

REPARAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA DANIFICADAS POR ESMAGAMENTO COM COMPÓSITOS DE CARBONO-EPÓXIDO

Campilho, R. D. S. G. [1], Moura, M. F. S. F. [1], Pinto, A. M. G. [2], Morais, J. J. L. [3], Santos, C. L. [3], Domingues, J. J. M. S. [2]

[1] Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal – raulcampilho@hotmail.com

[2] Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal – agp@isep.ipp.pt

[3] CITAB/UTAD, Departamento de Engenharias, Quinta de Prados, 5001-801 Vila Real, Portugal

Resumo

Este trabalho consiste num estudo experimental e numérico 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. A análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos inclui modelos de dano coesivos para modelar a iniciação e propagação do dano no adesivo, interlaminar no remendo e no interior da madeira através de diferentes planos de propagação. A metodologia numérica proposta foi validada em termos de modo de rotura, rigidez inicial, e carga máxima suportada da viga sem dano, da viga danificada mas não reparada e da viga reparada com diferentes comprimentos de sobreposição do remendo. Os resultados obtidos mostraram que a metodologia proposta é adequada na simulação do comportamento destas reparações.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivos, Reparação, Madeira.

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 tracção 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 acção de insectos 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 associa-

das. A dificuldade de obtenção de vigas de elevadas dimensões é outro factor que realça a importância da reparação destas vigas em vez da sua substituição.

Existem poucos trabalhos publicados sobre a reparação de estruturas de madeira, sendo que os que existem estão limitados a análises experimentais e, muitas vezes, as técnicas de reparação propostas não são fáceis de aplicar. Além disso, 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, o trabalho recentemente publicado de Akbiyik *et al.* (2007) deve ser mencionado. 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 recta equivalente superior nas zonas danificadas. 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.

Este trabalho consiste num estudo experimental e numérico 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. A análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos utiliza modelos de dano coesivos para modelar a iniciação e propagação do dano no adesivo, interlaminar no remendo e no interior da madeira através de diferentes planos de propagação. A validação da metodologia descrita foi efectuada em termos de modo de rotura, rigidez inicial e carga máxima suportada da viga sem dano, da viga danificada não reparada e da viga reparada com diferentes valores de L_0 .

2. MODELO DE DANO COESIVO

2.1 Descrição do modelo

Um modelo de dano coesivo em modo misto (I+II), baseado em elementos de interface de espessura nula, é usado para simular o início e propagação do dano. Como o modelo desenvolvido tem como finalidade principal a simulação de uma camada fina de um adesivo dúctil (Araldite® 2015), foi utilizada uma lei trapezoidal entre as tensões (σ) e os deslocamentos relativos (δ_r) de nós homólogos de um dado elemento de interface (Fig. 1). De facto, estas leis são as mais adequadas para a simulação de adesivos dúcteis que, após um comportamento inicial elástico, apresentam um patamar de tensões considerável antes da rotura (Marques e da Silva, 2008). É assim necessário o conhecimento das resistências locais na extremidade da fenda ($\sigma_{u,i}$, $i=I, II$) e das taxas críticas de libertação de energia ($J_{i,c}$, $i=I, II$). A iniciação do dano é prevista usando o seguinte critério de tensões quadrático

$$\left(\frac{\sigma_i^2}{\sigma_{u,i}^2} + \frac{\sigma_{ii}^2}{\sigma_{u,ii}^2} = 1 \right) \text{ if } \sigma_i > 0$$

$$\sigma_{ii} = 0 \text{ if } \sigma_i = 0$$
(1)

onde σ_i , ($i=I, II$) representa a tensão num dado ponto de integração do elemento de interface no modo respectivo. A iniciação do amaciamento das tensões é prevista por um critério quadrático de deslocamentos semelhante à equação (1), levando a

$$\left(\frac{\delta_{2m,i}^2}{\delta_{2,i}^2} + \frac{\delta_{2m,ii}^2}{\delta_{2,ii}^2} = 1 \right)$$
(2)

onde $\delta_{2,i}$ ($i=I, II$) representam os deslocamentos relativos em cada modo puro na iniciação do amaciamento das tensões e $\delta_{2m,i}$ ($i=I, II$) os respectivos deslocamentos em modo misto. A propagação do dano é simulada pelo critério energético linear

$$\frac{J_I}{J_{Ic}} + \frac{J_{II}}{J_{IIc}} = 1$$
(3)

A área do trapézio mais pequeno da Fig. 1 representa a energia libertada em cada modo, enquanto que a área do trapézio maior corresponde ao valor de J_{Ic} no modo respectivo. Quando a equação (2) é satisfeita, há propagação de dano e as tensões são anuladas, com a excepção das normais compressivas. O trabalho de Campilho *et al.* (2008a) apresenta uma explicação detalhada do modelo descrito.

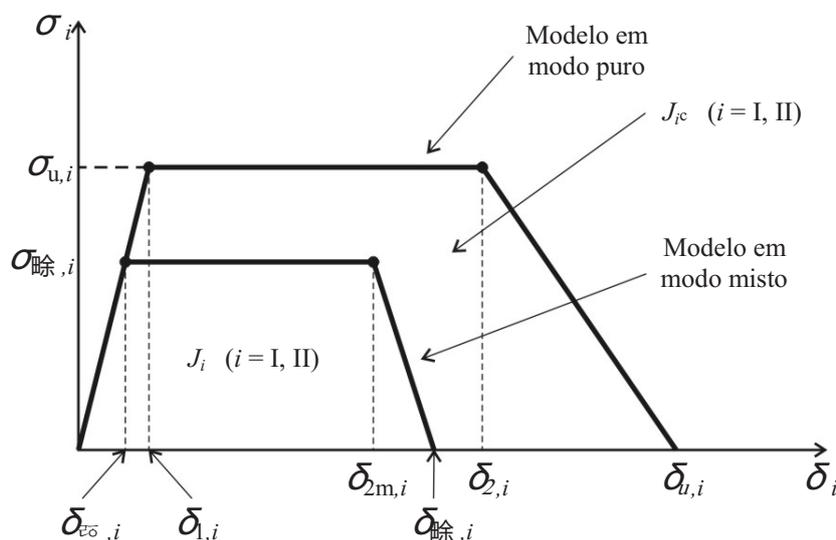


Fig. 1 – Lei de amaciamento trapezoidal para modo puro e modo misto.

2.2 Determinação dos parâmetros coesivos

A camada de adesivo foi modelada numericamente utilizando o modelo de dano coesivo apresentado. As relações iniciais entre σ e δ_r em modo puro I ou II, para $\delta < \delta_{1,i}$ (Fig. 1), são definidas pelos parâmetros de rigidez (e_i , $i=I, II$), sendo assim simulado o comportamento elástico da camada de adesivo. Estes parâmetros são definidos pelo rácio entre o módulo de elasticidade longitudinal ou ao corte (E ou G , respectivamente) e a espessura da camada de

adesivo (t_A). Os valores de E e G foram determinados experimentalmente (Marques e da Silva, 2008) com testes à tracção de adesivo em bruto e testes Thick Adherend Shear Test (TAST), respectivamente ($E=1850$ MPa; $G=650$ MPa). Para a completa caracterização das leis coesivas em modo puro I e II, os valores de $\sigma_{u,i}$, $\delta_{2,i}$ e J_{ic} também devem ser determinados. Enquanto J_{ic} pode ser determinado por testes convencionais de caracterização à fractura, os restantes parâmetros devem ser definidos por um método inverso aplicado a geometrias coladas onde o adesivo apresente uma espessura idêntica à da estrutura simulada (Campilho *et al.*, 2008b). Isto porque uma camada fina de adesivo se comporta de forma diferente do adesivo em bruto, devido ao efeito de restrição das deformações provocado pelos materiais adjacentes, mais rígidos do que o adesivo. Neste trabalho, as leis coesivas de uma camada de adesivo com $t_A=0,2$ mm e interlaminares do remendo de carbono-epóxico em modos puros I e II foram obtidas por um método inverso, utilizando os ensaios Double Cantilever Beam (DCB) e End-Notched Flexure (ENF), respectivamente. Num trabalho prévio (Campilho *et al.*, 2008b) apresenta-se uma explicação detalhada deste método, a determinação destes parâmetros e as leis coesivas finais para o adesivo e laminado compósito, utilizados neste trabalho. A fractura da viga de madeira nos planos RL (plano longitudinal da viga) e LR (plano transversal da viga) também é considerada no trabalho numérico desenvolvido, pois estes modos de rotura ocorreram experimentalmente. Os parâmetros coesivos da madeira no plano RL foram obtidos do trabalho de Silva (2005). Os parâmetros relativos ao plano LR foram estimados de valores típicos para o material em causa.

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

A Fig. 2 a) representa a geometria e parâmetros característicos da reparação ($a=300$ mm, $b=20$ mm, $h=20$ mm, $d=7,5$ mm, $t_A=0,2$ mm, $t_H=1,2$ mm, $L_O=10, 20$ e 30 mm). A reparação consiste na remoção, em forma de semi-círculo, do material esmagado na zona de compressão da viga de madeira e colagem de um remendo. A Fig. 2 b) mostra a configuração do ensaio de flexão em quatro pontos, utilizada neste trabalho ($S=260$ mm, $S'=130$ mm, $e=20$ mm).

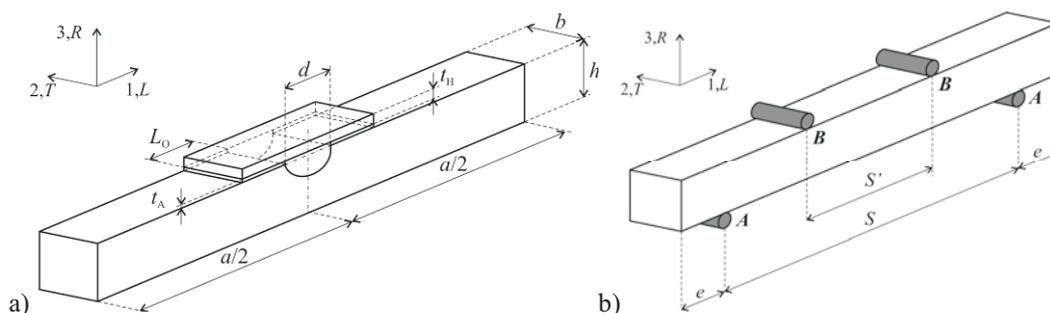


Fig. 2 – Técnica de reparação utilizada para a viga danificada por esmagamento e parâmetros característicos (a) e configuração de ensaio em flexão em quatro pontos (b).

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. 2). 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.*, 2008b). 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, tendo sido sempre obtidos pelo menos sete resultados válidos.

4. TRABALHO NUMÉRICO

As simulações numéricas foram efectuadas no ABAQUS[®], incluindo elementos finitos de interface com diferentes leis coesivas. Foi efectuada uma análise bi-dimensional com elementos sólidos rectangulares de estado plano de tensão e oito nós, incluindo não-linearidades geométricas. A Fig. 3 mostra a malha utilizada para a reparação com $L_0=10$ mm (a) e respectivo detalhe na zona da reparação (b). Foram utilizadas condições de simetria verticais a meio do comprimento da viga (linha A-A na Fig. 3 e Fig. 4). A viga de madeira e o remendo de carbono-epóxico foram modelados como materiais elásticos ortotrópicos (cujas propriedades se encontram nos trabalhos de Silva (2005) e Campilho *et al.* (2005), pela ordem respectiva). A localização dos elementos de interface com diferentes leis foi estabelecida tendo em consideração os modos de rotura obtidos experimentalmente, estando exemplificada na Fig. 4. Para além da rotura no adesivo, considerou-se a rotura interlaminar do remendo de carbono-epóxico a uma distância de 0,15 e 0,30 mm da camada de adesivo (correspondendo às interfaces entre a 1^a e 2^a, e a 2^a e 3^a camadas mais próximas do adesivo, respectivamente). Na viga de madeira, considerou-se roturas nos planos RL e LR. No primeiro caso, consideraram-se distâncias de 0,4 e 0,8 mm à camada de adesivo, correspondendo aos valores limite medidos nos provetes após ensaio. A possibilidade de roturas transversais também foi equacionada na linha de simetria vertical da reparação e debaixo do cilindro de deslocamento. Para as leis coesivas da madeira e do remendo, utilizou-se o método da função da penalidade até $\sigma_{u,i}$ (Fig. 1), considerando $e_i=10^6$ N/mm³. Nestes casos, também se consideraram leis triangulares ($\delta_{2,i}=\delta_{1,i}$ na Fig. 1), devido à ausência de plasticidade nestes materiais.

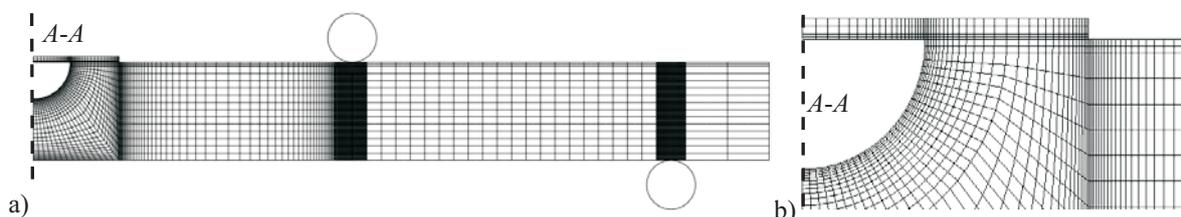


Fig. 3 – Malha utilizada para a reparação com $L_0=10$ mm (a) e respectivo detalhe da zona da reparação (b).

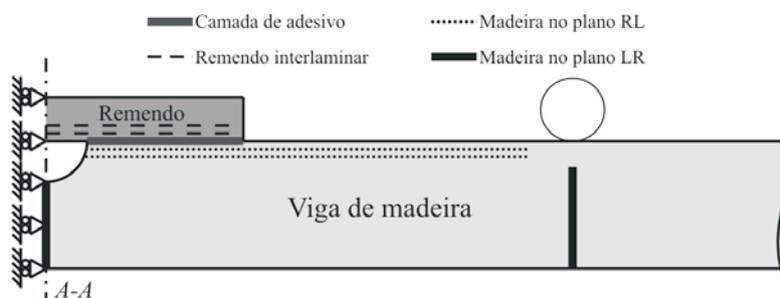


Fig. 4 – Localização dos elementos finitos de interface com diferentes leis coesivas.

5. RESULTADOS

No que diz respeito aos modos de rotura, nas simulações numéricas conseguiu-se reproduzir de forma fiel os modos de rotura experimentais. Sendo assim, para a viga sem dano, a rotura ocorreu transversalmente no plano LR debaixo do cilindro de deslocamento (Fig. 5 a).

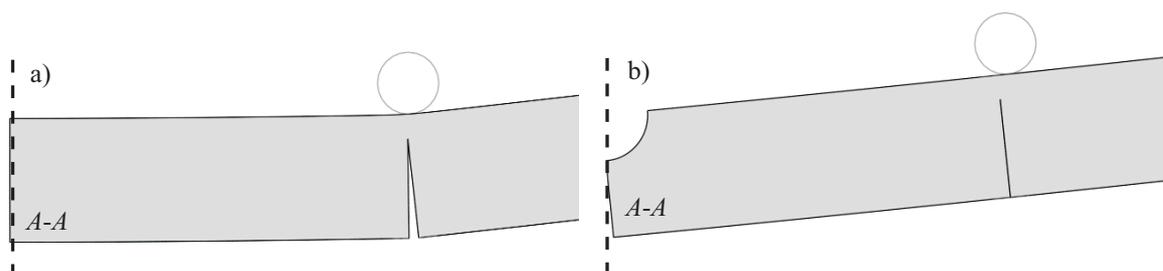


Fig. 5 – Roturas numéricas: no plano LR abaixo do cilindro de deslocamento para a viga sem dano (a) e na linha de simetria $A-A$ para a viga danificada não reparada (b).

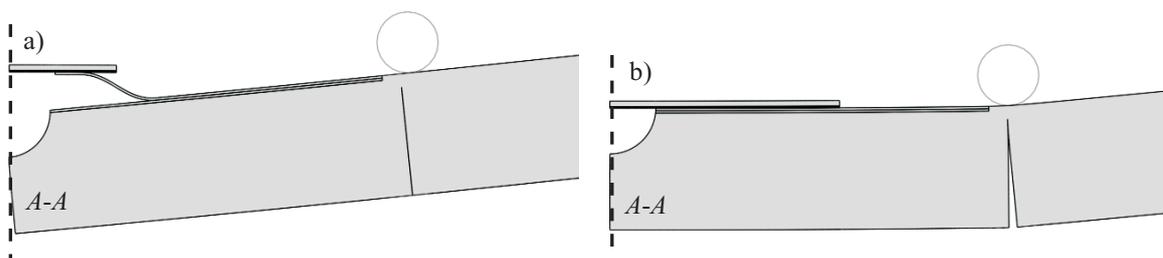


Fig. 6 – Roturas numéricas: inicialmente na madeira a 0,15 mm da camada de adesivo e posteriormente na linha de simetria $A-A$ para a reparação com $L_0=10$ mm (a) e no plano LR abaixo do cilindro de deslocamento para a reparação com $L_0=30$ mm (b).

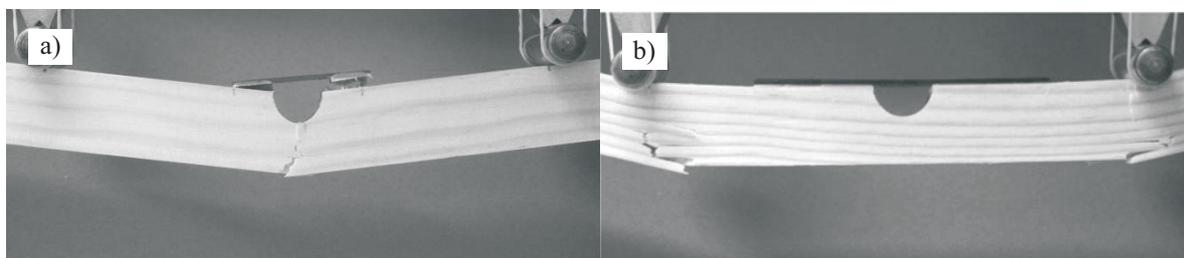


Fig. 7 – Roturas experimentais: inicialmente na madeira próximo da camada de adesivo e posteriormente na linha de simetria $A-A$ para a reparação com $L_0=10$ mm (a) e no plano LR abaixo do cilindro de deslocamento para a reparação com $L_0=30$ mm (b).

Considerando a viga danificada não reparada (Fig. 5 b), a rotura deu-se por tracção na linha de simetria $A-A$, devido à menor área de secção recta. Para as reparações com $L_0=10$ e 20 mm, registou-se iniciação do dano na viga de madeira, a uma distância de 0,15 mm da camada de adesivo, com rotura final na linha de simetria $A-A$. A Fig. 6 a) mostra a rotura final para a reparação com $L_0=10$ mm. Para $L_0=30$ mm (Fig. 6 b), a rotura é idêntica à viga sem dano, o que significa que a zona da reparação deixou de ser a zona menos resistente da viga, como acontecia para as reparações com um valor de L_0 mais reduzido. Este comportamento sugere que a resistência da viga sem dano é restituída totalmente com este valor de L_0 . A Fig. 7 apresenta dois exemplos de rotura experimental: para a reparação com $L_0=10$ mm (a) e $L_0=30$ mm (a). A Fig. 8 mostra, como exemplo, uma comparação entre as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) experimentais e numéricas para a viga danificada não reparada (a) e para a viga reparada com $L_0=10$ mm (b). Para a viga não reparada, observa-se uma boa concordância entre os valores experimentais e numéricos de rigidez elástica (K). A força máxima sustentada (P_m), correspondente a uma rotura transversal no plano de simetria $A-A$ (Fig. 5 b), foi ligeiramente sobrestimada numericamente. O comportamento experimental da viga reparada com $L_0=10$ mm foi simulado correctamente, tendo sido observado em ambos os casos uma

queda de P antes de ser atingido P_m , para $\delta \approx 3$ mm. Este evento correspondeu ao primeiro estágio de dano para esta reparação já mencionado, consistindo numa rotura da viga de madeira a 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 linha de simetria $A-A$. A Fig. 6 a) mostra a rotura final para esta reparação, sendo visíveis os dois mecanismos de dano descritos.

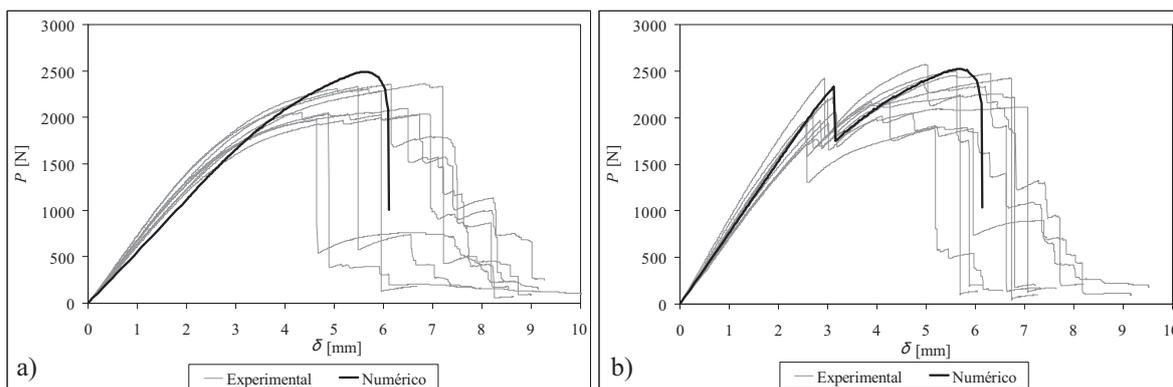


Fig. 8 – Comparação entre as curvas P - δ experimentais e numéricas para a viga danificada não reparada (a) e reparada com $L_0=10$ mm (b).

A Fig. 9 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais médios e numéricos de K (a) e P_m (b), incluindo o desvio padrão dos primeiros ($L_0=0$ mm corresponde à viga danificada não reparada). No que diz respeito aos valores de K , as previsões numéricas foram de uma forma geral aceitáveis, sendo que apenas para a viga não reparada ($L_0=0$ mm), K foi subestimado. Observou-se experimentalmente que o valor de K para a viga danificada não reparada é apenas ligeiramente inferior ao da viga sem dano, embora numericamente a diferença seja mais elevada. Aumentando L_0 , observa-se experimentalmente um aumento gradual de K , tendência que também foi obtida numericamente.

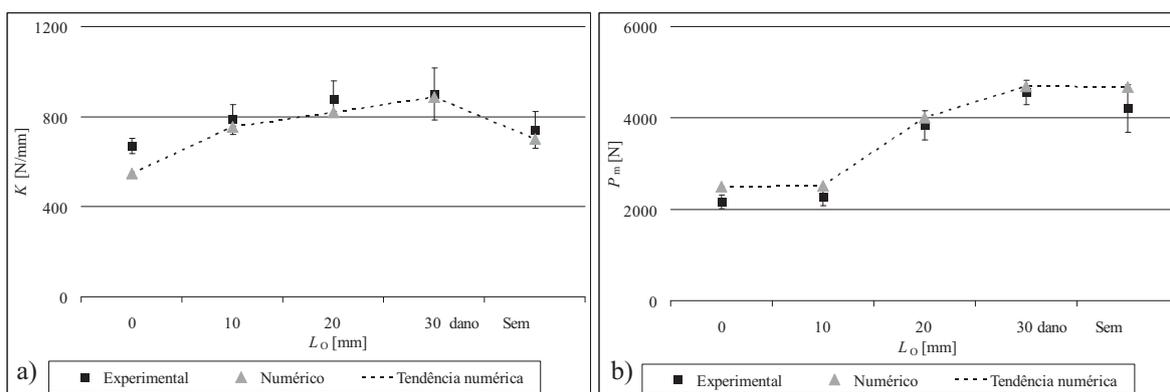


Fig. 9 – K em função de L_0 (a) e P_m em função de L_0 (b).

A Fig. 9 b) permite destacar não só a boa concordância entre os valores experimentais e numéricos de P_m , para todas as geometrias testadas, mas também 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. 8 (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. De uma forma geral, pode-se afirmar que o comportamento das diferentes vigas testadas foi reproduzido de forma muito aceitável pelas simulações numéricas realizadas, mostrando que a metodologia numérica seguida neste trabalho é adequada para simular este tipo de reparações adesivas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentou-se um estudo experimental e numérico do comportamento de uma viga de madeira sem dano, danificada não reparada e reparada com um remendo de carbono-epóxico com diferentes comprimentos de sobreposição, colado com um adesivo dúctil. Foi utilizada uma metodologia numérica para simular o início e propagação do dano nos diferentes constituintes da reparação. Esta metodologia consiste na utilização de modelos de dano coesivos, cujos parâmetros das respectivas leis em modos puros I e II foram obtidos por um método inverso. Este método consiste na determinação inicial da taxa crítica de libertação de energia em modo puro I ou II utilizando ensaios de caracterização à fractura (ensaio Double Cantilever Beam e ensaio End-Notched Flexure para modo puro I e II, respectivamente), e na estimativa dos parâmetros restantes das leis coesivas através do ajuste entre as curvas força-deslocamento experimentais e numéricas destes ensaios. Observou-se que as simulações numéricas capturaram de forma muito razoável o comportamento experimental das reparações, em termos de modo de rotura, rigidez elástica e força máxima sustentada, o que mostra que a metodologia numérica seguida neste trabalho é adequada para simular este tipo de reparações adesivas. Relativamente às diferentes reparações estudadas, observou-se que um comprimento de sobreposição do remendo de 30 mm permite restituir a resistência da viga de madeira sem dano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBIYIK *et al.* **Feasibility investigation of the shear repair of timber stringers with horizontal splits.** Construction and Building Materials, v. 21, p. 991-1000, 2007.

CAMPILHO *et al.* **Modelling single and double-lap repairs on composite materials.** Composites Science and Technology, v. 65, p. 1948-1958, 2005.

CAMPILHO *et al.* **Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs.** International Journal of Solids and Structures, v. 45, p. 1497-1512, 2008a.

CAMPILHO *et al.* **Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs.** Composites Part B: Engineering, accepted for publication, 2008b.

LOPEZ-ANIDO *et al.* **Repair of wood piles using prefabricated fiber-reinforced polymer composite shells.** Journal of Performance of Constructed Facilities, v. 19, p. 78-87, 2005.

MARQUES E. A. S. e DA SILVA L. F. M. **Joint strength optimization of adhesively bonded patches.** The Journal of Adhesion, v. 84, p. 917-936, 2008.

SILVA, M. A. L. **Estudo das Propriedades de Fractura em Modo II e em Modo III da Madeira de Pinus pinaster Ait.** 2005 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.