

Desempenho de distintas técnicas de reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP

Performance of distinct CFRP-strengthening techniques for reinforced concrete beams

Salvador J. E. Dias
Assistente
Universidade do Minho
Guimarães

Joaquim A. O. Barros
Professor Auxiliar
Universidade do Minho
Guimarães

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se a campanha de ensaios à flexão realizada com vigas de betão armado reforçadas ao corte recorrendo a quatro sistemas de reforço distintos: o convencional utilizando estribos de aço e os restantes três recorrendo a sistemas compósitos de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono). Para esta última solução foi comparado o comportamento de vigas de betão armado reforçadas ao corte por intermédio da colagem externa de mantas de CFRP (solução que tem sido usada em obra) e de laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da viga (verticais e inclinados a 45°). Foi efectuado um número de séries de ensaios por forma a avaliar-se a influência da percentagem e da orientação do reforço de CFRP, bem como da altura da viga. De entre as técnicas utilizando CFRP, a baseada na inserção de laminados foi a mais eficaz, quer em termos de aumento de capacidade de carga, quer de aumento da deformabilidade das vigas na sua rotura. Além disto é uma técnica mais simples e rápida de executar. Os resultados obtidos nos ensaios realizados são analisados e interpretados. O desempenho de modelos analíticos recentemente propostos é avaliado.

ABSTRACT

A conventional and three distinct CFRP (carbon fiber reinforced polymer)-based shear reinforcing systems were used to assess the most effective one on the shear strengthening of reinforced concrete beams. Nowadays, one of these CFRP-based shear reinforcing systems is currently applied, wrapping the beam with strips of CFRP sheets. The two others CFRP-based shear reinforcing systems are based on bonding, with epoxy adhesive, laminate strips of CFRP into pre-cut grooves on the concrete cover of the vertical surfaces of the concrete beams. These two CFRP-based reinforcing systems only differ on the direction of the laminates (vertical and inclined at 45° with the beam axis). To evaluate the influence of the beam height, two series of tests with beams of distinct height were carried out. These last reinforcing systems were more effective than the one based on strips of CFRP sheet, not only in terms of increasing the load carrying capacity, but also the deformability of the beam at its failure. They are also much more simple and faster to apply. In the present work the tests are described and the main results are presented and analyzed. The performance of recent analytical models is appraised.

1. INTRODUÇÃO

Alguns estudos já efectuados (Taerwe et al., 1997; Chaallal et al., 1997; Triantafillou, 1998; Khalifa et al., 1998; Triantafillou et al., 2000; Etman et al., 2001 e Basler et al., 2003) têm demonstrado que a colagem externa de compósitos de CFRP (mantas e laminados) permite aumentar consideravelmente a resistência ao corte de vigas de betão armado. No entanto, como resultado da ocorrência de roturas prematuras, principalmente a devida ao descolamento antecipado do CFRP, o nível máximo de tensão mobilizado no reforço é bastante inferior à sua resistência última. Assim, tem sido preocupação da comunidade científica desenvolver novas técnicas de reforço ao corte utilizando compósitos de CFRP.

De Lorenzis et al. (2001) analisaram o comportamento de vigas T de betão armado reforçadas ao corte com varões

de CFRP inseridos no betão de recobrimento das faces laterais dessas vigas. Verificaram que a utilização destes varões proporcionou um aumento significativo da capacidade resistente das vigas. Além disso, constataram que a resistência ao corte pode ser aumentada diminuindo o espaçamento dos varões, ancorando os varões verticais ao banzo da viga, ou alterando a orientação dos varões verticais para inclinados a 45° (mantendo o número de varões). Dos resultados experimentais verificaram que o processo mais eficiente é ancorar os varões verticais ao banzo da viga. A solução com varões inclinados proporcionou melhores resultados que os registados nos modelos em que se diminui o espaçamento dos varões verticais de CFRP.

No presente trabalho pretende-se desenvolver e caracterizar uma técnica de reforço ao corte com laminados de fibra de carbono que seja mais eficaz e simples de

aplicar que as técnicas de reforço com CFRP utilizadas actualmente (colagem externa). Esta técnica tem sido aplicada com sucesso no reforço à flexão de vigas e pilares, estando devidamente descrita em outros trabalhos (Ferreira, 2000; Barros et al., 2002 e Barros et al., 2003-a). Ensaio de arranque em flexão efectuados para caracterizar a relação tensão-deslizamento permitiram verificar que as tensões máximas de corte que esta técnica permite mobilizar são significativamente superiores às registadas com outras técnicas de reforço (Cruz et al., 2002). Na técnica de reforço ao corte que se propõe neste trabalho, faixas de laminado de CFRP são inseridas em finos entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas a reforçar. A fixação dos laminados de CFRP é efectuada por intermédio de um adesivo epoxídico. Nesta técnica, a área de colagem do laminado é dupla da mobilizada nas técnicas de reforço correntes com CFRP, o que permite aumentar o grau de fixação do laminado ao betão, mobilizando-se tensões mais elevadas no CFRP aquando da rotura do elemento reforçado. O facto dos laminados ficarem inseridos em entalhes aumenta a segurança relativamente à actuação do fogo e a actos de vandalismo.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A eficácia da técnica que se apresenta tem vindo a ser avaliada por intermédio da realização, no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (Barros et al., 2003-b e Dias et al., 2003), de uma campanha de ensaios experimentais com vigas de betão armado, em que a percentagem de CFRP, a orientação dos laminados e a altura da viga são parâmetros avaliados. O programa experimental engloba vigas sem qualquer armadura transversal, vigas com estribos de aço verticais, vigas em que o reforço ao corte foi materializado por meio de faixas de manta de CFRP coladas externamente em forma de U, e vigas reforçadas ao esforço transversal com laminados de CFRP dispostos verticalmente ou inclinados a 45°, inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da viga.

2.1. Séries de ensaios

A campanha de ensaios experimentais consistiu em duas séries de vigas de betão armado. A série A era constituída por vigas com uma secção transversal de 0.15x0.3 m², comprimento de 1.6 m e vão de 1.5 m. As vigas da série B tinham uma secção transversal de 0.15x0.15 m², comprimento de 1.0 m e vão de 0.9 m. Todas as vigas tinham um vão de corte igual a duas vezes a altura da secção (a/h = 2). Para cada uma das séries foram considerados dois tipos de armaduras longitudinais na face traccionada, um constituído por 4φ10 e o outro por 4φ12. Em todas as vigas utilizaram-se 2φ6 para armadura longitudinal de compressão.

A resistência ao esforço transversal foi materializada recorrendo a quatro distintos sistemas de reforço. Um utilizando estribos de aço convencionais e os restantes

adoptando compósitos de CFRP. Nestes últimos, recorreu-se a faixas de manta unidireccionais de CFRP coladas exteriormente e a laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento (verticais e inclinados a 45°). A quantidade de reforço nos vários sistemas utilizados foi determinada por forma a que o modo de ruína dos elementos fosse por corte e para valores de cargas semelhantes (REBAP, 1983 e ACI Committee 440, 2002). No Quadro I e nas Figuras 1 e 2 apresentam-se os dados necessários à caracterização dos modelos que compõe as séries ensaiadas.

QUADRO I – Características dos modelos ensaiados

Vigas	Resistência ao esforço transversal
VA10	-
VAE-30	Estribos a 90° (6φ6, 2r *, 300 mm de espaçamento)
VAM-19	MBrace Manta C5-30 (forma de U, fibras orientadas a 90°, 8 faixas de 2 camadas com 25 mm de largura e 190 mm de espaçamento)
VACV-20	MBrace Laminado LM a 90° (16 laminados com 200 mm de espaçamento)
VACI-30	MBrace Laminado LM a 45° (12 laminados com 300 mm de espaçamento)
VA12	-
VAE-15	Estribos a 90° (10φ6, 2r *, 150 mm de espaçamento)
VAM-9.5	MBrace Manta C5-30 (forma de U, fibras orientadas a 90°, 14 faixas de 2 camadas com 25 mm de largura e 95 mm de espaçamento)
VACV-10	MBrace Laminado LM a 90° (28 laminados com 100 mm de espaçamento)
VACI-15	MBrace Laminado LM a 45° (24 laminados com 150 mm de espaçamento)
VB10	-
VBE-15	Estribos a 90° (6φ6, 2r *, 150 mm de espaçamento)
VBM-8	MBrace Manta C5-30 (forma de U, fibras orientadas a 90°, 10 faixas de 2 camadas com 25 mm de largura e 80 mm de espaçamento)
VBCV-10	MBrace Laminado LM a 90° (16 laminados com 100 mm de espaçamento)
VBCI-15	MBrace Laminado LM a 45° (12 laminados com 150 mm de espaçamento)
VB12	-
VBE-7.5	Estribos a 90° (10φ6, 2r *, 75 mm de espaçamento)
VBM-4	MBrace Manta C5-30 (forma de U, fibras orientadas a 90°, 16 faixas de 2 camadas com 25 mm de largura e 40 mm de espaçamento)
VBCV-5	MBrace Laminado LM a 90° (28 laminados com 50 mm de espaçamento)
VBCI-7.5	MBrace Laminado LM a 45° (24 laminados com 75 mm de espaçamento)

* 2r - estribos de dois ramos.

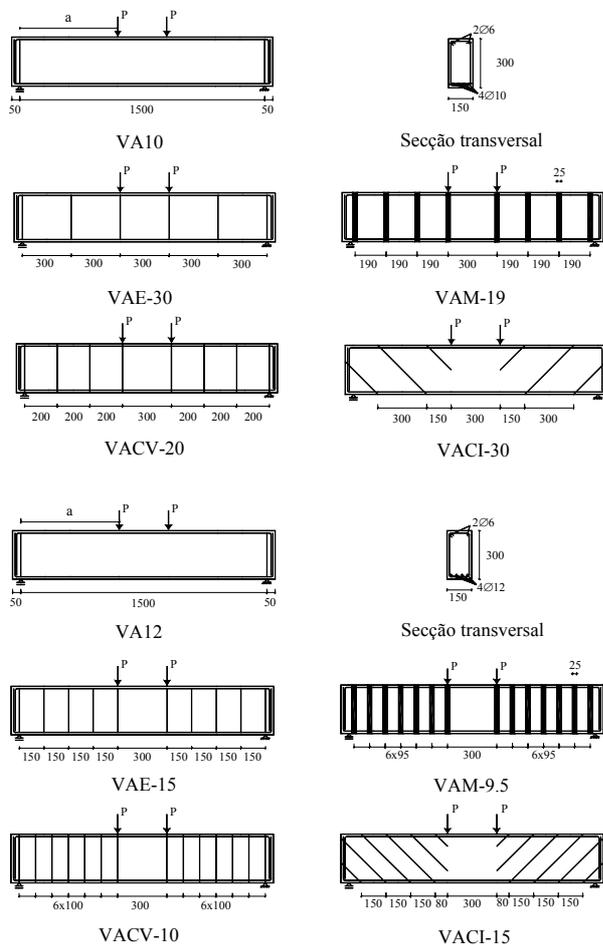


Figura 1 – Características dos modelos da série A

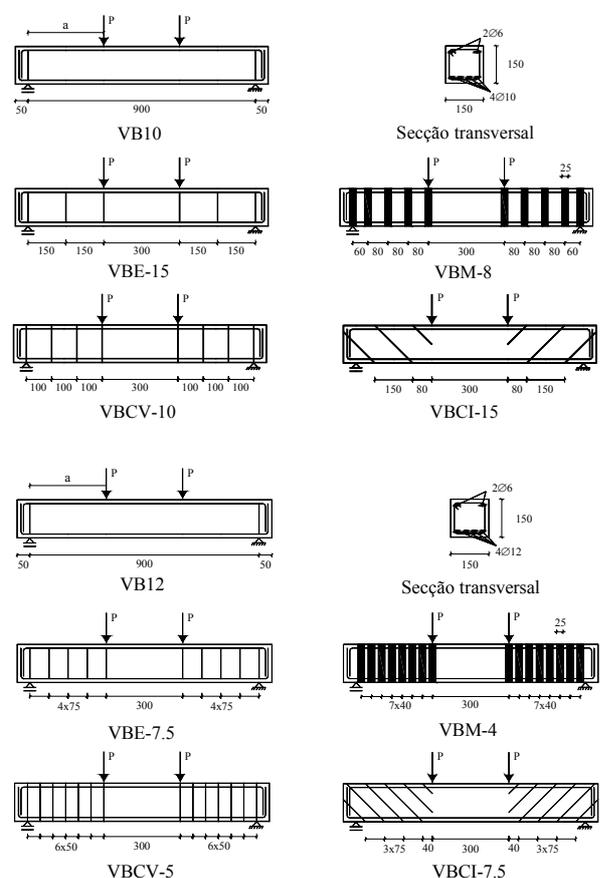


Figura 2 – Características dos modelos da série B

2.2. Caracterização dos materiais utilizados

A avaliação da resistência à compressão do betão foi efectuada experimentalmente aos 28 dias e à data da realização dos ensaios das vigas, à qual corresponde uma idade média de 227 dias na série A e 105 dias na série B. Para tal, ensaiaram-se à compressão cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Nas vigas ensaiadas utilizaram-se três tipos de aço nervurado (diâmetro de 6, 10 e 12 mm), cujas principais propriedades foram avaliadas por intermédio de ensaios de tracção uniaxial. No Quadro II apresentam-se os resultados dos ensaios efectuados para caracterizar os betões e os aços utilizados.

Neste trabalho foram utilizados dois sistemas compósitos de CFRP unidireccionais, a manta flexível curada “in situ” - MBrace Manta C5-30 e o laminado semi-rígido pré-fabricado - MBrace Laminado LM. As características dos materiais constituintes dos sistemas de reforço adoptados foram obtidas das fichas técnicas disponibilizadas pelo fornecedor (Bettor MBT Portugal, 1999) e encontram-se resumidas no Quadro III.

QUADRO II – Principais propriedades do betão e do aço

Vigas	28 dias de idade	Data do ensaio das vigas				
Betão	Série A	$f_{cm} = 37.6$ MPa (C30/37) *				
	Série B	$f_{cm} = 49.2$ MPa (227 dias)				
Betão	Série A	$f_{cm} = 49.5$ MPa (C40/50) *				
	Série B	$f_{cm} = 56.2$ MPa (105 dias)				
Vigas	Tensão	$\phi 6$ (long.)	$\phi 6$ (tran.)	$\phi 10$	$\phi 12$	
Aço	Série A	f_{sym} **	622 MPa	540 MPa	464 MPa	574 MPa
	Série B	f_{sum} ***	702 MPa	694 MPa	581 MPa	672 MPa
Aço	Série A	f_{sym} **	618 MPa	540 MPa	464 MPa	571 MPa
	Série B	f_{sum} ***	691 MPa	694 MPa	581 MPa	673 MPa

* Classe de resistência do betão de acordo com a NP-ENV206 (1993); ** Valor médio da tensão de cedência; *** Valor médio da tensão máxima.

QUADRO III – Principais propriedades dos constituintes dos CFRP

Sistemas de CFRP		Principais propriedades			
Tipo	Materiais	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Extensão na rotura (%)	Espessura (mm)
MBrace	Primário	12	0.7	30	-
Manta	Resina	50	3	25	-
C5-30	Manta	3000	390	8	0.167
MBrace	Adesivo	-	7	-	-
Laminado	Laminado	2200	150	14	1.4

2.3. Técnica de aplicação do reforço

A aplicação do sistema curado “in situ” envolveu as seguintes tarefas: 1) preparação da superfície de betão por intermédio da passagem de um esmeril, de forma a retirar a leitada superficial e a arredondar as arestas; 2) aplicação de jactos de ar para eliminar as impurezas; 3) aplicação de uma camada de primário para melhorar a aderência betão-CFRP; 4) colagem da manta recorrendo a uma resina epoxídica.



Figura 3 – Sistema curado “in situ” e sistema pré-fabricado (aplicação do reforço)

A aplicação do sistema pré-fabricado envolveu as seguintes tarefas: 1) abertura dos entalhes no betão de recobrimento das faces laterais das vigas, com cerca de 5 mm de largura e 12 mm de profundidade; 2) limpeza dos entalhes e dos laminados; 3) aplicação do adesivo nos entalhes e nos laminados; 4) inserção dos laminados nos entalhes. Nesta tarefa utilizou-se uma espátula para que toda o entalhe ficasse devidamente preenchido com adesivo. Tentou-se evitar a formação de vazios e o adesivo em excesso foi retirado. Na Figura 3 apresenta-se o aspecto final de uma viga reforçada com manta (face traccionada virada para cima) e de uma viga reforçada com laminados inseridos no betão. A secção transversal dos laminados de CFRP adoptados era de 10 mm de largura por 1.4 mm de espessura.

2.4. Sistema de ensaio

As vigas foram submetidas a quatro pontos de carga até à sua rotura (ver Figuras 1, 2 e 4). Para instrumentação recorreu-se a uma célula de carga com uma capacidade máxima de carga de 300 kN e a cinco LVDT's de 25 mm e 50 mm de campo de medida. Os LVDT's ficaram suportados num sistema que evita o registo de deslocamentos parasitas (“Japanese Yoke”). Os ensaios foram controlados por intermédio do LVDT colocado a meio vão, tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de 0.01 mm/s.

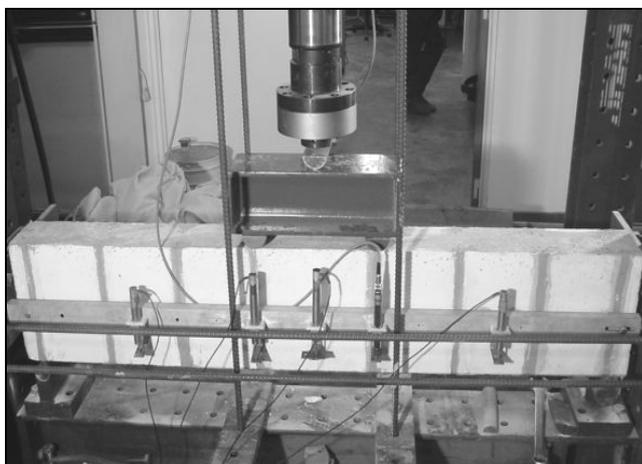


Figura 4 – Esquema geral do ensaio das vigas

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1. Série A

3.1.1. Vigas com 4φ10 longitudinais

Na Figura 5 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total e o deslocamento central das vigas VA10, VAE-30, VAM-19, VACV-20 e VACI-30. No Quadro IV apresentam-se, para cada um destes modelos, os valores registados para a carga total máxima. Atribuindo as designações $F_{max,VA10}$ e $F_{max,VAE-30}$ à força máxima registada na viga sem qualquer armadura de resistência ao esforço transversal e na viga reforçada somente com estribos, respectivamente, determinaram-se os factores $F_{max}/F_{max,VA10}$ e $F_{max}/F_{max,VAE-30}$ indicados no Quadro IV (F_{max} é a força máxima registada em qualquer viga). Designando por $\delta_{p,VA10}$ e $\delta_{p,VAE-30}$ os deslocamentos correspondentes a $0.95F_{max,VA10}$ e $0.95F_{max,VAE-30}$ (ver exemplo da obtenção deste deslocamento na Figura 6) determinaram-se os factores $\delta_p/\delta_{p,VA10}$ e $\delta_p/\delta_{p,VAE-30}$ incluídos no Quadro IV (em qualquer viga, δ_p é o deslocamento correspondente a $0.95F_{max}$).

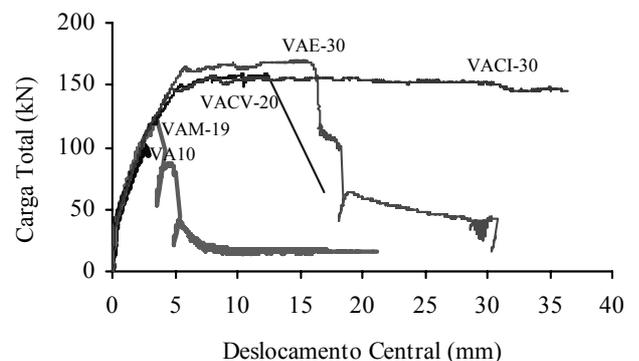


Figura 5 – Curvas carga total vs deslocamento central (Série A: 4φ10)

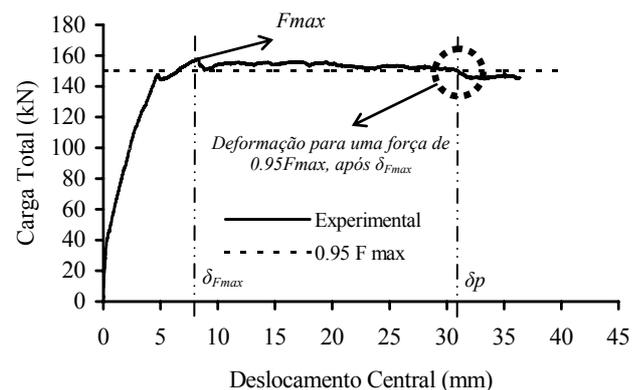


Figura 6 – Deslocamento para uma carga de 0.95 F_{max} após F_{max}

Da análise da Figura 5 e dos resultados apresentados no Quadro IV verifica-se que os compósitos de CFRP (mantas e laminados) proporcionaram um aumento significativo da capacidade máxima de carga da viga de referência VA10 (sem qualquer reforço ao corte). Tendo por base os resultados da viga VA10 constata-se que em termos da força F_{max} os estribos permitiram um aumento de 69%, enquanto os CFRP garantiram incrementos de 22% a

58%, sendo o maior valor o registado na viga com laminados verticais (VACV-20) e o menor na viga com faixas de manta (VAM-19). Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com CFRP com a observada na viga VAE-30 (com estribos) verifica-se que nas vigas VAM-19, VACV-20 e VACI-30 alcançou-se um valor 28%, 6% e 7% inferior, respectivamente.

O melhor desempenho dos laminados aplicados com uma inclinação de 45° foi evidente em termos de ductilidade. Considerando como indicador de ductilidade o deslocamento correspondente a δ_p , constata-se que, quando comparado com o deslocamento de pico verificado na viga VA10 ($\delta_{p,VA10}$), o deslocamento “máximo” registado nas vigas VAE-30, VACV-20, VACI-30 e VAM-19 foi 480%, 359%, 1006% e 34% superior, respectivamente, pelo que a viga reforçada com laminados inclinados a 45° introduziu um acréscimo de ductilidade que é 91% superior ao acréscimo proporcionado pela viga estribada.

QUADRO IV – Comparação do comportamento último

Vigas	F_{max}^* (kN)	$F_{max}/F_{max,VA10}$	$F_{max}/F_{max,VAE-30}$	δ_p (mm)	$\delta_p/\delta_{p,VA10}$	$\delta_p/\delta_{p,VAE-30}$
VA10	100.40	1.00	0.59	2.80	1.00	0.17
VAE-30	169.35	1.69	1.00	16.25	5.80	1.00
VAM-19	122.06	1.22	0.72	3.75	1.34	0.23
VACV-20	158.64	1.58	0.94	12.86	4.59	0.79
VACI-30	157.90	1.57	0.93	30.96	11.06	1.91

* $F_{max} = 2P$ (Ver Figura 1).

3.1.2. Vigas com 4φ12 longitudinais

Na Figura 7 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total e o deslocamento central das vigas VA12, VAE-15, VAM-9.5, VACV-10 e VACI-15. No Quadro V indicam-se, para cada um destes modelos, os valores registados para a carga total máxima. Atribuindo as designações $F_{max,VA12}$ e $F_{max,VAE-15}$ à força máxima registada na viga sem qualquer armadura de resistência ao esforço transversal e na viga reforçada somente com estribos, respectivamente, determinaram-se os factores $F_{max}/F_{max,VA12}$ e $F_{max}/F_{max,VAE-15}$ indicados no Quadro V (F_{max} é a força máxima registada em qualquer viga). Designando por $\delta_{p,VA12}$ e $\delta_{p,VAE-15}$ os deslocamentos correspondentes a $0.95F_{max,VA12}$ e $0.95F_{max,VAE-15}$, determinaram-se os factores $\delta_p/\delta_{p,VA12}$ e $\delta_p/\delta_{p,VAE-15}$ incluídos no Quadro V.

Da análise da Figura 7 e dos resultados apresentados no Quadro V verifica-se que a presença dos compósitos de CFRP (mantas e laminados) permitiu um aumento significativo da capacidade máxima de carga da viga de referência VA12 (sem qualquer reforço ao corte). Tendo por base os resultados da viga VA12 constata-se que em termos da força F_{max} os estribos permitiram um aumento de 85%, enquanto os CFRP garantiram incrementos de 54% a 125%, sendo o maior valor o registado na viga com laminados inclinados (VACI-15) e o menor na viga com faixas de manta (VAM-9.5). Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com CFRP com a observada na viga VAE-15 (com estribos) verifica-se que na viga

VAM-9.5 alcançou-se um valor 17% inferior, na viga VACV-10 atingiu-se um valor 9% superior e na viga VACI-15 registou-se um valor 22% superior.

O melhor desempenho dos laminados aplicados a 45° também foi notório em termos de ductilidade. Considerando como indicador de ductilidade o deslocamento correspondente a δ_p , constata-se que, quando comparado com o deslocamento de pico verificado na viga VA12 ($\delta_{p,VA12}$), o deslocamento “máximo” registado na viga VAE-15 foi 131% superior, enquanto nas vigas reforçadas com laminados inclinados, verticais e com faixas de manta foi 329%, 145% e 79% superior, isto é, a viga reforçada com laminados inclinados a 45° proporcionou um acréscimo de ductilidade 85% superior ao acréscimo proporcionado pela viga estribada.

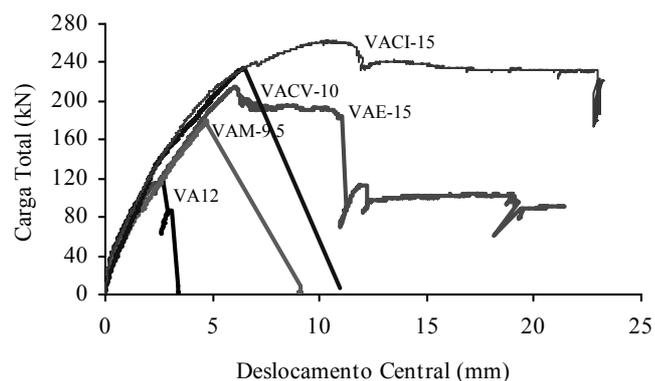


Figura 7 – Curvas carga total vs deslocamento central (Série A: 4φ12)

QUADRO V – Comparação do comportamento último

Vigas	F_{max}^* (kN)	$F_{max}/F_{max,VA12}$	$F_{max}/F_{max,VAE-15}$	δ_p (mm)	$\delta_p/\delta_{p,VA12}$	$\delta_p/\delta_{p,VAE-15}$
VA12	116.50	1.00	0.54	2.74	1.00	0.43
VAE-15	215.04	1.85	1.00	6.34	2.31	1.00
VAM-9.5	179.54	1.54	0.83	4.91	1.79	0.77
VACV-10	235.11	2.02	1.09	6.70	2.45	1.06
VACI-15	262.38	2.25	1.22	11.75	4.29	1.85

* $F_{max} = 2P$ (Ver Figura 1).

3.2. Série B

3.2.1. Vigas com 4φ10 longitudinais

Na Figura 8 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total e o deslocamento central das vigas VB10, VBE-15, VBM-8, VBCV-10 e VBCE-15. No Quadro VI apresentam-se os valores da carga total máxima registados nestas vigas. Atribuindo as designações $F_{max,VB10}$ e $F_{max,VBE-15}$ à força máxima registada na viga sem qualquer armadura de resistência ao esforço transversal e na viga reforçada somente com estribos, respectivamente, determinaram-se os factores $F_{max}/F_{max,VB10}$ e $F_{max}/F_{max,VBE-15}$ indicados no Quadro VI (F_{max} é a força máxima registada em qualquer viga). Designando por $\delta_{p,VB10}$ e $\delta_{p,VBE-15}$ os deslocamentos correspondentes a $0.95F_{max,VB10}$ e $0.95F_{max,VBE-15}$, determinaram-se os factores $\delta_p/\delta_{p,VB10}$ e $\delta_p/\delta_{p,VBE-15}$ incluídos no Quadro VI.

Da análise da Figura 8 e dos resultados apresentados no Quadro VI verifica-se que a participação dos compósitos de CFRP (mantas e laminados) permitiu um aumento significativo da capacidade máxima de carga da viga de referência VB10 (sem qualquer reforço ao corte). Tendo por base os resultados da viga VB10 constata-se que em termos da força F_{max} os estribos permitiram um aumento de 63%, enquanto os CFRP garantiram incrementos de 50% a 77%, sendo o maior valor o registado na viga com laminados verticais (VBCV-10) e o menor na viga com manta (VBM-8). Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com CFRP, com a observada na viga VBE-15 (com estribos) verifica-se que na viga VBM-8 alcançou-se um valor 8% inferior, na viga VBCV-10 atingiu-se um aumento de 9% e na viga VBCI-15 alcançou-se um valor muito similar.

Das formas de reforço ao corte com CFRP avaliadas, o melhor desempenho em termos de ductilidade foi garantido pelos laminados verticais. Considerando como indicador de ductilidade o deslocamento correspondente a δ_p , constata-se que, quando comparado com o deslocamento de pico verificado na viga VB10 ($\delta_{p,VB10}$), o deslocamento “máximo” registado na viga VBE-15 foi 327% superior, enquanto nas vigas reforçadas com laminados verticais, inclinados e com faixas de manta foi 242%, 114% e 120% superior, isto é, a viga reforçada com laminados verticais introduziu um acréscimo de ductilidade que é 80% do acréscimo proporcionado pela viga estribada.

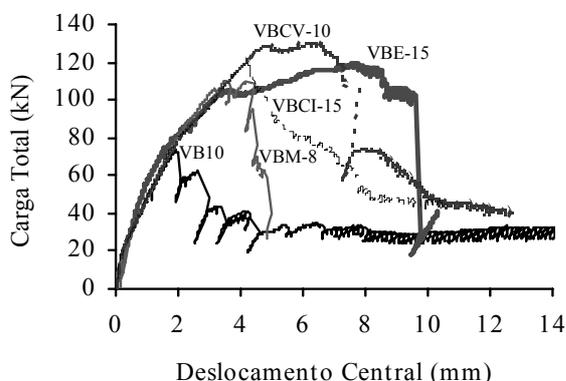


Figura 8 – Curvas carga total vs deslocamento central (Série B: 4φ10)

QUADRO VI – Comparação do comportamento último

Vigas	F_{max}^* (kN)	$F_{max}/F_{max,VB10}$	$F_{max}/F_{max,VBE-15}$	δ_p (mm)	$\delta_p/\delta_{p,VB10}$	$\delta_p/\delta_{p,VBE-15}$
VB10	74.02	1.00	0.61	2.00	1.00	0.23
VBE-15	120.64	1.63	1.00	8.53	4.27	1.00
VBM-8	111.14	1.50	0.92	4.40	2.20	0.52
VBCV-10	131.22	1.77	1.09	6.83	3.42	0.80
VBCI-15	120.44	1.63	1.00	4.27	2.14	0.50

* $F_{max} = 2P$ (Ver Figura 2).

3.2.2. Vigas com 4φ12 longitudinais

Na Figura 9 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total e o deslocamento central das

vigas VB12, VBE-7.5, VBM-4, VBCV-5 e VBCI-7.5. No Quadro VII apresentam-se, para cada um dos modelos anteriormente referidos, os valores registados para a carga total máxima. Atribuindo as designações $F_{max,VB12}$ e $F_{max,VBE-7.5}$ à força máxima registada na viga sem qualquer armadura de resistência ao esforço transversal e na viga reforçada somente com estribos, respectivamente, determinaram-se os factores $F_{max}/F_{max,VB12}$ e $F_{max}/F_{max,VBE-7.5}$ indicados no Quadro VII (F_{max} é a força máxima registada em qualquer viga). Designando por $\delta_{p,VB12}$ e $\delta_{p,VBE-7.5}$ os deslocamentos correspondentes a $0.95F_{max,VB12}$ e $0.95F_{max,VBE-7.5}$, determinaram-se os factores $\delta_p/\delta_{p,VB12}$ e $\delta_p/\delta_{p,VBE-7.5}$ incluídos no Quadro VII.

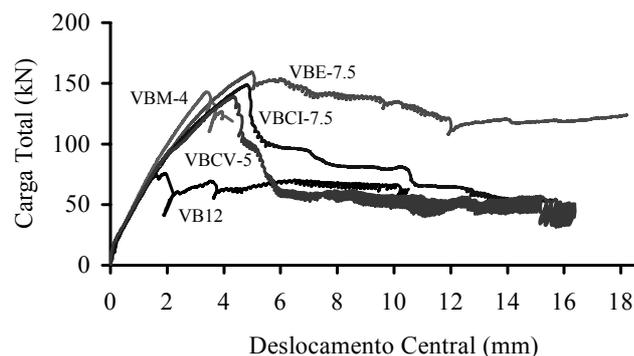


Figura 9 – Curvas carga total vs deslocamento central (Série B: 4φ12)

QUADRO VII – Comparação do comportamento último

Vigas	F_{max}^* (kN)	$F_{max}/F_{max,VB12}$	$F_{max}/F_{max,VBE-7.5}$	δ_p (mm)	$\delta_p/\delta_{p,VB12}$	$\delta_p/\delta_{p,VBE-7.5}$
VB12	75.7	1.00	0.48	2.03	1.00	0.40
VBE-7.5	159.1	2.10	1.00	5.09	2.51	1.00
VBM-4	143.0	1.89	0.90	3.52	1.73	0.69
VBCV-5	139.2	1.84	0.87	4.44	2.19	0.87
VBCI-7.5	148.5	1.96	0.93	4.92	2.42	0.97

* $F_{max} = 2P$ (Ver Figura 2).

Da análise da Figura 9 e dos resultados apresentados no Quadro VII verifica-se que os compósitos de CFRP (mantas e laminados) proporcionaram um aumento significativo da capacidade máxima de carga da viga de referência VB12 (sem qualquer reforço ao corte). Tendo por base os resultados da viga VB12 constata-se que em termos da força F_{max} os estribos permitiram um aumento de 110%, enquanto os CFRP garantiram incrementos de 84% a 96%, sendo o maior valor o registado na viga com laminados inclinados (VBCI-7.5) e o menor na viga com laminados verticais (VBCV-5). Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com CFRP, com a observada na viga VBE-7.5 (com estribos) verifica-se que na viga VBM-4 alcançou-se um valor 10% inferior, na viga VBCV-5 atingiu-se um valor de 13% inferior e na viga VBCI-15 alcançou-se um valor 7% inferior.

Das formas de reforço ao corte com CFRP avaliadas, o melhor desempenho em termos de ductilidade foi garantido pelos laminados inclinados a 45°. Considerando como indicador de ductilidade o deslocamento δ_p , constata-se

que, quando comparado com o deslocamento de pico verificado na viga VB12 ($\delta_{p,VB12}$), o deslocamento “máximo” registado na viga VBE-7.5 foi 151% superior, enquanto nas vigas reforçadas com laminados inclinados, verticais e com faixas de manta foi 142%, 119% e 73% superior, isto é, a viga reforçada com laminados inclinados a 45° introduziu um acréscimo de ductilidade que é 97% do acréscimo proporcionado pela viga estribada.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS VS EXPRESSÕES ANALÍTICAS

Os resultados obtidos experimentalmente para os modelos reforçados ao corte com CFRP serão comparados, de seguida, com os valores obtidos utilizando expressões analíticas propostas pelo *ACI* (*ACI Committee 440, 2002*) e pela *fib* (*fib - Bulletin 14, 2001*), para o caso do reforço por colagem externa de mantas de CFRP, e por De Lorenzis (2002) para o caso do reforço por inserção de varões de CFRP no betão de recobrimento.

A análise comparativa de resultados experimentais com os previstos pelas expressões analíticas anteriormente referidas é efectuada tomando como base os valores das propriedades mecânicas dos CFRP fornecidos pelo fabricante (valores característicos). Assim, refira-se a importância que poderá assumir nesta análise, o facto de que os valores das propriedades mecânicas dos CFRP poderem não representar correctamente os valores do material efectivamente aplicado como reforço.

4.1 Reforço ao corte por colagem externa de mantas de CFRP

4.1.1. Proposta do *ACI*

O “American Concrete Institute” (*ACI*) constituiu um grupo de trabalho designado “Committee 440-F” com vista a propor critérios de dimensionamento para o reforço de estruturas de betão por colagem externa de sistemas compósitos de FRP. Este “Committee” publicou um documento intitulado “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*” cuja filosofia de determinação da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal é apresentada de seguida.

O contributo do CFRP, em valores de cálculo, para a resistência ao esforço transversal é obtido por intermédio da seguinte expressão (Figura 10):

$$V_{fd} = \phi \psi_f \frac{A_{fv} f_{fe} d_f}{s_f} \quad (1)$$

em que ϕ é um coeficiente de segurança em relação à resistência ao esforço transversal de uma peça de betão armado e que vale 0.85, ψ_f é um coeficiente que minora a resistência ao corte garantida pelo CFRP, cujo valor, para a forma de reforço em análise, é de 0.85. Na mesma expressão, s_f é o afastamento entre faixas de CFRP e A_{fv} é a área efectiva de CFRP para resistir ao esforço transversal e é dada por:

$$A_{fv} = 2 n t_f w_f \quad (2)$$

em que n , t_f e w_f são, respectivamente, o número de camadas, a espessura e a largura da manta de CFRP (Figura 10).

A tensão efectiva no CFRP, f_{fe} , é obtida por intermédio do produto do módulo de elasticidade do compósito, E_f , pela extensão longitudinal efectiva no CFRP, ε_{fe} :

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \quad (3)$$

cujos valores não poderão exceder 0.004, sendo ε_{fu} o valor de cálculo da extensão longitudinal na ruína do CFRP (*ACI Committee 440, 2002*) e k_v um coeficiente para atender às ruínas prematuras obtido de:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11.9 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (4)$$

com:

$$L_e = \frac{23.3}{(n t_f E_f)^{0.58}} \quad (5)$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad (7)$$

Na expressão (6) f'_c é o valor característico, em MPa, da resistência do betão à compressão em cilindros (*ACI Committee 318, 2002*) e nas expressões (1) e (7) d_f é a altura útil do reforço de CFRP (Figura 10).

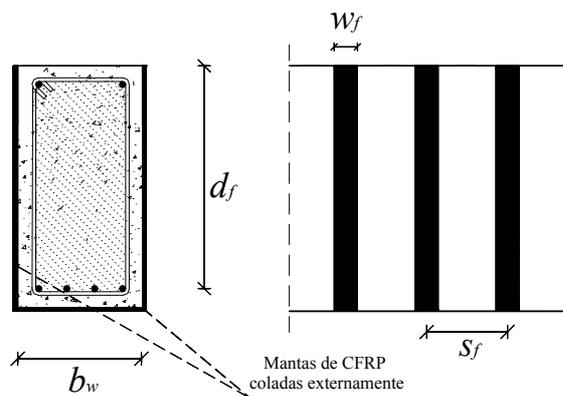


Figura 10 – Dados para a determinação da contribuição dos CFRP colados externamente na resistência ao corte

No Quadro VIII apresentam-se os resultados experimentais e analíticos da comparticipação do CFRP na resistência ao esforço transversal, bem como a relação entre eles, para os modelos reforçados ao corte com mantas de CFRP coladas externamente. Os referidos valores permitem verificar que a contribuição do reforço com compósitos de CFRP para a resistência ao corte obtida pelas regras do *ACI* é superior ao registado experimentalmente, com a excepção do modelo VBM-8. Ao comparar os modelos VBM-8 e VBM-4 verifica-se que

o factor $V_{fd}^{ana.}/V_f^{exp.}$ aumenta com a quantidade de reforço. O valor muito elevado da relação entre o resultado analítico e o experimental do modelo VAM-19 (em comparação com o verificado nos restantes modelos) pode ter origem numa eventual deficiente aplicação do reforço, concretamente da primeira presilha que se destacou, podendo assim ter originado uma rotura precoce da viga.

QUADRO VIII – Comparação de resultados experimentais vs analíticos (proposta do *ACI*)

Vigas	Experimentais	Analíticos	$V_{fd}^{ana.}/V_f^{exp.}$
	$V_f^{exp.}$ (kN)	$V_{fd}^{ana.}$ * (kN)	
VAM-19	10.8	17.0	1.57
VAM-9.5	31.5	33.8	1.07
VBM-8	18.6	17.7	0.95
VBM-4	33.7	35.0	1.04

* Nos cálculos foi considerado o valor de f_c' à data do ensaio das vigas.

4.1.2. Proposta da *fib*

A “Fédération Internationale du Béton” (*fib*) tem um grupo de trabalho designado por “Task Group 9.3 FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures” com o objectivo de propor critérios de dimensionamento para o reforço de estruturas de betão por colagem externa de compósitos de FRP de acordo com a filosofia do CEB-FIP Model Code e do Eurocódigo 2 (EC2). Este grupo de trabalho publicou um documento intitulado “*Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures*” cuja filosofia de determinação da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal é apresentada de seguida.

Assim, o contributo do CFRP, em valores de cálculo, para a resistência ao esforço transversal é obtido por intermédio da seguinte expressão:

$$V_{fd} = 0.9 \varepsilon_{fe,d} E_f \rho_f b_w d \quad (8)$$

em que $\varepsilon_{fe,d}$ é a extensão efectiva de cálculo do CFRP, ρ_f é a taxa geométrica do reforço, b_w é a largura da secção transversal da viga e d é a altura útil da viga. Para o caso de reforço ao corte aplicado de forma discreta, a taxa geométrica do CFRP é dada por:

$$\rho_f = \frac{2 n t_f w_f}{b_w s_f} \quad (9)$$

em que o significado das variáveis foi descrito na anterior secção.

Para a configuração da superfície colada adoptada (em forma de U), o valor médio da extensão efectiva no CFRP, ε_{fe} , é o mínimo dos valores resultantes da aplicação das duas expressões seguintes (a primeira associada à ruína por descolamento do CFRP e a segunda à rotura do CFRP):

$$\varepsilon_{fe} = \min \left[0.65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.56} \times 10^{-3}; 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \right] \quad (10)$$

em que f_{cm} é o valor médio da resistência à compressão do betão em cilindros e ε_{fu} é o valor da extensão longitudinal na ruína do CFRP. Nas expressões f_{cm} deve estar em MPa e E_f em GPa. A passagem do valor da extensão efectiva, ε_{fe} , para valores de cálculo é obtida afectando ε_{fe} , primeiro por um factor que vale 0.8 ($\varepsilon_{fe,k} = 0.8 \varepsilon_{fe}$) e depois dividindo por um coeficiente parcial de segurança, função do modo de ruína. Para o modo de ruína verificado nas vigas ensaiadas (descolamento da manta de CFRP) o referido factor de segurança é 1.3 ($\varepsilon_{fe,d} = 0.8 \varepsilon_{fe}/1.3$).

No Quadro IX apresentam-se os resultados experimentais e analíticos da participação do CFRP na resistência ao esforço transversal, bem como a relação entre eles, para os modelos reforçados ao corte com mantas de CFRP coladas externamente. Os referidos valores permitem verificar que a contribuição do reforço com compósitos de CFRP para a resistência ao corte obtida pelas regras da *fib* é superior ao registado experimentalmente, com a excepção do modelo VBM-4. Ao comparar os modelos VBM-8 e VBM-4 verifica-se que o factor $V_{fd}^{ana.}/V_f^{exp.}$ diminui com a quantidade de reforço, ao contrário do que aconteceu na análise segundo o documento do *ACI*. Utilizando as expressões da *fib* também se verifica que no modelo VAM-19 existe um desfasamento muito elevado entre o resultado analítico e o experimental (em comparação com o verificado nos restantes modelos). Este resultado reforça o facto da possibilidade de ter existido uma deficiente aplicação do reforço originando uma rotura precoce da viga VAM-19.

QUADRO IX – Comparação de resultados experimentais vs analíticos (proposta da *fib*)

Vigas	Experimentais	Analíticos	$V_{fd}^{ana.}/V_f^{exp.}$
	$V_f^{exp.}$ (kN)	$V_{fd}^{ana.}$ * (kN)	
VAM-19	10.8	24.0	2.22
VAM-9.5	31.5	38.9	1.23
VBM-8	18.6	20.5	1.10
VBM-4	33.7	30.9	0.92

* Nos cálculos foi considerado o valor de f_{cm} à data do ensaio das vigas.

4.2 Reforço ao corte por inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento

Segundo De Lorenzis (2002), a contribuição do CFRP para a resistência ao esforço transversal (V_f) de uma determinada secção de betão armado reforçada ao corte por meio da inserção de varões de CFRP é condicionada por dois factores: pela resistência da ligação colada (a contribuição do CFRP para o reforço ao corte, nestas condições, é designada por V_{lf}) e pela limitação da extensão máxima no CFRP a 4% (a contribuição do CFRP

para o reforço ao corte, nestas condições, é designada por V_{2f}). O contributo do CFRP para o valor do esforço transversal resistente será o menor destas duas parcelas, i.e.,

$$V_f = \min(V_{1f}, V_{2f}). \quad (11)$$

A formulação analítica proposta por De Lorenzis para varões de CFRP foi adaptada para o caso de laminados de CFRP. Para a determinação da grandeza de V_{1f} e V_{2f} e, conseqüentemente, da grandeza de V_f considerar-se-á como altura efectiva da secção reforçada o valor dado por:

$$d_{net} = d_r - 2c \quad (12)$$

em que d_r é a altura real do reforço de CFRP e c é a distância da face horizontal da viga até à posição das armaduras longitudinais (Figura 11). Para a situação de reforço com laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais o valor de d_r coincide com o comprimento real do reforço.

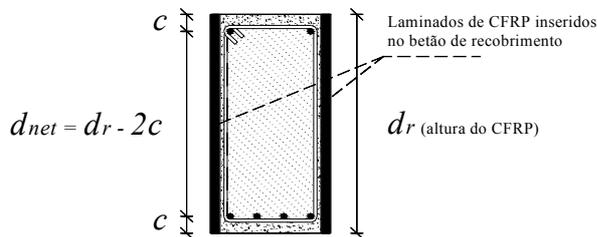
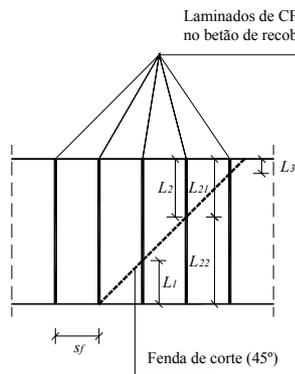


Figura 11 – Dados para a determinação da contribuição dos laminados de CFRP para a resistência ao corte

O valor de V_{1f} é dado por:

$$V_{1f} = 4(a+b)\tau_b L_{tot\ min} \quad (13)$$

em que a e b são as dimensões da secção transversal do laminado de CFRP. Para valor médio da tensão de aderência, τ_b , é proposto 6.9 MPa, enquanto $L_{tot\ min}$ é o somatório dos comprimentos de colagem efectivos dos laminados de CFRP (ver Figura 12) que atravessam a fenda de corte (com inclinação admitida constante e igual a 45°) na posição mais desfavorável.



Para cada CFRP atravessado pela fenda de corte, o comprimento de colagem efectivo L_i relativo a esse CFRP é o menor dos dois possíveis comprimentos (Ex: $L_2 = L_{21}$, dado que $L_{21} < L_{22}$).

L_{tot} é o somatório dos L_i dos CFRP atravessados pela fenda de corte. No exemplo da figura $L_{tot} = L_1 + L_2 + L_3$.

$L_{tot\ min}$ é o menor dos somatórios L_{tot} das possíveis posições da fenda de corte.

Figura 12 – Determinação do somatório dos comprimentos efectivos dos laminados de CFRP

O valor de $L_{tot\ min}$ é dado por:

para o caso de laminados inseridos em entalhes verticais:

$$L_{tot\ min} = d_{net} - s_f \quad \text{se } \frac{d_{net}}{3} \leq s_f < d_{net} \quad (14)$$

$$L_{tot\ min} = 2d_{net} - 4s_f \quad \text{se } \frac{d_{net}}{4} < s_f < \frac{d_{net}}{3}$$

para o caso de laminados inseridos em entalhes inclinados a 45°:

$$L_{tot\ min} = (2d_{net} - s_f) \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \text{se } \frac{2d_{net}}{3} \leq s_f < 2d_{net} \quad (15)$$

$$L_{tot\ min} = (d_{net} - s_f) 2\sqrt{2} \quad \text{se } \frac{d_{net}}{2} < s_f < \frac{2d_{net}}{3}$$

Para determinar a grandeza de V_{2f} é necessário, previamente, calcular o valor do comprimento efectivo do laminado de CFRP atravessado pela fenda de corte quando sujeito a uma extensão de 4%, designado por \bar{L}_i e que é obtido por intermédio de:

$$\bar{L}_i = 0.002 \frac{a \cdot b \cdot E_f}{a + b \cdot \tau_b} \quad (16)$$

A grandeza de V_{2f} é determinada em função do valor do espaçamento (s_f) entre laminados:

para o caso de laminados inseridos em entalhes verticais:

$$V_{2f} = 4(a+b)\tau_b \bar{L}_i \quad \text{se } \frac{d_{net}}{2} \leq s_f < d_{net} \quad (17)$$

$$V_{2f} = 4(a+b)\tau_b \bar{L}_i \frac{3d_{net} - 4s_f}{d_{net}} \quad \text{se } \frac{d_{net}}{4} < s_f < \frac{d_{net}}{2}$$

para o caso de laminados inseridos em entalhes inclinados a 45°:

$$V_{2f} = 4(a+b)\tau_b \bar{L}_i \quad \text{se } d_{net} \leq s_f < 2d_{net} \quad (18)$$

$$V_{2f} = 4(a+b)\tau_b \bar{L}_i \frac{3d_{net} - 2s_f}{d_{net}} \quad \text{se } \frac{d_{net}}{2} < s_f < d_{net}$$

No caso de se verificarem as condições (19) e (20) não é necessário calcular V_{2f} , pois V_{1f} é condicionante,

$$d_{net} < 2\bar{L}_i \quad (19)$$

para laminados inseridos em entalhes verticais;

$$d_{net} < \sqrt{2} \bar{L}_i \quad (20)$$

para laminados inseridos em entalhes inclinados a 45°.

O valor de cálculo da contribuição do reforço de CFRP para a resistência ao esforço transversal (V_{fd}) é obtido afectando o valor de V_f por um factor de segurança que vale 0.7.

No Quadro X apresentam-se os resultados experimentais e analíticos da participação do CFRP na resistência ao esforço transversal, bem como a relação entre

eles, para os modelos reforçados ao corte com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento. Refira-se que as expressões propostas por De Lorenzis (2002) não permitem quantificar analiticamente o valor da contribuição do reforço de CFRP na resistência ao corte para o modelo de viga VBCV-10, pois verifica-se que, neste modelo, o afastamento dos laminados, s_f , é superior ao valor da altura d_{net} .

QUADRO X – Comparação de resultados experimentais vs analíticos (proposta de De Lorenzis adaptada para o caso de laminados de CFRP)

Vigas	Experimentais	Analíticos	$V_{fd}^{ana.} / V_f^{exp.}$
	$V_f^{exp.}$ (kN)	$V_{fd}^{ana.}$ (kN)	
VACV-20	29.1	10.6	0.36
VACI-30	28.8	11.8	0.41
VACV-10	59.3	16.2	0.27
VACI-15	72.9	20.9	0.29
VBCI-15	23.2	7.1	0.31
VBCV-5	31.8	10.2	0.32
VBCI-7.5	36.4	16.9	0.46

A análise do Quadro X permite verificar que o factor $V_{fd}^{ana.} / V_f^{exp.}$ varia entre 0.27 e 0.46, constatando-se que os valores da contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal obtidos experimentalmente são, em termos médios, cerca de 2.9 vezes superiores aos valores fornecidos pelas expressões analíticas anteriormente apresentadas.

5. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos no programa de ensaios efectuado com modelos de vigas podem ser avançadas as conclusões seguintes:

- a utilização de compósitos de CFRP como elementos resistentes ao esforço transversal, colados externamente (mantas) ou inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento (laminados), permite aumentos significativos na capacidade máxima de carga de vigas de betão armado com rotura por corte;

- de entre as técnicas de reforço ao corte com CFRP, a que permitiu maior incremento de carga e de ductilidade foi a baseada na inserção de laminados em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas;

- as vigas reforçadas com faixas de laminado apresentaram carga máxima e níveis de ductilidade semelhantes aos registados nas vigas estribadas;

- aumentando a altura da viga, os laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° tornam-se mais eficazes que os laminados inseridos em entalhes verticais;

- quando comparada com a técnica que recorre à colagem externa de mantas de CFRP, a que se baseia na inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento é mais fácil e rápida de executar, pelo que mais económica. Além disto, este sistema de reforço fica mais protegido da acção do fogo e de actos de vandalismo;

- as propostas do “American Concrete Institute” (ACI) e da “Fédération Internationale du Béton” (fib) para o dimensionamento de reforços ao corte através da colagem externa de compósitos de CFRP, aplicadas aos modelos experimentais reforçados com o sistema curado “in situ” (mantas), conduziram a valores da contribuição do reforço de CFRP para a resistência ao corte superiores aos resultados experimentais;

- as expressões analíticas propostas por De Lorenzis, para a previsão da contribuição do reforço ao corte com varões de CFRP inseridos, foram aplicadas aos modelos experimentais reforçados ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento, tendo-se verificado que os resultados obtidos experimentalmente foram, em termos médios, 2.9 vezes superiores aos analíticos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam os seus agradecimentos à colaboração prestada pelas empresas UNIBETÃO (Central de Braga) na betonagem dos modelos e BeTTor MBT Portugal pela prestabilidade e fornecimento dos sistemas compósitos de reforço. O segundo autor agradece à bolsa SPRH/BD/3259/2000 da FCT e FSE.

7. REFERÊNCIAS

- ACI Committee 440, 2002, “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 440, Maio, 118 pp.
- ACI Committee 318, 2002, “*Building code requirements for structural concrete and commentary*”, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 118.
- Barros, J.A.O. e Fortes, A.S., 2002, “*Concrete beams reinforced with carbon laminates bonded into slits*”, 5º Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, Madrid, 3-6 Junio (Artigo convidado).
- Barros, J.A.O., Sena-Cruz, J.M., Dias, S.J.E., Ferreira, D.R.S.M. e Fortes, A. S., 2003-a, “*Investigação no âmbito da utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão*”, Vº Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, Brasil.
- Barros, J.A.O. and Dias, S.J.E., 2003-b, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams with laminate strips of CFRP*”, Proceedings of the International Conference Composites in Constructions - CCC2003, Itália, September, pp. 289-294.

- Basler, M., White, D. e Desroches, M., 2003, “*Shear strengthening with bonded CFRP L-shaped plates*”, Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, ACI Internacional SP-215, Editors: Sami Rizkalla and Antonio Nanni, pp. 373-384.
- Bettor MBT Portugal, 1999, “*Sistema Compósito MBrace*”, Fichas técnicas, Lisboa.
- Chaallal, O., Nollet, M.J. e Perraton D., 1997, “*Renforcement au cisaillement de poutres en béton armé par des lamelles composites collées à l’aide de résine époxy*”, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées - 212, Novembre/Decembre, pp. 87-93.
- Cruz, J.M.S. e Barros, J.A.O., 2002, “*Bond behaviour of carbon laminate strips into concrete by pullout-bending tests*”, Bond in Concrete – from the research to standards, International Symposium, 20 a 22 de Novembro, Budapest, Hungria, pp. 614-621.
- De Lorenzis, L. e Nanni, A., 2001, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams with-near surface mounted fiber-reinforced polymer rods*”, ACI Structural Journal, Vol. 98, Nº 1, January-February, pp. 60-68.
- De Lorenzis, Laura, 2002, “*Strengthening of RC Structures with Near-Surface Mounted FRP rods*”, PH. D. Dissertation of Civil Engineering, Università Degli Studi di Lecce, Italy, May, 289 pp.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2003, “*Materiais compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado*”, III Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 19 a 21 de Agosto, Maputo, Moçambique, pp. 539-550.
- Etman, E., Zaher, F. e Beeby, A.W., 2001, “*Experimental study of shear-strengthened beams*”, 7th International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs & Maintenance of Buildings & Structures, September, Nottingham, United Kingdom, pp. 313-320.
- Ferreira, D.R.S.M., 2000, “*Pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono*”, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- fib* - Bulletin 14, 2001, “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*”, technical report by Task Group 9.3 FRP (Fiber Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, Fédération Internationale du Béton - *fib*, July, 130 pp.
- Khalifa A., Gold, W.J., Nanni, A. e Aziz M.I.A., 1998, “*Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members*”, Journal of Composites for Construction, Vol.2, Nº4, November, pp. 195-202.
- NP-ENV 206, 1993, “*Betão - Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*”, Norma Portuguesa, IPQ, Outubro.
- REBAP, 1983, “*Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado*”, Decreto-Lei nº 349-C/83 de 30 de Julho, edição Porto Editora, Porto, 211 pp.
- Taerwe, L., Khalil, H. e Matthys S., 1997, “*Behaviour of RC beams strengthened in shear by external CFRP sheets*”, Proceedings of the Third International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Vol.1, Tokyo, October, pp. 483-490.
- Triantafillou T., 1998, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites*”, ACI Structural Journal, Vol. 95, Nº2, March-April, pp. 107-115.
- Triantafillou T. e Antonopoulos C. P., 2000, “*Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP*”, Journal of Composites for Construction, Vol. 4, Nº 4, November, pp. 198-205.