

Avaliação dos módulos de elasticidade por meio de ensaios não destrutivos para madeira laminada colada

Evaluation of the modulus of elasticity by non-destructive testing for glued laminated timber

DOI:10.34117/bjdv8n6-298

Recebimento dos originais: 21/04/2022

Aceitação para publicação: 31/05/2022

Clara Gaspar Fossi de Souza

Mestranda

Instituição: Universidade de São Paulo

Endereço: Av. Trab. São Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP,

CEP: 13566-590

E-mail: clara.gaspar@hotmail.com

Leonor da Cunha Mastela

Doutoranda

Instituição Universidade Federal do Espírito Santo

Endereço: Av. Governador Carlos Lindemberg, 316, CEP: 29550-000, Jerônimo

Monteiro, Espírito Santo, Brasil

E-mail: leonor.mastela@ufes.br

Ramon Ferreira Oliveira

Mestrando

Instituição: Mississippi State University

Endereço: 201 Locksley Way Starkville, MS 39759, USA

E-mail: rfo17@msstate.edu

Augusto Melo Moulin Breda

Mestrado

Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo

Endereço: Av. Governador Carlos Lindemberg, 316, CEP: 29550-000, Jerônimo

Monteiro, Espírito Santo, Brasil

E-mail: augustomoulin@gmail.com

Vinicius Borges Taquetti

Doutorando

Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo

Endereço: Av. Governador Carlos Lindemberg, 316, CEP: 29550-000, Jerônimo

Monteiro, Espírito Santo, Brasil

E-mail: viniciustaquetti@hotmail.com

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Doutorado

Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo

Endereço: Av. Governador Carlos Lindemberg, 316, CEP: 29550-000, Jerônimo

Monteiro, Espírito Santo, Brasil

E-mail: p_gutemberg2001@yahoo.com.br

RESUMO

Para a fabricação de madeira laminada colada (MLC) é preciso avaliar as propriedades das tábuas tanto pela classificação visual quanto por ensaio mecânico. Dentre os ensaios mecânicos, pelo método de avaliação não-destrutiva para madeira serrada, destacam-se vibração transversal, vibração longitudinal, *stress wave* e flexão estática. O objetivo deste trabalho foi propor a utilização de métodos de ensaios não-destrutivos por meio das vibrações e onda de tensão para estimar o módulo de elasticidade na flexão de tábuas de madeira. O método proposto foi testado e avaliado em uma amostra de 24 tábuas do material do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Foram obtidas boas correlações (0,95 a 0,97) entre o módulo de elasticidade da flexão estática e o módulo de elasticidade por meio dos ensaios de vibração transversal, longitudinal e *stress wave*. Além disso, verificou-se que o método de balanceamento das peças é indicado para fabricação de MLC. Desse modo, concluiu-se que os valores de correlação e médias aritmética e ponderada foram satisfatórias para se obter um melhor desempenho do MLC.

Palavras-chave: ensaio não-destrutivo, módulo de elasticidade, tábuas de madeira.

ABSTRACT

For the manufacture of glued laminated timber (MLC) it is necessary to evaluate the properties of the boards both by visual grading and mechanical testing. Among the mechanical tests, by the non-destructive evaluation method for sawn wood, are transverse vibration, longitudinal vibration, stress wave and static bending. The objective of this work was to propose the use of non-destructive testing methods by means of vibration and stress wave to estimate the modulus of elasticity in the bending of wood boards. The proposed method was tested and evaluated on a sample of 24 boards of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* hybrid material. Good correlations (0.95 to 0.97) were obtained between the static flexural modulus of elasticity and the modulus of elasticity by means of the transverse vibration, longitudinal vibration, and stress wave tests. In addition, it was found that the part balancing method is suitable for MLC fabrication. Thus, it was concluded that the correlation values and arithmetic and weighted averages were satisfactory to obtain a better performance of the MLC.

Keywords: non-destructive testing, modulus of elasticity, wood planks.

1 INTRODUÇÃO

A madeira laminada colada (MLC) é um material fabricado a partir de peças serradas de madeira coladas por meio de adesivos estruturais, as quais devem ser dispostas de forma a que suas fibras estejam paralelas entre si (LUZ et al., 2020; CEPTELKA; MALO, 2017). A qualidade na fabricação e a performance estrutural de

elementos em MLC pode ser garantida pela realização de ensaios, que têm como função caracterizar as propriedades físicas e mecânicas das peças (FARIA et al., 2019). Portanto, para a avaliação das propriedades das tábuas deve-se adotar a classificação visual e mecânica (ROSA et al., 2020).

Na classificação visual, o inspetor verifica cada peça e limita o tipo, localização e dimensão dos defeitos que podem contribuir para a diminuição da resistência estrutural (CARREIRA, 2003). A classificação mecânica consiste em determinar as propriedades mecânicas do material, em particular o módulo de elasticidade (MOE) (CHRISTOFORO et al., 2013).

Dessa forma, peças de qualidade superior podem ser selecionadas para uso crítico, enquanto as de baixa qualidade, podem ser usadas em locais onde não seja necessária alta resistência e rigidez (ZANGIÁCOMO et al., 2017). Dentre os métodos empregados, os ensaios não destrutivos são uma excelente alternativa para a obtenção de dados que garantam um produto com características de desempenho consistentes e bem definidas (MIRANDA et al., 2020; ALVES et al., 2013). Os principais ensaios não destrutivos empregados são: vibração transversal, vibração longitudinal, *stress wave* e flexão estática.

O objetivo deste trabalho foi propor a utilização de métodos de ensaios não-destrutivos por meio das vibrações e de onda de tensão para estimar o módulo de elasticidade na flexão de tábuas de madeira para a confecção de elementos estruturais de MLC.

2 METODOLOGIA

A madeira utilizada no presente estudo foi o clone de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* obtida pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estrutura da Madeira (LEMAD) no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM), localizado na cidade de Jerônimo Monteiro, ES. O lote de madeiras foi constituído por 24 tábuas, sendo elas com dimensões nominais de 60 × 5,5 × 2,5 cm (comprimento, largura e espessura, respectivamente).

Os ensaios não destrutivos de vibração transversal livre, vibração longitudinal, *stress wave* e flexão estática foram realizados em todas as tábuas.

Para determinação do módulo de elasticidade por vibração transversal livre, foi utilizado a norma ASTM E1876 (ASTM, 2007) e ASTM C215 (ASTM, 2008), por meio do *software* Sonelastic, que analisa as vibrações transitórias, o que permite obter as

frequências para o cálculo dos módulos elásticos e as respectivas taxas de atenuação para o cálculo do amortecimento. O *software* capta as frequências e aponta o valor do módulo de elasticidade (MOE). Para determinação do módulo de elasticidade por vibração longitudinal, foi utilizado a norma ASTM E1876 (ASTM, 2007), também por meio do *software* Sonelastic.

Para determinação do módulo de elasticidade pelo *stress wave*, foi utilizado o equipamento FAKOPP *Microsecond* Timer da empresa FAKOPP Ent. As agulhas (sensores) foram colocadas nas extremidades das tábuas, onde foi medido o tempo de propagação de ondas de tensão. A onda é impulsionada com martelo no sensor (*start*), em seguida, o equipamento apresenta o tempo de propagação.

Para determinação do módulo de elasticidade por flexão estática, foi utilizada a norma ASTM D143. O ensaio foi realizado com auxílio de um anel dinamométrico conectado a prensa hidráulica e um relógio comparador para medir o deslocamento (flecha). De modo que foi aplicada uma carga na região central da peça de madeira até atingir um deslocamento de 2,8 mm.

Logo após a obtenção dos módulos de elasticidade das tábuas, pelos ensaios descritos, foram feitos os gráficos de correlação, relacionando os ensaios de vibração transversal livre, vibração longitudinal e *stress wave* com a flexão estática. Em seguida, as tábuas foram organizadas em ordem crescente de acordo com os módulos de elasticidade da flexão estática. Para montagem de cada elemento de MLC, um conjunto de quatro tábuas foram sobrepostas. Sendo assim, foram formados seis conjuntos para a confecção dos elementos estruturais de MLC.

Na montagem dos elementos, as tábuas com maior módulo de elasticidade foram alocadas nas regiões mais solicitadas do elemento. Em contrapartida, as peças de menor módulo foram dispostas nas regiões de menor solicitação, ou seja, próximas a linha neutra do elemento estrutural.

Para estimar o valor do módulo de resistência do elemento MLC, antes de testá-lo, foi calculado o valor médio aritmético do módulo das tábuas que constitui a peça, de acordo com a equação:

$$E_{médio} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad \text{Equação 1}$$

Em que $E_{m\u00e9dio}$ \u00e9 o m\u00f3dulo m\u00e9dio aritm\u00e9tico estimado para a pe\u00e7a estrutural, E_i \u00e9 o m\u00f3dulo da t\u00e1bua i (com i variando de 1 at\u00e9 n), e n \u00e9 o n\u00famero de t\u00e1buas que formam o elemento de MLC, ou seja, 4.

Para levar em considera\u00e7\u00e3o a contribui\u00e7\u00e3o do m\u00f3dulo de elasticidade da t\u00e1bua em fun\u00e7\u00e3o de sua posi\u00e7\u00e3o no elemento de MLC, o m\u00f3dulo de elasticidade m\u00e9dio ponderado E_p tamb\u00e9m \u00e9 calculado de acordo com a seguinte equa\u00e7\u00e3o:

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o 2}$$

Em que E_i e I_i s\u00e3o, respectivamente, o m\u00f3dulo de elasticidade e o momento de in\u00e9rcia da t\u00e1bua i na se\u00e7\u00e3o ($i = 1, 2, \dots, n$), com $n = 4$.

Por fim, foi feita a homogeneiza\u00e7\u00e3o da se\u00e7\u00e3o em fun\u00e7\u00e3o do m\u00f3dulo de elasticidade da primeira t\u00e1bua posicionada no elemento estrutural de baixo para cima (como padr\u00e3o apenas). A partir disso, determinou-se o novo centro de gravidade. Em seguida, foi calculado o momento de in\u00e9rcia da se\u00e7\u00e3o de cada t\u00e1bua que constitui o elemento de MLC e, obteve-se o valor estimado do m\u00f3dulo de elasticidade m\u00e9dio ponderado.

A partir disso, obteve-se o coeficiente de varia\u00e7\u00e3o entre a m\u00e9dia aritm\u00e9tica simples para o m\u00f3dulo de elasticidade ($E_{m\u00e9dio}$) e a m\u00e9dia ponderada (E_p).

3 RESULTADOS

Na Tabela 1 est\u00e3o representadas as m\u00e9dias dos m\u00f3dulos de elasticidade das t\u00e1buas obtidos nos ensaios de vibra\u00e7\u00e3o transversal livre, vibra\u00e7\u00e3o longitudinal, *stress wave* e flex\u00e3o est\u00e1tica.

Tabela 1 - A m\u00e9dia dos valores dos m\u00f3dulos de elasticidade obtidos nas t\u00e1buas.

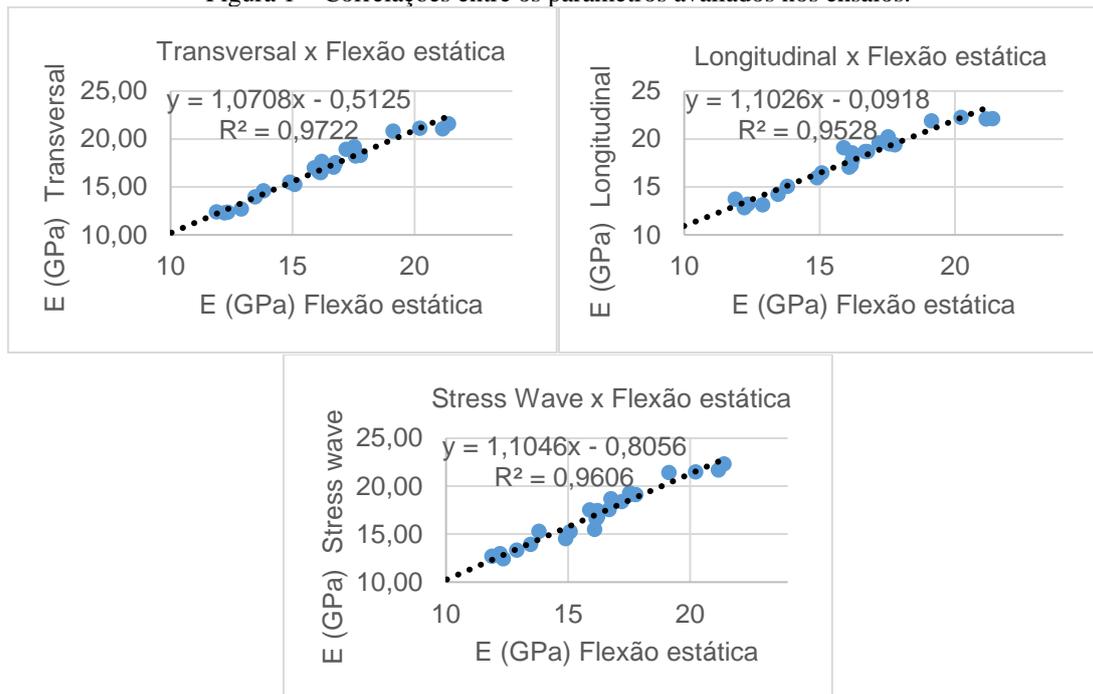
	VL (GPa)	VT (GPa)	SW (GPa)	FE (GPa)
M\u00e9dia Amostral	17,46	16,53	16,78	15,92

* VL: Vibra\u00e7\u00e3o Longitudinal; VT: Vibra\u00e7\u00e3o Transversal; SW: *Stress Wave*; FE: Flex\u00e3o Est\u00e1tica.

Fonte: Os autores.

Para analisar resultados encontrados nos ensaios n\u00e3o destrutivos, os valores obtidos nos ensaios de flex\u00e3o est\u00e1tica foram correlacionados com os valores de MOE dos outros ensaios (vibra\u00e7\u00e3o transversal livre, vibra\u00e7\u00e3o longitudinal e *stress wave*). Os resultados obtidos para as 24 t\u00e1buas s\u00e3o apresentados nos gr\u00e1ficos da Figura 1.

Figura 1 – Correlações entre os parâmetros avaliados nos ensaios.



Fonte: Os autores.

Para a montagem dos elementos em MLC, as tábuas foram denominadas L1, L2, L3 e L4, de acordo com a sua posição na peça em função dos módulos obtidos por meio do ensaio de flexão estática. A Tabela 2 apresenta as distribuições das tábuas (L1, L2, L3 e L4) nas seções dos elementos de MLC de acordo com os módulos.

Tabela 2 – Disposição das tábuas nos elementos de MLC.

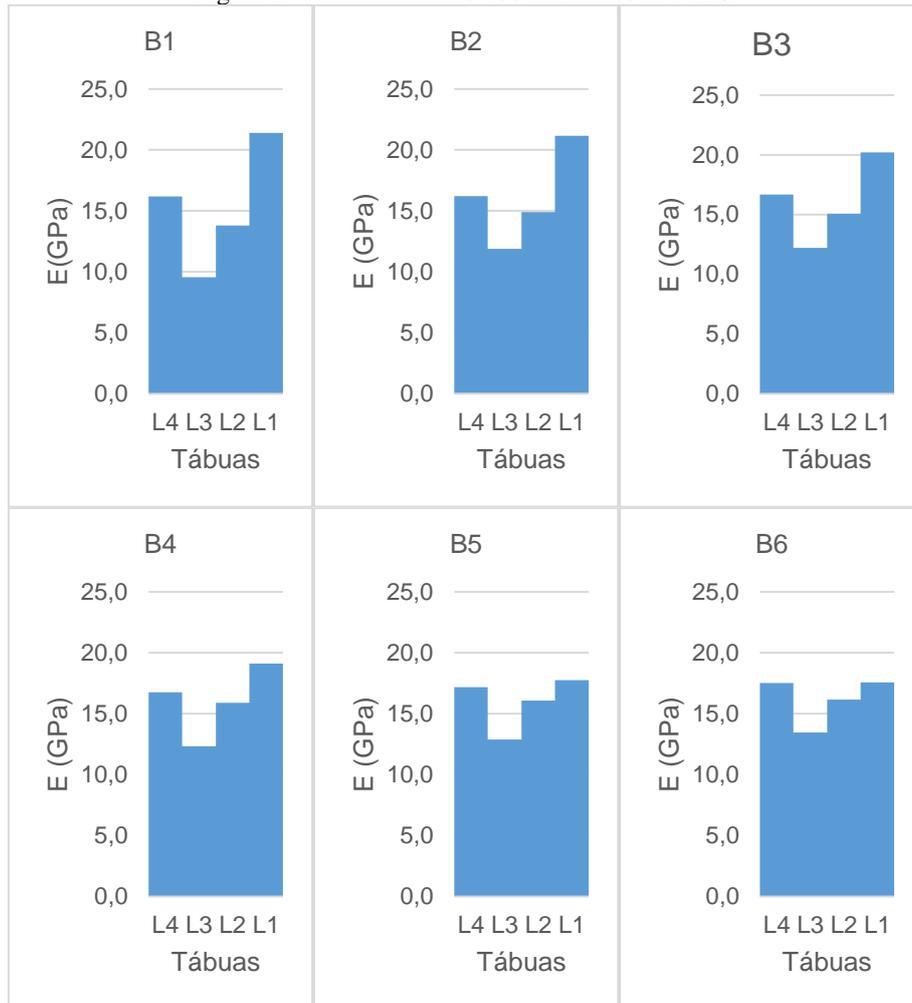
Distribuição das tábuas	B1		B2		B3		B4		B5		B6	
	A	E (GPa)										
L4	13	16,2	12	16,2	15	16,7	14	16,8	19	17,2	20	17,5
L3	1	9,6	5	11,9	2	12,2	4	12,3	3	12,9	6	13,5
L2	7	13,8	8	14,9	9	15,1	16	15,9	10	16,1	11	16,2
L1	23	21,4	22	21,2	24	20,2	21	19,1	17	17,8	18	17,6

*B: elemento de MLC; A: Amostra; E: Módulo de elasticidade.

Fonte: Os autores.

A configuração do balanceamento das tábuas para a confecção dos elementos de MLC é apresentada nos gráficos da Figura 2.

Figura 2 – Balanceamento dos elementos de MLC.



Fonte: Os autores.

A Tabela 3 apresenta a identificação dos elementos de MLC, sua média aritmética simples para o módulo de elasticidade ($E_{médio}$), a média ponderada (E_p) e a diferença, em porcentagem, da relação entre a média ponderada e a média simples. Os valores de $E_{médio}$ e E_p são expressos em GPa.

Tabela 3 – Valores dos módulos de elasticidade médios obtidos para os elementos de MLC.

Elemento de MLC	$E_{médio}$ (GPa)	E_p (GPa)	Diferença
B1	15,2	18,4	17,0%
B2	16,0	18,4	12,8%
B3	16,0	18,1	11,2%
B4	16,0	17,6	9,0%
B5	16,0	17,1	6,5%
B6	16,2	17,2	6,0%

Fonte: Os autores

4 DISCUSSÃO

De acordo com os resultados obtidos, o módulo de elasticidade por meio da flexão estática apresenta valor inferior ao encontrado utilizando os ensaios não destrutivos (vibração longitudinal, vibração transversal e *stress wave*). Este comportamento confirma resultados apresentados na literatura (SEGUNDINHO et al., 2013; SHEN et al., 2011). A superioridade do módulo obtidos por ensaios dinâmicos em relação ao ensaio de flexão estática se deve a natureza viscoelástica da madeira (RIBEIRO et al., 2016)

Na avaliação dos gráficos de correlação, os resultados de R^2 variaram de 0,95 a 0,97, isso indica uma forte correlação entre os valores de módulos de elasticidade obtidos nos ensaios. Estudos que relacionam ensaios de flexão estática aos ensaios dinâmicos comprovam que os valores dos módulos de elasticidade apresentam boas correlações. Calil e Miná (2003) obtiveram coeficiente de correlação de 98% entre o módulo de elasticidade estático e o dinâmico para peças de pinus. A qualidade de lâminas produzidas com a madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum*) foi avaliada pelo método *stress wave* (MELO et al, 2013). Os resultados mostraram que existe forte correlação entre a velocidade de propagação de ondas com o módulo de elasticidade dinâmica, assim como o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade, obtido em ensaio de flexão estática.

Conforme os estudos apresentados os ensaios de vibração transversal livre, vibração longitudinal e *stress wave* podem ser utilizados para caracterização mecânica de peças de madeira. A classificação permite definir a localização das peças de acordo com a sua resistência. As lâminas com valores mais altos de módulo de elasticidade (MOE) devem ser colocadas na parte externa (camadas inferior e superior) e as lâminas com um baixo valor de MOE devem ser posicionadas próximo a linha neutra (camada central) (MASCIA et al., 2018). Esse processo permite maior aproveitamento de peças de madeira, quando é feito o emprego de peças de menor qualidade em zonas menos solicitadas e peças de maior resistência em zonas mais solicitadas (LESTARI et al., 2018).

Na distribuição das tábuas para execução dos elementos de MLC, percebe-se que os valores da média ponderada para os módulos de elasticidade (E_p) são maiores que os valores da média aritmética simples ($E_{médio}$). Houve uma variação de 6,0 a 17,0%. Esta ocorrência pode ser explicada pelo fato de que as tábuas com maiores módulos de elasticidade ficaram nas regiões mais solicitadas da peça, sendo que estas últimas têm maior contribuição no momento de inércia final do elemento estrutural (ZANGIÁCOMO

et al., 2017). Tal fato demonstra que a distribuição das tábuas de acordo com o módulo de elasticidade influencia as propriedades de rigidez do elemento estrutural.

5 CONCLUSÃO

Com a utilização dos ensaios não destrutivos de vibração transversal livre, vibração longitudinal e *stress wave* é possível efetuar uma adequada estimativa do módulo de elasticidade de elementos de MLC, sem a necessidade de retirada de corpos de prova para a execução de ensaios destrutivos.

O balanceamento na montagem dos elementos de MLC, com tábuas de módulo de elasticidade variados de baixo valores a alto, possibilita a execução de elementos de MLC com valores do MOE mais elevados e homogêneos. Além disso, o balanceamento garante maior aproveitamento de peças de madeira, já que é possível utilizar peças de menor resistência em zonas menos solicitadas e peças de maior resistência em zonas mais solicitadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio do Programa Institucional de Iniciação Científica (PIIC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pela concessão da bolsa para o desenvolvimento do projeto, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio aos pesquisadores por meio de projetos de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. C. et al. Application of the Nondestructive Method of Drill Resistance for Determination of the Strength of Brazilian Tropical Woods. **IJET: International Journal of Engineering & Technology**, v. 13, p. 69-73, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 143**: Standard test methods for small clear specimens of timber. Philadelphia, PA, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876 - 09**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C215-08**: Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Philadelphia, 2008.

CALIL JÚNIOR, C.; MINÁ, A. J. S. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 335-338, 2003.

CARREIRA, M. R. et al. Avaliação de técnicas não-destrutivas aplicadas à madeira de pinus sp. In: **Conferência Pan-americana de ensaios não destrutivos**. 2003.

CEPELKA, M.; MALO, K. A. Moment resisting splice of timber beams using long threaded rods and grout-filled couplers – Experimental results and predictive models. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 560-570, 2017.

CHRISTOFORO, A. L. et al. Módulo de elasticidade em vigas de madeira de dimensões estruturais pelo método dos mínimos quadrados. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p. 981-988, 2013.

FARIA, D. L. et al. Number of laminae on the mechanical behavior of glued laminated timber (glulam) of *Toona ciliata* produced with vegetable polyurethane adhesive. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, 2019.

LESTARI, A. S. R. D. et al. The physical and mechanical properties of glulam made from pine and Jabon Woods. **Journal of Tropical Wood Science and Technology**, v. 16, p. 93-101, 2018.

LUZ, Arthur Bueno et al. Aplicação da madeira laminada colada (MLC) como vigas de pontes: uma análise sob o olhar do projeto de revisão da NBR 7190/1997/Application of collated laminated wood (MLC) as beams of bridges: an analysis under the view of the NBR 7190/1997 review project. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 59283-59306, 2020.

MELO, R. R. et al. Avaliação das propriedades físicas, químicas, mecânicas e de superfície de lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 2, p. 238-249, 2013.

MIRANDA, Eduardo Hélio de Novaes et al. Utilização da técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) para o estudo do módulo de elasticidade de painéis de madeira compensada. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 24766-24772, 2020.

RIBEIRO, E. S. et al. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. **Nativa**, v. 4, n. 2, p. 103-106, 2016.

ROSA, T. O. et al. Classificação visual e mecânica da espécie *Cryptomeria japonica* D. Don para utilização em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 451-462, 2020.

SEGUNDINHO, P. G. A. et al. Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 7-14, 2013.

SHEN, S. et al. Evaluation of mechanical properties of structural larch sawn lumber by machine stress rating. **Science & Technology Review**, v. 29, n. 6, p. 54-56, 2011.

ZANGIÁCOMO, A. L. et al. Glued laminated timber produced with tropical brazilian wood species. **Journal of Applied Science and Technology**, v. 23, p. 1-12, 2017.