

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

**REFORÇO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE
LVL DE PARICÁ (*SCHIZOLOBIUM AMAZONICUM*) COM BARRAS
ROSQUEADAS DE AÇO COLADAS COM RESINA POLIURETANA DERIVADA
DE ÓLEO DE MAMONA**

**MARIA GABRIELA SALES DA SILVA¹, VINÍCIUS DE SOUSA LIMA¹, SANDRIEL
LIMA NASCIMENTO¹, MARCO ANTONIO SIVEIRO², JÉSSICA ALMEIDA DOS
SANTOS¹, JOÃO MIGUEL SANTOS DIAS¹**

AFILIAÇÃO

¹ UEMASUL - CCHSTL/Eng. Civil - Rua Topázio, 100. Vila São Francisco. CEP: 65930-000. Açailândia-MA.

² Grupo Arboris – Rua Gonçalves Dias, 919. CEP: 68633-000. Dom Eliseu-PA.

RESUMO

O presente trabalho buscou determinar o acréscimo da resistência mecânica em ligação com barra de aço rosqueada, de 6,3 mm de diâmetro, colada com adesivo poliuretano à base de mamona em LVL de paricá (*Schizolobium amazonicum*), sujeita a esforços de tração, ao comparar os comprimentos de ancoragem de 10, 12,5 e 15 vezes o diâmetro da barra de aço. Ademais, foi avaliada a influência na resistência e rigidez à flexão advinda da disposição de barras rosqueadas de aço, com comprimento de 30 vezes o diâmetro da barra de aço rosqueada, colada com adesivo poliuretano à base de mamona na parte comprimida e, simultaneamente, na parte tracionada e comprimida da viga de LVL. A metodologia do estudo foi baseada na execução de ensaios de tração paralela às fibras e flexão em 4 pontos, na posição *edgewise*. Os resultados obtidos no ensaio de tração sugerem um aumento significativo entre as ancoragens de 15d e 12,5d comparadas com 10d, mas não houve aumento na série de 15d em comparação com a ancoragem de 12,5d. O modo de ruptura dos corpos de prova sujeitos à tração apresentou comportamento frágil caracterizado por cisalhamento na interface adesivo-barra. Não foi possível determinar experimentalmente o comprimento de ancoragem mínimo da ligação estudada. Em relação aos resultados das vigas fletidas, foi possível observar o aumento da resistência e rigidez mecânica em reforço das vigas reforçadas com barras rosqueadas de aço nas regiões de tensões normais de tração e compressão em comparação com vigas LVL sem reforço. Nas três séries de ensaios de flexão, o modo de ruptura ocorreu somente devido à tração nas fibras inferiores dos corpos de prova.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira; Resistência mecânica; barras coladas.

INTRODUÇÃO

A crescente conscientização sobre práticas construtivas sustentáveis e a busca por soluções eficientes têm solidificado a madeira engenheirada como uma escolha estratégica (Stefańska *et al.*, 2021). Entretanto, ao longo do tempo, essas estruturas podem enfrentar desafios derivados de cargas excessivas, alterações ambientais ou requisitos de carregamento mais rigorosos (Negrao, Balseiro e Faria, 2011). Nesse contexto, o reforço de vigas de madeira

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

engenheirada surge como uma solução para a manutenção e melhoria da integridade estrutural (Steiger *et al.*, 2015).

Os estudos e pesquisas dedicados às hastes coladas como método de reforço em madeira engenheirada têm demonstrado sua eficácia em uma variedade de aplicações, desde vigas e pilares até elementos decorativos (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011). O reforço de vigas LVL de paricá apresenta desafios intrínsecos devido às características mecânicas da madeira. Segundo Limberger *et al.* (2013), a utilização industrial da resina poliuretana (PUR) derivada de óleo de mamona pode ser uma opção válida, atendendo ao fato de possuir desempenho mecânico satisfatório, além de ser biodegradável e proveniente de fonte renovável.

A complexidade resultante da utilização de materiais de naturezas distintas, como madeira de paricá, adesivo poliuretano e barras de aço, desafia as formulações teóricas tradicionais da resistência dos materiais (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011). Portanto, o objetivo do presente estudo é analisar a influência do reforço de barras de aço rosqueadas coladas com PUR derivada de óleo de mamona em elementos estruturais tracionados e fletidos de LVL de paricá (*Schizolobium amazonicum*).

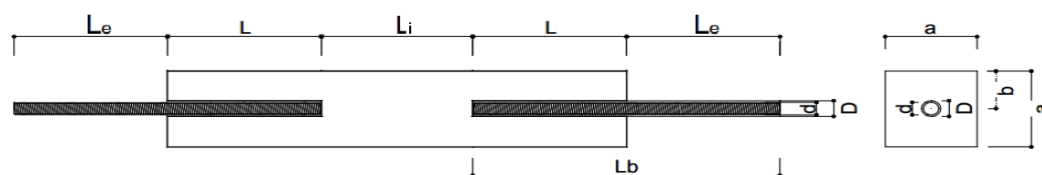
METODOLOGIA

Os Corpos de Prova (CPs) utilizados na pesquisa foram fornecidos pelo Grupo Arboris. Os CPs foram obtidos a partir de 6 painéis LVL com espessura de 37 mm a 38 mm, 2,28 mm de comprimento e 1,22 de largura. A caracterização das propriedades físicas e mecânicas desses painéis está disponível no estudo de Lima *et al* (2022). Além disso, foi utilizado, poliuretano bi-componente a base de mamona obtido da empresa Kehl Indústria e Comércio Ltda para a colagem das barras de aço rosqueadas de 6,35 mm de diâmetro no LVL.

Para o ensaio de tração, foram analisados três diferentes comprimentos de ancoragem (L), separados em três séries com 30 CPs cada. A primeira série possuía o comprimento de ancoragem de 63,5 mm (10 vezes o diâmetro da barra), sendo denominada 10d, em que “d” era o diâmetro da barra. A segunda série possuía o comprimento de ancoragem de 79,38 mm (12,5 vezes o diâmetro da barra) sendo denominada 12,5d. A terceira série possuía o comprimento de ancoragem de 95,25 mm (15,0 vezes o diâmetro da barra) sendo denominada 15d. As dimensões médias dos corpos de prova eram de 40 mm x 37 mm x 462 mm (Figura 1).

Figura 1: Variáveis geométricas da ligação com barra de aço colada.

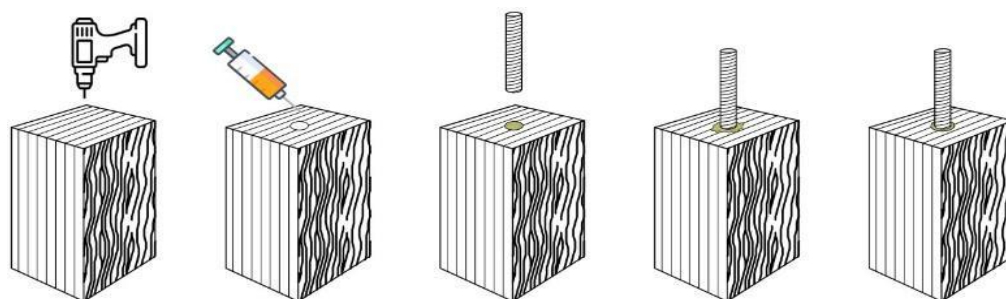
VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA



Legenda: distância entre o eixo da barra e a borda do bloco de madeira (b), distância entre extremidades das barras (Li), comprimento de ancoragem (L), comprimento externo da barra (Le), diâmetro do furo (D), diâmetro da barra (d), Comprimento da barra (Lb), dimensões da seção transversal do CP (a). Fonte: Chans, Cimadevila e Gutiérrez (2009).

Inicialmente, foram realizados os furos dos 90 CPs, de acordo com o comprimento de ancoragem de cada série. Por conseguinte, foi iniciada a colagem do furo de um lado do CP por meio da inserção dos dois componentes do adesivo com o auxílio de uma seringa, de modo que ambos tenham a mesma proporção. Após isso, foi realizada a inserção da barra rosqueada, por meio de rotação no sentido horário de forma a evitar formação de bolhas de ar, mantendo a barra perpendicular à seção transversal do CP. Decorrido um intervalo de 24 horas de cura do adesivo, foi realizada a colagem do outro lado (Figura 2).

Figura 2: Processo de confecção dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

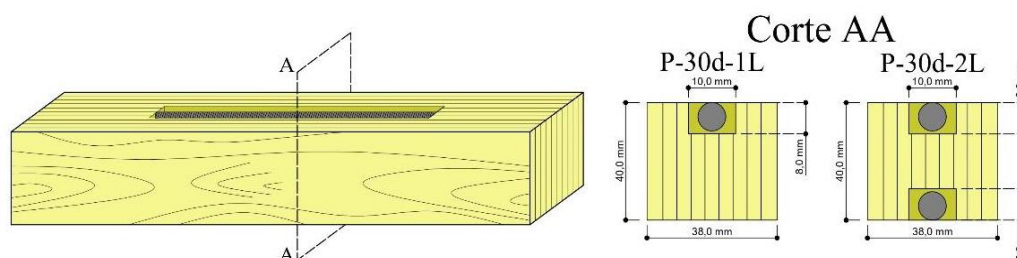
Após a confecção dos CPs, procedeu-se os ensaios de tração nas barras dos CPs na máquina universal de ensaios INSTRON EMIC 23-100, com célula de carga com capacidade de 100 kN, sob uma taxa de aplicação de carga de 50 N/s, conforme foi utilizado na campanha experimental de Dias (2015).

De posse dos resultados provenientes dos ensaios nas ligações com barras de aço rosqueadas coladas com PUR derivada de óleo de mamona, procedeu-se a confecção dos CPs de LVL para ensaio de flexão estática em 4 pontos, na posição *edgewise*, com reforço longitudinal com barras de comprimento de 30d, posicionadas somente na parte comprimida e

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

simultaneamente na parte tracionada e comprimida da viga (Figura 3).

Figura 3: Configuração dos corpos de prova com reforço da barra rosqueada de aço.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os ensaios foram realizados com uso de 3 séries com 30 CPs cada, sendo que as duas primeiras séries possuíam comprimento de embutimento da barra de 190,5 mm (30 vezes o diâmetro da barra) A primeira série foi reforçada com barras de aço apenas na parte comprimida da viga LVL, essa série foi denominada P-30d-1L. A segunda série foi reforçada na parte comprimida e na parte tracionada, essa série foi denominada P-30d-2L. A terceira série é composta por CPs sem reforço de barras rosqueadas de aço, essa série foi denominada V-0d-0L.

Foi executado o furo dos 90 CPs com auxílio de uma tupa. O processo de colagem iniciou com a inserção dos componentes A e B do adesivo em um recipiente plástico, usando a balança para aferir as massas e garantir a proporção de 1:1 entre os componentes. Após isso, foi realizada a mistura dos mesmos com o auxílio de uma espátula metálica. A mistura foi inserida no rasgo do CP, seguida da inserção da barra rosqueada. Em seguida, o CP teve seu rasgo completamente coberto com fita durex, a fim de que o adesivo não saísse do rasgo. Após isso, foi iniciado um intervalo de 24 horas para cura do adesivo, ao fim desse intervalo foi realizada a colagem do outro lado do CP.

Os ensaios de flexão em quatro pontos na posição *edgewise*, foram realizados na máquina universal de ensaios INSTRON EMIC 23-100, com uma taxa de carregamento de 10 MPa/s, conforme norma ABNT NBR 7190-3:2022-*Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*.

Com base nos dados obtidos durante a campanha experimental, foram realizadas análises estatísticas. Adicionalmente, foi calculado os valores de rigidez à flexão (MOE) (Equação 1) obtidos a partir dos ensaios de flexão.

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

$$MOE = \frac{F \cdot a}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta} \cdot (3L^2 - 4a^2) \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme os resultados expostos na Tabela 1, que abrange os valores de força máxima dos CPs de cada série, é evidente que houve um incremento na força de ruptura ao comparar os valores entre as séries 10d e 12,5d. No entanto, esse fenômeno não se manifestou ao comparar a série 12,5d com a série 15d, o que também foi observado no trabalho de Zhang *et al.* (2020), para ligações de barras de aço rosqueadas de diâmetros iguais a 12 e 16 mm coladas com adesivo epóxi em LVL de bambu.

Tabela 1: Valores de força máxima dos CPs de cada série.

Valores	Séries		
	10d	12,5d	15d
Máximo (kN)	5,11	7,31	8,71
Médio (kN)	3,66	5,23	5,64
Mínimo (kN)	2,73	4,14	3,67
F_k (kN)	3,10	4,62	4,04
CV (%)	14,84	14,55	20,71

CV: coeficiente de variação; *d*: diâmetro da barra. Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

É notável que em todas as séries, o modo de falha foi caracterizado por cisalhamento na interface adesivo-barra (Figura 4). Isso pode estar relacionado a baixa aderência entre o adesivo e a barra e a grande quantidade de bolhas de ar oriundas da reação química de cura do adesivo. A análise estatística da ANOVA revelou uma diferença significativa entre, pelo menos, duas séries investigadas. Utilizando o teste T de *Student*, identifica-se que existem diferenças estatisticamente relevantes entre os valores das séries 10d e 12,5d, bem como entre as séries 10d e 15d. Entretanto, não se verificou uma diferença significativa entre as séries 12,5d e 15d.

Figura 4: Modo de ruptura apresentado nos CPs das três séries.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

A análise dos valores médios de MOR apresentados na Tabela 2, revelam incrementos progressivos em relação às séries de V-0d-0L para P-30d-1L e P-30d-2L. Essa tendência pode estar relacionada ao efeito do reforço, com as séries com reforço (P-30d-1L e P-30d-2L) exibindo valores médios mais elevados, indicando uma melhoria potencial nas propriedades mecânicas. Esses resultados estão alinhados com as ideias de autores (Yang *et al.*, 2016), que ressaltam os ganhos na resistência mecânica decorrentes de abordagens de reforço em compósitos de madeira.

Tabela 2: Valores de módulo de ruptura e rigidez à flexão em cada série.

Valor	V-0d-0L		P-30d-1L		P-30d-2L	
	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE
Máximo (MPa)	56,01	7174	57,79	7763	62,77	7923
Médio (MPa)	50,84	6597	51,79	6488	52,28	6916
Mínimo (MPa)	41,43	5971	43,05	3554	40,44	5324
CV (%)	7,47	5,93	8,49	15,96	12,51	7,35
f_k (MPa)	48,39	-	47,27	-	43,82	-

f_k : valor característico da resistência mecânica; CV: coeficiente de variação. Fonte: Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os valores médios de e rigidez à flexão (MOE) apresentados na Tabela 2, mostram que, comparadas com a série sem reforço (V-0d-0L), houve um aumento da rigidez na série com reforço simultâneo nas regiões tracionada e comprimida (P-30d-2L), mas não houve incremento de rigidez na série com reforço na apenas na região comprimida (P-30d-1L). Os resultados da análise estatística do teste T de *student* sugerem que o reforço na região tracionada e comprimida (P-30d-2L) impactou de maneira notável a resposta mecânica, mas não é possível afirmar que houve melhoria na série com reforço na área comprimida em relação a série sem reforço em termos de resistência mecânica.

Nas três séries de ensaios de flexão, observou-se que o modo de ruptura ocorreu predominantemente devido à tração nas fibras inferiores dos corpos de prova. Cada um desses corpos de prova apresentou ruptura em um ponto específico, variando entre o local de aplicação da carga ou no ponto intermediário do vão entre os apoios, conforme mostra a Figura 5. Esse modo de ruptura está em consonância com estudos de Yang *et al.* (2016).

Figura 5: Modos de ruptura apresentados nos CPs das três séries.

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

CONCLUSÕES

Com base nos resultados do presente trabalho, ao comparar o comprimento de ancoragem de 15d e 12,5d com 10d, foi possível determinar que houve acréscimo de resistência mecânica em ligação com barra de aço rosqueada colada com adesivo poliuretano à base de mamona em LVL de paricá sujeita a esforços de tração, mas não houve aumento significativo na resistência mecânica na série de 15d em comparação com a série de 12,5d. Ao analisar o modo de ruptura dos corpos de prova sujeitos à tração, fica evidente que em todas as séries cisalhamento na interface adesivo-barra. Dessa forma, não foi possível determinar experimentalmente o comprimento de ancoragem mínimo da ligação estudada.

A disposição de barras rosqueadas de aço, com comprimento de 30d, coladas simultaneamente na parte tracionada e comprimida da viga, com resina poliuretana derivada de óleo de mamona, aumentou significativamente a resistência mecânica e rigidez de peças fletidas de LVL de paricá, mas não foi observar esse aumento em reforço com barra de aço rosqueada apenas na região comprimida em comparação com vigas LVL sem reforço. Nas três séries de ensaios de flexão, o modo de ruptura ocorreu somente devido à tração nas fibras inferiores dos corpos de prova.

APOIO FINANCEIRO

Os autores agradecem ao Grupo Arboris pelo fornecimento dos painéis LVL e a Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL) pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR 7190 - 3: Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: 2022.

Chans, D. O.; Cimadevila, J. E.; Gutiérrez, E. M. Influence of the geometric and material characteristics on the strength of glued joints made in chestnut timber. *Materials and Design*,

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 11 de novembro de 2023- Imperatriz-MA

2009, 30, 132532.

Dias, J. M. S. Ligações Estruturais Com Barras De Aço Coladas Com Epóxi Em Madeiras De Alta Densidade – Influência dos defeitos da madeira e dos erros de produção na resistência mecânica. Bahia. 2015. 208f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Construção e Estruturas, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

Lima, J. T. et al. Influence of the paricá wood (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) natural durability on the mechanical performance of adhesively bonded joints. *Construction and Building Materials*, 2022, 315, 355-361.

Limberger, H. J.; Mendes Mählmann, C.; Lawisch Rodríguez, A.; de Cássia de Souza Schneider, R. Poliuretanos baseados em óleo de mamona. *Revista Jovens Pesquisadores*, 2013, 3, 3, 2013.

Negrão, J. H.; Balseiro, A.; Faria, J. A. Uso de Laminados de Carbono Para Reforço e Reabilitação de Vigas de Madeira. In: Congresso ibero-latino americano da madeira na construção, 2011.

Stefańska. A.; Cygan. M.; Batte. K.; Pietrzak. J. Application of Timber and Wood-based Materials in Architectural Design using Multi-objective Optimisation Tools. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 2021, 21, 3.

Steiger, R.; Serrano, E., Stepinac, M.; Rajčić, V.; O'Neill, C.; McPolin, D.; Widmann, R. Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and building materials*, 2015, 97, 90-105.

Tlustochowicz, G.; Serrano, E.; Steiger, R. State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Materials and Structures*, 2011, 44, 997–1020.

Yang, H.; Liu, W.; Lu, W.; Zhu, S.; Geng, Q. Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. *Construction and building materials*, 2016, 106, 550-563.

Zhang, X.; Jiang, Z.; Fei, B.; Fang, C.; Liu, H. Experimental performance of threaded steel glued into laminated bamboo. *Construction and Building Materials*, v. 249, p. 118780, 2020.