

Relações entre os módulos de elasticidade à compressão, tração e flexão para madeiras tropicais

Relationships between the compressive, tensile, and flexural elasticity modulus for tropical woods

José Ricardo Gabriel Kuniyoshi 

Fabricio da Silva Aguiar 

Cleyton Éder Rodrigues Rocha 

Clara Gaspar Fossi de Souza 

André Luis Christoforo 

Fernando Menezes de Almeida Filho 

Francisco Antonio Rocco Lahr 

Resumo

A NBR 7190-3 (ABNT, 2022) apresenta diferentes métodos para determinar o módulo de elasticidade da madeira, permitindo a adoção de equivalência entre o módulo de elasticidade na compressão (E_{c0}) e na tração (E_{t0}). Por outro lado, não apresenta uma forma de estimar o módulo de elasticidade na flexão (E_{M0}), e tais estimativas não consideram a variação das estruturas anatômicas das espécies. Diante dessa lacuna, é necessário avaliar se essas equações são válidas para diferentes espécies. O presente artigo avaliou as propriedades elásticas de três espécies: Cumaru (*Dipteryx odorata*), Marupá (*Simarouba amara* Aubl., *Simaroubaceae*) e Roxinho (*Peltogyne* spp., *Leguminosae*). Para isso, realizou-se o ensaio não destrutivo de flexão, seguido de ensaios à compressão e à tração. Imagens microscópicas foram comparadas, para compreender a influência das estruturas anatômicas nas propriedades de rigidez. Os resultados confirmaram a equivalência entre E_{c0} e E_{t0} . A maior concentração de parênquimas no Cumaru e no Roxinho é responsável pelos valores estatisticamente inferiores de E_{M0} em relação a E_{c0} e E_{t0} .

Palavras-chave: Madeira. Módulo de elasticidade. Compressão paralela às fibras. Tração paralela às fibras. Flexão estática.

Abstract

*The NBR 7190-3 (ABNT, 2022) presents various methods to determine the wood's modulus of elasticity, allowing for the adoption of equivalence between the modulus of elasticity in compression (E_{c0}) and tension (E_{t0}). However, it does not provide a way to estimate the modulus of elasticity in bending (E_{M0}), and such estimates do not consider the variation in anatomical structures among species. Faced with this gap, it is necessary to evaluate whether these equations are valid for different species. This article evaluated the elastic properties of three species: Cumaru (*Dipteryx odorata*), Marupá (*Simarouba amara* Aubl., *Simaroubaceae*) and Roxinho (*Peltogyne* spp., *Leguminosae*). For this purpose, a non-destructive flexural test was initially conducted, followed by compression and tension tests. Microscopic images were compared to understand the influence of anatomical structures on stiffness properties. The results confirmed the equivalence between E_{c0} and E_{t0} . The higher concentration of parenchyma cells in Cumaru and Roxinho is responsible for statistically lower values of E_{M0} compared to E_{c0} and E_{t0} .*

Keywords: Wood. Modulus of elasticity. Compression parallel to the grain. Tension parallel to the grain. Static bending.

¹José Ricardo Gabriel Kuniyoshi
¹Universidade de São Paulo
São Carlos - SP - Brasil

²Fabricio da Silva Aguiar
²Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

³Cleyton Éder Rodrigues Rocha
³Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

⁴Clara Gaspar Fossi de Souza
⁴Universidade de São Paulo
São Carlos - SP - Brasil

⁵André Luis Christoforo
⁵Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

⁶Fernando Menezes de Almeida
Filho
⁶Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

⁷Francisco Antonio Rocco Lahr
⁷Universidade de São Paulo
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 21/12/23
Aceito em 26/02/24

Introdução

A utilização da madeira apresenta notáveis vantagens que poucos materiais construtivos possuem, como: baixo consumo de energia em sua produção, sustentabilidade e baixo peso, quando comparada com o concreto e aço que são amplamente empregados em aplicações estruturais. De acordo com Calil Junior, Lahr e Dias (2003), a relação entre resistência e densidade da madeira é cerca de três e dez vezes superior à do aço e do concreto, respectivamente, configurando ser a madeira um material da construção civil que apresenta uma boa relação entre resistência e densidade.

Christoforo *et al.* (2013) e Ruthes *et al.* (2022) afirmam que em um projeto de estrutura de madeira é necessário conhecer as resistências e módulo de elasticidade do material, fornecidos via ensaios experimentais padronizados. Ter a compreensão das propriedades do material é fundamental para a avaliação das possíveis causas de manifestações patológicas que podem surgir ao longo da vida útil da estrutura. Um exemplo comum de manifestação patológica em estruturas de madeira submetidas à flexão é a ocorrência de flechas acentuadas, que podem estar associadas a deformações elásticas ou à fluência (Brito, 2014).

Ao avaliar as propriedades da madeira, é fundamental entender que se trata de um material anisotrópico. Isso significa que suas características variam dependendo da direção das fibras, em contraste com materiais isotrópicos, como o aço, onde as propriedades mecânicas são uniformes independentemente da direção. A fim de simplificar as análises, a madeira é comumente considerada como um material ortotrópico, que é um subconjunto da anisotropia. Nesse contexto, em um ponto específico, as propriedades são tratadas como variando em três direções ortogonais distintas: longitudinal, radial e tangencial (Dias *et al.*, 2019).

Dessa forma, ao caracterizar um lote de madeira, a variabilidade do módulo de elasticidade pode chegar a valores elevados próximos de 20% (Batista *et al.*, 2023). É também importante destacar que o módulo de elasticidade pode variar consideravelmente ao longo de uma única seção transversal de uma peça de madeira. Um estudo conduzido por Morales-Conde e Machado (2017) mostrou que, em madeira de Pinus, o módulo de elasticidade possui uma variabilidade relativa em torno de 11% ao longo da seção transversal, superior à variabilidade relativa da densidade, próxima de 6%. Além disso, observa-se que o módulo de elasticidade pode demonstrar uma tendência de aumento à medida que a altura ou a largura do corpo de prova diminui, embora não esteja diretamente vinculado à densidade ou à largura dos anéis de crescimento (Totsuka *et al.*, 2021).

As propriedades elásticas da madeira também estão intrinsecamente ligadas ao tipo de carga à qual a peça está sujeita. Nesse contexto, a Norma Brasileira NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) oferece diretrizes para a obtenção dos valores do módulo de elasticidade para madeiras nativas em diferentes situações: compressão paralela às fibras (E_{c0}), tração paralela às fibras (E_{t0}), compressão perpendicular às fibras (E_{c90}) e flexão estática (E_{M0}). No entanto, a realização de múltiplos ensaios pode resultar em custos elevados e requerer um tempo considerável. Por esse motivo, é pertinente avaliar se esses valores podem vir a ser equivalentes ou dependentes uns dos outros, a fim de evitar a realização de uma grande quantidade de ensaios.

A análise da equivalência estatística entre os módulos de elasticidade associados a três tipos distintos de solicitações foi objeto de estudo realizado por Almeida *et al.* (2020). Nesse estudo, foram conduzidos ensaios em 30 espécies de madeira, em que foram considerados 12 corpos de prova separados para cada tipo de ensaio em cada espécie. Os resultados revelaram uma equivalência estatística significativa entre as médias dos grupos de E_{c0} (compressão paralela às fibras) e E_{t0} (tração paralela às fibras). Entretanto, essa equivalência não foi observada na relação $E_{c0} = E_{M0}/0,9$, conforme estabelecido para dicotiledôneas na NBR 7190 (ABNT, 1997). Em virtude desses achados, Almeida *et al.* (2020) propuseram uma revisão dessa consideração normativa, sugerindo a relação $E_{c0} = E_{M0}/0,98$.

É importante ressaltar que nas versões atualizadas das normas brasileiras relacionadas à madeira, a NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) e a NBR 7190-3 (ABNT, 2022b), a relação entre o módulo de elasticidade na compressão e na flexão, conforme prevista na versão anterior, não mais subsiste. No entanto, a equivalência entre o módulo de elasticidade obtido na compressão e na tração foi mantida.

Essas relações entre as propriedades elásticas normalmente são determinadas a partir de ensaios de lotes de diversas espécies. É feita uma abordagem generalizada, em que se considera que a expressão é tida como válida para todas as espécies do grupo amostral. Entretanto, é importante verificar se estas expressões são válidas particularmente para cada espécie, uma vez que as características anatômicas influem na diferença nas propriedades de rigidez entre as espécies (de Borst; Bader; Wikete, 2012).

Quando analisada a microestrutura, as paredes das fibras são as maiores responsáveis por proporcionar as propriedades de rigidez da madeira das folhosas (Dahle; Grabosky, 2010). Por outro lado, espécies com baixo

módulo de elasticidade tendem a ter madeira rica em parênquimas (Ziemińska; Westoby; Wright, 2015), que são células com densidade e rigidez muito inferiores às das fibras (Obataya; Kitin; Yamauchi, 2007) e com amido armazenado em seu interior. Sua presença diminui a resistência e rigidez principalmente quando solicitada à tração. Além da fração de célula de parênquimas na madeira, outras características como padrões de distribuição, formato, espessura da parede além de outras propriedades dos parênquimas podem interferir nas propriedades mecânicas da madeira (Ziemińska; Westoby; Wright, 2015). A Figura 1 mostra esquematicamente a microestrutura das madeiras de folhosas.

Medeiros Neto, Paes e Silva (2016) ao avaliarem as madeiras Teca (*Tectonagrandis* L. F.) e Mogno Africano (*Khaya ivorensis*), perceberam que por mais que o Mogno possuísse maior massa específica, em relação à Teca, seu valor de módulo de elasticidade à flexão estática foi menor. Os autores acreditam que esse fato possa ter ocorrido devido a maior presença de células de parênquima no Mogno, que influencia no acréscimo da massa específica, porém não contribui para a resistência convencional à flexão estática.

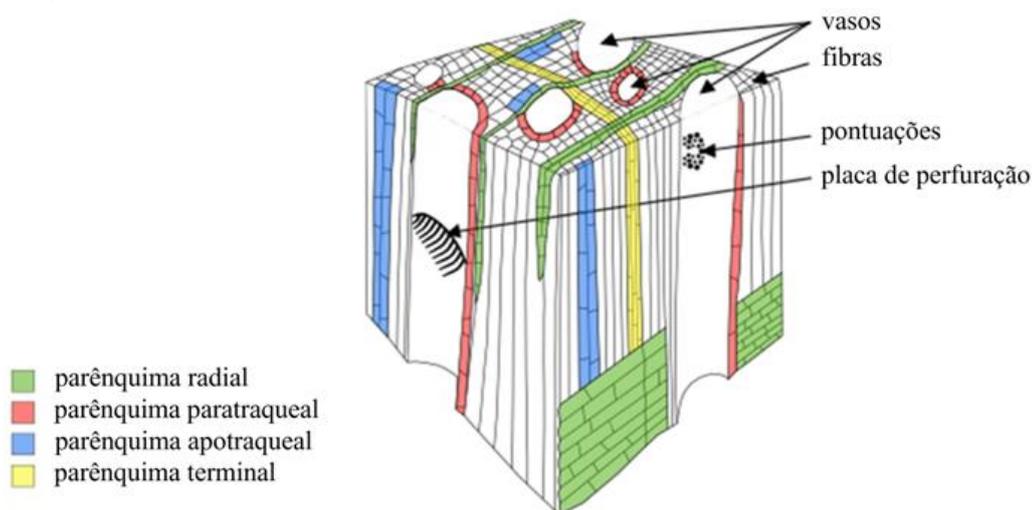
Nesse cenário, o presente estudo avaliou as propriedades de rigidez de três espécies de madeira tropical (Cumarú, Marupá Roxinho), submetidas a três diferentes tipos de solicitação mecânica: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão. Contudo, diferentemente de Almeida *et al.* (2020), o presente estudo verificou primeiramente o módulo de elasticidade na flexão estática em um ensaio não destrutivo e na fase linear-elástica em um corpo de prova e, em seguida, extraíram-se deste outros dois corpos de prova que foram ensaiados à compressão e à tração paralela às fibras. Isso permitiu uma comparação mais precisa entre os módulos de elasticidade determinados na mesma peça, ao evitar variações que poderiam surgir ao retirar corpos de prova de diferentes peças.

Dentre as três espécies estudadas na presente pesquisa, a madeira de Marupá é a única que é mole, leve e com camadas de crescimento indistintas. Além disso, como características anatômicas, possui poucos vasos, normalmente de pequena e média dimensão, envolvidos completamente por células de parênquimas com estreitos prolongamentos perpendiculares (IPT, 2023a).

A madeira de Roxinho, por sua vez, possui uma densidade alta e é dura ao corte, além de suas camadas de crescimento serem distintas e separadas por zonas fibrosas tangenciais e por células de parênquimas. Seus vasos são pouco numerosos, e seus parênquimas possuem uma distribuição paratraqueal aliforme de extensão linear, com confluências (IPT, 2023b).

A madeira de Cumarú também possui uma densidade alta e é dura ao corte. Suas camadas de crescimento são pouco distintas, demarcadas por zonas fibrosas. Seus parênquimas axiais são apenas visíveis com aumento por lente e ficam agrupados em formas losangulares e em contato direto com os vasos (IPT, 2023c).

Figura 1 - Esquema da microestrutura das madeiras de folhosas



Fonte: adaptado de Stupianek, Dolzblasz e Sokolowska (2021).

Materiais e métodos

Espécies de madeiras utilizadas

Para os ensaios, foram selecionadas as seguintes espécies de madeira: Cumaru (*Dipteryx odorata*), Marupá (*Simarouba amara* Aubl., *Simaroubaceae*) e Roxinho (*Peltogyne* spp., *Leguminosae*). A escolha dessas espécies permite que seja possível avaliar as diferenças entre espécies de classes de resistências distintas, bem como as diferenças entre espécies pertencentes à mesma classe. Além disso, trata-se de espécies cujas estruturas anatômicas apresentam diferenças entre si. É importante ressaltar que todas as peças de madeira utilizadas estavam isentas de defeitos e com teor de umidade em torno de 12% e foram fornecidas pela Madeireira do Cesar com sede na cidade de Brotas – SP. As peças são originárias de áreas certificadas da floresta tropical do sul do Pará. Usualmente estas são retiradas da parte central do tronco, para maior aproveitamento no desdobro.

Corpos de prova

Primeiramente, foram produzidos doze corpos de prova com dimensões de $(50 \times 50 \times 1150)$ mm para cada uma das espécies de madeira. Esses corpos de prova foram empregados no ensaio de flexão. Posteriormente, cada um deles foi subdividido em dois corpos de prova menores: um com dimensões de $(50 \times 50 \times 150)$ mm, utilizado no ensaio de compressão paralela às fibras, e o outro para o ensaio de tração paralela às fibras, todos de acordo com as diretrizes da NBR 7190-3 (ABNT, 2022b). Ou seja, para cada espécie, foram ensaiados 12 corpos de prova de flexão, 12 de compressão paralela às fibras e 12 de tração paralela às fibras, totalizando 36 corpos de prova para cada espécie e 108 no total. Um esquema dos corpos de prova e da forma de extração das peças para os ensaios de compressão e à tração paralela às fibras é apresentado na Figura 2.

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, USP, na máquina universal de ensaios AMSLER com capacidade de 250 kN.

Módulo de elasticidade e resistência mecânica

A fim de avaliar a rigidez e a resistência das amostras de madeira, foram empregados três métodos de ensaio, conforme indicado na Tabela 1. Foram realizadas doze repetições para determinar cada propriedade para cada uma das espécies, totalizando 108 ensaios. A norma brasileira NBR 7190-3 (ABNT, 2022b) estipula a execução destes métodos com um ciclo de carregamento e descarregamento prévio, antes de proceder ao aumento contínuo da carga até a ocorrência da ruptura. Além disso, o módulo de elasticidade foi calculado com base na inclinação da reta secante à curva de tensão pelo deslocamento dos respectivos métodos de ensaios.

Figura 2 - Modo de extração dos corpos de prova e dimensões (em milímetros) utilizadas em cada um dos ensaios

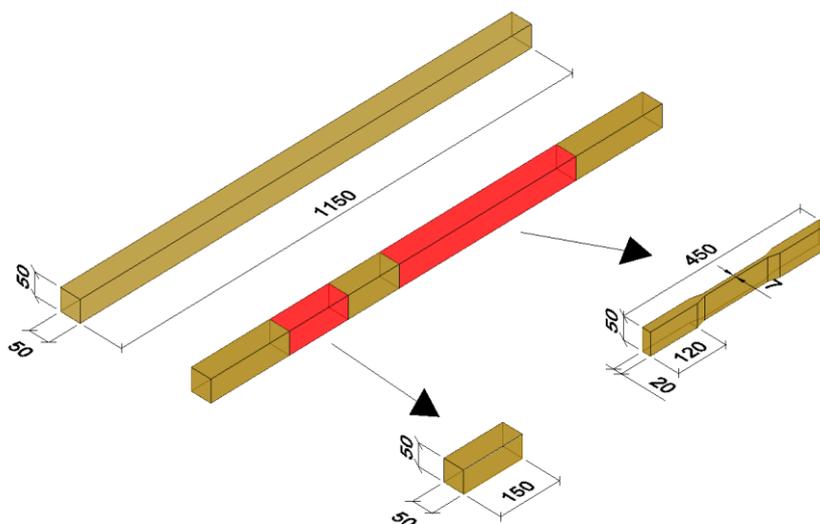


Tabela 1 - Métodos de ensaios para obtenção da resistência e da rigidez de corpos de prova de madeira segundo a NBR 7190-3 (ABNT, 2022b)

Métodos de ensaios	Corpos de prova	Resistência	Módulo de elasticidade
Módulo de elasticidade na flexão estática	50 x 50 x 1150 mm	$* f_M = \frac{M_{max}}{W_e}$	$E_{M0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%}) \cdot 4bh^3}$
Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras	50 x 50 x 150 mm	$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A}$	$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}}$
Módulo de elasticidade à tração paralela às fibras	20 x 50 x 450 mm	$f_{t0} = \frac{F_{t0,max}}{A}$	$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}}$

Nota: *valor não obtido devido a reutilização da peça do ensaio de E_{M0} para determinação dos E_{c0} e E_{t0} de uma mesma região da madeira.

No primeiro método (flexão estática), as variáveis L , b e h são, respectivamente, o comprimento, a largura e altura do corpo de prova, $F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ são as forças correspondentes a 10% e 50% da força máxima estimada por meio de um corpo gêmeo, $v_{10\%}$ e $v_{50\%}$ são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da força máxima estimada. No segundo e terceiro métodos (compressão e tração), $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ se referem às tensões correspondentes a 10% e 50% da resistência estimada por meio do corpo de prova gêmeo associado a cada método. Por sua vez, $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ representam as deformações específicas medidas nos corpos de prova, as quais estão relacionadas às tensões de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$, e são obtidas em duas faces opostas.

Como os corpos de prova foram extraídos da peça ensaiada à flexão, optou-se por limitar o ensaio ao deslocamento máximo no meio do vão de 3,5 mm, o que corresponde a 1/300 do vão livre, pequeno deslocamento, assim o ensaio foi realizado garantidamente no regime elástico. Dessa forma, foram medidas as forças aplicadas para que a flecha atingisse o valor de 2,1 mm e de 3,5 mm, permitindo determinar o módulo de elasticidade, conforme equação da Tabela 1, mas sem o risco de haver a plastificação da madeira. A Figura 3 ilustra os ensaios realizados para a obtenção dos módulos de elasticidade.

É importante destacar que os corpos de prova possuíam teores de umidade em torno de 10% a 15%, e todas as propriedades de resistência e rigidez determinadas no presente trabalho foram corrigidas para a umidade-padrão de 12 %, assim como recomendado pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022a).

Todos os corpos de prova foram submetidos a uma taxa de carregamento monotônico crescente de aproximadamente 10 MPa por minuto. Para a medição precisa dos deslocamentos, empregaram-se relógios comparadores da marca Mitutoyo, com uma precisão de 1µm, atendendo a precisão mínima de 0,01 mm requerida pela NBR 7190-3 (ABNT, 2022b).

Para a determinação dos valores característicos das resistências (5º percentil), foi utilizada a Equação 1, proposta pela NBR 7190-3 (ABNT, 2022b).

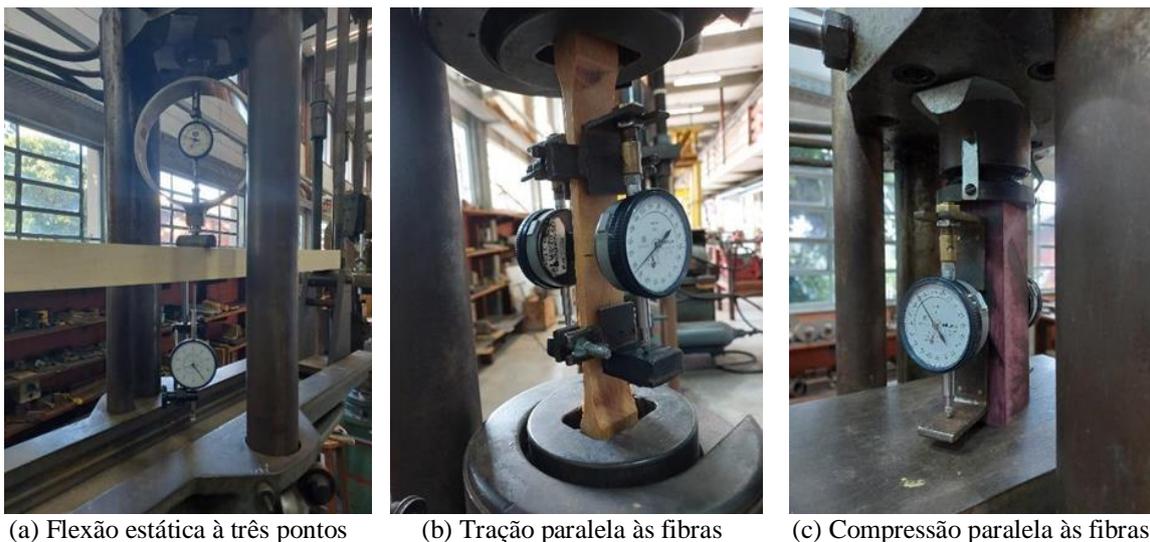
$$f_{wk} = \left(2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2)-1} - f_{n/2} \right) \cdot 1,10 \quad \text{Eq. 1}$$

Em que n é o número de amostras utilizadas nos ensaios mecânicos, e $f_1 \leq f_2 \leq f_3 \leq \dots \leq f_n$ são os resultados colocados em ordem crescente, não se tomando para f_{wk} valor inferior a f_1 ou a 70% do valor médio nem superior ao valor médio.

Análise microscópica

Para avaliar a estrutura anatômica e compreender as causas dos diferentes comportamentos entre as espécies, foram geradas imagens de microscopia óptica dos corpos de prova, com auxílio do equipamento SteREO Discovery.V8 Estereomicroscópio. Esta análise permite a identificação dos elementos da madeira, como vasos, fibras, raios e parênquimas com também seus padrões de distribuição.

Figura 3 - Ensaio realizados



Para tanto, foram utilizadas peças do mesmo lote de cada uma das espécies, com teor de umidade próximo de 12%, mas que não foram usadas nos ensaios mecânicos. De cada uma dessas peças, foram extraídos corpos de prova com dimensões aproximadas de 1 cm x 1 cm x 1 cm, de modo a garantir compatibilidade com o equipamento de microtomia. Para facilitar o processo de seccionamento das amostras no micrótomo, foi necessário amolecer os corpos de prova. Isso foi feito através de um cozimento em fogo médio em uma panela de pressão contendo uma mistura de água e ácido acético na proporção de 4:1, por um período de 6 horas. Após o amolecimento adequado, os corpos de prova foram seccionados utilizando um micrótomo de deslize, devidamente ajustado, resultando em seções com espessura variando entre 18 e 20 micrômetros.

Análise estatística

Para avaliar a influência do tipo de ensaio nos valores do módulo de elasticidade, recorreu-se à Análise de Variância (ANOVA) de medidas repetidas, com um nível de significância de 5%. Quando constatada diferença significativa entre os grupos, o teste de contraste de médias de Tukey foi utilizado. Além disso, foi utilizado o teste t pareado, com nível de significância de 5%, para verificar se os resultados obtidos vão ao encontro das relações $E_{c0} = E_{M0}/0,9$ (ABNT, 1997) e $E_{c0} = E_{M0}/0,98$ de Almeida *et al.* (2020). Para validar a ANOVA e o teste t pareado, foi realizado o teste de Anderson-Darling (AD), com um nível de significância de 5%, com o intuito de verificar a normalidade dos resíduos e das diferenças respectivamente. A análise estatística foi conduzida com o auxílio do *software* Minitab 19.

Resultados e discussões

Avaliação das propriedades mecânicas

Na Figura 4 são apresentados os valores médios e os intervalos de confiança das resistências mecânicas f_{c0} e f_{t0} de cada espécie. Além disso, a Tabela 2 apresenta os valores característicos da resistência à compressão ($f_{c0,k}$) e da resistência à tração paralela às fibras ($f_{t0,k}$), determinados com base na NBR 7190-3 (ABNT, 2022b). A madeira de Marupá apresentou os menores valores de resistência, enquanto a madeira de Cumaru apresentou os maiores. Considerando os resultados obtidos na Tabela 2, o Marupá, o Roxinho e o Cumaru são categorizados, segundo a NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), nas classes de resistência à compressão D30, D60 e D60 respectivamente.

Nas Tabelas 3, 4 e 5 são apresentados os valores dos módulos de elasticidade obtidos para as amostras de Marupá, Roxinho e Cumaru, respectivamente. Os valores-p obtidos pelo teste de Anderson Darling (AD) foram todos superiores a 5%, validando a ANOVA. Os resultados da ANOVA e do Teste de Tukey indicam que, para a amostra de Marupá, os três valores do módulo de elasticidade são estatisticamente equivalentes, com valor-p inferior ao nível de significância de 5%. Por outro lado, para a madeira de Cumaru e de Roxinho, só houve equivalência estatística entre E_{t0} e E_{c0} .

Dessa forma, a equivalência estatística entre E_{t0} e E_{c0} para as três espécies está em conformidade com o item 4.4 da NBR 7190-3 (ABNT, 2022b) como também com os estudos de Almeida *et al.* (2020), mostrando que essa generalização é válida independentemente da classe de resistência e da variabilidade das estruturas anatômicas da madeira.

Contudo, por não mostrar a mesma tendência para as três espécies, a equivalência entre E_{M0} com E_{t0} ou E_{c0} não pode ser generalizada. Como todos os valores-p encontrados pelo teste de Anderson Darling (0,067–0,150) foram todos superiores a 5%, é validada todas as análises por meio do teste t pareado apresentadas na Tabela 6.

Figura 4 - Valores médios e intervalos de confiança das resistências

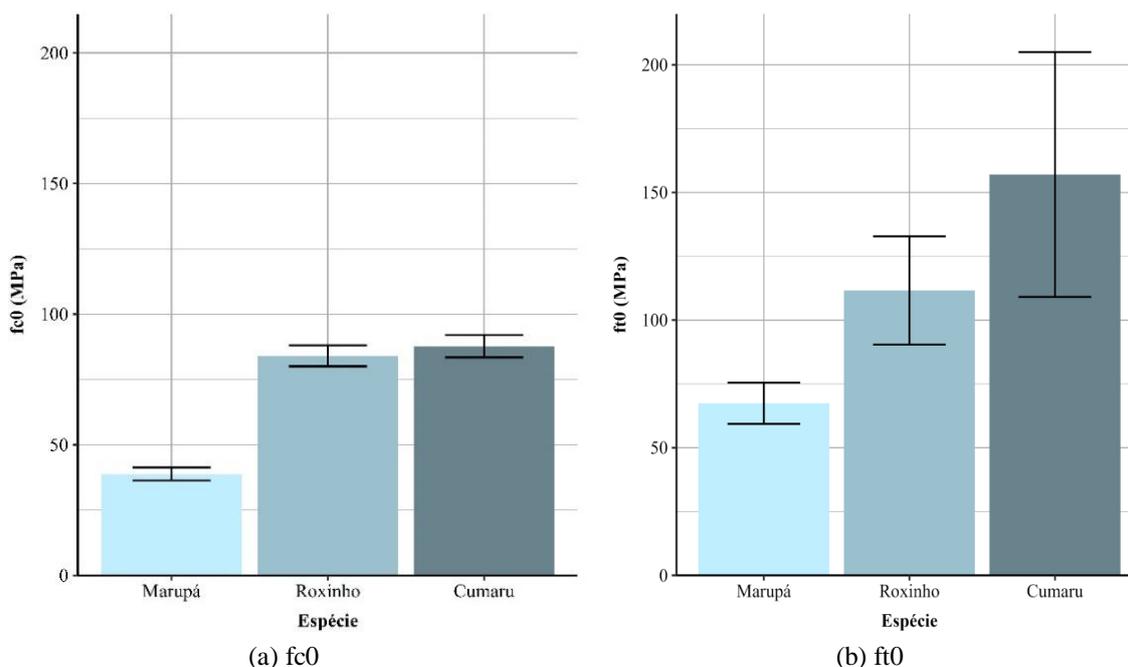


Tabela 2 - Valores característicos das resistências com base na NBR 7190-3 (ABNT, 2022b)

Espécie	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)
Marupá	35,63	58,68
Roxinho	84,07	97,20
Cumaru	87,76	109,91

Tabela 3 - Propriedades de rigidez da espécie de Marupá

Propriedade	Média	CV (%)	Máximo	Mínimo	AD	ANOVA	Agrupamento
E_{M0} (MPa)	9862	10,56	10750	7856	0,521	0,445	A
E_{c0} (MPa)	10587	16,94	13900	9416			A
E_{t0} (MPa)	9850	13,36	11206	7614			A

Tabela 4 - Propriedades de rigidez da espécie de Roxinho

Propriedade	Média	CV (%)	Máximo	Mínimo	AD	ANOVA	Agrupamento
E_{M0} (MPa)	20933	3,51	21517	19748	0,216	0,006	B
E_{c0} (MPa)	24234	3,55	25147	22605			A
E_{t0} (MPa)	22463	10,26	25362	19696			A

Tabela 5 - Propriedades de rigidez da espécie de Cumaru

Propriedade	Média	CV (%)	Máximo	Mínimo	AD	ANOVA	Agrupamento
E_{M0} (MPa)	17600	12,18	20857	15791	0,312	0,008	B
E_{c0} (MPa)	24887	21,61	32362	19682			A
E_{t0} (MPa)	25345	16,06	30392	21078			A

Tabela 6 - Verificação das relações entre E_{c0} e E_{M0}

Relação	Espécie	Teste t pareado	Equivalência
$E_{c0} = E_{M0}/0,90$	Marupá	0,6750	Sim
	Roxinho	0,0265	Não
	Cumaru	0,0263	Não
$E_{c0} = E_{M0}/0,98$	Marupá	0,5490	Sim
	Roxinho	0,0002	Não
	Cumaru	0,0104	Não

Da Tabela 6 é possível concluir que as relações $E_{c0} = E_{M0}/0,9$ e $E_{c0} = E_{M0}/0,98$ não permitem uma estimativa precisa do E_{c0} para as espécies de Roxinho e Cumaru. Essas relações foram adequadas apenas para madeira de Marupá, para a qual já se tinha verificado a equivalência de E_{M0} com E_{c0} . O comportamento distinto entre o Roxinho e o Cumaru com o Marupá mostra que essas relações não podem levar em consideração apenas os resultados de ensaios mecânicos.

Dessa forma, apesar de ser uma propriedade intrínseca do material, o módulo de elasticidade medido pode variar conforme o tipo de solicitação aplicada no ensaio. Isso se deve às características de cada espécie, uma vez que cada uma apresenta estruturas anatômicas particulares, dificultando que sejam estabelecidas equações gerais para estimar E_{c0} a partir de outras propriedades elásticas. Portanto, é fundamental a análise microscópica, com o intuito de compreender como as características anatômicas de cada espécie influem nas propriedades mecânicas.

Além disso, os valores do módulo de elasticidade na flexão (E_{M0}) foram consistentemente inferiores aos obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras (E_{c0}). Esses resultados sugerem que a recomendação da NBR 7190 (ABNT, 2022) de utilizar E_{c0} como parâmetro de projeto para espécies nativas pode levar à valores superestimados das propriedades elásticas de elementos estruturais de madeira sujeitos a esforços de flexão. Caso seja considerada uma rigidez de projeto superestimada, a determinação das flechas de projeto de vigas fletidas pode levar a valores menores do que os reais, o que representa um fator de risco para os estados limites de serviço da estrutura.

Comparação dos resultados dos ensaios com dados da literatura

Nas Tabelas 7, 8 e 9 são apresentados os resultados das características mecânicas encontradas na literatura para as três espécies avaliadas neste artigo e os intervalos de confiança dos achados desta pesquisa. Uma observação relevante é que, dentre os autores mencionados, nenhum abordou de forma abrangente as cinco características (resistência à tração e compressão, módulo de elasticidade na flexão, tração e compressão) para uma mesma espécie. Essa lacuna na análise ressalta a necessidade de abordagens mais abrangentes e comparativas na investigação das propriedades mecânicas das madeiras estudadas, a fim de proporcionar uma compreensão mais completa e integrada de seu desempenho.

Jesus, Logsdon e Finger (2015) classificaram vinte e seis espécies de madeira em relação à resistência, entre elas a madeira Marupá, de forma a subsidiar os engenheiros em seus projetos de estruturas de madeira. Os valores de resistência, Tabela 7, por eles apresentados revelaram-se inferiores aos resultados encontrados nesta pesquisa, apontando para possíveis variações nos contextos de teste ou nas condições de crescimento das árvores analisadas. Essa disparidade destaca a complexidade inerente à avaliação da resistência da madeira.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade à compressão, de maneira similar a Jesus, Logsdon e Finger (2015), Felipe *et al.* (2019), ao examinarem as propriedades mecânicas de compressão da madeira Marupá para a calibração de um modelo numérico, apresentaram valores para o módulo de elasticidade à compressão que se encontra dentro do intervalo de confiança estabelecido por esta pesquisa.

Ao confrontar os resultados obtidos nesta pesquisa com as estimativas de Alves, Pizzol e Carrasco (2017) e Ribeiro *et al.* (2019) para o módulo de elasticidade à compressão da madeira Roxinho, conforme apresentados na Tabela 8, observa-se uma variação nos valores médios, com Alves, Pizzol e Carrasco (2017) indicando um valor abaixo e Ribeiro *et al.* (2019) um valor acima do intervalo de confiança estabelecido neste estudo. Esta discrepância pode ser atribuída, em parte, às diferentes regiões geográficas de origem das espécies analisadas. A espécie *Peltogynediscolor* demonstra uma ampla distribuição pelo Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil. Por outro lado, a espécie *Peltogyne confertiflora* apresenta ocorrência confirmada exclusivamente no estado do Rio de Janeiro. Essas divergências regionais podem influenciar significativamente as propriedades mecânicas da madeira, destacando a importância de considerar a origem geográfica ao interpretar e comparar dados sobre as características dessa espécie madeireira.

A análise comparativa entre os resultados obtidos neste estudo e as pesquisas conduzidas por Silva (2012) e Almeida *et al.* (2020) revela que as propriedades mecânicas da madeira Cumaru, conforme apresentadas na Tabela 9, demonstram desempenho equivalente ou superior aos valores encontrados no intervalo de confiança deste artigo. Essa consistência nos resultados entre os estudos fortalece a confiança nas características mecânicas positivas atribuídas à madeira Cumaru, destacando sua robustez e adequação para diversas aplicações.

As discrepâncias observadas entre resultados de diferentes estudos, especialmente em relação à resistência da madeira Marupá e ao módulo de elasticidade à compressão do Roxinho, sublinham a importância da consideração dos contextos específicos de teste e das condições anatômicas das espécies analisadas.

Por fim, a maior parte dos resultados aqui obtidos, principalmente para a madeira Cumaru, foi ao encontro dos valores literários. Essa concordância fortalece a confiabilidade dos achados deste estudo e reforça a validade das propriedades mecânicas atribuídas.

Análise da estrutura anatômica

A Figura 5 apresenta imagens microscópicas das amostras de Marupá, Roxinho e Cumaru, em que é possível identificar elementos microscópicos típicos de madeiras tropicais, como vasos, fibras, raios e parênquimas, cabendo destacar que as propriedades químicas e físicas desses elementos influem nas propriedades mecânicas da madeira.

O Marupá (Figura 5a) possui uma microestrutura com os parênquimas axiais dispostos de forma paratraqueal aliforme de extensão linear, isto é, envolvendo completamente os elementos de vaso, com pequenas extensões perpendiculares. Além disso, poucos parênquimas axiais são observados entre as fibras. Esse tipo de disposição dos parênquimas axiais no Marupá também foi observado por Nisgoski, Muñiz e Ceccantini (2003).

Tabela 7 - Propriedades mecânicas da madeira Marupá

Propriedade	Referências		Intervalo de confiança dos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa
	Jesus, Logsdon e Finger (2015) - <i>Simarouba amara Aubl</i>	Felipe <i>et al.</i> (2019) - <i>Simarouba amara Aubl</i>	
f_{c0} (MPa)	27,3		$36,30 \leq \mu \leq 41,29$
f_{t0} (MPa)	34,15		$59,34 \leq \mu \leq 75,50$
E_{M0} (MPa)			$8769 \leq \mu \leq 10955$
E_{c0} (MPa)	8851	9513	$8705 \leq \mu \leq 12469$
E_{t0} (MPa)			$8469 \leq \mu \leq 11231$

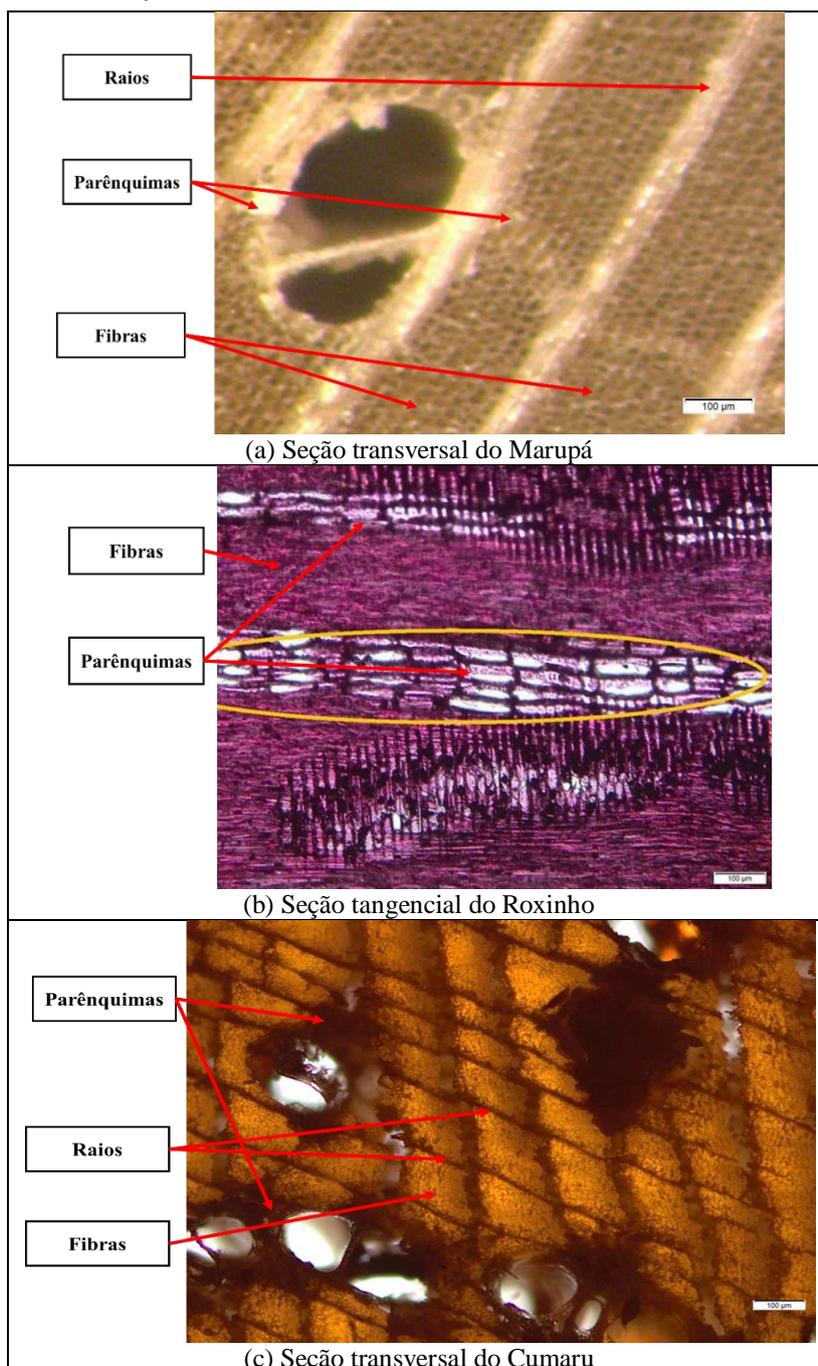
Tabela 8 - Propriedades mecânicas da madeira Roxinho

Propriedade	Referências		Intervalo de confiança dos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa
	Alves, Pizzol e Carrasco (2017) - <i>Peltogynediscolor</i>	Ribeiro <i>et al.</i> (2019) - <i>Peltogyne confertiflora</i>	
f_{c0} (MPa)			$80,06 \leq \mu \leq 88,09$
f_{t0} (MPa)			$90,37 \leq \mu \leq 132,79$
E_{M0} (MPa)			$20161 \leq \mu \leq 21705$
E_{c0} (MPa)	12024	29301	$23331 \leq \mu \leq 25136$
E_{t0} (MPa)			$20045 \leq \mu \leq 24881$

Tabela 9 - Propriedades mecânicas da madeira Cumaru

Propriedade	Referências		Intervalo de confiança dos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa
	Silva (2012) - <i>Dypterixodotora</i>	Almeida <i>et al.</i> (2020) - <i>Dypterixodotora (Aubl.) Willd.</i>	
f_{c0} (MPa)	98,91		$83,46 \leq \mu \leq 92,06$
f_{t0} (MPa)	116,38		$109,1 \leq \mu \leq 205,0$
E_{M0} (MPa)		24653	$15351 \leq \mu \leq 19849$
E_{c0} (MPa)	27796	22732	$19244 \leq \mu \leq 30531$
E_{t0} (MPa)	23198	21165	$21074 \leq \mu \leq 29615$

Figura 5 - Imagens microscópicas das madeiras analisadas



De forma similar, o Roxinho apresenta parênquima paratraqueal aliforme extensão linear. Contudo, como visto na Figura 5b, o Roxinho também apresenta regiões com parênquima marginal, isto é, com faixas perpendiculares aos raios.

Por outro lado, o Cumaru (Figura 5c) possui regiões com parênquima axial paratraqueal aliforme losangular e outras regiões com confluências dos parênquimas. Nesse caso, o parênquima envolve mais de um vaso, sem existir fibras dispostas entre eles.

Essa grande concentração de células de parênquima em uma região específica no Cumaru e no Roxinho proporciona uma menor resistência e rigidez local. Essa diminuição localizada das propriedades mecânicas é perceptível principalmente no ensaio de flexão, uma vez que, caso haja grande concentração de parênquimas na região inferior no meio do vão, em que há a maior solicitação à tração, os deslocamentos medidos acabam sendo superiores, proporcionando valores do módulo de elasticidade inferiores.

No ensaio de tração paralela às fibras, a influência da concentração de parênquimas na determinação do módulo de elasticidade pode ser menor, dado que a deformação é tida como a média de duas medidas em planos opostos do corpo de prova. Além disso, nesse ensaio, a tensão normal é tida como aproximadamente uniforme na seção e ao longo da peça. Por outro lado, no ensaio de flexão, o deslocamento é medido apenas no centro do vão, na região tracionada, justamente onde se tem a maior magnitude das tensões normais. Caso nessa região, haja uma concentração maior de parênquimas e de zonas de confluência, a rigidez tende a ser reduzida.

González *et al.* (2020) relata que a composição das madeiras moles é mais simples do que as madeiras duras, tendo menos tipos celulares, um arranjo mais regular e destacando que a microestrutura tecidual das madeiras moles sofre menos alterações em termos de forma e composição, sendo essas características anatômicas também visíveis na Figura 5a. Isso pode ser um dos motivos da madeira Marupá apresentar propriedades de rigidez semelhantes para compressão, tração e flexão.

Conclusões

Os resultados do presente estudo mostraram, por meio da ANOVA e do teste de Tukey, que há equivalência estatística entre E_{c0} e E_{t0} , para todas as três espécies estudadas, validando a relação proposta pela NBR 7190-3 (ABNT, 2022b). Por outro lado, a equivalência entre E_{c0} e E_{M0} só foi constatada para a amostra de Marupá, espécie de menor resistência entre as três estudadas e com maior homogeneidade na microestrutura, conforme observado nas imagens microscópicas.

Ou seja, mesmo que o módulo de elasticidade seja uma propriedade do material, os resultados dos ensaios mostraram que seu valor para as madeiras de Cumaru e Roxinho variou conforme o tipo de solicitação. Isso indica que a espécie e sua respectiva estrutura anatômica interferem na mensuração das propriedades elásticas da madeira. Além disso, mesmo que usadas relações $E_{c0} = E_{M0}/0,9$ e $E_{c0} = E_{M0}/0,98$, para considerar a redução do módulo de elasticidade medido na flexão, não se mostraram satisfatórias para estimar E_{c0} da madeira de Cumaru e de Roxinho. Isso mostra que as relações para estimativa de E_{c0} não podem ser generalizadas para todas as espécies, uma vez que cada uma apresentará um comportamento elástico diferente, em função de sua estrutura anatômica.

As imagens microscópicas mostraram alta concentração de células de parênquimas na madeira de Cumaru e de Roxinho. Como são células com propriedades de rigidez inferior em comparação às das fibras, para essas duas espécies, a presença significativa de parênquimas na região tracionada da peça ensaiada à flexão proporciona uma queda na rigidez local e maiores deslocamentos medidos no meio do vão. Como a espécie de Marupá apresenta uma estrutura anatômica mais homogênea, com uma distribuição essencialmente paratraqueal do parênquima, a influência da menor rigidez destas células é reduzida, e as propriedades elásticas não variam com o tipo de solicitação.

A NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) define que o módulo de elasticidade obtido no ensaio de compressão seja considerado como parâmetro de projeto. Entretanto, essa pesquisa evidenciou que essa consideração pode levar a um valor superestimado das propriedades elásticas, quando submetidas à flexão. Isso pode provocar cálculos de deslocamentos inferiores às flechas reais em vigas fletidas, uma vez que pode ocorrer uma redução no módulo de elasticidade na flexão, a depender das características anatômicas da espécie em questão.

Referências

- ALMEIDA, J. P. B. *et al.* Analysis of relations between the moduli of elasticity in compression, tension, and static bending of hardwoods. **BioRes**, v. 15, n. 2, p. 3278–3288, 2020.
- ALVES, R. C.; PIZZOL, V. T.; CARRASCO, E. V. M. Estimate of elastic stiffness constants of tropical hardwoods using ultrason. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2.; CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DE LA MADERA EN LA CONSTRUCCIÓN, 2., Buenos Aires, 2017. **Anais [...]** Buenos Aires, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1**: projeto de estruturas de madeira: parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-3**: projeto de estruturas de madeira: parte 3: métodos de ensaio para corpos de prova isentos defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro, 2022b.
- BATISTA, M. *et al.* Representativeness of the fiber parallel elasticity modulus value referring to the Brazilian standard C40 strength class in the design of timber structures. **Ciência Rural**, v. 53, n. 3, 2023.
- BRITO, L. D. **Patologia em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação**. São Carlos, 2014. 502 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003.
- 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, out. 2013.
- DAHLE, G. A.; GRABOSKY, J. C. Variation in modulus of elasticity (E) along Acer platanoides L. (Aceraceae) branches. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 9, n. 3, p. 227–233, 2010.
- DE BORST, K.; BADER, T. K.; WIKETE, Christoph. Microstructure-stiffness relationships of ten European and tropical hardwood species. **Journal of Structural Biology**, v. 177, n. 2, p. 532–42, 2012.
- DIAS, A. A. *et al.* **Estruturas de Madeira**: projetos, dimensionamento e exemplos de cálculo. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- FELIPE, T. R. C. *et al.* Análise não linear física e geométrica em ensaio de compressão paralela: caso de estudo na madeira Marupá. **Revista InterScientia**, v. 7, n. 2, p. 41–49, dez. 2019.
- GONZÁLEZ, O. M. *et al.* representative hardwood and softwood green tissue-microstructure transitions per age group and their inherent relationships with physical–mechanical properties and potential applications. **Forests**, v. 11, n. 5, p. 569, may 2020.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Informações sobre madeiras**: Marupá. 2023a. Disponível em: <https://madeiras.ipt.br/marupa/>. Acesso em: 07 fev. 2024.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Informações sobre madeiras**: Pau-roxo. 2023b. Disponível em: <https://madeiras.ipt.br/pau-roxo/>. Acesso em: 07 fev. 2024.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Informações sobre madeiras**: Cumaru. 2023c. Disponível em: <https://madeiras.ipt.br/cumaru/>. Acesso em: 07 fev. 2024.
- JESUS, J. M. H. de; LOGSDON, N. B.; FINGER, Z. Classes de resistência de algumas madeiras de Mato Grosso. **E&S Engineering and Science**, v. 3, n. 1, p. 35–42, 2015.
- MEDEIROS NETO, P. N.; PAES, J. B.; SILVA, J. G. M. da S. Efeito do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade da madeira por técnica não destrutiva. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 112, dez. 2016.
- MORALES-CONDE, M. J.; MACHADO, J. S. Evaluation of cross-sectional variation of timber bending modulus of elasticity by stress waves. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 617–625, mar. 2017.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G. I. B.; CECCANTINI, G. Caracterização anatômica macroscópica das madeiras utilizadas para laminação na região de Curitiba-PR. **Scientia Agraria**, v. 4, n. 1-2, p. 47-52, 2003.

OBATAYA, E.; KITIN, P.; YAMAUCHI, H. Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber-foam composite structure. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 5, p. 385-400, jun. 2007.

RIBEIRO, E. S. *et al.* Propriedades tecnológicas da espécie *Peltogyne confertiflora* (Mart. exHayne) Benth. **Revista Biodiversidade**, v. 18, p. 28-42, 2019.

RUTHES, H. C. *et al.* Influence of moisture content on physical and mechanical properties of *Vatairea* SP wood. **Revista Árvore**, v. 46, 2022.

SILVA, M. A. A. A. **Aplicação de conectores metálicos para tabuleiros mistos de madeira e concreto para estradas vicinais**. Manaus, 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.

SLUPIANEK, A.; DOLZBLASZ, A.; SOKOLOWSKA, K. Xylem Parenchyma: role and relevance in wood functioning in trees. **Plants**, v. 10, 2021.

TOTSUKA, M. *et al.* Experimental study on partial compression parallel to grain of solid timber. **Journal of Wood Science**, v. 67, n. 1, 2021.

ZIEMIŃSKA, K.; WESTOBY, M.; WRIGHT, I. J. Broad anatomical variation within a narrow wood density range: a study of twig wood across 69 Australian Angiosperms. **PLOS ONE**, v. 10, n. 4, p. e0124892, 2015.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

José Ricardo Gabriel Kuniyoshi

Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia de Estruturas | Universidade de São Paulo | Av. Trab. São Carlense, 400, Parque Arnold Schimidt | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13566-590 | Tel.: (16) 3373-9483 | E-mail: josericardogk@usp.br

Fabricao da Silva Aguiar

Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Rod. Washington Luís, km 235 - SP-310 | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13565-905 | Tel.: (17) 99159-7294 | E-mail: fabricioaguiar.1012@gmail.com

Cleyton Éder Rodrigues Rocha

Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Tel.: (16) 3351-9694 | E-mail: cleytonrocha@live.com

Clara Gaspar Fossi de Souza

Análise de dados, Pesquisa.

Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais | Universidade de São Paulo | E-mail: clara.gaspar@hotmail.com

André Luis Christoforo

Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Tel.: (16) 3351-8262 | E-mail: alchristoforo@ufscar.br

Fernando Menezes de Almeida Filho

Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Tel.: (16) 3351-9694 | E-mail: almeidafilho@ufscar.br

Francisco Antonio Rocco Lahr

Conceitualização, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia de Estruturas | Universidade de São Paulo | Tel.: (16) 3373-8206 | E-mail: frocco@sc.usp.br

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros e Julio Cesar Molina**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.