

## REPARAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA COM DELAMINAÇÃO ATRAVÉS DE PARAFUSOS AUTO PERFURANTES



Ricardo Silva

Mestrando  
IST, UL  
Lisboa  
ricardo.c.h.silva@gmail.com



Helena Cruz

Investigadora Principal  
LNEC  
Lisboa  
helenacruz@lnec.pt



João G. Ferreira

Prof. Associado  
DECivil, ICIST, IST, UL  
Lisboa  
joao.gomes.ferreira@tecnico.ulisboa.pt

### SUMÁRIO

Apresenta-se o trabalho realizado com o objectivo de avaliar a viabilidade da utilização de parafusos auto perfurantes e placas de contraplacado na reparação de vigas retas delaminadas, previamente levadas à rotura por flexão. O programa de ensaios envolveu o fabrico de 21 vigas com 3,090m x 0,175m x 0,095m, apresentando diversos tipos de delaminação. As vigas foram ensaiadas em flexão até à rotura, sendo posteriormente reparadas com recurso a parafusos auto perfurantes e placas de contraplacado, e ensaiadas de novo à flexão.

Os resultados obtidos indicaram que a reparação efetuada foi tanto mais eficaz quanto menos danificada tivesse ficado a viga após o primeiro ensaio, e que a utilização de parafusos auto perfurantes aumentou a ductilidade das vigas.

**Palavras-chave:** madeira, reparação, parafusos, contraplacado, delaminação

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação e Objectivos

Os elementos de madeira lamelada colada (MLC) são utilizados regularmente na construção, permitindo esta técnica de fabrico obter peças com o tamanho e a formas desejadas. Contudo, sendo estes elementos obtidos por colagem de lamelas de madeira, pode ocorrer delaminação nas juntas coladas, nomeadamente devido ao envelhecimento ou a erros de fabrico, relacionados, por exemplo, com a preparação das superfícies, a quantidade de cola e as condições de cura, ou em resultado da utilização de colas inadequadas face às condições de serviço.

O trabalho desenvolvido pelos autores abordou, por um lado, a avaliação dos efeitos da delaminação em elementos retos de madeira lamelada colada na resistência mecânica desses elementos e a possibilidade de reforço (preventivo) de vigas delaminadas, sendo esses resultados apresentados noutra comunicação. Por outro lado, atendendo à possibilidade de eventuais anomalias serem detetadas apenas após a ocorrência de rotura estrutural, pretendeu-se avaliar a possibilidade de reparação desses elementos recorrendo a um método simples, compatível com uma intervenção “*in situ*”, trabalho esse que se apresenta seguidamente.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Programa de trabalho

Os resultados apresentados nesta comunicação incluem-se num programa de investigação mais vasto que teve por objectivo analisar a eficácia da utilização de parafusos auto perfurantes na reparação e no reforço de vigas de MLC com delaminação. Foram, no total, fabricadas em ambiente industrial 21 vigas com 3,090m x 0,175m x 0,095m, apresentando intencionalmente diversos tipos de delaminação: i) 3 vigas sem delaminação, denominadas vigas de referência ou vigas “A” (A1 a A3); ii) 6 vigas com delaminação “curta” abrangendo toda a secção transversal e todas as linhas de cola mas apenas nas extremidades das vigas, num comprimento de 0,320m, denominadas vigas “B” (B1 a B6); iii) 6 vigas com delaminação “longa” abrangendo toda a secção transversal e todas as linhas de cola mas apenas nas extremidades das vigas num comprimento de 0,720m, denominadas vigas “C” (C1 a C6); iv) 6 vigas com delaminação em todas as linhas de cola e em todo o seu comprimento afetando (de forma simétrica) apenas 2/3 da largura das lamelas, denominadas vigas “D” (D1 a D6). As vigas foram produzidas com madeira de Pinho bravo (*Pinus pinaster*, Ait.), com teor de água médio da ordem de 14%, constituídas por 5 lamelas de 3,5cm de espessura. A Fig. 1 mostra um esquema da geometria das vigas, e as Fig. 2 e 3 ilustram a delaminação das vigas “B”/“C” e “D”, respetivamente.

Esta campanha experimental envolveu os ensaios das vigas A1, A2, A3; B1, B3, B6; C1, C2, C3; e D1 a D6.

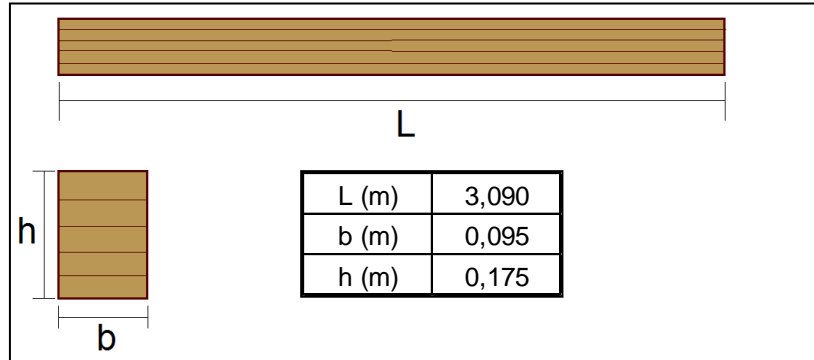


Figura 1. Dimensões das vigas

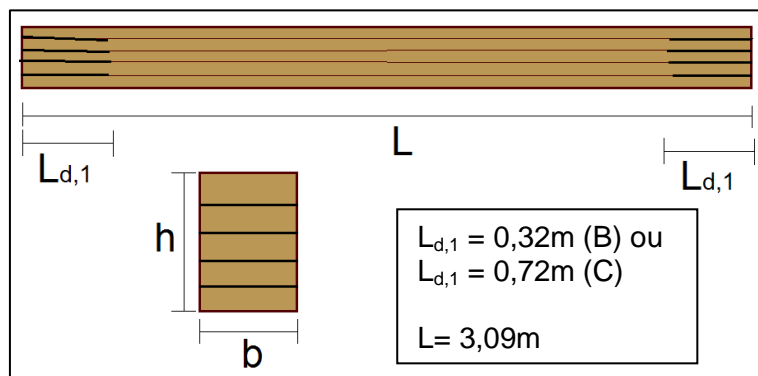


Figura 2. Esquema de delaminação das vigas "B" e "C" (delaminações a risco espesso)

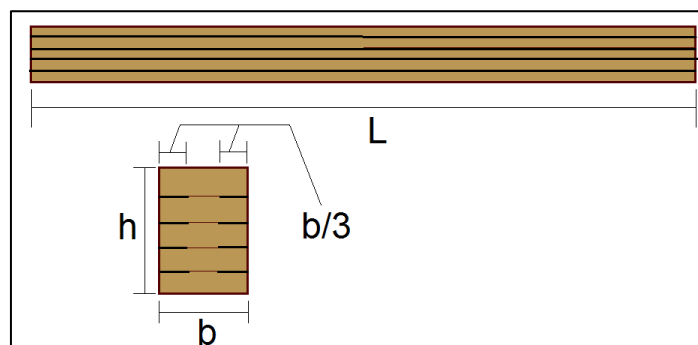


Figura 3. Esquema de delaminação das vigas "D" (delaminações a risco espesso)

De modo a se atingirem os objectivos propostos, a abordagem foi a seguinte: inicialmente foram realizados ensaios à flexão, segundo a norma *EN 408:2004* [1], das vigas sem qualquer tipo de reforço; realizaram-se depois as reparações das vigas conforme o seu tipo de rotura e estado final; por fim, realizaram-se novamente ensaios à flexão das vigas

reparadas. Os materiais utilizados na reparação nas vigas foram os seguintes: parafusos auto perfurantes de aço *HBS10160* e *HBS10240* fornecidos pela empresa “*Rothoblaas*”, ilustrados na figura 4, e placas de contraplacado de madeira Okoumé com 2,392m x 0,095m x 0,027m (dimensões após cortes em carpintaria), da empresa “*JULAR Madeiras*”.



Figura 4. Parafusos auto perfurantes HBS10240 (em cima) e HBS10160 (em baixo)

## 2.2 Fabrico das vigas

As vigas foram fabricadas numa empresa especializada em fabrico e montagem de estruturas em MLC, seguindo na generalidade os procedimentos de seleção da madeira, preparação das superfícies, colagem, prensagem e cura habituais [2, 3]. Para a colagem das lamelas foi usada uma cola de Melamina-Ureia-Formaldeído da marca “*KOMARTEX M*” da empresa Colquímica, utilizando-se a mesma cola para os finger-joints.

De modo a simular a delaminação nas linhas de colagem, no fabrico das vigas foi colocada fita-cola entre as lamelas, após o afagamento e imediatamente antes da aplicação da cola nas faces e compressão das vigas, para que nessas zonas não existisse aderência entre lamelas, garantindo a dimensão e a forma pretendidas para a “delaminação” e uma transição o mais natural possível entre a zona colada e a não colada. Este procedimento tinha sido previamente testado em laboratório.

As vigas foram fabricadas com comprimento superior ao pretendido, o que permitiu eliminar um troço em cada extremidade com cerca de 20cm, rejeitando desta forma as pontas das vigas onde é mais difícil garantir uma pressão de aperto uniforme. A Fig. 5 mostra a presença da fita-cola entre lamelas numa viga ensaiada (B3).



Figura 5. Presença de fita-cola entre lamelas

A qualidade da colagem das lamelas das vigas foi avaliada através de ensaios de corte e de delaminação, seguindo as respetivas normas de ensaio, referências [4] e [5], analisando os resultados em comparação com os requisitos da norma *EN 386:2001* [2]. Estes ensaios foram realizados no LNEC em equipamento para controlo de fabrico industrial, sobre provetes obtidos das pontas retiradas das vigas A e D. A Fig. 6 mostra os provetes utilizados nesses ensaios (sendo os provetes mais estreitos (24 à direita) utilizados para os ensaios de corte, e os de maior volume (9 à esquerda) utilizados para os ensaios de delaminação).



Figura 6. Provetes utilizados em ensaios de delaminação e de corte

### 2.3 Ensaios de flexão

Como referido, as vigas foram sujeitas a ensaios de “flexão com quatro pontos de carga” feitos no LNEC conforme o especificado na norma *EN 408:2004* [1], usando seis LVTDs: nos pontos de aplicação de carga, nos apoios e a meio vão (Figuras 7 e 8). Os equipamentos utilizados nestes ensaios foram: máquina de ensaios modelo *AG-IS* da marca *SHIMADZU CORPORATION*; LVTDs e DataLogger da marca *RDP*.



Figura 7. Imagem de um ensaio

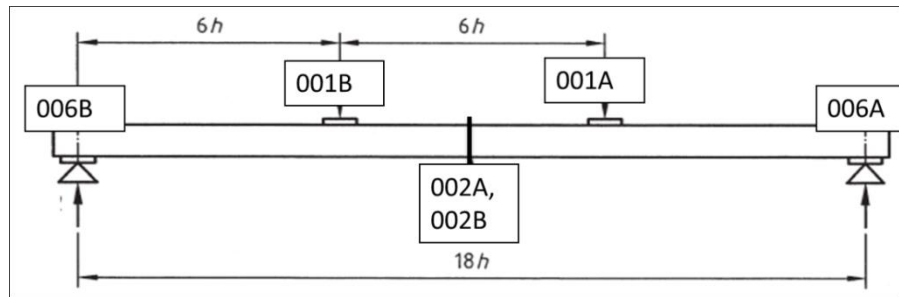


Figura 8. Esquema da posição dos defletómetros no ensaio [1]

## 2.4 Dimensionamento da reparação das vigas

O dimensionamento da reparação das vigas foi realizado tendo em vista atingir uma resistência correspondente ao valor médio de tensão de rotura das vigas de referência (45kN). Foi decidido usar genericamente a mesma abordagem para todas as vigas, apenas com ligeiros ajustamentos da posição do reforço, conforme o tipo de rotura exibido. A Fig. 9 ilustra as roturas obtidas nas vigas ensaiadas, sendo aqui representadas as linhas de colagem a castanho escuro, as delaminações a preto e as linhas de rotura a azul turquesa (a ordem das vigas ilustradas na figura é a indicada no ponto 2.1.).

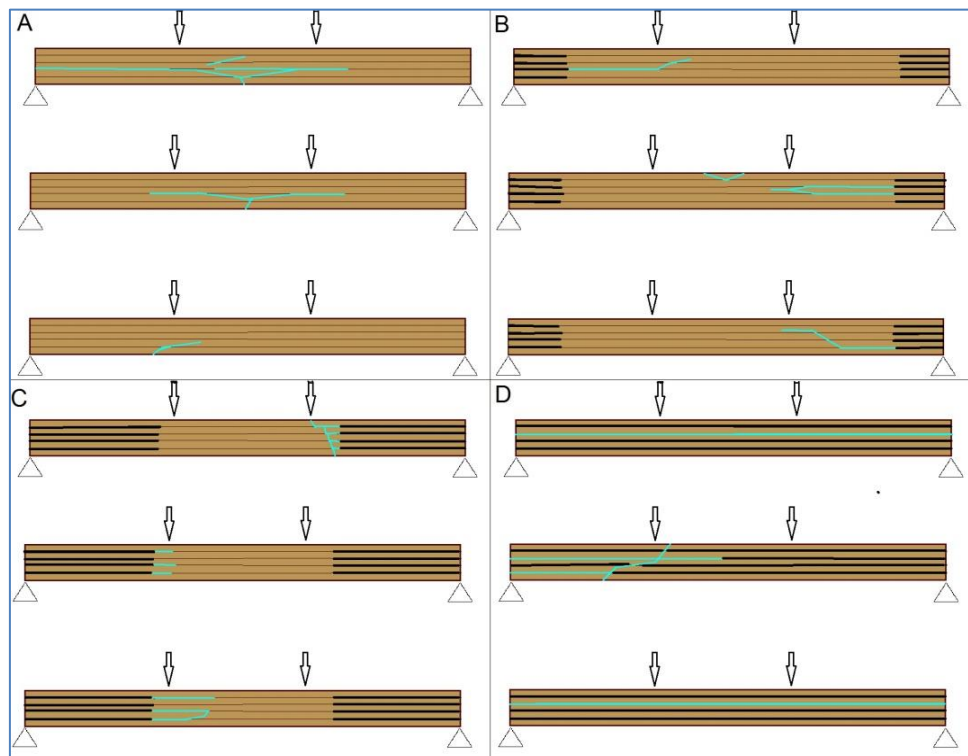


Figura 9. Esquema das roturas a reparar

O método de reparação consistiu em utilizar os parafusos de aço para transmitir esforços de corte e as chapas de contraplacado, centradas nas zonas de rotura das lamelas, para

transmitir os esforços de tração e compressão resultantes da flexão. Consequentemente, como as vigas D1 e D3 só tiveram rotura por esforço de corte (fendas somente horizontais), foram reparadas apenas recorrendo aos parafusos. Neste pressuposto, previa-se a aplicação de parafusos transversais apenas nos terços exteriores das vigas, onde existem esforços de corte. Em princípio, as chapas de contraplacado deveriam ser necessárias no terço central das vigas, na zona de maior momento fletor. No entanto, dado que o comprimento de amarração das chapas de contraplacado acarretava em alguns casos a sobreposição dos dois tipos de reforço, optou-se por usar os mesmos parafusos igualmente para fixar as chapas de contraplacado à viga de madeira.

Optou-se pela cravação dos parafusos perpendicularmente às lamelas, em vez de pares de parafusos inclinados cruzados (o que produziria uma ligação mais eficiente) e a sua cravação com recurso a pré-furação, por se constatar ser este o procedimento mais viável em obra, em madeiras com densidade relativamente elevada, como era o caso.

### 2.4.1 Transmissão de esforços de corte

Para estes cálculos, utilizaram-se os valores indicados na figura 10, medidos nos ensaios das vigas (distâncias entre elementos).

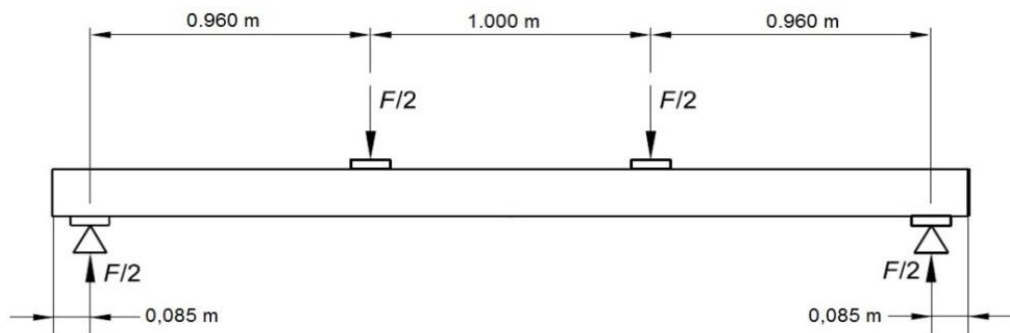


Figura 10. Distância entre elementos da viga

A reparação feita ao esforço de corte foi executada por aplicação de parafusos de aço HBS10160 com as características indicadas no Quadro 1, cravados perpendicularmente às lamelas. Considerou-se uma força de dimensionamento de  $F = 45\text{kN}$ , de que resulta um esforço de corte de  $22,5\text{kN}$ .

Quadro 1. Características dos parafusos HBS10160

Parafusos HBS10160	
$F_{u,k}$ (MPa)	1000,00
d1 (mm)	10,00
d2 (mm)	6,40
ds (mm)	7,00

Em que:

- $F_{u,k}$  – Força última de tração axial do parafuso;
- $d_1$  – Diâmetro exterior na rosca do parafuso;
- $d_s$  – Diâmetro do liso do parafuso;
- $d_2$  – Diâmetro interior na parte roscada.

Admitiu-se que a ligação era feita pelos parafusos unindo as duas metades da secção transversal da viga, pelo que se aplicam as expressões (8.6) do ponto 8.2.2. do Eurocódigo 5 [6] Nas expressões seguintes:  $t_i$  é a espessura do elemento  $i$ ;  $f_{h,i,k}$  é o valor característico da resistência ao esmagamento localizado do elemento  $i$  na direção paralela às fibras;  $M_{y,Rk}$  é o valor característico do momento de cedência plástica do parafuso,  $F_{ax,Rk}$  é a força característica de arrancamento do parafuso e  $\beta$  (definido adiante) reflete a relação entre as resistências ao esmagamento lateral dos materiais ligados pelo parafuso.  $F_{v,Rk}$  é o valor característico da capacidade resistente da ligação, por plano de corte e por parafuso, que corresponderá ao mecanismo de rotura da ligação suscetível de ocorrer primeiro (expressões 1).

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \quad (a) \\ f_{h,2,k} t_2 d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right. \quad (1)$$

Segundo a secção 8.7.1. do Eurocódigo 5 [6], nestas expressões, o diâmetro ( $d$ ) do parafuso a considerar deve ser:  $d_{ef} = 1,1 \cdot d_2 = 7,04$  mm. Dado que o parafuso tem diâmetro superior a 6mm, podem-se utilizar as regras aplicáveis a parafusos de porca (secção 8.5.1. do EC5) Neste caso  $\alpha=0^\circ$  (ângulo entre a direção da força aplicada e a direção das fibras da madeira).

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d_{ef}) \times 600 = 45,74 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \times f_{u,k} \times d_{ef}^{2,6} = 0,3 \times 1000 \times 7,04^{2,6} = 47952 \text{ Nmm} \quad (3)$$



Dado que o parafuso tem um comprimento total de 160mm, as espessuras a considerar para os cálculos são as seguintes:  $t_1 = 87,50\text{mm}$  e  $t_2 = 72,50\text{mm}$ , correspondentes aos “elementos” que recebem a cabeça e a ponta do parafuso, respetivamente.

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = 1 \quad (4)$$

Por os “elementos” ligados serem do mesmo material. Substituindo em (1) obtém-se (valores em kN):

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} (a) 23,34 \\ (b) 28,17 \\ (c) 10,75 + 100\% \times 10,75 = 21,50 \\ (d) 8,85 + 100\% \times 8,85 = 17,70 \\ (e) 10,43 + 100\% \times 10,43 = 20,86 \\ (f) 6,39 + 100\% \times 6,39 = 12,78 \end{cases} \quad (5)$$

Pelo que  $F_{v,Rk} = 12,78 \text{ kN}$

Com este valor de resistência da ligação, por parafuso, calcula-se o afastamento entre parafusos, sendo  $b$  a largura da seção transversal da viga,  $h$  a altura da seção transversal da viga,  $\tau$  o valor de tensão de corte a meia altura da seção, e  $F_c$  a força de corte resultante de  $\tau$ .

$$\tau = \left(\frac{F}{2}\right) \times \frac{3}{2} \times \frac{1}{b \times h} = 2,03 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$F_c = \tau \times b = 192,86 \text{ kN} \quad (7)$$

$$\# \text{Parafusos por metro} = \frac{F_c}{F_{v,Rk}} \times b = 15,09 \cong 15 \quad (8)$$

Para uma melhor distribuição, optou-se por colocar os parafusos em duas fiadas, com as distâncias finais mostradas na Fig. 11.

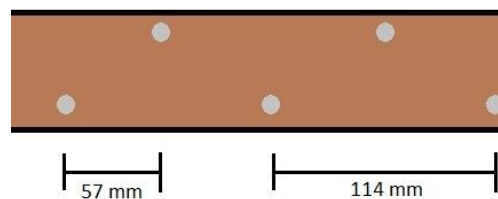


Figura 11. Esquema do afastamento entre parafusos (em planta)

### 2.4.2 Transmissão de esforços de tração

Para um momento flector no terço central da viga (21,60 kNm), obtém-se a seguinte força  $F_M$  do binário associado

$$\sigma_M = \frac{M}{w} = 44,55 \text{ MPa} \quad (9)$$

com  $w = \frac{bh^2}{6}$  (10)

$$F_M = \frac{1}{2} \times \sigma_M \times \frac{h}{2} \times b = 185,14 \text{ kN} \quad (11)$$

Calculada com a distribuição de tensões ilustrada na Fig. 12.

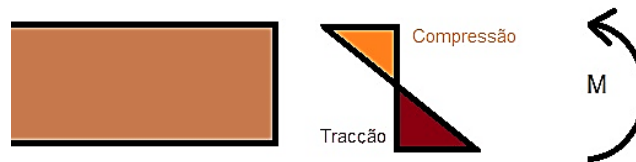


Figura 12. Esquema de tensões no terço central da viga

Para transmitir o esforço de tração, optou-se por utilizar na reparação duas placas de contraplacado e parafusos *Rothoblaas* HBS10240 (nas zonas dos contraplacados) com as mesmas características que os usados na reparação de rotura por corte mas mais compridos. As Fig. 13 e 14 ilustram a reparação nas vigas C1 e A1, para se ter uma ideia da distribuição dos parafusos ao longo da viga em duas situações extremas de localização da rotura.

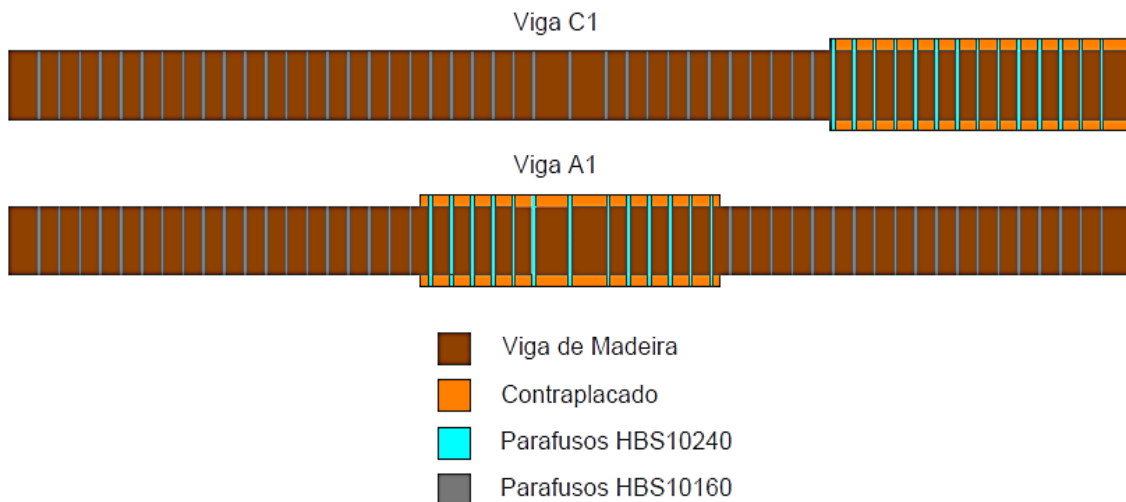


Figura 13. Esquemas de reparação das vigas C1 e A1 (vista longitudinal)

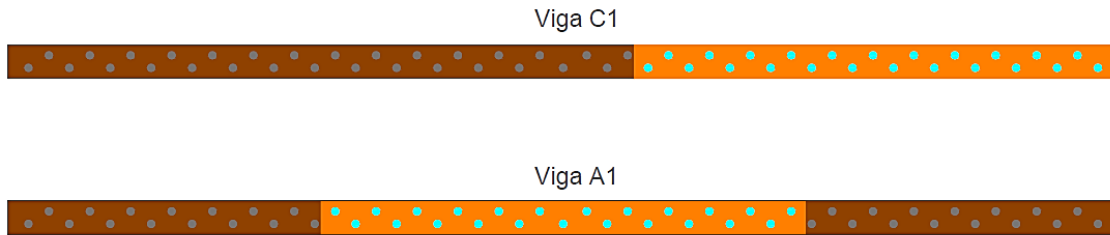


Figura 14. Esquemas de reparação das vigas C1 e A1 (vista em planta)

Nestas zonas, assumiu-se que a ligação correspondia a um elemento central de madeira ligado por parafusos a dois elementos exteriores de contraplacado, pelo que se aplicaram as expressões (8.7) do EC5 [6] (corte duplo), onde o índice 1 corresponde aos elementos de contraplacado (são iguais), e o índice 2 à viga de madeira.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (g) \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & (h) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (j) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (k) \end{cases} \quad (12)$$

com 
$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (213)$$

Em que:  $t_1 = 27\text{mm}$ ;  $t_2 = 175\text{mm}$  (espessuras dos elementos ligados);  $d_{ef} = 7,04\text{mm}$ .

$$f_{h,1,k} = 0,11(1 - 1,01d_{ef}) \times \rho_k = 61,35 \text{ MPa} \quad (3)$$

Contraplacado de Okoumé:  $\rho_k = 600 \text{ kg/m}^3$ , segundo o catálogo.

Resultando assim  $\beta = 0,741$

Substituindo nas expressões (12), resulta

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} (g) 11,66 \\ (h) 28,17 \\ (j) 5,43 + 100\% \times 5,43 = 10,85 \\ (k) 6,84 + 100\% \times 6,84 = 13,68 \end{cases}$$

$F_{v,Rk} = 10,85 \text{ kN}$  (resistência por parafuso e por plano de corte)

Considerando dois planos de corte e duas fiadas de parafusos, e aplicando o fator de correção recomendado em [6] para ter em conta a perda de eficiência de múltiplos parafusos colocados numa mesma fiada, obtemos um número mínimo de 5 parafusos por fiada, de cada lado da ligação.

Por simplicidade, adotou-se em todo o comprimento das vigas o mesmo espaçamento entre parafusos (114mm), o que determinou o comprimento das placas de contraplacado.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Ensaio iniciais

Após os ensaios iniciais, obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 2. A deformação no momento de rotura ( $\delta$ ) indicada é o deslocamento devolvido pela máquina de ensaio, sendo aqui posto apenas como um valor qualitativo e de comparação (os valores para calcular as outras características foram obtidos através da intersecção de dados da máquina de ensaio com os defletómetros). As grandezas apresentadas nos quadros são as seguintes:

- $F_{rot}$  – Força de rotura da viga;
- $\delta$  – deslocamento vertical da secção central da viga obtida através da máquina de ensaio;
- $E_{m,g}$  – Módulo de elasticidade global em flexão;
- $\sigma_{rot}$  – Tensão de tração atingida pela fibra inferior da seção a meio vão correspondente à força de rotura;
- $\tau_{rot}$  – Tensão de corte na zona do apoio (esforços máximos) correspondente à força de rotura.

Quadro 2. Resultados dos ensaios iniciais

Vigas	$F_{rot}$ (kN)	$\delta$ (mm)	$E_{m,g}$ (MPa)	$\sigma_{rot}$ (MPa)	$\tau_{rot}$ (MPa)
A1	47,48	48,96	12482	45,48	2,07
A2	40,78	49,88	11696	40,40	1,84
A3	51,32	48,31	13721	52,66	2,40
B1	16,14	18,59	10715	15,98	0,73
B3	25,27	29,69	12225	25,02	1,14
B6	24,69	33,00	10479	24,45	1,11
C1	8,84	30,35	3827	9,88	0,45
C2	10,51	34,69	4118	12,11	0,55
C3	10,18	37,95	3530	11,36	0,52
D1	40,59	33,94	14801	40,19	1,83
D2	60,41	63,68	13488	59,81	2,73
D3	37,51	28,84	15357	37,15	1,69
D4	42,26	37,70	14175	41,83	1,91
D5	28,12	32,24	11150	27,83	1,27
D6	50,59	58,20	11249	50,08	2,28

Para uma melhor leitura dos resultados e sua comparação, apresenta-se no Quadro 3 a média dos valores do Quadro 2.

Quadro 3. Valores médios (por tipo de viga) dos resultados dos ensaios iniciais

Vigas	$F_{rot}$ (kN)	$\delta$ (mm)	$E_{m,g}$ (MPa)	$\sigma_{rot}$ (MPa)	$\tau_{rot}$ (MPa)
A	46,53	49,05	12633	46,18	2,10
B	22,03	27,09	11140	21,82	0,99
C	9,84	34,33	3825	11,12	0,51
D	43,24	42,43	13370	42,82	1,95

Estes resultados confirmam que a delaminação abrangendo toda a secção transversal nas extremidades (vigas B e C) afetou o desempenho mecânico das vigas (resistência e rigidez), tanto mais quanto maior o comprimento da zona delaminada. Além disso, os resultados das vigas A e D são semelhantes, mostrando que neste caso a delaminação não afeta o desempenho, por se tratar de vigas retas cujo dimensionamento é condicionado por esforços de flexão.

### 3.2 Ensaios após reforço

Os resultados após reforço das vigas são apresentados nos Quadros 4 (valores individuais) e 5 (valores médios).

Quadro 4. Valores individuais dos resultados dos ensaios após reparação

Vigas	$F_{rot}$ (kN)	$\delta$ (mm)	$E_{m,g}$ (MPa)	$\sigma_{rot}$ (MPa)	$\tau_{rot}$ (MPa)
A1	35,37	55,74	7991	20,45	1,22
A2	35,91	53,00	9231	20,76	1,24
A3	39,22	38,47	13882	39,00	1,78
B1	39,83	82,18	8562	39,43	1,80
B3	38,19	81,53	6476	37,81	1,72
B6	36,35	64,12	8220	35,98	1,64
C1	24,82	72,25	5487	24,57	1,12
C2	21,47	65,49	4577	21,26	0,97
C3	27,15	99,80	3890	26,88	1,22
D1	36,26	44,87	10616	35,89	1,64
D2	29,01	69,81	6120	28,71	1,31
D3	46,19	53,29	11877	45,73	2,08

Quadro 5. Valores médios (por tipo de viga) dos resultados dos ensaios após reparação

Vigas	$F_{rot}$ (kN)	$\delta$ (mm)	$E_{m,g}$ (MPa)	$\sigma_{rot}$ (MPa)	$\tau_{rot}$ (MPa)
A	36,83	49,07	10368	26,73	1,41
B	38,12	75,94	7753	37,74	1,72
C	24,48	79,18	4651	24,23	1,10
D	37,15	55,99	9538	36,78	1,68

### 3.3 Análise de resultados

Os Quadros 6 e 7 ilustram a recuperação da resistência das vigas através do quociente entre os valores obtidos após reparação e antes da reparação das vigas.

Quadro 6. Percentagens de recuperação relativamente aos valores iniciais

Vigas	$F_{rot}$ (kN)	$\delta$ (mm)	$E_{m,g}$ (MPa)	$\sigma_{rot}$ (MPa)	$\tau_{rot}$ (MPa)
A1	74%	114%	64%	45%	59%
A2	88%	106%	79%	51%	67%
A3	76%	80%	101%	74%	74%
B1	247%	442%	80%	247%	247%
B3	151%	275%	53%	151%	151%
B6	147%	194%	78%	147%	147%
C1	281%	238%	143%	249%	249%
C2	204%	189%	111%	176%	176%
C3	267%	263%	110%	237%	237%
D1	89%	132%	72%	89%	89%
D2	48%	110%	45%	48%	48%
D3	123%	185%	77%	123%	123%

Quadro 7. Percentagens de recuperação - valores médios

Vigas	$F_{rot}$ (kN)	$\delta$ (mm)	$E_{m,g}$ (MPa)	$\sigma_{rot}$ (MPa)	$\tau_{rot}$ (MPa)
A	80%	100%	81%	57%	67%
B	182%	304%	70%	182%	182%
C	251%	230%	122%	220%	220%
D	87%	142%	65%	87%	87%

Aqui verifica-se claramente que a reparação foi muito mais eficaz nas vigas dos tipos “B” e “C”, recuperando e até melhorando as suas características mecânicas iniciais, embora com efeitos muito mais significativos na sua resistência do que na rigidez. Nos outros tipos (“A” e “D”), a recuperação da resistência e da rigidez das vigas são da mesma ordem de grandeza; a recuperação da capacidade resistente foi ainda assim bastante eficaz (80% e 87% de recuperação da força de rotura atingida pelas vigas “A” e “D” respetivamente).

#### 4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que, com o método de reparação utilizado, é possível recuperar a resistência das vigas após rotura, especialmente naquelas cuja delaminação afetava severamente as pontas das vigas em toda a secção transversal, apresentando por isso um baixo desempenho inicial. Verificou-se ainda que a reparação foi tanto mais eficaz quanto menor a deterioração sofrida pela viga na sequência da sua rotura mecânica, sobretudo no que se refere à ocorrência de rotura de lamelas por tração. Com efeito, o método de reparação implementado mostrou-se mais eficaz na recuperação da capacidade de transmissão de esforços de corte do que de tração. Verificou-se, além disso, que não se conseguiu recuperar a rigidez original das vigas. Isto é mostrado nas Fig. 15 e 16, que mostram os gráficos Força-Deslocamento das vigas D1 e D2 e das vigas B1 e B2, respetivamente.

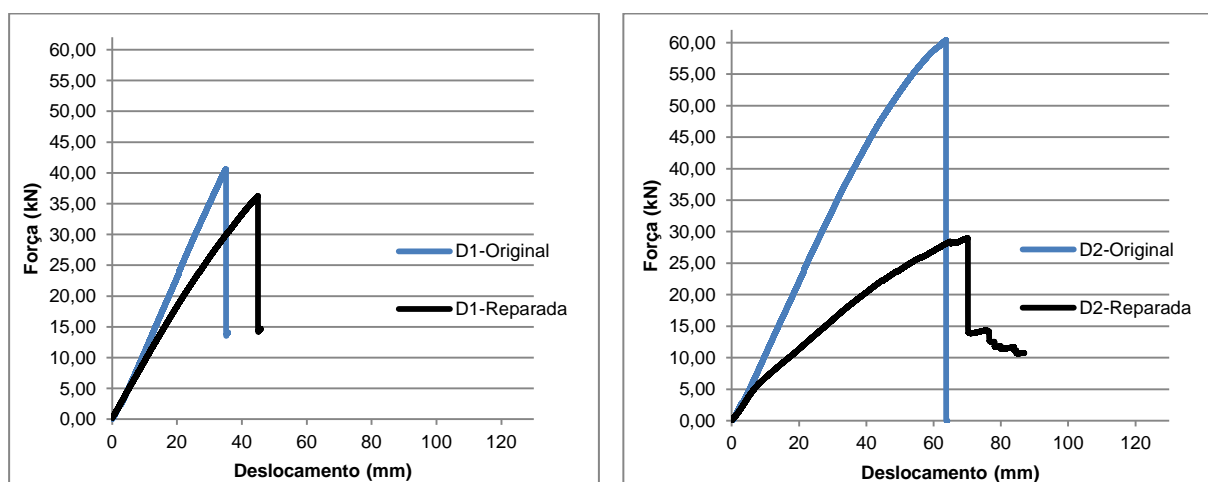


Figura 15. Comparação gráfica dos ensaios antes e após reparação das vigas D1 e D2

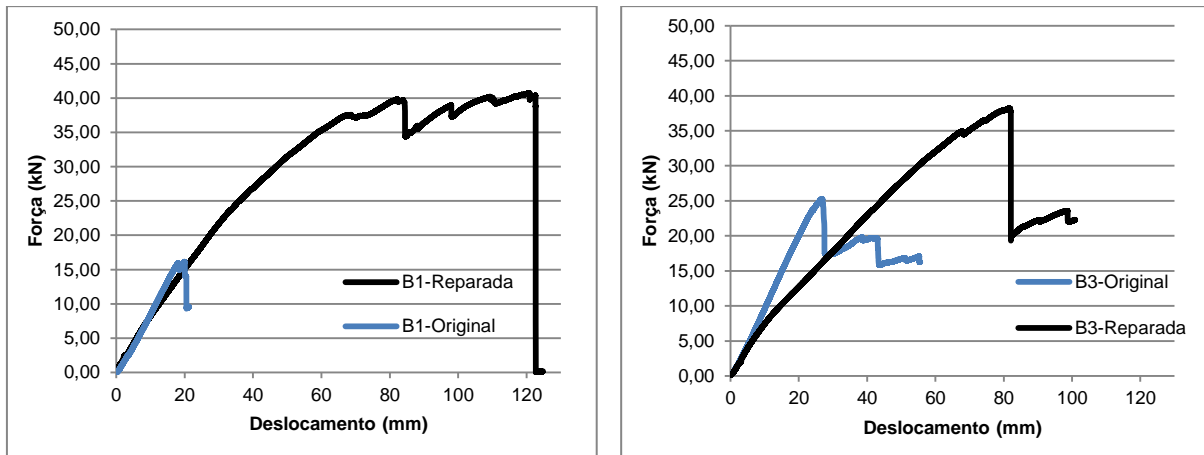


Figura 16. Comparação gráfica dos ensaios antes e após reparação das vigas B1 e B3

Note-se que a recuperação da rigidez das vigas teria muito provavelmente sido superior caso os parafusos tivessem sido inseridos em pares, cruzados, inclinados relativamente aos planos de delaminação. Tal não foi possível neste caso, pela dificuldade técnica da sua introdução em condições simulando a aplicação em obra, em madeira de pinho bravo com densidade relativamente elevada.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FCT o apoio financeiro concedido.

Agradece-se ainda às empresas “Rothoblaas”, “Bernardino e Mendes” e “JULAR Madeiras”, o apoio prestado.

## REFERÊNCIAS

- [1] EN 408:2004 - Timber structures - *Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*
- [2] EN 386:2001, Glued laminated timber: *Performance requirements and minimum production requirements*
- [3] EN 14080:2005 - Timber structures; *Glued laminated timber – Requirements*
- [4] EN 392:1995 - Glued laminated timber: *Shear test of glue lines*
- [5] EN 391:2001 - Glued laminated timber: *Delamination test of glue lines*
- [6] EN 1995-1-1:2004/A1:2008: *Eurocode 5 – Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. CEN, Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2008