

VIGAS DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS AO CORTE COM LAMINADOS DE CFRP - UMA TÉCNICA NOVA



Salvador DIAS
Assistente
Universidade do Minho
Guimarães
sdias@civil.uminho.pt



Joaquim BARROS
Prof. Auxiliar
Universidade do Minho
Guimarães
barros@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

Com o objectivo de avaliar a eficácia em termos de resistência ao esforço transversal de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento foram efectuados ensaios com vigas de betão armado. Estes ensaios são descritos, os resultados obtidos e os modos de rotura observados são apresentados e comentados.

1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos [1-6] 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. A técnica de reforço ao corte que se propõe neste trabalho tem como principal objectivo aumentar a eficácia do CFRP. Para tal, faixas de laminado de CFRP são inseridas em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento 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 aplicada nas técnicas de reforço correntes com CFRP, o que permite aumentar o grau de fixação do laminado ao betão, mobilizando-se tensões mais elevadas na 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.

A eficácia da técnica que se propõe foi avaliada por intermédio de uma campanha de ensaios experimentais sobre vigas de betão armado, em que a percentagem e a orientação das fibras do laminado, e a altura da viga foram parâmetros considerados. Neste trabalho são apresentados e interpretados os principais resultados, sendo comentados aspectos como a eficiência do reforço, a influência da orientação das fibras, os modos de ruína observados e o padrão de fendilhação desenvolvido.

2. ENSAIOS PRELIMINARES

Previamente à realização da campanha de ensaios descrita na secção seguinte, efectuaram-se ensaios preliminares à flexão sob três pontos de carga sobre duas vigas de betão armado de $0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$ de secção transversal e 0.60 m de comprimento (a distância entre apoios adoptada foi de 0.50 m) com o objectivo de avaliar a viabilidade da técnica que se propõe. Longitudinalmente as duas vigas foram armadas com $3\phi 10$ na face traccionada e $2\phi 6$ na face comprimida. Para resistir ao esforço transversal uma das vigas (VE) foi dotada de estribos de 6 mm de diâmetro afastados de 0.125 m, enquanto que a solução adoptada para a outra viga (VSE) passou pela utilização de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento (laminados com secção transversal de $9.59 \pm 0.09 \text{ mm}$ de largura por $1.45 \pm 0.005 \text{ mm}$ de espessura [7]) afastados de 0.083 m. Neste dimensionamento teve-se em conta as propriedades dos materiais intervenientes [7] e as recomendações do ACI [8]. Na Figura 1 apresentam-se os modelos ensaiados.

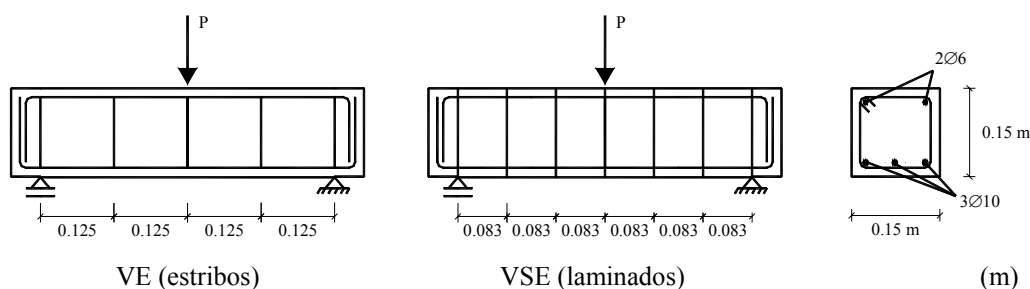


Figura 1 - Modelos VE e VSE (ensaios preliminares).

Na Figura 2 apresentam-se as curvas carga vs deslocamento central das duas vigas ensaiadas, assim como uma recta correspondente à contribuição do betão na resistência ao esforço transversal, V_{cd} [9]. A viga estribada (VE) apresentou uma carga máxima 10% superior à registada na viga reforçada com laminados (VSE) e uma rigidez mais elevada. Esta diferença de comportamento está associada ao diferente modo de rotura registado nas duas vigas. Na viga VSE formaram-se três corpos, um de cada lado do provete e um no centro desenvolvendo-se desde próximo dos apoios (do lado de dentro) até ao ponto de carga. Este corpo praticamente separou-se dos outros dois, dado que os laminados não abraçam o núcleo de betão da viga. No entanto, o aumento de resistência ao corte proporcionado pelo sistema de reforço proposto é bastante elevado, o suficiente para desafiar os autores do presente trabalho a elaborar a campanha experimental descrita na secção seguinte.

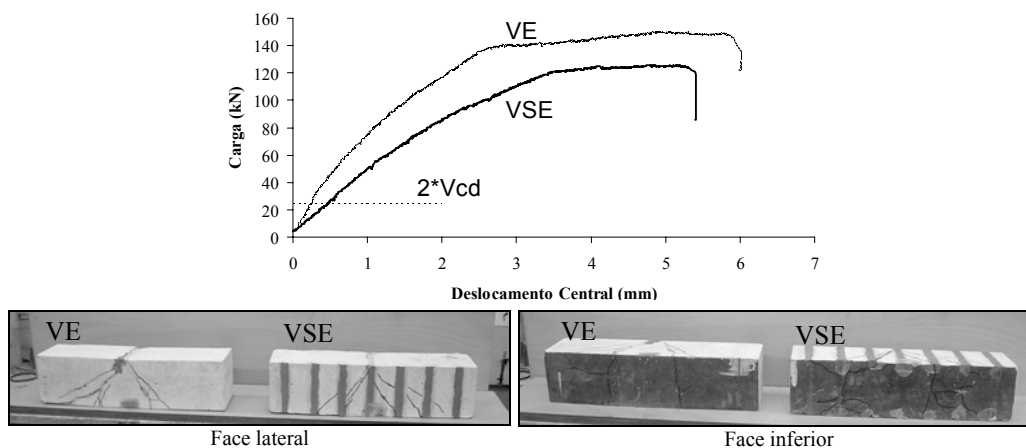


Figura 2 - Curvas carga vs deslocamento central e modos de ruína das vigas VE e VSE.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Concepção dos modelos

O programa experimental realizado engloba duas séries de vigas. A série A é constituída por vigas com secção transversal de $0.15 \times 0.30 \text{ m}^2$, comprimento de 1.6 m e vão de 1.50 m. As vigas da série B têm secção transversal de $0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$, 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 $4\phi 10$ na face traccionada, enquanto que no segundo adoptou-se $4\phi 12$. Em todas as vigas utilizou-se $2\phi 6$ para a armadura de compressão.

A resistência ao esforço transversal foi materializada recorrendo a três hipóteses distintas. Uma utilizando os estribos de aço convencionais e as restantes adoptando sistemas compósitos de CFRP. Para esta última solução recorreu-se a mantas de CFRP coladas exteriormente e a laminados de CFRP inseridos em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento. Para as várias hipóteses procedeu-se a um pré-dimensionamento de forma a que o modo de ruína dos elementos fosse por corte e para cargas semelhantes.

Na Tabela 1 apresentam-se as informações gerais sobre os modelos ensaiados. Para uma melhor compreensão da Tabela 1 apresentam-se na Figura 3 os modelos VB10, VBE-15, VBM-8, VBCV-10 e VBCI-15.

3.2 Caracterização dos materiais

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 com 15 cm de diâmetro e 30 cm de comprimento. Nas vigas ensaiadas utilizaram-se três tipos de aço nervurado (diâmetro de 6, 10 e 12 mm), cujas características foram avaliadas através de ensaios de tracção uniaxial. Na Tabela 2 apresentam-se os resultados dos ensaios efectuados para a caracterização do betão e do aço utilizados.

Tabela 1 - Informações gerais sobre os modelos ensaiados.

Designação das vigas	Armadura longitudinal	Resistência ao esforço transversal
Série A	VA10	-
	VAE-30	Estribos a 90° (6φ6 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 - cutins a 90° (16 cutins com 0.20 m de espaçamento)
	VACI-30	MBrace Laminado LM - cutins a 45° (12 cutins com 0.30 m de espaçamento)
	VA12	-
Série B	VAE-15	Estribos a 90° (10φ6 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 - cutins a 90° (28 cutins com 0.10 m de espaçamento)
	VACI-15	MBrace Laminado LM - cutins a 45° (24 cutins com 0.15 m de espaçamento)
	VB10	-
	VBE-15	Estribos a 90° (6φ6 de 2 ramos @ 0.15 m)
Série B	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 - cutins a 90° (16 cutins com 0.10 m de espaçamento)
	VBCI-15	MBrace Laminado LM - cutins a 45° (12 cutins com 0.15 m de espaçamento)
	VB12	-
	VBE-7.5	Estribos a 90° (10φ6 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)
Série B	VBCV-5	MBrace Laminado LM - cutins a 90° (28 cutins com 0.05 m de espaçamento)
	VBCI-7.5	MBrace Laminado LM - cutins a 45° (24 cutins com 0.075 m de espaçamento)

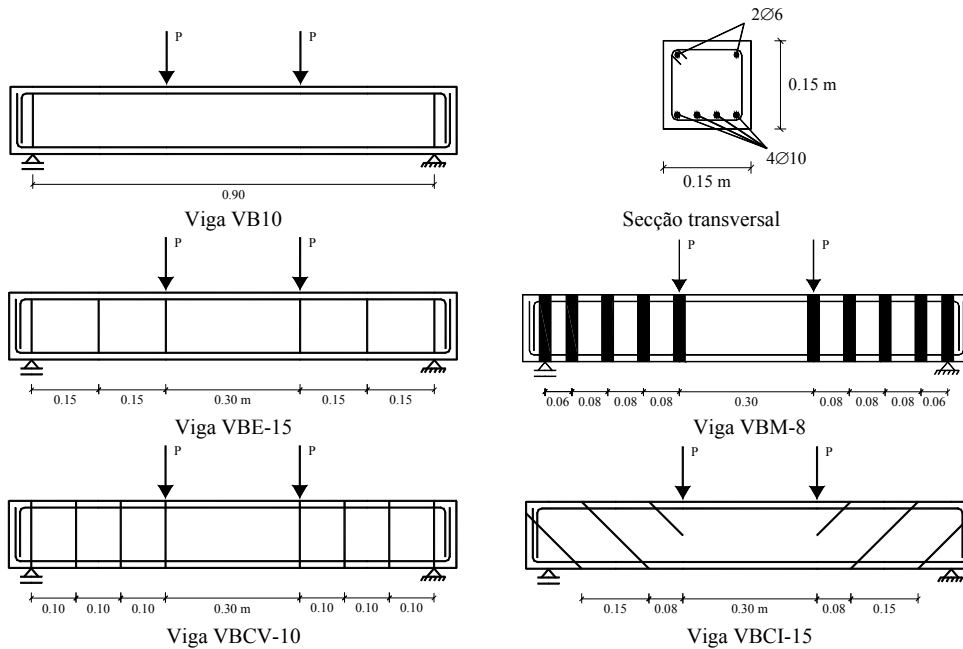


Figura 3 - Modelos VB10, VBE-15, VBM-8, VBCV-10 e VBCI-15.

Tabela 2 - Características 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	$f_{cm} = 49.5$ MPa (C40/50) *		$f_{cm} = 56.2$ MPa (105 dias de idade)	
Vigas		$\phi 6$ (longitudinal)	$\phi 6$ (transversal)	$\phi 10$	$\phi 12$
Aço	Série A	$f_{sym} = 622$ MPa	$f_{sym} = 540$ MPa	$f_{sym} = 464$ MPa	$f_{sym} = 574$ MPa
		$f_{sum} = 702$ MPa	$f_{sum} = 694$ MPa	$f_{sum} = 581$ MPa	$f_{sum} = 672$ MPa
	Série B	$f_{sym} = 618$ MPa	$f_{sym} = 540$ MPa	$f_{sym} = 464$ MPa	$f_{sym} = 571$ MPa
		$f_{sum} = 691$ MPa	$f_{sum} = 694$ MPa	$f_{sum} = 581$ MPa	$f_{sum} = 673$ MPa

* Classe de resistência do betão segundo a NP-ENV-206.

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. A Figura 4 apresenta os dois sistemas de CFRP utilizados. As características dos materiais utilizados foram obtidas das fichas técnicas disponibilizadas pelo fornecedor [10], que se encontram resumidas na Tabela 3. No entanto, ensaios de tracção uniaxial efectuados por Sena e Barros [7] com provetes do laminado utilizado no presente trabalho forneceram 158.8 ± 2.6 GPa (c.v. 1.6 %) para valor médio de módulo de Young, 2739.5 ± 85.7 MPa (c.v. 3.1 %) para valor médio de resistência à tracção e 17.0 ± 0.4 ‰ (c.v. 2.4 %) para extensão última.

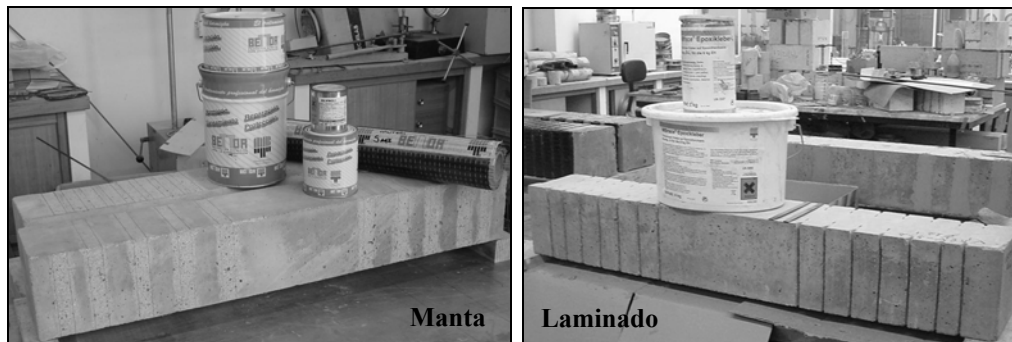


Figura 4 - Sistema curado in situ e sistema pré-fabricado.

3.3 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 de forma a 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 com cerca de 5 mm de espessura e 12 mm de profundidade; 2) limpeza da ranhura executada no betão, e limpeza do laminado; 3) aplicação do adesivo na ranhura do betão e no laminado; 4) inserção do laminado na ranhura, recorrendo para tal a uma espátula de forma a preencher com adesivo toda a ranhura, tendo-se evitado a formação de vazios e retirado o adesivo em excesso. Na Figura 5 apresenta-se o aspecto final de uma viga reforçada com manta e outra reforçada com laminados inseridos no betão.

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

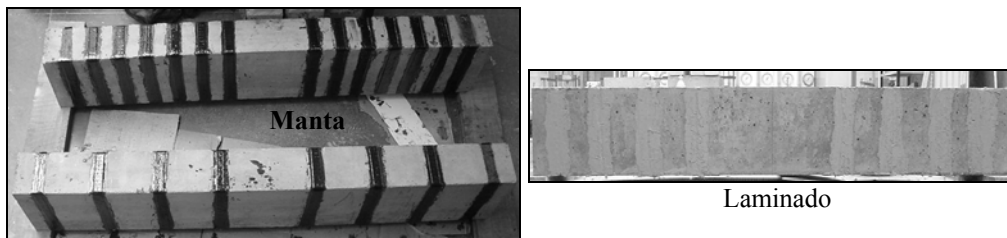


Figura 5 - Sistema curado in situ e sistema pré-fabricado (aplicação do reforço).

3.4 Sistema de ensaio

O sistema de ensaio usado consistiu em solicitar as vigas a um carregamento constituído por quatro pontos de carga, até à rotura (Figura 6). 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.

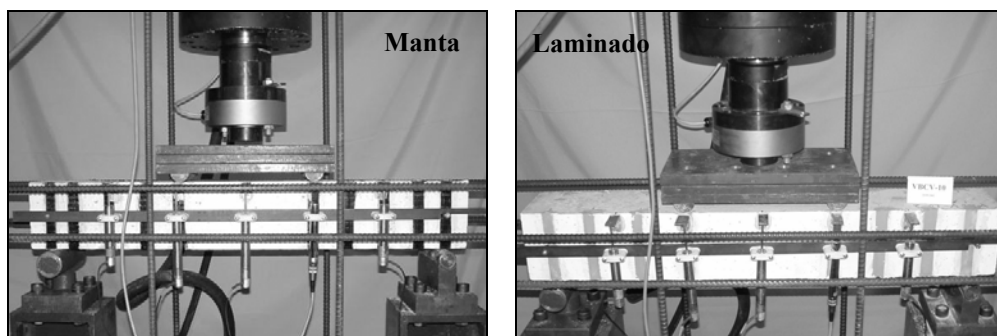


Figura 6 - Sistema de ensaio.

Os LVDTs ficaram suportados num sistema (“Japanese Yoke”) que evita a leitura 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.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A campanha de ensaios experimentais descrita na anterior 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 da série B, armadas com 4 ϕ 10 (ver Tabela 1 e Figura 3). Na Figura 7 ilustram-se as curvas carga total vs deslocamento central das vigas VB10, VBE-15, VBM-8, VBCV-10 e VBCI-15. Na Tabela 4 apresentam-se, para cada um dos modelos anteriormente referidos, os valores registados para a carga máxima e respectiva flecha central. 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 $F_{max}/F_{max,VBE-15}$ (F_{max} é máxima força registada em qualquer viga) indicados na Tabela 4. Designando por $\delta_p,VB10$ e $\delta_p,VBE-15$ os deslocamentos correspondentes a $F_{max,VB10}$ e $F_{max,VBE-15}$, determinaram-se os factores $\delta_p/\delta_p,VB10$ e $\delta_p/\delta_p,VBE-15$ (δ_p é o deslocamento correspondente a F_{max}) incluídos na Tabela 4.

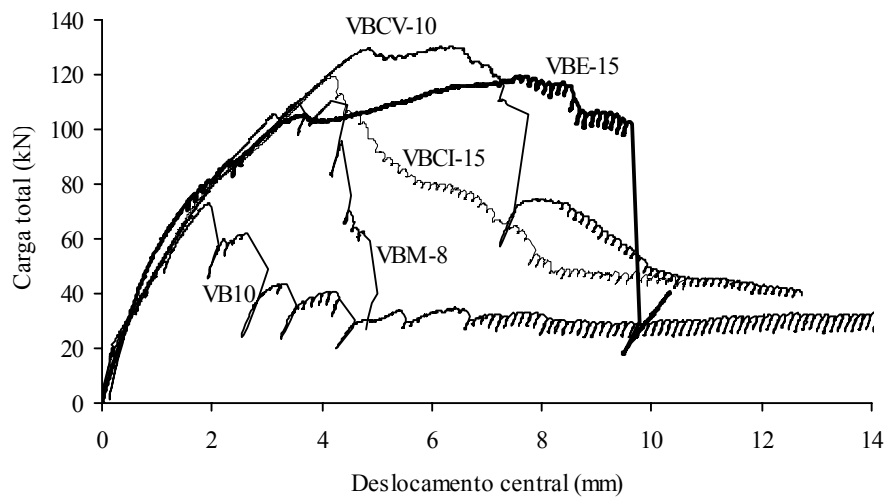


Figura 7 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas ensaiadas.

Tabela 4 - Principais resultados dos ensaios das vigas ensaiadas.

Vigas	Reforço ao corte	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	1.92	1.00	0.25
VBE-15	Estribos	120.64	1.63	1.00	7.57	3.94	1.00
VBM-8	Manta	111.14	1.50	0.92	4.18	2.18	0.55
VBCV-10	Laminados verticais	131.22	1.77	1.09	6.37	3.32	0.84
VBCI-15	Laminados inclinados	120.44	1.63	1.00	4.21	2.19	0.56

Da análise da Figura 7 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 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 a manta alcançou um valor 8% inferior, os laminados verticais um valor 9% superior e os laminados inclinados atingiram um valor muito similar.

O melhor desempenho dos laminados aplicados verticalmente é ainda mais notório em termos de ductilidade. Considerando como indicador de ductilidade o deslocamento correspondente à máxima carga, δ_p , constata-se que, quando comparado com o deslocamento de pico verificado na viga VB10 ($\delta_{p,VB10}$), o deslocamento de pico registado na viga VBE-15 foi 294% superior, enquanto nas vigas reforçadas com laminados verticais, inclinados e com faixas de manta foi 232%, 119% e 118% superior, isto é, a viga reforçada com laminados verticais introduziu um acréscimo de ductilidade que é 84% do acréscimo proporcionado pela viga estribada.

Na Figura 8 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 7).

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 8). 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 7).

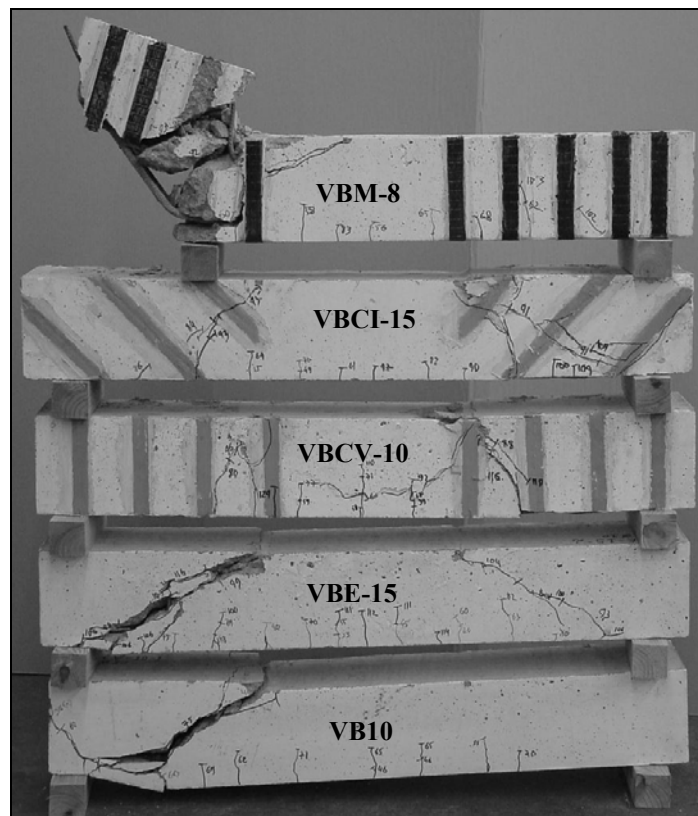


Figura 8 - Modos de rotura verificados.

5. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios sobre modelos de vigas apresentados no presente trabalho permitiram extrair as seguintes conclusões:

- 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 utilizadas, a que permitiu maior incremento de carga e de ductilidade foi a baseada na inserção de laminados em ranhuras verticais efectuadas no betão de recobrimento das vigas. Em comparação com o comportamento registado na viga estribada (VBE-15), a viga VBCV-10 apresenta maior carga de rotura e ductilidade ligeiramente inferior;
- 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.

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.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Chaallal, O., 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.
- [2] Taerwe, L. et al., 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, Porto, October, pp. 483-490.
- [3] Triantafillou T., 1998, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites*”, ACI Structural Journal, March-April, pp. 107-115.
- [4] Khalifa A. et al., 1998, “*Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members*”, Journal of Composites for Construction, November, pp. 195-202.
- [5] Triantafillou T. and Antonopoulos C. P., 2000, “*Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP*”, Journal of Composites for Construction, November, pp. 198-205.
- [6] Etman E. et al., 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.
- [7] Cruz, J.M.S. e Barros, J.A.O., 2002, “*Caracterização experimental da ligação de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento*”, Relatório 02-DEC/E-15, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.
- [8] ACI Committee 440, 2000, “*Guide for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, American Concrete Institute, ACI Committee 440, Julho, 95 pp.
- [9] RSA, 1983, “*Regulamento de segurança e acções para edifícios e pontes*”, Decreto-Lei nº 253/83 de 31 de Maio, edição Lopes da Silva, Porto, 93 pp.
- [10] BeTTor MBT Portugal, 1999, “*Sistema Compósito MBrace*” - Fichas técnicas, Lisboa.