

# MATERIAS COMPÓSITOS DE CFRP NO REFORÇO AO CORTE DE VIGAS DE BETÃO ARMADO

Salvador Dias<sup>1</sup> e Joaquim Barros<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistente do Departamento de Eng.<sup>a</sup> Civil da Escola de Eng.<sup>a</sup> da Universidade do Minho

<sup>2</sup> Prof. Auxiliar do Departamento de Eng.<sup>a</sup> Civil da Escola de Eng.<sup>a</sup> da Universidade do Minho

*Com o objectivo de avaliar a eficiência, em termos de resistência ao esforço transversal, de laminados de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono) inseridos no betão de recobrimento, vigas de betão armado foram reforçadas com distintos sistemas de reforço e foram ensaiadas experimentalmente. Estes ensaios são descritos, os resultados obtidos são apresentados e interpretados, sendo comentados aspectos como a eficiência da técnica de reforço proposta, a influência da orientação das fibras, os modos de ruína observados e o padrão de fendilhação registado.*

## 1 - INTRODUÇÃO

Alguns estudos já efectuados (Taerwe et al., 1997; Chaallal et al., 1997; Triantafillou, 1998; Khalifa et al., 1998; Triantafillou et al., 2000 e Etman et al., 2001) 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, devido à ocorrência de roturas prematuras, principalmente o destacamento 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 formas de reforço ao corte utilizando compósitos de CFRP.

De Lorenzis et al., 2000 analisaram o comportamento de vigas de betão armado reforçadas ao corte com varões de CFRP inseridos no betão de recobrimento 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. Com varões inclinados obtiveram melhores resultados que os registados diminuindo o espaçamento dos varões 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). Ensaios 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 aos registados 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 ranhuras efectuadas 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 ranhuras 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, de uma campanha de ensaios experimentais sobre vigas de betão armado, em que a percentagem de CFRP, a orientação dos laminados e a altura da viga são parâmetros avaliados. Para tal, recorreu-se a vigas sem qualquer armadura transversal, vigas com estribos verticais, vigas em que a resistência ao corte será materializada por intermédio de faixas de manta de CFRP colocadas com as fibras orientadas a 90° em relação ao eixo das vigas, e vigas com laminados de CFRP dispostos verticalmente e inclinados a 45°, inseridos em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento das faces laterais da viga.

### **2.1 Concepção dos modelos**

A campanha de ensaios experimentais realizado engloba duas séries de vigas de betão armado. A série A é constituída por vigas com secção transversal de 0.15x0.30 m<sup>2</sup>, comprimento de 1.6 m e vão de 1.50 m. As vigas da série B têm secção transversal de 0.15x0.15 m<sup>2</sup>, comprimento de 1.0 m e vão de 0.90 m. Todas as vigas têm um vão de corte igual a duas vezes a altura da secção. Para cada uma das séries foram considerados dois tipos de armaduras longitudinais. O primeiro corresponde à colocação de 4φ10 na face traccionada, enquanto que no segundo adoptou-se 4φ12. Em todas as vigas utilizaram-se 2φ6 para armadura de compressão.

A resistência ao esforço transversal foi materializada recorrendo a três alternativas distintas. Uma utilizando os estribos de aço convencionais e as restantes adoptando sistemas compósitos de CFRP. Nestas, recorreu-se a faixas de manta unidireccionais de CFRP coladas exteriormente e a laminados de CFRP inseridos em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento. 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 cargas semelhantes (REBAP, 1983 e ACI Committee 440, 1999). Na Tabela 1 apresentam-se as informações gerais sobre os modelos ensaiados. A campanha de ensaios experimentais descrita nesta secção está a decorrer em simultâneo com a realização deste artigo. Assim, no presente trabalho apenas se apresentam os resultados dos ensaios efectuados com as vigas das séries A e B, armadas longitudinalmente com 4φ10 na face traccionada. Nas Figuras 1 e 2 apresentam-se os modelos ensaiados, cujos resultados serão apresentados e discutidos no presente trabalho.

Tabela 1 - Informações gerais sobre as vigas.

Designação das vigas	Armadura longitudinal	Resistência ao esforço transversal
Série A	VA10	-
	VAE-30	Estribo a 90° (6 $\phi$ 6 de 2 ramos @ 0.30 m)
	VAM-19	MBrace Manta C5-30 (forma de U, fibras orientadas a 90°, 8 faixas de 2 camadas com 0.025 m de largura e 0.19 m de espaçamento)
	VACV-20	MBrace Laminado LM a 90° (16 laminados com 0.20 m de espaçamento)
	VACI-30	MBrace Laminado LM a 45° (12 laminados com 0.30 m de espaçamento)
	VA12	-
	VAE-15	Estribo a 90° (10 $\phi$ 6 de 2 ramos @ 0.15 m)
	VAM-9.5	MBrace Manta C5-30 (forma de U, fibras orientadas a 90°, 14 faixas de 2 camadas com 0.025 m de largura e 0.095 m de espaçamento)
	VACV-10	MBrace Laminado LM a 90° (28 laminados com 0.10 m de espaçamento)
	VACI-15	MBrace Laminado LM a 45° (24 laminados com 0.15 m de espaçamento)
Série B	VB10	-
	VBE-15	Estribo a 90° (6 $\phi$ 6 de 2 ramos @ 0.15 m)
	VBM-8	MBrace Manta C5-30 (forma de U, fibras orientadas a 90°, 10 faixas de 2 camadas com 0.025 m de largura e 0.08 m de espaçamento)
	VBCV-10	MBrace Laminado LM a 90° (16 laminados com 0.10 m de espaçamento)
	VBCI-15	MBrace Laminado LM a 45° (12 laminados com 0.15 m de espaçamento)
	VB12	-
	VBE-7.5	Estribo a 90° (10 $\phi$ 6 de 2 ramos @ 0.075 m)
	VBM-4	MBrace Manta C5-30 (forma de U, fibras orientadas a 90°, 16 faixas de 2 camadas com 0.025 m de largura e 0.04 m de espaçamento)
	VBCV-5	MBrace Laminado LM a 90° (28 laminados com 0.05 m de espaçamento)
	VBCI-7.5	MBrace Laminado LM a 45° (24 laminados com 0.075 m de espaçamento)

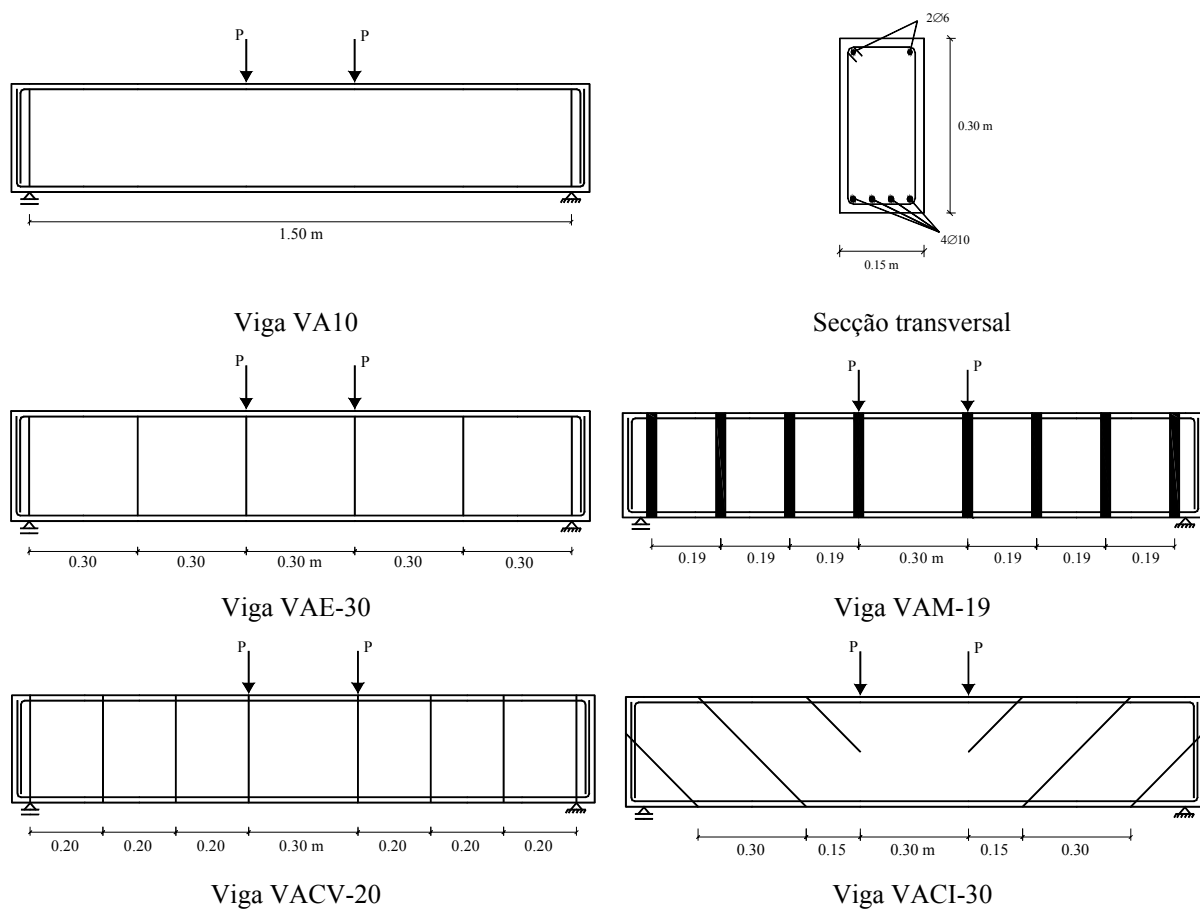


Figura 1 - Modelos VA10, VAE-30, VAM-19, VACV-20 e VACI-30.

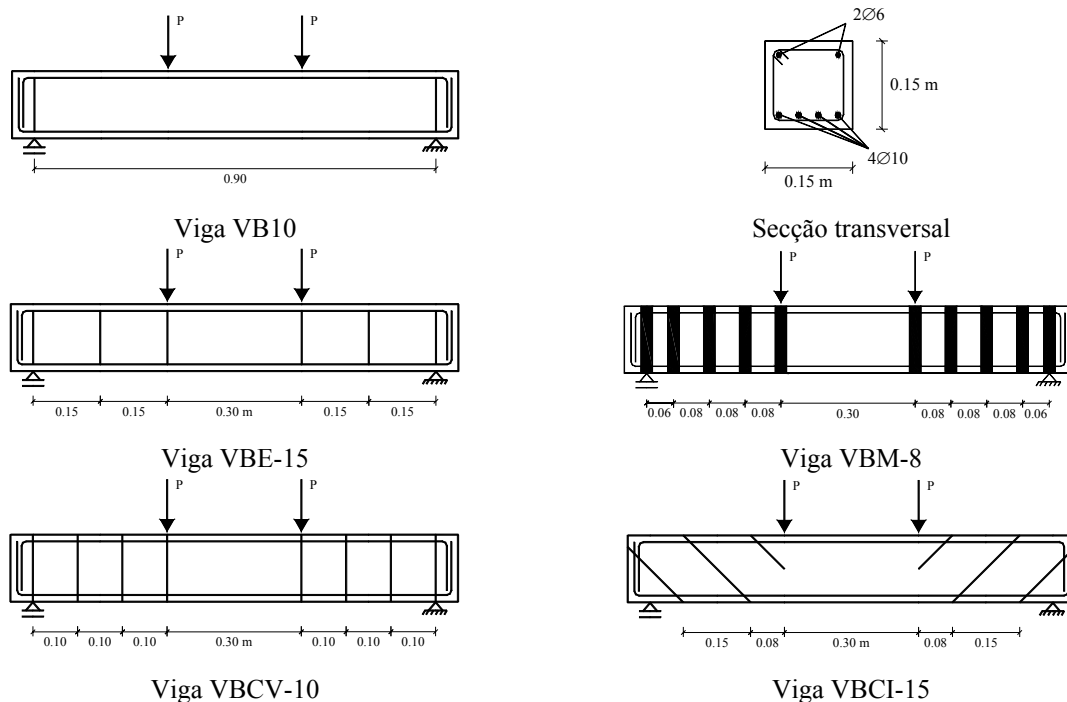


Figura 2 - Modelos VB10, VBE-15, VBM-8, VBCV-10 e VBCI-15.

## 2.2 Caracterização dos materiais

### 2.2.1 Betão e aço das armaduras convencionais

A avaliação da resistência à compressão do betão foi efectuada experimentalmente aos 28 dias e à data da realização dos ensaios das vigas. 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 características foram avaliadas por intermédio de ensaios de tracção uniaxial. Na Tabela 2 apresentam-se os resultados dos ensaios efectuados para a caracterização dos betões e dos aços utilizados.

Tabela 2 - Características do betão e do aço das armaduras convencionais.

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

\* Classe de resistência do betão segundo a NP-ENV-206; \*\*  $f_{sym}$  - Valor médio da tensão de cedência; \*\*\*  $f_{sum}$  - Valor médio da tensão de rotura.

### 2.2.2 Sistemas de CFRP

Neste trabalho foram utilizados dois sistemas compósitos de CFRP, 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), que se encontram resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características dos constituintes dos sistemas de CFRP utilizados.

Sistemas de CFRP		Principais propriedades			
Tipo	Materiais	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Extensão na rotura (‰)	Espessura (mm)
MBrace Manta C5-30	Primário	12	0.7	30	-
	Resina	54	3	25	-
	Manta	3000	390	8	0.167
MBrace Laminado LM	Adesivo	-	7	-	-
	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 através 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.

A aplicação do sistema pré-fabricado envolveu as seguintes tarefas: 1) abertura das ranhuras no betão de recobrimento das faces laterais das vigas, com cerca de 5 mm de largura e 12 mm de profundidade; 2) limpeza das ranhuras e laminados; 3) aplicação do adesivo nas ranhuras e nos laminados; 4) inserção dos laminados nas ranhuras. Nesta tarefa utilizou-se uma espátula para que toda a ranhura ficasse devidamente preenchida 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 e outra reforçada com laminados inseridos no betão. A secção transversal dos laminados de CFRP era de  $9.59 \pm 0.09$  mm de largura por  $1.45 \pm 0.005$  mm de espessura.

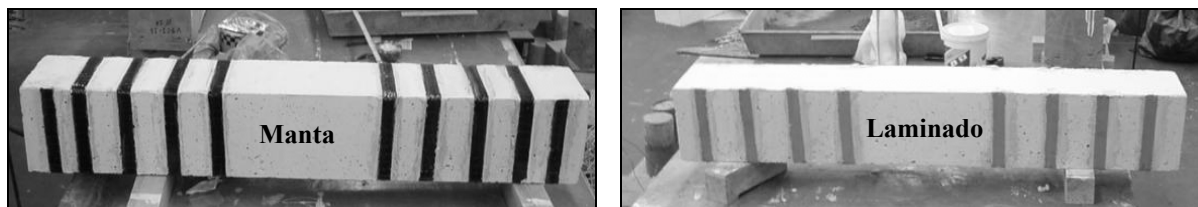


Figura 3 - Sistema curado in situ e sistema pré-fabricado (aplicação do reforço).

### 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 LVDTs de 25 e 50 mm de campo de medida. Os LVDTs ficaram

suportados num sistema (“Japanese Yoke”) que evita o registo de deslocamentos parasitas. Os ensaios foram controlados por intermédio do LVDT colocado a meio vão, tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de 0.01 mm/s.

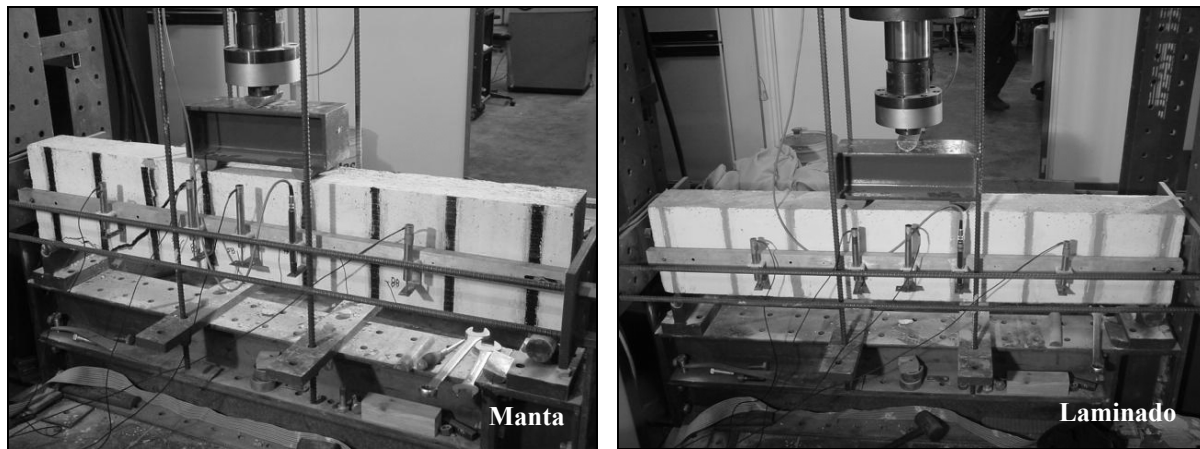


Figura 4 - Sistema de ensaio.

### 3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1 Série A - Vigas com 4φ10 longitudinais

Na Figura 6 ilustram-se as curvas carga total vs deslocamento central das vigas VA10, VAE-30, VAM-19, VACV-20 e VACI-30. Na Tabela 4 apresentam-se, para cada um dos modelos anteriormente referidos, os valores registados para a carga máxima. Atribuindo as designações  $F_{max,VA10}$  e  $F_{max,VAE-30}$  à carga 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 na Tabela 4 ( $F_{max}$  é a máxima força 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 5 para o caso da viga VACI-30) determinaram-se os factores  $\delta_p/\delta_{p,VA10}$  e  $\delta_p/\delta_{p,VAE-30}$  incluídos na Tabela 4 (em qualquer viga,  $\delta_p$  é o deslocamento correspondente a  $0.95F_{max}$ ).

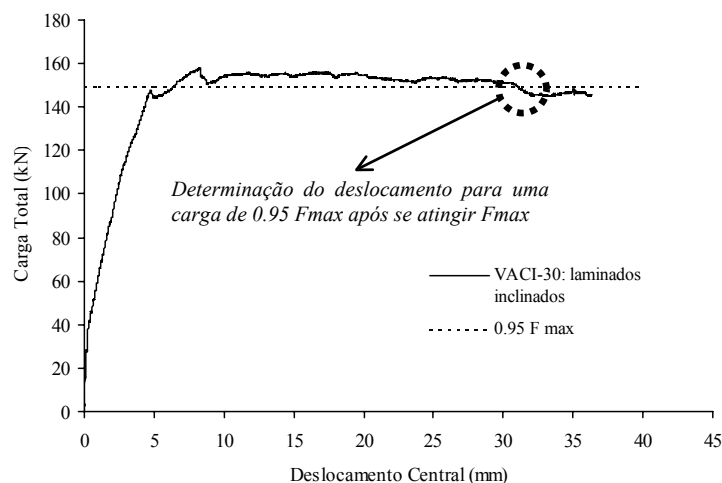


Figura 5 - Deslocamento para uma carga de 0.95  $F_{max}$  após se atingir  $F_{max}$ .

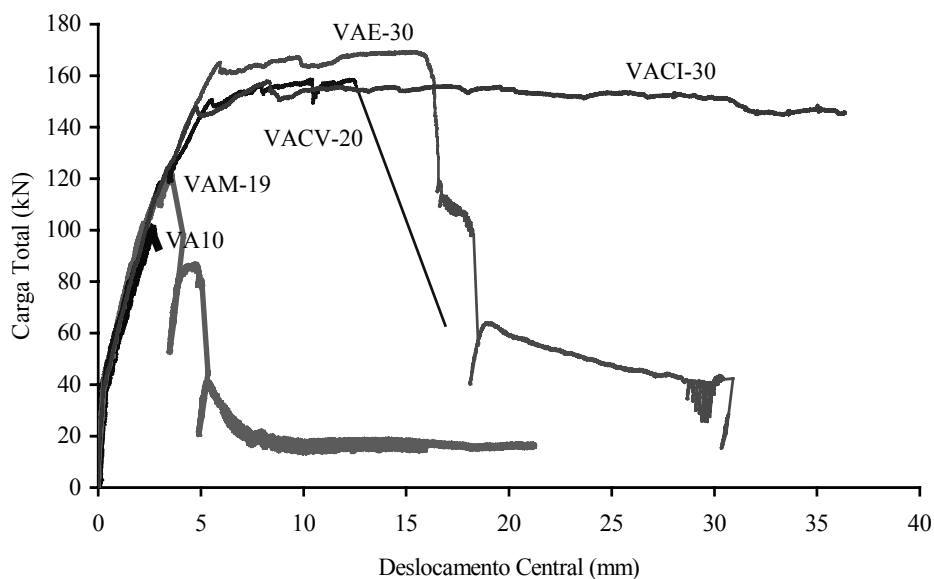


Figura 6 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas da série A com 4φ10.

Tabela 4 - Principais resultados dos ensaios das vigas da série A com 4φ10.

Vigas	Reforço ao corte	$F_{max}$ (kN)	$F_{max}/F_{max,VA10}$	$F_{max}/F_{max,VAE-30}$	$\delta_p$ (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	Estribos	169.35	1.69	1.00	16.25	5.80	1.00
VAM-19	Manta	122.06	1.22	0.72	3.75	1.34	0.23
VACV-20	Laminados verticais	158.64	1.58	0.94	12.86	4.59	0.79
VACI-30	Laminados inclinados	157.90	1.57	0.93	30.96	11.06	1.91

Da análise da Figura 6 e dos resultados apresentados na Tabela 4 verifica-se que a presença dos compósitos de CFRP (mantas e laminados) aumenta significativamente a capacidade máxima de carga das vigas de betão. Quando comparadas com a viga VA10 (sem qualquer reforço ao corte) constata-se que 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 na viga VAM-19 alcançou-se um valor 28% inferior, na viga VACV-20 atingiu-se um valor 6% inferior e na viga VACI-30 registou-se um valor 7% inferior.

O melhor desempenho dos laminados inclinados a 45° é notório em termos de ductilidade. Admitindo ser  $\delta_p$  um indicador de ductilidade, constata-se que, quando comparado com o deslocamento de pico verificado na viga VA10 ( $\delta_{p,VA10}$ ), o deslocamento “máximo” registado na viga VAE-30 foi 480% superior, enquanto nas vigas reforçadas com laminados verticais, inclinados e com faixas de manta foi 359%, 1006% e 34% superior, isto é, a viga reforçada

com laminados inclinados introduziu um acréscimo de ductilidade que é 191% superior ao acréscimo proporcionado pela viga estribada.

Na Figura 7 apresentam-se os modos de ruína verificados nas cinco vigas ensaiadas. A viga VA10 rompeu pela ocorrência de uma fenda de corte num dos vãos de corte, após se ter desenvolvido um pequeno número de fendas de flexão. Na viga estribada (VAE-30), após o desenvolvimento de fendas de flexão (em maior número que no caso anterior) surgiram duas fendas de corte, uma em cada vão de corte. A rotura acabou por ocorrer por abertura excessiva de uma dessas fendas, onde se deu o rompimento de um dos estribos aí localizados. O aumento da abertura da fenda de corte foi acompanhado pelo fecho das restantes fendas. A viga reforçada com faixas de manta (VAM-19) rompeu violentamente, com destacamento da manta, logo após a formação da fenda de rotura por corte. As vigas reforçadas com laminados inseridos no betão de recobrimento apresentaram modos de rotura mais dúcteis que o verificado na viga VAM-19 (manta), principalmente a viga VACI-30, cuja rotura foi por flexão. Nas vigas reforçadas com laminados inseridos, a carga residual de valor próximo da correspondente máxima carga foi mantida até flechas elevadas, principalmente na viga VACI-30, o que não aconteceu nas vigas reforçadas com faixas de manta (Figura 6).



Figura 7 - Modos de rotura verificados nas vigas da série A com  $4\phi 10$ .

### 3.2 Série B - Vigas com $4\phi 10$ longitudinais

Na Figura 8 ilustram-se as curvas carga total vs deslocamento central das vigas VB10, VBE-15, VBM-8, VBCV-10 e VBCI-15. Na Tabela 5 apresentam-se, para cada um dos modelos anteriormente referidos, os valores registados para a carga máxima. Atribuindo as designações  $F_{max,VB10}$  e  $F_{max,VBE-15}$  à carga máxima registada na viga sem qualquer armadura de resistência ao esforço transverso 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 na Tabela 4 ( $F_{max}$  é máxima força registada em qualquer viga). Designando por  $\delta_p,VB10$  e  $\delta_p,VBE-15$  os deslocamentos correspondentes a  $0.95F_{max,VB10}$  e  $0.95F_{max,VBE-15}$ , (ver exemplo da obtenção deste deslocamento na Figura 5 para o caso da viga VACI-30) determinaram-se os factores  $\delta_p/\delta_p,VB10$  e  $\delta_p/\delta_p,VBE-15$  incluídos na Tabela 5 (em qualquer viga,  $\delta_p$  é o deslocamento correspondente a  $0.95F_{max}$ ).



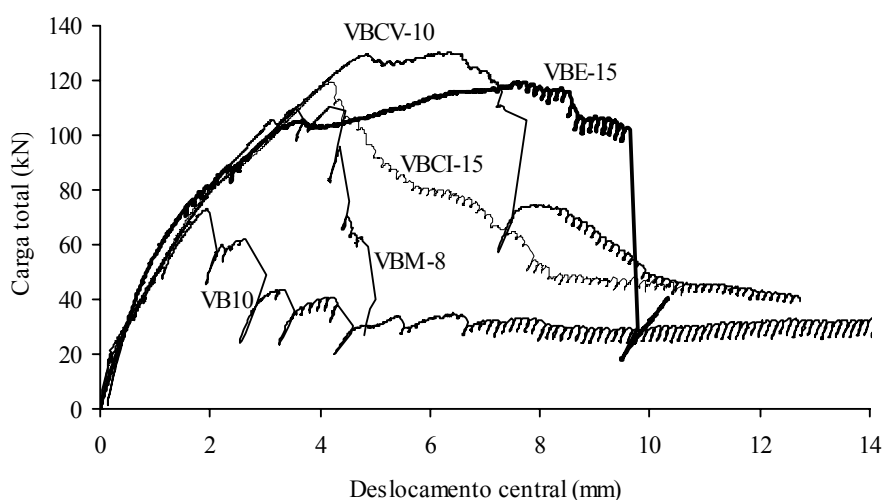


Figura 8 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas da série B com 4φ10.

Tabela 5 - Principais resultados dos ensaios das vigas da série B com 4φ10.

Vigas	Reforço ao corte	$F_{\max}$ (kN)	$F_{\max}/F_{\max,VB10}$	$F_{\max}/F_{\max,VBE-15}$	$\delta_p$ (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	Estribos	120.64	1.63	1.00	8.53	4.27	1.00
VBM-8	Manta	111.14	1.50	0.92	4.40	2.20	0.52
VBCV-10	Laminados verticais	131.22	1.77	1.09	6.83	3.42	0.80
VBCI-15	Laminados inclinados	120.44	1.63	1.00	4.27	2.14	0.50

Da análise da Figura 8 e dos resultados apresentados na Tabela 5 verifica-se que a presença dos compósitos de CFRP (mantas e laminados) aumenta significativamente a capacidade máxima de carga das vigas de betão. Quando comparadas com a viga VB10 (sem qualquer reforço ao corte) constata-se que 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 ao da viga anterior.

O melhor desempenho dos laminados aplicados verticalmente é ainda mais notório em termos de ductilidade. Considerando como indicador de ductilidade o deslocamento correspondente a  $\delta_p$ , 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% superior ao acréscimo proporcionado pela viga estribada.

Na Figura 9 apresentam-se os modos de ruína verificados nas cinco vigas ensaiadas. A viga VB10 rompeu pela ocorrência de uma fenda de corte num dos vãos de corte, após se ter desenvolvido um pequeno número de fendas de flexão. Devido ao tipo de controlo utilizado no ensaio, foi possível registar a resposta deformacional após o pico de carga (ver Figura 8).

Na viga estribada (VBE-15), após o desenvolvimento de fendas de flexão (em maior número que no caso anterior) surgiram duas fendas de corte, uma em cada vão de corte. A rotura acabou por ocorrer por abertura excessiva de uma dessas fendas, onde se deu o rompimento de um dos estribos aí localizados. O aumento da abertura da fenda de corte foi acompanhado pelo fecho das restantes fendas.

A viga reforçada com faixas de manta (VBM-8) rompeu violentamente logo após a formação da fenda de rotura por corte. A energia elástica acumulada nas faixas de manta durante a deformação da viga impediu que o controlador do equipamento assegurasse a estabilidade do ensaio após a carga máxima.

As vigas reforçadas com laminados inseridos no betão de recobrimento apresentaram modos de rotura mais dúcteis que o verificado na viga VBM-8 (manta), principalmente a reforçada com laminados verticais (VBCV-10). Nas vigas reforçadas com laminados inseridos regista-se uma carga residual para grandes flechas, o que não acontece nas vigas reforçadas com manta ou com estribos. Tal deve-se à energia libertada no momento de rotura, que é muito elevada, principalmente nas vigas reforçadas com mantas, e nas vigas estribadas em que ocorre rotura de estribos. Por sua vez, a resistência elevada dos laminados obriga a fenda de rotura a progredir entre os dois primeiros laminados, a partir de um dos pontos de carga (ver Figura 9). Este facto deve ter induzido alguma plastificação na armadura longitudinal que atravessava a fenda de rotura tendo proporcionado o aparecimento do patamar observado na resposta deformacional desta viga (ver Figura 8).

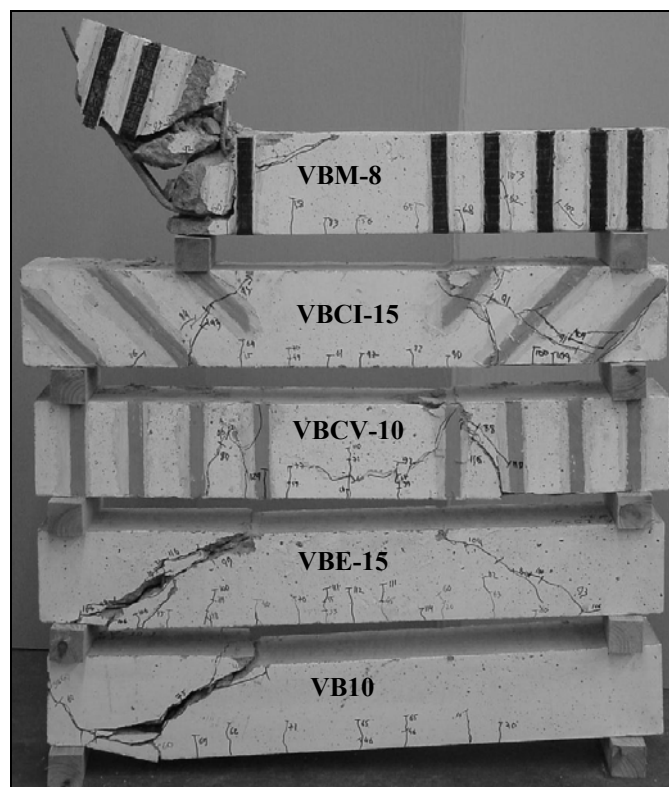


Figura 9 - Modos de rotura verificados nas vigas da série B com  $4\phi 10$ .

## 4 - CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos na campanha de ensaios efectuada com modelos de vigas, as seguintes conclusões podem ser avançadas:

- a utilização de compósitos de CFRP como elementos resistentes ao esforço transversal, colados externamente (mantas) ou inseridos no betão de recobrimento (laminados), permite aumentos significativos na capacidade máxima de carga de vigas de betão armado;
- 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 ranhuras efectuadas no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. As vigas reforçadas com faixas de laminado apresentaram carga de rotura e níveis de ductilidade semelhantes aos registados nas vigas estribadas;
- após a carga de pico, as vigas reforçadas com laminados apresentaram uma capacidade de carga residual superior ao registado nas restantes vigas, demonstrativo da sua maior ductilidade para grandes deformações;
- quando comparada com a técnica que recorre à colagem externa de manta 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.

## 5 - 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. Um agradecimento especial ao aluno Miguel Freitas, finalista da licenciatura em Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela colaboração na campanha de ensaios levada a cabo para a realização deste trabalho.

## 6 - REFERÊNCIAS

1. ACI Committee 440, 1999, “*Guidelines for the selection, design, and installation of fiber reinforced polymer (FRP) systems for external strengthening of concrete structures*”, American Concrete Institute, ACI Committee 440, Outubro, 97 pp.
2. Barros, J.A.O. e Fortes, A.S., 2002, “*Concrete beams reinforced with carbon laminates bonded into slits*”, 5º Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Madrid, 3-6 Junio (Artigo convidado).
3. Barros, J.A.O. e Fortes, A.S., 2003, “*Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits*”, submetido para apreciação, para publicação na Revista Composites For Construction, ASCE.
4. Bettor MBT Portugal, 1999, “*Sistema Compósito MBrace*” Fichas técnicas, Lisboa.

5. Chaallal, O., Nollet, M.J. et 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/Décembre, pp. 87-93.
6. 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.
7. De Lorenzis, L., A. Nanni and A. La Tegola, 2000, “*Flexural and shear strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods*”, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada, J. Humar and A. G. Raazaqpur, Editors, 15-18 August, pp. 521-528.
8. Etman E. et al., 2001, “*Experimental study of shear-strengthened beams*”, 7<sup>th</sup> International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs & Maintenance of Buildings & Structures, September, Nottingham, United Kingdom, pp. 313-320.
9. Ferreira, D.R.S.M, 2001, “*Pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono*”, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
10. Khalifa A., Gold, W.J., Nanni, A. and Aziz M.I.A., 1998, “*Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members*”, Journal of Composites for Construction, Vol. 2, N° 4, November, pp. 195-202.
11. REBAP, 1983, “*Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado*”, Decreto-Lei n° 349-C/83 de 30 de Julho, edição Porto Editora, Porto, 211 pp.
12. Taerwe, L., Khalil, H. and 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.
13. Triantafillou T., 1998, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites*”, ACI Structural Journal, March-April, pp. 107-115.
14. Triantafillou T. and Antonopoulos C. P., 2000, “*Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP*”, Journal of Composites for Construction, Vol. 4, N° 4, November, pp. 198-205.