

## Viabilidade do fabrico de estruturas de madeira lamelada colada com pinho bravo tratado

### **Florindo Gaspar**

PhD, Dep. Engenharia Civil  
Instituto Politécnico de Leiria  
[fgaspar@estg.ipleiria.pt](mailto:fgaspar@estg.ipleiria.pt)



### **Augusto Gomes**

PhD, Dep. Eng. Civil e Arquitectura,  
Instituto Superior Técnico (Lisboa)  
[augusto@civil.ist.utl.pt](mailto:augusto@civil.ist.utl.pt)



### **Lina Nunes**

PhD, Dep. Estruturas,  
LNEC (Lisboa)  
[linanunes@lneec.pt](mailto:linanunes@lneec.pt)



### **Helena Cruz**

PhD, Dep. Estruturas,  
LNEC (Lisboa)  
[helenacruz@lneec.pt](mailto:helenacruz@lneec.pt)



**Palavras-chave** – Madeira lamelada colada, Pinho bravo, Produtos preservadores de azóis de cobre, Delaminação, Resistência ao corte

**Keywords** - Glued laminated timber, Maritime pine, Copper azole preservatives, Delamination, Shear strength

### **RESUMO**

Foi realizado um programa experimental tendo em vista avaliar o desempenho da madeira lamelada colada (glulam) de pinho bravo tratado com um produto preservador de azóis de cobre. A resistência das juntas coladas cumpriu os requisitos da norma EN 386 (2001) sem influência da pressão de aperto e da temperatura de cura. Segundo a mesma norma, a delaminação foi satisfatória para as temperaturas de cura mais elevadas aplicadas com uma pressão de aperto de 0,6 N/mm<sup>2</sup>. As ligações de entalhes múltiplos fabricadas com madeira tratada apresentaram resistência satisfatória à flexão. O tratamento preservador não influenciou o módulo de elasticidade das vigas. Segundo uma simulação de Monte Carlo realizada e de acordo com os requisitos da norma NP EN 1194 (2002), é possível fabricar madeira lamelada colada da classe GL 28c se for usada madeira de Pinho bravo classificada visualmente nas classes E e EE (NP 4305, 1995) nas lamelas interiores e extremas, respectivamente, e da classe GL 24h quando forem usadas ambas as classes em proporções iguais aleatoriamente distribuídas pelo elemento estrutural.

### **ABSTRACT**

A study was conducted to evaluate the performance of glued laminated timber (glulam) of maritime pine treated with a copper azole preservative product. Shear strength of glue lines met the requirements of EN 386 (2001) with no influence of clamping pressure and cure temperature. According to the same standard, delamination was satisfactory for higher cure temperatures applied with a clamping pressure of 0,6 N/mm<sup>2</sup>. Finger joints made with treated wood presented satisfactory bending strength. The preservative treatment did not influence the modulus of elasticity of the beams. According to a Monte Carlo simulation and following the requirements of EN 1194 (2002), glulam of class GL 28c can be manufactured if visually graded maritime pine of classes E and EE (NP 4305, 1995) is used in the inner and outer lamellas, respectively, and class GL 24h when using both grades in equal proportions randomly distributed through the glulam element.

## 1. Introdução

As espécies mais utilizadas no fabrico de madeira lamelada colada são, sobretudo, as Resinosas. Na Europa destaca-se a utilização de Espruce (*Picea abies*, H. Karsten) e Casquinha (*Pinus silvestris*, L.), madeiras abundantes e de utilização corrente em estruturas, fáceis de colar e capazes de garantir ligações coladas resistentes e duráveis. No entanto, a durabilidade destas espécies, embora geralmente adequada para ambientes secos (interiores), poderá ser insuficiente para certo tipo de aplicações correspondentes às classes de risco 3 e 4 definidas na norma EN 335-2 (2006), quando estejam por exemplo expostas às intempéries ou em contacto com o solo (Gaspar, 2006).

A utilização de espécies Folhosas reduz substancialmente a susceptibilidade da madeira mas introduz dificuldades tecnológicas adicionais na colagem (Selbo, 1975; Becker e Ressel, 2004).

O fabrico a partir de madeira tratada em profundidade com produtos preservadores é uma hipótese a considerar, mas só viável no caso de espécies susceptíveis de tratamento, o que limita a utilização de Espruce. Para este fim, o Pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait) nacional poderá constituir uma alternativa interessante, dado ser uma espécie que apresenta características físicas e mecânicas adequadas para utilizações estruturais e que pode ser tratada em profundidade. Recomenda-se nestes casos o tratamento das lamelas com produtos preservadores aquosos antes da colagem, procurando-se hoje em dia alternativas ao tradicional CCA recentemente restringido a nível europeu (Lebow, 2004). Actualmente são muito usados os compostos de cobre juntamente com amónio quaternário (ACQ) e os azóis de cobre (CA).

Por outro lado, é reconhecido que o desempenho das juntas coladas realizadas com madeira tratada, no que diz respeito à delaminação, é inferior ao da madeira não tratada. Segundo (Lorenz e Frihart, 2006) muitas razões podem explicar as diferenças na adesão da madeira tratada, tais como: interferência química do produto preservador com a cura da cola, redução da molhabilidade da madeira e bloqueio físico da superfície onde a cola adere à madeira.

Apesar dos problemas existentes na colagem de madeira tratada, alguns estudos relataram experiências bem sucedidas usando procedimentos similares aos da colagem de madeira não tratada (Podgorski e Legrand, 2006). O melhoramento da qualidade da colagem da madeira tratada foi estudado por vários autores através da modificação dos materiais usados, nomeadamente pela reformulação da cola (Sellers e Miller, 1997) ou usando um primário (*hydroxymethylated resorcinol* - HMR) (Vick, 1995), ou mudando o procedimento de colagem, nomeadamente pelo aumento do tempo de aperto ou da temperatura de cura (Selbo, 1959).

Tendo em vista identificar um processo adequado para fabricar estruturas de madeira lamelada colada com Pinho bravo tratado em profundidade foi desenvolvido um trabalho experimental para avaliar a qualidade da colagem e obter uma primeira aproximação da resistência mecânica do material fabricado.

## 2. Trabalho experimental

### 2.1. Materiais e métodos

O trabalho experimental desenvolvido teve como objectivo principal o estudo do efeito da temperatura de cura, da pressão de aperto e da retenção de produto preservador no desempenho da colagem das faces das lamelas. Foi também realizada uma campanha experimental visando avaliar a resistência das ligações de entalhes múltiplos (*finger joint*) executadas com madeira de Pinho bravo tratada.

Neste trabalho utilizaram-se tábuas de madeira tratadas com Tanalith E3497, um produto preservador de azóis de cobre para produzir vigas de madeira lamelada colada. A madeira foi tratada numa autoclave, usando vácuo inicial, seguido da aplicação de pressão e finalizando com a aplicação de novo vácuo, com duas retenções alvo adequadas às classes de risco 3 e 4 segundo o documento de homologação DH 723 (2003). A madeira assim tratada foi inicialmente seca ao ar (para fixação do produto preservador) e depois seca em estufa até cerca de 14% de teor de água. Todas as tábuas foram depois condicionadas no ambiente de referência (20°C e 65% de humidade relativa) até atingirem massa constante.

O controlo da retenção de produto preservador foi realizado através de espectroscopia de absorção atómica, segundo a norma AWPA A11-93 (1998). As retenções médias (de 3 provetes) de produto determinadas foram de  $7,6 \text{ kg/m}^3$  e  $19,1 \text{ kg/m}^3$  para a retenção mais baixa e mais alta, respectivamente, seguidamente designadas por níveis L e H. O trabalho experimental incluiu também madeira não tratada da mesma espécie, para controlo, adiante designada pela letra Z. A massa volúmica média determinada foi igual a  $600 \text{ kg/m}^3$  para a madeira não tratada, enquanto que para a madeira tratada foi de  $630 \text{ kg/m}^3$  (para ambos os níveis de retenção).

As vigas de madeira lamelada colada foram produzidas em duas fases. Na primeira fase, o fabrico foi realizado em ambiente industrial à temperatura ambiente ( $18^\circ\text{C}$  em média) e aplicando três pressões de aperto durante 24 h enquanto que a segunda fase foi conduzida em laboratório usando uma única pressão de aperto e três temperatura de cura ( $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  e  $45^\circ\text{C}$ ) durante 24 h.

Em ambas as fases foram usados os três níveis de tratamento preservador mencionados anteriormente e foi aplicada uma cola de fenol-resorcinol-formol (PRF) correntemente usada no fabrico industrial de madeira lamelada colada na colagem das faces das lamelas.

Nas ligações de entalhes múltiplos foi usada uma cola de melamina-ureia-formol (MUF).

#### Colagem à temperatura ambiente

Foram produzidas em ambiente fabril vigas e ligações de entalhes múltiplos para posterior ensaio. Na colagem das faces, baixas pressões de aperto, à volta de  $0,7 \text{ N/mm}^2$ , são geralmente adequadas para madeira de baixa densidade, enquanto que altas pressões de aperto até  $1,7 \text{ N/mm}^2$ , podem ser necessárias para madeiras mais densas (Vick, 1999). Os fabricantes de colas indicam usualmente uma gama recomendada de pressões de aperto. Dado que o Pinho bravo é uma espécie que tem maior massa volúmica do que a maioria das espécies utilizadas no fabrico de madeira lamelada colada, deveria, segundo o exposto anteriormente, ser usada com uma pressão de aperto mais elevada.

De modo a encontrar uma pressão de aperto adequada à colagem das faces das lamelas, esta variável foi considerada usando três valores diferentes ( $0,6 \text{ N/mm}^2$ ,  $0,9 \text{ N/mm}^2$  e  $1,12 \text{ N/mm}^2$ ). No total foram fabricadas 27 vigas, cada uma com 2,90 m de comprimento, 0,15 m de altura e 0,08 m de largura e com cinco lamelas de 0,03 m de espessura obtidas pela junção das tábuas através de ligações de entalhes múltiplos. Para cada combinação de nível de retenção de produto preservador (Z, L e H) e pressão de aperto foram obtidas 3 vigas. As ligações de entalhes múltiplos ficaram localizadas no terço central das duas lamelas extremas (zona traccionada) de todas as vigas, excepto para duas vigas de cada nível de retenção Z e L e para uma viga do nível H. As ligações de entalhes múltiplos foram produzidas com a geometria correntemente usada pelo fabricante, com 20 mm de comprimento, 6,2 mm de passo e 1 mm para a espessura do dente.

#### Avaliação da resistência das vigas

A colagem à temperatura ambiente foi realizada para avaliar também a resistência à flexão das vigas produzidas. Antes da colagem, 73 tábuas de cada nível de retenção, com dimensões médias iguais a 1,85 m de comprimento, 0,035 m de espessura e 0,10 m de largura, foram classificadas segundo a resistência, pela medição do módulo de elasticidade de todas as secções espaçadas de 0,15 m, num ensaio de flexão realizado com um vão de 0,90 m, aplicando uma carga pontual a meio vão. Nas extremidades das peças, que não podem ser classificadas mecanicamente, foi verificado o cumprimento dos requisitos das normas EN 14081-1 (2005) e EN 385 (2001). Este procedimento permitiu ordenar as tábuas segundo a sua resistência, posicionando as mais resistentes nas lamelas extremas de modo a fabricar um tipo de madeira lamelada combinada. As tábuas foram também classificadas visualmente segundo a norma NP 4305 (1995) numa das duas classes definidas nesta norma – E e EE – que correspondem aproximadamente às classes de resistência C18 e C35 (EN 338, 2003), respectivamente. As peças que não cumpriram os requisitos da classe E foram rejeitadas.

#### Colagem a temperaturas mais elevadas

Na colagem a temperaturas mais elevadas, 12 vigas de 4 lamelas foram produzidas em laboratório com 1 m de comprimento, 0,12 m de altura e 0,08 m de largura, uma de cada combinação (nível de retenção de produto preservador e temperatura de cura). A pressão de aperto usada foi de  $0,6 \text{ N/mm}^2$ , que corresponde à pressão mais baixa utilizada em fábrica e cuja

adequação fora confirmada pelos resultados dos ensaios de delaminação do material produzido à temperatura ambiente, conforme se descreve adiante.

## 2.2. Ensaio e resultados

### 2.2.1. Ensaio de corte

Os ensaios de corte foram realizados segundo a norma EN 392 (1995). A resistência ao corte das lamelas foi também medida e comparada com a resistência ao corte das juntas coladas.

#### Cura à temperatura ambiente

A resistência ao corte das juntas coladas cumpriu os requisitos da norma EN 386 (2001), quer para a resistência, quer para a percentagem de rotura pela madeira (Fig. 1). Adicionalmente, a resistência individual obtida foi consideravelmente elevada (maior do que 10 N/mm<sup>2</sup> em todos os casos). No Quadro 1 apresentam-se os valores médios e o desvio padrão da resistência da junta colada. Os valores médios são similares para diferentes pressões de aperto para cada nível de retenção do produto preservador, o que é confirmado pelo teste ANOVA. Em resultado da mesma análise de variância, é significativo afirmar (a 5%) que o valor médio da resistência da junta colada foi afectado pelo nível de retenção de produto preservador. Segundo o teste de comparações múltiplas HSD-Tukey estas diferenças são significativas entre provetes com e sem tratamento preservador, mas não são significativas entre os níveis de tratamento L e H.

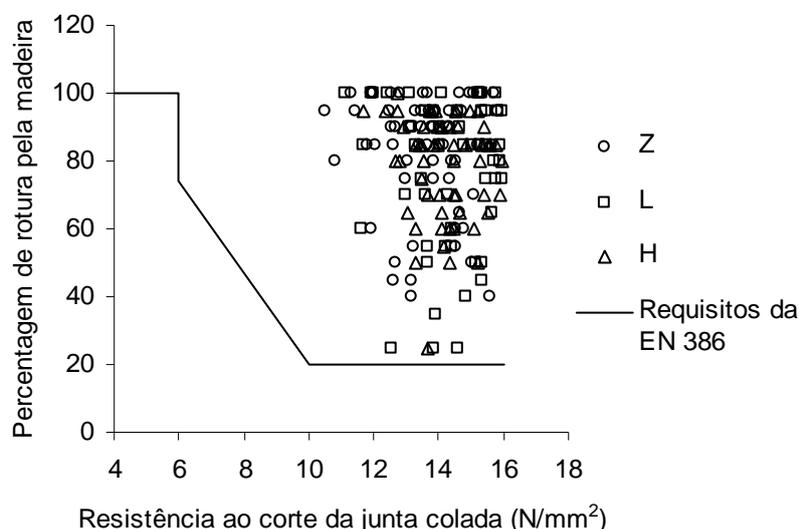


Figura 1 – Resultados dos ensaios de corte – cura à temperatura ambiente

Nível de retenção de produto preservador	Pressão de aperto (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência ao corte da junta colada (N/mm <sup>2</sup> )			Resistência ao corte da madeira (N/mm <sup>2</sup> )		
		Número de provetes	Média	Desvio padrão	Número de provetes	Média	Desvio padrão
Z	1,12	21	14,2	1,1	53	12,6	1,6
	0,9	24	13,3	1,5			
	0,6	23	13,6	0,9			
L	1,12	24	14,4	1,2	50	13,9	1,6
	0,9	23	14,4	1,2			
	0,6	19	14,1	1,5			
H	1,12	21	14,4	1,0	63	13,4	1,3
	0,9	24	14,2	0,9			
	0,6	24	14,1	0,9			

Quadro 1 – Resultados dos ensaios de corte pela madeira e pela junta colada – cura à temperatura ambiente

#### Cura a temperaturas mais elevadas

A influência da temperatura de cura na resistência da junta colada não é clara (Fig. 2). Para a madeira não tratada, a resistência das juntas coladas parece essencialmente replicar a resistência da madeira. Contudo, para a madeira tratada tal não se verifica, porque outros factores,

nomeadamente a composição química e a estrutura física das juntas coladas, desempenham um papel importante na resistência das juntas coladas.

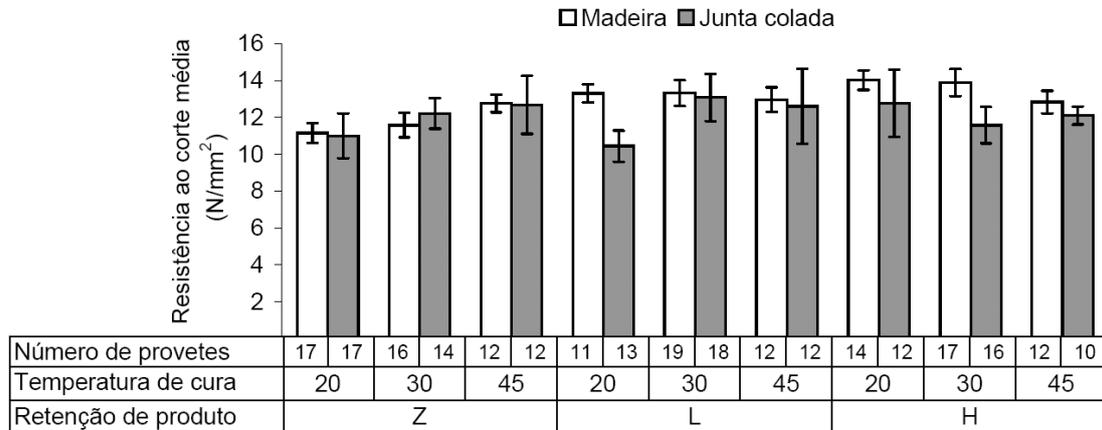


Figura 2 – Resistência ao corte média da madeira e das juntas coladas – cura a temperaturas mais elevadas

Pode-se observar que a resistência das juntas coladas é sempre mais baixa do que a resistência da madeira envolvida, levantando a possibilidade de uma mais baixa qualidade das juntas coladas em madeira tratada relativamente às juntas de madeira não tratada.

### 2.2.2. Ensaios de delaminação

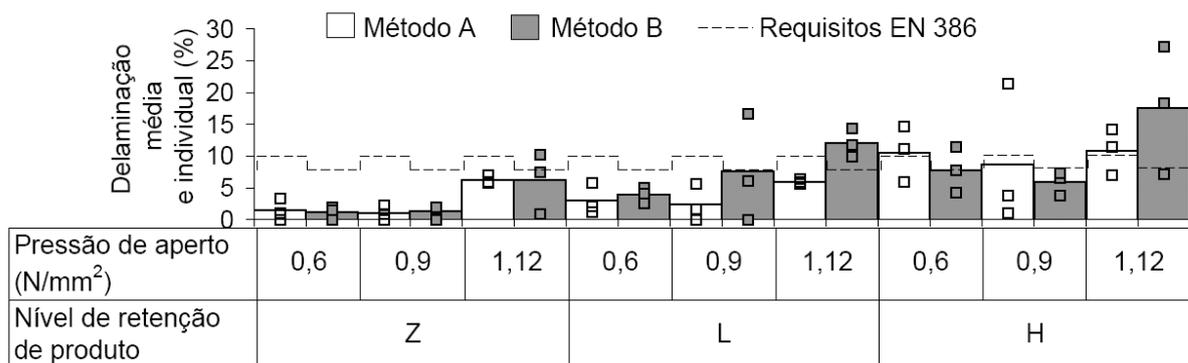


Figura 3 – Resultados dos ensaios de delaminação – cura à temperatura ambiente

Os ensaios de delaminação foram realizados de acordo com a norma EN 391 (2001), seguindo os métodos A e B. Na Fig. 3 apresentam-se os valores da delaminação individual e média obtidos para cada pressão de aperto e nível de retenção de produto preservador (primeira fase de produção). A tendência global indica que a pressão de aperto mais elevada (1,12 N/mm<sup>2</sup>) e a maior retenção de produto preservador forneceram os maiores valores de delaminação, indicando que o uso de pressões de aperto elevadas não é favorável e que a delaminação aumenta com a retenção de produto preservador, tendo alguns provetes falhado os requisitos da norma EN 386 (2001). De facto, à excepção do nível de retenção de produto preservador mais elevado, a pressão de aperto mais baixa (0,6 N/mm<sup>2</sup>) foi a única que cumpriu os requisitos de delaminação para ambos os métodos A e B.

A influência da temperatura de cura na delaminação foi estudada na segunda fase de ensaios (Fig. 4). Os valores da delaminação obtidos são todos inferiores aos obtidos com a cura realizada à temperatura ambiente, cumprindo os requisitos da norma EN 386 (2001). Segundo a análise de variância (ANOVA) realizada, é significativo afirmar (a 5%) que os valores médios da delaminação (para ambos os métodos) foram afectados pelo nível de retenção de produto preservador e pela temperatura de cura. A delaminação média de ambos os métodos decresce para as maiores temperaturas de cura e, tal como aconteceu para a cura à temperatura ambiente, aumenta para os maiores níveis de retenção de produto preservador, tal como se mostra no Quadro 2. Este

facto indica que o aumento da temperatura de cura é um meio possível para obter desempenho satisfatório das juntas coladas em madeira tratada.

Comparando os resultados obtidos em ambas as fases de produção, para a pressão de aperto igual a 0,6 MPa, verifica-se que existem significativas diferenças nos resultados dos ensaios de delaminação. Para o nível de tratamento H a delaminação média obtida para a cura a 20°C (2ª fase) foi de 2,8%, enquanto para a cura à temperatura ambiente (1ª fase) se obteve 9,2%. O mesmo acontece para os níveis de tratamento Z e L, embora com diferenças menores. Uma primeira razão para estas diferenças poderá ser a temperatura de cura que em ambiente laboratorial foi possível manter nos 20°C durante as 24 horas de cura, ao passo que na fábrica a cura foi realizada à temperatura ambiente, em média igual a 18°C, partindo de 15°C e alcançando 24°C ao longo de algumas horas. As temperaturas mais baixas numa fase inicial da cura poderão desta forma ter afectado negativamente a qualidade da colagem. Uma segunda razão para o menor desempenho das juntas coladas realizadas em ambiente fabril poderá ter sido o processo de aplicação da cola que na fábrica foi realizada, como habitualmente, por um processo de extrusão enquanto que em laboratório se fez a aplicação manualmente usando uma espátula o que poderá ter melhorado a qualidade da colagem.

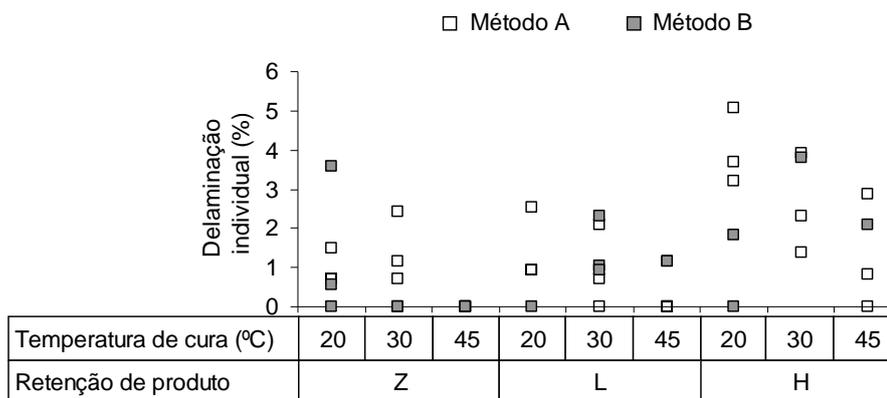


Figura 4 – Resultados dos ensaios de delaminação – cura a temperaturas mais elevadas

	Nível de retenção de produto preservador*			Temperatura de cura (°C)**		
	Z	L	H	20	30	45
Número de provetes	14	15	13	15	16	14
Delaminação média (%)	0,66	0,91	2,38	1,68	1,42	0,57

\* - Todas as temperaturas de cura

\*\* - Todos os níveis de retenção

Quadro 2 – Valores da delaminação média para cada nível de retenção de produto preservador e temperatura de cura

### 2.2.3. Ensaio de flexão de ligações de entalhes múltiplos

Os ensaios de flexão das ligações de entalhes múltiplos foram realizados segundo a norma (EN 408, 2003), em ensaio simétrico de 4 pontos com vão igual a 18 vezes a espessura (0,03 m neste caso), com cargas aplicadas nos terços do vão. Este ensaio foi realizado após 7 dias de cura à temperatura ambiente. Os resultados dos ensaios realizados em provetes de madeira tratada (H) e de madeira não tratada (Z) apresentam-se no Quadro 3.

	Nível de retenção de produto preservador	
	Z	H
Número de provetes	15	30
Média	54,3	49,4
Desvio padrão	8,4	8,0
Valor característico <sup>a</sup>	-	37,8

<sup>a</sup> – Determinado pela função de probabilidades log-normal

Quadro 3 – Resultados dos ensaios à flexão das ligações de entalhes múltiplos, em N/mm<sup>2</sup>

A resistência à flexão média decresce com a retenção de produto preservador. No entanto, o valor característico da madeira tratada (37,8 N/mm<sup>2</sup>) situa-se acima do mínimo indicado pela norma NP EN 1194 (2002). Segundo esta norma, o valor característico da resistência à flexão das ligações de entalhes múltiplos deverá ser igual ou superior a 37,4 N/mm<sup>2</sup> quando a classe de resistência da madeira é C35, que corresponde à classe EE do Pinho bravo (NP 4305, 1995). Deste modo, pode concluir-se que é viável a realização de ligações de entalhes múltiplos com madeira tratada de Pinho bravo com resistência adequada.

## 2.2.4. Ensaio de flexão de vigas de madeira lamelada colada

Os ensaios de flexão das vigas (primeira fase de produção) foram conduzidos segundo a norma EN 408 (2003) com um vão de 2,7 m e com carregamento nos terços do vão, medindo-se a resistência à flexão e o módulo de elasticidade global.

A pressão de aperto não teve um efeito claro nos resultados (Fig. 5). A resistência à flexão foi em grande medida influenciada pelo local onde se iniciou a rotura. Os maiores valores observados estão relacionados com roturas iniciadas em ligações de entalhes múltiplos localizadas fora do terço central das vigas, ao contrário dos restantes casos. O Quadro 4 mostra os resultados correspondentes a roturas iniciadas no terço central das vigas.

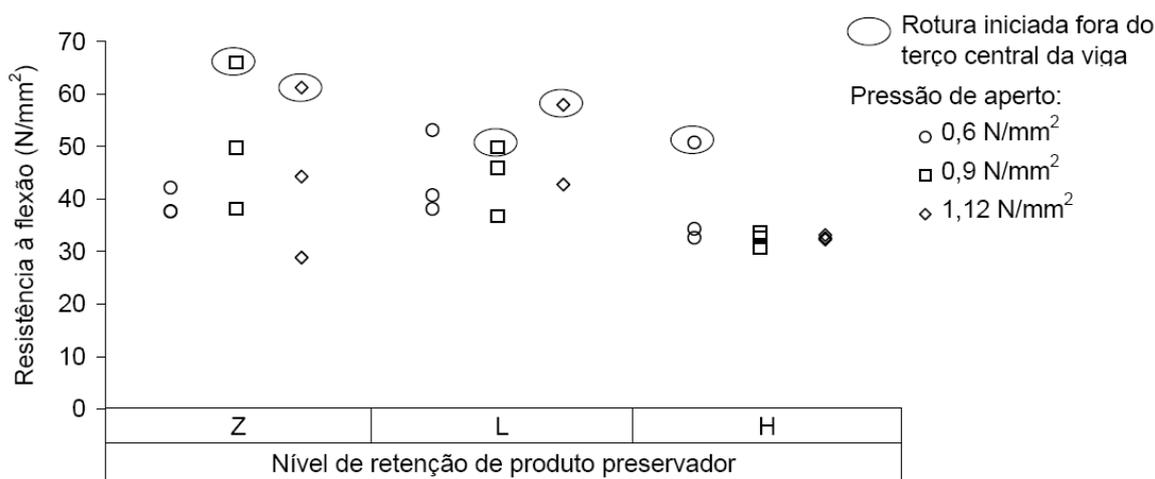


Figura 5 – Resistência à flexão das vigas. Valores corrigidos pelo factor  $k_{size}$ , segundo a norma NP EN 1194 (2002)

O módulo de elasticidade global obtido é similar para os três níveis de retenção de produto preservador, sugerindo que o tratamento não afectou esta propriedade. A mesma evidência foi verificada no módulo de elasticidade das tábuas (Quadros 5 e 6). Para a resistência à flexão, o número de vigas não é

estatisticamente significativo e não permite atribuir uma classe de resistência às vigas fabricadas. No entanto, os valores médios e o desvio padrão da resistência à flexão são aceitáveis e são confrontados com a análise estatística que se faz seguidamente.

## 2.2.5. Análise estatística da resistência à flexão das vigas

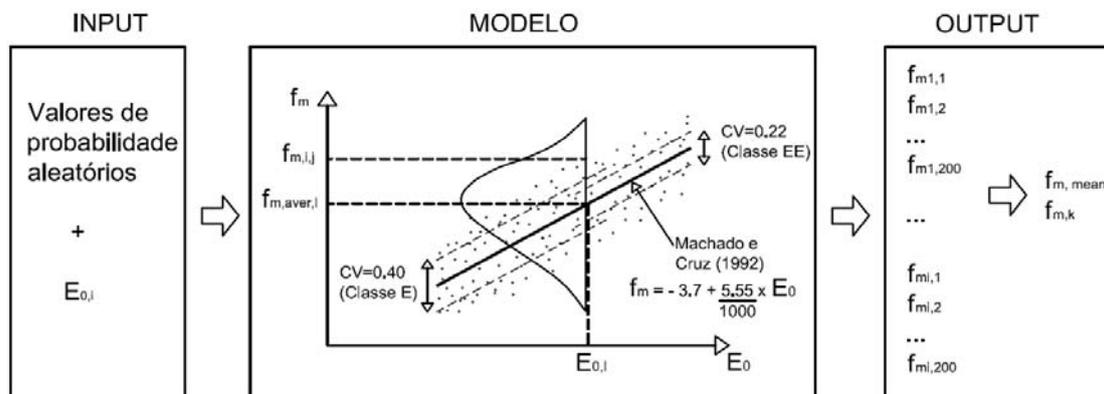
De forma a avaliar a conformidade das vigas de madeira lamelada colada com a norma NP EN 1194 (2002), foi realizada uma primeira simulação de Monte Carlo para estimar a resistência das tábuas usadas nas lamelas extremas das vigas. Esta simulação foi realizada de acordo com o esquema ilustrado na Fig. 6. O módulo de elasticidade mínimo de cada tábua aplicada nas quatro lamelas extremas foi usado para estimar a sua resistência à flexão através da recta de regressão obtida por Machado e Cruz (1992). Cada valor de resistência à flexão foi usado com os coeficientes de variação de cada classe de qualidade da madeira de Pinho bravo, que são, segundo Machado et al. (1998), 40% e 22% para as classes E e EE, respectivamente, para gerar uma distribuição normal de probabilidades obtida com 200 valores de probabilidade aleatórios para cada tábua. O valor característico da resistência à flexão para cada nível de retenção foi obtido aplicando o método não paramétrico a esta distribuição, tal como indicado na norma

		Nível de retenção de produto preservador		
		Z	L	H
Número de vigas		7	7	8
Resistência à flexão	Média <sup>a</sup>	39,6	42,7	32,6
	Desvio padrão	6,5	6,0	1,0
Módulo de elasticidade global	Média	15100	15300	15100
	Desvio padrão	500	500	900

<sup>a</sup> – Os valores individuais foram corrigidos pelo factor  $k_{size}$ , segundo a NP EN 1194 (2002)

Quadro 4 – Resultados dos ensaios à flexão das vigas em  $N/mm^2$

EN 384 (2008) e os valores característicos da resistência à tracção foram considerados iguais a 60% da resistência à flexão, seguindo a mesma norma. O Quadro 5 resume os resultados obtidos.



$E_{0,i}$  - módulo de elasticidade mínimo da tábuia i  
 $f_m$  - resistência à flexão  
 $f_{m,mean}$  - resistência à flexão média  
 $f_{m,k}$  - valor característico da resistência à flexão  
 CV - coeficiente de variação  
 $f_{m,i,j}$  - resistência à flexão da tábuia i e para o valor de probabilidade aleatório j  
 $f_{m,aver,i}$  - resistência média à flexão da tábuia i

Figura 6 – Esquema da simulação de Monte Carlo usada para estimar a resistência das lamelas

	Nível de retenção de produto preservador			
	Z	L	H	
Propriedades mecânicas das tábuas usadas nas quatro lamelas extremas				
Número de tábuas	58 <sup>d</sup>	61 <sup>e</sup>	59 <sup>f</sup>	
Resistência à flexão estimada	Média (N/mm <sup>2</sup> )	74,8	75,6	74,7
	Coeficiente de variação (%)	32,3	37,3	34,5
	Valor característico (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	36,1	31,4	33,1
Valor característico da resistência à tracção estimada (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>b</sup>	21,7	18,8	19,9	
Módulo de elasticidade médio medido (N/mm <sup>2</sup> )	14100	13900	13900	
Propriedades mecânicas estimadas para a madeira lamelada colada <sup>c</sup>				
Valor característico da resistência à flexão (N/mm <sup>2</sup> )	32,0	28,6	29,9	
Módulo de elasticidade médio (N/mm <sup>2</sup> )	14800	14600	14600	
Valor característico do módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )	12000	11900	11900	
<sup>a</sup> – Pelo método não paramétrico				
<sup>b</sup> – Igual a 60% da resistência à flexão				
<sup>c</sup> – Segundo a norma NP EN 1194 (2002)				
<sup>d</sup> – 25 são da classe E e 33 são da classe EE				
<sup>e</sup> – 40 são da classe E e 21 são da classe EE				
<sup>f</sup> – 33 são da classe E e 26 são da classe EE				

Quadro 5 – Propriedades mecânicas da madeira considerando as tábuas usadas nas quatro lamelas extremas (glulam combinado)

As equações indicadas na norma NP EN 1194 (2002), para estimar a resistência à flexão e o módulo de elasticidade das vigas a partir das propriedades das lamelas, foram depois aplicadas usando o valor característico estimado para a resistência à tracção e o módulo de elasticidade médio medido para cada tábuia (Quadro 5), indicando que as vigas podem ser classificadas na classe de resistência GL 28c. Apesar do pequeno número de resultados experimentais, a resistência à flexão e o módulo de elasticidade das vigas ensaiadas (Quadro 4) é consistente com esta classe de resistência.

Outra simulação de Monte Carlo foi realizada com o módulo de elasticidade medido em todas as tábuas aplicadas no fabrico das vigas para simular uma localização aleatória das tábuas nas vigas de madeira lamelada colada de modo a reproduzir um tipo de glulam homogéneo. O Quadro 6

apresenta os resultados para cada nível de retenção. Neste caso, a resistência estimada cumpre os requisitos da classe GL 24h. Deste modo, quando forem usadas as classes E e EE em proporções iguais aleatoriamente distribuídas no elemento estrutural, a classe de resistência estimada é a GL 24h.

		Nível de retenção de produto preservador		
		Z	L	H
Propriedades mecânicas de todas as tábuas usadas nas lamelas				
Número de tábuas		73 <sup>d</sup>	73 <sup>e</sup>	73 <sup>f</sup>
Resistência à flexão estimada	Média (N/mm <sup>2</sup> )	72,1	71,4	70,9
	Coefficiente de variação (%)	35,0	40,4	46,9
	Valor característico (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	29,6	27,1	31,5
Valor característico da resistência à tracção estimada (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>b</sup>		17,8	16,3	18,9
Módulo de elasticidade médio medido (N/mm <sup>2</sup> )		13200	13100	13300
Propriedades mecânicas estimadas para a madeira lamelada colada <sup>c</sup>				
Valor característico da resistência à flexão (N/mm <sup>2</sup> )		27,5	25,7	28,7
Módulo de elasticidade médio (N/mm <sup>2</sup> )		13900	13700	13900
Valor característico do módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )		11200	11100	11300
<sup>a</sup> – Pelo método não paramétrico				
<sup>b</sup> – Igual a 60% da resistência à flexão				
<sup>c</sup> – Segundo a norma NP EN 1194 (2002)				
<sup>d</sup> – 37 são da classe E e 36 são da classe EE				
<sup>e</sup> – 47 são da classe E e 26 são da classe EE				
<sup>f</sup> – 41 são da classe E e 32 são da classe EE				

Quadro 6 – Propriedades mecânicas da madeira considerando todas as tábuas usadas nas lamelas (*glulam homogéneo*)

### 3. Conclusões

O uso da maioria das espécies Resinosas nas classes de risco 3 e 4 (EN 335-2, 2006), em elementos de madeira maciça ou lamelados colados, requer o tratamento preservador em profundidade antes da colagem que é o meio mais efectivo para obter adequada protecção, mas alguns problemas deverão ser resolvidos para obter qualidade da colagem aceitável. Tempos e temperaturas de cura mais altos, a modificação das colas ou a aplicação de primários têm sido usados para obter juntas coladas de qualidade satisfatória.

A resistência ao corte das juntas coladas de madeira de Pinho bravo não é afectada de forma consistente pelo tratamento preservador, cumprindo os requisitos da norma EN 386 (2001) sem influência clara da pressão de aperto e da temperatura de cura.

Contudo, a delaminação aumenta com o aumento da retenção de produto preservador e da pressão de aperto, diminuindo com o aumento da temperatura de cura, demonstrando que o aumento da temperatura de cura é uma via possível para obter adequada qualidade de colagem em madeira de Pinho bravo tratada com produto preservador à base de azóis de cobre. Por outro lado, o efeito negativo do tratamento preservador na delaminação indica que deverá aplicar-se sempre a menor retenção necessária para evitar ataque biológico em serviço, evitando sempre que possível o contacto com o solo e empregando detalhes construtivos que minimizem o acesso da água às juntas coladas.

Quanto aos resultados obtidos nos ensaios sobre ligações de entalhes múltiplos, verifica-se que é possível obter resistência adequada com ligações fabricadas com madeira de Pinho bravo tratada.

As vigas ensaiadas apresentaram resistência à flexão satisfatória, consistente com uma classe de resistência estimada GL 28c (NP EN 1194, 2002) e sem influência da pressão de aperto. O tratamento preservador não influenciou o módulo de elasticidade das vigas. Segundo a simulação de Monte Carlo realizada e seguindo a NP EN 1194 (2002), a madeira de Pinho bravo tratada pode ser usada no fabrico de madeira lamelada colada da classe GL 28c se for usado material das classes E e EE nas lamelas interiores e exteriores, respectivamente, ou da classe GL 24h se

aquelas classes forem usadas em proporções iguais distribuídas aleatoriamente pelo elemento estrutural.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, pela bolsa de doutoramento (referência SFRH/BD/30310/2006) atribuída a Florindo Gaspar, e à Arch Timber Protection Ltd pelo apoio concedido.

## Referências Bibliográficas

- AWPA A11-93 (1998). Standard method for analysis of treated wood and treating solutions by atomic absorption spectroscopy. American Wood-Preservers' Association Book of Standards, American Wood-Preservers' Association A11-93: 4.
- Becker, P. e J. B. Ressel (2004). High quality beech Glulam. 8<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering, Lahti.
- DH 723 (2003). TANALITH E 3497: Características e condições de emprego, LNEC, Lisboa.
- EN 338 (2003). Structural timber - Strength classes, European Committee for Standardization: 10.
- EN 384 (2008). Timber structures - Determination of characteristic values of mechanical properties and density, European Committee for Standardization: 18.
- EN 385 (2001). Finger jointed structural timber - Performance requirements and minimum production requirements, European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 386 (2001). Glued laminated timber - Performance requirements and minimum production requirements. European Committee for Standardization: 15.
- EN 391 (2001). Glued laminated timber. Delamination test of glue lines. European Committee for Standardization, European Committee for Standardization: 9.
- EN 392 (1995). Glued laminated timber. Shear test of glue lines, European Committee for Standardization: 12.
- EN 408 (2003). Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties, European Committee for Standardization.
- EN 14081-1 (2005) Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- Gaspar, F. (2006). Estruturas de madeira lamelada-colada – Viabilidade da utilização da madeira de pinho bravo tratada com produto preservador, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa, p. 359.
- Lebow, S. (2004). Alternatives to chromated copper arsenate (CCA) for residential construction. Environmental Impacts of Preservative-Treated Wood Conference, Orlando, Florida.
- Lorenz, L. F. e C. Frihart (2006). "Adhesive bonding of wood treated with ACQ and copper azole preservatives." Forest Products Journal 56(9): 90-93.
- Machado, J. S. e H. Cruz (1992). Madeira de Pinheiro bravo. Determinação dos valores característicos da tensão resistente à flexão. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 39/92 – NM. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Machado, J. S., R. Sardinha e H. Cruz (1998). Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds. 5<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes Lausanne, vol 2, pp 304-311.
- NP 4305 (1995). Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 1194 (2002). Estruturas de madeira. Madeira lamelada-colada. Classes de resistência e determinação dos valores característicos, Instituto Português da Qualidade.
- Podgorski, L. e G. Legrand (2006). The International Research Group on Wood Protection, paper prepared for the 37<sup>th</sup> Annual Meeting, document n° IRG/WP 06-40342, Stockholm.
- Selbo, M. L. (1959). Summary of information on gluing of treated wood. Report number 1785 (information reviewed and reaffirmed 1965), Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- Selbo, M. L. (1975). Adhesive bonding of wood. Washington, U.S. Department of Agriculture.
- Sellers, T. e G. D. Miller (1997). "Evaluations of three adhesive systems for CCA-treated lumber." Forest Prod J 47(10): 73-76.
- Vick, C. B. (1995). "Coupling agent improves durability of PRF bonds to CCA-treated southern pine." Forest Prod J 45(3): 78-84.
- Vick, C. B. (1999). Adhesive Bonding of Wood Materials. In: Wood handbook - wood as a engineering material, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI, Forest Products Laboratory. 463 p.