

REFORÇO À FLEXÃO COM COMPÓSITOS DE CFRP DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA-COLADA

Salvador Dias, Jorge Branco e Paulo Cruz
Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Portugal

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma campanha de ensaios em vigas de madeira lamelada-colada reforçadas à flexão com dois sistemas de compósitos unidireccionais de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono), o curado “in situ” (manta) e o pré-fabricado (laminado). Para cada sistema de CFRP, o reforço foi aplicado externamente ou internamente na face inferior da penúltima lamela. No caso do reforço interno foi, também, avaliada a influência da colagem do CFRP numa pequena cavidade previamente executada na face da lamela a reforçar. Os resultados obtidos são analisados e interpretados, referindo-se as principais conclusões, tendo em vista avaliar a viabilidade do reforço à flexão de vigas de madeira lamelada-colada através da colagem de compósitos de CFRP.

1. INTRODUÇÃO

Os novos produtos estruturais derivados de madeira, como a madeira lamelada-colada (“glulam”), vieram dar um enorme impulso a este material, abrindo novos campos de aplicação e estabelecendo padrões de produção e utilização compatíveis com as modernas exigências das construções. No entanto, a procura crescente destes produtos, a redução progressiva de stocks de madeira de elevada qualidade e a necessidade de racionalizar o uso de um recurso escasso e valioso, vêm incentivando o desenvolvimento de novas soluções estruturais que, preservando no produto final a beleza do material primário, permitam aumentar o seu desempenho e, conseqüentemente, reduzir o seu consumo.

O desempenho de estruturas de madeira lamelada-colada à flexão é condicionado pela resistência à tracção da madeira das lamelas, o que tem motivado a busca de novas soluções baseadas no reforço da zona traccionada. Assim, nos últimos anos tem sido investigado o potencial de reforço associado a uma variedade de materiais, como o aço, o alumínio e os polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP), de carbono (CFRP) e de aramida (AFRP) (Moulin et al., 1990; Tingley, 1996-a; Tingley, 1996-b; Dolan et al., 1997 e Romani et al., 2000).

Os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) têm sido utilizados, com muito sucesso, em diversas áreas tais como a indústria aeronáutica, automobilística e naval. Nos finais dos anos setenta e inícios dos anos oitenta, iniciou-se a investigação destes materiais aplicados às estruturas de engenharia civil, nomeadamente no reforço de estruturas de betão. Com efeito, devido à necessidade, cada vez maior, de reabilitar e reforçar estruturas de betão tornou-se imperativo que surgissem técnicas que recorram a materiais duráveis e de elevada

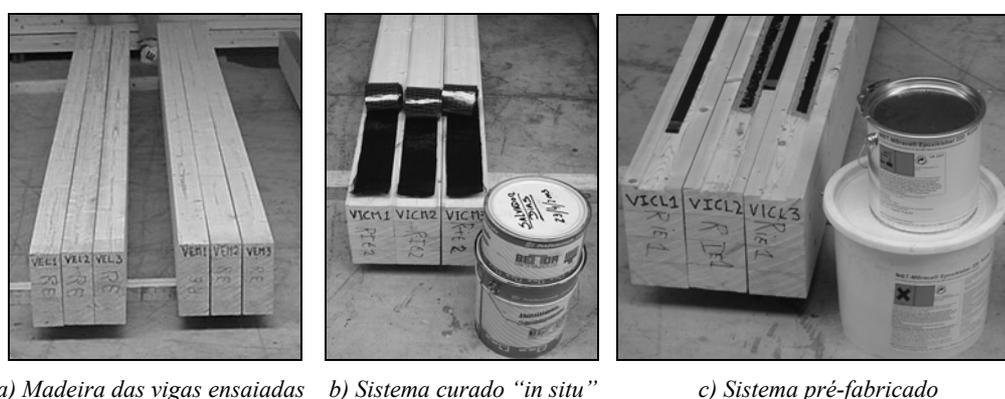
resistência mecânica, que minimizem os efeitos em termos estéticos e que sejam de rápida e simples execução. Diversos estudos já realizados demonstram que a colagem de compósitos de CFRP em estruturas de betão é uma técnica de reforço eficaz e que garante os requisitos atrás referidos (CCC2001, 2001; Dias et al., 2002 e Barros et al., 2003).

Neste contexto foi realizada, no Laboratório de Ensaio de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, uma campanha de ensaios em vigas de madeira lamelada-colada reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP, de forma a avaliar a eficiência do referido reforço quer em termos de facilidade e rapidez de execução quer em termos de ganhos de rigidez, resistência e ductilidade, comparando o comportamento das vigas reforçadas com uma viga de referência não reforçada.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Caracterização dos materiais utilizados e da ligação madeira-CFRP

A madeira das vigas ensaiadas (Figura 1a), da espécie do Abeto (*Picea Abies*) oriundo da Finlândia, tem uma resistência à flexão, em termos de valores característicos, de 18.0 MPa, ou seja a sua classe de resistência é a C18 (EN 338, 1995).



a) Madeira das vigas ensaiadas b) Sistema curado “in situ” c) Sistema pré-fabricado

Figura 1 - Materiais utilizados

Tabela 1 - Principais propriedades dos constituintes dos sistemas de CFRP utilizados

Sistemas de CFRP		Principais propriedades			
Tipo	Materiais	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Extensão na rotura (%)	Espessura (mm)
MBrace Manta C1-30	Resina	54	3	25	-
	Manta	3700	240	15	0.167
MBrace Laminado HM	Adesivo	-	7	-	-
	Laminado	2200	200	11	1.4

O reforço das vigas de madeira lamelada-colada foi executado com dois sistemas compósitos de CFRP unidireccionais (Figura 1b e 1c), a manta flexível curada “in situ” (MBrace

Manta C1-30) e o laminado pré-fabricado (MBrace Laminado HM). As principais características dos constituintes dos sistemas de CFRP foram retiradas da literatura técnica disponibilizada pelo seu fabricante (Bettor MBT Portugal, 1999) e estão resumidas na Tabela 1.

A caracterização da ligação madeira-CFRP foi efectuada, para cada sistema de reforço de CFRP adoptado, através de ensaios de arrancamento por tracção (ensaio de “pull-off”) em troços de madeira obtidos a partir das lamelas utilizadas para a concepção das vigas ensaiadas neste trabalho, tal como se representa na Figura 2 (Cruz et al., 2004). Para um cenário idêntico ao adoptado no reforço das vigas, nomeadamente em relação ao tipo de tratamento de superfície e à colagem do CFRP (ver ponto 2.3), no caso do sistema curado “in situ” (manta) o valor médio da tensão de aderência obtida foi de 3.9 MPa, enquanto que para o sistema pré-fabricado (laminado) foi de 2.9 MPa. Refira-se que os valores obtidos para a tensão de aderência são superiores ao mínimo estabelecido para a utilização da técnica de colagem de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão, que deve ser 1.4 MPa (ACI Committe 440, 1999).

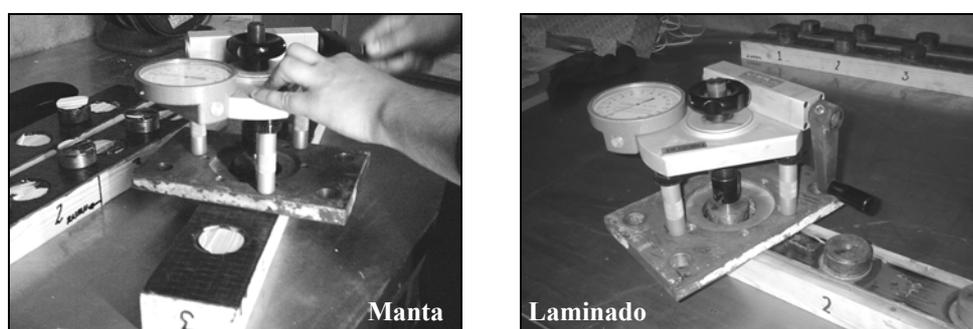


Figura 2 - Ensaios de “pull-off”

2.2. Concepção dos modelos

As vigas de madeira lamelada-colada utilizadas nos ensaios realizados no âmbito deste trabalho (Figura 1a) apresentavam uma secção transversal com 90 mm de largura e 225 mm de altura, um comprimento de 4 m com um vão livre entre apoios de 3.64 m. A altura da viga foi obtida através da colagem na vertical de cinco lamelas com 45 mm de espessura (Figura 3).

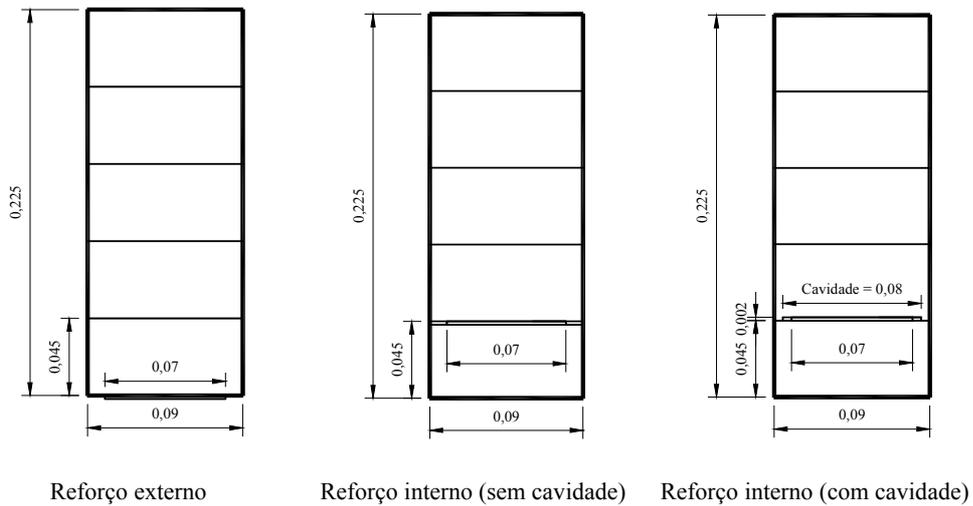
O reforço das vigas para o caso da manta de CFRP foi materializado através de 2 camadas com 70 mm de largura. Em relação ao sistema pré-fabricado, a quantidade de reforço considerada foi obtida impondo uma igualdade de rigidez axial para os dois sistemas de reforço (manta e laminado). Assim, atendendo aos dados apresentados na Tabela 1 e considerando a expressão (1), para o reforço com laminado foi adoptada uma tira com 20 mm de largura.

$$[EA]_{laminado} = [EA]_{manta} \quad (1)$$

No programa experimental realizado foram ensaiadas 18 vigas distribuídas em três grupos. O primeiro contempla uma viga de madeira lamelada-colada sem qualquer tipo de reforço (viga de referência). No segundo grupo tem-se nove vigas reforçadas à flexão com o sistema de manta: três reforçadas externamente e seis em que o reforço foi colocado na face inferior da

penúltima lamela. Em três destas o reforço foi aplicado numa pequena cavidade previamente executada. Finalmente, o terceiro grupo engloba oito vigas reforçadas à flexão com o sistema laminado, sendo duas reforçadas externamente e seis em que o reforço foi instalado na face inferior da penúltima lamela. Destas últimas, em três o reforço foi colocado numa pequena cavidade previamente executada. Na Figura 3 e na Tabela 2 apresentam-se os dados sobre os modelos de vigas ensaiados.

Sistema curado "in situ" (manta)



Sistema pré-fabricado (laminado)

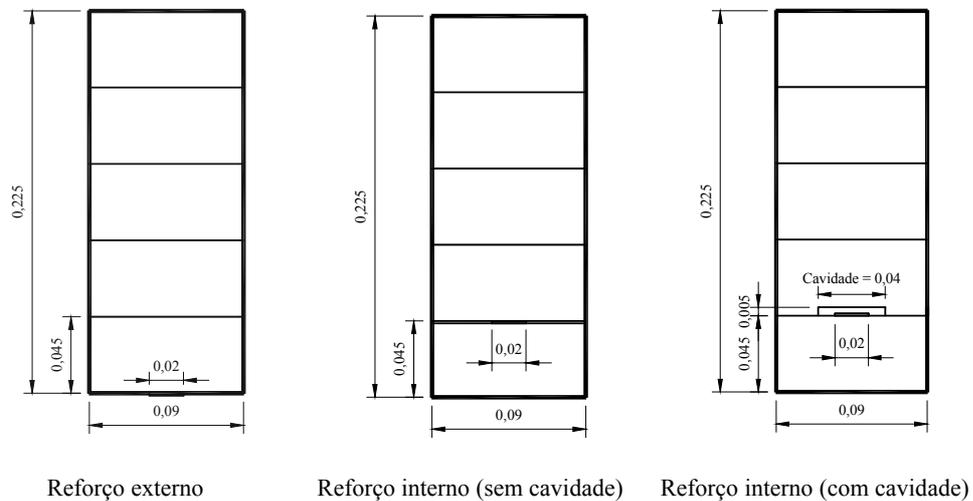


Figura 3 - Secção transversal das vigas reforçadas com CFRP (medidas em m)

Tabela 2 - Dados gerais sobre os modelos ensaiados

Vigas		Descrição
Referência	VR	Viga de madeira lamelada-colada de referência (sem reforço)
Reforço externo	VEM1	Três vigas de madeira lamelada-colada reforçadas externamente com duas camadas de manta de CFRP do tipo MBrace Manta C1-30 com 0.167 mm de espessura e 70 mm de largura.
	VEM2	
	VEM2	
Reforço interno sem cavidade	VIM1	Três vigas de madeira lamelada-colada reforçadas internamente (colagem na face inferior da penúltima lamela) com duas camadas de manta de CFRP do tipo MBrace Manta C1-30 com 0.167 mm de espessura e 70 mm de largura.
	VIM2	
	VIM3	
Reforço interno com cavidade	VICM1	Três vigas de madeira lamelada-colada reforçadas internamente numa cavidade, previamente executada na face inferior da penúltima lamela, com duas camadas de manta de CFRP do tipo MBrace Manta C1-30 com 0.167 mm de espessura e 70 mm de largura.
	VICM2	
	VICM3	
Reforço externo	VEL1	Duas vigas de madeira lamelada-colada reforçadas externamente com uma tira de laminado de CFRP do tipo MBrace Laminado HM com 1.4 mm de espessura e 20 mm de largura.
	VEL2	
Reforço interno sem cavidade	VIL1	Três vigas de madeira lamelada-colada reforçadas internamente (colagem na face inferior da penúltima lamela) com uma tira de laminado de CFRP do tipo MBrace Laminado HM com 1.4 mm de espessura e 20 mm de largura.
	VIL2	
	VIL3	
Reforço interno com cavidade	VICL1	Três vigas de madeira lamelada-colada reforçadas internamente numa cavidade, previamente executada na face inferior da penúltima lamela, com uma tira de laminado de CFRP do tipo MBrace Laminado HM com 1.4 mm de espessura e 20 mm de largura.
	VICL2	
	VICL3	

2.3. Aplicação do reforço

A aplicação dos sistemas compósitos de CFRP envolve essencialmente três tarefas (Juvandes et al., 2003): i) a preparação da superfície de forma a garantir que a base tenha boas condições de aderência; ii) a colagem propriamente dita do reforço; iii) o controlo de qualidade da técnica de reforço antes, durante e após a aplicação. O tipo de preparação da superfície da madeira a reforçar adoptada, para ambos os sistemas de reforço considerados, teve como base os resultados obtidos por Cruz et al. (2004). Tal consistiu na aplicação de uma escova de aço de forma a tornar rugosa a superfície de madeira e não foi aplicada nenhuma camada de primário.

A aplicação do sistema curado “in situ” envolveu, além da preparação da superfície atrás referida, a colagem das duas camadas de manta de CFRP recorrendo a uma resina epoxi com o cuidado necessário de forma a que as fibras ficassem devidamente orientadas na direcção do eixo da viga, que não houvesse excessos de resina nem a formação de bolhas de ar. Na Figura 4 apresentam-se algumas fases da aplicação do reforço recorrendo ao sistema curado “in situ”. Para o caso das vigas reforçadas internamente após a colagem das duas camadas de CFRP foi necessário proceder à colagem da última lamela, tal como está representado na Figura 5c.

A aplicação do sistema pré-fabricado envolveu, após a preparação da superfície atrás referida (Figura 4a), o corte do laminado nas dimensões estabelecidas e respectiva limpeza para retirada das impurezas, a colagem da tira de laminado de CFRP recorrendo a um adesivo epoxi. Com o auxílio de uma espátula houve o cuidado de retirar o adesivo em excesso e de evitar a formação de bolhas de ar. Na Figura 5 apresentam-se algumas fases da aplicação do sistema pré-fabricado. Para o caso das vigas reforçadas internamente após a colagem do laminado de CFRP foi necessário proceder à colagem da última lamela, tal como está representado na Figura 5c.



Figura 4 - Aplicação do sistema de reforço de CFRP curado “in situ” (manta)

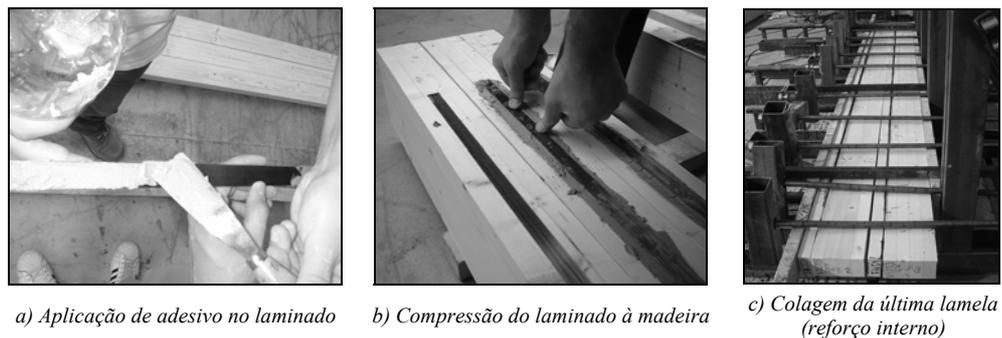


Figura 5 - Aplicação do sistema de reforço de CFRP pré-fabricado (laminado)

2.4. Tipo de ensaio

As vigas foram ensaiadas à flexão em quatro pontos, através de um carregamento monotonicamente crescente até à rotura com uma velocidade constante de deformação de 0,14 mm/s. Para instrumentação dos modelos recorreu-se a uma célula de carga com a capacidade máxima de 100 kN e a dois transdutores de deslocamentos do tipo “Linear Variable Displacement Transducer” (LVDT). Na Figura 6 apresenta-se o esquema de ensaio referindo-se que as dimensões adoptadas foram obtidas seguindo o estipulado na EN 408 (1995).

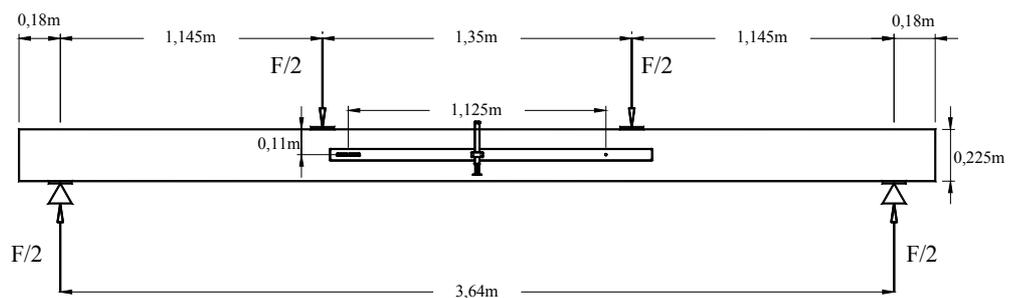


Figura 6 - Esquema de ensaio adoptado

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1. Desempenho do reforço

A Tabela 3 apresenta, para cada modelo ensaiado, os principais resultados em termos de módulo de elasticidade ($E_{0,mean}$), carga máxima (F_{max}) e respectivo deslocamento central (d_{max}). Para as grandezas anteriormente referidas, também se apresentam, na Tabela 3, as relações entre o valor médio obtido para cada um dos sistemas/formas de reforço utilizados e o valor obtido na viga de referência ($E_{0,mean}/E_{0,mean,VR}$, $F_{max}/F_{max,VR}$ e $d_{max}/d_{max,VR}$).

Tabela 3 - Resultados obtidos nas vigas ensaiadas

Vigas		$E_{0,mean}$ (GPa)	$E_{0,mean}/E_{0,mean,VR}$	F_{max} (kN)	$F_{max}/F_{max,VR}$	d_{max} (mm)	$d_{max}/d_{max,VR}$
Referência	VR	11,9	1,0	47,8	1,0	36,0	1,0
Manta	Reforço externo	VEM1	1,25	60,1	1,52	42,2	1,57
		VEM2		81,7		68,6	
		VEM3		76,7		58,5	
	Reforço interno sem cavidade	VIM1	1,16	68,0	1,30	47,9	1,33
		VIM2		67,5		58,6	
		VIM3		50,3		37,6	
	Reforço interno com cavidade	VICM1	1,20	65,7	1,41	46,5	1,80
		VICM2		61,3		82,3	
		VICM3		74,5		66,1	
Laminado	Reforço externo	VEL1	1,07	77,6	1,54	83,7	1,99
		VEL2		69,3		59,6	
	Reforço interno sem cavidade	VIL1	1,23	54,8	1,17	41,3	1,29
		VIL2		54,8		54,9	
		VIL3		57,9		43,1	
	Reforço interno com cavidade	VICL1	1,21	66,4	1,35	49,5	1,53
		VICL2		53,0		43,0	
		VICL3		74,7		72,6	

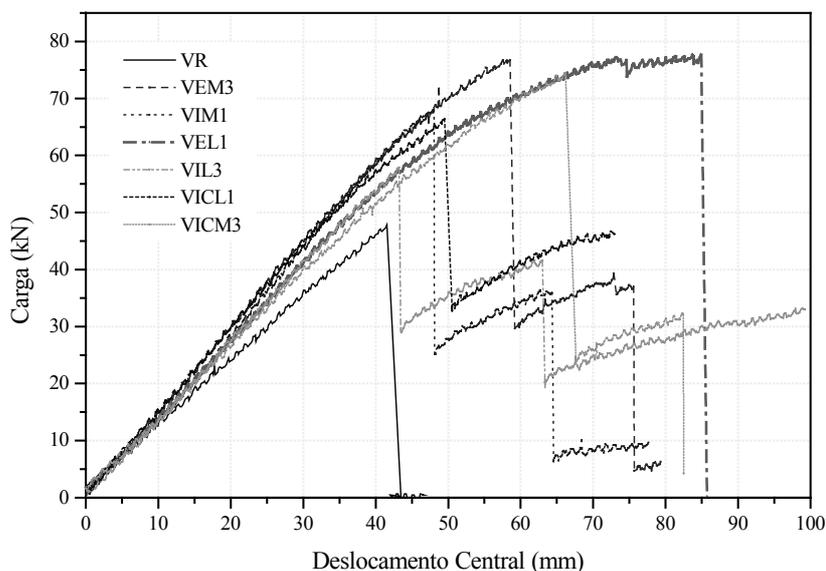


Figura 7 - Curvas Carga vs Deslocamento Central

Na Figura 7 apresentam-se as curvas de comportamento Carga vs Deslocamento Central da viga de referência e de um modelo de viga representativo de cada um dos sistemas/formas de reforço analisados (Ver Tabela 2 e 3).

A análise dos dados da Tabela 3 e das curvas de comportamento apresentadas na Figura 7 permite verificar que, independentemente dos sistemas/formas de reforço adoptados, a presença dos compósitos de CFRP conduziu, relativamente à viga de referência, a maiores valores de módulo de elasticidade, de carga máxima e respectiva flecha central.

Em termos de módulo de elasticidade, e considerando o valor obtido na viga de referência, o reforço através de mantas de CFRP proporcionou aumentos de 16% a 25%, enquanto para o caso dos laminados os aumentos foram entre os 7% e os 23%.

Analisando os dados relativos à carga máxima atingida pelos modelos verifica-se que o reforço externo proporcionou aumentos semelhantes e superiores a 50% (52% para a manta e 54% para o laminado). Em relação ao reforço interno os aumentos da capacidade máxima resistente foram para o caso da manta de 30% (reforço sem cavidade) e 41% (reforço com cavidade). Utilizando o sistema laminado, os aumentos da carga máxima foram de 17% (reforço sem cavidade) e de 35% (reforço com cavidade). Destes dados pode concluir-se que o reforço externo é, de entre as formas analisadas e para a mesma quantidade de reforço, a que proporciona valores da capacidade resistente maiores. Ao mesmo tempo, constata-se que no caso do reforço interno é muito benéfico, em termos de rendimento do reforço, a existência da cavidade sobretudo para o caso do laminado. Comparando os dois sistemas de reforço verifica-se que os resultados são muito próximos, com a excepção da forma de reforço interno sem cavidade. Esta diferença deve-se ao facto de no caso do laminado, devido à espessura que apresenta, a ligação à última lamela ser muito precária, quando comparado com o que se passa no reforço com manta.

Relativamente aos valores obtidos para o deslocamento central das vigas associado à carga máxima, verifica-se que as mantas proporcionaram um aumento entre os 33% (reforço interno sem cavidade) e os 80% (reforço interno com cavidade). O laminado conduziu a aumentos do valor do deslocamento para o qual ocorreu a carga máxima de 29% (reforço interno sem cavidade) a 99% (reforço externo).

3.2. Modos de ruína

Na viga de referência a ruína ocorreu por esgotamento da capacidade resistente à tracção das lamelas (Figura 8a).

Nos modelos reforçados externamente a ruína para as vigas reforçadas com manta ocorreu por rotura do reforço (Figura 8b). No caso das vigas reforçadas com laminado, numa a rotura foi por esgotamento do CFRP (VEL1) e na outra (VEL2) foi por descolamento do CFRP (Figura 8c).

No caso das vigas reforçadas internamente a ruína em todos os elementos deu-se pela rotura da última lamela tendo o reforço continuado a “trabalhar”, acabando este por se descolar ou por atingir a rotura (Figuras 8d e 8e). No entanto, devido à quantidade de reforço de CFRP adoptado, as vigas nunca atingiram valores superiores ao que originou a rotura da última lamela, como se pode constatar, por exemplo, no caso da curva de comportamento da viga VICL1 da Figura 7. Concretamente, o valor da carga que originou a rotura/destacamento do CFRP foi em todos os casos superior a 50% da carga máxima atingida.

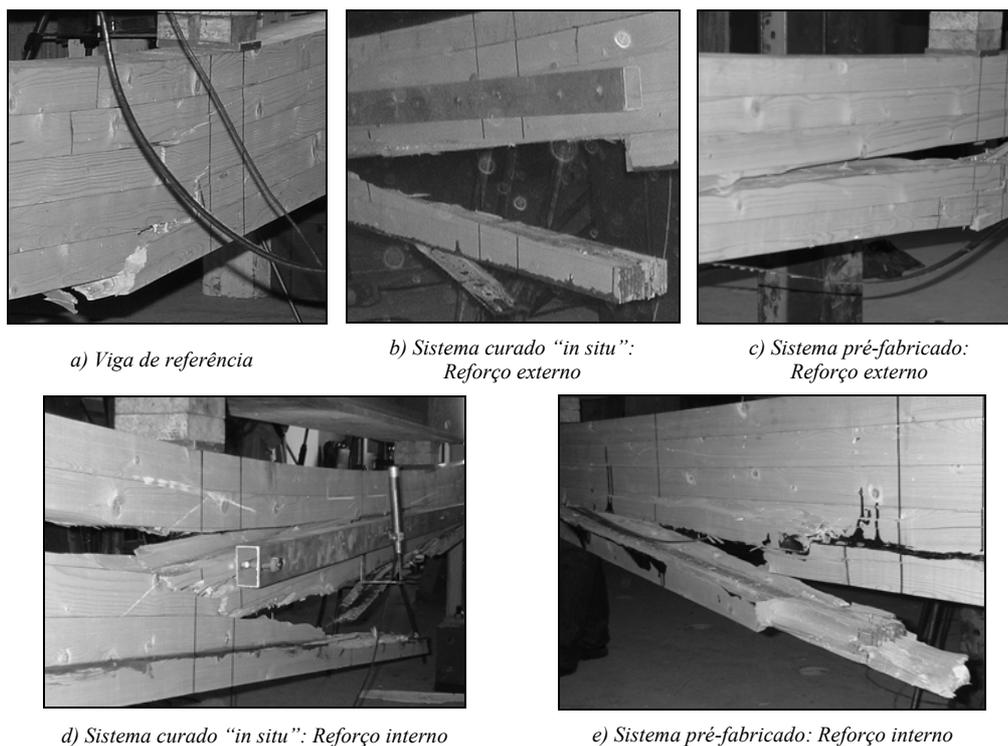


Figura 8 - Modos de ruína

4. CONCLUSÕES

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

- a utilização de compósitos de CFRP no reforço à flexão permite aumentos de rigidez, da capacidade máxima de carga e da respectiva flecha central;
- de entre as formas de reforço utilizadas a que conduziu a um maior valor da capacidade máxima resistente foi a referente ao reforço externo;
- as vigas reforçadas internamente sem cavidade foram as que tiveram o pior desempenho, especialmente no caso do laminado;
- com a excepção do caso das vigas reforçadas internamente sem cavidade, verifica-se que os valores atingidos para a carga máxima são semelhantes para os dois sistemas de reforço de CFRP utilizados neste trabalho (manta e laminado);
- a aplicação dos reforços permitiu concluir que o reforço interno é bastante mais trabalhoso e que no caso do reforço com laminado sem cavidade introduz na estrutura reforçada uma zona, a da ligação à última lamela, bastante precária;
- de forma a ultrapassar a questão da ligação à última lamela mencionada na conclusão anterior, sugere-se para trabalhos futuros o estudo do reforço de vigas de madeira lamelada-colada com laminados inseridos em cavidades executadas na penúltima lamela. Esta técnica poderá também ser aplicada em termos de reforço externo por forma a existir uma maior protecção à acção do fogo e a actos de vandalismo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam os seus agradecimentos à colaboração prestada pelas empresas que forneceram os materiais utilizados: a Flexilam no caso das vigas de madeira lamelada-colada e BeTTor MBT Portugal no caso dos sistemas compósitos de reforço. Um agradecimento especial aos alunos Eurico Jerónimo e João Paulo Freitas, finalistas da licenciatura em Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela preciosa colaboração prestada na campanha de ensaios levada a cabo para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- 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.
- Barros, J., Sena Cruz, J., Dias, S.J.E., Ferreira, D.R.S.M. e Fortes, A. S., 2003 - “Investigação no âmbito da utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão”, *Vº Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto*, São Paulo, Brasil, Junho.
- Bettor MBT Portugal, 1999 - *Sistema Compósito Mbrace*. Fichas técnicas, Lisboa.
- CCC2001, 2001 - proceedings of the “*Composites in Construction International Conference - CCC2001*”, Figueiras, Juvandes e Faria (ed.), Balkema Publishers.
- Cruz, P.J.S., Dias, S.J.E. e Branco, J.M., 2004 – “Avaliação da aderência da ligação colada madeira-CFRP”, *1º Congresso Ibérico - A madeira na Construção*, Guimarães, Março.
- Dias, S.J.E., Juvandes, L. e Figueiras, J.A, 2002 - *Comportamento experimental de vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP do tipo Mbrace*. Relatório Técnico FEUP, Janeiro, 34 pp.
- Dolan, C. W., Galloway, T.L. and Tsunemori, 1997 – “Prestressed glued-laminated timber beam - pilot study”, *Journal of Composites for Construction*, 1(1), pp. 10-16.
- EN 408, 1995 - *Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*. English version, CEN, Bruxelas, Janeiro.
- EN 338, 1995 - *Structural Timber – Strength Classes*. English Version, CEN.
- Juvandes, L., Dias, S.J.E. e Figueiras, J.A, 2003 - “Eficiência do reforço de faixas de laje com sistemas compósitos de CFRP”, *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, nº 52, Setembro, pp. 33-42.
- Moulin, J. M., Pluvinage, G and Jodin, P., 1990 - “FGRG: fiberglass reinforced glulam – a new composite”, *Wood Science Technology*, 24, pp. 289-294.T
- Romani, M., Blass, H.J., 2000 - *Reinforcement of glulam beams with frp reinforcement*. University of Karlsruhe, Alemanha.
- Tingley, D.A., 1996-a - “High-strength fiber-reinforced plastic reinforcement of wood and wood composite”, *41st International Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE) Symposium*, March, Anaheim, California, pp. 667-673.
- Tingley, D.A., 1996-b - *Over a decade of research results in new, improved glulam*. Canadian Consulting Engineer, March/April, pp. 24-28.