

15º Congresso Brasileiro de Polímeros
27 a 31 de outubro de 2019

REFORÇO DE EMENDAS DENTEADAS COM FIBRAS DE VIDRO EM MADEIRA LAMELADA COLADA

Antonio A. Dias^{1*} e Pedro G. A. Segundinho²

1 – Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP dias@sc.usp.br

2 - Departamento Ciências Florestas e da Madeira (DCFM), Centro de Ciências Agrárias e Engenharia (CCAÉ), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre, ES

Resumo: A falha predominante nas vigas de madeira lamelada colada (MLC) ocorre na região tracionada, iniciando nas emendas denteadas, principalmente no caso de madeiras com maior densidade, quem têm alta resistência à tração. Neste trabalho foi avaliada experimentalmente a influência de reforço com resina poliuretana e fibras de vidro (GFRP) na resistência de vigas de MLC de *Eucalyptus spp* de alta densidade. Foram realizados os seguintes testes de tração em lamelas: sem emendas, emendas sem reforço, emendas com reforço de GRFP. Posteriormente, foram testadas 6 vigas de MLC (metade sem reforço) em ensaios de flexão estática; os reforços foram posicionados na interface entre a duas lamelas inferiores em todo o comprimento da viga, e na face inferior da viga. Os testes de tração indicaram um ganho de resistência à tração superior a 70%, e os testes de flexão indicaram um aumento de 108% na resistência à flexão, no caso de utilização do reforço de GFRP nas emendas.

Palavras-chave: emendas denteadas, reforço de emendas denteadas, madeira lamelada colada, reforço com fibra de vidro.

GLASS FIBERS REINFORCEMENT OF FINGER JOINTS IN GLUE-LAMINATED TIMBER BEAMS.

Abstract: The predominant failure in glue-laminated timber beams (GLULAM) occurs in the tensile position, starting in the finger joints, especially in the case of wood with higher density, which have high tensile strength. In this work, the influence of reinforcement with polyurethane resin and glass fibers (GFRP) on the strength of GLULAM beams made with high density *Eucalyptus spp* was evaluated experimentally. The following tensile tests were performed on lumber: without finger joints, no reinforced finger joints and finger joints with GRFP reinforcement. Subsequently, 6 GLULAM beams (half without reinforcement) were tested in static bending tests; the reinforcements were positioned at the interface between the bottom lumber and the next one over the length of the beam, and on the underside of the beam. The tensile tests indicated a tensile strength gain of more than 70%, and bending tests indicated a 108% increase in bending strength, in the case of using GFRP reinforcement in the finger joints.

Keywords: finger joints, finger joints reinforcement, glue-laminated timber, glass fiber reinforcement.

Introdução

Na fabricação de madeira lamelada colada (MLC), para se obter lamelas com o comprimento dos elementos estruturais, são utilizadas emendas denteadas coladas, que são os pontos frágeis desses elementos. No caso de vigas fletidas, geralmente a falha se inicia nas emendas denteadas situadas nas regiões mais solicitadas por tração[1-3], principalmente no caso de madeiras de maior densidade, para as quais a eficácia da colagem das emendas dentadas é menor.

Nesse contexto, foi realizada avaliação experimental para avaliar a influência de reforço com fibras de vidro na resistência das emendas denteadas por meio de ensaios de tração em lamelas e de ensaios de flexão em vigas, utilizando elementos em tamanho estrutural. O objetivo da proposta é avaliar o uso de reforço com fibras para aumentar a resistência à flexão de vigas de MLC.

Experimental

Madeira: peças de *Eucalyptus* spp, dimensões nominais da seção transversal 3,5 x 11 cm, densidade média do lote igual a 0,93 g/cm³ a 12% de umidade (umidade, densidade e correção da densidade para 12% de umidade foram determinadas de acordo com a norma ABNT: NBR 7190/97 [4], a partir de corpo de prova extraído de cada peça após o ensaio). As peças foram classificadas mecanicamente a partir do MOE (módulo de elasticidade) obtido em testes de flexão estática segundo o eixo de menor inércia da peça.

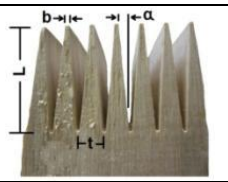
Adesivos: na colagem das emendas denteadas e das lamelas para confecção das vigas de MLC foram utilizados o adesivo Cascophen RS-216-M e o endurecedor FM-60-M (da Hexion), em temperatura ambiente, na proporção 5:1 em massa, respectivamente; na laminação dos compósitos de fibras de vidro foram utilizados a resina epóxi AR-300 e endurecedor AH-30 (da Barracuda Advanced Composites), em temperatura ambiente, na proporção 3:1 em massa, respectivamente.

Fibras de vidro: tecido longitudinal UF-0900 da FIBERTEX, espessura igual a 0,5 mm (resistência à tração do compósito fibras e resina determinada em ensaios mecânicos igual 1016 MPa).

Para os ensaios de tração nas lamelas foram utilizadas 18 peças de madeira, com os tratamentos: T1 (sem emenda), T2 (emenda sem reforço) e T3: (emenda reforçada com compósito de fibra de vidro/resina). Foram testadas 6 peças para cada tipo de tratamento. Para diminuir a variabilidade nos resultados, as 18 lamelas foram distribuídas em 6 grupos, cada grupo com lamelas de MOE semelhantes. A distribuição das peças de cada grupo entre os tratamentos foi aleatória.

Para 12 lamelas, foram confeccionadas emendas denteadas com padrão vertical (dimensões mostradas na Tabela 1), na metade do comprimento.

Tabela 1: Parâmetros geométricos das emendas denteadas com perfil vertical [5].

Parâmetro do dente	Dimensões	
comprimento	L=28,30 mm	
largura	t=6,98 mm	
largura da ponta	b=0,81 mm	
inclinação	a=1:10,6	

As emendas denteadas foram coladas com pressão igual a 9 MPa e tempo mínimo de prensagem igual a 2 segundos, conforme recomenda a norma DIN 68140: 1971 [6]. As lamelas foram aplainadas para se obter dimensões e superfícies regulares para a colagem (dimensões nominais finais iguais a 3 x 8,5 x 200 cm), inclusive as sem emendas para uniformização.

O esquema do reforço para as lamelas do tratamento T3 peças está mostrado na Fig. 1.

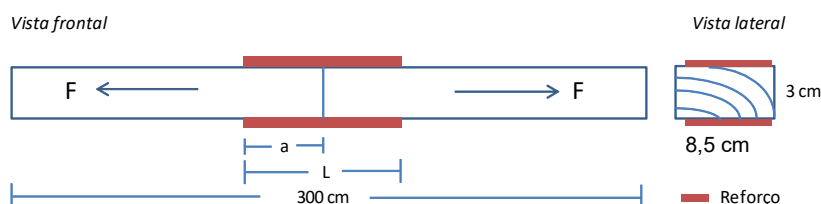


Figura 1 - Esquema geral de uma peça com emenda dentada e reforço.

A quantidade de camadas de fibras, com largura 8,5 cm, foi definida de forma que a resistência mínima do reforço fosse igual ao valor médio da resistência à tração obtida para as lamelas sem emenda, determinado previamente. O comprimento do reforço (L) foi estimado considerando a resistência ao cisalhamento na interface madeira/reforço igual a 10 MPa [7]. Os valores obtidos foram 5 camadas e L = 25 cm. Foram utilizadas 6 camadas (3 de cada lado) com 35 cm de comprimento, de forma a minimizar a possibilidade de falha no reforço. Os ensaios de tração nas lamelas foram realizados na máquina de ensaio de tração horizontal, modelo 422 da Metriguard com capacidade para 880 kN (o equipamento possui célula de carga, resolução igual a 0,1 kN). Os ensaios

de tração foram conduzidos de acordo com a norma ISO13910/2013 [8], que estipula apenas a determinação da resistência.

Foram confeccionadas 6 vigas de MLC, com dimensões nominais 3 x 10 x 300 cm, cada viga com 6 lamelas com dimensões nominais 3 x 10 x 300 cm. As 36 lamelas foram divididas em 6 grupos com MOE homogêneo, de modo a se ter uma distribuição seletiva ao longo da altura das vigas e melhorar a homogeneidade entre as propriedades das lamelas em cada viga. As vigas foram divididas em dois grupos, por sorteio. Cada grupo foi direcionado para um tratamento específico, isto é, vigas sem reforço (V1, V2 e V3) e vigas com reforço (V4, V5 e V6). As 6 vigas foram confeccionadas com emendas nas 3 lamelas inferiores. A lamela inferior de cada viga possui emenda no centro de seu comprimento; as outras duas lamelas posicionadas no lado inferior de cada viga possuem emendas distanciadas 25 cm do centro do comprimento.

Na Fig. 2 é mostrado o esquema do reforço com fibras de vidro utilizado apenas nas vigas V4, V5 e V6. Na face inferior da viga foi colocado reforço com 3 camadas de fibra de vidro, com comprimento igual a 35 cm, em toda a sua largura. Na interface entre a última e a penúltima lamela foi colocado reforço com 3 camadas de fibra de vidro, na largura da viga e em toda a sua extensão, por motivos de fabricação.

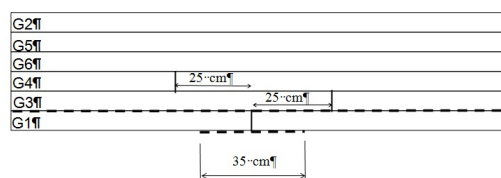


Figura 2 - Vista lateral das vigas com reforço (linhas tracejadas)

A experimentação consistiu em teste de flexão estática, de acordo com [8], com as forças ativas aplicadas nos terços do vão livre da viga, igual a 2,85 m. Essa força total foi aplicada em dois pontos (terços do vão). Os ensaios foram feitos em 3 ciclos de carregamento: nos dois primeiros, a força foi aplicada até um valor de flecha igual a 1/300 do vão livre (9,5 mm), e mantida constante durante 30 segundos; no último ciclo, o ensaio foi conduzido até a ruptura da viga.

Resultados e Discussão

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos para a resistência à tração (f_{t0}) e forma de ruptura de cada lamela, bem como o valor médio e o coeficiente de variação (CV) de cada tratamento.

Tabela 2 - Resistência à tração das lâminas e modos de ruptura nas emendas

Grupo	T1	T2		T3	
	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	modo	f_{t0} (MPa)	modo
1	76,4	60,6	1	69,5	II
2	62,6	54,8	1	70,3	6
3	73,1	33,1	1	68,3	6
4	120,3	30,3	1	78,1	II
5	11,4*	32,8	1	76,4	II
6	87,4	42,6	5	80,6	II
média	84,0	42,4	-	73,9	-
CV	24%	27%	-	6%	-

(*) valor desconsiderado nos cálculos

Modo 1: na maioria das vezes rompe ao longo das superfícies da linha de cola;

Modo 5: a ruptura começa na emenda e se propaga; praticamente 100% da ruptura é na madeira;

Modo 6: ruptura fora da emenda e não influenciada por ela;

Modo II: Ruptura por cisalhamento na linha de cola entre o reforço e a madeira.

Os modos de ruptura apresentados para emendas denteadas estão de acordo com a norma ASTM [9] e para emendas com reforço de acordo com [10] quando a falha ocorre no reforço.

O valor médio obtido para a resistência à tração das lamelas sem emenda (T1) foi 84,0 MPa, muito superior (cerca do dobro) ao valor médio obtido para a resistência das peças com emendas sem reforço (T2), igual a 42,4 MPa. Cinco lamelas do tratamento T2 apresentaram ruptura do tipo 1, isto é, predominantemente ao longo da superfície da linha de cola da emenda denteada. Essa forma de ruptura denota deficiência na colagem das emendas denteadas, o que deve ter sido motivado pela maior densidade da madeira empregada. A outra peça teve ruptura do modo 5, isto é, a ruptura ocorre predominantemente na madeira, começando na região da emenda com propagação subsequente. Esses resultados indicam a conveniência de se fazer o reforço.

O valor médio da resistência obtido para as peças com reforço (T3) foi 73,9 MPa, com ganho de resistência igual a 74% em relação às peças com emenda e sem reforço (T2). Para duas lâminas do tratamento T3, a ruptura ocorreu por falha na madeira fora da região do reforço (modo de ruptura 6). Nesses casos, pode ser considerado que a resistência da emenda com reforço é superior ao valor obtido, pois a emenda resistiu, sem ter falhado, ao valor de tensão que causou a ruptura da peça. As outras quatro lâminas do tratamento T3 apresentaram ruptura do modo II; nesses casos, após a falha do reforço, observou-se a ruptura da emenda por descolamento dos dentes.

As peças com emendas reforçadas com fibras de vidro atingiram 87% da resistência das peças sem emendas, em termos de valores médios. Uma das peças sem emenda (T1) teve grande influência positiva no valor médio da resistência. Se não considerada, o valor médio da resistência das peças sem emendas passaria a ser 74,9 MPa. Nesse caso, a resistência das peças com emendas reforçadas com fibras de vidro atingiria 99% da resistência das peças sem emendas, em termos de valores médios.

Na Tabela 3 são mostrados os valores do momento fletor na ruptura (M_{exp}) e das tensões atuantes na borda tracionada (σ_t) e na borda comprimida (σ_c) de cada viga, calculadas de forma teórica pela teoria clássica da flexão com o método da seção transformada, usando o valor do momento fletor experimental na ruptura (M_{exp}). No caso das vigas com reforço, o cálculo foi feito em relação à seção com as duas camadas de reforço. O comportamento praticamente linear das vigas foi observado por medidas de extensômetros elétricos até a fase de ruptura.

Tabela 3 - Tensões normais máximas atuantes.

Viga	M_{exp} (kN.cm)	Tensões normais atuantes	
		σ_t (MPa)	σ_c (MPa)
V1	2565	57,1	-59,5
V2	1922	42,7	-42,8
V3	1553	35,0	-32,7
média	2013	44,9	45
CV	21%	20%	-25%
V4	3791	78	68,4
V5	4047	74	82,2
V6	4769	93	85,9
média	4202	81,7	78,8
CV	10%	10%	10%

Em termos dos valores médios, a resistência das vigas com reforço foi 109% superior à resistência das vigas sem reforço. De maneira geral, para as vigas sem reforço (V1 a V3), a ruptura se iniciou na emenda da lâmina inferior, havendo a propagação da ruptura por cisalhamento na interface entre as duas lâminas inferiores, posterior ruptura da emenda dentada da lâmina adjacente à lâmina inferior, e ruptura final por cisalhamento. Observa-se que, ao contrário das outras duas vigas, na viga V2 não ocorreu a abertura da emenda da terceira lâmina (contada a partir da borda inferior). Nas vigas com reforço, a ruptura teve início com a abertura da emenda da lâmina inferior, com a falha do reforço inferior por descolamento na interface madeira-reforço.

Os valores médios das tensões de tração atuantes (44,9 MPa e 81,7 MPa) podem ser comparados com os valores médios obtidos nos ensaios da resistência à tração das emendas denteadas: 42,4 MPa para peças com emendas sem reforço, e 73,9 MPa para peças com emendas reforçadas com fibras de vidro. Observa-se, em termos de valores médios, uma boa aproximação do valor de tensão obtido nas vigas sem reforço em relação ao valor médio da resistência à tração das peças com emendas sem reforço (diferença igual a 6%). No outro caso, a diferença entre o valor médio da tensão na viga com reforço em relação às peças tracionadas com emendas reforçadas com fibra de vidro foi um pouco superior (11%). Nesse último caso, a influência positiva para as vigas reforçadas deve ter ocorrido pelo fato da emenda intermediária ter sido feita em toda a extensão da viga.

Conclusões

Nos ensaios de tração, a utilização do reforço com fibras de vidro proporcionou um grande incremento na resistência das lamelas com emendas (74%), que atingiram 87% da resistência das lamelas sem emendas, em termos de valores médios. Isso indica a conveniência de se fazer o reforço das emendas em peças com maior densidade devido à menor eficiência da colagem das emendas denteadas nesse caso.

Com relação aos ensaios de flexão das vigas, em termos de valores médios, a utilização do reforço nas vigas proporcionou um aumento de 109% na resistência à flexão. A ruptura se iniciou por falha da lamela inferior, devido à solicitação de tração. Os valores das tensões de tração atuantes nas bordas peças na ruptura, calculados pela teoria clássica da flexão usando a seção transformada, foram comparados aos valores obtidos nos ensaios da resistência à tração das emendas denteadas em peças estruturais de eucalipto, obtendo-se uma boa aproximação entre os resultados, para as vigas com e sem reforço.

Pode-se afirmar que o uso de reforço com fibras pode implementar um grande aumento na resistência de elementos estruturais solicitados por flexão.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, ao CNPq, e à CAPES pelo apoio financeiro ao desenvolvimento do projeto, concessão de bolsas e participação no evento.

Referências

1. H. Yingcheng et al. *Materials Science Forum* 2009, 620, 137.
2. J. Fiorelli; A. A. Dias *Materials and Structures* 2011, 44, 1431.
3. R. F. Lindyberg, Tese de Doutorado, University of Maine-USA, 2000.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
5. R. Hernandez in 5th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, 1998.
6. Deutsches Institut Fur Nurmung, DIN 68140: Keilzinkenverbindungen von Holz, Berlim, Alemanha, 1971.
7. J. Fiorelli, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 2002.
8. International Organization for Standardization. ISO 13910: Structural timber - Characteristic values of strength - graded timber - Sampling, full-size testing and evaluation, 2013.
9. American Society for testing and materials, ASTM D4688 Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber, Estados Unidos, 1999.
10. Q. D. Bui; H. R. Milner; J. M. Williams, in International Wood Engineering Conference, Madison-WI-USA, 1996.