

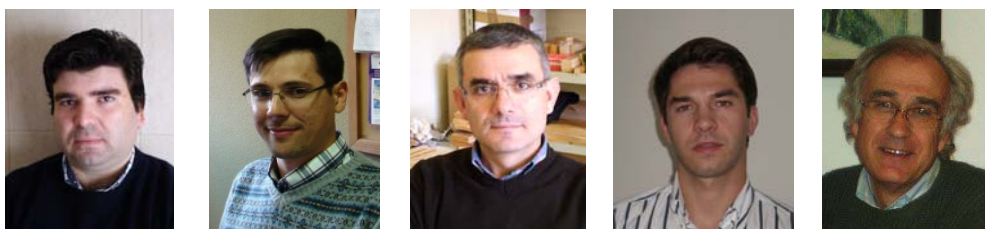
## DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES DE REFORÇO EM LIGAÇÕES DE MADEIRA DO TIPO CAVILHA

C.L. Santos<sup>1</sup>, A.M.P. de Jesus<sup>2</sup>, J.J.L. Morais<sup>1</sup>, E.R.M.A. Queirós<sup>3</sup>, A.M.V. Lima<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CITAB/Departamento de Engenharias, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

<sup>2</sup>UCVE-IDMEC/Departamento de Engenharias, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

<sup>3</sup>Departamento de Engenharias, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro



### RESUMO

*Este artigo apresenta um estudo comparativo entre técnicas de reforço de ligações do tipo cavilha, para aplicação em estruturas de madeira. Uma das técnicas proposta é baseada na aplicação de insertos de aço colados nos furos das peças de madeira. A outra técnica consiste na colagem de laminados de carbono nas zonas dos furos das peças de madeira. Estas técnicas são testadas em ligações construídas em madeira de pinho Português. Adesivos epóxicos são usados quer na colagem dos insertos de aço quer na aplicação do laminado de carbono. O programa experimental incluiu três séries de ensaios: uma sem reforço e duas com reforço. Cada provete é constituído por três peças de madeira, duas peças laterais sujeitas ao carregamento na direcção radial e uma peça central, carregada na direcção longitudinal em compressão. O conjunto das três peças, ligadas por uma cavilha de aço, caracteriza um dos detalhes estruturais mais comum nas estruturas de madeira - a ligação em T. O programa experimental permitiu a avaliação das características de resistência, ductilidade, rigidez e modos de rotura das diferentes séries, demonstrando um bom desempenho das soluções de reforço propostas.*

## 1- INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

### 1.1 - Introdução

O aspecto crítico do projecto de estruturas de madeira situa-se ao nível das ligações entre os elementos estruturais. As ligações são os elementos críticos no projecto e desempenho de estruturas de madeira. Cerca de 80% das falhas em estruturas de madeira iniciam nas ligações (Itany e Faherty 1984). A ausência de perfeita continuidade nas estruturas, devido à presença de ligações, resulta numa redução da resistência global da estrutura, justificando o aumento das

dimensões dos elementos estruturais. As ligações do tipo cavilha são as mais comuns nas estruturas de madeira. O conhecimento do comportamento mecânico das ligações do tipo cavilha é fundamental para a sua utilização eficiente.

Várias técnicas de reforço têm sido propostas com vista ao aumento da eficiência e fiabilidade de ligações de madeira do tipo cavilha. Uma das técnicas mais utilizadas consiste na aplicação de materiais mais resistentes nas superfícies laterais das peças de madeira, na envolvente dos furos. Como materiais de reforço, têm sido usadas madeiras de alta

densidade, produtos derivados da madeira, chapas metálicas e materiais compósitos reforçados com fibras (FRP). Os reforços podem assumir variadas formas, tais como placas rectangulares ou anéis e podem ser aplicados por colagem ou simplesmente pregados. Estes reforços procuram controlar a rotura paralela e perpendicular ao fio da madeira, assim como aumentar a resistência ao esmagamento (Rodd e Leijten 2003, Claisse e Davis 1998, Haller et al. 2006).

A injeção de resina entre a cavilha e os furos, nas peças de madeira, também tem sido utilizado como técnica para aumentar a rigidez da ligação (Davis e Claisse 2001).

A utilização de tubos em substituição de cavilhas maciças tem sido proposta com vista o aumento da ductilidade da ligação e, conseqüentemente, a sua capacidade de dissipação de energia (Larsen e Jensen 2000).

Recentemente, Santos et al. (2009) propôs uma técnica de reforço baseada na aplicação de insertos metálicos colados, nos furos das peças de madeira. Esta técnica de reforço tem já sido empregue, com sucesso, no reforço de ligações em compósitos de alta performance (Camanho et al. 2005, Camanho e Lambert 2006). Com base em ensaios de esmagamento localizado em peças de madeira de Pinho Marítimo, Santos et al. (2009) verificou ganhos superiores a 50% na resistência ao esmagamento na direcção longitudinal e superior a 80% na direcção radial.

Queirós (2009) estudou recentemente uma técnica de reforço baseada na aplicação de laminados de carbono colados com resina epóxi, tendo verificado ser eficiente na eliminação de modos de rotura frágeis, assim como no aumento da resistência ao esmagamento da madeira, em ligações com ligadores do tipo cavilha.

## 1.2 - Objectivos

Este artigo tem como objectivo apresentar um estudo experimental comparativo entre técnicas de reforço de ligações do tipo cavilha, para aplicação em

estruturas de madeira. Uma das técnicas proposta é baseada na aplicação de insertos de aço colados nos furos das peças de madeira. A outra técnica de reforço adoptada consiste na aplicação de uma placa de laminado de carbono (CFRP) nas zonas envolventes dos furos.

O estudo deve basear-se em ligações construídas em madeira de Pinho Marítimo, por ser uma das espécies mais abundantes em Portugal.

## 2 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 - Descrição do ensaio

O programa experimental incluiu três séries de ensaios: uma sem reforço e duas com reforço. Cada provete é constituído por três peças de madeira. Uma peça central, carregada na direcção paralela ao fio da madeira em compressão, e duas peças laterais, carregadas na direcção perpendicular ao fio da madeira, que estão simplesmente apoiadas. O conjunto das três peças de madeira ligadas pela cavilha de aço, caracteriza um dos detalhes estruturais mais comum nas estruturas de madeira – a ligação em T.

Estes ensaios foram instrumentados com quatro LVDT's: dois LVDT's (1 e 2) estão solidários à peça central e medem o deslocamento de uma secção da peça central em relação à base da máquina; outros dois LVDT's (3 e 4) estão ligados directamente à cavilha e medem o deslocamento da cavilha em relação à base da máquina (ver Fig. 1).



Fig. 1 – Ensaio da ligação em T.

Os ensaios foram realizados numa máquina de ensaios electromecânica, marca Instron®, modelo 1125, equipada com uma célula de carga de 100 kN. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento do travessão da máquina, tendo-se usado LVDT's, modelo AML/EU  $\pm 10$ -S10, da marca Applied Measurements®, para medir os deslocamentos. Os dados obtidos nos ensaios experimentais foram adquiridos através do sistema de aquisição de dados SPIDER 8-30®.

O esquema de carregamento adoptado nos ensaios seguiu as recomendações da norma EN26891 (1993). Inicialmente os provetes são carregados até 40% da carga máxima de rotura estimada, mantendo-se a posição do travessão constante durante 30 s; de seguida os provetes são descarregados até 10% da carga máxima, mantendo-se a posição do travessão da máquina correspondente durante 30 s; finalmente os provetes são carregados até à rotura. A ligação foi testada impondo um deslocamento ao travessão da máquina de 0.3 mm/min. Testes preliminares revelaram uma força de resistência máxima de 16500 N, para os ensaios sem reforço e 19000 N para os ensaios com reforço. Estas forças serviram de base à planificação do ensaio, nomeadamente à definição dos patamares descarga/recarga estabelecidos pela norma EN26891 e adaptados neste estudo.

Foram ensaiados um total de trinta provetes do detalhe estrutural: dez sem reforço, dez reforçados com laminado de carbono e dez reforçados com insertos metálicos. Todos os provetes foram devidamente identificados, medidos e pesados, de modo a determinar a massa volúmica para cada provete. Nas ligações reforçadas, todas as peças constituintes da ligação (três) foram reforçadas em ambas as faces com o respectivo reforço (laminado/inserto metálico).

## 2.2 - Descrição dos materiais

Todo o programa experimental é realizado com madeira de Pinho Marítimo (*Pinus pinaster* Ait.) dado ser uma das espécies de madeira mais relevantes em Portugal. Na Tabela 1 resumem-se as constantes elásticas da madeira de Pinho Marítimo usada no presente estudo que foram obtidas com base em informação disponível na literatura (Xavier 2003, Pereira 2003, Oliveira 2003 e Garrido 2004).

Tabela 1 – Propriedades elásticas da madeira *Pinus pinaster* Ait.

$E_L=15.1$ GPa	$\nu_{LR}=0.47$	$G_{LR}=1110$ MPa
$E_R=1900$ MPa	$\nu_{RT}=0.59$	$G_{LT}=1040$ MPa
$E_T=1000$ MPa	$\nu_{TL}=0.05$	$G_{RT}=160$ MPa

Técnicas de reforço e reparação de estruturas de madeira, envolvendo adesivos estruturais, revelam ser eficientes e economicamente competitivas quando comparadas com outros métodos alternativos. Uma das técnicas mais promissoras é a utilização de adesivos epóxicos (Custódio et al. 2009). Na aplicação do laminado de carbono foi seleccionado como adesivo uma argamassa à base de resina epóxida proposta pela SIKAR® para a colagem de reforço em estruturas. Esta argamassa tem a designação comercial Sikadur-30 e tem sido usada na colagem de reforços de estruturas, especialmente nos trabalhos de reforço estrutural com laminados de carbono. Na aplicação dos insertos de aço colados nos furos das peças de madeira foi seleccionado um adesivo epóxico, usado pela HILTI® em sistemas de ancoragens, de designação HIT-RE 500. Na Tabela 2, estão apresentadas algumas propriedades destes adesivos, fornecidas pelos respectivos fabricantes, nomeadamente o módulo elástico ( $E$ ) e a tensão de rotura ( $\sigma_{rot}$ ).

Tabela 2 – Propriedades dos adesivos.

Adesivo	$E$ (MPa)	$\sigma_{rot}$ (MPa)
Sikadur-30	12800	32.7
HILTI RE500	1493	43.5

Uma das técnicas de reforço investigadas neste trabalho consiste na aplicação, por colagem, de laminados de carbono na zona envolvente dos furos para inserção das cavilhas. O laminado de carbono utilizado consiste num laminado bidireccional, permitindo assim uma melhor performance do reforço nas duas direcções, em particular nas direcções de simetria material da madeira - longitudinal e radial. O laminado de carbono foi construído especificamente para o presente trabalho tendo resultado do empilhamento de dez camadas de manta unidireccional (SEAL Texipreg® HS160 RM) dispostas alternadamente segundo a sequência  $[(0/90)_2/0]_S$  e impregnadas com resina epóxida. Cada camada apresenta uma espessura de 0.15 mm, resultando um laminado de 1.5 mm de espessura nominal.

Com vista à identificação das propriedades da camada do laminado de carbono, foi realizada uma série de ensaios de tracção usando o laminado de carbono. Assim, foram preparados seis provetes com dimensões de acordo com a norma ASTM D3039 (2000). A espessura do provete foi a mesma do laminado usado no reforço. Os provetes foram cortados ou na direcção da camada superficial ou segundo a direcção perpendicular a esta camada. Em particular, foram cortados três provetes em cada uma das direcções anteriores, nomeadamente  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . A Tabela 3 apresenta os valores das constantes elásticas obtidas para a camada que compõe o laminado de carbono. Apenas as propriedades  $E_{xx}$ ,  $E_{yy}$ , e  $\nu_{xy}$  foram estimadas com base nos ensaios realizados neste estudo. As restantes propriedades foram estimadas com base em informação disponível na literatura (Campilho 2009).

Tabela 3 – Propriedades elásticas da camada do laminado de carbono.

$E_{xx}=1190$ GPa	$\nu_{xy}=0.21$	$G_{xy}= 4.32$ GPa
$E_{yy}=15.8$ GPa	$\nu_{xz}=0.21$	$G_{xz}= 4.32$ GPa
$E_{zz}=15.8$ GPa	$\nu_{yz}=0.38$	$G_{yz}= 3.20$ GPa

### 2.3 - Preparação dos provetes

Todo o processo que conduziu à preparação das peças de madeira

constituintes dos provetes foi controlado desde o abate das árvores. Após o abate das árvores foram cortadas pranchas de cerca de 100 mm de espessura. Estas foram secas em estufa até alcançarem um teor de humidade de cerca de 12%. Posteriormente, foram cortados os provetes e colocados no laboratório a estabilizar com a atmosfera aí existente. O corte dos provetes foi feito de modo a respeitar as dimensões e orientações do fio da madeira ilustradas na Fig. 2. Informa-se ainda que a direcção da espessura foi seleccionada de modo a corresponder à direcção tangencial e a espessura seleccionada foi de 30 mm ( $t=2.14d$ ), sendo  $d$  o diâmetro da cavilha, igual a 14 mm.

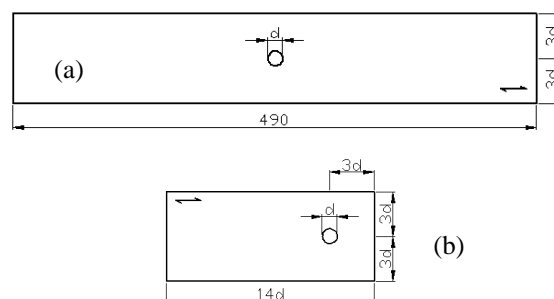


Fig. 2 – Dimensões e orientação dos provetes: a) peça lateral; b) peça central.

No total foram produzidos noventa peças em madeira limpa, das quais, sessenta foram peças laterais e trinta, peças centrais, perfazendo um total de dez provetes por série. Na Tabela 4 indicam-se as densidades médias de cada série assim como o desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 4 – Densidades das séries testadas.

Série	N.º Provetes	Densidade		
		Média	Desv. Pad.	CV
		(kg/m³)		%
s/ reforço	10	612.8	30.7	5.0
c/ reforço - CFRP	10	621.8	36.7	5.9
c/ reforço - insertos	10	566.1	11.2	2.0

Os laminados de carbono foram aplicados em rebaixos maquinados na madeira (Fig. 3a). Também foram criados rebaixos nas peças de madeira, de modo a

embeber a aba dos insertos metálicos (Fig. 3b).

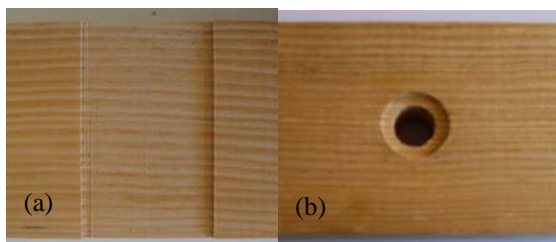


Fig. 3 – Preparação das peças de madeira para aplicação dos reforços: a) laminados CFRP; b) insertos metálicos.

As placas de laminado de carbono foram produzidas com as dimensões de  $400 \times 400 \times 1.5 \text{ mm}^3$  e posteriormente foram cortadas para as dimensões finais de  $84 \times 50 \text{ mm}^2$  mantendo a espessura.

Os insertos metálicos foram maquinados, em torno CNC, a partir de um varão de aço de construção, de acordo com a geometria e dimensões apresentadas na Fig. 4.

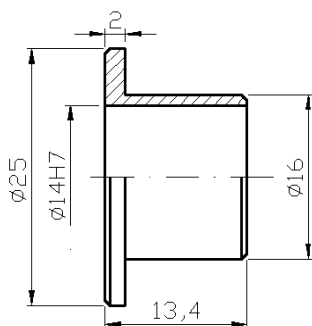


Fig. 4 – Geometria e dimensões do inserto metálico (dimensões em mm).

As colagens foram realizadas tendo em conta as indicações dos fabricantes. No caso da colagem dos laminados de CFRP, os provetes ficaram todos sujeitos à mesma pressão durante 48 horas e tiveram um tempo de cura de catorze dias antes de se proceder à furação. A furação foi executada com uma broca de carboneto de tungsténio de 14.00 mm de diâmetro (Fig. 5a).

No caso dos provetes reforçados com insertos metálicos (Fig. 5b), à medida que se colavam eram alinhados e prensados num varão roscado M14, de modo a garantir o alinhamento dos insertos. A cura foi de sete dias.

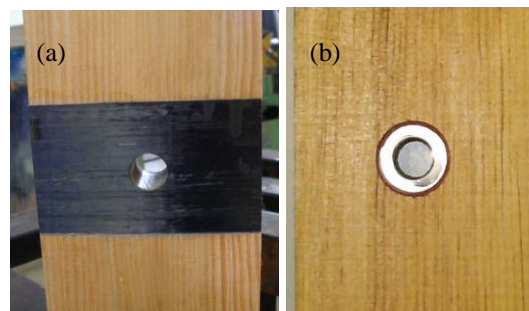


Fig. 5 – Provetes reforçados: a) com laminados CFRP; b) com insertos metálicos.

Todas as peças constituintes da ligação foram reforçadas em ambas as faces, com laminados de carbono/insertos metálicos. A Fig. 6 apresenta uma foto de uma peça de madeira reforçada com um inserto metálico, seccionada de modo a permitir ilustrar em pormenor os insertos metálicos.



Fig. 6 – Provette reforçado com insertos metálicos – secção transversal.

### 3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os ensaios experimentais foi registada a carga e os deslocamentos dos LVDT's. Definiram-se três tipos de deslocamentos, nomeadamente o deslocamento de uma secção da peça central localizada a 60 mm do topo (prato da máquina de ensaios), em relação à base (média dos deslocamento dos LVDT's 1 e 2), o deslocamento da cavilha em relação à base da máquina (média dos deslocamentos dos LVDT's 3 e 4) e, finalmente as diferenças entre os deslocamentos anteriores,  $(1/2)-(3/4)$ . A diferença de deslocamentos representa o esmagamento da peça central em relação à cavilha. Nas Figs. 7 a 9 apresentam-se os



diferentes tipos de deslocamento referidos para as três séries de testes. Da análise dos gráficos, constata-se que os deslocamentos medidos na peça central (1/2) são superiores aos deslocamentos medidos na cavilha (3/4). Com efeito, os LVDT's 1 e 2 contabilizam a deformação conjunta da peça central e laterais; os LVDT's 3 e 4 apenas contabilizam apenas a deformação das peças laterais. A análise dos deslocamentos (1/2) dá uma visão da ductilidade global da ligação. Pode-se constatar que o reforço com CFRP aumentou a ductilidade da ligação de forma muito significativa, tendo eliminado os modos de rotura frágeis. A Fig. 11 ilustra o aspecto da rotura na ligação reforçada com CFRP. As peças laterais quase não sofreram dano visível; já a peça central sofreu um esmagamento controlado. Em qualquer dos casos não se formaram fendas que conduzissem ao colapso frágil da ligação.

O reforço com insertos metálicos não teve um efeito de aumento de ductilidade na ligação. Apenas um provete reforçado com insertos metálicos apresentou níveis de ductilidade elevados, tendo sido o único provete, desta série, a apresentar rotura na peça central; todos os restantes da série exibiram rotura pela peça lateral. A Fig. 12 ilustra os modos de rotura obtidos nesta série. O colapso final ocorre com a iniciação e propagação instável de uma fenda no plano RL.

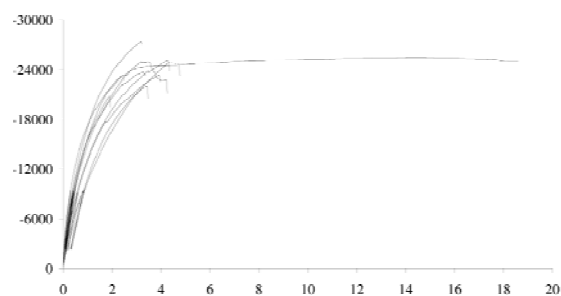
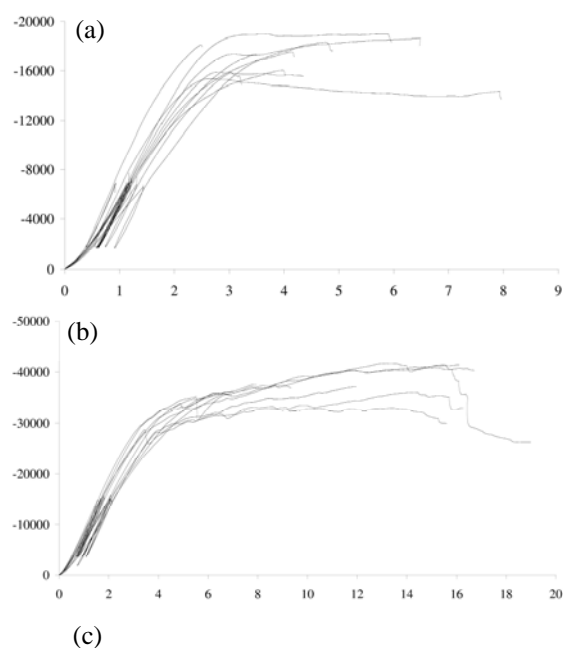


Fig. 7 – Força versus deslocamento (1/2) do detalhe estrutural: a) sem reforço; b) reforçado com CFRP; c) reforçado com insertos metálicos.

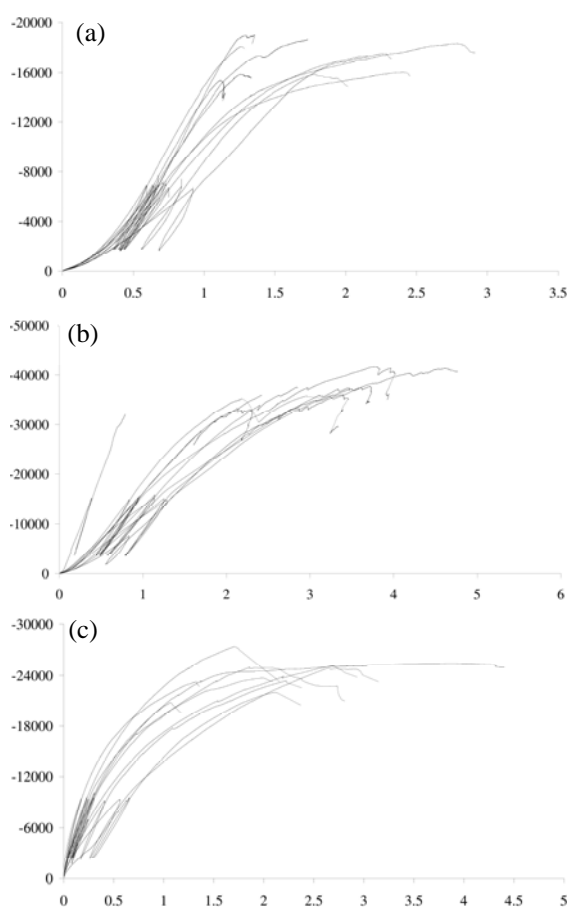
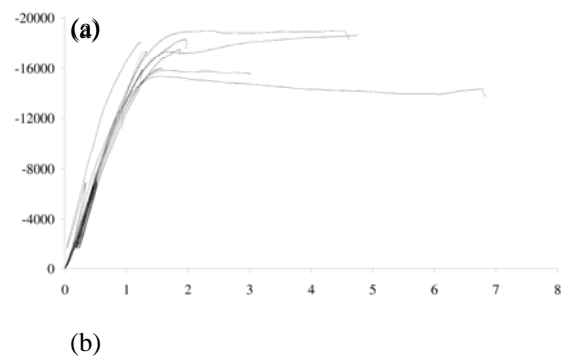


Fig. 8 – Força versus deslocamento (3/4) do detalhe estrutural: a) sem reforço; b) reforçado com CFRP; c) reforçado com insertos metálicos.



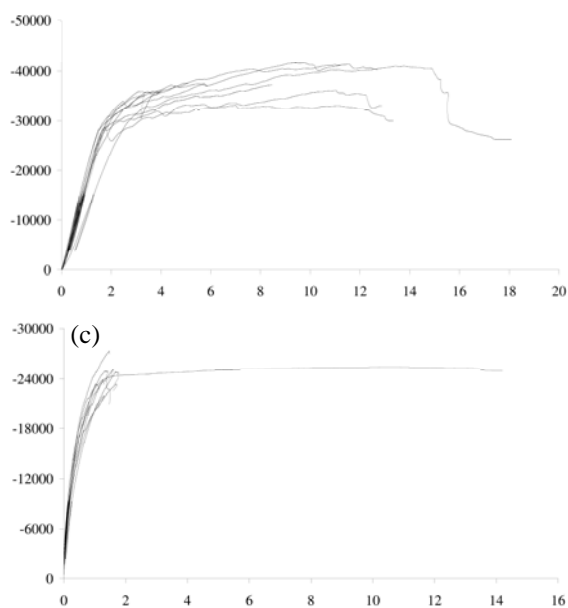


Fig. 9 – Força versus deslocamento (1/2) – (3/4) do detalhe estrutural: a) sem reforço; b) reforçado com CFRP; c) reforçado com insertos metálicos.

Relativamente às peças sem reforço, alguns provetes apresentaram rotura nas peças laterais, outros na peça central. A Fig. 10 ilustra o aspecto final da rotura, nestes dois casos, sendo que a rotura final se caracterizou pela formação de uma fenda no plano RL. Nos casos em que a rotura se deu pela peça central, a ligação apresentou maior ductilidade, pois a criação da fenda foi antecedida por algum esmagamento da madeira. Nos casos em que a rotura se deu pelas peças laterais, o comportamento da ligação é globalmente frágil, não tendo o deslocamento (1/2) ultrapassado os 2 mm (ver Fig. 9a)).

A análise das Figs. 7 a 9 mostra também o efeito benéfico dos reforços, no aumento das cargas de rotura,  $F_{rot}$ . O aumento é mais acentuado no reforço com CFRP, sendo relativamente mais modesto com a aplicação do inserto metálico, mas ainda significativo.

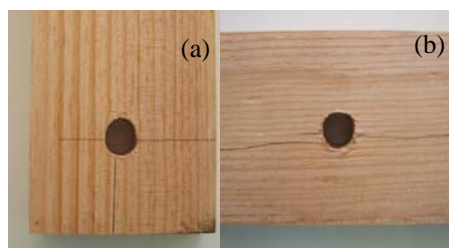


Fig. 10 – Modos de rotura na ligação em T, sem reforço: a) rotura na peça central (4 casos); b) rotura na peça lateral (6 casos).

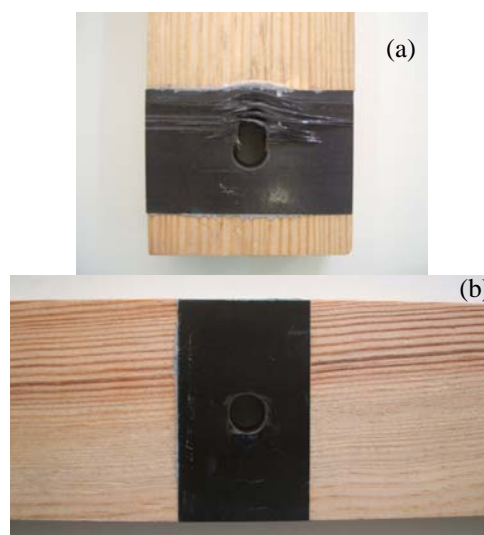


Fig. 11 – Modos de rotura na ligação em T, reforçada com CFRP: a) rotura na peça central; b) aspecto da peça lateral.

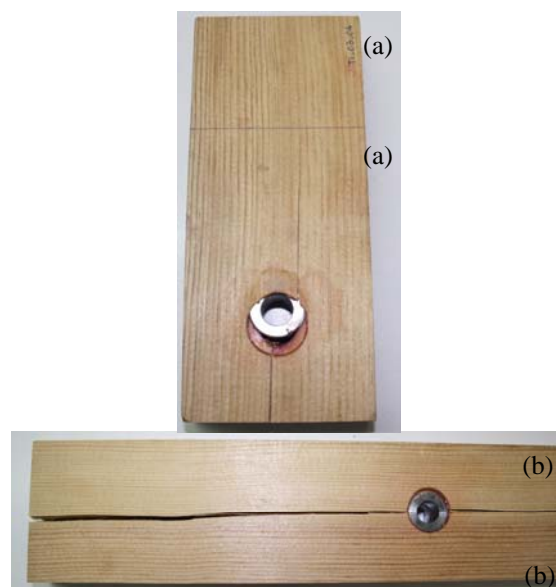


Fig. 12 – Modos de rotura na ligação em T, reforçada com inserto metálico: a) rotura na peça central (1 caso); b) rotura na peça lateral (9 casos).

Nas Tabelas 5, 6 e 7 resumem-se os valores das cargas máximas registadas durante os ensaios. Comparando as cargas médias de cada série constata-se que a aplicação do reforço de CFRP conduziu a um ganho de 120% na carga de rotura, relativamente à solução sem reforço; a aplicação do inserto metálico conduziu a um ganho de 40% relativamente à solução sem reforço. Os valores dos coeficientes de variação das cargas de rotura são praticamente iguais para as várias séries. Dado que as séries apresentam valores

médios de massa volúmica distintos, apresenta-se, na Fig. 13, a evolução da carga de rotura, com a massa volúmica, para cada série. Pode-se constatar uma fraca correlação entre a carga de rotura e a massa volúmica, pelo que os ganhos atrás referidos não se devem às diferenças de massas volúmicas médias entre séries.

As Tabelas 5, 6 e 7 também incluem o valor da rigidez das ligações, obtidos usando as curvas carga – deslocamento, representadas, respectivamente nas Figs. 7, 8 e 9. A rigidez foi calculada eliminando os troços de descarga/recarga. Comparando os valores de rigidez, constata-se que ambos os reforços contribuem para um aumento desta, sendo o aumento resultante da aplicação do inserto metálico mais relevante. Tendo como referência a rigidez  $k_1$ , que representa a rigidez global da ligação, o reforço CFRP produz um ganho de 16% e o inserto metálico produz um ganho de 64%. Na Fig. 14 ilustra-se a evolução dos coeficientes de rigidez com a massa volúmica, para as três séries. Consta-se que a correlação entre as duas grandezas é reduzida. No entanto, a correlação é superior na série sem reforço do que nas séries reforçadas. As correlações nas séries sem reforço e reforçadas com insertos metálicos são sempre positivas; na ligação reforçada com CFRP obteve-se correlação negativa para os coeficientes de rigidez  $k_1$  e  $k_2$ . A análise dos gráficos confirma as conclusões extraídas com base na análise dos valores médios de rigidez de cada série.

Tabela 5 – Resumo dos resultados experimentais da ligação em T sem reforço.

Nº	$\rho$	$F_{rot}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
Prov.	kg/m <sup>3</sup>	N	N/mm	N/mm	(N/mm)
T_01	589.1	17540	5544	8873	13640
T_02	576.0	16026	6573	11959	14583
T_03	644.8	15880	7176	15618	13723
T_04	574.8	17374	6696	12050	15178
T_05	645.7	19000	7980	16616	15302
T_06	579.5	18346	6981	13170	14805
T_07	646.2	18662	7823	17073	14886
T_08	623.9	18116	10389	19338	22205
T_09	638.3	15370	8554	17727	16558
T_10	609.5	15878	6447	12022	14581

Média	612.8	17219	7416	14445	15546
Desv. Pad.	30.7	1329	1356	3303	2480
CV%	5.0	8	18	23	16

Tabela 6 – Resumo dos resultados experimentais da ligação em T reforçada com CFRP.

Nº	$\rho$	$F_{rot}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
Prov.	kg/m <sup>3</sup>	N	N/mm	N/mm	N/mm
T_01	639.0	37756	7034	11840	17650
T_02	627.0	40964	9825	42440	12960
T_03	597.8	37598	8586	19306	17863
T_04	579.4	36230	9532	18562	19390
T_05	552.8	33132	9064	18775	17610
T_06	651.5	35782	10253	21045	19312
T_07	620.3	41670	9350	17170	19802
T_08	619.8	36110	7788	13608	18783
T_09	659.7	41322	7013	12119	17747
T_10	670.3	37442	7271	12295	17107
Média	621.8	37801	8572	18716	17822
Desv. Pad.	36.7	2764	1214	9001	1937
CV(%)	5.9	7	14	48	11

Em suma, o reforço com CFRP produziu aumentos mais significativos na carga máxima do ensaio, do que o reforço com insertos metálicos. O reforço com insertos metálicos produziu aumentos mais importantes na rigidez da ligação. O reforço com CFRP aumentou a ductilidade da ligação, eliminados os modos de rotura frágeis; o reforço com insertos metálicos não possibilitou aumentos de ductilidade da ligação, sendo esta uma desvantagem deste tipo de reforço.

Tabela 7 – Resumo dos resultados experimentais da ligação em T reforçada com insertos metálicos.

Nº	$\rho$	$F_{rot}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
Prov.	kg/m <sup>3</sup>	N	N/mm	N/mm	N/mm
T_01	546.0	25154	10020	16401	27572
T_02	564.5	20812	13780	23346	32772
T_03	552.1	23396	11660	17716	30198
T_04	575.1	25450	12852	20935	20935
T_05	566.3	22008	9997	14269	20391
T_06	576.4	23252	17225	30480	42718
T_07	558.0	23712	12328	21103	29642
T_08	580.0	24884	7744	11600	23250
T_09	575.2	25006	11603	19452	28737
T_10	566.9	27426	14281	24946	33404
Média	566.1	24110	12149	20025	28962
Desv.	11.2	1885	2637	5472	6650



Pad.					
CV%	2.0	8	22	27	23

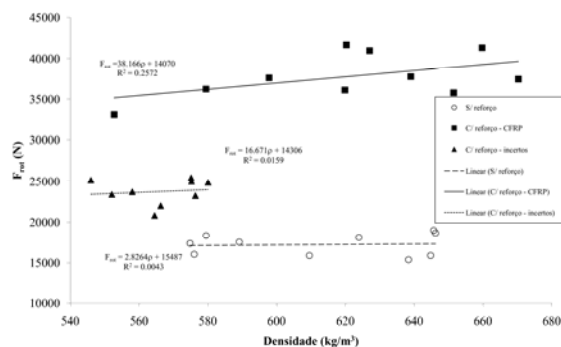


Fig. 13 – Evolução das cargas de rotura com a massa volúmica para as três séries.

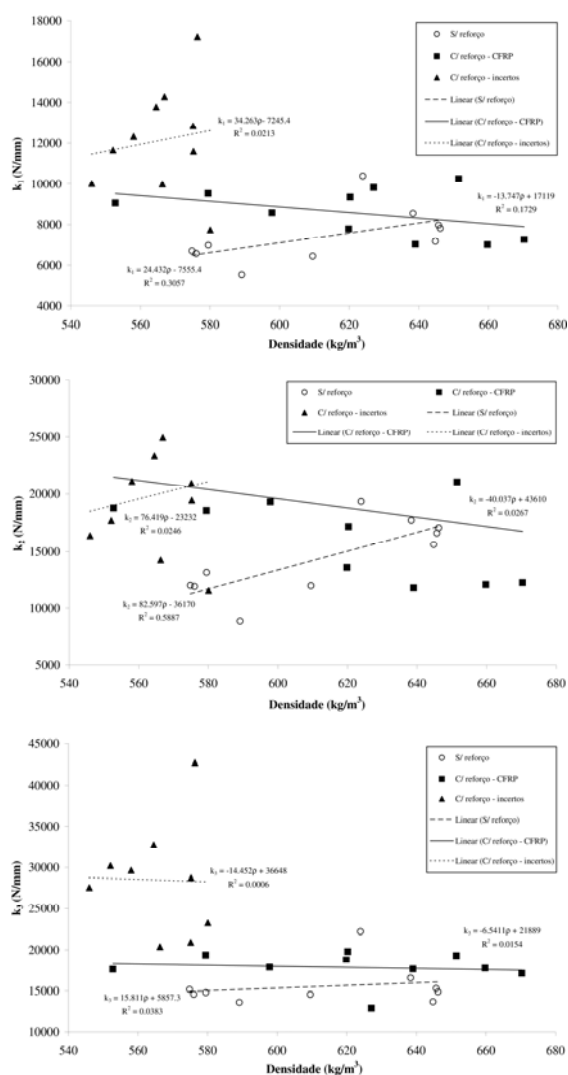


Fig. 14 – Evolução dos coeficientes de rigidez com a massa volúmica para as três séries.

## 4- CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma comparação entre duas soluções de reforço para ligações do tipo cavilha em peças de madeira. As soluções de reforço consistiram na aplicação de laminados de carbono (CFRP) e insertos metálicos. Os materiais de reforço foram aplicados usando resinas epóxi, que demonstraram ser eficientes. A comparação apresentada recorreu a um programa de ensaios de uma ligação em T em madeira de Pinho Marítimo. Da análise de resultados conclui-se:

i) o reforço com CFRP conduziu a ganhos muito significativos de carga de rotura (120%);

ii) o reforço com insertos metálicos conduziu a ganhos de carga de rotura de 40%, sendo ainda valores significativos;

iii) o reforço com CFRP apenas produziu ganhos marginais na rigidez global da ligação (16%:  $k_1$ );

iv) o reforço com insertos metálicos produziu ganhos na rigidez global da ligação muito significativos (64%:  $k_1$ );

v) o reforço com CFRP's aumentou muito significativamente a ductilidade da ligação, pois eliminou as roturas frágeis observadas na ligação sem reforço;

vi) o reforço com insertos metálicos não foi capaz de eliminar ou atenuar a existência de roturas frágeis na ligação, sendo esta uma desvantagem evidente deste tipo de reforço, quando comparado com o reforço com CFRP's.

Importa referir que ambos os reforços têm custos de aquisição/aplicação que podem ser importantes, devendo este factor também ser tido em conta aquando da selecção da solução de reforço. Ambos os reforços requerem uma maquinação prévia das peças de madeira. O custo do CFRP é significativamente superior ao custo do aço para os insertos.

## 5- REFERÊNCIAS

- ASTM D3039: ASTM Standards. Annual Book of, Vol 15.03, ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, 13 p. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- Camanho, P.P., Tavares, C.M.L, Oliveira, R., Marques, A.T. e Ferreira, A.J.M. 2005. Increasing the efficiency of composite single-shear lap joints using bonded inserts, *Composites Part B – Engineering*, (36), p. 372-83.
- Camanho, P.P. e Lambert, M. 2006. A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials, *Composites Science and Technology*, (66)15, p. 3004-3020.
- Campilho, R.D.S.G. 2009. Repair of composite and wood structures, Tese de Doutorado, FEUP.
- Claisse, P.A. e Davis, T.J. 1998. High performance jointing systems for timber, *Construction and Building Materials*, (12), p. 415-25.
- Custódio, J., Broughton, J. e Cruz, H. 2009. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints, *International Journal of Adhesion &Adhesives*, (29), p. 173-185.
- Davis, T.J. e Claisse, P.A. 2001. Resin-injected dowel joints in glulam and structural timber composites, *Construction and Building Matererials*, (15), p. 157-67.
- EN26891: European Standard. 1993. Timber structures. Test methods. Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners,
- Garrido, N. 2004. Identificação do comportamento ao corte da madeira, através do ensaio de tracção Fora dos Eixos de Simetria Material, Tese de Mestrado, UTAD.
- Haller, P., Birk,T., Offermann, P. e Cebulla, H. 2006. Fully fashioned biaxial weft knitted and stitch bonded textile reinforcements for wood connections, *Composites-Part B*, (37), p. 278-285.
- Itany, R.Y. e Faherty, K.F. 1984. Structural wood research, state-of-the-art and research needs, ASCE, New York.
- Larsen, H.J. e Jensen, J.L. 2000. Influence of semi-rigidity of joints on the behaviour of timber structures, *Progress in Structural Engineering and Materials*, (2), p. 267-277.
- Oliveira, M. 2003. Caracterização do comportamento ao corte da madeira usando o ensaio de Arcan, Tese de Mestrado, UTAD.
- Pereira, J. 2003. Comportamento mecânico da madeira em tracção nas direcções de simetria material, Tese de Mestrado, UTAD.
- Queirós, E.R.M.A. 2009. Comportamento de ligações do tipo cavilha reforçadas com CFRP em estruturas de madeira, 134 p., Tese de Mestrado, UTAD.
- Rodd, P.D. e Leijten, A.J.M. 2003. High-performance dowel-type joints for timber structures, *Progress in Structural Engineering and Materials*, (5), p. 77-99.
- Santos, C.L., Jesus, A.M.P., Morais, J.J.L. e Santos, N.J.P. 2009. Development of a Strengthening Solution for Dowel-Type Connections Based on Glued Metallic Inserts, *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2010)*, Gramado, RS, Brazil.
- Xavier, J.C. 2003. Caracterização do comportamento ao corte de madeira usando o ensaio de Iosipescu, Tese de Mestrado, UTAD.