



Estimativa da resistência à tração nas madeiras de dez espécies de eucalipto em função de parâmetros anatômicos e da densidade aparente

Estimation of tensile strength in timbers of ten eucalypt species as a function of anatomical parameters and apparent density

Lucas José Marini¹, Raquel Schmitt Cavalheiro², Victor Almeida de Araujo^{3,1}, Francisco Antonio Rocco Lahr², André Luis Christoforo¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rodovia Washington Luiz km 235, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil.

²Universidade de São Paulo, Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira. Avenida Trabalhador São-carlense 400, 13564-002, São Carlos, SP, Brasil.

³Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciências e Engenharia, LIGNO - Desenvolvimento de Produtos Lignocelulósicos. Rua Geraldo Alckmin 519, 18409-010, Itapeva, SP, Brasil.

e-mail: lucasjmarini@hotmail.com, raquelschmitt1@gmail.com, va.araujo@unesp.br, frocco@sc.usp.br, alchristoforo@ufscar.br

RESUMO

A caracterização dos elementos construtivos é um conhecimento essencial para garantir a estabilidade e resistência estrutural de qualquer construção. A resistência dos materiais é uma predição efetiva prescrita por normas técnicas, as quais delimitam comportamentos resistivos em diferentes condições. As propriedades físico-mecânicas da madeira permitem a aplicação racional desse biorrecurso em projetos estruturais. Porém, testes para determinar as propriedades mecânicas requerem equipamentos de grande porte e mão-de-obra capacitada, requerimentos os quais são encontrados em poucas instituições e centros de pesquisa específicos. Uma alternativa para entender as propriedades da madeira pode ser estabelecida pela microscopia e modelos de regressão. O presente artigo objetivou demonstrar a viabilidade de estimar as propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus* em função de suas características anatômicas e da densidade aparente. Dez lotes de diferentes espécies de eucalipto foram selecionados para prever a tração paralela às fibras, tensão perpendicular às fibras e o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras, bem como três diferentes parâmetros anatômicos (fibras, vasos e raios) das amostras de madeira de acordo com duas normas técnicas brasileiras. Na prática, os modelos de regressão propostos foram excelentes, pois os valores de R² foram iguais a 90,55, 86,55 e 67,95% para estimar E₁₀, f₁₀ e f₁₉₀, respectivamente.

Palavras-chave: Eucalyptus; propriedades mecânicas; modelos de regressão; anatomia; densidade aparente.

ABSTRACT

Characterization of construction materials is a piece of essential knowledge to ensure the structural stability and strength of any building. The strength of materials is an effective prediction prescribed by technical standards, which delimit the resistive behaviors in different conditions. Physical-mechanical properties of timber allow the rational application of this bioresource in structural projects. However, tests to determine mechanical properties require large equipment and a skilled workforce, found in few institutions and specific research centers. The microscopy and regression models may establish an alternative to understanding the properties of wood. The present paper aimed to demonstrate the feasibility of estimating the mechanical properties of *Eucalyptus* wood as a function of its anatomical characteristics and apparent density. Ten batches of different eucalypt species were selected to predict the tensile strength parallel to the grain, tensile strength normal to grain, and modulus of elasticity in tensile parallel to the grain, as well as three different anatomical parameters (fibers, vessels, and rays) of the wood samples according to two Brazilian standard documents. In practice, the proposed regression models were excellent, as the R² values were equal to 90.55, 86.55, and 67.95% for estimating E₁₀, f₁₀, and f₁₉₀, respectively.

Keywords: Eucalyptus; mechanical properties; regression models; anatomy; apparent density.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um recurso natural complexo constituído por diferentes tipos de células com propriedades específicas que desempenham as funções vitais de uma árvore [1]. A sua anatomia descreve o arranjo dos elementos celulares do lenho das árvores. A variação das dimensões dos elementos anatômicos interfere na qualidade da madeira, uma vez que a dimensão, distribuição e o arranjo estrutural das células propiciam as propriedades de resistência mecânica, a trabalhabilidade e os isolamentos térmico e acústico [2–6].

A madeira é amplamente utilizada na construção civil, especialmente em cimbramentos, fôrmas, pisos internos e externos, guarnições, esquadrias e elementos estruturais [7–11]. Diante de uma demanda crescente pela madeira serrada, houve a introdução do gênero *Eucalyptus* no Brasil [12], visando à produção em escala por meio de florestas plantadas [10]. Esse gênero se origina da Austrália e possui mais de 600 espécies adaptadas às diversas condições de clima e solo [12].

Como a madeira é um material polimérico heterogêneo, se faz necessário o conhecimento de suas propriedades tecnológicas para a aplicação comercial [13]. Os ensaios para determinar essas propriedades, especialmente as propriedades mecânicas, geralmente exigem equipamentos robustos encontrados apenas em centros de pesquisas, os quais ainda dependem da operação e análise por meio de mão de obra especializada. No Brasil, a norma técnica NBR 7190 [14] prescreve as diretrizes para o uso da madeira na construção civil.

Dentre as propriedades destaca-se a densidade aparente, que é de fácil obtenção e instiga estudos de correlação entre as propriedades de resistência e rigidez. Cabe destacar os trabalhos originados por DIAS e LAHR [15], MACHADO *et al.* [16], CHRISTOFORO *et al.* [17], AQUINO *et al.* [18], CHEN e GUO [19], entre outros, que buscaram correlacionar a densidade com as propriedades físicas e mecânicas da madeira.

Devido à grande importância da madeira de eucalipto, a partir da década de 1980 surgiram os primeiros trabalhos acadêmicos, para a caracterização anatômica, conduzidos por TOMAZELLO FILHO [4]. Para isso, os microscópios constituem na ferramenta mais apropriada para gerar resolução e campo de visão adequado para suportar a compreensão e a avaliação das madeiras voltadas para fins diversos, como a construção civil [20].

Hoje, o avanço tecnológico e o acesso aos diversos laboratórios de materiais, aliado ao uso de técnicas microscópicas, vêm contribuindo para a caracterização da estrutura básica da madeira. A literatura abrange diversos trabalhos que caracterizam a anatomia microscópica desse valioso biorrecurso como, por exemplo, NISGOSKI *et al.* [21], MOTTA *et al.* [22], SOBIER *et al.* [23], REDMAN *et al.* [24], WENTZEL *et al.* [25], entre outros.

Entretanto, até a presente data, não foram identificados trabalhos científicos que utilizem parâmetros anatômicos da madeira de *Eucalyptus* como estimadores de propriedades mecânicas. Essa grande lacuna de informações sobre as muitas espécies deste gênero impede que sua madeira seja utilizada de forma racional como elemento acabado na construção civil. Este estudo visa demonstrar a viabilidade de utilizar modelos de regressão na estimativa de propriedades de resistência da madeira de eucalipto utilizando-se do conhecimento da densidade aparente e das informações das estruturas anatômicas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Para o estudo foram adquiridos 10 lotes de madeira de diferentes espécies de *Eucalyptus* em empresas do setor madeireiro localizadas na região de São Carlos – SP, as quais se encontram apresentadas na Tabela 1.

Essa escolha se baseou na disponibilidade no comércio regional, sendo que três espécies – *Eucalyptus urophylla*, *E. grandis* e *E. saligna* – foram priorizadas em virtude de estarem entre aquelas variedades mais comuns na produção de casas de madeira no Brasil conforme verificaram DE ARAUJO *et al.* [26].

Foram confeccionados corpos de prova seguindo as premissas do anexo B da NBR 7190 [14] para os ensaios da densidade aparente e da tração paralela e normal às fibras. Para essa caracterização anatômica dos dez eucaliptos (Tabela 1), seguiram-se as prescrições da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) [27] e da *INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS* (IAWA) [28].

2.2. Métodos

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Madeiras e Estrutura de Madeira (LaMEM) e no Laboratório de Análise Térmica, Eletroanalítica e Química de Soluções (LATEQS), do Instituto de Química (IQ), ambos na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

	NOME CIENTÍFICO	NOME COMERCIAL
1	Eucalyptus alba Reinw. ex Blume	Eucalipto alba, eucalipto branco
2	Eucalyptus propinqua Maiden & Deane	Eucalipto propinqua
3	Eucalyptus microcorys Mueller	Eucalipto microcoris, eucalipto de sebo
4	Eucalyptus saligna Smith	Eucalipto saligna
5	Eucalyptus paniculata Smith	Eucalipto paniculata, casca-de-ferro
6	Eucalyptus grandis Hill	Eucalipto grandis, eucalipto rosado
7	Eucalyptus urophylla Blake	Eucalipto urophila, urofila
8	Eucalyptus tereticornis Smith	Eucalipto tereticornis
9	Eucalyptus camaldulensis Dehnhardt	Eucalipto camaldulensis, eucalipto vermelho
10	Eucalyptus cloeziana Mueller	Eucalipto cloeziana

Tabela 1: Identificação das dez espécies de eucalipto em avaliação.

2.2.1. Determinação da densidade aparente

A densidade aparente é a específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume dos corpos de prova de massa madeira com teor de umidade de 12% (Equação 1).

$$\rho_{\rm ap,12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \tag{1}$$

Onde:

 $\rho_{\text{AP.12}}$ é a densidade aparente a 12% de umidade em gramas (g/cm³).

 m_{12} é a massa específica a 12% de umidade em gramas (g).

 V_{12} é o volume da madeira a 12% de umidade em centímetros cúbicos (cm³).

O procedimento foi realizado em corpos de prova prismáticos, com seção transversal nominal de 2 cm por 2 cm, e comprimento ao longo das fibras de 5 cm.

2.2.2. Determinação da tração

Os valores das resistências foram obtidos seguindo as premissas e métodos de ensaio da NBR 7190 [14]. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios AMSLER, que possui capacidade de carga de 250 kN. O carregamento foi monotônico com taxa crescente de 10 MPa/min para a resistência à tração paralela às fibras e 2,5 MPa/min para a resistência à tração normal às fibras. As amostras foram carregadas até atingirem a ruptura.

A resistência da madeira à tração paralela às fibras é dada pela relação entre a máxima tensão de tração que pode atuar em um corpo de prova alongado com trecho central de seção transversal uniforme de área A e comprimento não menor que $8\sqrt{A}$, com extremidades mais resistentes que o trecho central e com concordâncias que assegurem a ruptura no trecho central da amostra, calculada conforme a Equação 2. Foram utilizados pares simétricos de garras para ajustar o corpo de prova à máquina de ensaios e extensômetros para medir as deformações específicas, com precisão mínima de 50 μ m/m.

Onde:

$$f_{t0} = \frac{f_{t0,máx}}{A}$$
(2)

F_{T0.MÁX} é a máxima força de tração aplicada ao corpo de prova durante o ensaio em Newton (N).

A é a área da seção transversal tracionada do trecho central da amostra em milímetro quadrado (mm²).

 $f_{_{T0}}$ é a resistência à tração paralela às fibras em Mega Pascal (MPa).

A rigidez da madeira na tração paralela às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama tensão deformação específica. Para esta finalidade, foi determinada pela inclinação da reta secante à curva tensão deformação, correspondente respectivamente a 10% e 50% de f_{10} determinada no ensaio (Equação 3).

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}}$$
(3)



Figura 1: Preparo das amostras para o estudo anatômico: (a) fervura em água das amostras para amolecimento, (b) cortes histológicos no micrótomo, (c) coloração das amostras e (d) montagem das lâminas permanentes.

Onde:

 E_{T0} é o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras em Mega Pascal (MPa).

 $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de tração correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{to} .

 $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ são as deformações no trecho central do corpo de prova referentes às tensões $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

Sequencialmente, a resistência da madeira à tração normal às fibras (f_{190}) é obtida a partir da máxima força de tração aplicada e a área do corpo de prova (Equação 4). Foram utilizados acessórios de encaixe nos orifícios dos corpos de prova para possibilitar a aplicação da força que traciona a amostra.

$$f_{t90} = \frac{F_{t90,\text{máx}}}{A}$$
(4)

Onde:

 $F_{T90,MAX}$ é a máxima força de tração normal aplicada ao corpo de prova em Newton (N).

A é área inicial da seção transversal tracionada do trecho alongado em milímetro quadrado (mm²).

 F_{T90} é a resistência à tração normal às fibras em Mega Pascal (MPa).

2.2.3. Determinação dos parâmetros anatômicos

Foram confeccionados corpos de prova com dimensões $1,5 \text{ cm} \times 1,5 \text{ cm} \times 1,5 \text{ cm}$ na direção radial, tangencial e transversal, atentando-se pela correta orientação. Para a mensuração dos elementos de vaso (frequência e diâmetro) e dos elementos de raio (altura e largura) foram confeccionadas lâminas histológicas permanentes, já para a análise das fibras isoladas foram feitas lâminas provisórias com material macerado.

Foi realizado o amolecimento das amostras por fervura em água, Figura 1a. Após esse amolecimento, os corpos de prova foram seccionados nos três planos anatômicos em um micrótomo rotativo *Leica RM 2125 RTS*, Figura 1b. Os cortes foram clarificados com hipoclorito de sódio e, com isso, lavados com água destilada e ácido acético 1%. Posteriormente, os cortes foram desidratados em sequência alcoólica até etanol 50% e, portanto, corados com Safranina aquosa 1%, Figura 1c. Após esse procedimento, a desidratação seguiu até etanol absoluto (100%). Foram montadas lâminas com os cortes radial, transversal e longitudinal, Figura 1d. As lâminas foram analisadas utilizando-se o microscópio *Olympus EX51*. Foram mensurados os valores do diâmetro dos vasos (D_v) , frequência dos vasos (F_{rv}) , largura dos raios (L_r) e altura dos raios (H_r) .

A confecção do material macerado seguiu as normas da ABNT e IAWA [27, 28]. Retirou-se pequenos cavacos de cada amostra, que foram depositados em vidros devidamente identificados e cobertos com solução macerante de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio na proporção de 1v:1v, seguindo o método de Franklin [29, 30], Figura 2a. Os frascos foram mantidos por 24h em estufa a 50°C, Figura 2b. Após esse processo o material foi lavado por três vezes em água destilada e foi adicionado o corante safranina em solução aquosa 1%, Figura 2c. Com o material foram confeccionadas lâminas semipermanentes, Figura 2d.

As lâminas foram analisadas no microscópio e obtiveram-se os valores do comprimento das fibras, diâmetro das fibras e diâmetro do lúmen. Logo, a espessura da parede das fibras foi calculada a partir da Equação 5.

(cc) BY



Figura 2: Preparo das lâminas pelo método de Franklin: (a) frascos com os cavacos cobertos com a solução macerante, (b) frascos após 24 h na estufa a 50°C, (c) coloração da amostra e (d) montagem das lâminas semipermanentes.

ESPÉCIE	D _v	F _{RV}	H _R	L _R		D _F	D _{LU}	E _{PF}	F _{T0}	F ₁₉₀	E _{T0}
E. alba	159	1	140	140	100	50	50	50	12	12	12
E. propinqua	145	1	121	121	100	50	50	50	12	12	12
E. microcorys	82	1	70	70	100	50	50	50	12	12	12
E. saligna	113	1	117	117	100	50	50	50	12	12	12
E. paniculata	51	1	76	76	100	50	50	50	12	12	12
E. grandis	157	1	115	115	100	50	50	50	12	12	12
E. urophylla	114	1	112	112	100	50	50	50	12	12	12
E. tereticornis	136	1	124	124	100	50	50	50	12	12	12
E. camaldulensis	103	1	111	111	100	50	50	50	12	12	12
E. cloeziana	114	1	132	132	100	50	50	50	12	12	12

Tabela 2: Número de determinações experimentais relacionadas às propriedades avaliadas para os dez eucaliptos.

$$E_{pf} = \frac{L_f - D_{lu}}{2} \tag{5}$$

Onde:

 $E_{_{\rm PF}}$ é a espessura da parede em milímetros (mm).

 L_{F} é a largura da fibra em milímetros.

D_{LU} é o diâmetro do lúmen em milímetros.

2.2.4. Análise estatística

A Tabela 2 apresenta o número de determinações experimentais associado às propriedades anatômicas, físicas e mecânicas para cada uma das dez espécies de eucalipto estudadas: diâmetros dos vasos (D_v) , das fibras (D_E) e do lúmen (D_{LU}), frequência dos vasos (F_{RV}), larguras dos raios (L_R) e das fibras (L_F), espessura das paredes das fibras (E_{PF}), resistências às trações normal (F_{T90}) e paralela (F_{T0}) e módulo de elasticidade (E_{T0}). Nas análises estatísticas, foram considerados os valores médios devido ao número diferente de determinações.

O teste de correlação de Pearson (r de Pearson: $-1 \le r \le 1$), avaliado pela análise de variância (ANOVA -5% de significância), foi utilizado com o propósito de analisar a relação entre as propriedades anatômicas e também a relação entre as propriedades anatômicas com as características físicas e propriedades mecânicas das espécies deste estudo. Da ANOVA, valor-p (probabilidade p) menor ou igual ao nível de significância implica em se considerar a correlação significativa, e não significativa em caso contrário.

Modelos de regressão linear a múltiplas variáveis foram considerados para a compreensão dos efeitos combinados de duas ou mais variáveis livres. A ANOVA (5% de significância) também foi considerada na análise dos modelos de regressão a múltiplas variáveis, permitindo julgar a significância do modelo.

Por último, na tentativa de melhorar a precisão dos modelos de regressão múltipla (utilização desses para a estimativa de propriedades), a densidade aparente foi considerada em conjunto com as propriedades anatômicas que mais afetaram os modelos anteriormente obtidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta a síntese dos resultados das propriedades físicas e mecânicas das espécies de eucalipto consideradas neste estudo, mediante uma amostragem significativa (Tabela 2), das quais incluíram: densidade aparente (ρ_{AP}), resistências à tração paralela (F_{T0}) e perpendicular às fibras (F_{T90}), módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (E_{T0}) e, por fim, seus respectivos coeficientes de variação (CV).

A madeira por ser um material heterogêneo apresenta diferentes coeficientes de variação, sendo considerados baixos quando menores que 10%, médios (entre 10% e 20%), altos (entre 20% e 30%) ou muito altos (acima de 30%). A NBR 7190 [14] define que para as resistências aos esforços normais é admitido um CV de 18%, já para as resistências aos esforços tangenciais um CV de 28%. Os maiores valores médios de densidade aparente a 12% de umidade foram apresentados pela madeira de *Eucalyptus paniculata* (1,09 g/cm³). Esta espécie também apresentou os maiores valores médios para a resistência à tração paralela às fibras (147 MPa), resistência à tração normal às fibras (5,50 MPa) e módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (23179 MPa). Esses valores estão próximos aos encontrados no anexo E da NBR 7190 [14]. A espécie *E. propínqua* apresentou o segundo maior valor médio de densidade aparente (0,96 g/cm³). Os resultados das propriedades mecânicas desta espécie também ficaram dentro dos verificados no anexo E da norma brasileira supracitada.

O lote de *E. microcorys* apresentou o segundo maior valor médio de f_{T0} (120 MPa), f_{T90} (4,60 MPa) e E_{T0} (19327MPa). Esses valores, bem como o valor da ρ_{ap} estão próximos aos apresentados pela norma brasileira [14]. Também, os resultados das propriedades físicas e mecânicas das espécies *E. camaldulensis*, *E. alba*, *E. tereticornis* também se mostraram próximos aos valores indicados por esta norma brasileira.

ESPÉCIE	ρ _{AP,12} (CV)	F _{T0} (CV)	F ₁₉₀ (CV)	E _{T0} (CV)
E. cloeziana	0,86 (3,87)	89,83 (27,55)	3,40 (36,28)	14459 (14,66)
E. camaldulensis	0,87 (6,63)	77,75 (25,67)	4,85 (31,23)	17803 (13,92)
E. grandis	0,67 (5,33)	70,00 (23,65)	3,00 (34,36)	14576 (16,76)
E. urophylla	0,74 (2,81)	84,00 (28,60)	4,20 (31,64)	15380 (15,22)
E. paniculata	1,09 (3,64)	147,00 (31,14)	5,50 (33,25)	23719 (18,63)
E. alba	0,71 (4,23)	69,00 (26,55)	3,60 (25,62)	13888 (20,11)
E. tereticornis	0,90 (4,72)	116,00 (28,31)	4,60 (28,97)	17509 (22,14)
E. microcorys	0,93 (5,46)	120,00 (30,25)	4,60 (26,50)	19327 (18,71)
E. propinqua	0,96 (6,07)	92,00 (27,12)	4,40 (31,23)	16045 (21,98)
E. saligna	0,73 (4,51)	85,00 (29,52)	4,10 (35,21)	15981 (23,62)

Tabela 3: Síntese das propriedades físicas e mecânicas das espécies de eucalipto estudadas.

*Valores de densidade (g/cm³); resistência e de rigidez (MPa); os coeficientes de variação (CV) foram apresentados em porcentagem.

Tabela 4: Valores característicos de resistência (FW,K) das espécies estudadas.

ESPÉCIE	F _{T0,K}	Г _{190,К}	CR
E. grandis	41,86	1,74	C20
E. alba	56,11	2,43	C30
E. cloeziana	60,13	2,08	C30
E. camaldulensis	68,18	3,63	C30
E. microcorys	82,43	3,29	C30
E. urophylla	54,00	3,66	C40
E. paniculata	120,55	3,35	C40
E. tereticornis	71,06	3,73	C40
E. propinqua	64,75	3,67	C40
E. saligna	28,88	2,86	C30

*Valores de resistência (MPa).

ESPÉCIE	D _v (CV)	F _{RV}	H _R (CV)	L _R (CV)
E. cloeziana	0,07084 (24,78)	20,8006	0,14798 (42,67)	0,01491 (35,21)
E. camaldulensis	0,10475 (32,13)	16,2593	0,15188 (27,48)	0,02082 (17,46)
E. grandis	0,12654 (15,56)	10,6455	0,14153 (31,58)	0,01594 (29,42)
E. urophylla	0,14495 (24,33)	11,2014	0,15483 (34,41)	0,01187 (25,31)
E. paniculata	0,14575 (35,67)	1,5914	0,28896 (36,65)	0,03229 (38,65)
E. alba	0,10968 (27,91)	20,3822	0,14493 (35,50)	0,01279 (24,32)
E. tereticornis	0,11869 (24,75)	12,6855	0,16510 (30,23)	0,01845 (22,69)
E. microcorys	0,14267 (25,19)	10,1262	0,19915 (34,40)	0,01254 (25,03)
E. propinqua	0,09422 (33,80)	11,6687	0,15842 (36,23)	0,02434 (24,18)
E. saligna	0,12556 (29,57)	9,8665	0,16109 (34,96)	0,01319 (20,80)
ESPÉCIE	L _F (CV)	D _F (CV)	D _{LU} (CV)	E _{PF} (CV)
E. cloeziana	0,84633 (18,42)	0,01288 (25,47)	0,00352 (50,11)	0,00468 (26,15)
E. camaldulensis	1,05595 (22,58)	0,01690 (24,51)	0,00582 (36,35)	0,00554 (30,99)
E. grandis	0,95388 (20,80)	0,01550 (19,56)	0,00680 (36,98)	0,00435 (28,18)
E. urophylla	0,85068 (22,91)	0,01532 (27,64)	0,00840 (40,32)	0,00346 (36,21)
E. paniculata	2,02036 (25,93)	0,04672 (23,74)	0,03462 (29,86)	0,00605 (34,71)
E. alba	1,03177 (18,34)	0,01648 (22,27)	0,00770 (47,03)	0,00439 (30,81)
E. tereticornis	0,94569 (18,86)	0,01526 (23,19)	0,00522 (44,35)	0,00502 (23,81)
E. microcorys	1,32754 (15,58)	0,02072 (17,52)	0,00766 (36,41)	0,00653 (32,83)
E. propinqua	1,06533 (20,83)	0,01670 (16,24)	0,00484 (42,02)	0,00593 (19,12)
E. saligna	1,14862 (22,07)	0,01414 (20,00)	0,00572 (43,69)	0,00421 (20,23)

Tabela 5: Síntese dos resultados das propriedades anatômicas das espécies estudadas.

*Com exceção da Frv, cuja unidade é a de vasos/mm², as demais variáveis são expressas em milímetros (mm); os coeficientes de variação (CV) foram apresentados em porcentagem.

Para as amostras de *E. urophylla* os resultados foram próximos dos valores da norma brasileira [14] e de outros estudos [20, 31–38]. Os valores determinados para a madeira de *E. cloeziana* ficaram próximos aos determinados por outros autores que estudaram as propriedades dessa espécie [39, 40] e também quando comparados com os valores fornecidos pela norma brasileira [14]. Já para as madeiras de *E. saligna* e *E. grandis* os valores propriedades física e mecânicas foram próximos aos verificados na normativa brasileira [14], pelo INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT) [41] e por BARRICHELO e BRITO [42].

Na Tabela 4, são apresentados os resultados dos valores característicos de resistência ($F_{W,K}$) obtidos nos ensaios e também a categorização das espécies de madeira de eucalipto nas classes de resistência (CR) do grupo das folhosas segundo a norma ABNT NBR 7190 [14].

Verifica-se que dentre as espécies apresentadas na Tabela 4, a espécie *Eucalyptus paniculata* foi a que apresentou o maior valor característico de resistência à tração paralela às fibras (120, 55 MPa), seguido do *E. microcorys, E. tereticornis* e *E. camaldulensis*. Por apresentarem altas resistências, essas espécies têm sido recomendadas para uso em aplicações estruturais na construção civil.

A Tabela 5 apresenta a síntese dos resultados das características anatômicas para as dez espécies de *Eucalyptus* consideradas na pesquisa, das quais incluíram: diâmetro dos vasos (D_v), frequência dos elementos de vasos (F_{RV}), altura dos raios (H_R), largura dos raios (L_R), largura da fibra (L_F), diâmetro da fibra (D_F), diâmetro do lúmen (D_{TU}), espessura da parede (E_{PF}) e seus respectivos coeficientes de variação.

O parâmetro frequência dos vasos é a razão entre o número de vasos e a área, portanto não apresentou CV. Como a madeira é um material de alta complexidade suas características anatômicas apresentam alta variabilidade. As características anatômicas variam de acordo com a posição no tronco, a idade da árvore, razão de crescimento e etc.

Analisando a frequência dos elementos de vaso verificamos, pela Tabela 5, que são poucos numerosos na espécie *E. paniculata* (1,59 vasos/mm²) e bastante numerosos nas demais espécies estudadas, Figuras 3a e 3b. Já o diâmetro tangencial dos vasos variou de 0,070 mm na espécie *E. cloeziana*, para 0,145 mm na espécie *E. paniculata*.



Figura 3: Planos transversais com elementos de: (a) vasos de *E. Paniculata*, (b) vasos de E. cloeziana, (c) raios de *E. microcorys* e (d) raios de *E. grandis*.

Os elementos de raio para as espécies analisadas neste estudo foram extremamente baixos (altura menor que 1 mm) variando de 0,141 mm na espécie *E. grandis* a 0,288 mm na espécie *E. paniculata*, Figuras 3c e 3d. As larguras dos raios foram estreitas (largura menor que 0,5 mm), variando de 0,011 mm para o *E. urophylla* a 0,032 mm para o *E. paniculata*, com predominância de raios unisseriados (raios que apresentam apenas uma célula de largura) e, consequentemente, uma menor porcentagem de bisseriados (raios que apresentam duas células de largura).

Os elementos de fibras predominantes são as fibras curtas (fibras com comprimento entre 0,5 e 2 mm), variando de 0,84 mm para *E. cloeziana* a 1,32 mm para *E. microcorys*. A espécie *E. paniculata* apresentou fibras longas (fibras com comprimento entre 2 e 5 mm) com comprimento médio de 2,02 mm, Figuras 4a e 4b. Os diâmetros da fibra são estreitos variando de 0,012 mm (*E. cloeziana*) a 0,046 mm (*E. paniculata*). O diâmetro do lúmen também é estreito e varia de 0,005 mm (*E. cloeziana*) a 0,034 mm (*E. paniculata*). A espessura da parede da fibra é média, variando de 0,0034 mm na espécie *E. urophylla*, Figura 4c, a 0,0065 mm na espécie *E. microcorys*, Figura 4d.

Os resultados das características anatômicas das espécies deste trabalho, identificados na Tabela 5 e ilustrados a partir das Figuras 3 e 4, se encontram bastante próximos aos encontrados por outros autores [4, 31, 33–35].

A Tabela 6 apresenta os resultados (r de Pearson) da correlação entre variáveis anatômicas para o conjunto composto pelas dez espécies de eucalipto. Verifica-se que a frequência dos vasos apresenta correlações fortes com quase todas as demais variáveis anatômicas, e apresenta valores negativos em todas elas, isto é, à medida que o valor de uma variável aumenta, o valor da outra diminui. Já o diâmetro do vaso possui correlação forte apenas com a frequência dos vasos. Para os elementos de raio, as variáveis altura e largura dos raios possuem correlação forte a muito forte com quase todas as demais variáveis, exceto com a espessura da parede da fibra. Das características das fibras, a largura da fibra, diâmetro da fibra e diâmetro do lúmen se correlacionam de forma muito forte entre si. Já a espessura da parede da fibra não apresentou correlação significativa com as demais características anatômicas.

Estudos na literatura demonstraram que os raios tendem a mudar de dimensão de acordo com o desenvolvimento da árvore [35], e sua largura está correlacionada com o seu volume [36]. A sua altura, entretanto,



Figura 4: Elementos de fibras de: (a) E. cloeziana, (b) E. paniculata, (c) E. urophylla e (d) E. microcorys.

	D _v	F _{RV}	H _R	L _R	L _F	D _F	D _{LU}
F _{RV}	<u>-0,75</u>						
H _R	0,52	<u>-0,76</u>					
L_{R}	0,03	-0,54	<u>0,69</u>				
$L_{\rm F}$	0,49	<u>-0,74</u>	<u>0,96</u>	<u>0,70</u>			
$\mathbf{D}_{\mathbf{F}}$	0,47	<u>-0,71</u>	<u>0,96</u>	<u>0,77</u>	<u>0,95</u>		
D _{LU}	0,51	<u>-0,71</u>	<u>0,93</u>	<u>0,71</u>	<u>0,91</u>	<u>0,98</u>	
E _{PF}	0,02	-0,32	0,56	0,57	0,60	0,50	0,33

Tabela 6: Resultados obtidos das correlações entre as variáveis anatômicas das espécies estudadas.

*Correlações consideradas significativas pela ANOVA (5% de significância) encontram-se sublinhadas.

se correlaciona com o comprimento dos vasos [37, 38]. Essa correlação com os elementos de vasos pode ser explicada pela derivação de novos raios a partir da subdivisão de iniciais fusiformes [36].

Na Tabela 7, são apresentados os resultados das análises de correlação envolvendo as variáveis anatômicas e as características físicas e propriedades mecânicas das madeiras de eucalipto. Pode-se observar que a densidade aparente apresenta correlação forte com a espessura da parede das fibras. Ainda apresentou correlações fortes e moderadas com a largura e altura dos raios e com o comprimento e o diâmetro da fibra. A resistência à tração paralela às fibras e a resistência à tração normal às fibras apresentaram correlações fortes com a altura e largura dos raios, comprimento das fibras, diâmetros das fibras e do lúmen e espessura da parede das fibras. Já o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras apresentou uma correlação forte com a altura dos raios. Houveram correlações fortes com largura dos raios, comprimento e diâmetro das fibras, diâmetro do lúmen, espessura de parede das fibras e frequência dos vasos.

Outros trabalhos da literatura avaliaram as correlações demonstradas na Tabela 7. MELO *et al.* [3] encontraram correlação negativa entre a densidade básica e a frequência dos vasos e correlação positiva entre a espessura das paredes das fibras com a densidade em amostras de *Eucalyptus*. Essa correlação negativa entre a densidade e a frequência dos vasos também foi observada por TOMAZELLO FILHO [4].

Tabela 7: Resultados obtidos das correlações entre as variáveis anatômicas e as propriedades físicas e mecânicas das espécies estudadas.

	ρ_{AP}	F _{T0}	F ₁₉₀	E _{T0}
D _v	0,03	0,41	0,40	0,51
F _{RV}	-0,45	<u>-0,67</u>	-0,58	<u>-0,75</u>
H _R	<u>0,76</u>	<u>0,89</u>	<u>0,73</u>	<u>0,93</u>
L _R	<u>0,78</u>	0,59	<u>0,65</u>	<u>0,71</u>
$L_{\rm F}$	<u>0,68</u>	<u>0,77</u>	<u>0,69</u>	<u>0,90</u>
D _F	<u>0,69</u>	<u>0,77</u>	<u>0,67</u>	<u>0,88</u>
D _{LU}	0,58	<u>0,70</u>	0,60	<u>0,81</u>
E	0.82	0.64	0.61	0.69

*Correlações consideradas significativas pela ANOVA (5% de significância) encontram-se sublinhadas.

Tabela 8: Resultados obtidos das correlações entre a densidade aparente e as demais propriedades das espécies estudadas.

	F _{T0}	Г _{Т90}	E _{to}
ρ _{ΑΡ}	0,85	0,80	0,82

Tabela 9: Resultados dos modelos de regressão linear dependentes da densidade aparente.

MODELO	R ² (%)
$f_{_{T0}} = -41,19 + 161,0{\rho}AP$	72,59
$f_{T90} = 0,442 + 4,472{\rho}AP$	64,03
$E_{T0} = 1409 + 18274{p}AP$	67,50

As fibras são as principais responsáveis pela sustentação da madeira e resistência aos esforços mecânicos. SHIMOYAMA [5] analisando espécies de *Eucalyptus* verificou que as características anatômicas exercem grande influência na densidade, destacando-se a espessura da parede das fibras e o diâmetro do lúmen. Aumentos no comprimento das fibras e na espessura da parede das fibras implicam em aumentos na densidade da madeira [41]. Outros autores como ABRUZZI *et al.* [31] e POUBEL *et al.* [43] analisando espécies de *Eucalyptus* também encontraram fortes correlações entre a densidade e o diâmetro do lúmen.

Na Tabela 8, são apresentados os resultados das análises de correlação envolvendo a densidade aparente e as propriedades mecânicas das madeiras de eucalipto. Verifica-se que a densidade aparente afeta significativamente todas as propriedades mecânicas analisadas. Aumentos nos valores da densidade implicam em aumentos nas propriedades mecânicas. Estudos na literatura também encontraram boas correlações entre a densidade e a as propriedades mecânicas de várias espécies de madeiras [15, 17, 44–48].

Na Tabela 9, são apresentados os modelos de regressão linear (densidade aparente como uma variável independente) obtidos das correlações consideradas significativas pela ANOVA.

O modelo de regressão para a resistência a tração paralela às fibras dependente da densidade aparente apresentou o melhor coeficiente de determinação (72,59%). O modelo para estimativa do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras também apresentou um alto valor de coeficiente de determinação. Os valores de coeficiente de determinação deste estudo foram superiores aos encontrados para outras espécies florestais na literatura [17].

Na Tabela 10, são apresentados os modelos de regressão linear dependentes apenas das propriedades dos vasos (D_{v^2} , F_{Rv}) da estrutura anatômica das madeiras e também os resultados da ANOVA (5% de significância), resultados esses obtidos com o propósito principal de avaliar a influência combinada das variáveis D_v e F_{Rv} . Verifica-se que não foi encontrada correlação significativa entre as características dos vasos e as propriedades físicas e mecânicas da madeira de eucalipto deste estudo.

Na Tabela 11 são apresentados os modelos de regressão linear dependentes apenas das propriedades dos raios (H_R, L_R) da estrutura anatômica das madeiras e os resultados da ANOVA (5% de significância), resultados esses obtidos com o propósito de avaliar a influência combinada das variáveis H_R e L_R . Então, verificam-se

MODELO	R ² (%)	P-VALOR (MODELO)	P-VA	LOR
			D _v	F _{RV}
$\rho_{AP} = 1,596 - 3,86 \cdot D_V - 0,0233 \cdot F_{RV}$	42,41	0,145	0,149	0,058
$f_{_{T0}} = 167, 6 - 221 \cdot D_{_{V}} - 3, 71 \cdot F_{_{RV}}$	46,99	0,108	0,626	0,087
$f_{_{T90}} = 5,60 - 2,6 \cdot D_{_{V}} - 0,0852 \cdot F_{_{RV}}$	34,11	0,232	0,859	0,209
$E_{T0} = 23983 - 13738 \cdot D_v - 438 \cdot F_{RV}$	56,76	0,053	0,774	0,063

Tabela 10: Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades dos vasos.

Tabela 11: Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades dos raios.

MODELO	R ² (%)	P-VALOR (MODELO)	P-VA	LOR
			H _R	L _R
$\rho_{AP} = 0,455 + 1,256 \cdot H_{R} + 9,93 \cdot L_{R}$	70,40	0,014	0,185	0,131
$f_{T0} = 9,0 + 524 \cdot H_R - 216 \cdot L_R$	79,56	0,004	0,006	0,819
$f_{T90} = 2,113 + 9,18 \cdot H_R + 30,5 \cdot L_R$	58,16	0,047	0,150	0,455
$E_{T0} = 6213 + 56556 \cdot H_{R} + 54359 \cdot L_{R}$	88,45	0,001	0,002	0,522

Tabela 12: Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades das fibras.

MODELO	R ² (%)	P-VALOR	P-VALOR			
		(MODELO)	L_{F}	D _F	D _{LU}	
$\rho_{\rm AP} = 0.398 - 0.316 \cdot L_{\rm F} + 66.9 \cdot D_{\rm F} - 52.2 \cdot D_{\rm LU}$	82,90	0,010	0,257	0,013	0,014	
$f_{T0} = 23.8 - 4.5 \cdot L_F + 6118 \cdot D_F - 4469 \cdot D_{LU}$	67,93	0,063	0,948	0,265	0,297	
$f_{T90} = 2,05 + 0,21 \cdot L_F + 166 \cdot D_F - 137 \cdot D_{LU}$	55,91	0,153	0,929	0,372	0,352	
$E_{T0} = 7222 + 2198 \cdot L_F + 585200 \cdot D_F - 440765 \cdot D_{LU}$	86,32	0,005	0,677	0,177	0,193	

*Modelos considerados significativos pela ANOVA encontram-se em negrito.

Takala 12. Damikadaa	J J - 1 J -	~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~	1	1		14	
Tabela 15: Kesullados	aos modelos de	e regressão	dependentes (ia densidade a	inarenie e d	a anura dos	s raios.
					-r		

MODELO	R ² (%)	P-VALOR (MODELO)	P-VALOR	
			P _{AP}	H _R
$f_{T0} = -26,7 + 78,0;_{p}AP + 325:H_{R}$	86,55	0,001	0,095	0,031
$f_{T90} = 0.67 + 3.17 \cdot_{\rho} AP + 5.09 \cdot H_{R}$	67,95	0,019	0,129	0,386
$E_{T0} = 3602 + 5738 \cdot_{\rho} AP + 49084 \cdot H_{R}$	90,55	0,000	0,195	0,004

todos os modelos foram considerados significativos (Tabela 11). O modelo que apresentou melhor coeficiente de determinação foi o do módulo de elasticidade, onde o fator H_R isolado também foi considerado significativo. O modelo ser significativo não implica que os termos componentes devem ser significativos, como verificado no modelo que estima a resistência à tração e a densidade aparente. Nesses modelos, as variáveis isoladas não explicam as variações, entretanto a soma de ambas explica que o modelo foi significativo.

Na Tabela 12 são apresentados os modelos de regressão linear dependentes apenas das propriedades das fibras (L_F , D_F , D_{LU} , E_{PF}) da estrutura anatômica das madeiras e os resultados da ANOVA (5% de significância), cabendo destacar que o propósito principal dessa abordagem consistiu de investigar a influência combinada das variáveis L_F , D_F , D_{LU} e E_{PF} . A variável E_{PF} não pôde ser estimada pelos modelos (impossibilidade na determinação do respectivo coeficiente do modelo pelo método dos mínimos quadrados) e, por isso, essa foi desconsiderada. Apenas os modelos para estimativa da densidade aparente e do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras foram considerados significativos. O modelo que apresentou o melhor coeficiente de determinação também foi o do módulo de elasticidade ($R^2 = 876,32\%$), entretanto as variáveis isoladas não foram significativas. As propriedades dos elementos de vaso não foram consideradas significativas na estimativa das propriedades das madeiras analisadas. Das propriedades dos raios (H_R, L_R) , apenas a H_R foi considerada significativa na estimativa de algumas propriedades, sendo não significativo a L_R em todas as estimativas. Dentre as propriedades das fibras (L_P, D_P, D_{LU}) , apenas a $D_P e D_{LU}$ afetou de forma significativa na estimativa dos valores das propriedades. AJUZIOGU *et al.* [47] estudando espécies de madeiras da Nigéria também encontraram correlações entre as propriedades de resistência à tração e as características anatômicas da madeira. Dessa forma, $\rho_{AP} e H_R$ foram consideradas conjuntamente na tentativa da obtenção de equações com maior precisão, sendo tais modelos apresentados na Tabela 13.

Os modelos apresentados na Tabela 9 apresentaram correlações moderadas a forte e podem ser de grande utilidade nos projetos estruturais, visto que não dependem da variável anatômica Hr. Entretanto os modelos apresentados na Tabela 13 mostraram correlações forte a muito forte, sendo o modelo para estimativa do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras o que apresentou o maior valor de coeficiente de determinação ($R^2 = 90,55\%$), sendo a variável isolada Hr significativa. O modelo para estimativa da resistência à tração paralela às fibras apresentou o segundo melhor R^2 (86,55%) e o modelo para estimativa da resistência à tração normal às fibras o terceiro melhor valor ($R^2 = 67,95\%$).

Os modelos obtidos neste estudo podem ser valiosos para explorar o uso das espécies de Eucaliptos nas diversas aplicações na construção civil, representando uma saída urgente para suprir a demanda de insumos construtivos.

4. CONCLUSÕES

Os modelos de regressão para estimativa das propriedades mecânicas, considerando a altura dos raios e a densidade aparente, foram excelentes. Isso se justificou pelos coeficientes de determinação, os quais foram iguais a 90,55, 86,55 e 67,95% para estimativa do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras, resistência à tração paralela às fibras e resistência tração normal às fibras, respectivamente.

Ainda, verificaram-se as importantes características anatômicas que influenciam nas propriedades da madeira. Dos elementos de vaso, a frequência teve correlação significativa negativa com resistência à tração paralela às fibras e com o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras. A largura e altura dos raios apresentaram fortes correlações com a densidade aparente e as propriedades mecânicas analisadas. As características das fibras também apresentaram correlações positivas com as propriedades físicas e mecânicas em análise.

Os modelos de regressão apresentados podem ser extremamente importantes à Ciência dos Materiais, uma vez que os mesmos possibilitam estimar as propriedades mecânicas de tração em diferentes espécies de madeira de eucalipto mediante parâmetros anatômicos (altura dos raios) e da densidade aparente, já que tais propriedades podem ser facilmente determinadas em quaisquer laboratórios de materiais.

5. **BIBLIOGRAFIA**

- [1] BURGER, M.B., RITCHER, H.C., Anatomia da madeira, São Paulo, Nobel, 154 p., 1991.
- [2] ROCHA, F.T., FLORSHEIM, S.M.B., COUTO, H.T.Z., "Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden aos sete anos.", *Revista do Instituto Florestal*, v. 16, n. 1, pp. 43–55, Jun. 2004.
- [3] MELO, L.E.L., SILVA, J.R.M., NAPOLI, A., *et al.*, "Influence of genetic material and radial position on the anatomical structure and basic density of wood from *Eucalyptus* spp. and *Corymbia citriodora*", *Scientia Forestalis*, v. 44, n. 111, pp. 611–621, 2016. doi: http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n111.07.
- [4] TOMAZELLO FILHO, M., "Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do Eucalyptus gummifera, E. microcorys e E. pilularis", IPEF, n. 30, pp. 45–54, 1985.
- [5] SHIMOYAMA, V.R.S., "Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em Eucalyptus spp.", Tese de M.Sc., ESALQ/USP, Piracicaba (SP), 93 p., 1990.
- [6] SOARES, A.K., LOURENÇON, T.V., DELUCIS, R.A., et al., "Composição química e estabilidade dimensional da madeira de três eucaliptos", *Revista Matéria*, v. 23, n. 4, pp. 1–7, 2018. doi: http://dx.doi. org/10.1590/s1517-707620180004.0560.
- [7] ANDRADE JUNIOR, J.R., ALMEIDA, D.H., ALMEIDA, T.H., et al., "Avaliação das estruturas de cobertura em madeira de um galpão de estoques de produtos químicos", *Ambiente Construído*, v. 14, n. 3, pp. 75–85, 2014. doi: http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000300006.

(cc) BY

- [8] MARINI, L.J., ALMEIDA, T.H., ALMEIDA, D.H., *et al.*, "Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus* sp. pela colorimetria", *Ambiente Construído*, v. 21, n. 1, pp. 147–158, 2021. doi: http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100499.
- [9] DE ARAUJO, V.A., BARBOSA, J.C., GAVA, M., et al., "Classification of wooden housing building systems", BioResources, v. 11, n. 3, pp. 7889–7901, 2016. doi: http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.3.DeAraujo.
- [10] DE ARAUJO, V.A., GARCIA, J.N., CORTEZ-BARBOSA, J., et al., "Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados", *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 37, n. 90, pp. 157–168, 2017. doi: http://dx.doi.org/10.4336/2017.pfb.37.90.824.
- [11] DE ARAUJO, V., VASCONCELOS, J., LAHR, F., *et al.*, "Timber forest products: a way to intensify global bioeconomy from bio-materials", *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, v. 64, n. 1, pp. 99–111, 2022.
- [12] DELUCIS, R.A., CADEMARTORI, P.H.G., MISSIO, A.L., et al., "Decay resistance of four fast-growing eucalypts wood exposed to three types of fields", *Maderas. Ciencia y Tecnología*, v. 18, n. 1, pp. 33–42, 2016.
- [13] SCHULZ, H.R., ACOSTA, A.P., GALLIO, E., *et al.*, "Avaliação de proprie-dades termoquímicas e físico-mecânicas de três espécies florestais de rápido crescimento", *Revista Matéria*, v. 25, n. 3, pp. 1–12, 2020. doi: http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200003.1118.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 7190 Projeto de Estruturas de Madeira, Rio de Janeiro, ABNT, 1997.
- [15] DIAS, F.M., LAHR, F.A.R., "Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente", *Scientia Forestalis*, v. 65, pp. 102–113, 2004.
- [16] MACHADO, J.S., LOUZADA, J.L., SANTOS, A.J.A., et al., "Variation o fwood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.)", *Materials & Design*, v. 12, n. 2, pp. 975–980, 2014. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.016.
- [17] CHRISTOFORO, A.L., AFTIMUS, B.H.C., PANZERA, T.H., et al., "Physico-mechanical characterization of the Anadenanthera colubrina Wood specie", Engenharia Agrícola, v. 37, n. 2, pp. 376–384, 2017. doi: http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n2p376-384/2017.
- [18] AQUINO, F.R., PEÑA, M.M.G., HERNÁNDEZ, J.I.V., et al., "Mechanical properties of wood of two Mexican Oaks: relationship to selected physical properties", *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 76, n. 1, pp. 69–77, 2018. doi: http://dx.doi.org/10.1007/s00107-017-1168-9.
- [19] CHEN, Y., GUO, W., "Nondestructive evaluation and reliability analysis for determining the mechanical properties of old wood of ancient timber structure", *BioResources*, v. 12, n. 2, pp. 2310–2325, 2017. doi: http://dx.doi.org/10.15376/biores.12.2.2310-2325.
- [20] ANDRADE, C.R., TRUGILHO, P.F., NAPOLI, A., et al., "Estimation of the mechanical properties of wood from *Eucalyptus urophylla* using near infrared spectroscopy", *Cerne*, v. 16, n. 3, pp. 291–298, 2010. doi: http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602010000300005.
- [21] NISGOSKI, S., MUÑIZ, G.I.B., TRIANOSKI, R., et al., "Características anatômicas da madeira e índices de resistência do papel de Schizolobium parahyba (Vell.) Blake proveniente de plantio experimental", Scientia Forestalis, v. 40, n. 94, pp. 203–211, 2012.
- [22] MOTTA, J.P., OLIVEIRA, J.T.S., BRAZ, R.L., et al., "Caracterização da madeira de quatro espécies florestais", *Ciência Rural*, v. 44, n. 12, pp. 2186–2192, 2014. doi: http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20130479.
- [23] SOBIER, H., MENZEMER, C.C., SRIVATSAN, T.S., "An investigation and understanding of the me-chanical response of Palmyrah timber", *Materials Science and Engineering*, v. 354, n. 1-2, pp. 257–269, 2003. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00015-7.
- [24] REDMAN, A.L., BAILLERES, H., TURNER, I., et al., "Characterisation of wood-water relation-ships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade", *Wood Science and Technology*, v. 50, n. 4, pp. 739–757, 2016. doi: http://dx.doi.org/10.1007/s00226-016-0818-0.
- [25] WENTZEL, M., KODDENBERG, T., MILITZ, H., "Anatomical characteristics of thermally modified Eucalyptus nitens wood in an open and closed reactor system", *Wood Material Science & Engineering*, v. 15, n. 4, pp. 223–228, 2019. doi: http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2019.1572649.

- [26] DE ARAUJO, V., VASCONCELOS, J., GAVA, M., et al., "What does Brazil know about the origin and uses of tree species employed in the housing sector? Perspectives on available species, origin and current challenges", *International Forestry Review*, v. 23, n. 3, pp. 392–404, 2021. doi: http://dx.doi. org/10.1505/146554821833992794.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRADE NORMAS TÉCNICAS, ABNTNBR 15066 Madeira e Pasta Celulósica Determinação das Dimensões de Fibras – Método de Microscopia Óptica, Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- [28] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS, "List of microscopic features for hardwood identification", *IAWA Bulletin*, v. 3, n. 10, pp. 219–332, 1989.
- [29] JOHANSEN, D.A., Plant microtechnique, New York, McGraw-Hill, 523 p., 1940.
- [30] SASS, J.E., Botanical microtechnique, 2 ed., Ames, Iowa State College Press, 228 p., 1951. doi: http:// dx.doi.org/10.5962/bhl.title.5706.
- [31] ABRUZZI, R.C., DEDAVID, B.A., PIRES, M.J.R., *et al.*, "Relationship between density and anatomical of different species of *Eucalyptus* and identification of preservatives", *Materials Research*, v. 16, n. 6, pp. 1428–1438, 2013. doi: http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392013005000148.
- [32] PRASETYO, A., AISO, H., ISHIGURI, F., *et al.*, "Variations on growth characteristics and wood properties of three *Eucalyptus* species planted for pulpwood in Indonesia", *Tropics*, v. 26, n. 2, pp. 59–69, 2017. doi: http://dx.doi.org/10.3759/tropics.MS16-15.
- [33] ALFONSO, V.A., "Caracterização anatômica da madeira e casca das principais espécies de *Eucalyptus*, cultivadas no Estado de São Paulo", *Silvicultura*, v. 8, n. 28, pp. 720–725, 1983.
- [34] PALERMO, G.P.D., LATORRACA, J.V., CARVALHO, A.M., et al., "Anatomical properties of Eucalyptus grandis wood and transition age between the juvenile and mature woods", European Journal of Wood and Wood Products, v. 73, n. 6, pp. 775–780, 2015. doi: http://dx.doi.org/10.1007/s00107-015-0947-4.
- [35] CARLQUIST, S.J., Comparative wood anatomy, 2 ed., Berlin, Springer, 2001. doi: http://dx.doi. org/10.1007/978-3-662-04578-7.
- [36] SCUKANEC, V., PETRIC, B., "The relationship between wood ray shape and ray volume percentage in beech", *IAWA Bulletin*, v. 3, pp. 57–59, 1977.
- [37] GIRAUD, B., "Correlations between wood anatomical characters in Entandophragma utile (Meliaceae)", *IAWA Bulletin*, v. 1, n. 1-2, pp. 73–77, 1980. doi: http://dx.doi.org/10.1163/22941932-90000810.
- [38] FERREIRINHA, M.P., "Appraisal of the variation in the micrographic fibre characteristics within and between trees of tropical hardwood species", *Garcia de Orta*, v. 13, pp. 383–390, 1965.
- [39] GONÇALEZ, J.C., BREDA, L.C.S., BARROS, J.F.M., et al., "Características tecnológicas das madeiras de Eucalyptus grandis W.Hill ex Maiden e Eucalyptus cloeziana F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira", Ciência Florestal, v. 16, n. 3, pp. 329–341, 2006. doi: http://dx.doi. org/10.5902/198050981912.
- [40] LI, C., WENG, Q., CHEN, J.B., et al., "Genetic parameters for growth and wood mechanical properties in Eucalyptus cloeziana F. Muell.", New Forests, v. 48, n. 1, pp. 33–49, 2017. doi: http://dx.doi.org/10.1007/ s11056-016-9554-4.
- [41] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, *Informações sobre madeiras*, São Paulo, IPT, 2020, https://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca, acessado em setembro de 2022.
- [42] BARRICHELO, L.E.G., BRITO, J.O., "Variabilidade longitudinal e radial da madeira de *E. grandis*", In: *Anais do Congresso Anual da ABCP*, São Paulo, 1984.
- [43] POUBEL, D.S., GARCIA, R.A., LATORRACA, J.V.F., et al., "Estrutura anatômicas e propriedades físicas da madeira de Eucalyptus pellita F. Muell", Floresta e Ambiente, v. 18, n. 2, pp. 117–126, 2011. doi: http:// dx.doi.org/10.4322/floram.2011.029.
- [44] LAHR, F.A.R., AFTIMUS, B.H.C., ARROYO, F.N., et al., "Full characterization of Vatairea sp. wood specie", International Journal of Materials Engineering, v. 6, n. 3, pp. 92–96, 2016. doi: http://dx.doi. org/10.5923/j.ijme.20160603.05.
- [45] ALMEIDA, T.H., ALMEIDA, D.H., CHRISTOFORO, A.L., et al., "Density as estimator of strength in compression parallel to the grain in wood", *International Journal of Materials Engineering*, v. 6, n. 3, pp. 67–71, 2016. doi: http://dx.doi.org/10.5923/j.ijme.20160603.01.
- [46] MISSANJO, E., MATSUMURA, J., "Wood density and mechanical properties of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Malawi", *Forests*, v. 7, n. 12, pp. 1–10, 2016. doi: http://dx.doi.org/10.3390/f7070135.

- [47] AJUZIOGU, G.C., NWOSU, M.O., NZEKWE, U., et al., "Biomechanics, an aspect of the relationships between wood anatomical parameters and mechanical strength in ten Nigerian timber species", *Interna*tional Journal of Scientific and Engineering Research, v. 5, n. 2, pp. 628–645, 2014.
- [48] TOONG, W., RATNASINGAM, J., ROSLAN, M.K.M., et al., "The prediction of wood properties from anatomical characteristics: the case of common commercial Malaysian timbers", *BioResources*, v. 9, n. 3, pp. 5184–5197, 2014. doi: http://dx.doi.org/10.15376/biores.9.3.5184-5197.