

# COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS DE MADEIRA REPARADAS POR COLAGEM DE REMENDOS DE CARBONO-EPÓXIDO

R. D. S. G. Campilho<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Ciências Económicas, Sociais e da Empresa, Universidade Lusófona do Porto

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico do Porto  
e-mail: raulcampilho@gmail.com

## RESUMO

*Este trabalho consiste num estudo experimental relativo ao comportamento de vigas de madeira reparadas solicitadas à flexão em quatro pontos, inicialmente danificadas numa secção intermédia por esmagamento na zona de compressão. A reparação consiste na remoção do material danificado e colagem de um remendo de carbono-epóxico para restituição da rigidez e resistência iniciais da viga. Os resultados obtidos mostraram que a metodologia de reparação proposta é adequada para a restituição total da resistência da viga danificada.*

## 1 – INTRODUÇÃO

A madeira é dos materiais de construção mais antigos no mundo, tendo sido amplamente usada para a construção de estruturas de grandes dimensões como pontes, edifícios, armazéns, casas residenciais, infraestruturas para linhas de comboio, entre outras. As vantagens deste material incluem a sua disponibilidade em quase todas as partes do mundo, a aparência natural e agradável e a elevada resistência à tração e à compressão. Além disso, as estruturas de madeira apresentam uma longevidade elevada, desde que sujeitas a uma manutenção cuidada. No entanto, é sabido que na ausência de manutenção, a madeira deteriora-se devido à ação de insetos e fungos, para além da variação dimensional decorrente de alterações na humidade atmosférica. A importância da

reparação de vigas de madeira, tema deste trabalho, advém do grande uso da madeira como material estrutural, adicionado ao elevado número de potenciais mecanismos de dano possíveis neste material, que muitas vezes levam à necessidade da substituição de membros de madeira de dimensões muito elevadas, com as dificuldades associadas. A dificuldade de obtenção de vigas de elevadas dimensões é outro fator que realça a importância da reparação destas vigas em vez da sua substituição.

Existem poucos trabalhos publicados sobre a reparação de estruturas de madeira, e os que existem estão limitados a análises experimentais e, muitas vezes, as técnicas de reparação propostas não são fáceis de aplicar. Por outro lado, ainda não foram desenvolvidas metodologias eficazes para

previsão do comportamento de reparações adesivas de estruturas de madeira, que seriam extremamente benéficas para eliminação do tempo necessário e custos decorrentes da realização de ensaios experimentais, tradicionalmente necessários para permitir a utilização generalizada destas técnicas de reparação. Dos poucos trabalhos que focam a reparação de estruturas de madeira com compósitos, deve ser mencionado o trabalho de Akbiyik et al. (2007). Estes investigadores estudaram a reparação de vigas de madeira de grandes dimensões danificadas por fendas horizontais ao longo do seu comprimento, utilizando diversas técnicas. Estas consistiram na utilização de varões metálicos em diferentes configurações ligando as porções inferior e superior das vigas, e a utilização de placas de compósitos de vidro-epóxico ligadas com parafusos nas faces laterais da zona danificada da viga. Esta última técnica revelou-se particularmente benéfica na restituição das características iniciais das vigas, proporcionando uma área de secção reta equivalente superior, nas zonas danificadas, à da viga original. O trabalho de Lopez-Anido et al. (2005) foca a reparação de pilares de madeira submersos em água do mar após deterioração, utilizando materiais compósitos reforçados a fibras e um material de enchimento. O método proposto consiste no revestimento do pilar de madeira deteriorado com algumas camadas de um compósito de carbono-epóxico. O espaço entre o revestimento e o pilar de madeira é preenchido com um material de enchimento que garante a transmissão de esforços entre o pilar e o revestimento. Apesar de não terem sido feitas reparações em condições reais de utilização, a viabilidade do método proposto foi comprovada em laboratório com provetes em tamanho real. Alam et al. (2009) compararam técnicas diferentes de reparação para vigas de madeira danificadas artificialmente em laboratório, para simular dano estrutural, em solicitação de flexão em 4 pontos. A reparação consistiu na maquinagem de rasgos nas faces da viga em tensão, compressão ou ambas ao longo do

seu comprimento, e ligação adesiva de barras de reforço com um adesivo epóxico estrutural. Como materiais para as barras de reforço foram considerados o aço, compósitos pultrudidos de carbono-epóxico, vidro-epóxico e FULCRUM (designação comercial de um compósito reforçado com fibras de poliuretano), todos com secção retangular. A resistência das vigas reparadas foi comparada com a das vigas não danificadas e, não obstante o tipo de reforço, a rigidez e resistência foram sempre beneficiadas com reforços nas faces em compressão ou ambas. O aço e carbono-epóxico conduziram a valores de resistência superiores às vigas não danificadas, enquanto os restantes materiais de reforço se revelaram apenas suficientes para restituir a resistência inicial das vigas. Duarte et al. (2004) propuseram uma técnica da reabilitação para membros de madeira sujeitos a esforços de flexão que pode ser igualmente praticável para reparação. O método consiste na remoção das porções de viga danificadas, seguida pela colocação de um remendo de madeira reforçada, ligado à viga por um adesivo estrutural. Foram testados diferentes tipos de reforços, como barras texturadas de aço macio, barras roscadas de aço inoxidável e barras pultrudidas de vidro-epóxico. O programa experimental consistiu no teste até à rotura das vigas não danificadas. Após rotura, as vigas foram recuperadas pelos processos descritos e testadas novamente. As barras roscadas mostraram ser as mais eficazes, devido ao efeito de fricção com a resina epóxida. As barras de vidro-epóxico, apesar da elevada resistência têm um módulo de elasticidade reduzido, o que se traduziu em maiores deformações que não são acompanhadas pela resina. Como resultado, verificou-se uma rotura prematura entre o reforço e a resina.

Este trabalho consiste num estudo experimental relativo à reparação de vigas de madeira solicitadas à flexão em quatro pontos, inicialmente danificadas numa secção intermédia por esmagamento na zona de compressão. A reparação consiste na remoção do material danificado e colagem de um remendo de carbono-epóxico

com o adesivo Araldite® 2015. Foram estudados três comprimentos de sobreposição do remendo ( $L_0$ ): 10, 20 e 30 mm.

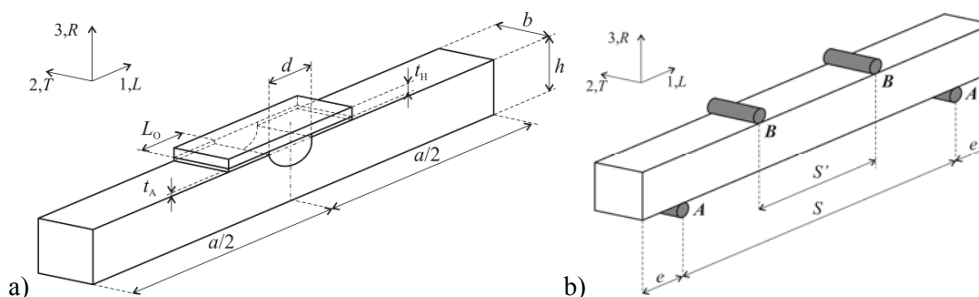
## 2 – DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O mecanismo de dano avaliado é a rotura por compressão, caracterizada pelo esmagamento da madeira em vigas sujeitas a flexão na porção da secção reta da viga sujeita a compressão, sendo um mecanismo de rotura particular provável para espécies de madeira de baixa densidade (Akbiyik, 2005). Nestas circunstâncias, o método proposto para reparação consiste na remoção do material danificado com uma forma semicircular, minimizando concentrações de esforço na região enfraquecida, e ligação adesiva de um remendo de compósito de carbono-epóxico com o adesivo dúctil Araldite® 2015 (Fig. 1 a). Neste caso, o remendo carregará principalmente cargas de compressão no sentido do comprimento da viga. Devido a este facto, serão usados remendos unidireccionais com as fibras alinhadas ao longo da direcção longitudinal da viga. Deve-se mencionar que o procedimento de reparação proposto pode igualmente ser utilizado em outras aplicações, tais como a deterioração causada pelo envelhecimento ou por circunstâncias ambientais adversas, imperfeições da madeira (por exemplo nós), intervenção humana ou dano em serviço (Custódio et al., 2009). São definidos os seguintes parâmetros para esta geometria de reparação (em mm): comprimento da viga

( $a=300$ ), largura da viga ( $b=20$ ), altura da viga ( $h=20$ ), diâmetro de furo ( $d=7,5$ ), espessura da camada de adesivo ( $t_A=0,2$ ), espessura do remendo ( $t_H=1,2$ ) e  $L_0=10, 20$  e  $30$ . A Fig. 1 b) mostra a configuração do ensaio de flexão em quatro pontos, utilizada neste trabalho ( $S=260$  mm,  $S'=130$  mm,  $e=20$  mm). Deve-se mencionar que o valor ótimo de  $t_H$  foi definido numericamente num trabalho prévio (Campilho, 2009), como o valor mínimo necessário para evitar fenómenos de encurvadura, possível de ocorrer nestas circunstâncias devido ao carregamento compressivo aplicado ao remendo, adicionado à sua forma esbelta (Gilfillan et al., 2001).

Foram consideradas vigas de madeira de *Pinus Pinaster*. Os remendos consistem em laminados unidireccionais de carbono-epóxico (Texipreg HS 160 RM, SEAL®) com 8 camadas e as fibras orientadas segundo a direcção longitudinal da viga (eixo  $L$  na Fig. 1). Utilizou-se o adesivo Araldite® 2015 e fios de pesca com diâmetro de 0,2 mm, de forma a garantir a espessura desejada para a camada de adesivo (Campilho et al., 2009a).

O adesivo foi curado à temperatura ambiente durante uma semana. Os testes de flexão em quatro pontos foram realizados com uma máquina de ensaios Instron® 1125 equipada com uma célula de carga de 100 kN, à temperatura ambiente e em controlo de deslocamentos (2 mm/min). Foram testados dez provetes para cada geometria, com pelo menos sete resultados válidos.



**Fig 1** – Técnica de reparação utilizada para a viga danificada por esmagamento e parâmetros característicos (a) e configuração de ensaio em flexão em quatro pontos (b).

### 3 – ANÁLISE DE RESULTADOS

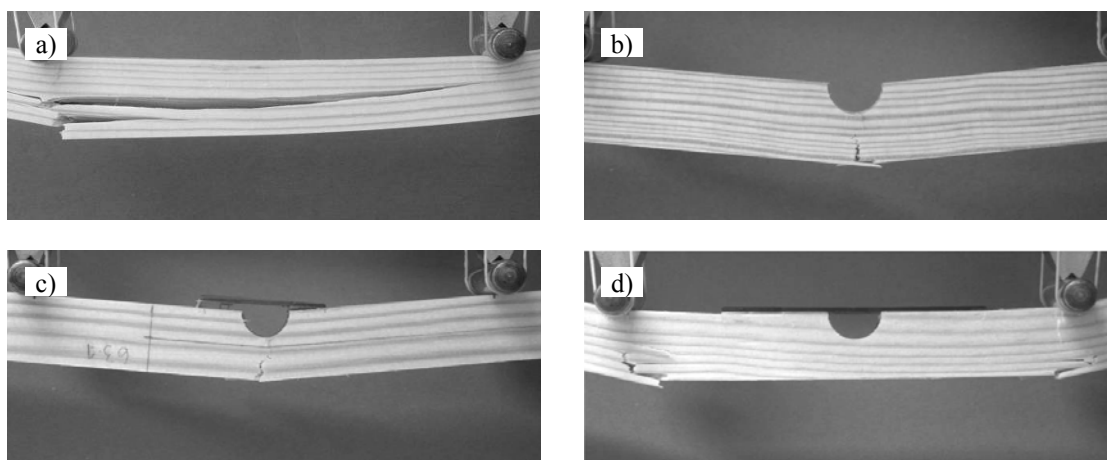
São inicialmente descritos os mecanismos de rotura experimentais. Refere-se que um número muito pequeno de provetes testados para cada condição exibiu rotura por *cross-graining* (rotura com fenda a um ângulo reduzido com a direção longitudinal da viga, devido a desalinhamento das fibras). Este comportamento residual não será no entanto mencionado. A Fig. 2 apresenta exemplos representativos das roturas experimentais. Para a viga de madeira não danificada, a iniciação de dano e resistência máxima da viga estão relacionados com uma fratura vertical por tensão pura abaixo dos cilindros de aplicação da carga (Fig. 2 a), que foi seguida por propagação horizontal da fenda ao longo do comprimento da viga.

Considerando a viga danificada mas não reparada, a rotura teve lugar verticalmente na proximidade do plano de simetria (Fig. 2 b), o que pode ser explicado pela redução da área de secção reta nesta zona, o que obviamente conduz a tensões normais de magnitude superior.

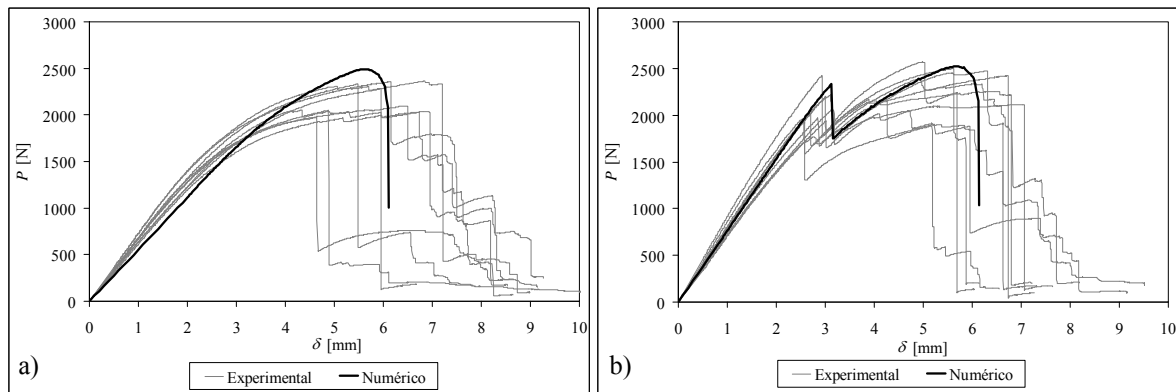
Para a viga reparada com  $L_0=10$  mm (Fig. 2 c), o dano iniciou por fratura na viga de madeira na zona da sobreposição, muito próximo da camada de adesivo, promovendo a separação entre o remendo e a viga. A força máxima sustentada correspondeu a uma rotura vertical na zona do furo da viga. Como a força

máxima corresponde à rotura que ocorreu para a viga não danificada, este comportamento sugere que não irá haver aumento de resistência com este valor de  $L_0$ . Refere-se que este modo de rotura é idêntico ao observado para a viga reparada com  $L_0=20$  mm, embora neste caso a resistência máxima tenha sido superior à da viga não danificada. Para a reparação com  $L_0=30$  mm (Fig. 2 d), a rotura dá-se por fratura transversal da viga de madeira na zona dos cilindros de aplicação de carga, enquanto a zona da reparação não apresenta dano visível. Como este mecanismo de rotura é idêntico ao observado para a viga sem dano, é provável que esta reparação permita a restituição completa da resistência inicial da viga (antes do dano).

A Fig. 3 mostra, como exemplo, as curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) experimentais para a viga danificada não reparada (a) e para a viga reparada com  $L_0=10$  mm (b). É feita uma comparação com resultados numéricos de um trabalho anterior (Campilho et al., 2009b). Para a viga não reparada observa-se uma diminuição da rigidez da viga para  $\delta \approx 3,5$  mm, correspondente ao início do esmagamento por compressão na zona do furo. A força máxima sustentada ( $P_m$ ) corresponde a uma rotura transversal na mesma região da viga. O comportamento da viga reparada com  $L_0=10$  mm já mencionado é facilmente perceptível na Fig. 3 (b), tendo sido observado uma queda de  $P$  antes de ser atingido  $P_m$ , para  $\delta \approx 3$  mm.



**Fig 2** – Roturas experimentais: para a viga não danificada verticalmente, por baixo de um dos cilindros de aplicação da carga (a), na viga não danificada verticalmente na linha de simetria (b), para a reparação com  $L_0=10$  mm, inicialmente na madeira próximo da camada de adesivo e posteriormente na linha de simetria (a) e para a reparação com  $L_0=30$  mm, verticalmente debaixo dos cilindros de aplicação da carga (b).

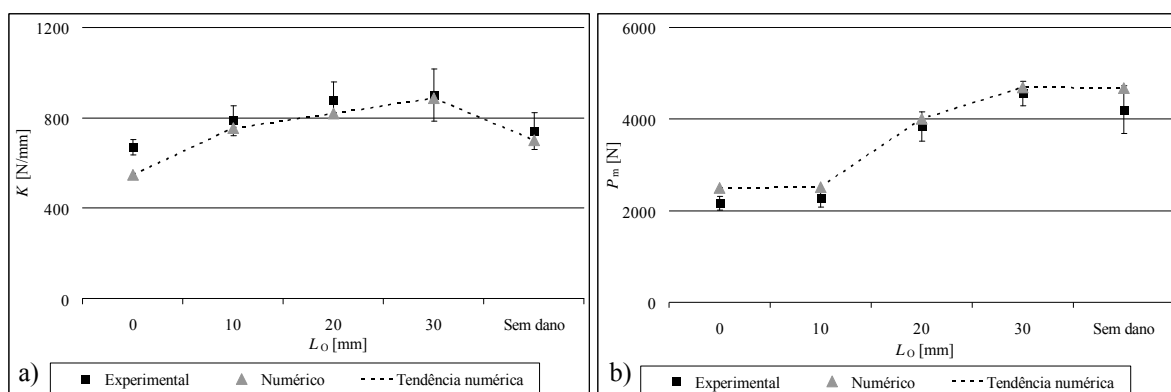


**Fig 3** – Comparação entre as curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para a viga danificada não reparada (a) e reparada com  $L_0=10$  mm (b).

Este evento correspondeu ao primeiro estágio de dano para esta reparação, já mencionado, consistindo numa rotura da viga de madeira a cerca de 0,15 mm da camada de adesivo, ao longo da sobreposição com o remendo. Após este evento, a reparação comportou-se de forma semelhante à viga não reparada, sustentando ainda esforços durante um certo deslocamento. O valor de  $P_m$  correspondeu a uma rotura transversal na região do furo. A Fig. 4 apresenta a evolução dos resultados experimentais médios de rigidez ( $K$ ) (a) e  $P_m$  (b), incluindo o seu desvio padrão ( $L_0=0$  mm corresponde à viga danificada não reparada). São apresentados os equivalentes numéricos obtidos em Campilho et al. (2009b). Observou-se que o valor de  $K$  para a viga danificada não reparada é apenas ligeiramente inferior ao da viga sem dano. Aumentando  $L_0$ , observa-se um aumento gradual de  $K$ . Esta tendência é justificada pelo correspondente aumento da área de

ligação entre a viga e o remendo na zona de reparação (Corradi et al., 2006).

A Fig. 4 (b) evidencia os valores médios e respetivos desvios de  $P_m$  para todas as geometrias testadas, destacando-se desde logo a inutilidade de reparar a viga com  $L_0=10$  mm, uma vez que esta solução causa apenas um aumento marginal de  $P_m$ . Este comportamento é explicado pela já referida rotura inicial na viga de madeira próximo da camada de adesivo (visível na Fig. 3 (b) pela queda de  $P$  para  $\delta \approx 3$  mm), resultando num comportamento posterior idêntico à viga não reparada. Valores mais elevados de  $L_0$  levam a um aumento gradual de  $P_m$ , sendo atingida a resistência da viga sem dano para  $L_0=30$  mm. Relativamente aos dois parâmetros apresentados na Fig. 4 ( $K$  e  $P_m$ ), observa-se uma dispersão considerável dos resultados, o que é justificado pelas típicas variações nas propriedades elásticas e de resistência na madeira, mesmo entre provetes da mesma espécie (Baillères et al., 2005).



**Figura 4** –  $K$  em função de  $L_0$  (a) e  $P_m$  em função de  $L_0$  (b).

## 5 – CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um estudo experimental de reparação de vigas de madeira sujeitas a um carregamento de flexão em 4 pontos, inicialmente danificadas por esmagamento numa zona intermédia da viga. O processo de reparação proposto consiste na remoção da zona danificada numa forma semicircular e posterior colagem com um adesivo epóxico estrutural de um remendo de compósito de carbono-epóxico para reforço na zona da reparação. Os resultados obtidos permitiram a obtenção de tendências, em função do comprimento de sobreposição, da rigidez elástica e resistência máxima das vigas reparadas. Observou-se um aumento progressivo da rigidez com o valor do comprimento de sobreposição. Relativamente à resistência das reparações, os resultados permitem concluir que, para as propriedades materiais e a geometria sob a avaliação, a reparação com comprimento de sobreposição de 30 mm restaura completamente a resistência da viga de madeira não danificada. A reparação com comprimento de sobreposição de 20 mm, apesar de não atingir este objetivo, é igualmente uma opção para aumento da resistência da viga não reparada. Por outro lado, não existe vantagem em reparar a viga com um comprimento de sobreposição de 10 mm.

## REFERÊNCIAS

Akbiyik A., Lamanna A.J. e Hale W.M., “Feasibility investigation of the shear repair of timber stringers with horizontal splits”, *Constr. Build. Mater.*, 21, 991-1000 (2007).

Akbiyik, A. “Feasibility investigation into shear repair of timber bridge stringers”, Tese de Mestrado, New Orleans, USA: Department of Civil and Environmental Engineering, Tulane University: 2005.

Alam P., Ansell M.P. e Smedley D., “Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements”, *Compos. Part B – Eng.*, 40, 95-106 (2009).

Baillères H., Vitrac O. e Ramanantoandro T., “Assessment of continuous distribution of wood properties from a low number of samples: application to the variability of modulus of elasticity between trees and within a tree”, *Holzforschung*, 59, 524-530 (2005).

Campilho R.D.S.G., “Repair of composite and wood structures”, Tese de Doutoramento, Porto, Portugal: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto: 2009.

Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Barreto A.M.J.P., Morais J.J.L. e Domingues J.J.M.S., “Fracture behaviour of damaged wood beams repaired with an adhesively-bonded composite patch”, *Compos. Part A*, 40, 852-859 (2009b).

Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Pinto A.M.G., Morais J.J.L. e Domingues J.J.M.S., “Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs”, *Compos. Part B-Eng.*, 40, 149-157 (2009a).

Corradi M., Speranzini E., Borri A. and Vignoli A., “In-plane shear reinforcement of wood beam floors with FRP”, *Compos. Part B-Eng.*, 37, 310-319 (2006).

Custódio J., Broughton J. e Cruz H., “A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints”, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 29, 173-185 (2009).

Duarte A., Negrão J. e Cruz H., “Rehabilitation of timber beams with reinforced epoxy plates”, *Proc. 8th World Conference on Timber Engineering*, (Lahti, Finland, 14-17 June, 2004).

Gilfillan R., Gilbert S. e Patrick G., “The improved performance of home-grown timber glulam beams using fibre reinforcement”, *J. Inst. Wood Sci.*, 15, 307-317 (2001).

Lopez-Anido R., Michael A.P., Sandford T.C. e Goodell B., “Repair of wood piles using prefabricated fiber-reinforced polymer composite shells”, *J. Perf. Constr. Fac.*, 19, 78-87 (2005).