir que as armaduras existentes não sejam danificadas (longitudinais e transversais) — Betão deve apresentar-se seco, isento de gorduras e poeiras (necessidade de aplicação de jactos de ar)
<p>PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS PARA A APLICAÇÃO DO REFORÇO</p> <ul style="list-style-type: none"> — Corte dos laminados de CFRP com o comprimento desejado — Limpeza dos laminados de CFRP com um desengordurante — Preparação do adesivo epoxídico (garantir as dosagens das suas componentes e do seu modo de mistura)
<p>INSERÇÃO DOS LAMINADOS DE CFRP</p> <ul style="list-style-type: none"> — Aplicação de adesivo no laminado de CFRP — Preenchimento do entalhe com adesivo — Inserção do laminado de CFRP no entalhe — Remoção do adesivo em excesso
<p>CONTROLO DE QUALIDADE (ANTES, DURANTE E APÓS A APLICAÇÃO)</p> <ul style="list-style-type: none"> — Nos materiais utilizados (testes normalizados nos CFRP e nos adesivos) — Nas condições de aplicação (condições ambientais, "pot life" do adesivo epoxídico) — Durante a aplicação (controlo do número de laminados aplicados, existência de vazios)
<p>ACABAMENTO (OPCIONAL)</p> <ul style="list-style-type: none"> — Pintura,..... (estética, protecção ao fogo e raios ultra violetas)

Figura 4: Aplicação da técnica de reforço NSM e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação

O sucesso da técnica NSM com laminados de CFRP e, conseqüentemente, o nível de desempenho do CFRP passa necessariamente pela qualidade com que é realizada a tarefa de execução de reforço. Na Figura 4 apresenta-se um organigrama que regista, de uma forma resumida, os passos fundamentais numa operação de reforço com CFRP usando a técnica NSM, incluindo os aspectos essenciais para um rigoroso controlo de qualidade da execução do reforço.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS 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 as designações F_{max}^{2S-R} e F_{max}^{6S-R} à carga máxima registada nas vigas de referência contendo, respectivamente, a menor (viga 2S-R: $\phi 6@300\text{mm}$) e a maior (viga 6S-R: $\phi 6@130\text{mm}$) percentagem de armadura transversal, determinaram-se os factores $\Delta F_{max}/F_{max}^{2S-R}$ e F_{max}/F_{max}^{6S-R} indicados no Quadro 3. Neste quadro 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 (ΔF), 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} . As flechas na secção de aplicação da carga correspondentes ao parâmetro $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$ e à carga máxima também estão registadas no Quadro 3.

As respostas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga e a relação $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$ vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com CFRP estão apresentadas na Figura 5. O primeiro tipo de resposta 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.

Quadro 3 - Principais resultados em termos de capacidade de carga

Viga	F_{max} (kN)	$\Delta F_{max}/F_{max}^{2S-R}$ (%)	F_{max}/F_{max}^{6S-R}	$(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$ (%)	$u(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$ (mm)
C-R	243	-	0.59	-	-
2S-R	315	0.0	0.77	0.0	-
6S-R	410	30.2	1.00	30.2	7.4 (7.4)
2S-3LV	316	0.3	0.77	13.4	3.84 (4.94)
2S-5LV	357	13.3	0.87	17.3	5.05 (7.11)
2S-8LV	396	25.7	0.97	26.5	5.1 (6.22)
2S-3LI45	328	4.1	0.80	8.7	4.13 (5.73)
2S-5LI45	384	21.9	0.94	22.1	5.79 (5.92)
2S-8LI45	382	21.3	0.93	28.2	4.8 (5.07)
2S-3LI60	374	18.7	0.91	19.6	5.76 (5.78)
2S-5LI60	392	24.4	0.96	24.4	5.93 (5.93)
2S-7LI60	406	28.9	0.99	33.0	5.04 (5.86)

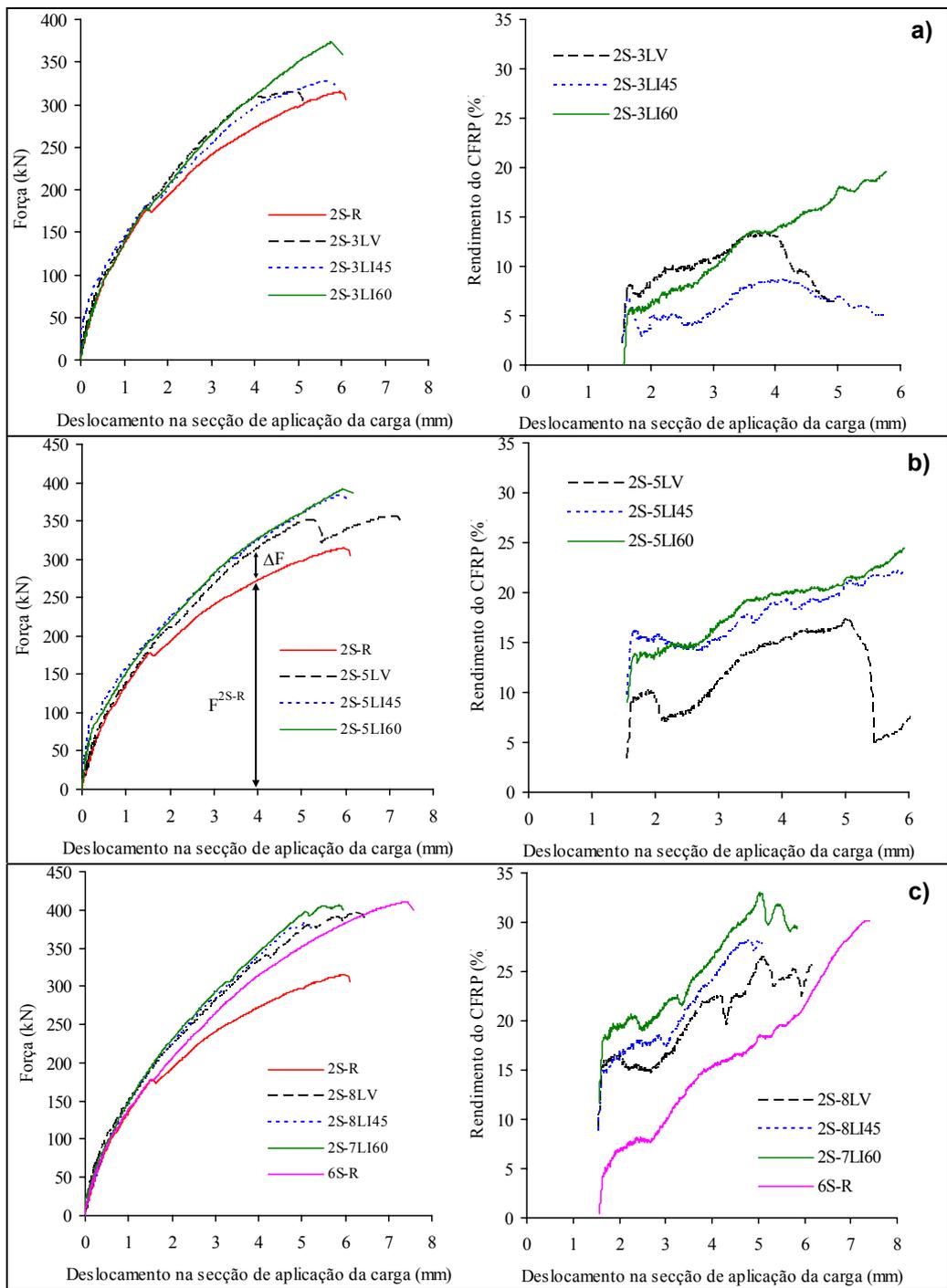


Figura 5: Comportamento das vigas ensaiadas: a) percentagem mínima de CFRP; b) percentagem intermédia de CFRP; c) percentagem máxima de CFRP

A análise dos dados do Quadro 3 e da Figura 5 permite constatar que a presença dos laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da percentagem e orientação do CFRP, 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 quebra momentânea da capacidade de carga que se verificou na curva de comportamento da viga 2S-R, para uma carga de cerca de 170 kN e uma flecha na secção de aplicação da carga de 1.5 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 5.

As soluções com a menor percentagem de CFRP (maior espaçamento entre os laminados) foram as que conduziram a menores ganhos de capacidade de carga máxima: 0.3%, 4.1% e 18.7%, respectivamente, para a solução de laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60°. No entanto, em termos do parâmetro $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$ a contribuição das soluções de reforço das vigas 2S-3LV e 2S-3LI45 foi maior (13.4% e 8.7%, respectivamente, do que em termos de contributo para o aumento da capacidade máxima de carga (para a viga 2S-3LI60 $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}=19.6\%$), indicando que as referidas duas soluções garantiram um apreciável contributo em termos de rigidez.

Em relação às soluções de CFRP correspondentes ao valor intermédio de ρ_{fv} , o reforço com laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° garantiu, tomando como base de comparação a carga máxima da viga 2S-R, um aumento de 13.3%, 21.9% e 24.4%, respectivamente. Para esta gama de ρ_{fv} , apenas as vigas 2S-5LV e 2S-5LI45 tiveram valores de $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$ superiores ao aumento que proporcionaram em termos de carga máxima (17.3% e 22.1%, respectivamente).

Das vigas reforçadas com o maior valor de ρ_{fv} , a solução com laminados inclinados a 60°, tal como aconteceu nas restantes percentagens, foi a mais eficaz, garantindo, relativamente à carga máxima da viga 2S-R, um aumento, em termos de capacidade de carga máxima, de 28.9%, enquanto as soluções com laminados verticais e inclinados a 45° garantiram um aumento de 25.7% e 21.3%, respectivamente. Em termos de $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$ verificou-se que as soluções de laminados a 60°, 45° e 90° proporcionaram valores de 33.0%, 28.2% e 26.5%, respectivamente.

Conforme foi referido anteriormente, as vigas reforçadas com a maior percentagem de CFRP foram concebidas de forma a terem uma capacidade de carga máxima semelhante à da viga de referência 6S-R. Os resultados demonstram que esse objectivo foi, de um modo geral, atingido uma vez que a capacidade de carga máxima da viga reforçada com a maior percentagem de laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° foi, respectivamente, 97%, 93% e 99% da atingida pela viga 6S-R. Comparando as curvas de comportamento das vigas reforçadas com o maior valor de ρ_{fv} com o da viga “equivalente” em termos de betão armado (6S-R) é possível constatar o melhor comportamento das vigas com CFRP após o momento correspondente à formação da fenda diagonal de corte na viga 2S-R. Com efeito, o número de laminados aplicados conduziu a um aumento significativo de rigidez, que não foi tão evidente no caso da viga 6S-R.

3.2 Efeito da percentagem e da orientação do CFRP

Na Figura 6 apresenta-se, para cada uma das vigas com CFRP o acréscimo de carga máxima (primeira coluna) e o valor $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$ (segunda coluna) na qual é possível observar a influência da percentagem e da orientação do CFRP na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP quando aplicada no reforço ao corte de vigas de betão armado. De um modo geral verifica-se que, independentemente da percentagem de CFRP, a solução com laminados inclinados a 60° foi a mais eficaz das três orientações analisadas. A análise da Figura 6 permite constatar que as soluções de laminados a 45° tiveram melhor desempenho que as soluções de laminados verticais.

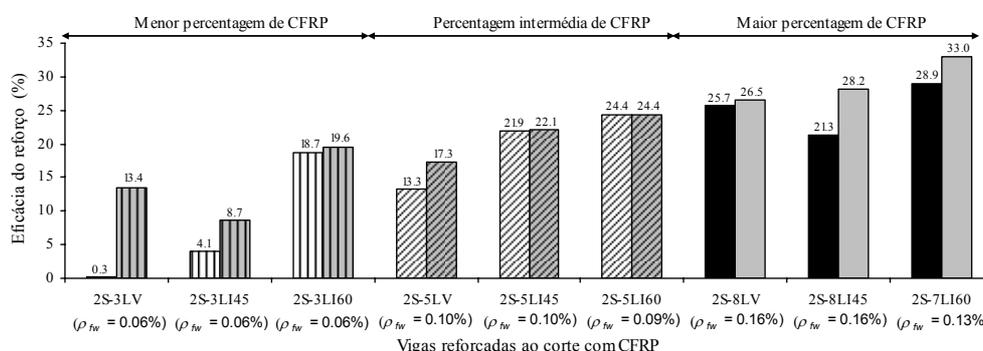


Figura 6: Eficácia do reforço de CFRP nos modelos ensaiados

Em termos da menor percentagem de CFRP aplicada, o ganho de resistência da solução de reforço a 60° foi cerca de 4.5 vezes superior ao garantido pela solução de reforço a 45°. O valor de F_{max} da viga 2S-3LI60 ($\rho_{fw} = 0.06\%$) foi 1.4 vezes superior ao da viga 2S-5LV ($\rho_{fw} = 0.1\%$) e foi cerca de 86% de F_{max} das vigas 2S-5LI45 ($\rho_{fw} = 0.1\%$) e 2S-8LI45 ($\rho_{fw} = 0.16\%$). Para o menor valor de ρ_{fw} , a solução de laminados verticais não trouxe qualquer benefício em termos de capacidade máxima de carga (0.3%), enquanto que para o caso do aplicado a 45° o ganho de resistência na rotura foi cerca de 4%. O valor de $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$ da viga 2S-3LI60 (19.6%) foi bastante superior ao atingido pelas vigas 2S-3LI45 e 2S-3LV: 13,4 e 8.7%, respectivamente. Analisando os dados relativos às vigas 2S-8LV, 2S-8LI45 e 2S-7LI60, verificou-se que o melhor desempenho da solução a 60° foi, também, bastante evidente no caso da percentagem máxima de CFRP usada. Com efeito, foi a solução de laminados a 60°, à qual correspondeu a menor percentagem máxima de CFRP aplicada ($\rho_f = 0.13\%$, enquanto para as outras duas soluções $\rho_{fw} = 0.16\%$), que proporcionou o maior aumento da capacidade máxima de carga (29%) e atingiu o maior valor de $(\Delta F/F^{2S-R})_{max} = 33\%$. Algo de semelhante se passou para a percentagem intermédia de CFRP utilizada. De facto, a solução de laminados a 60° ($\rho_f = 0.09\%$) proporcionou um acréscimo de capacidade de carga máxima de 24% e $(\Delta F/F^{2S-R})_{max} = 24\%$, valores superiores aos registados nas soluções de laminados verticais (13% e 17%) e laminados inclinados a 45° (22%), para as quais a percentagem de reforço ao corte (ρ_{fw}) era de 0.1%. A carga máxima da viga 2S-5LI60 só foi ultrapassada pelas obtidas nas vigas 2S-8LV ($\rho_{fw} = 0.16\%$) e 2S-7LI60 ($\rho_{fw} = 0.13\%$).

Os ganhos de resistência proporcionados pelos reforços de CFRP adoptados (F_{max} e $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$) foram, de um modo geral, proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_{fw}), ou

seja, o aumento da percentagem ρ_{fW} garantiu um maior aumento da capacidade de carga (a única excepção foi o caso da viga 2S-8LI45 ($\rho_{fW} = 0.16\%$) que teve uma capacidade de carga máxima ligeiramente inferior à da viga 2S-5LI45 ($\rho_{fW} = 0.1\%$)). No entanto verificou-se que não existe uma proporcionalidade directa entre a percentagem de CFRP e o acréscimo de capacidade de carga máxima. Neste aspecto foi a solução com laminados a 60° que proporcionou uma maior proximidade com a referida proporcionalidade.

3.3 Modos de rotura

Como era esperado, a rotura por corte acabou por se registar em todas as vigas ensaiadas, tendo ocorrido no menor dos vãos de corte. Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 apresentam-se pormenores da zona de rotura das vigas de referência (apenas betão armado) e das vigas com ρ_{fW} mínima, intermédia e máxima, respectivamente.

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 6S-R a capacidade máxima de carga foi atingida quando ocorreu a rotura de um dos estribos que atravessavam a fenda de rotura de corte. Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 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.



Figura 7: Modo de rotura das vigas sem reforço ao corte com CFRP

O modo de rotura típico observado nas vigas com a menor percentagem de CFRP foi a cedência do laminado central, com destacamento de betão adjacente ao CFRP. O melhor desempenho da solução de laminados a 60° esteve associado ao facto da única fenda diagonal de corte que ocorreu ter sido interceptada por dois estribos e um laminado. Tal facto não ocorreu nas vigas 2S-3LV e 2S-3LI45, onde se formaram duas fendas diagonais de corte cada uma interceptada por um estribo e um laminado.

Na viga 2S-5LV ocorreu uma quebra de rigidez por volta dos 2 mm de deformação na secção de aplicação da carga, em virtude da formação de fendas de corte. Devido à presença dos laminados, a rigidez da viga foi recuperada e a capacidade de carga aumentou até aos 350 kN, quando ocorreu uma quebra de carga devido ao deslizamento do laminado central (parte inferior). Após a quebra de carga referida, dos 350 kN para os 315 kN, a capacidade resistente da viga voltou a aumentar até aos 357 kN, altura em que se deu a rotura de um dos estribos de aço. A carga máxima da viga 2S-5LI45 foi atingida quando ocorreu o destacamento da parte inferior do segundo laminado a contar do apoio da viga, a que se seguiu o destacamento do laminado central (parte superior). A capacidade de carga da viga 2S-5LI60 aumentou até ao momento em que ocorreu o destacamento do laminado central. Para estas duas últimas vigas a rotura dos dois estribos presentes no vão de corte reforçado com CFRP ocorreu posteriormente ao momento em que as vigas atingiram a sua capacidade máxima de carga. Tal

como aconteceu nas vigas com a percentagem mínima de CFRP, os laminados que cederem nas vigas 2S-5LI45 e 2S-5LI60, e que originaram a rotura das vigas, continham betão adjacente. Desta forma confirma-se que a resistência do betão tem um papel fundamental no desempenho do reforço de CFRP.

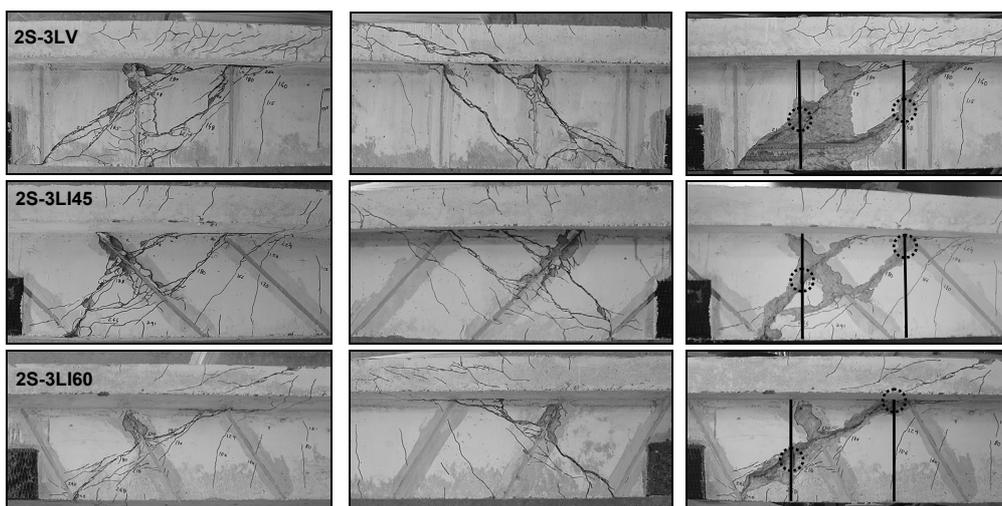


Figura 8: Modo de rotura das vigas com a percentagem mínima de CFRP

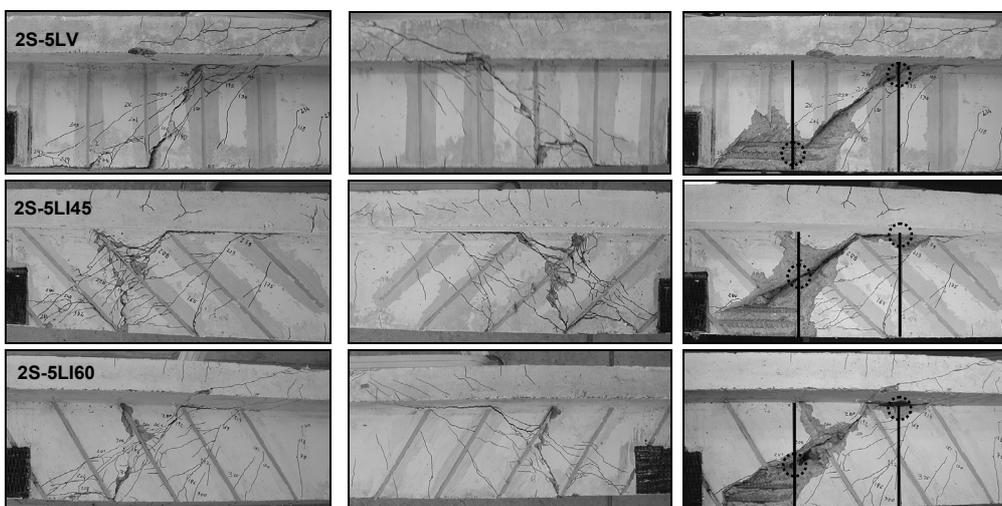


Figura 9: Modo de rotura das vigas com a percentagem intermédia de CFRP

Na viga 2S-8LV ocorreu o destacamento do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga com um comprimento de colagem de cerca de 6 cm. A carga máxima foi atingida com o destacamento do quinto laminado a contar da secção de aplicação da carga, no lado oposto ao que se verificou o destacamento anteriormente referido, sendo de 11cm o comprimento de amarração. Após a carga máxima os dois estribos localizados no menor dos vãos de corte atingiram a rotura. A carga máxima da viga 2S-8LI45 foi atingida com o destacamento do

quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga (parte superior), seguido do destacamento da parte superior do quinto laminado a contar da secção de aplicação da carga. Posteriormente ocorreu a rotura dos dois estribos localizados no menor vão de corte da viga. A carga máxima da viga 2S-7LI60 foi atingida imediatamente antes do destacamento do laminado central. De seguida deu-se o destacamento do terceiro laminado a contar da secção da carga (parte superior). Nesta viga apenas o estribo mais próximo do apoio atingiu a rotura. De um modo geral, nas vigas com a maior percentagem de CFRP a fenda de rotura de corte não era visível no final do ensaio. Contudo, após a remoção do betão que se destacou foi possível verificar a banda de fendilhação de corte que originou a rotura das vigas.

O padrão de fendilhação instalado nas vigas reforçadas com CFRP é dependente da percentagem de reforço, tornando-se mais difuso à medida que a percentagem de CFRP aumenta. Quando a percentagem de CFRP é significativa, o número elevado de laminados e o padrão de fendilhação instalado podem originar pequenos comprimentos de aderência do CFRP. Este facto pode promover uma menor eficiência do reforço de CFRP uma vez que, com menores comprimentos de aderência a cedência do laminado é mais prematura. Além disso, o menor espaçamento dos CFRP pode induzir uma intercepção das linhas de rotura associadas à cedência do CFRP proporcionando o aparecimento de uma camada de betão que se destaca (efeito de grupo), conforme pode ser observado no caso da viga 2S-8LI45. Este facto indicia que, para uma determinada solução de reforço ao corte com CFRP, deve existir um limite mínimo para o espaçamento dos laminados a partir do qual não há mais contributo na capacidade resistente da viga em termos de esforço transversal.

Na Figura 11 apresenta-se o aspecto final das vigas 2S-3LI45, 2S-5LI45 e 2S-8LI45 onde é possível verificar o efeito da percentagem de CFRP no modo de rotura das vigas.

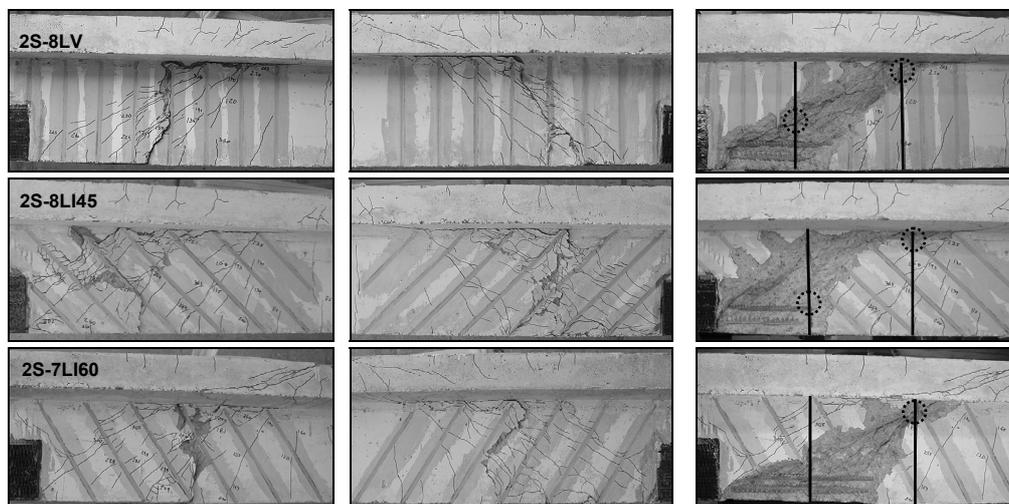


Figura 10: Modo de rotura das vigas com a percentagem máxima de CFRP

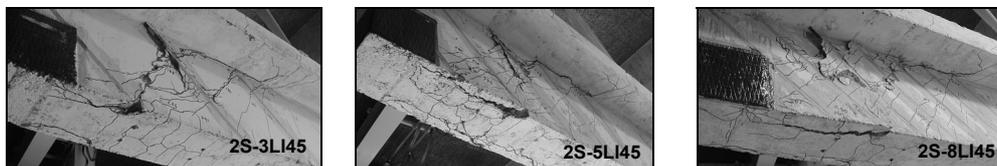


Figura 11: Efeito da percentagem de CFRP no modo de rotura das vigas

3.4 Extensão no CFRP e nas armaduras

No Quadro 4 apresentam-se, para cada viga ensaiada, os valores das extensões no CFRP correspondentes à carga máxima e, quando a extensão máxima no CFRP se verificou para uma carga inferior à carga máxima, indica-se entre parêntesis curvos os valores registados nos extensómetros nesse instante. Da análise da extensometria é possível verificar que o valor médio das extensões registadas quando as vigas atingiram a sua capacidade máxima de carga variou entre os 3.9‰ e os 8.4‰, enquanto que em termos da extensão máxima os valores registados variaram entre os 6.0‰ e os 11.1‰. Nas vigas com a maior percentagem de CFRP, onde o padrão de fendilhação é bastante difuso e onde pode ocorrer o efeito de grupo que origina o destacamento dos laminados em grupo (ver ponto 3.3), as extensões máximas no CFRP foram mais baixas que as verificadas nas vigas com a menor percentagem de CFRP. Nestas, o padrão de fendilhação mais discreto e o menor número laminados originam necessariamente uma concentração extensões em determinadas secções do laminado. Os factos anteriormente referidos justificam a maior uniformidade das extensões ao longo do laminado registado nas vigas com a maior percentagem de CFRP. A extensão média registada nos laminados instrumentados em correspondência com a carga máxima foi de 6.6‰ (37.5% da extensão última dos laminados).

A análise dos dados referentes à extensometria colocada nos estribos permitiu concluir que em todas as vigas com CFRP a carga máxima foi atingida com as armaduras transversais em cedência. Além disso, foi possível verificar que a presença do CFRP diminui o estado de tensão instalado no estribo.

Quadro 4: Análise dos valores obtidos nos extensómetros eléctricos colados no CFRP

Viga	$\epsilon_{CFRP}^{Ext. L1}$ (‰)	$\epsilon_{CFRP}^{Ext. L2}$ (‰)	$\epsilon_{CFRP}^{Ext. L3}$ (‰)	$\epsilon_{CFRP}^{Ext. L4}$ (‰)	ϵ_{CFRP}^{avg} (‰)	$\epsilon_{CFRP}^{avg} / \epsilon_{fu}$ (%)
2S-3LV	-	7.84	3.67	-	5.76	33
2S-5LV	-	7.65	6.26	6.12	6.68	38
2S-8LV**	6.65 (6.68)	6.94 (7.17)	6.91 (5.44)	4.26 (3.06)	6.19 (5.59)	35 (32)
2S-3LI45	8.86	8.83	10.76	5.20	8.41	48
2S-5LI45	7.58	8.47	5.67	3.83	6.39	36
2S-8LI45	2.60	5.95	4.76	2.15	3.87	22
2S-3LI60**	-	11.08 (11.11)	9.75 (9.72)	2.28 (2.16)	7.70 (7.66)	44 (43)
2S-5LI60**	7.41 (7.74)	8.87 (8.96)	8.36 (8.44)	-	8.21 (8.38)	46 (47)
2S-7LI60	4.70 (6.57)	8.47 (8.72)	7.31 (7.14)	4.59 (4.23)	6.27 (6.67)	35 (38)

** Os valores das extensões referem-se à carga imediatamente antes da cedência do laminado instrumentado

** Os valores das extensões entre parênteses referem-se à carga para a qual ocorreu a máxima extensão no laminado antes da carga máxima (391 kN na viga 2S-8LV, 372 kN na viga 2S-3LI60, 389 kN na viga 2S-5LI60 e 405 kN na viga 2S-7LI60).

4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos no presente trabalho podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- o uso da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da orientação e da percentagem de CFRP, permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga de vigas de betão armado de secção em T com rotura por corte. Exceptuando dois modelos que continham uma reduzida percentagem de CFRP, as soluções de reforço de CFRP estudadas proporcionaram um aumento da capacidade máxima de carga que variou entre os 13% e os 29%. Em termos do acréscimo relativo de carga entre a formação da fenda crítica de corte na viga de referência (2S-R) e a carga de rotura das vigas reforçadas, $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$, as soluções de reforço testadas conduziram a valores entre os 9% e os 33%.
- os ganhos de resistência proporcionados pelos sistemas de reforço em CFRP adoptados (F_{max} e $(\Delta F/F^{2S-R})_{max}$) foram, de um modo geral, proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_{fw}), ou seja, maiores valores de ρ_{fw} garantiram maiores aumentos da capacidade resistente. No entanto, verificou-se que não existe uma proporcionalidade directa entre a percentagem de CFRP e o acréscimo de capacidade de carga máxima. Neste aspecto foi na solução com laminados a 60° onde se verificou uma maior proximidade com a referida proporcionalidade.
- em termos de orientação dos laminados, e independentemente da percentagem de CFRP, a solução com laminados a 60° foi mais eficaz que as soluções com laminados verticais e inclinados a 45°. De um modo geral, a solução de laminados a 45° foi mais eficaz que a solução com laminados verticais.
- os modelos reforçados com a maior percentagem de CFRP apresentaram uma carga máxima 99%, 93% e 97% da verificada na viga 6S-R para as soluções de laminados a 60°, 45° e 90°, respectivamente. Em termos de carga máxima, a viga 6S-R era o modelo em betão armado “equivalente” aos modelos reforçados com a quantidade máxima de CFRP.
- o efeito do reforço de CFRP foi evidente a partir do momento em que surgiram as fendas de corte, garantindo um acréscimo de rigidez que aumentou com a percentagem de CFRP. Neste contexto refira-se que, após o início da formação das fendas diagonais de corte, a capacidade de carga das vigas com a máxima percentagem de CFRP foi bastante maior do que a registada na viga 6S-R. Este facto evidencia o acréscimo de rigidez proporcionado pelos laminados de CFRP.
- 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. A quantidade de betão que se destacou foi condicionada pela percentagem de CFRP e do padrão de fendilhação que se formou. Para a menor percentagem de CFRP, o laminado que cedeu foi atravessado por um número reduzido de fendas o que conduziu a valores elevados de comprimentos de amarração (>10 cm). Para esta gama de percentagens de CFRP os laminados cedem individualmente, sem qualquer interferência com os laminados vizinhos. À medida que a percentagem de CFRP aumenta, o padrão de fendilhação instalado nas vigas é mais repartido originando menores comprimentos de amarração dos laminados. Além disso, para o caso de percentagens de CFRP elevadas pode ocorrer um efeito de grupo na cedência dos laminados devido à sua proximidade, conduzindo ao destacamento de um volume considerável de betão.

- a distância entre os elementos resistentes ao esforço transversal (laminados e estribos de aço) tem uma influência na eficácia de uma determinada solução de reforço ao corte. A distribuição do reforço deve ser a mais homogénea possível, sendo de evitar a sobreposição de laminados e estribos.
- a extensão média registada nos laminados instrumentados em correspondência com a carga máxima variou entre os 3.9‰ e os 8.4‰, enquanto que a extensão máxima no CFRP variou entre os 6.0‰ e os 11.1‰. De um modo geral os valores das extensões no CFRP diminuíram com o aumento da percentagem de CFRP.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento à empresa “Empreiteiros 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. Os autores agradecem o apoio prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no projecto POCTI/ECM/59033/2004.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Boussselham A.; Chaallal, O. – “Shear Strengthening Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer: Assessment of Influencing Parameters and Required Research”, *ACI Structural Journal*, 2004, Vol. 101, Nº 2, March-April, pp. 219-227.
- [2] De Lorenzis Laura – “Strengthening of RC Structures with Near-Surface Mounted FRP rods”, *PH. D. Dissertation of Civil Engineering*, 2002, Università Degli Studi di Lecce, Italy, May, 289 pp.
- [3] Dias, S.J.E.; Barros, J.A.O., "Proposta de uma técnica de reforço ao corte com CFRP", *Revista Engenharia Civil • UM*, Universidade do Minho, 2004, nº 21, Dezembro, pp.11-24.
- [4] Barros, J.A.O.; Dias, S.J.E., "Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beam", *Journal Cement & Concrete Composites*, 2006, nº28, January, pp. 276-292.
- [5] ACI Committee 440, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”, *Reported by ACI Committee 440*, American Concrete Institute, 2002, May, 118 pp.
- [6] Sena-Cruz, J.M.; Barros, J.A.O., “Bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete in structural strengthening”, *Journal of Composites for Construction*, 2004, Vol. 8, Nº 6, pp. 519-527.