



Influência dos anéis de crescimento nas propriedades mecânicas da madeira de *Pinus*

Influence of growth rings on the mechanical properties of Pinus wood

Raynord Mayard^{1*}, Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho², Lorenzo Lube dos Santos³, Fabricio Gomes Gonçalves², João Gabriel Missia da Silva²

¹ Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Goiabeiras, ES, Brasil

² Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. Goiabeiras, ES, Brasil.

³ Faculdades Integradas Espírito Santenses. Departamento de Engenharias e Arquitetura. Vitória, ES, Brasil

* Autor de correspondencia. raynord2006@yahoo.fr

RESUMO

A inspeção visual é o primeiro parâmetro de qualidade dos materiais, sobretudo, quando se refere à madeira, que possui defeitos naturais, a exemplo da madeira de *Pinus*. Este estudo teve como objetivo avaliar a relação dos anéis de crescimento e as características físico-mecânicas da madeira de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Foram utilizados 250 corpos de prova de madeira, com dimensões, aproximadamente, de $89 \text{ mm}^3 \times 39 \text{ mm}^3 \times 90 \text{ mm}^3$. Para a determinação da proporção da área e espessura do lenho tardio nos anéis de crescimento, as faces dos corpos de prova foram escaneadas, e a proporção da área de lenho tardio/inicial quantificada por meio de software analisador. Os corpos de prova foram separados pelo número de anéis de crescimento e sua forma de apresentação no plano transversal, totalizando cinco tratamentos. Em seguida, foram realizados ensaios de resistência de compressão normal às fibras por meio de quatro diferentes métodos (ABNT - $F_{c,90}$, ISO - $F_{c,90}$, ASTM - $F_{c,90}$, ABNT- $E_{c,90}$). Como resultado, foi encontrada diferença significativa entre as médias dos cinco tratamentos utilizados para a resistência à compressão normal às fibras. Os modelos matemáticos encontrados foram menos ajustados. Em conclusão, a densidade aparente da madeira foi explicada, parcialmente, pelos números de anéis de crescimento, pela proporção de lenho tardio e pela espessura de lenho tardio. A resistência à compressão normal às fibras mostrou diferença significativa entre as normas ISO 13910, NBR 7190 e ASTM D143.

PALAVRAS CHAVE: ABNT 7190, ASTM D245, compressão normal às fibras, densidade aparente, ISO 13910, modulo de elasticidade.

ABSTRACT

Visual inspection is the first parameter of the quality of materials, especially when it comes to wood, which has natural defects, such as *Pinus* wood. This study aimed to evaluate the relationship between the growth rings and the physical-mechanical characteristics of the Loblolly and Slash pine wood. 250 wooden specimens were used, with dimensions of approximately $89 \text{ mm}^3 \times 39 \text{ mm}^3 \times 90 \text{ mm}^3$. To determine the proportion of the area and thickness of the latewood in the growth rings, the faces of the specimens were scanned, and the proportion of the area of the latewood/earlywood was quantified by means of analyzer software. The specimens were separated by the number of growth rings and their form of presentation in the transversal plane, totaling five treatments. Then, tests of compression perpendicular to grain were carried out using four different methods (ABNT - $F_{c,90}$, ISO - $F_{c,90}$, ASTM - $F_{c,90}$, ABNT- $E_{c,90}$). As a result, a significant difference was found between the means of the five treatments used for compression perpendicular to grain. The mathematical models found were less fit. In conclusion, the apparent wood density was explained, in part, by the number of years of growth, as well as the proportion and thickness of the latewood. The normal compressive strength of the fibers showed a significant difference between the ISO 13910, NBR 7190, and ASTM D143 standards.

KEYWORDS: ABNT 7190, ASTM D245, compression perpendicular to grain, apparent density, ISO 13910, modulus of elasticity.

INTRODUÇÃO

A avaliação das propriedades físico-mecânicas é fundamental para a classificação das peças de madeira, cujo intuito é alcançar parâmetros mínimos para serem aplicados a determinados usos. Dessa forma, a classificação visual estrutural é projetada para permitir uma escolha, praticamente, ilimitada no estabelecimento de critérios de qualquer qualidade para melhor atender aos requisitos de produção e utilização (American Society of Testing and Materials [ASTM], 2014).

A inspeção visual é o primeiro parâmetro de qualidade dos materiais, principalmente, quando se refere à madeira, que possui defeitos naturais, que podem ser notados, na maioria das vezes, na percepção do olhar. A madeira de *Pinus*, que contém coloração clara, presença de nós, canais resiníferos e desvio de grã, é facilmente distinta pela inspeção visual (Siegloch e Marchiori, 2015; Santos, 2019).

Em um anel de crescimento típico, o lenho inicial caracteriza-se por ser produzido quando a atividade fisiológica da planta está forte e, consequentemente, sua atividade cambial, ocasionando madeira de coloração mais clara. O lenho tardio, marcado por ser apresentado em estações de baixa atividade fisiológica ou dormência, tem coloração de tonalidade mais escura. A visualização dos anéis de crescimento é comum nas gimnospermas ou nas coníferas (Rall, 2010; Soares Filho, 2014).

O número de anéis de crescimento anuais por centímetro é um preditor da taxa de crescimento de uma árvore. Geralmente, está relacionado à madeira juvenil ou à adulta, por exemplo, porcentagens de crescimento rápido produzem proporções de madeira juvenil, que, por sua vez, está conexa à sua propriedade mecânica (Cardoso et al., 2019). Uma pesquisa sobre a caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* sustentou que o emprego de caracteres macroscópicos de fácil aquisição, como proporção de lenho tardio, ou número de anéis de crescimento por centímetro linear, pode ser empregado para a predição da resistência da madeira (Melo et al., 2010).

As propriedades da madeira são variáveis no sentido medula-casca, uma vez que, nos primeiros anéis de

crescimento, a madeira proporciona menor densidade e menor comprimento de traqueídeos (Vidaurre et al., 2011) e ocorre inversamente no sentido oposto. Esses autores alegaram que, em anéis consecutivos, saindo da medula, verifica-se o aumento da densidade e das características anatômicas, como comprimento, diâmetro do lúmen e espessura da parede de traqueídeo.

A norma americana estabelece classes de densidade para a madeira serrada de conífera em função da taxa de crescimento, que pode ser densa, não densa ou leve (ASTM, 2019). Essa norma considerou dois critérios distintos para a classificação da madeira quanto à densidade: o número de anéis por polegada e a proporção de lenho tardio, os quais estão associados à velocidade de crescimento da árvore e ao local de seu desenvolvimento (Cukor et al., 2020; Foti et al., 2018). O índice de crescimento se refere à quantidade de anéis de crescimento presentes em 2,5 cm (1"), medida em uma linha radial representativa, considerando a direção medula-casca.

A norma NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT], 1997) cita ainda que os procedimentos, para a determinação das propriedades da madeira a serem consideradas em um projeto estrutural, ou seja, resistência, rigidez e módulo de elasticidade, devem respeitar essa regra, o que não influencia tanto a determinação da densidade e o teor de umidade, por levarem em conta apenas o volume e a massa de todo corpo de prova.

OBJETIVOS

O objetivo geral deste artigo foi desenvolver modelos matemáticos que relacionam, a densidade aparente e as propriedades físico-mecânicas da madeira *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Para atingir o objetivo geral, o trabalho foi repartido em três objetivos específicos: a) Relacionar a densidade aparente da madeira com o número de anéis de crescimento por polegada, a espessura e a proporção do lenho tardio; b) Comparar os resultados dos ensaios da resistência à compressão normal às fibras, realizados de acordo com Organização Internacional de Normalização, a Norma Brasileira Regulamentadora e a American Society for Testing and Materials; c) Desenvolver modelos matemáticos para



estimar as propriedades físico-mecânicas da madeira em função das características dos anéis de crescimento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Espécie e origem da madeira

Foram utilizadas madeiras da espécie *Pinus spp.*, previamente serradas e fornecidas pela Indústria Berneck S.A. Painéis e Serrados, localizada no município de Thomaz Coelho, estado do Paraná, Brasil. As madeiras ensaiadas são da espécie *Pinus spp.* com densidade aparente (DA) variando de 320 kg m⁻³ a 770 kg m⁻³. Os ensaios foram realizados no laboratório de Estruturas de Madeiras (LEMAP) da Universidade Federal do Espírito Santo.

Os corpos de provas (CPs), empregados para os ensaios de compressão, também foram utilizados para determinar o teor de umidade e densidade aparente da madeira. Os procedimentos de ensaio para determinação de características mecânicas seguiram as prescrições da NBR 7190 (ABNT, 1997), ISO 13910 (International Organization for Standardization [ISO], 2013), ASTM D143 (ASTM, 2014) e COPANT 466 (Comisión Panamericana de Normas Técnicas [Copant], 1972).

Preparo e seleção dos corpos de prova

Em primeiro lugar, todos os corpos de prova do lote foram lixados para melhor visualização dos anéis de crescimento e contada a quantidade dos anéis de crescimento por polegada para cada corpo de prova. Depois de serem lixados, todos os corpos de prova foram medidos e pesados para a determinação de suas densidades aparentes (ABNT, 1997).

Foi determinado o teor de umidade dos corpos de prova por meio de 24 corpos de prova aleatórios, os quais foram pesados e secos em uma estufa de circulação forçada de ar (Ethik Technology, 400/5D) a uma temperatura de 103 °C ± 3 °C (ABNT, 1997).

O sentido de quantificação dos anéis de crescimento foi obtido conforme a figura 1, atentando para a presença

ou não da medula, conforme estipulado por instrumento normativo que estabelece os princípios básicos da classificação visual da madeira, descrito em D245 - 06 (ASTM, 2019).

Mensuração da área dos anéis de crescimento

Na classificação da densidade dos corpos de prova, foram considerados o número de anéis de crescimento por polegada e a proporção do lenho tardio, os quais foram divididos em três orientações diferentes: tangencial, radial tangencial e medular conforme a figura 2.

As duas primeiras classes foram subdivididas em denso e não denso, de acordo com o número de anéis, formando, dessa forma, cinco tratamentos. A norma americana D245-06 (ASTM, 2019) estabelece classes de densidade para a madeira de coníferas em função da taxa de crescimento. Para ser considerada densa, a peça de madeira deve ter seis ou mais anéis de crescimento por polegada e além disso, mais de um terço (1/3) da seção transversal deve ser de madeira de inverno, ou seja, lenho tardio. Ao todo, foram empregadas 250 amostras para a realização do trabalho, considerando 50 para cada tratamento.

Para a avaliação dos anéis de crescimento, os corpos de provas foram classificados em cinco tratamentos: tangencial denso (TD), tangencial não denso (TND), radial tangencial denso (RTD), radial tangencial não denso (RTND) e classe medular (CM). A classe medular teve apenas um tratamento, pois não houve corpos de prova com anéis de crescimento densos. Nessa classe, foram considerados todos os corpos de prova, que continham medula ou aqueles com anéis de crescimento próximos a eles.

Em seguida, procedeu-se a classificação dos corpos de prova quanto à DA da madeira. Isso possibilitou a realização de uma correlação do número dos anéis de crescimento e a orientação dos planos de corte destes (radial, tangencial e radial tangencial) com as demais propriedades estudadas.

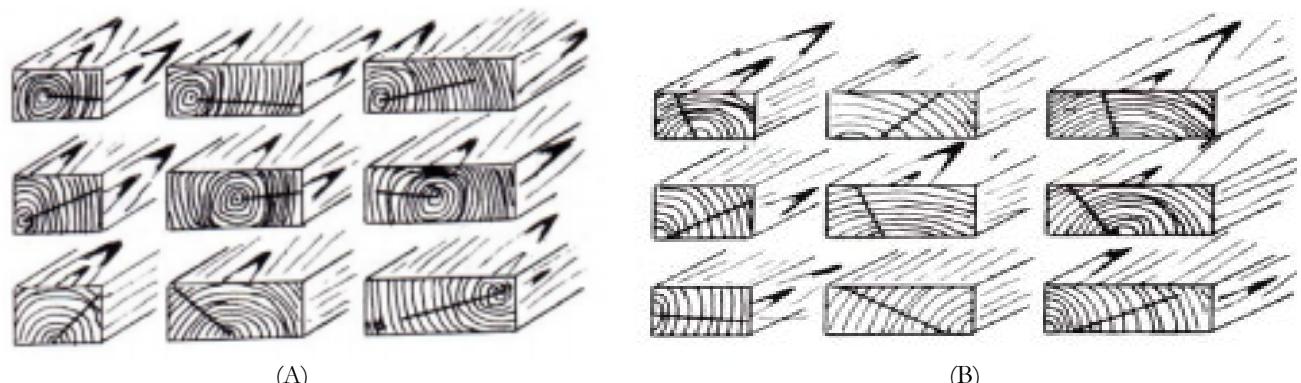


FIGURA 1. Linha radial representativa contendo medula (A) e em peça sem medula (B) para quantificação dos anéis de crescimento em corpos de prova.

Fonte: Carreira, Dias e Calil Jr. (2004).

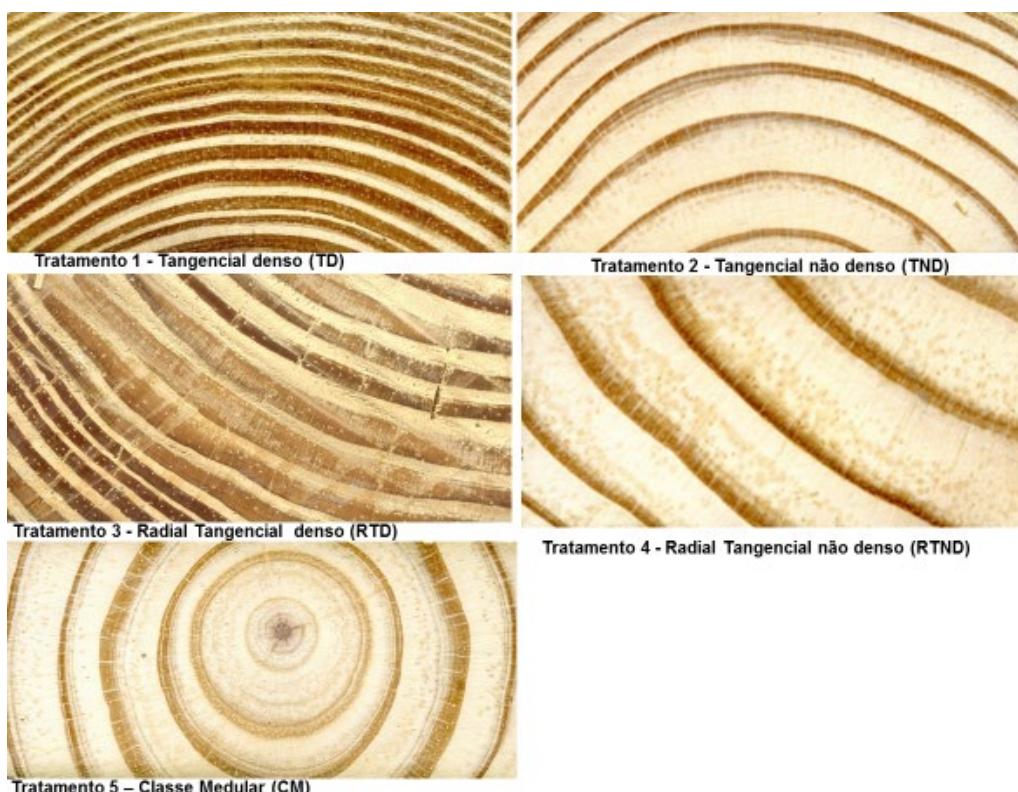


FIGURA 2. Definição do enquadramento das classes em função da posição dos anéis de crescimento e da medula nos corpos de prova.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a determinar a proporção do lenho tardio dos anéis de crescimento, as faces dos corpos de prova foram escaneados (Epson Perfection, V750). Em seguida, as imagens foram avaliadas no software livre *Image J®* versão

1.49 (Rasband, 2012), conforme ilustrada na figura 3. As imagens foram, então, convertidas para a resolução de 8 bits, o que possibilitou a mensuração e a quantificação dos lenhos primaveril (branco) e outonal (preto).

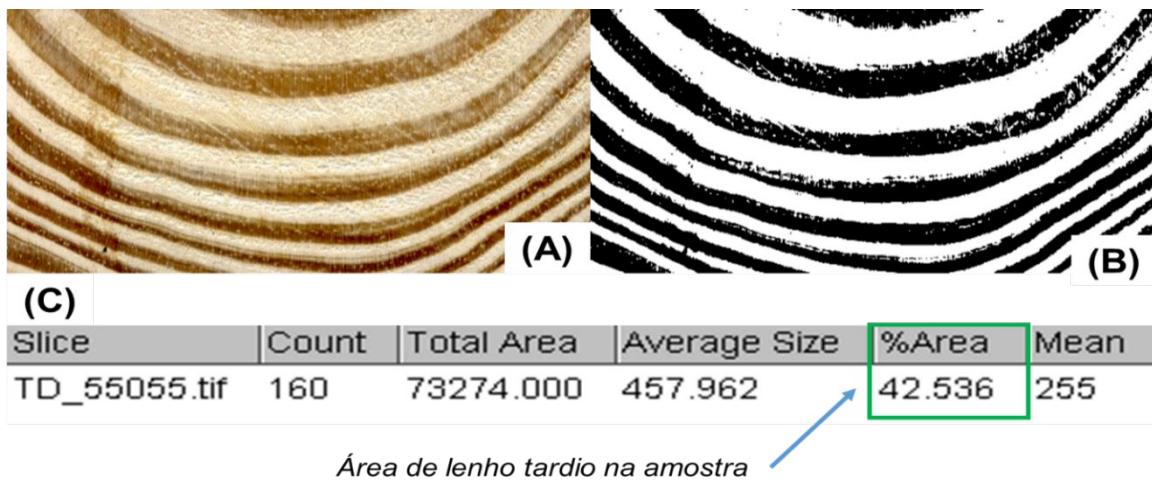


FIGURA 3. Processo de determinação do lenho tardio em software analisador de imagem.

(A) Entrada da face do corpo de prova; (B) Processamento da imagem; e (C) resultado do cálculo da proporção de lenho tardio

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, procedeu-se a classificação dos corpos de prova quanto à DA da madeira. Isso possibilitou a realização de uma correlação do número dos anéis de crescimento e a orientação dos planos de corte destes (radial, tangencial e radial tangencial) com as demais propriedades estudadas.

Ensaio de compressão normal às fibras

Para a avaliação da resistência à compressão normal às fibras e de seu respectivo módulo de elasticidade, foram empregados os requisitos da norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Os ensaios foram realizados nos mesmos 250 corpos de prova, cujos números de anéis de crescimento foram avaliados.

Para as avaliações de módulo de elasticidade, foi conectado à máquina de ensaios (ENERPAC, P80) um par de transdutor de deslocamento (LVDTs) em posição oposta à do corpo de prova. Com esse LVDT, foi possível obter o deslocamento das amostras durante os ensaios e, por consequência, as deformações e, posteriormente, correlacioná-las com a tensão submetida, conforme descrito na lei de *Hooke*.

O módulo de elasticidade ($E_{c,90}$), expressado em MPa, foi determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão × deformação específica, definida pelos pontos

$(\sigma_{10\%} \text{ e } \varepsilon_{10\%})$ e $(\sigma_{50\%} \text{ e } \varepsilon_{50\%})$, correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da resistência à compressão normal às fibras, avaliada no ensaio e obtida pela equação 1 (ABNT, 1997).

$$E_{c,90} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (1)$$

A resistência à compressão normal às fibras (ABNT, 1997) foi avaliada pelo valor convencional, determinado pela deformação específica residual de 0,2%. Para adquirir o valor da resistência à compressão normal às fibras ($F_{c,90}$) (ISO, 2013), foi aplicada a equação 2. Para obtenção do $F_{c,90}$ (ASTM, 2014), foi considerada a carga proporcional ao deslocamento equivalente a 2,5 mm.

$$F_{c,90} = \frac{F_{ult}}{90b} \quad (2)$$

onde:

F_{ult} = valor da carga aplicada no estado limite último (carga final)

b = largura do corpo de prova

Análise estatística

Para as análises estatísticas, utilizou-se o software SigmaPlot 13 e minitab (19.1.1.0 versão 2020). Os dados

das características dos anéis de crescimento, as propriedades mecânicas e a densidade aparente da madeira foram submissas à análise de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e de homocedasticidade pelo teste de Cochran. Foram realizados correlação de Pearson a 1% de significância, testes de média a 5% de significância, desvio padrão, análise de regressão linear e estatística descritiva.

As estimativas da densidade aparente, em função do número de anéis de crescimento (NAC), espessura do lenho tardio (ELT) e proporção de lenho tardio (PLT) e das propriedades mecânicas em função da DA, NAC, ELT e PLT, foram realizadas pela análise de regressão linear para o conjunto dos 250 corpos de prova.

A qualidade de ajuste dos modelos foi obtida em função de coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão e a significância de valores dos modelos.

RESULTADOS

Caracterização dos anéis de crescimento e a densidade aparente do *Pinus* spp.

Para os 250 corpos de prova avaliados, foi apresentada uma análise descritiva, em que foi observada a média e o desvio padrão das características dos anéis de crescimento e da DA da madeira

de *Pinus* spp. de cada um dos cinco tratamentos, conforme pode ser observado na tabela 1.

Os cinco tratamentos foram avaliados para as seguintes variáveis: o número de anéis de crescimento (NAC), a proporção da área de lenho tardio (PLT), a espessura do lenho tardio (ELT) e a densidade aparente (DA). Foi observado que os valores médios da DA, ELT e o NAC da madeira de *Pinus* spp. do tratamento tangencial denso foram maiores comparando aos demais. Enquanto os valores médios de PLT no tratamento tadal tangencial denso foram analogicamente maiores que nos outros.

Caracterização da resistência e rigidez à compressão normal às fibras (Fc,90) da madeira de *Pinus*

Para os testes realizados, houve diferença significativa ($p < 0,05$), por isso, os dados foram transformados pela raiz quadrada de x, sendo analisados novamente. Contudo, nos resultados, foram apresentados os valores originais. Nessa transformação, E_{c90} , o número de anéis de crescimento (NAC), a proporção de lenho tardio (PLT) e a espessura do lenho tardio (ELT) não seguiram uma distribuição normal. De fato, foi apresentada uma análise estatística descritiva (média e desvio padrão) para essas variáveis.

TABELA 1. Médias das características dos anéis de crescimento e da densidade aparente da madeira de *Pinus* spp.

Tratamentos	PLT* (%)	ELT (mm/pol.)	ELT (mm cm ⁻¹)	NAC (unid./pol.)	NAC (mm cm ⁻¹)	DA (kg m ⁻³)
Tangencial denso	42,59 ± 15,14	11,66 ± 1,52	4,59 ± 0,60	5,58 ± 1,25	2,20 ± 0,49	554,64 ± 63,36
Tangencial não denso	25,01 ± 13,30	6,95 ± 2,22	2,74 ± 0,87	3,08 ± 0,75	1,21 ± 0,30	431,18 ± 47,41
Radial tangencial denso	46,88 ± 16,34	10,93 ± 1,19	4,30 ± 0,47	5,06 ± 1,04	1,99 ± 0,41	552,14 ± 56,78
Radial tangencial não denso	21,81 ± 17,33	5,83 ± 1,87	2,30 ± 0,74	2,72 ± 0,64	1,07 ± 0,25	449,42 ± 57,27
Classe medular	14,56 ± 9,21	5,01 ± 2,20	1,97 ± 0,87	2,66 ± 0,56	1,05 ± 0,22	399,21 ± 35,78

*: desvio padrão; * PLT: proporção de lenho tardio, ELT: espessura de lenho tardio, NAC (unidade por polegada): número de anéis de crescimento, DA: densidade aparente.



A tabela 2 consta cada uma das propriedades mecânicas avaliadas pelas normas NBR (ABNT, 1997), ISO (2013) e ASTM (2014), que foram comparadas pelo teste de Tukey com nível de significância de 5%.

Análise da correlação entre as propriedades físico-mecânicos na madeira de *Pinus*

Para todas as propriedades (Tabela 3), houve correlação significativa ($p < 0,05$). O máximo valor encontrado entre $F_{c,90}$ e $F_{c,90}$ foi 0,9797; e o mínimo valor, estatisticamente significativo

entre $E_{c,90}$ e PLT foi 0,3327. Referente a densidade aparente e as características dos anéis de crescimento *versus* mecânicas, a tabela 3 mostra o maior valor foi entre DA e $F_{c,90}$ (0,4503) e o menor estatisticamente significante foi entre PLT e $E_{c,90}$ (0,3327).

Os resultados entre as propriedades da madeira para estimar a densidade aparente e a rigidez e resistência à compressão normal às fibras foi realizada pela análise de regressão linear simples (Tabela 4), por ser mais simples e os coeficientes serem significativos, mesmo com baixos coeficientes de correlação a ela associados.

TABELA 2. Média da rigidez e módulo de elasticidade a compressão normal às fibras da madeira de *Pinus spp.* por tratamento.

Tratamentos	F_{c90}^* (MPa)	F_{c90}^2 (MPa)	F_{c90}^3 (MPa)	K_{c90} (MPa mm ⁻¹)	E_{c90} (Mpa)
Tangencial denso	13,21 A ab [#] ± 2,78	14,24 A a ± 2,77	12,33 A b ± 2,69	7,42 A ± 1,66	578,38 ± 141,63
Tangencial não denso	10,65 C a ± 2,15	11,52 B a ± 2,20	10,58 B a ± 2,05	4,42 D ± 1,15	381,48 ± 104,91
Radial tangencial denso	11,89 B b ± 2,33	13,09 A a ± 2,40	11,80 A b ± 2,40	6,23 B ± 1,65	505,23 ± 140,33
Radial tangencial não denso	10,10 C b ± 1,72	11,08 B a ± 1,84	9,25 C c ± 1,73	5,22 C ± 1,54	418,49 ± 137,12
Classe Medular	8,31 D b ± 1,50	9,65 C a ± 1,78	8,55 C b ± 1,71	4,62 CD ± 1,29	375,88 ± 104,42

: desvio padrão; * F_{c90} : resistência à compressão normal às fibras; I conforme a norma NBR 7190:1997, 2 ISO 13910:2013, 3 ASTM D 143:2014; E_{c90} : módulo de elasticidade à compressão normal às fibras; K_{c90} : rigidez à compressão normal às fibras. # Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não se diferenciam entre si (Tukey $\geq 0,05$).

TABELA 3. Matriz de correlações entre as propriedades físico-mecânicas e características dos anéis de crescimento (correlação de Pearson).

	F_{c90}^1	F_{c90}^2	F_{c90}^3	E_{c90}	K_{c90}	PLT	ELT	NAC	DA)
F_{c90}^1	1,0000								
F_{c90}^2	0,9797 **	1,0000							
F_{c90}^3	0,9438 **	0,9404 **	1,0000						
E_{c90}	0,6129 **	0,6111 **	0,5914 **	1,0000					
K_{c90}	0,6174 **	0,6086 **	0,5624 **	0,8810 **	1,0000				
PLT	0,3472 **	0,3451 **	0,3429 **	0,3327 **	0,3169 **	1,0000			
ELT	0,5478 **	0,5441 **	0,5235 **	0,3890 **	0,4629 **	0,5015 **	1,0000		
NAC	0,4477 **	0,4370 **	0,4150 **	0,4218 **	0,4595 **	0,5236 **	0,6701 **	1,0000	
DA	0,4488 **	0,4503 **	0,4026 **	0,4115 **	0,4576 **	0,6100 **	0,6369 **	0,7380 **	1,0000

F_{c90} : resistência à compressão normal às fibras; I conforme a norma NBR 7190:1997, 2 ISO 13910:2013, 3 ASTM D 143:2014; E_{c90} : módulo de elasticidade à compressão normal às fibras; K_{c90} : rigidez à compressão normal às fibras; PLT: proporção da área de lenho tardio; ELT: espessura de lenho tardio; NAC: número de anéis de crescimento por polegada; DA: densidade aparente. Todos os valores apresentados foram significativos ao nível de 1% de significância (**).

TABELA 4. Modelos de regressão para a DA em função de NAC, ELT e PLT e E_{c90} ; K_{c90} ; F_{c90} em função de DA, NAC, ELT e PLT.

Equação	R^2	S_{xy}	F_c	P-valor
$DA = 323,77^{**} + 40,20^{**} NAC$	0,5428	56,16	296,58	0,000**
$DA = 346,79^{**} + 16,16^{**} ELT$	0,4032	64,16	169,24	0,000**
$DA = 397,17^{**} + 2,66^{**} PLT$	0,3695	65,94	146,98	0,000**
$E_{c90} = 107,96 + 0,73 DA$	0,1638	136,39	49,80	0,000**
$E_{c90} = 299^{**} + 41,30^{**} NAC$	0,1750	135,52	53,66	0,000**
$E_{c90} = 313^{**} + 17,70^{**} ELT$	0,1480	137,69	44,23	0,000**
$E_{c90} = 378^{**} + 2,60^{**} PLT$	0,1070	140,95	30,86	0,000**
$K_{c90} = 0,887 + 0,010^{**} DA$	0,2032	1,637	64,52	0,000**
$K_{c90} = 3,54^{**} + 0,55^{**} NAC$	0,2080	1,63	66,37	0,000**
$K_{c90} = 3,56^{**} + 0,26^{**} ELT$	0,2110	1,63	67,63	0,000**
$K_{c90} = 4,73^{**} + 0,03^{**} PLT$	0,0968	1,74	27,69	0,000**
$F_{c90}^1 = 3,88^{**} + 0,015^{**} DA$	0,1980	2,41	62,53	0,000**
$F_{c90}^1 = 7,81^{**} + 0,79^{**} NAC$	0,1970	2,42	62,16	0,000**
$F_{c90}^1 = 7,19^{**} + 0,45^{**} ELT$	0,2970	2,26	106,34	0,000**
$F_{c90}^1 = 9,35^{**} + 0,05^{**} PLT$	0,1170	2,53	33,98	0,000**
$F_{c90}^2 = 4,85^{**} + 0,02^{**} DA$	0,2000	2,44	63,07	0,000**
$F_{c90}^2 = 8,93^{**} + 0,78^{**} NAC$	0,1880	2,46	58,53	0,000**
$F_{c90}^2 = 8,25^{**} + 0,45^{**} ELT$	0,2930	2,30	104,32	0,000**
$F_{c90}^2 = 10,4^{**} + 0,049^{**} PLT$	0,1160	2,57	33,52	0,000**
$F_{c90}^3 = 4,54^{**} + 0,01^{**} DA$	0,1590	2,36	47,97	0,000**
$F_{c90}^3 = 7,82^{**} + 0,70^{**} NAC$	0,1688	2,35	51,59	0,000**
$F_{c90}^3 = 7,17^{**} + 0,41^{**} 2ELT$	0,2710	2,20	93,64	0,000**
$F_{c90}^3 = 9,10^{**} + 0,05^{**} PLT$	0,1140	2,43	33,04	0,000**

R^2 : coeficiente de determinação; S_{xy} : erro médio padrão absoluto; F_c : F calculado; P-valor e os coeficientes a nível de probabilidade de erro ($p < 0,01$) (**); DA: densidade aparente em [kg m^{-3}]; NAC: número de anéis de crescimento por polegada; ELT: espessura de lenho tardio em [mm pol-1]; PLT: proporção da área de lenho tardio em [%]; E_{c90} : módulo de elasticidade à compressão normal às fibras em [MPa]; K_{c90} : rigidez à compressão normal às fibras; F_{c90} : resistência à compressão normal às fibras em [MPa]; 1 conforme a norma NBR 7190:1997; 2 ISO 13910:2013 3 ASTM D 143:2014.

Regressão linear das propriedades físicomecânicas

A busca por modelos estatísticos, que estimam melhor as propriedades mecânicas em função da densidade aparente e das características dos anéis de crescimento, foi realizada por meio da análise de regressão múltipla (Tabela 5). A proporção de lenho tardio, por não ser significativa ($p \geq 0,05$), foi apresentada nas equações. Os modelos múltiplos de E_{c90} , K_{c90} e F_{c90} , em função de número de anéis de crescimento e densidade aparente, apresentaram evolução dos valores de R^2 , mas permaneceram

baixos. De todos os modelos múltiplos significativos, o de F_{c90}^1 (conforme a norma NBR 7190:1997) foi o mais preciso ($R^2 = 0,2250$), e o de F_{c90}^3 (conforme a norma ASTM D 143:2014) apresentou o menor valor de R^2 (0,1860). A constante dos modelos K_{c90} , em função de DA, e A F_{c90}^3 , em função de ELT, não foi significativa, por esse motivo, não foi apresentada. De fato, os modelos não apresentaram correção.

Foram ajustados os modelos múltiplos de E_{c90} , K_{c90} e F_{c90} , em função da densidade aparente a 12%, e as espessuras do lenho tardio e lenho inicial. Porém, a espessura do lenho inicial não foi



apresentada, visto que não teve contribuição significativa no aumento das propriedades mecânicas. Todos os coeficientes de determinação foram considerados significativos, mesmo sendo baixos. Enquanto o modelo de F_{c90}^2 (conforme a norma ISO 13910:2013), em função da ELT, obteve a maior precisão ($R^2 = 0,3090$), o modelo de E_{c90} teve o menor valor ($R^2 = 0,1900$), no entanto, comparados à regressão linear, todos os coeficientes R^2 aumentaram.

DISCUSSÃO

Caracterização dos anéis de crescimento e a densidade aparente do *Pinus spp.*

Os valores da densidade aparente média ($399,21 \text{ kg m}^{-3}$ e $554,64 \text{ kg m}^{-3}$) encontrados na tabela 1, foram similares aos valores de 460 kg m^{-3} e 500 kg m^{-3} , encontrados por Amorim et al (2013) e Almeida et al. (2014). O valor da densidade aparente obtida pode ser considerado como satisfatório, devido à maior quantidade de corpos de prova não densos, empregados nesta pesquisa, proporcionando, assim, uma menor densidade média.

O NAC por polegada e a PLT apresentaram uma correlação igual a 52,36%. Os valores médios de anéis de crescimento por polegada, nesse artigo, $2,7 (1,1 \text{ cm}^{-1})$ próxima da medula e $5,6 (2.2 \text{ cm}^{-1})$ próxima à casca foram semelhantes ao observado por Haselein et al. (2000), próximo a medula em toras de *Pinus elliottii*, que foi $3,5 (1.4 \text{ cm}^{-1})$ próxima à medula e $8,2 (3.2 \text{ cm}^{-1})$ próxima à casca.

Observa-se, na figura 3, que quanto maiores foram ELT, PLT e NAC, maior foi a densidade aparente. Castro (2011) observou que os anéis de crescimento, próximos à medula, são mais largos e com lenho tardio de menor espessura, comparados ao lenho inicial; e os anéis de crescimento próximos à casca mantinham, aproximadamente, a mesma largura e com lenho tardio de maior espessura em relação ao lenho inicial. Esse fato corrobora com Rosa et al. (2013) que ressaltaram que a largura dos anéis de crescimento está relacionada com a maturidade da madeira. Ballarin e Palma (2003) evidenciaram que a densidade aparente da madeira adulta foi maior do que a madeira juvenil. Madeiras de alta densidade proporcionam maior resistência mecânica, sendo indicadas para fins estruturais (Lima et al., 2014).

Em uma análise do lenho de árvores de *Pinus caribaea var. hondurensis*, Castro et al. (2014) demonstraram que, em árvores de maior densidade aparente, ocorreram maior porcentagem de lenho tardio, sobretudo, na madeira adulta, além de impregnação do lume das células com resina, resultando em acréscimo da sua densidade aparente média (Castro et al., 2014).

Resistência e rigidez à compressão normal às fibras ($F_{c,90}$)

Na tabela 2, foi observado que os valores médios da resistência à compressão normal às fibras do tratamento radial denso foram maiores e os do tratamento medular foram menores. Nesse sentido, Melo et al. (2010), avaliando a madeira *Araucaria angustifolia*, sustentaram que a resistência mecânica da madeira, retirada das posições mais externas, próximas à casca, foi, significativamente, superior àquela formada próxima à medula.

Os resultados encontrados da resistência à compressão normal às fibras aproximaram-se das pesquisas realizadas por Moya et al. (2013), Santos (2019) e Moritani (2018), os quais obtiveram valores médios de 9,3 MPa, 9,06 MPa e 10,54 MPa, respectivamente. No entanto, ficaram maiores que os encontrados por Mustefaga et al. (2019) para *Pinus taeda* (7,52 MPa) e menores que os encontrados por Rodriguez e Vergara (2008) para *Pinus canariensis* (14,8 MPa). Essa diferença entre as resistências à compressão normal às fibras pode ser devido à influência da idade das peças avaliadas, ao ângulo das fibras em relação ao eixo longitudinal da peça e ao grau de polimerização da celulose (Mustefaga et al., 2019).

Os resultados de $E_{c,90}$ deste trabalho ficaram semelhantes à pesquisa realizada por Mustefaga et al. (2019), que estudaram as caracterizações físico-mecânicas da madeira juvenil de *Pinus*, com valores $E_{c,90}$ para *Pinus taeda* (341 MPa). Também comparando $E_{c,90}$ da tabela 3 com o estudo de Aira et al. (2014), que obtiveram valor médio de 814 MPa, ficaram menores. Enquanto os valores médios de $K_{c,90}$ deste trabalho superaram o valor médio encontrado por Moritani (2018), que foi $3,65 \text{ MPa mm}^{-1}$. Essa diferença pode ter ocorrido em razão da quantidade, maturidade e dimensões das peças, utilizadas por estes autores.

Um estudo consistente foi desenvolvido por Melo et al. (2010), no qual o resultado médio do módulo elástico da madeira

madura de *Pinus taeda* foi avaliado. Essa pesquisa revelou que os resultados gerais do módulo de elasticidade da madeira juvenil eram sempre menores que o da madeira madura; a densidade aparente e o número de anéis por polegada foram superiores nesta última. Os autores sustentaram que a utilização de caracteres macroscópicos de fácil visualização, como proporção de lenho tardio ou número de anéis de crescimento por centímetro linear, pode ser empregada para a predição da resistência da madeira.

Relações entre as características dos anéis de crescimento e as propriedades físico-mecânicas do *Pinus* spp.

Na tabela 3, a correlação entre $F_{c,90}^1$ e DA chegou a 0,4488, foi menor ao do resultado de Moritani (2018), o qual encontrou o valor 0,5550 para *Pinus taeda* da mesma correlação. A correlação entre DA e PLT atingiu 0,6100, que é semelhante àquela encontrada por Trianoski et al. (2013), que foi 0,6300 para a mesma espécie precedente. Em um outro estudo, avaliando a compressão paralela em 8 espécies de *Pinus* tropicais, foram encontrados valores entre 0,35000 e 0,8100 e valor médio 0,5800 (Trianoski et al., 2014), similar ao que foi encontrado neste trabalho.

A avaliação de DA versus NAC resultou em R^2 igual a 0,5428 ($p < 0,05$) (Tabela 4) compatível ao encontrado por Delucis et al. (2013) para *Pinus elliotti*, ($R^2 = 0,6500$). Enquanto que, na análise de $E_{c,90}$ versus DA, foi encontrado R^2 igual a 0,1638, valor menor em relação ao observado por Ballarin e Palma (2003) para madeira juvenil ($R^2 = 0,2800$) e maior ao observado Moya et al. (2013), estudando a madeira juvenil de 15 anos ($R^2 = 0,1100$) de *Pinus taeda*.

O coeficiente de determinação encontrado em $F_{c,90}^2$ versus DA foi R^2 igual a 0,2000, resultado compatível com Irby et al. (2020), os quais apresentaram R^2 igual a 0,2200, em suas correlações para resistência à compressão paralela e densidade aparente menor que 500 kg m^{-3} , estudando efeitos de anéis de crescimento e a densidade na compressão paralela às fibras com madeira de *Pinus*. Todavia, inferior ao que foi encontrado por Mustefaga et al. (2019) ($R^2 = 0,7800$), relacionando densidade

aparente com a resistência à compressão normal às fibras para *Pinus taeda*.

Entretanto, os coeficientes de determinação dos modelos de regressão linear foram baixos. Nesse caso, buscou-se modelos matemáticos com melhor precisão, em razão disso, realizou-se análise de regressão múltipla para estimar as propriedades mecânicas em função das características dos anéis de crescimento e da densidade da madeira.

Nesse caso, os modelos da tabela 5 não foram ajustados. Enquanto a $F_{c,90}^2$, em função de DA e ELT, apresentou maior valor ($R^2 = 0,3090$), o $F_{c,90}^3$ obteve o menor valor ($R^2 = 0,1860\%$). Por outro lado, comparados com a regressão linear, todos os coeficientes R^2 melhoraram. Isso demonstra que a combinação da densidade aparente e as características dos anéis de crescimento podem melhorar a estimativa das propriedades mecânicas.

Os coeficientes de determinação encontrados para as propriedades físico-mecânicas foram menos ajustados. Esses resultados podem ser explicados pelo fato de que, no crescimento inicial de *Pinus*, o lenho tardio é bastante próximo em densidade e as propriedades são mais influenciadas pelo ângulo da microfibrila e pela composição química da madeira (Moya et al., 2013; Alteyrac, 2015; Funda et al., 2020).

Por outro lado, Irby et al. (2020) analisaram o R^2 da compressão paralela às fibras para corpos de prova de $50,8 \text{ mm} \times 254 \text{ mm}$ e variaram o número de anéis de crescimento até maior que 5 (2 cm^{-1}), obtendo modelos mais ajustados ($R^2 = 0,4600$) para os corpos de prova com anéis de crescimento por polegada maior que 5 (2 cm^{-1}). Isso demonstra os baixos valores encontrados nesta pesquisa, os quais estão relacionados à alta porcentagem de corpos de prova, que tiveram número de anéis de crescimento por polegada menor que cinco ($< 2 \text{ cm}^{-1}$).

Para as três normas, empregadas na avaliação da resistência à compressão normal às fibras, os resultados mostram que houve diferença estatisticamente, significativa

CONCLUSÕES

A densidade aparente da madeira foi explicada, parcialmente, pelos números de anéis de crescimento, pela proporção de lenho tardio e pela espessura de lenho tardio.

A resistência à compressão normal às fibras mostrou diferença significativa entre as normas ISO 13910 (ISSO, 2013),



NBR 7190 (ABNT, 1997) e ASTM D143 (ASTM, 2014). Além disso, a rigidez e o módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras variaram entre os tratamentos, sobretudo, para a madeira com anéis mais densos.

Os modelos matemáticos encontrados foram menos ajustados, ou seja, as características de anéis de crescimento predizem parcialmente as propriedades mecânicas. Embora sejam imprescindíveis mais pesquisas com maior amplitude e corpos de prova com maiores dimensões, a madeira com anéis de crescimento densos é mais resistente. Uma evidência de que essas madeiras são mais adequadas para aplicações estruturais, assumindo que critérios de classificação possam ser estabelecidos para a seleção de peças mais aptas ao uso

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo financiamento da bolsa de estudo. À Universidade Federal do Espírito Santo, pela oportunidade de realizar o curso de Mestrado no Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais.

REFERÊNCIAS

- Aira, J. R., Arriaga, F., & Iniguez-Gonzales, G. (2014). Determination of the elastic constants of scots pine (*Pinus sylvestris L.*) wood by means of compression tests. *Biosystems Engineering*, 126, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.008>
- Almeida, D. H., Scaliante, R. M., Chritoforo, A. L., Varanda, D. L., Rocco Lahr, A., Dias, A. A. & Calil Junior, C. (2014). Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. *Revista Árvore*, 38(1), 203-207. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000100020>
- Alteyrac, J. (2015). Variation of microfibril angle of *Pinus radiata* D. Don in relation to tree spacing in Chilean plantations. *Revista Árvore*, 39(4), 751-758. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000400018>
- Amorim, P. G. R., Gonçalez, J. C. & Camargos, J. A. A. (2013). Propriedade da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. *Cerne*, 19(3), 461-466. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000300013>
- American Society of Testing and Material [ASTM] (2019). *ASTM D245-06. Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber*. ASTM.
- American Society of Testing and Material [ASTM] (2014). *ASTM D143-14 Standard test methods for small clear specimens of timber*. ASTM.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT] (1997). NBR 7190: 2022. *Parte 2. Projeto de estruturas de madeiras*. ABNT.
- Ballarin, A. W., & Palma, H. A. L. (2003). Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. *Revista Árvore*, 27(3), 371-380. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300014>
- Cardoso, A., Moya, L., & Borges, A. (2019). Prediction of the bending stiffness of Uruguayan loblolly and slash pine timber applying different statistical techniques. *BioResources*, 14(1), 755-768. <https://doi.org/10.15376/biores.14.1.755-768>
- Castro, V. R. (2011). Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *bondurensis* Barr. et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.). [Tese de bacharel, Universidade de São Paulo].
- Castro, V. R., Tomazello Filho, M., & Surdi, P. G. (2014). Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de *Pinus* (*Pinus caribaea* var. *bondurensis* Barr. et Golf.) por densitometria de raios X. *Scientia Forestalis*, 42(103), 353-360.
- Comision Panamericana de Normas Técnicas [Copant] (1972). *466 Maderas: Método de determinación de la compresión perpendicular al grano*. Copant.
- Cukor, J., Zeidler, A., Vacek, Z., Vacek, S., Šimůnek, V., & Gallo, J. (2020). Comparison of growth and wood quality of Norway spruce and European larch: effect of previous land use. *European Journal of Forest Research*, 139(3), 459-472. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01259-7>
- Delucis, R., Gatto, D. A., Stangerlin, D. M., Beltrame, R., & Trevisan, R. (2013). Qualificação da madeira de três espécies de coníferas oriundas de reflorestamentos jovens. *Scientia Forestalis*, 41(100), 477-484.
- Foti, D., Passialis, C., Voulgaridis, E., Skaltsoyianne, A., & Tsaktsira, M. (2018). Wood density and tracheid length of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) grafts in relation to cambium age and growth rate. *Journal of Forest Science*, 64(3), 101-107. <https://doi.org/10.17221/127/2017-JFS>
- Funda, T., Fundova, I., Gorzsás, A., Fries, A., & Wu, H. X. (2020). Predicting the chemical composition of juvenile and mature woods in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using FTIR spectroscopy. *Wood Science and Technology*, 54, 289-311. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01159-4>
- Haselein, C. R., Cechin, E., Santini, E. J., & Gatto, D. A. (2000). Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* Engelm aos

- 30 anos de idade. *Ciência Florestal*, 10(2), 135-144. <https://doi.org/https://doi.org/10.5902/19805098487>
- International Organization for Standardization [ISO] (2013). *FDIS 13910:2014 N810. 2013. Timber structures – Strength graded timber – Test methods for structural properties*. ISO.
- Irby, N. E., França, F. J. N., Barnes, H. M., Seale, R. D., & Shmulsky, R. (2020). Effect of growth rings per inch and density on compression parallel to grain in southern pine lumber. *Bioresources*, 15(2), 2310-2325. <https://doi.org/10.15376/biores.15.2.2310-2325>
- Lima, I. L., Longui, E. L., Freitas, M. L. M., Zanatto, A. C. S., Zanata, M., Florshein, S. M. B., & Bortoletto Junior, G. (2014). Physical-mechanical and anatomical characterization in 26-year-old *Eucalyptus resinifera* Wood. *Floresta e Ambiente*, 21(1), 91-98. <https://doi.org/10.4322/floram.2014.006>
- Melo, R. R., Stangerlin, D. M., Del Menezzi, C. H. S., Gatto, D. A., & Calegari, L. (2010). Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 5(1), 67-73. <https://doi.org/10.5039/agraria.v5i1a515>
- Moritani, F. Y. (2018). *Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira: Eucalyptus grandis, Pinus taeda e Schizolobium amazonicum* (Paricá). [Tese de mestrado, Universidade de São Paulo].
- Moya, L., Laguarda, M., & Matías, C. (2013). Physical and mechanical properties of loblolly and slash pine wood from Uruguayan plantations. *Forest Products Journal*, 63(3/4), 128-137. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-13-00024>
- Mustefaga, E. C., Hillig, E., Tavares, E. L., Sozim, P. C. L., & Rusch, F. (2019). Caracterização físico-mecânica da madeira juvenil de *Pinus*. *Scientia Forestalis*, 47(123), 472-481. <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n123.09>
- Rall, R. (2010). Processamento de imagens digitais para detecção e quantificação de defeitos na madeira serrada de coníferas de reflorestamento de uso não estrutural. [Tese de doutorado. Universidade Estadual de São Paulo].
- Rasband, W. S. (2012). ImageJ, U.S. National Institutes of Health.
- Rodriguez, C., & Vergara, E. (2008). Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus canariensis*. *Bosque*, 29(3), 192-196. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002008000300002>
- Rosa, R. T., Hillig, E., & Viana, L. C. Propriedades físicas da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze e sua relação com os anéis de crescimento. *Brazilian Journal of Wood Science*, 4(1), 01-14, <https://doi.org/10.12953/2177-6830.v04n01a01>
- Santos, L. L. (2019). *Estabelecimento de classes de resistência para a madeira serrada de Pinus spp.* [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo].
- Siegloch, A. M., & Marchiori, J. N. C. (2015). Anatomia da madeira de treze espécies de coníferas. *Ciência da Madeira*, 6(3), 149-165. <https://doi.org/10.15210/cmad.v6i3.713>
- Soares Filho, M. P. (2014). Anatro UFPR – *Software para análise de tronco, em meio digital, utilizando Sistema Polar*. [Tese de doutorado em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná].
- Trianoski, R., Matos, J. L. L., Iwakiri, S. & Prata, J. G. (2014). Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de pinus tropicais. *Scientia Forestalis*, 42(101), 21-28.
- Trianoski, R., Matos, J. L. M., Iwakiri S., & Prata, J. G. (2013). Variação longitudinal da densidade básica da madeira de espécies de pinus tropicais. *Revista Floresta*, 43(3), 503- 510. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5380/rf.v43i3.28252>
- Vidaurre, G., Lombardi, L. R., Oliveira, J. T. S., & Arantes, M. D. C. (2011). Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. *Floresta e Ambiente*, 18(4), 469-480. <https://doi.org/10.4322/floram.2011.066>

Manuscrito recebido em 04 de junho de 2021

ACEITO em 19 de outubro de 2022

Publicado em 15 de dezembro de 2022

Este documento deve ser citado como:

Mayard, R., Segundinho, P. G. A., dos Santos, L. L., Gonçalves, F. G., da Silva, J. G. M. (2022). Influência dos anéis de crescimento nas propriedades mecânicas da madeira de *Pinus*. *Madera y Bosques*, 28(3), e2832364. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2832364>



Madera y Bosques pelo Instituto de Ecología, A.C. é distribuída sob uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição-NãoComercial ShareAlike 4.0.