

MADEIRA LAMINADA COLADA REFORÇADA COM BARRAS DE AÇO COLADAS COM EPOXI E COM POLIURETANO

GLUED LAMINATED TIMBER REINFORCED WITH STEEL BARS GLUED WITH EPOXY AND WITH POLYURETHANE ADHESIVES

Bruno P. Pellis ⁽¹⁾, Julio Soriano ⁽²⁾ (A), Aurélio M. S. Ferrari ⁽³⁾

(1) MSc em Engenharia Agrícola, Engenheiro projetista, Alpine Comércio de Madeiras e Serviços, Salto, Brasil

(2) Dr. Prof., Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Brasil

(3) Estudante de graduação. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Brasil

Endereço de contato: julio.soriano@feagri.unicamp.br; (A) Apresentador

Código de identificação: T4-11

Resumo

A Madeira Laminada Colada (MLC) representa um dos mais importantes produtos tecnológicos para a concepção de estruturas das construções civis, por possibilitar que sejam superadas algumas das limitações das peças de madeira serradas comerciais, bem como pela qualidade das peças proporcionada pelo processo de produção. De forma a melhorar suas propriedades mecânicas é possível prover reforços da MLC com fibras de carbono, de vidro ou vegetais, bem como com barras de aço coladas internamente na seção transversal da peça. Neste contexto, o presente trabalho objetivou avaliar a eficiência mecânica promovida por reforços com barras de aço coladas com adesivo epoxídico e com adesivo poliuretano. Foram confeccionados 09 protótipos de MLC, com lâminas de *Pinus elliottii*, com seção transversal medindo 43 mm x 57,6 mm e 1300 mm de comprimento. Desses protótipos, 03 foram produzidos sem reforços e as outras 06 peças foram reforçadas com barras de aço de diâmetro de 6,3 mm (CA50) dispostas internamente nas regiões tracionada e comprimida. Da análise dos resultados de flexão estática, os reforços com barras de aço proporcionaram um substancial incremento na rigidez em relação às peças não reforçadas, sendo da ordem de 70,4% e 79,2% para os reforços colados com os adesivos epóxi e poliuretano, respectivamente. Com base nos resultados da presente pesquisa, pode-se concluir que o adesivo de poliuretano tem um grande potencial para a técnica de reforço de peças de MLC.

Palavras chave: rigidez; flexão estática; madeira laminada colada; barras de aço; adesivos

Abstract

*The glued laminated timber (glulam) represents one of the most important technological products for the design of structures of civil constructions, which is due to a technique that allows to overcome some of inherent limitations of the sawn timber pieces, as well as by the quality of the pieces provided by the production process. To improve the mechanical properties of the glulam it is possible to provide reinforcements with carbon, vegetable or glass fibers, as well as with steel bars glued internally in cross-sections of the pieces. In this context, this study evaluates the mechanical efficiency promoted by reinforcements with steel bars glued with epoxy adhesive and with polyurethane adhesive. Nine glulam prototypes with cross-section of 43 mm x 57.6 mm and 1,300-mm-length were fabricated with *Pinus elliottii* laminations. Three of these prototypes were fabricated without reinforcements and, another 06 pieces were reinforced with 6.3-mm-diameter steel bars (steel class CA50) glued internally in the tension and compressive regions. By the analysis of static flexural test results, it was found that the reinforcements with steel bars provided a substantial increase in stiffness compared to non-reinforced pieces, in order of 70.4% and 79.2% for reinforcements glued with epoxy and polyurethane adhesive, respectively. Based on the results of this research, we concluded that the polyurethane adhesive has a great potential for the reinforcement glulam technique.*

Keywords: stiffness; static flexural; glued laminated timber; steel bars; adhesives

1. INTRODUÇÃO

A madeira laminada colada (MLC) retrata uma das técnicas para prover o aumento do desempenho estrutural da madeira, bem como para superar alguns dos limites inerentes das peças de madeira serrada. Devido as características dessa tecnologia fundamentada pelo controle das etapas de fabricação, das seleções da matéria-prima e do adesivo até o processo de cura das peças [1], tem sido possível estabelecer classes de resistência da MLC.

O desempenho estrutural da MLC pode ainda ser melhorado com técnicas de reforços com fibras naturais, como é o caso do uso das fibras vegetais de sisal, representando uma solução com aspectos ecológicos [2]. Soluções convencionais de reforços da MLC contemplam o uso de fibras sintéticas e podem ser elaboradas com o emprego de fibras de vidro, como é o caso da pesquisa desenvolvida com aplicações de fibras na região tracionada de vigas de MLC [3,4]. Também são possíveis aplicações de outras fibras sintéticas, tais como fibra de carbono ou aramida [5].

Reforços poliméricos produzem estruturas com características mais uniforme, implicando em propriedades mecânicas com menor variabilidade [6]. O reforço de vigas de MLC com um composto de fibra de vidro unidirecional e resina de epóxi produziu um aumento de 10% na rigidez de peças reforçadas em relação a peças não reforçadas [3].

O uso de barras de aço para o reforço da MLC coladas com adesivo epóxi [7,8], pode ser visto como uma solução para o aumento da capacidade de carregamento e o aumento da rigidez de vigas, cujos resultados são dependentes da taxa de armadura empregada. Em pesquisa relacionada ao reforço de vigas de MLC [9] apontam que a desatualização da técnica se devia à evolução dos adesivos, e usando o adesivo de poliuretano (PU) em vigas, com taxa de armadura igual a 0,82%, os autores obtiveram resultados significativos em peças fletidas, com um aumento de 48% na carga última e o aumento da rigidez igual a 26%. O emprego de barras de aço coladas com poliuretano para o reforço vigas de MLC, com taxas de armadura iguais a 2% e 4%, proporcionaram o aumento da capacidade de carregamento de serviço da ordem de 53,1% e 79,2% [10]. Além dessa maior capacidade de carregamento, os autores também destacam que os reforços proporcionaram uma menor variabilidade no comportamento a flexão (carga x deslocamento vertical) que aquelas apresentadas por vigas de MLC não reforçadas.

Este trabalho teve por objetivo a avaliação da eficiência proporcionada por barras de aço nervuradas, dispostas simetricamente e coladas com dois tipos de adesivo (epóxi e poliuretano), no reforço de peças de MLC fletidas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para confecção dos protótipos foram adquiridas tábuas de *Pinus elliotti*, das quais após processo de secagem natural, foram extraídas lâminas com seção transversal medindo 43 mm x 14,4 mm. Foram selecionadas lâminas isentas de defeitos (rachaduras, presença de nós) detectados na inspeção visual.

As peças foram fabricadas com quatro lâminas constituindo a seção transversal de 43 mm x 57,6 mm e comprimento de 1.300 mm, sendo três isentas de reforço e denominadas de MLC. Três peças foram reforçadas com barras de aço coladas com adesivo epoxídico Sikadur 32®, denominadas MLCA_EP. Outras três peças foram reforçadas com barras de aço coladas com adesivo poliuretano PUR-Adhesive 501-Kleiberit® e denominadas MLCA_PU. Em cada uma dessas peças reforçadas foram empregadas duas barras de aço nervuradas com 6,3 mm de diâmetro, usais para construções de concreto armado CA 50 (resistência característica de escoamento igual a 500 MPa). As barras foram dispostas simetricamente em sulcos produzidos nas laminas externas (Figura 1), resultando numa taxa de armadura (razão entre a área do reforço e da seção bruta da peça) igual a 2,5%.

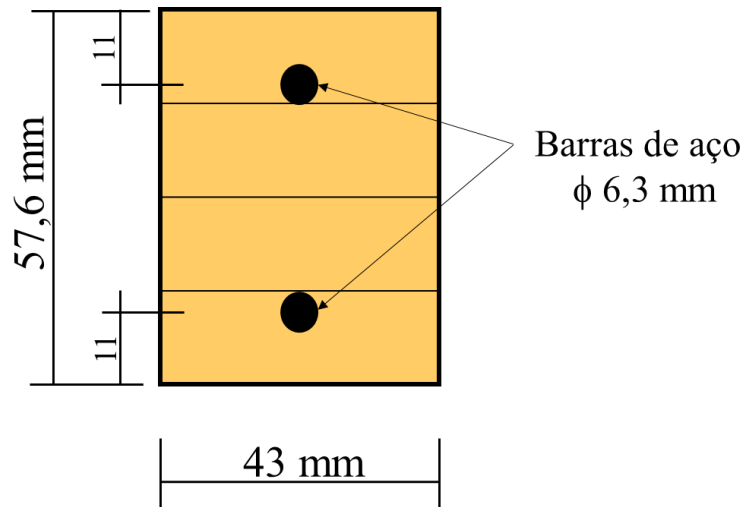


Figura 1: Seção transversal da peça MLC reforçada

Na produção de todos os protótipos, na interface de contato das lâminas foi empregado adesivo PUR-Adhesive 501-Kleiberit®. As peças montadas foram submetidas a prensagem em dispositivo hidráulico-mecânico (Figura 2), sob pressão de 1,5 MPa, por um período mínimo de 6h e mantidas em processo de cura por mais 24h.



Figura 2: Processo de prensagem das peças

As peças foram submetidas à flexão estática (Figura 3) numa máquina de ensaio universal (EMIC DL30000, Brasil), com esquema estático de flexão por três pontos, de acordo com o proposto pela [11]. Como procedimento de ensaio à uma taxa de carregamento de 10 MPa min^{-1} , inicialmente foi realizada a escorva antes do passo de carregamento incremental para a obtenção da curva Carga \times Deslocamento vertical e, também, para obtenção da carga de ruptura.



Figura 3: Ensaio de flexão estática

2.1 Determinação da Rigidez

O produto de rigidez de cada protótipo foi obtido com a Equação (1) aplicada às curvas ajustadas para os resultados experimentais (carga \times deslocamento vertical).

$$E_w \cdot I_{eq} = \frac{\Delta P \cdot L^3}{48 \cdot \Delta u} \quad (1)$$

Onde: E_w = módulo de elasticidade, I_{eq} = momento de inércia equivalente, L = distância entre apoios, ΔP = incremento de carga, e Δu = flecha correspondente ao incremento de carga.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados (carga \times deslocamento vertical) registrados durante os ensaios de flexão foram ajustadas as equações para representar o comportamento de cada um dos protótipos, as quais são apresentadas com seus respectivos coeficientes angulares na Tabela 1. Em todos os casos, os coeficientes de determinação (R^2) resultaram iguais a 1,0, mostrando a adequada variação linear do ajuste para o comportamento de flexão das peças ensaiadas.

O produto de rigidez ($E_m \cdot I_{eq}$) de cada uma das peças foi calculado tendo por base as equações ajustadas (Tabela 1) e a Eq. (1). Aos resultados obtidos para os três grupos foi aplicada a análise estatística para se verificar se as diferenças são significativas. Com isto, pode-se notar que os resultados dos grupos das peças com reforço (grupo B) são diferentes daqueles obtidos para as peças não reforçadas (grupo A). No entanto, as diferenças encontradas entre as peças reforçadas não são significativas, pois ambos os tipos de adesivo incorreram no agrupamento B. Isto prova, quanto à melhoria da rigidez, a importância dos reforços para peças de MLC. No entanto, para as condições desta pesquisa, verificou ser indiferente o tipo adesivo (epóxi ou poliuretano) empregado na colagem das barras.

Da análise dos resultados médios do produto de rigidez (Tabela 1), o emprego de barras de aço reforçando as peças de madeira laminada colada proporcionaram incrementos significativos e da ordem de 70,4% para as peças do grupo MLCA_EP e de 79,2% para o grupo MLCA_PU. Esses valores, que foram obtidos para uma taxa de armadura igual a 2,5%, mostram o elevado incremento da rigidez quando comparado com resultados obtidos para uma taxa de armadura 0,82% [9] e muito

superiores aos resultados obtidos com o reforço com fibras de vidro reforçando apenas a região de tração [3].

Tabela 1: Resultados das peças submetidas à flexão simples

Protótipo	Carga de ruptura (N)	Euações ajustadas $P \times u$	$E_w \cdot I_{eq}$ (N . m ²)	$E_m \cdot I_{eq, \text{médio}}$ (N . m ²)	Agrupamento*
MLC_1	5180,8	$P = 132,75 u$	4779,00	5469,60	A
MLC_2	4913,9	$P = 162,43 u$	5847,48		
MLC_3	5712,7	$P = 160,62 u$	5782,32		
MLCA_EP_1	5135,3	$P = 280,97 u$	10114,92	9319,56	B
MLCA_EP_2	6348,5	$P = 250,14 u$	9005,04		
MLCA_EP_3	6730,2	$P = 245,52 u$	8838,72		
MLCA_PU_1	7487,6	$P = 251,77 u$	9063,72	9802,80	B
MLCA_PU_2	6049,6	$P = 266,06 u$	9578,16		
MLCA_PU_3	6255,4	$P = 299,07 u$	10766,52		

* Pelo método de Tukey, com uma margem de erro de 5,0%, letras distintas implicam em diferenças significativas.

Na Tabela 1 são apresentados os valores experimentais das cargas de ruptura alcançadas para cada um dos protótipos. Pode-se notar que a presença do reforço, em relação ao grupo de peças MLC, proporcionou uma maior capacidade de carregamento à nível da ruptura para todas as peças do grupo MLCA-PU. No entanto, para o grupo MLCA_EP este efeito não se notou para uma das peças, no caso a peça MLCA_E_1. Por outro lado, a favor da segurança, em se comparando apenas os menores valores de carga de ruptura registrado para cada grupo (MLC_2, MLCA_EP_1 e MLCA_PU_2), para os protótipos MLCA_EP_1 e MLCA_PU_2, os respectivos valores de carga de ruptura foram superiores a 4,51% e 23,11% daquele registrado para MLC_2.

No entanto, quando se analisa o desempenho das peças a nível dos Estados Limites de Serviço (ELS), com a limitação da flecha, fica evidente o benefício proporcionado pelo reforço. Empregando-se as equações ajustadas (Tabela 1), na Figura 4 pode ser visto o comportamento de cada uma das peças até um deslocamento limite de serviço usual [11] igual a $L/200$, que neste caso (com $L= 1200$ mm) resultou igual a 6 mm. Para este limite de deslocamento imposto, para o grupo de peças não reforçadas destaca-se a MLC_2 com o maior valor de carga (974,58 N). Comparativamente a este valor, como consequência do aumento de rigidez proporcionado pelo reforço, para o grupo em que se empregou o adesivo Epóxi foi obtido um aumento de até 73% e, para o grupo de barras coladas com adesivo PU o aumento foi de até 84,1%, correspondendo as peças MLCA_EP_1 e MLCA_PU_3, respectivamente.

O incremento no produto de rigidez pode ser explicado pelo fato dessa grandeza ser composta pelo momento de inércia e pelo módulo de elasticidade, portanto, a presença do reforço pode ser assumida como uma área equivale adicional do material base, no caso a MLC.

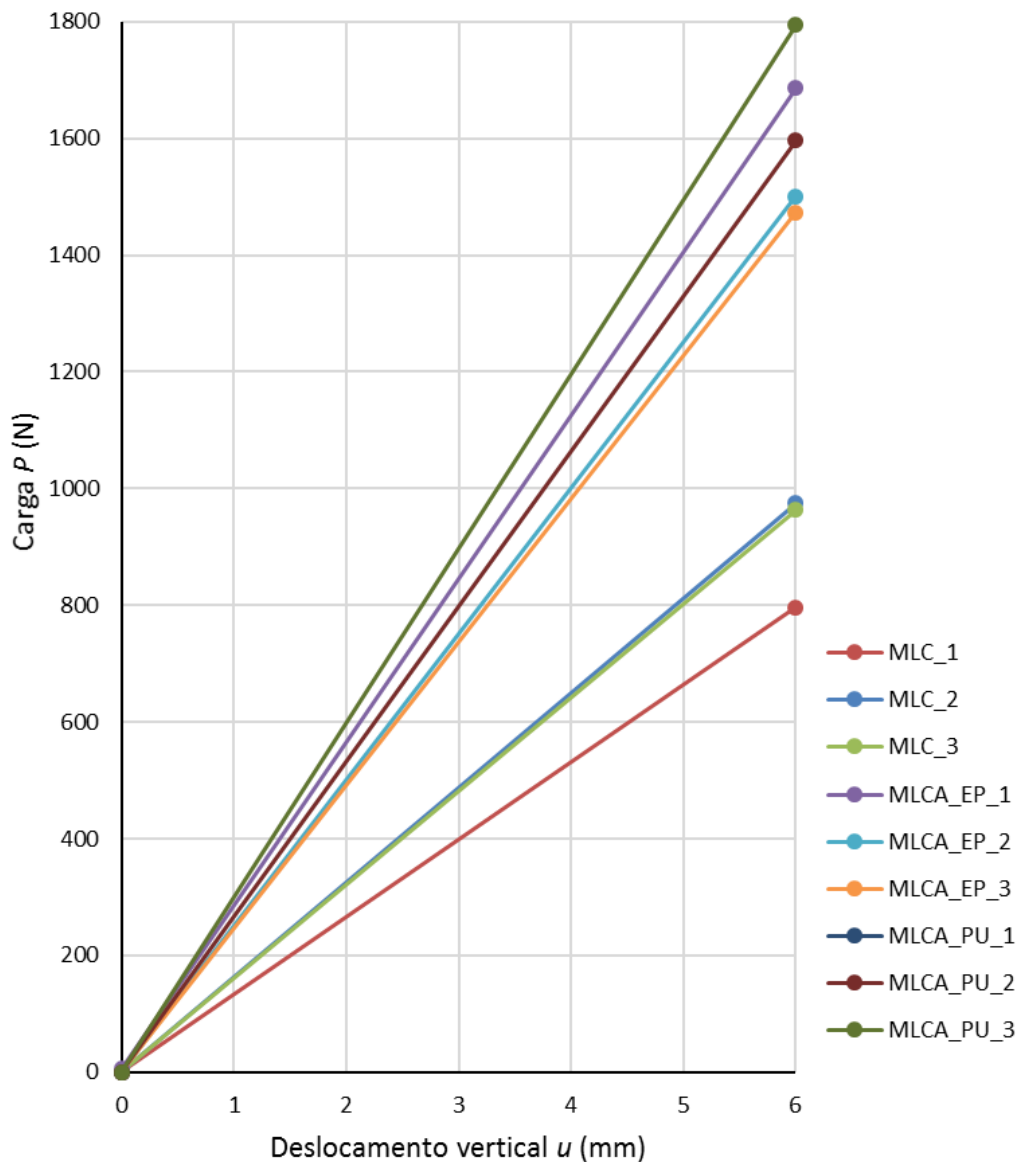


Figura 4: Carga *versus* deslocamento vertical - intervalo correspondente ao Estado de Serviço (flecha limitada a 6 mm)

Outro aspecto a ser considerado é o modo de ruptura das peças reforçadas (Figura 5), caracterizado pela ruptura das fibras da madeira na região de tração e perda parcial de aderência madeira-aço, localizada apenas nas proximidades das fibras de madeira rompidas. No entanto, a presença das barras para ambos os grupos reforçados garantiu uma resistência residual após ruína, o que não acontece com as peças não reforçadas.

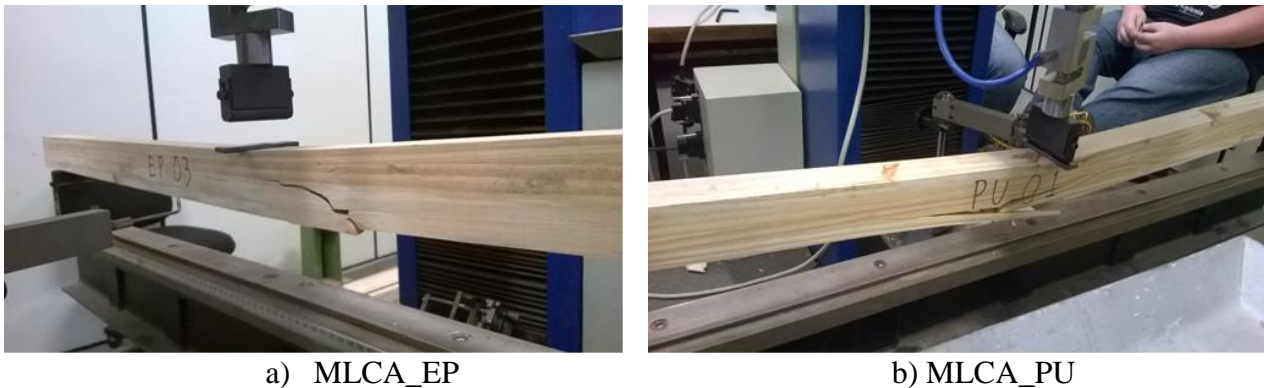


Figura 5: Modo de ruptura

Finalmente, ambos os adesivos empregados nesta pesquisa se mostraram eficientes para a fixação do reforço em peças de madeira lamina colada, proporcionando o aumento de rigidez das peças submetidas à flexão. No entanto, no caso do adesivo tipo PU além de proporcionar melhor trabalhabilidade na montagem das peças, com tempo de aplicação (pot-life) superior ao do adesivo epoxídico, também foram proporcionadas melhores condições de usinagem das peças, como é o caso da regularização e do acabamento de superfícies.

4. CONCLUSÕES

O emprego da taxa de armadura igual a 2,5% para reforço de peças de MLC sujeitas à flexão, permitiu concluir que:

- Ambos os adesivos epóxi e poliuretano contribuíram para o reforço com um efetivo aumento na rigidez quando comparada com a rigidez de protótipos não reforçados;
- O aumento de rigidez proporcionado pelo reforço, quanto às condições limites de serviço da estrutura, implicou na capacidade de carregamento muito superior.
- Não houve diferença significativa pelo uso do adesivo epóxi ou do adesivo poliuretano nos resultados obtidos para as peças reforçadas. No entanto, destaca-se a melhor trabalhabilidade na confecção e na usinagem das peças cujas barras foram fixadas com adesivo de poliuretano.

AGRADECIMIENTOS

Ao apoio técnico do Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI - UNICAMP) e, aos apoios financeiros do CNPq e do FAEPEX-UNICAMP.

Os autores também agradecem o Eng. Fábio Piva Pellis e José Luiz Pellis, da Allpine Comércio de Madeiras e Serviços, pela colaboração na confecção dos protótipos.

REFERENCIAS

- [1] Forest Products Laboratory, 'Wood handbook: Wood as an engineering material', U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, (Madison, 2010).
- [2] Mascia, N.T. e Mayer, R.M., 'Analysis of wood laminated beams reinforced by natural fibres', *Advanced Materials Research*. **778** (2013) 553-560.
- [3] Fiorelli, J. e Dias, A.A., 'Fiberglass-reinforced glulam beams: mechanical properties and theoretical model', *Materials Research*. **9** (3) (2006) 263-269.
- [4] Miotto, J.L. e Dias, A.A. 'Avaliação experimental de vigas mistas de MLC-concreto reforçadas com fibras de vidro', *Mecânica Experimental*. **19** (2011) 121-131.
- [5] Romani, M. e Blab, H.J. 'Design model for FRP Reinforced Glulam Beams', Proceedings of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction, (2001).

- [6] André, A., ‘Fibers for Strengthening of Timber Structures’. (2006), < <http://goo.gl/ZSFKhc> >, Acessado: out. 2013.
- [7] Negrão, J.H., ‘Prestressing systems for timber beams’. In: 12th World Conference on Timber Engineering, (2012).
- [8] Pellis, F.P., Pellis B.P., Soriano, J., Lorensani, R.G.M. e Batista, F. A. F., ‘Método da seção transformada para avaliação do desempenho de vigas em madeira laminada colada armada’. In: 13th Encontro Brasileiro de Madeira e Estruturas de Madeira, (2012).
- [9] De Luca, V. e Marano, C., ‘Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars’, *Constr Build Mater.* **30** (1) (2012) 206-217.
- [10] Soriano, J., Pellis, B.P. e Mascia, N.T., ‘Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars’, *Composite Structures.* **150** (2016) 200-207.
- [11] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997), NBR 7190 Projeto de estruturas de madeira, Rio de Janeiro.