



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**AUGUSTO MELO MOULIN BREDÁ**

**CLASSIFICAÇÃO PARA MADEIRA DE *Pinus* sp. LIVRE DE DEFEITOS A  
PARTIR DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

AUGUSTO MELO MOULIN BREDA

**CLASSIFICAÇÃO PARA MADEIRA DE *Pinus* sp. LIVRE DE DEFEITOS A  
PARTIR DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Coorientadores: Lorenzo Lube dos Santos  
Fabricio Gomes Gonçalves

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

B831c Breda, Augusto Melo Moulin, 1995-  
Classificação para madeira de Pinus sp. livre de defeitos a partir dos anéis de crescimento / Augusto Melo Moulin Breda. - 2022.  
72 f. : il.

Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho.  
Coorientadores: Lorenzo Lube dos Santos, Fabricio Gomes Gonçalves.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Anéis de crescimento. 2. Módulo de elasticidade. 3. Madeira de Pinus sp.. I. Segundinho, Pedro Gutemberg de Alcântara. II. Santos, Lorenzo Lube dos. III. Gonçalves, Fabricio Gomes. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 630

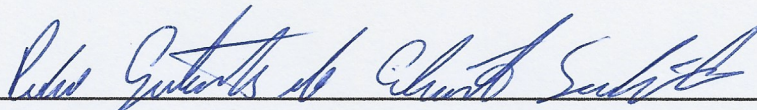
---

**CLASSIFICAÇÃO PARA MADEIRA DE *Pinus* sp. LIVRE DE DEFEITOS A PARTIR  
DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO**

**AUGUSTO MELO MOULIN BREDÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2022.



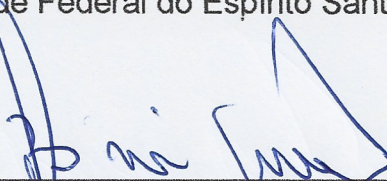
---

Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho (Orientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

Prof. Dr. Yonny Martinez Lopez (Examinador Externo)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

Prof. Dr. Juarez Benigno Paes (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Espírito Santo

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me permitido chegar até aqui.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCFL), da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pela oportunidade em poder cursar este mestrado acadêmico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo financiamento do presente trabalho.

À minha família, especialmente minha mãe e meu irmão, pela ajuda sempre disponível e incansável.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, pela orientação paciente e por me acolher mesmo não sendo formado numa área de relação direta com as Engenharias.

Aos meus coorientadores, Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves e Prof. Dr. Lorenzo Lube dos Santos, pelo auxílio nos momentos de dúvida e de desenvolvimento do projeto e da dissertação. Ao Dr. João Gabriel Missia da Silva pela sua ajuda com a melhoria da estatística deste trabalho.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Juarez Benigno Paes e Prof. Dr. Yonny Martinez Lopez, por aceitarem o convite para contribuir com esta dissertação. Aos membros suplentes da banca, Prof. Dr. Pedro Nicó de Medeiros Neto e Dr. João Gabriel Missia da Silva, por aceitarem o convite para compor a banca como suplentes.

Aos meus colegas e amigos do LEMAD, Leonor, Clara, Raynord e Ramon, por todo auxílio, ajuda e horas de trabalho em todas as etapas de desenvolvimento da pesquisa, pelos momentos de descontração e por tornarem a estadia deste Biólogo num Laboratório de Engenharia Civil mais suave.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCFL), pelos ensinamentos construídos e transmitidos. À Secretaria do PPGCFL, na pessoa da funcionária Elizangela, por todo o auxílio durante o mestrado, sempre disposta a nos ajudar em todas as etapas do curso.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), especialmente José Geraldo, Elecy

e Vanessa, pela ajuda no desenvolvimento da pesquisa e pela disponibilidade em compartilhar comigo suas habilidades.

Aos amigos da “Tropa”: Vanessa, Vitor, Vinicius, Larissa, Máira, Taísa e Nathan, pelos momentos de diversão durante o mestrado.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram com o desenvolvimento desta pesquisa, meu muito obrigado!

## RESUMO

BREDA, Augusto Melo Moulin. **Classificação para madeira de *Pinus* sp. livre de defeitos a partir dos anéis de crescimento.** 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho. Coorientadores: Lorenzo Lube dos Santos; Fabricio Gomes Gonçalves.

A Norma Brasileira (NBR) para Projeto de Estruturas de Madeira deve considerar para a classificação mecânica e para o dimensionamento de estruturas de madeira a associação entre as propriedades físico-mecânicas e as características dos anéis de crescimento de *Pinus* sp. As características dos anéis de crescimento são variáveis essenciais para se estimar as propriedades físico-mecânicas da madeira. Por isso, o objetivo desta dissertação é avaliar a relação entre anéis de crescimento e as propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* sp. livre de defeitos. Foram realizados ensaios não destrutivos de vibração longitudinal e transversal, de ondas de tensão e de flexão estática, de determinação das densidades básica e aparente e ensaio destrutivo de ruptura. Além disso, foram obtidas a espessura de lenho tardio, a proporção de lenho tardio e o número de anéis de crescimento. A matriz de correlação de Pearson foi utilizada para analisar a associação entre as propriedades físico-mecânicas e as características dos anéis de crescimento. Os coeficientes  $r$  de Pearson foram todos significativos ( $p < 0,05$ ). Assim, conclui-se que a espessura do lenho tardio dos anéis de crescimento explicou 62% da densidade básica e 60% da densidade aparente, mas somente 18% da elasticidade estática. Por conseguinte, a avaliação conjunta das características dos anéis de crescimento e das propriedades físico-mecânicas possibilitou a caracterização mecânica de *Pinus* sp. a partir dos anéis de crescimento.

**Palavras-chave:** Densidade aparente, Flexão estática, Lenho tardio, Matriz de correlação, Módulo de elasticidade.

## ABSTRACT

BREDA, Augusto Melo Moulin. **Classification for wood of *Pinus* sp. clear specimens from growth rings.** 2022. Dissertation (Master in Forestry Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho. Co-advisors: Lorenzo Lube dos Santos; Fabricio Gomes Gonçalves.

The Brazilian Standard (NBR) for Design of Wood Structures must consider for the mechanical classification and for the design of wood structures the association between physical-mechanical properties and the characteristics of the growth rings of *Pinus* sp. The characteristics of the growth rings are essential variables to estimate physical-mechanical properties of wood. Therefore, the objective of this dissertation is to evaluate the relationship between growth rings and physical-mechanical properties of clear specimens wood of *Pinus* sp. Non-destructive tests of longitudinal and transversal vibrations, stress wave, static bending, determination of basic and apparent densities, and destructive rupture test were performed. In addition, latewood width, latewood proportion, and number of growth rings were obtained. Pearson's correlation matrix was used to analyze the associations between physical-mechanical properties and growth rings characteristics'. Pearson's  $r$  coefficients were all significant ( $p < 0,05$ ). Thus, it is concluded that the latewood width of the growth rings explained 62% of the basic density and 60% of the apparent density, but only 18% of the static bending. Therefore, the joint evaluation of growth rings characteristics and physical-mechanical properties enabled the mechanical characterization of *Pinus* sp. from growth rings.

**Palavras-chave:** Apparent density, Static bending, Latewood, Correlation matrix, Modulus of elasticity.



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>12</b>
1.2.1 Objetivo Geral.....	12
1.2.2 Objetivos Específicos.....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 Lenho tardio e anéis de crescimento</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2 Densidade aparente da madeira</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3 Caracterização mecânica da madeira</b> .....	<b>16</b>
<b>2.4 A NBR 7190 e a classificação mecânica da madeira</b> .....	<b>18</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 Espécie, origem da madeira e ensaios realizados</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2 Ensaio não destrutivos</b> .....	<b>24</b>
3.2.1 Ensaio de vibração transversal livre e longitudinal.....	24
3.2.2 Ensaio de ondas de tensão .....	27
3.2.3 Ensaio de flexão estática e de ruptura .....	29
3.2.4 Espessura e proporção de lenho tardio .....	31
<b>3.3 Análise dos dados</b> .....	<b>34</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>37</b>
<b>4.1 Características dos anéis de crescimento e propriedades físico-     mecânicas da madeira de <i>Pinus sp.</i></b> .....	<b>37</b>
4.1.1 Densidades Aparente e Básica.....	40
4.1.2 Módulos de Elasticidade Dinâmicos .....	41
4.1.3 Módulo de Elasticidade Estático .....	42
4.1.4 Módulo de Ruptura .....	43
4.1.5 Número de Anéis de Crescimento, Espessura e Proporção de Lenho Tardio.....	44
<b>4.2 Análise da correlação entre as características dos anéis de crescimento e     as propriedades físico-mecânicas da madeira de <i>Pinus sp.</i></b> .....	<b>46</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>50</b>
<b>6 TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>52</b>

<b>APÊNDICES .....</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE A – Simbologia apresentada ao longo dos Apêndices .....</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE B – Propriedades mecânicas e características dos anéis de crescimento da madeira de <i>Pinus</i> sp. na orientação tangencial .....</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE C – Propriedades mecânicas e características dos anéis de crescimento da madeira de <i>Pinus</i> sp. na orientação radial .....</b>	<b>60</b>
<b>APÊNDICE D – Propriedades mecânicas e características dos anéis de crescimento da madeira de <i>Pinus</i> sp. na orientação radial tangencial.....</b>	<b>63</b>
<b>APÊNDICE E – Resultados do Teste do <math>\chi^2</math> para a independência das variáveis.....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE F – Resultados do Teste de Kruskal-Wallis para comparação de medianas. ....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A distinção entre os tipos de madeira faz referência à espécie florestal. Para a ciência dos materiais de construção, a diferença reside na botânica da espécie madeireira e no seu Centro de Origem: se é gimnosperma ou angiosperma. No primeiro caso, a ordem das gimnospermas produz madeiras menos densas, denominadas de *softwoods*. No segundo caso, a ordem das angiospermas produz madeiras mais densas, chamadas de *hardwoods*. Além disso, as angiospermas se subdividem em monocotiledôneas e dicotiledôneas, e nesta última se encontram as espécies produtoras de madeira, as *hardwoods* (CALIL JUNIOR; ROCCO LAHR; DIAS, 2003; HOADLEY, 2000).

Outras denominações recorrentes para tratar das *softwoods* e *hardwoods* são as de coníferas e folhosas, respectivamente (CALIL JUNIOR; ROCCO LAHR; DIAS, 2003). Exemplos comuns de folhosas são as espécies de *Eucalyptus* spp., enquanto os exemplos de coníferas são as espécies de *Pinus* spp. (BURGER; RICHTER, 1991), que são o objeto de estudo desta Dissertação. Nela serão realizados ensaios não destrutivos e um ensaio destrutivo para caracterizar a madeira de *Pinus* sp.

A caracterização físico-mecânica da madeira depende de ensaios não destrutivos e destrutivos. O termo *não destrutivo* é empregado quando a madeira e suas propriedades permanecem inalteradas após a realização do ensaio (DAHLEN et al., 2018). Como a madeira é um material polimérico anisotrópico, na ocasião de uma solicitação de esforços, as cargas aplicadas fazem com que a madeira tenha um comportamento diferente na resistência à tração e à compressão (BENABOU; SUN, 2015).

Nesse sentido, as características dos anéis de crescimento são determinantes na avaliação das propriedades físico-mecânicas para o uso das vigas de madeira como material estrutural. Os anéis de crescimento se formam a partir do câmbio; essa formação é dividida em duas regiões: lenho tardio e lenho inicial. Em espécies de *Pinus* spp., a distinção entre as camadas de lenho tardio e lenho inicial decorrem dos fatores ambientais (clima e temperatura de acordo com as estações do ano) e de fatores relativos à própria planta, como perda de folhas (COSTA et al., 2013).

Entretanto, a formação da madeira, afetada por esses fatores externos e endógenos, pode resultar em defeitos na madeira, sendo o de maior incidência a presença de nós, o que reduziria a área da seção transversal (MARINI, 2019). Por conseguinte, a presença de defeitos influencia nas propriedades físico-mecânicas por não permitir a correta aferição dos módulos de elasticidade, de ruptura, da densidade e das características dos anéis de crescimento. Os defeitos podem, inclusive, anular a utilização da madeira. Por isso, nesta Dissertação, adotaram-se corpos de prova livres de defeitos.

Tendo em vista as abordagens utilizadas para caracterização da resistência mecânica da madeira, novos estudos podem ser realizados para modelar a associação da madeira e suas propriedades tecnológicas com outras variáveis com a finalidade de classificá-la estruturalmente.

## **1.1 Justificativa**

Este trabalho representa uma proposta de melhoria para a classificação mecânica da madeira de *Pinus* a partir da relação entre os anéis de crescimento, o lenho tardio e a flexão estática em relação à Norma Brasileira – NBR 7190, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997). Esta perspectiva está baseada nas atuais discussões sobre a atualização da respectiva normativa, haja vista que, segundo Rocco Lahr et al. (2022), ela subestima as estruturas de madeira, considerando que suportam menos carga que a norma prediz.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a relação entre anéis de crescimento e as propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* sp. livre de defeitos, submetida a ensaios destrutivo e não destrutivos.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar ensaios não destrutivos e destrutivo na madeira de *Pinus* sp.;

- Determinar as propriedades físicas da madeira: densidades aparente e básica;
- Analisar as características dos anéis de crescimento (número de anéis de crescimento, espessura de lenho tardio e proporção de lenho tardio);
- Estabelecer padrões estatísticos que permitam caracterizar a madeira de *Pinus* sp.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

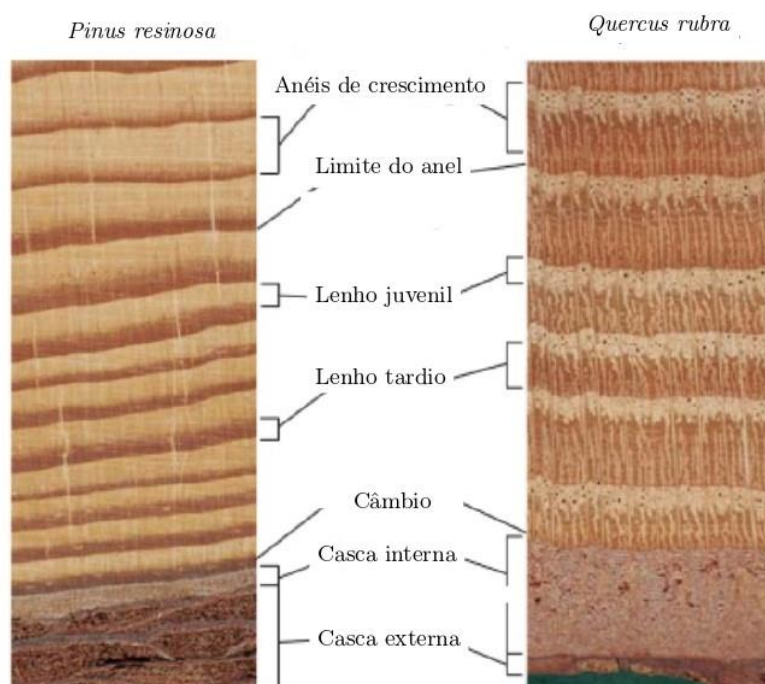
### 2.1 Lenho tardio e anéis de crescimento

Em termos anatômicos, a formação da madeira ocorre a partir do xilema secundário. É o xilema secundário que contribui com o crescimento em espessura das plantas e a formação da árvore. Nos estudos em ciência e tecnologia da madeira a madeira é seccionada em três planos direcionais: transversal, radial e tangencial. Na seção transversal o corte é perpendicular ao eixo da árvore, isto é, ao tronco; na seção radial, a visualização é perpendicular aos anéis de crescimento e paralelo aos raios; na seção tangencial, a visualização é perpendicular às células dos raios (COSTA et al., 2013). Mas todas as observações dependem do crescimento da madeira, que é afetado por fatores como latitude e longitude, poluição e disponibilidade hídrica (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2016; TAIZ et al., 2017).

O desenvolvimento do xilema secundário é afetado pelas estações do ano. A formação dos lenhos tardio e inicial é um exemplo de como as estações influenciam na formação anatômica da madeira. Em termos gerais, o lenho inicial é o anel de células que se desenvolve na primavera, cuja parede celular cresce em espessura de forma rápida e apresenta coloração mais clara, enquanto o lenho tardio representa o anel de células de desenvolvimento celular lento, ocasionando na formação de parede celular mais espessa e de coloração escura, típico de desenvolvimento no outono (HOADLEY, 2000).

Na Figura 1, retirada de Hoadley (2000), consta a diferenciação entre lenho tardio ou lenho outonal (*latewood*) e lenho inicial ou primaveril (*earlywood*). Pode-se observar também a espessura de lenho tardio (ELT), muitas vezes referida na literatura como *growth ring width*. O lenho tardio é um dos componentes dos anéis de crescimento, que se formam pela deposição próxima à casca do xilema secundário, de forma concêntrica em torno da medula (COSTA et al., 2013).

**Figura 1** – Localização dos anéis de crescimento (*growth rings*) evidenciando os limites entre um anel e outro (*growth-ring boundary*), a delimitação entre o lenho tardio (*latewood*) e lenho inicial (*earlywood*), a localização do câmbio (cambium) e a casca interna (*inner bark*) e externa (*outer bark*) em detalhe de seção transversal de *Pinus resinosa* (*red pine*) e *Quercus rubra* (*red oak*).



Fonte: Hoadley (2000), adaptado pelo Autor.

Os anéis de crescimento também são chamados de anéis anuais. Isso decorre da sazonalidade da formação do lenho tardio e do lenho inicial a partir do xilema secundário (câmbio). Esse incremento anual é mais aparente quando é possível diferenciar lenho inicial de tardio, cujas causas de não diferenciação são os fatores ecológicos (THOMAS, 1991; VIDAURRE et al., 2011).

Assim, a diferenciação entre os anéis de crescimento é dada principalmente pela combinação lenho tardio-lenho inicial em regiões de clima temperado, que possuem estações mais definidas, ao passo que em regiões de clima tropical essa diferença é ocasionada principalmente por estações secas e chuvosas (KOLLMANN; CÔTÉ JUNIOR, 1968). Outro fator não menos importante é o comprimento das fibras e traqueídeos, principal marcador da diferença entre madeira juvenil e madeira adulta (PALMA; BALLARIN, 2003).

## 2.2 Densidade aparente da madeira

A densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) da madeira é definida como a razão entre a massa do corpo de prova e seu volume, considerados em um determinado teor de umidade. Os dados de densidade podem ser corrigidos para o teor de umidade referência de 12%, como preconizado pela NBR 7190 (ABNT, 1997), norma regulamentadora dos Projetos de Estruturas de Madeira, mesmo que ela possa ser determinada a qualquer teor de umidade (RALL, 2006). Classes de densidade também podem ser definidas pela densidade aparente e pela densidade básica ( $\rho_{bas}$ ), resultando em dados propícios para classificação estrutural (KELLER et al., 2017).

De fato, conforme Ballarin e Palma (2003), a madeira adulta é mais densa do que a juvenil. Esse fato é decisivo na classificação para uso estrutural. Além disso, a densidade aparente é uma das propriedades mais empregadas para avaliar a qualidade da madeira (RALL, 2006).

Também chamada de massa específica aparente, a densidade aparente é uma das principais propriedades físicas da madeira. Isso ocorre, especialmente, uma vez que as outras propriedades da madeira são afetadas ou relacionadas com a densidade. Os fatores que a afetam diretamente são as mesmas características do local e condições de plantio, que afetam o crescimento e desenvolvimento da espécie florestal (MARQUES et al., 2012).

Em muitas pesquisas, a resistência da madeira é avaliada em função da densidade. A densidade básica considera o teor de umidade, cujo teor está acima do ponto de saturação das fibras, que, em suma, faz com que o desempenho mecânico seja inferior e dependente do material saturado, enquanto a densidade aparente considera os vazios da madeira, mas a um teor de umidade constante (DIAS; ROCCO LAHR, 2004).

## 2.3 Caracterização mecânica da madeira

Em linhas gerais, as propriedades mecânicas da madeira podem ser divididas em propriedades de elasticidade e em propriedades de resistência (RALL, 2006). No Quadro 1 consta uma classificação simplificada das propriedades mecânicas de resistência da madeira.



**Quadro 1** – Propriedades mecânicas de resistência da madeira.

<b>Propriedades</b>	<b>Símbolo</b>
Compressão paralela às fibras	$f_{c0}$
Compressão perpendicular às fibras	$f_{c90}$
Compressão inclinada em relação às fibras	$f_{c\alpha}$
Tração paralela às fibras	$f_{t0}$
Tração perpendicular às fibras	$f_{t90}$
Tração inclinada em relação às fibras	$f_{t\alpha}$
Cisalhamento paralelo às fibras	$f_v$

Fonte: o Autor.

Relacionada às propriedades de resistência mecânica está o módulo de ruptura, que quantifica a tensão máxima que a madeira é capaz de suportar quando submetida a carregamentos diversos (CALIL JUNIOR; ROCCO LAHR; DIAS, 2003). Dada a anisotropia da madeira, as propriedades mecânicas de resistência devem ser testadas em duas direções ortotrópicas: paralela e perpendicular (RALL, 2006). No Quadro 2 consta uma relação das propriedades mecânicas de elasticidade da madeira.

**Quadro 2** – Propriedades mecânicas elásticas da madeira.

<b>Propriedades</b>	<b>Símbolo</b>
Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras	$E_{c0}$
Módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras	$E_{c90}$
Módulo de elasticidade à tração paralela às fibras	$E_{t0}$
Módulo de elasticidade à tração perpendicular às fibras	$E_{t90}$
Módulo de elasticidade à flexão	$E_M$

Fonte: o Autor.

As propriedades elásticas estão relacionadas aos módulos de elasticidade; estes quantificam a rigidez da madeira, quando submetida a esforços solicitantes (CALIL JUNIOR; ROCCO LAHR; DIAS, 2003).

Alguns fatores influenciam na caracterização mecânica, como teor de umidade, duração do carregamento dos esforços solicitantes (duração da aplicação da carga *versus* deformação, em que, quanto maior o tempo de duração, menor a resistência), desdobro e secagem da madeira (essas duas últimas parte do processamento da madeira), direção das fibras em relação à solicitação da peça de madeira, condições de crescimento e desenvolvimento da madeira; que juntamente com o processamento, influenciam alterando a direção (ângulo) das fibras e, conseqüentemente, no desempenho mecânico, afirmando o caráter anisotrópico da madeira; espessura da parede celular (quanto maior espessura, menor a quantidade de vazios e maior a resistência mecânica) (DIAS; ROCCO LAHR, 2004).

#### **2.4 A NBR 7190 e a classificação mecânica da madeira**

Os materiais apresentam propriedades específicas que lhes conferem ou um ou outro uso pela humanidade. Para determinar suas melhores aplicações, essas propriedades devem ser investigadas. No entanto, para que um material seja avaliado quanto a suas características, deve-se estabelecer uma padronização que

permita a reprodução e a comparação entre procedimentos em diferentes locais e a qualquer tempo. Com a madeira não é diferente, pois seu uso como material de construção requer estudos técnicos sistemáticos para a determinação de valores médios, característicos e, finalmente, de projeto, dada a anisotropia natural proveniente da multiplicidade de espécies. Dessa forma, algumas normas técnicas prescrevem procedimentos e dimensões para avaliar os corpos de prova.

Em projetos de estruturas de madeira, as propriedades físico-mecânicas mais importantes são as de resistência ao cisalhamento, à compressão paralela às fibras, à compressão perpendicular às fibras e à flexão estática. Para realizar os ensaios dentro de padrões normativos, o pesquisador ou profissional deve se guiar segundo a finalidade do projeto. Para tanto, ele deve seguir as prescrições de normas regulamentadoras, que servem como instrumentos para realização dos ensaios nos corpos de prova, como a:

- NBR 7190 (ABNT, 1997);
- *American Society for Testing and Materials* – ASTM D143-94 (1995); e a
- *International Organization for Standardization* – ISO 13910 (2005).

Embora o uso de corpos de prova livres de defeitos e com pequenas dimensões seja recomendado pela maioria das normas, algumas delas, como a ASTM D198 (2008), indicam a realização dos ensaios em peças de tamanho estrutural. Um outro organismo além dos já citados é a *Comisión Panamericana de Normas Técnicas* (COPANT), cujas normas são equivalentes às da ASTM D143-94 (1995) e requerem, para efeito de comparação com a NBR 7190 (ABNT, 1997) a aplicação de um fator de correção.

No Anexo B da NBR 7190 (ABNT, 1997) denominado de *Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas*, há um elenco de propriedades cuja finalidade é servir como “elemento comparativo das resistências entre diferentes espécies”, e dentre elas constam a umidade, densidade, estabilidade dimensional, compressão normal às fibras, tração normal às fibras, cisalhamento, fendilhamento, flexão e dureza. A ASTM D143-94 (1995) apresenta listagem semelhante, mas sob a forma de um sumário das seções de descrição dos testes escrito, dentro da seção *Scope*, enquanto a ISO 13910 (2005) não apresenta

sumarização, iniciando já na descrição das dimensões dos corpos de prova e nos procedimentos de cada ensaio.

Cada norma estabelece as dimensões de corpos de prova para determinação de cada módulo considerado no projeto. A título de exemplo, considere os ensaios de determinação da flexão estática.

Na NBR 7190 (ABNT, 1997), os corpos de prova devem possuir dimensões  $b$  (largura)=5cm,  $h$  (espessura)=5cm e  $l$  (comprimento)=115cm, cujo vão livre entre os apoios será 21h. Na seção 8 da ASTM D143-94 (1994), as dimensões são  $b=5$ cm,  $h=5$ cm e  $l=76$ cm, enquanto a ISO 13910 (2005) não especifica as dimensões. Uma outra norma da ISO, a 3349 (1975), *Wood – Determination of modulus of elasticity in static bending*, prevê as dimensões,  $a=2$ cm,  $b=2$ cm e  $h=30$  a 38cm.

Quanto ao procedimento dos ensaios, no caso da flexão, a NBR 7190 (ABNT, 1997) prescreve que é necessário realizar o carregamento de um corpo de prova e levá-lo à ruptura e nos outros corpos de prova, realizar dois ciclos de carregamentos prévios e um ciclo de carregamento final. A ASTM D143-94 (1995) indica que os corpos de prova devem estar biapoiados, com distância de 70cm entre os apoios, a velocidade de carregamento deve provocar um deslocamento e  $2,5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Na ISO 13910 (2005), os corpos de prova devem ser carregados em dois pontos com igual distância dos apoios nas extremidades. A carga deve ser continuamente aplicada até que a viga se rompa completamente.

É interessante notar que, dentre as normas citadas, somente a NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta uma representação gráfica para a flexão. A ASTM D143-94 (1995) apresenta um misto de gráfico com informações estatísticas. Ainda na NBR 7190 (ABNT, 1997), é notável o diagrama carga X deslocamento, com o módulo representado no trecho linear após a aplicação do último carregamento. A NBR 7190 (ABNT, 1997) é a mais extensa das normas pesquisadas, apresentando recursos gráficos que auxiliam na execução dos ensaios.

Por fim, pode-se pontuar que a formação anatômica da madeira influencia diretamente as propriedades físico-mecânicas. A partir da avaliação de características anatômicas, como a análise dos anéis de crescimento, realizam-se ensaios destrutivos e não destrutivos com o intuito de obter informações sobre a

qualidade da madeira e para projetos de estruturas de madeira e produtos engenheirados. Para tanto, normas técnicas são elaboradas com a finalidade de padronizar os processos produtivos e contribuir com o desenvolvimento tecnológico de produtos florestais. Assim, com a evolução do conhecimento científico em Ciência e Tecnologia da Madeira, as normativas devem ser atualizadas e aperfeiçoadas, a fim de atender as novas demandas do setor produtivo e da sociedade.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Espécie, origem da madeira e ensaios realizados

Para a realização desta pesquisa, foram utilizadas madeiras de *Pinus* sp. provenientes do material utilizado por Santos (2019). Ao todo, foram ensaiados 426 corpos de prova (CPs) de *Pinus* sp. Os CPs foram divididos em grupos segundo as orientações dos mesmos (tangencial, radial e radial tangencial).

Os ensaios para determinação das propriedades físico-mecânicas e características visuais foram realizados no Laboratório de Estruturas de Madeiras (LEMAD), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias (CCAEE), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), seguindo as prescrições da NBR 7190 (ABNT, 1997) e, em casos específicos, da ISO 13910 (2005) e da ASTM D143-94 (1995).

Os CPs utilizados nos ensaios de flexão foram também empregados para determinar as densidades básica e aparente, espessura e proporção de lenho tardio.

Os corpos de prova foram mensurados nas direções longitudinal, radial e tangencial com régua (graduada em mm) para a medição do comprimento e paquímetro digital (precisão de 0,005mm) para obtenção da largura e da espessura. Os CPs tinham dimensões médias de 49,88cm x 3,8cm x 2,26cm (comprimento x largura x espessura). Depois de mensurados eles foram pesados em balança de precisão (precisão de 0,01g) e analisou-se a densidade aparente.

Posteriormente, foram realizadas marcações do vão para os apoios de cada ensaio, seguindo o disposto na NBR 7190 (ABNT, 1997) e ASTM D143-94 (1995), de acordo com o ensaio experimental a ser realizado.

A Tabela 1 abaixo apresenta os ensaios realizados nesta pesquisa.

**Tabela 1** – Propriedades físico-mecânicas e características dos anéis de crescimento de *Pinus* sp. avaliadas na pesquisa.

<b>Propriedades e características</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidade</b>
Módulo de elasticidade na vibração longitudinal	MOE <sub>al</sub>	GPa
Módulo de elasticidade na vibração transversal livre	MOE <sub>vt</sub>	GPa
Módulo de elasticidade por ondas de tensão no aparelho Fakopp	MOE <sub>ds(F)</sub>	GPa
Módulo de elasticidade por ondas de tensão no aparelho Metriguard	MOE <sub>ds(M)</sub>	GPa
Módulo de elasticidade à flexão	E <sub>M</sub>	GPa
Módulo de ruptura	MOR	MPa
Densidade aparente	$\rho_{ap}$	g.cm <sup>-3</sup>
Densidade básica	$\rho_{bas}$	g.cm <sup>-3</sup>
Proporção de lenho tardio	PLT	%
Espessura de lenho tardio	ELT	mm
Número de anéis de crescimento	NAC	unidade

Fonte: o Autor.

A contagem dos anéis de crescimento foi realizada de forma visual e a madeira foi classificada como densa ou leve, seguindo a descrição das classes de densidade da Tabela 2, ajustada a partir da ASTM D245-06 (2011).

**Tabela 2** – Classes de densidade para a madeira de coníferas a partir da proporção de lenho tardio.

<b>Classe</b>	<b>Proporção de lenho tardio</b>
Densa	>1/2
Leve	<1/2

Fonte: ASTM D245-06 (2011), adaptado pelo Autor.

Este procedimento foi necessário por causa das dimensões dos CPs utilizados na análise no *software ImageJ*, em torno de 2cm de largura x 2cm de espessura (altura) x 3cm de comprimento. Esses CPs foram utilizados para a análise da densidade básica.

### 3.2 Ensaaios não destrutivos

#### 3.2.1 Ensaios de vibração transversal livre e longitudinal

As madeiras foram ensaiadas na vibração transversal livre e longitudinal para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, com ação do *software Sonelastic®*, um computador, um microfone e um martelo específico para realizar a excitação das peças.

O ensaio de vibração transversal livre foi realizado conforme a ASTM E 1876 (2007) e ASTM C 215 (2008), foi baseado em Segundinho et al. (2017), conforme descrição a seguir.

Após as marcações os CPs foram dispostos em apoios sobre duas linhas de nylon. Na parte inferior do corpo de prova (CP) e situada abaixo da marcação do meio da peça, foi posicionado um microfone. Este foi acoplado ao computador que possui um sistema de aquisição de dados. Na parte superior do CP, onde está a marcação do meio, foi efetuada uma batida no corpo de prova com o martelo. O impacto gerado produziu uma vibração, que se propagou pelo CP até ser captada pelo microfone.

A Figura 2 ilustra o ensaio de vibração transversal livre.



**Figura 2** – Ensaio de vibração transversal livre com o software Sonelastic® para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico na vibração transversal livre.



Fonte: o Autor.

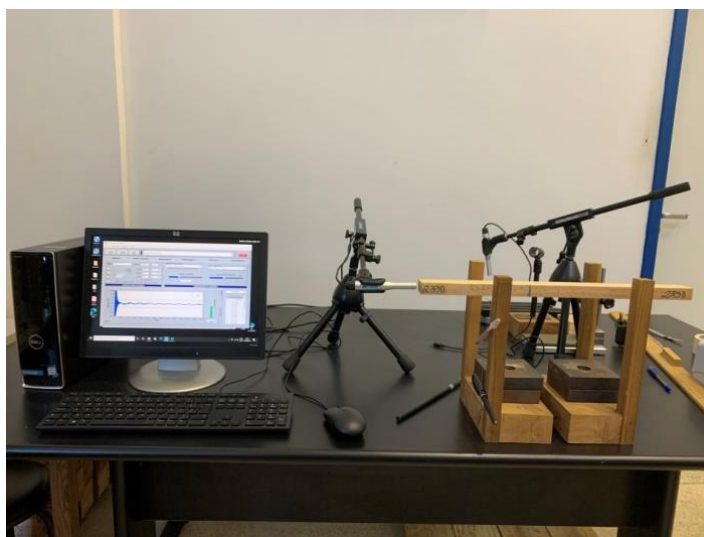
O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado pela Equação (1), conforme Segundinho et al. (2017):

$$MOE_{vt} = \left( \frac{2 \cdot f_1}{\gamma_1 \cdot \pi} \right)^2 \cdot \frac{m \cdot l^3}{I} \quad (1)$$

Em que:  $MOE_{vt}$  = módulo de elasticidade longitudinal obtido pelo método de vibração transversal livre (MPa);  $f_1$  = primeira frequência de vibração transversal livre (Hz);  $\gamma_1$  = obtido por meio da equação  $(n + 0,5)2$ , onde  $n$  é igual a 1 (número do modo harmônico);  $m$  = massa do corpo de prova (kg);  $l$  = comprimento da peça (m); e  $I$  = momento de inércia da seção transversal ( $m^4$ ).

O ensaio de vibração longitudinal foi realizado segundo a ASTM E 1876 (2007) e executado conforme descrito por Segundinho et al. (2018). Na Figura 3 é ilustrado o ensaio de vibração longitudinal para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico.

**Figura 3** – Ensaio de vibração longitudinal com o software Sonelastic® para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico na vibração longitudinal.



Fonte: o Autor.

Os CPs foram apoiados em duas linhas de nylon. Em uma das extremidades foi posicionado o microfone acoplado a um computador com o sistema de aquisição de dados. Na outra extremidade foi efetuada uma batida no corpo de prova com um martelo, e o microfone captou a vibração induzida pelo impacto no CP. Para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_{al}$ ) foi utilizada a Equação (2).

$$MOE_{al} = 4 \cdot \left( \frac{m \cdot f_1^2}{b} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{h} \right) \quad (2)$$

Em que:  $MOE_{al}$  = módulo de elasticidade longitudinal obtido pelo método de vibração longitudinal (MPa);  $m$  = massa (kg) do corpo de prova;  $f_1$  = primeira frequência de vibração longitudinal (Hz);  $b$  = largura da seção (cm);  $h$  = altura da seção (cm); e  $l$  = comprimento da peça (cm).

### 3.2.2 Ensaio de ondas de tensão

Foram obtidos dois módulos de elasticidade dinâmicos via ondas de tensão. Para tanto, foram realizados ensaios em dois equipamentos de *stress wave timer* distintos (o Fakopp e o Metriguard Inc., modelo 239A, WA, USA). Os ensaios de ondas de tensão (*stress wave*) no equipamento Fakopp foram realizados conforme descrito por Paula et al. (2016). Na Figura 4 é ilustrado o experimento com o Fakopp.

**Figura 4** – Ensaio de ondas de tensão com o instrumento de *stress wave timer* Fakopp, para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: o Autor.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de vibração transversal livre e vibração longitudinal foram utilizados para estes ensaios. Os CPs foram posicionados em suas extremidades entre dois acelerômetros, um de partida e outro de chegada da onda de tensão. Um martelo específico do equipamento de *stress wave timer* Fakopp foi utilizado para gerar o impacto no acelerômetro de partida. Com o impacto, a onda se propaga pelo CP até atingir o acelerômetro de chegada. Foram realizadas três medições do tempo de propagação da onda. Com os dados do tempo de propagação, pôde-se calcular o módulo de elasticidade dinâmico

( $MOE_{ds}$ ) no sentido longitudinal do corpo-de-prova, conforme a Equação (3) (Cunha; Matos, 2010).

$$MOE_{ds} = \frac{V \cdot ME_{12\%}}{A} \quad (3)$$

Em que:  $MOE_{ds}$  = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);  $V$  = velocidade de propagação da onda ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $ME_{12\%}$  = massa específica a 12% de umidade ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ); e  $A$  = aceleração da gravidade ( $9,80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ).

Com a mesma equação obteve-se o módulo de elasticidade dinâmico por equipamento de *stress wave timer* Metriguard. Na Figura 5 é ilustrado o ensaio com o Metriguard.

**Figura 5** – Ensaio de ondas de tensão com o instrumento de *stress wave timer* Metriguard para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: o Autor.

Para o uso do equipamento de *stress wave timer* Metriguard foi seguido o protocolo descrito em Gonzalez et al. (2018). Assim, para este ensaio, os CPs foram

alocados entre dois sensores, um em cada extremidade da viga. O acelerômetro de partida recebeu o impacto, gerando a onda de tensão que se propagou pela viga até atingir o acelerômetro de chegada. O tempo que a onda leva de um acelerômetro até o outro é o dado que foi captado para leitura no equipamento. Foram efetuadas três leituras do tempo de propagação, e considerou-se a média das três leituras para uso no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico. Com isso, pôde-se obter o  $MOE_{ds}$ .

### 3.2.3 Ensaio de flexão estática e de ruptura

O ensaio de flexão estática foi realizado segundo Candaten et al. (2018) em máquina universal de ensaio EMIC (capacidade de 10kN), com sistema automatizado de aquisição de dados acoplado, seguindo a ASTM D143-94 (1995). As variáveis determinadas foram os módulos de elasticidade estático (MOE) e de ruptura (MOR). O equipamento possui um pórtico de reação, uma máquina eletromecânica e dispositivos de flexão em que é possível medir os deslocamentos de carga verticais.

O sistema no computador foi carregado com os dados dos CPs. Em seguida, foi dado início ao processo de obtenção dos dados de flexão. A máquina eletromecânica com o dispositivo de flexão se deslocou em direção ao CP até atingir a marcação do meio da peça, segundo o vão de flexão. Com isso, foi dado início ao processo de ensaio. Finalizado o ensaio, o medidor de deslocamento vertical no sistema indicou o valor do deslocamento para o cálculo do módulo de elasticidade estático. Na Figura 6 é ilustrado o ensaio de flexão estática para obtenção do módulo de elasticidade estático.

**Figura 6** – Ensaio de flexão estática na máquina de ensaios universal (EMIC) para obtenção do módulo de elasticidade estático.



Fonte: o Autor.

Para o cálculo do módulo de elasticidade estático foi utilizada a Equação (4):

$$E_M = \frac{FL^3}{48} \left( \frac{1}{\Delta i} \right) \quad (4)$$

Em que:  $E_M$  = módulo de elasticidade estático (MPa);  $F$  = força (kN);  $L$  = vão livre da peça (cm);  $\Delta$  = variação do deslocamento (cm); e  $I$  = momento de inércia (cm<sup>4</sup>).

Na obtenção do módulo de ruptura (MOR), o ensaio prosseguiu metodologicamente semelhante ao ensaio realizado para obtenção do módulo de elasticidade estático. Entretanto, o sistema foi calibrado para romper a peça estrutural. Na Figura 7 é ilustrado o ensaio de ruptura para obtenção do módulo de ruptura.

**Figura 7** – Execução do ensaio de ruptura utilizando a máquina de ensaios universal (EMIC) para obtenção do módulo de ruptura.



Fonte: o Autor.

Após o rompimento da peça, o medidor de deslocamento vertical mostrou o deslocamento da peça, no qual ocorreu o momento de ruptura. Os valores obtidos pela máquina de ensaios universal no ensaio de ruptura, em  $\text{kgf.cm}^{-2}$ , foram convertidos em MPa. O módulo de ruptura foi dado pelo modelo da Equação (5):

$$MOR = \frac{3FL}{2ba^2} \quad (5)$$

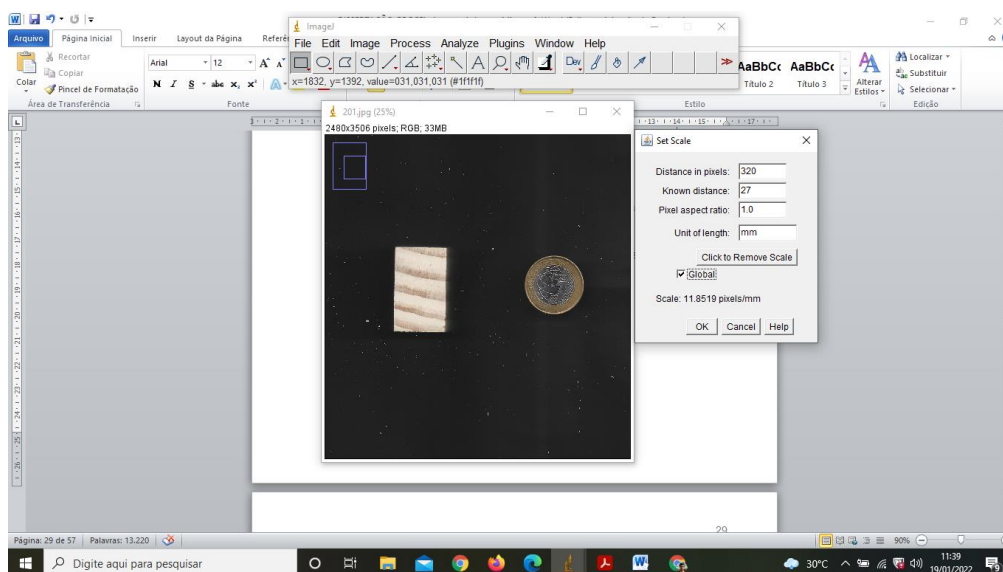
Em que:  $MOR$  = Módulo de ruptura na flexão estática (MPa);  $F$  = força (kN);  $L$  = vão livre da peça (cm);  $a$  = distância entre o apoio e o ponto de aplicação da força (cm);  $b$  = base da seção (cm).

### 3.2.4 Espessura e proporção de lenho tardio

Dentre as características dos anéis de crescimento foram analisadas a proporção (PLT, em %) e a espessura de lenho tardio (ELT, em mm). Para determinar a PLT e a ELT os CPs foram escaneados no *scanner* Epson Perfection

V750. Logo após, as imagens foram analisadas no *software* livre *ImageJ*® versão 1.49 (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012), com conversão para a resolução de 8 *bits* (em preto e branco). Antes do início da análise, o *software* foi calibrado. Na Figura 8 consta o ambiente de calibração do *software*.

**Figura 8** – Ambiente de calibração do *software* ImageJ para análise das características dos anéis de crescimento.



Fonte: o Autor.

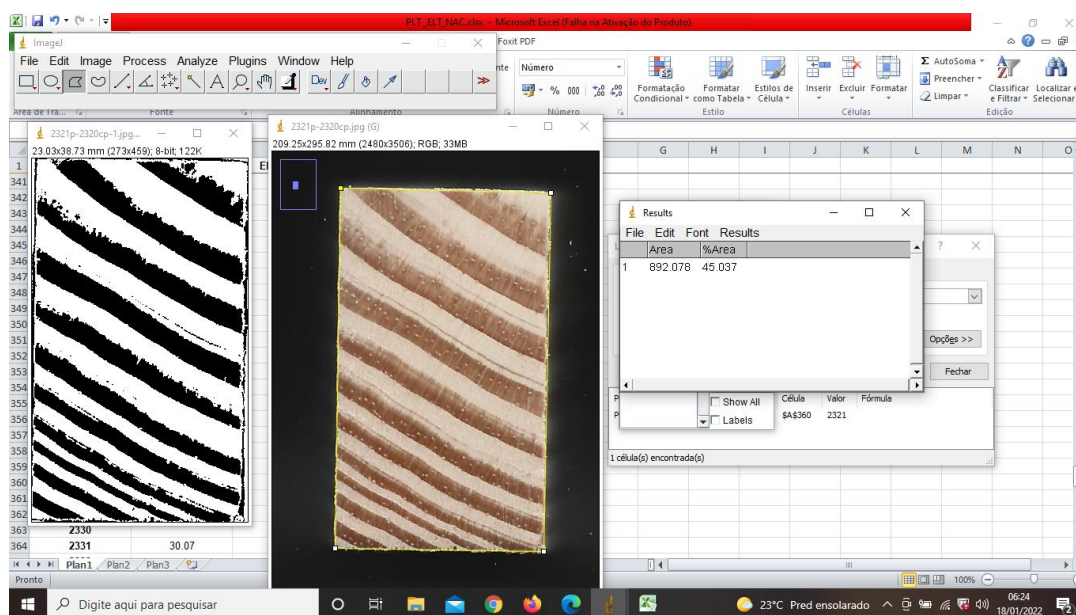
Para tanto, os CPs foram escaneados com uma moeda de diâmetro 27,00 mm ao lado, para que o diâmetro da moeda servisse como parâmetro para a calibração dos *pixels* e da unidade de medida (mm) correspondente.

Para calibrar o *software*, com o uso do botão *Straight*, foi anotado o diâmetro da moeda no espaço correspondente à distância em *pixels* (*distance in pixels*), que foi acessado na guia *Analyze*, na aba *Set Scale*. Para padronizar as medidas, foi utilizado durante toda análise a distância em *pixels* de 320. O diâmetro da moeda correspondeu à distância conhecida (*known distance*) para calibração do *software*, e foi anotado no espaço da distância conhecida (*known distance*); a unidade de comprimento (*unit of length*), em mm, foi anotada no espaço correspondente. A escala para as análises, portanto, foi de 11.8519 *pixels*.mm<sup>-1</sup>. Para que a calibração fosse efetivada para todas as imagens e análises posteriores,



acionou-se o ícone *Global* e procedeu-se às análises. Na Figura 9 é ilustrado o ambiente de trabalho do *software ImageJ* para análise da PLT.

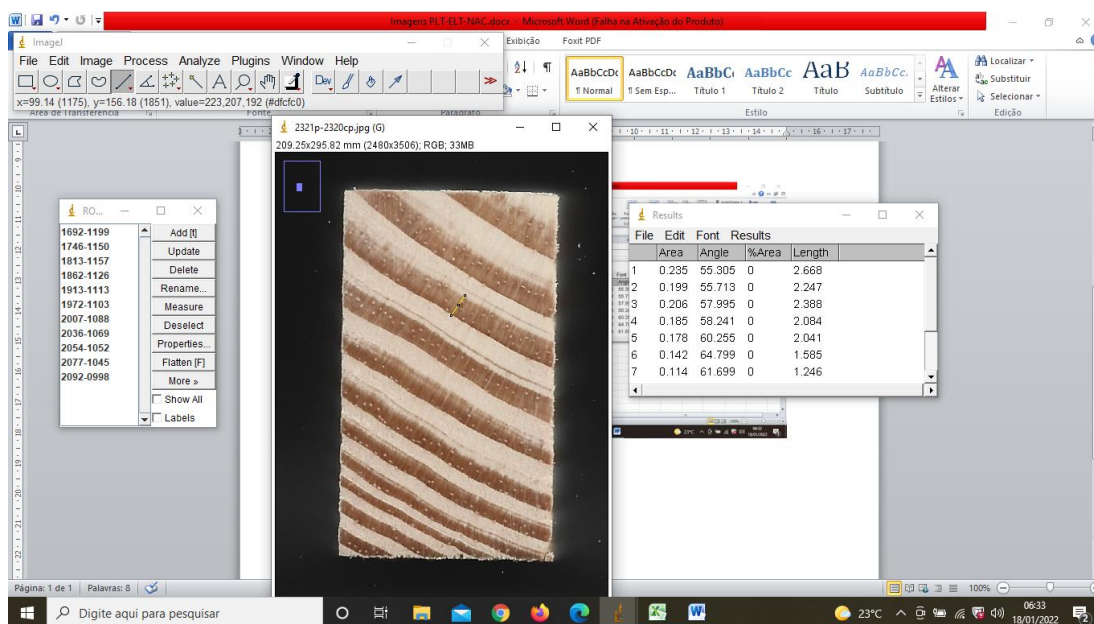
**Figura 9** – Ambiente de trabalho do *software ImageJ* para análise da proporção de lenho tardio (PLT).



Fonte: o Autor.

Para a análise da PLT, a imagem foi selecionada na guia *File*. Para ampliar a imagem, essa foi selecionada e acionou-se a tecla “Ctrl” do teclado do computador, movimentando-se o mouse para ampliar ou reduzir a imagem. A região da imagem analisada foi selecionada com o ícone do polígono (*polygon sections*) e, com o uso da tecla direita do *mouse*, a imagem foi duplicada (*Duplicate*). Logo após, a imagem foi convertida para a resolução de 8 *bits* na guia *Image*. Após, na guia *Process*, foi subtraído o fundo da imagem (*Subtract Background*) e a imagem foi descolorida com o uso do *Threshold* (na guia *Image*) e foi tornada binária (*Make binary*) na aba *Binary* da guia *Process*. Na mesma guia, em *Binary*, foram preenchidos os espaços vazios (*Fill holes*) dos anéis de crescimento coloridos de preto. A PLT e a área correspondente foi obtida na guia *Analyze*, aba *measure*. O valor anotado de PLT foi o correspondente à coluna *%Area*. Na Figura 10 é ilustrado o ambiente de trabalho do *software ImageJ* para obtenção da ELT.

**Figura 10** – Ambiente de trabalho do software *ImageJ* para análise da espessura de lenho tardio (ELT).



Fonte: o Autor.

Na análise da ELT, a imagem foi selecionada na guia *File*. Após, na guia *Analyze*, na aba *Tools*, foi selecionada a opção *ROI Manager*. Com o uso do ícone *Straight*, foi selecionado o lenho tardio, movimentando-se o *mouse* do início até o final da área do lenho perpendicularmente ao comprimento do anel. Essa ação foi repetida para todos os anéis de lenho tardio visíveis no CP. Para armazenar o valor da medida e selecionar o próximo anel foi acionada a tecla “T” do teclado do computador. Outra ação utilizada para armazenar os valores das medidas foi a opção *Add[t]* da aba *ROI Manager*. Ao término dessas ações nos anéis de lenho tardio do CP correspondente, acionou-se o ícone *Measure* na aba *ROI Manager* para obtenção da espessura de cada anel selecionado. O valor da ELT correspondeu à soma dos valores da coluna *Length*, que foi exibida ao acionar-se o ícone *Measure*.

### 3.3 Análise dos dados

O software R (R CORE TEAM, 2021) foi utilizado como solução computacional-estatística nas análises de estatística descritiva. Foram calculadas as

seguintes medidas estatísticas: média, mediana, valores máximo e mínimo observados e desvio-padrão amostral.

Os corpos de prova foram divididos em grupos (tratamentos) segundo as orientações dos mesmos: tangencial, radial e radial tangencial. Foi adotado um delineamento inteiramente casualizado (DIC). Os tratamentos tangencial, radial e radial tangencial foram chamados de T1, T2 e T3, respectivamente, e foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) para a realização do teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Os tratamentos tiveram repetições diferentes: tangencial (T1): seis repetições; radial (T2): 121 repetições; radial tangencial (T3): 299 repetições. As médias de cada tratamento, isto é, as médias de todas as variáveis: módulos de elasticidade e de ruptura, densidades básica e aparente, PLT, ELT e NAC para aquele tratamento, foram submetidas ao teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Em seguida, as propriedades físico-mecânicas da madeira e as características dos anéis de crescimento foram submetidas ao teste de normalidade de Anderson-Darling ( $p < 0,05$ ). Após, verificou-se que a distribuição dos dados não segue a distribuição normal, e procedeu-se à análise estatística não paramétrica. Foi realizado o teste do  $\chi^2$  (chi-quadrado) ( $p < 0,05$ ) para verificar a independência entre as variáveis. Verificada a independência, para as variáveis independentes entre si foi realizado o teste de Kruskal-Wallis ( $p < 0,05$ ) para comparação de medianas, apropriado para dados que não seguem a distribuição normal.

Por fim, foi verificada a correlação entre todas as propriedades físico-mecânicas da madeira e as características dos anéis de crescimento por meio da matriz de correlação de Pearson ( $p < 0,05$ ). Com a finalidade de estruturar a matriz, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) para duas variáveis ( $x, y$ ) quaisquer consideradas nesta Dissertação. Assim, calculou-se a média de cada variável ( $\bar{x}, \bar{y}$ ) e procedeu-se o cálculo do coeficiente  $r$ , segundo a Equação (6) (MONTGOMERY; RUNGER, 2016).

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i(x_i - \bar{x})}{[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]^{1/2}} \quad (6)$$

O cálculo de  $r$  determinou o grau de relação entre as variáveis, demonstrando qual o percentual de explicação de uma variável em relação à outra. A matriz de correlação de Pearson foi elaborada no *software* estatístico R (R CORE TEAM, 2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Características dos anéis de crescimento e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus sp.*

Os dados dos módulos de elasticidade dinâmicos, estático e módulo de ruptura, das densidades básica e aparente e das características dos anéis de crescimento (espessura e proporção de lenho tardio e número de anéis de crescimento) para as direções tangencial, radial e radial tangencial encontram-se nos Apêndices B, C e D, respectivamente.

Na Tabela 3 consta as médias das características dos anéis de crescimento da madeira de *Pinus sp.*

**Tabela 3** – Características dos anéis de crescimento da madeira de *Pinus sp.* para as orientações tangencial, radial e radial tangencial.

Tratamentos	Variáveis		
	PLT (%)	ELT (mm)	NAC
Tangencial	16,91 b ±3,96	5,92 c ±1,50	2,67 b ±0,81
Radial	23,38 a ±7,46	9,11 b ±3,72	4,20 a ±1,62
Radial Tangencial	22,89 a ±7,36	11,12 a ±3,93	4,49 a ±1,88

±: desvio-padrão; PLT: Proporção de lenho tardio; ELT: Espessura de lenho tardio; NAC: Número de anéis de crescimento. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey ( $p \geq 0,05$ )).

Observa-se que a média da direção tangencial foi diferente das demais na proporção do lenho tardio e no número de anéis de crescimento, enquanto todas as médias foram diferentes para a variável proporção de lenho tardio. Uma das possíveis causas para diferença está nas características dos corpos de prova de cada tratamento.

Na Tabela 4 consta as médias das densidades básica e aparente da madeira de *Pinus sp.*

**Tabela 4** – Densidades aparente e básica da madeira de *Pinus* sp. para as orientações tangencial, radial e radial tangencial.

Tratamentos	Variáveis	
	$\rho_{ap}$ (g.cm <sup>-3</sup> )	$\rho_{bas}$ (g.cm <sup>-3</sup> )
Tangencial	0,41 b ±0,03	0,34 b ±0,03
Radial	0,45 a ±0,05	0,37 a ±0,05
Radial Tangencial	0,44 a ±0,06	0,37 a ±0,05

±: desvio-padrão;  $\rho_{ap}$ : Densidade aparente;  $\rho_{bas}$ : Densidade básica. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey ( $p \geq 0,05$ )).

Os valores da  $\rho_{ap}$  são semelhantes nas direções radial e radial tangencial e superiores se comparados com a direção tangencial. Melo et al. (2013) concluíram que a densidade da madeira de *Pinus elliottii* é afetada pela direção das amostras, variando da base para o topo (sentido longitudinal) e da medula para a casca (sentido axial).

Na Tabela 5 consta as propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* sp.

**Tabela 5** – Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* sp. para as orientações tangencial, radial e radial tangencial.

Tratamentos	Variáveis					
	MOE <sub>al</sub> (GPa)	MOE <sub>vt</sub> (GPa)	MOE <sub>ds(F)</sub> (GPa)	MOE <sub>ds(M)</sub> (GPa)	E <sub>M</sub> (GPa)	MOR (MPa)
Tangencial	8,94 a ±1,68	8,79 a ±1,86	8,56 a ±1,33	7,99 a ±1,38	6,97 a ±0,54	63,88 a ±12,67
Radial	8,73 a ±2,66	8,22 a ±2,50	8,60 a ±2,19	8,05 a ±2,18	6,49 b ±1,14	66,84 a ±15,91
Radial Tangencial	9,10 a ±3,06	8,59 a ±2,85	8,80 a ±2,51	8,21 a ±2,47	6,52 b ±1,35	66,56 a ±16,69

±: desvio-padrão; MOE<sub>al</sub>: Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método de vibração longitudinal; MOE<sub>vt</sub>: Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método de vibração transversal livre; MOE<sub>ds(F)</sub>: Módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão obtido no equipamento Fakopp; MOE<sub>ds(M)</sub>: Módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão obtido no equipamento Metriguard; E<sub>M</sub>: Módulo de elasticidade estático; MOR: Módulo de ruptura. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si (Tukey ( $p \geq 0,05$ )).

Para os módulos de elasticidade dinâmicos e para o módulo de ruptura não houve diferença entre os tratamentos. Já para o módulo de elasticidade estático a direção tangencial diferiu das demais. Da mesma forma ocorreu com as propriedades físicas densidade aparente e densidade básica.

De modo geral, verifica-se que os módulos de elasticidade dinâmicos  $MOE_{al}$ ,  $MOE_{ds(F)}$  e  $MOE_{ds(M)}$  e a ELT e NAC são maiores na direção radial tangencial, ao passo que  $MOE_{vt}$  e  $E_M$  são superiores na direção tangencial e MOR, PLT e  $\rho_{ap}$  são maiores na direção radial. A densidade básica não difere nas direções radial e radial tangencial.

Na Tabela 6 consta a estatística descritiva geral para todas as variáveis utilizadas.

**Tabela 6** – Estatística descritiva geral das características dos anéis de crescimento, densidades aparente e básica e propriedades mecânicas de *Pinus sp.*

Variáveis	Estatística Descritiva				
	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Desvio-padrão
$MOE_{al}$ (GPa)	3,13	8,67	8,99	22,40	2,94
$MOE_{vt}$ (GPa)	2,65	8,21	8,49	21,16	2,74
$MOE_{ds(F)}$ (GPa)	3,47	8,59	8,74	19,52	2,41
$MOE_{ds(M)}$ (GPa)	3,20	7,97	8,16	18,94	2,38
$E_M$ (GPa)	2,44	6,92	6,52	9,52	1,29
MOR (MPa)	25,02	64,99	66,60	132,63	16,39
$\rho_{ap}$ (g.cm <sup>-3</sup> )	0,32	0,44	0,45	0,69	0,06
$\rho_{bas}$ (g.cm <sup>-3</sup> )	0,26	0,37	0,37	0,61	0,05
PLT (%)	6,22	22,26	22,95	49,88	7,38
ELT (mm)	1,52	9,88	10,47	29,29	3,98
NAC (unidade)	1,00	4,00	4,38	14,00	1,81

$MOE_{al}$ : Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método de vibração longitudinal;  $MOE_{vt}$ : Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método de vibração transversal livre;  $MOE_{ds(F)}$ : Módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão obtido no equipamento Fakopp;  $MOE_{ds(M)}$ : Módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão obtido no equipamento Metriguard;  $E_M$ : Módulo de elasticidade estático; MOR: Módulo de ruptura;  $\rho_{ap}$ : Densidade aparente;  $\rho_{bas}$ : Densidade básica; PLT: Proporção de lenho tardio; ELT: Espessura de lenho tardio; NAC: Número de anéis de crescimento.

O valor máximo da proporção de lenho tardio é de 49,88%. Por isso, não foi verificada a presença de CPs densos neste experimento, conforme se depreende da classificação proposta pela Tabela 1, que estipula um valor maior que  $\frac{1}{2}$  da área total da figura fornecida pelo software para que o CP seja classificado como denso.

Esse fato também impossibilitou a divisão dos grupos segundo as orientações tangencial, radial e radial tangencial em denso e não denso.

#### 4.1.1 Densidades Aparente e Básica

Para a densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), Ballarin e Palma (2003) apresentaram uma divisão da madeira em madeira adulta e juvenil, cujas médias estão acima do nível de significância adotado nesta pesquisa. Almeida et al. (2014) encontraram um valor médio de  $0,50 \text{ g.cm}^{-3}$  para a densidade aparente em madeira de *Pinus* sp., superior ao deste trabalho.

Para a madeira de *Pinus* sp., Segundinho et al. (2017) encontraram um valor de  $0,56 \text{ g.cm}^{-3}$ , acima do valor de  $\rho_{ap}$  deste trabalho. Já Mustefaga et al. (2019) encontraram valores de densidade aparente para *Pinus patula* e *Pinus taeda* de  $0,32$  e  $0,41 \text{ g.cm}^{-3}$ , respectivamente, inferiores aos valores encontrados nesta pesquisa e considerados baixos pelos autores.

Em Ferreira et al. (2021), para a densidade aparente de *Pinus elliottii* sob diferentes teores de umidade, obtiveram aos valores de  $0,82 \text{ g.cm}^{-3}$  (90% de umidade),  $0,695 \text{ g.cm}^{-3}$  (60% de umidade),  $0,591 \text{ g.cm}^{-3}$  (30% de umidade),  $0,564 \text{ g.cm}^{-3}$  (25% de umidade),  $0,556 \text{ g.cm}^{-3}$  (20% de umidade),  $0,54 \text{ g.cm}^{-3}$  (15% de umidade),  $0,531 \text{ g.cm}^{-3}$  (12% de umidade),  $0,526 \text{ g.cm}^{-3}$  (11% de umidade),  $0,509 \text{ g.cm}^{-3}$  (5% de umidade) e  $0,484 \text{ g.cm}^{-3}$  (0% de umidade), todos acima do valor de  $0,45 \text{ g.cm}^{-3}$  (a um teor de umidade de referência de 12% para corpos de prova confeccionados) encontrado nesta pesquisa. Os referidos autores afirmaram que, das espécies florestais pesquisadas (*Pinus elliottii* e *Bertholletia excelsa*), a madeira das espécies com baixos valores de densidade ( $\rho_{ap}$  e  $\rho_b$ ) tiveram maior variação nas propriedades mecânicas e menores valores de módulo de elasticidade estático que aquelas madeiras com maiores valores de densidade em geral.

De modo geral, a densidade tem seus resultados influenciados pelas variáveis ambientais (como clima, temperatura, água disponível, fertilidade do solo), pelo comprimento, largura e espessura das fibras e traqueídes, principalmente, na célula vegetal, pela espessura da parede celular (MARQUES et al., 2012). Esses são influenciados pelo teor de umidade, que altera as propriedades físico-mecânicas



da madeira. Para essa influência em *Pinus*, Segundinho et al. (2017) determinaram uma densidade básica de  $0,49 \text{ g.cm}^{-3}$ , acima do valor de  $0,37 \text{ g.cm}^{-3}$  desta pesquisa.

Gonçalez et al. (2018), para a relação anéis de crescimento-propriedades mecânicas em *Pinus caribaea*, obtiveram densidades básicas de  $0,51 \text{ g.cm}^{-3}$  para amostras com anéis de crescimento com espessura entre 0 e 0,7mm;  $0,46 \text{ g.cm}^{-3}$  para anéis de crescimento com espessura entre 0,7 e 1,2mm; e  $0,41 \text{ g.cm}^{-3}$  para anéis de crescimento com espessura entre 1,2 e 2mm. Esse fato levou-os a concluir que, quanto mais estreitos os anéis de crescimento e maior a proporção de lenho tardio, maior a densidade básica.

#### 4.1.2 Módulos de Elasticidade Dinâmicos

Dentre as propriedades mecânicas avaliadas no projeto de estruturas de madeira está o módulo de elasticidade dinâmico. Por meio de ensaios não destrutivos, como vibração longitudinal, vibração transversal livre e de ondas de tensão (*stress wave*), realizados nesta Dissertação, é possível estimar esses valores e, posteriormente, obter os valores de cálculo e os característicos.

Para a relação entre anéis de crescimento e propriedades mecânicas em amostras de *Pinus caribaea*, com diferentes espessuras de anéis de crescimento, Gonçalez et al. (2018) verificaram que aquelas com anéis de crescimento com espessura entre 0 e 0,7mm apresentaram um  $\text{MOE}_{\text{ds(M)}}$  de 17,67 GPa; espessura entre 0,7 e 1,2mm, 12,56 GPa; e espessura entre 1,2 e 2mm, 10,37 GPa. É de se observar que, quanto maior a espessura dos anéis de crescimento e menor a presença do lenho tardio, menor o valor do módulo de elasticidade dinâmico. Ainda assim, acima da média de 8,16 GPa para o  $\text{MOE}_{\text{ds(M)}}$ , porém abaixo do valor máximo de 18,94 GPa para  $\text{MOE}_{\text{ds(M)}}$ .

Erasmus et al. (2018), para o efeito de diferentes espaçamentos no ângulo microfibrilar e na densidade de *Pinus patula*, obtiveram um  $\text{MOE}_{\text{ds(F)}}$ , que variou num intervalo entre 10,15 e 15,044 GPa. Tais valores estão acima da média de 8,74 GPa e abaixo do valor máximo de 19,52 GPa encontrados nesta pesquisa.

Outra forma de se obter o módulo de elasticidade dinâmico é pelo ensaio de vibração transversal. Segundinho et al. (2017), para a influência da umidade na determinação do módulo elástico de *Pinus* sp., obtiveram valores máximos em torno

de 14 GPa para  $MOE_{vt}$  para teores de umidade abaixo de 20%, valor inferior ao valor máximo de  $MOE_{vt}$  desta pesquisa, de 21,16 GPa. Ferreira et al. (2021), para a relação entre umidade, densidade e propagação de onda em *Pinus* spp., encontraram valores de  $MOE_{vt}$  que variam conforme a umidade, sendo o maior valor na vibração transversal de 11,54 GPa, a 5% de umidade, valor superior ao valor médio de 8,49 GPa deste trabalho.

Em média, os valores máximos do módulo de elasticidade dinâmico na vibração longitudinal apresentados neste trabalho são maiores em relação aos demais módulos de elasticidade dinâmicos, especialmente em relação ao módulo de elasticidade dinâmico na vibração transversal. Isso ocorre porque os anéis de crescimento da maioria das amostras desta pesquisa possuíam uma maior proporção de lenho tardio e uma menor espessura de lenho tardio, além do fato de serem corpos de prova livres de defeitos, melhorando os valores máximos do módulo de elasticidade dinâmico obtido pela vibração longitudinal.

Embora o valor mínimo do  $MOE_{al}$  neste trabalho tenha sido inferior aos módulos de elasticidade dinâmicos por ondas de tensão  $MOE_{ds(M)}$  e  $MOE_{ds(F)}$ , pode-se afirmar que o ensaio de vibração longitudinal foi o mais adequado para se obter o módulo de elasticidade dinâmico e para a caracterização mecânica da madeira. Isso ocorre porque, pelo conhecimento do módulo de elasticidade dinâmico é possível destinar as peças estruturais para seu aproveitamento mais apropriado, considerando a resistência da madeira (ANDRADE JUNIOR, 2016).

#### 4.1.3 Módulo de Elasticidade Estático

A NBR 7190 (ABNT, 1997) preconiza a tração e a compressão como propriedades mecânicas para a classificação estrutural para avaliação em duas direções (paralela e perpendicular às fibras). Entretanto, a flexão estática é uma propriedade da qual se é possível extrair duas informações essenciais no projeto de estruturas (o módulo de elasticidade estático e o de ruptura). Com isso, para uma proposta de classificação mecânica da madeira de *Pinus* sp. livre de defeitos, é necessário estudar essa propriedade.

Ballarin e Palma (2003), para a resistência e rigidez de *Pinus* sp., encontraram para a madeira adulta de *Pinus taeda* um valor médio de 16,73 GPa

para o  $E_M$ . Esse valor está acima da média encontrada neste trabalho, de 6,52 GPa. Como os autores ressaltam, a madeira adulta tem melhor desempenho que a juvenil, quando considerado o módulo elástico na flexão estática.

Quanto ao espaçamento entre as árvores, Hébert et al. (2016), para *Pinus banksiana*, concluíram que o espaçamento em si não afetou o  $E_M$  e, sim, se as amostras eram juvenis ou adultas. Trianoski et al. (2014), para as propriedades mecânicas de espécies de *Pinus* sp. tropicais, detectaram que o módulo de elasticidade estático variou de 6,06 GPa a 8,943 GPa, valores inferior e superior em relação à média de 6,52 GPa deste trabalho, respectivamente. Ao final, os autores informaram que *P. maximinoi*, *P. tecunumanii* e *P. oocarpa* tiveram melhor desempenho de resistência e rigidez.

Para a influência do teor de umidade no módulo elástico de *Pinus* sp., Segundinho et al. (2017) obtiveram um valor máximo de  $E_M$  em torno de 14 GPa para teores de umidade abaixo de 20%. Essien et al. (2017) obtiveram um valor médio de 7,97 GPa para *Pinus taeda*.

Em experimento com *Pinus* sp., Gonçalves et al. (2018) ao relacionarem a espessura dos anéis de crescimento com o módulo elástico na flexão estática obtiveram valores médios de 8,67 GPa para a espessura de 0 a 0,7mm; 10,051 GPa para 0,7 a 1,2mm; e 11,568 GPa para 1,2 a 2mm. Mustefaga et al. (2019) investigaram a madeira juvenil de *Pinus* sp. e obtiveram valores de 6,318 GPa para *P. patula* e de 6,628 GPa para *P. taeda*. A maioria dos valores obtidos nesses experimentos estão acima dos valores médio e máximo conseguidos nesta pesquisa, de 6,52 GPa e 9,52 GPa, respectivamente. Isso ocorre porque os anéis de crescimento das amostras (embora livres de defeitos) desta pesquisa possuíam maior espessura de lenho tardio do que os experimentos de Gonçalves et al. (2018), o que resultou em valores menores para a elasticidade estática obtida nesta pesquisa.

#### 4.1.4 Módulo de Ruptura

Para o MOR, Ballarin e Palma (2003) encontraram valor médio de 127,62 MPa para a madeira adulta de *Pinus taeda*. Já Hébert et al. (2016) concluíram que o espaçamento entre árvores não afetou o MOR, mas que a amostragem influenciou

no MOR. Essien et al. (2017) obtiveram para *Pinus taeda* um valor médio de 74,47 MPa para o módulo de ruptura.

Em relação a esses valores, Gonzalez et al. (2018), para espaçamentos de 0 a 0,7mm, 0,7 a 1,2mm e 1,2 a 2mm encontraram valores de ruptura de 93,49 MPa, 101,68 MPa e 80,25 MPa, respectivamente. Ademais, Mustefaga et al. (2019), para a madeira juvenil de *Pinus* sp., encontraram os valores médios de 45,3 MPa e 56,3 MPa em *P. patula* e *P. taeda*, respectivamente.

Os anéis de crescimento influenciam na resistência mecânica analisada pelo módulo de ruptura através da densidade: quanto maior a proporção do lenho tardio e menor a espessura do lenho tardio, maior a densidade e maior a resistência mecânica (RALL, 2006). Com corpos de prova livres de defeitos, o módulo de ruptura obtido apresenta maior resistência mecânica. Isso porque os defeitos não permitem obter corretamente as propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* sp. (CALIL JUNIOR; ROCCO LAHR; DIAS, 2003).

#### 4.1.5 Número de Anéis de Crescimento, Espessura e Proporção de Lenho Tardio

Na Ciência e Tecnologia da Madeira, as variáveis número de anéis de crescimento, espessura e proporção de lenho tardio fazem parte da análise de crescimento das árvores. Todas essas propriedades possuem uma relação funcional em comum, sendo dadas em função dos anéis de crescimento. Os anéis de crescimento estão relacionados com outras variáveis, como as propriedades físicas (densidades básica e aparente) e mecânicas (os módulos de elasticidade e de ruptura).

Em relação à ELT, evidências dendrocronológicas indicadas por Arzac et al. (2018) ao estudarem *Pinus sylvestris*, revelaram que o incremento anual de anéis de crescimento pode prever, por modelagem, as potenciais variações nas propriedades mecânicas advindas de mudanças climáticas. Na referida pesquisa, a ampliação da espessura dos traqueídeos em um período chuvoso favoreceu as propriedades estruturais anatômicas e, conseqüentemente, as propriedades físico-mecânicas e as características dos anéis de crescimento. Gonzalez et al. (2018) para *Pinus caribaea*, concluíram que, quanto mais estreitos os anéis de crescimento e maior a presença de lenho tardio, maior a densidade básica. Além disso, os

autores reforçaram a ideia de que o módulo de elasticidade e o de ruptura são maiores em madeiras com anéis de crescimento mais estreitos, isto é, anéis de crescimento com espessuras menores.

Para três classes de *Pinus sylvestris* L. com 60 anos, Fabisiak e Fabisiak (2021) relataram três valores para a variância anual ELT (para a classe dominante, 3,44mm, para a classe intermediária, 2,39mm, e para a classe suprimida, 1,54mm). Contudo, os anéis de crescimento mais estreitos se encontram na classe suprimida, que possuía os menores valores de ELT. Assim, a classe suprimida seria a que melhor se adequaria a um projeto de estrutura, que considera a densidade e as características dos anéis de crescimento. Fabisiak e Fabisiak (2021) reportaram, ainda, que a classe suprimida foi a que apresentou maiores percentuais de lenho tardio e densidade. Entretanto, todos os valores encontrados por Fabisiak e Fabisiak (2021) foram inferiores ao encontrado neste trabalho, de 10,47mm em média.

As condições ambientais e de mudanças climáticas também influenciam na ELT. Prova disso é o estudo de cronologias de parâmetros para anéis de crescimento de *Pinus kesiya* obtidos por Thomte et al. (2022). Dentre eles está a espessura de lenho tardio. Nessa pesquisa, os autores observaram que o lenho inicial, ao longo do tempo, representou a maior parte dos anéis de crescimento, enquanto o tardio ocupou uma área menor. Tal fato é compatível com as análises de ELT desta pesquisa, cuja proporção de lenho tardio correspondente não superou a porcentagem de 50% da área total analisada no *software ImageJ*.

Em relação à proporção de lenho tardio, Topanotti et al. (2021) observaram que a espessura e a proporção de lenho tardio influenciam na densidade dos anéis de *Pinus taeda*, mas, principalmente, a PLT. Ademais, os autores ressaltaram que a proporção de lenho tardio aumenta com o passar dos anos, contribuindo com o aumento da densidade da árvore e indica se o lenho é adulto ou juvenil. Para tanto, a PLT deveria ter alcançado ou superado o valor de 50%, o que não ocorreu no experimento dos autores e corrobora os resultados deste estudo, cuja proporção de lenho tardio alcançou valor máximo de 49,88%.

Adamopoulos et al. (2009), para a espessura e a proporção de lenho tardio em *Pinus brutia* proveniente de reflorestamento no Nordeste da Grécia detectaram, em relação ao ELT, uma média de 4,9mm para três alturas do tronco (base, meio e topo) em cultivo em terreno de boa qualidade (solos mais profundos e

com água disponível) e de 4,3mm em terreno de média qualidade. Já em relação ao PLT, no terreno de boa qualidade, a média foi de 16,5%, enquanto que em terreno de média qualidade a média aferida foi de 15,6%. Tanto os valores de ELT quanto os valores de PLT desse trabalho (média de 22,95% para PLT e de 10,47mm para ELT) estão acima dos verificados pelos autores citados.

Dias et al. (2018), para a variação intra e entre árvores da densidade de *Pinus nigra* em diferentes locais em Portugal, chegaram a uma média geral de PLT igual a 38,9%, acima da média encontrada por esta pesquisa. Quanto a ELT, os autores citados chegaram a uma média geral de 0,87mm por anel, e concluíram que os diferentes locais de plantio influenciaram a PLT.

#### 4.2 Análise da correlação entre as características dos anéis de crescimento e as propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus sp.*

Na Tabela 7 constam os valores do teste de Anderson-Darling (AD) para a normalidade dos dados.

**Tabela 7** – Teste de Anderson-Darling para a normalidade dos dados.

Variáveis	AD	p-valor
MOE <sub>al</sub>	3,25	3,60*10 <sup>-8</sup>
MOE <sub>vt</sub>	3,00	1,47*10 <sup>-7</sup>
MOE <sub>ds(F)</sub>	2,76	5,86*10 <sup>-7</sup>
MOE <sub>ds(M)</sub>	2,32	6,93*10 <sup>-6</sup>
E <sub>m</sub>	15,30	2,20*10 <sup>-16</sup>
MOR	4,18	2,08*10 <sup>-10</sup>
ρ <sub>ap</sub>	4,05	4,31*10 <sup>-10</sup>
ρ <sub>bas</sub>	4,99	2,33*10 <sup>-12</sup>
PLT	1,46	8,88*10 <sup>-4</sup>
ELT	2,77	5,36*10 <sup>-7</sup>
NAC	16,88	2,2*10 <sup>-16</sup>

AD: estatística do teste de Anderson-Darling.

Verificou-se que os dados não seguem a distribuição normal. Assim, a estatística utilizada neste trabalho foi não-paramétrica. Rejeitou-se a hipótese nula e procedeu-se à análise da independência das variáveis. Este passo é necessário para a escolha do teste de comparação de médias. No caso deste trabalho, o teste

de Kruskal-Wallis decidiu se as amostras em que foi verificada a independência de duas médias provêm de populações com as mesmas médias. Para a verificação da independência entre duas médias, utilizou-se o teste do  $\chi^2$ .

Os resultados da estatística  $\chi^2$  para cada variável tomada duas a duas encontram-se no Apêndice E. Pela análise dos resultados para a estatística  $\chi^2$ , o teste indicou que há associação entre as variáveis: MOE<sub>al</sub> e MOE<sub>vt</sub>; MOE<sub>al</sub> e MOR; MOE<sub>al</sub> e NAC; MOE<sub>vt</sub> e MOR; MOE<sub>vt</sub> e NAC; e MOR e NAC. Por isso, essas variáveis, com essas combinações, não foram selecionadas para o teste de Kruskal-Wallis ( $p < 0,05$ ) de comparação de medianas, visto que uma das pressuposições do referido teste de comparação de amostras provenientes de duas populações com as mesmas médias é que as amostras sejam independentes.

Os resultados do teste de Kruskal-Wallis (H) para comparação de medianas, usual quando os dados não possuem distribuição normal, estão no Apêndice F.

O teste de Kruskal-Wallis permite inferir que as medianas do módulo de elasticidade estático em relação às medianas dos módulos de elasticidade dinâmicos, obtidos por vibrações longitudinal e transversal, são diferentes. Da mesma forma, as medianas do módulo de elasticidade dinâmico obtido, por ondas de tensão, quando relacionados com as medianas dos módulos de elasticidade dinâmicos obtidos por vibração longitudinal e transversal, são diferentes pelo teste de Kruskal-Wallis.

Para a elaboração da matriz de correlação de Pearson foram calculados os valores de cada coeficiente  $r$  de Pearson. Em seguida, foi testada a significância dos coeficientes  $r$  de Pearson ( $p < 0,05$ ).

Na Tabela 8 a seguir consta a matriz de correlação de Pearson para os dados obtidos nesta pesquisa. A matriz foi utilizada como instrumento estatístico de análise das correlações entre as propriedades físico-mecânicas e as características dos anéis de crescimento.

**Tabela 8** – Correlação de Pearson entre as propriedades físico-mecânicas e características dos anéis de crescimento de *Pinus sp.*

	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	ρ <sub>ap</sub>	ρ <sub>bas</sub>	PLT	ELT	NAC
MOE <sub>al</sub>	1,00										
MOE <sub>vt</sub>	0,99	1,00									
MOE <sub>ds(F)</sub>	0,98	0,97	1,00								
MOE <sub>ds(M)</sub>	0,96	0,95	0,97	1,00							
E <sub>M</sub>	0,80	0,80	0,80	0,77	1,00						
MOR	0,78	0,78	0,78	0,75	0,60	1,00					
ρ <sub>ap</sub>	0,64	0,63	0,67	0,64	0,39	0,79	1,00				
ρ <sub>bas</sub>	0,49	0,48	0,51	0,49	0,27	0,67	0,85	1,00			
PLT	0,39	0,37	0,40	0,38	0,20	0,53	0,70	0,66	1,00		
ELT	0,35	0,33	0,36	0,34	0,18	0,47	0,60	0,62	0,76	1,00	
NAC	0,65	0,64	0,66	0,64	0,45	0,60	0,56	0,52	0,57	0,56	1,00

MOE<sub>al</sub> (GPa): Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método de vibração longitudinal; MOE<sub>vt</sub> (GPa): Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método de vibração transversal livre; MOE<sub>ds(F)</sub> (GPa): Módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão obtido no equipamento Fakopp; MOE<sub>ds(M)</sub> (GPa): Módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão obtido no equipamento Metriguard; E<sub>M</sub> (GPa): Módulo de elasticidade estático; MOR (MPa): Módulo de ruptura; ρ<sub>ap</sub> (kg.m<sup>-3</sup>): Densidade aparente; ρ<sub>bas</sub> (g.cm<sup>-3</sup>): Densidade básica; PLT (%): Proporção de lenho tardio; ELT (mm): Espessura de lenho tardio; NAC: Número de anéis de crescimento. Os valores de correlação são significativos (p<0,05).

Todas as correlações foram significativas (p<0,05). Os valores de cada correlação de Pearson variaram de 0,18 na correlação entre E<sub>M</sub> e ELT a 0,99 na correlação entre MOE<sub>al</sub> e MOE<sub>vt</sub>. A alta correlação entre os módulos de elasticidade dinâmicos nas vibrações longitudinal transversal corrobora com a análise pelo teste do  $\chi^2$  para a independência das variáveis, que mostrou que essas variáveis são dependentes uma da outra. Os valores mais baixos foram encontrados na correlação entre o módulo de elasticidade estático e a espessura de lenho tardio, em que a espessura de lenho tardio explica 18% do módulo de elasticidade estático, a proporção de lenho tardio explica 20% do módulo de elasticidade estático e a densidade básica explica 27% da elasticidade estática.

Ballarin e Palma (2003) encontraram correlação significativa entre os módulos relacionados à flexão estática (E<sub>M</sub> e MOR) em madeira adulta de *Pinus taeda*. Essien et al. (2017) verificaram uma alta correlação, de 0,92, entre E<sub>M</sub> e MOR, superior ao resultado obtido nesta pesquisa. Erasmus et al. (2018) observaram uma correlação negativa entre a ELT e a PLT e entre ELT e densidade, discrepantes dos resultados deste estudo, mas significativos para a referida pesquisa.



Com um *stress wave timer*, González et al. (2018) determinaram que foi possível obter melhores correlações que com o ultrassom. Nesse estudo foram encontrados valores de correlação altos para diferentes intervalos de espessura de anéis de crescimento na faixa de 0 a 0,7mm, entre  $E_M$  e  $MOE_{ds}$  uma correlação de 0,593 e entre MOR e  $MOE_{ds}$  uma correlação de 0,614. Ambos os resultados abaixo da correlação encontrada neste trabalho. Somente a correlação entre  $E_M$  e MOR performou melhor no intervalo de espessura dos anéis de crescimento de 1,2 a 2mm: 0,926. Este valor foi superior ao encontrado nesta pesquisa.

Mustefaga et al. (2019) demonstraram que existe alta correlação entre a densidade aparente e a maioria das propriedades mecânicas, deixando evidente que a densidade aparente pode estimar parâmetros de resistência e rigidez. Portanto, considerando as propriedades físicas (densidades básica e aparente) e que as peças são isentas de defeitos, pode-se afirmar, com Santos (2019), que os valores de densidade estão entre as causas de variação nos resultados das demais variáveis estudadas nesta pesquisa.

Nesse ínterim, as correlações obtidas nesta Dissertação representam graus de associação entre variáveis em corpos de prova. Entretanto, para projetos de estruturas de madeira, Zangiacomo, Christoforo e Rocco Lahr (2013) argumentam que essa inferência, a partir de CPs de pequenas dimensões, pode levar a dimensionamentos estruturais não tão seguros quanto aqueles que poderiam ser realizados com peças estruturais. O mesmo posicionamento é encontrado em Moritani e Calil Junior (2019); mesmo em CPs isentos de defeitos não é possível averiguar os melhores parâmetros para peças com dimensões estruturais.

Couto et al. (2020) ressaltaram que a NBR 7190 (ABNT, 1997) pode estar superdimensionando os elementos estruturais, resultando em aumento do peso da estrutura. Ainda, Rocco Lahr et al. (2022) evidenciaram que a NBR 7190 (ABNT, 1997) superestimou em 35% o peso que a estrutura pode realmente resistir.

Embora a compressão e a tração sejam os métodos mais indicados para se estimar o módulo de elasticidade, quanto a elementos estruturais de madeira, a flexão estática e a ruptura são métodos que podem ser empregados na classificação mecânica da madeira de *Pinus* sp., desde que seja testada em peças de uso estrutural.

## 5 CONCLUSÕES

Tendo em vista as características do material observadas, as peças de madeira utilizadas neste estudo foram classificadas como não densas. Sendo assim, não foi possível dividir os tratamentos em denso e não denso.

Pela análise dos resultados, verifica-se que a espessura do lenho tardio dos anéis de crescimento explicou 60% da densidade aparente e 62% da densidade básica, mas somente 18% da elasticidade estática.

Por conseguinte, a espessura e a proporção do lenho tardio dos anéis de crescimento resultaram em maior resistência mecânica para a madeira de *Pinus* sp., pois as amostras analisadas apresentaram maior proporção e menor espessura de lenho tardio.

Dessa forma, a ausência de defeitos nos corpos de prova influenciou na obtenção dos módulos dinâmicos, estático e de ruptura, pois peças livres de defeitos proporcionam módulos maiores.

Conclui-se que a avaliação conjunta das variáveis módulos de elasticidade e de ruptura, densidades básica e aparente e espessura e proporção de lenho tardio permitiu caracterizar a resistência mecânica de *Pinus* sp. a partir dos anéis de crescimento, uma vez que a determinação das características dos anéis de crescimento forneceu informações sobre o comportamento mecânico da madeira explicitado nos módulos de elasticidade e de ruptura.

## **6 TRABALHOS FUTUROS**

Como trabalhos futuros, sugere-se: explorar a correlação entre os módulos obtidos pelos ensaios não destrutivos e destrutivos nesta dissertação e outros parâmetros indicados pela norma brasileira, a fim de contribuir com a proposta de revisão da NBR 7190 (ABNT, 1997); avaliar as mesmas correlações em corpos de prova que apresentam defeitos; avaliar outros parâmetros, como inclinação da grã da madeira.

## REFERÊNCIAS

ADAMOPOULOS, S.; MILIOS, E.; DOGANOS, D.; BISTINAS, I. Ring width, latewood proportion and dry density in stems of *Pinus brutia* Ten. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 67, p. 471-477, 2009. DOI: 10.1007/s00107-009-0345-x.

ALMEIDA, D. H.; SCALIANTE, R. M.; CHRISTOFORO, A. L.; VARANDA, L. D.; ROCCO LAHR, F. A.; DIAS, A. A.; CALIL JUNIOR, C. Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 203-207, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-215**: standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, 2008. 7p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 143-94**: standard test methods for small clear specimens of timber. West Conshohocken, PA, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-198**: standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, 2008. 20p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM D245-06**. Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. West Conshohocken, PA, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-1876**: standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, 2007. 6p.

ANDRADE JUNIOR, J. R. **Classificação estrutural de peças de madeira de *Pinus elliottii* utilizando o módulo de elasticidade obtido pelo método de ondas longitudinais de tensão**. 2016. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2016.

ARZAC, A.; BABUSHKINA, E. A.; FONTI, P.; SLOBODCHIKOVA; SVIDERSKAYA, I. V.; VAGANOV, E. A. Evidences of wider latewood in *Pinus sylvestris* from a forest-steppe of Southern Siberia. **Dendrochronologia**, v. 49, p. 1-8, 2018. DOI: 10.1016/j.dendro.2018.02.007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeiras. Rio Janeiro, 1997. 107p.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003. DOI: 10.1590/S0100-67622003000300014.

BENABOU, L.; SUN, Z. Numerical study of anisotropic failure in wood under large deformation. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 48, n. 6, p. 1977-1993, 2015. DOI: 10.1617/s11527-014-0287-6.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 155p.

CALIL JUNIOR, C.; ROCCO LAHR, F.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais em madeira**. Barueri: Manole, 2003. 152p.

CANDATEN, L.; RODRIGUES, E. F.; TREVISAN, R.; ELOY, É.; FONTOURA, M. R. Flexão estática e massa específica aparente da madeira de *Inga marginata* em diferentes condições de umidade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-5, 2018. DOI: 10.4336/2018.pfb.38e201801671.

COSTA, C. G.; CALLADO, C. H.; CORADIN, V. T. R.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. Xilema. In: APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. **Anatomia vegetal**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2013. p. 123-146

COUTO, N. G.; ALMEIDA, J. P. B.; GOVONE, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Relação entre a resistência ao cisalhamento e a resistência à compressão paralela às fibras de madeiras folhosas. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 319-327, 2020. DOI: 10.1590/s1678-86212020000400475.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo (“*stress wave timer*”). **Revista Árvore**, v. 34, n. 2, p. 345-354, 2010.

DAHLEN, J.; MONTES, C.; EBERHARDT, T. L.; AUTY, D. Probability models that relate nondestructive test methods to lumber design values of plantation loblolly pine. **Forestry**, v. 91, n. 3, p. 295-306, 2018. DOI: 10.1093/forestry/cpy001.

DIAS, A.; GAPAR, M. J.; CARVALHO, A.; PIRES, J.; LIMA-BRITO, J.; SILVA, M. E.; LOUZADA, J. L. Within- and between-tree variation of wood density components in *Pinus nigra* at six sites in Portugal. **Annals of Forest Science**, v. 75, p. 1-19, 2018.

DIAS, F. M.; ROCCO LAHR, F. A. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Florestalis**, n. 65, p. 102-113, 2004.

ERASMUS, J.; KUNNEKE, A.; DREW, D. M.; WESSELS, C. B. The effect of planting spacing on *Pinus patula* stem straightness, microfibril angle and wood density. **Forestry**, v. 91, n. 3, p. 247-258, 2018. DOI: 10.1093/forestry/cpy005.

ESSIEN, C.; VIA, B. K.; CHENG, Q.; GALLAGHER, T.; MCDONALD, T.; WANG, X.; ECKHARDT, L. G. Multivariate modeling of acoustomechanical response of 14-year-old suppressed loblolly pine (*Pinus taeda*) to variation in wood chemistry, microfibril angle and density. **Wood Science and Technology**, v. 51, n. 3, p. 475-492, 2017. DOI: 10.1007/s00226-017-0894-9.

FABISIAK, E.; FABISIAK, B. Relationship of tracheid length, annual ring width, and wood density in scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees from different social classes of tree position in the stand. **BioResources**, v. 16, n. 4, p. 7492-7508, 2021.

FERREIRA, P. S.; RAMALHO, F. M. G.; COUTO, A. M.; PROTÁSIO, T. P.; MONTEIRO, T. C.; HEIN, P. R. G. Relationship among the stiffness, wave propagation speed, density and moisture content of *Pinus elliottii* and *Bertholletia excels* wood specimens. **Wood Material Science and Engineering**, p. 1-10, 2021. DOI: 10.1080/17480272.2021.1996456.

GONÇALEZ, J. C.; SANTOS, N.; SILVA JUNIOR, F. G.; SOUZA, R. S.; PAULA, M. H. Growth ring width of *Pinus caribaea* and its relationship with wood properties. **Scientia Florestalis**, v. 46, n. 120, p. 670-678, 2018. DOI: 10.18671/scifor.v46n120.15.

HÉBERT, F.; KRAUSE, C.; PLOURDE, P. Y.; ACHIM, A.; PRÉGENT, G.; MÉNÉTRIER, J. Effect of tree spacing on tree level volume growth, morphology, and wood properties in a 25-year-old *Pinus banksiana* plantation in the Boreal Forest of Quebec. **Forests**, v. 7, n. 11, p. 1-16, 2016. DOI: 10.3390/f7110276.

HOADLEY, R. B. **Understanding wood**: a craftsman's guide to wood technology. Newtown: The Taunton Press, 2000. 280p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13910**: Structural timber – Characteristic values of strength-graded timber – Sampling, full-size testing and evaluation. Genebra, 2005. 22 p.

KELLER, A.; BALLARIN, A. W.; FREITAS, M. L. M.; ZANATTO, A. C. S.; LONGUI, E. L. Physical-mechanical wood properties of *Myracrodruon urundeuva* in homogeneous planting. **Revista do Instituto Florestal**, v. 29, n. 2, p. 239-251, 2017. DOI: 10.24278/2178-5031.201729208.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology I: solid wood**. Nova York: Springer-Verlag. 1968. 592p.

MARINI, L. J. **Estimativas de propriedades físicas e mecânicas de *Pinus* sp. por colorimetria**. 2019. 102 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2019.

MARQUES, S. S.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, E. S.; SILVA, A. G.; FIEDLER, N. C. Estudo comparativo da massa específica aparente e retratibilidade da madeira de pau-brasil (*Caesalpinia echinata* LAM.) nativa e de reflorestamento. **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 373-380, 2012.

MELO, R. R.; SILVESTRE, R.; OLIVEIRA, T. M.; PEDROSA, T. D. Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. com diferentes idades. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 4, n. 1, p. 83-92, 2013.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 629p.

MORITANI, F. Y.; CALIL JUNIOR, C. Comparação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do *Eucalyptus urograndis*: corpos de prova isentos de defeitos X peças estruturais. In: TULLIO, F. B. M. (Org.). **Pesquisa científica e inovação tecnológica nas engenharias**. v. 1. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. p. 133-144.

MUSTEFAGA, E. C.; HILLIG, E.; TAVARES, E. L.; SOZIM, P. C. L.; RUSCH, F. Caracterização físico-mecânica da madeira juvenil de *Pinus*. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 123, p. 472-481, 2019. DOI: 10.18671/scifor.v47n123.09.

PALMA, H. A. L.; BALLARIN, A. W. Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, n. 64, p. 13-22, 2003.

PAULA, M. H.; MESQUITA, R. R. S.; GONÇALEZ, J. C.; RIBEIRO, E. S.; SOUZA, R. S. Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* Willd). **Biodiversidade**, v. 15, n. 2, p. 136-149, 2016.

R CORE TEAM (2021). **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

RALL, R. **Influência das características dos anéis de crescimento na densidade, resistência e rigidez da madeira de *Pinus taeda* L.** 2006. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 2006.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal**. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2016. 856p.

ROCCO LAHR, F. A.; CHAHUD, E.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; RODRIGUES, E. F. C.; ALMEIDA, J. P. B.; AQUINO, V. B. M. Análise da representatividade e da densidade aparente como estimadoras do módulo de elasticidade da classe C60 da NBR7190:1997. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 1, p. 139-146, 2022. DOI: 10.1590/s1678-86212022000100583.

SANTOS, L. L. **Estabelecimento de classes de resistência para a madeira serrada de *Pinus sp.*** 2019. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2019.

SCHNEIDER, C.A., RASBAND, W.S., ELICEIRI, K.W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012. DOI: 10.1038/nmeth.2089.

SEGUNDINHO, P. G. A.; CARREIRA, M. R.; REGAZZI, A. J.; DIAS, A. A. Influência do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade de vigas de *Pinus sp.* **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 319-329, 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000300179.

SEGUNDINHO, P. G. A.; REGAZZI, A. J.; POLETTI, F. S.; PAULA, M. O.; MENDONÇA, A. R.; GONÇALVES, F. G. Variação dos módulos de elasticidade e ruptura em madeira de cedro-australiano por meio de ensaios não destrutivo e destrutivo. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1163-1178, 2018. DOI: 10.5902/19805098333392.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.



THOMAS, R. J. Wood: formation and morphology. In: LEWIN, M.; GOLDSTEIN, I. S. (Eds.). **Wood structure and composition**. Nova York: Marcel Dekker, 1991. p. 7-47.

THOMTE, L.; SHAH, S. K.; MEHROTRA, N.; BHAGABATI, A. K.; SAIKIA, A. Influence of climate on multiple tree-ring parameters of *Pinus kesiya* from Manipur, Northeast India. **Dendrochronologia**, v. 71, p. 1-14, 2022. DOI: 10.1016/j.dendro.2021.125906.

TOPANOTTI, L. R.; VAZ, D. R.; CARVALHO, S. P. C.; RIOS, P. D.; TOMAZELLO-FILHO, M.; DOBNER JUNIOR, M.; NICOLETTI, M. F. Growth and wood density of *Pinus taeda* L. as affected by shelterwood harvest in a two-aged stand in Southern Brazil. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 869-881, 2021. DOI: 10.1007/s10342-021-01372-1.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. **Scientia Florestalis**, v. 42, n. 101, p. 21-28, 2014.

VIDAURRE, G.; LOMBARDI, L. R.; OLIVEIRA, J. T. S.; ARANTES, M. D. C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011. DOI: 10.4322/floram.2011.066.

ZANGIACOMO, A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Avaliação do módulo de elasticidade de peças estruturais roliças e de corpos-de-prova de *Pinus elliottii*. **Scientia Florestalis**, v. 41, n. 98, p. 283-291, 2013.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Simbologia apresentada ao longo dos Apêndices

<b>Sigla</b>	<b>Unidade</b>	<b>Definição</b>
ID	adimensional	Identificação da amostra
MOE <sub>al</sub>	GPa	Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método de vibração longitudinal
MOE <sub>vt</sub>	GPa	Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método de vibração transversal livre
MOE <sub>ds(F)</sub>	GPa	Módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão obtido no equipamento Fakopp
MOE <sub>ds(M)</sub>	GPa	Módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão obtido no equipamento Metriguard
E <sub>M</sub>	GPa	Módulo de elasticidade estático
MOR	MPa	Módulo de ruptura
$\rho_{ap}$	$g.cm^{-3}$	Densidade aparente
$\rho_{bas}$	$g.cm^{-3}$	Densidade básica
PLT	%	Proporção de lenho tardio
ELT	mm	Espessura de lenho tardio
NAC	unidade	Número de anéis de crescimento
$\chi^2$	adimensional	Estatística do Teste do Chi-quadrado
H	adimensional	Estatística do Teste de Kruskal-Wallis

**APÊNDICE B – Propriedades mecânicas e características dos anéis de crescimento da madeira de *Pinus* sp. na orientação tangencial**

<b>ID</b>	<b>MOE<sub>al</sub></b>	<b>MOE<sub>vt</sub></b>	<b>MOE<sub>ds(F)</sub></b>	<b>MOE<sub>ds(M)</sub></b>	<b>E<sub>M</sub></b>	<b>MOR</b>	<b>ρ<sub>ap</sub></b>	<b>ρ<sub>bas</sub></b>	<b>PLT</b>	<b>ELT</b>	<b>NAC</b>
100	10.78	10.40	9.90	9.12	6.93	77.30	0.46	0.40	21.76	6.27	2
210	9.29	9.21	8.99	8.49	6.73	66.22	0.41	0.34	14.41	4.89	4
593	7.21	7.10	7.17	6.60	7.03	58.57	0.39	0.32	14.68	6.72	3
1417	11.02	11.46	10.25	9.85	7.88	79.56	0.45	0.37	21.43	6.46	3
1818	7.6	7.14	7.62	7.43	6.20	49.64	0.37	0.30	12.07	3.48	2
2585	7.71	7.40	7.44	6.45	7.08	51.99	0.41	0.31	17.10	7.72	2

**APÊNDICE C – Propriedades mecânicas e características dos anéis de crescimento da madeira de *Pinus sp.* na orientação radial**

ID	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	PLT	ELT	NAC
64	9.82	9.60	9.09	9.20	6.84	73.97	0.43	0.37	15.52	6.81	3
243	7.42	7.12	7.15	7.02	6.19	62.49	0.39	0.33	24.15	9.31	4
403	6.98	6.83	6.86	6.59	6.11	61.12	0.41	0.35	13.94	5.45	3
427	4.08	3.90	4.91	4.18	3.24	34.43	0.39	0.37	17.25	8.74	2
430	6.08	5.31	7.51	6.57	4.72	54.64	0.48	0.52	15.87	11.38	5
437	10.04	9.71	9.10	8.39	7.77	75.73	0.43	0.37	24.57	9.14	3
438	9.6	9.19	9.45	8.65	6.69	72.69	0.50	0.42	27.30	14.78	5
439	6.15	5.59	6.59	6.03	5.92	64.65	0.49	0.45	30.80	16.38	5
463	11.05	10.04	10.60	10.03	6.83	85.05	0.52	0.43	34.75	16.64	6
465	6.33	6.44	6.98	6.58	5.88	42.67	0.37	0.32	16.29	5.64	4
470	9.03	8.53	9.17	8.28	6.59	58.27	0.42	0.31	20.79	4.73	8
479	6.29	5.80	7.03	6.51	4.73	76.81	0.50	0.39	31.56	11.58	4
490	3.78	3.59	4.09	3.84	4.82	87.51	0.45	0.38	39.98	16.07	6
491	8.29	7.11	8.49	8.55	6.20	55.13	0.40	0.32	16.32	4.47	2
493	7.56	7.37	7.39	7.26	6.27	56.90	0.45	0.39	22.52	9.57	3
495	6.42	6.25	6.75	5.93	6.78	55.92	0.39	0.33	21.63	8.53	4
520	6.38	6.24	7.60	7.05	5.82	50.13	0.43	0.40	26.00	7.86	8
527	14.31	12.96	11.93	12.53	7.36	88.58	0.49	0.41	19.31	9.70	6
541	8.33	8.07	7.71	7.86	6.45	56.51	0.36	0.31	8.17	4.32	3
545	6.61	6.41	7.00	5.76	5.29	56.51	0.37	0.32	15.91	5.74	3
823	8.39	7.23	8.46	7.47	6.21	66.51	0.44	0.35	27.68	10.17	3
824	15.95	15.00	14.66	13.52	8.05	94.37	0.60	0.50	32.95	13.13	7
829	9.44	9.20	9.02	8.39	7.56	74.46	0.46	0.36	28.21	11.85	6
846	7.32	6.96	7.26	6.74	6.64	48.07	0.35	0.28	6.22	1.52	1
852	10.96	10.49	10.44	10.87	6.81	77.30	0.47	0.39	15.92	7.58	5
859	7.97	7.55	8.49	8.28	7.08	60.23	0.41	0.32	24.11	6.73	3
864	7.12	7.72	7.36	6.47	5.14	51.89	0.39	0.33	22.14	7.41	4
896	9.04	8.48	8.71	7.33	7.02	66.12	0.44	0.37	30.33	10.73	6
920	8.18	7.72	8.61	8.05	7.31	65.04	0.43	0.37	17.55	7.15	3
938	9.85	9.06	9.76	9.08	6.85	62.29	0.42	0.32	13.61	6.99	3
944	13.07	12.45	12.23	11.50	7.34	89.76	0.49	0.44	13.45	7.28	4
952	9.06	8.41	8.59	8.48	6.97	63.18	0.41	0.33	20.34	6.77	2
971	5.2	5.03	5.42	5.01	4.42	51.11	0.35	0.29	12.03	4.23	2
982	6.69	6.26	6.44	6.40	5.19	128.02	0.37	0.31	14.46	2.53	3
1015	9.56	8.76	9.49	9.01	6.56	52.78	0.43	0.35	20.77	6.27	4
1030	4.67	4.63	5.00	4.74	3.95	51.01	0.40	0.34	19.04	4.48	3
1039	3.43	2.90	4.00	3.62	2.67	42.58	0.40	0.33	24.68	6.90	2
1042	11.31	10.60	10.26	10.39	6.79	82.70	0.50	0.45	30.97	7.09	9
1044	8.34	7.83	8.06	7.39	6.93	57.39	0.39	0.33	23.48	7.06	3
1058	8.21	7.74	8.08	8.18	6.72	52.09	0.37	0.28	24.69	11.89	4
1101	7.87	7.45	7.74	7.12	7.04	57.09	0.41	0.33	19.20	6.42	5
1141	8.96	7.75	8.18	7.98	7.00	42.48	0.39	0.33	16.70	5.75	4
1172	9.05	8.57	8.87	7.63	7.24	71.02	0.48	0.47	29.68	10.43	4

ID	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	PLT	ELT	NAC
1179	10.41	10.07	9.63	8.84	7.61	66.32	0.40	0.35	16.93	4.64	5
1202	6.03	5.92	6.32	5.74	5.31	51.11	0.37	0.33	18.07	8.97	3
1212	13.26	12.46	12.55	11.71	7.93	81.82	0.49	0.35	17.36	8.61	4
1216	8.17	7.68	8.62	7.52	6.88	67.10	0.44	0.37	21.18	6.96	5
1218	5.2	5.01	5.37	5.11	4.64	25.02	0.34	0.29	13.42	4.58	2
1227	5.29	5.06	5.38	4.91	4.26	49.15	0.39	0.31	27.60	7.78	3
1231	11.6	9.89	11.53	10.38	7.69	75.14	0.49	0.39	20.02	10.50	6
1238	8.19	8.11	8.06	7.40	6.96	64.16	0.40	0.33	17.27	4.99	3
1251	12.44	12.08	11.52	11.23	7.41	93.69	0.53	0.47	33.59	13.30	7
1255	7.73	8.80	8.71	7.37	7.04	62.00	0.41	0.34	19.81	6.38	4
1258	10.63	9.74	10.19	10.13	7.21	66.41	0.50	0.41	29.92	11.39	6
1260	13.8	13.25	12.38	10.93	8.10	93.88	0.52	0.40	30.09	10.48	6
1270	5.1	4.92	5.35	4.77	4.16	67.30	0.50	0.42	14.67	3.55	2
1271	10.78	10.05	10.46	11.65	7.94	81.72	0.53	0.38	19.08	4.74	5
1273	10.81	10.52	9.91	9.97	7.04	74.07	0.45	0.39	23.11	9.47	4
1279	8.57	8.54	8.43	8.18	7.36	60.43	0.44	0.34	20.34	7.61	4
1300	6.52	5.59	7.24	6.18	6.76	41.89	0.41	0.39	20.30	8.69	4
1314	17.61	16.12	15.25	14.82	8.14	114.09	0.57	0.51	34.20	10.91	9
1323	8.07	7.47	8.23	7.65	7.07	72.50	0.49	0.39	29.42	8.45	4
1327	7.58	7.31	7.01	6.36	7.01	47.09	0.34	0.30	16.41	6.47	4
1328	7.96	7.48	7.93	7.30	7.15	65.33	0.42	0.34	25.87	8.78	5
1330	7.41	6.97	8.10	7.43	6.65	52.39	0.39	0.30	11.68	7.75	3
1332	4.66	4.31	4.88	4.56	3.83	50.23	0.40	0.35	22.65	11.06	4
1334	7.9	7.69	8.03	6.84	6.23	67.69	0.44	0.37	19.52	6.79	2
1336	10.26	9.35	9.70	8.39	7.55	68.08	0.44	0.34	27.22	13.02	6
1342	10.87	10.18	10.48	9.01	7.33	67.98	0.44	0.37	26.44	12.26	6
1343	11.1	10.58	10.66	9.72	7.55	67.30	0.45	0.42	28.29	9.35	4
1347	12.67	12.07	12.06	11.82	7.41	68.08	0.50	0.38	25.42	9.79	6
1349	8.11	7.94	8.29	6.98	7.23	79.36	0.50	0.41	32.43	14.45	4
1356	8.64	8.31	8.34	7.41	7.32	69.16	0.43	0.37	23.74	7.43	3
1362	9.32	9.30	8.68	7.93	7.02	53.37	0.38	0.34	18.77	9.41	3
1394	8.13	7.67	7.92	6.95	6.91	61.90	0.41	0.38	15.47	6.37	3
1395	7.63	7.34	7.48	6.75	6.64	75.24	0.52	0.43	31.32	17.79	4
1626	6.98	6.78	7.71	5.84	6.86	57.98	0.40	0.34	19.12	5.82	4
1802	12.32	11.35	12.31	11.62	6.83	99.08	0.57	0.44	42.43	17.67	7
1805	8.21	7.76	8.77	8.22	6.15	77.40	0.56	0.51	33.36	19.62	6
1812	7.61	6.59	7.34	7.47	6.23	51.21	0.39	0.33	15.06	5.35	3
1813	9.34	8.54	9.01	10.79	6.55	66.71	0.46	0.40	26.50	14.42	4
1838	6.8	6.47	7.98	7.02	5.85	57.68	0.46	0.40	27.83	8.82	6
1847	7.04	6.83	7.33	7.47	6.14	57.00	0.40	0.33	17.29	2.79	2
1854	11.39	10.63	10.84	9.41	6.68	87.70	0.52	0.44	36.50	16.38	6
1866	11.08	10.08	10.23	9.91	6.74	79.17	0.47	0.42	23.12	8.23	5
1876	7.57	7.42	7.74	7.78	6.11	58.86	0.41	0.34	15.17	4.26	5
1886	9.94	9.23	9.51	9.09	6.60	71.61	0.43	0.37	20.77	17.79	3
1904	12.67	11.83	11.84	11.76	7.00	82.89	0.47	0.38	19.42	6.62	5
1911	10	9.01	9.44	9.25	6.62	61.41	0.42	0.36	11.95	5.42	4
1940	10.44	10.02	10.30	9.88	6.73	86.03	0.56	0.48	35.90	10.78	6

ID	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	PLT	ELT	NAC
1947	8.03	7.67	8.15	7.82	6.26	63.18	0.43	0.38	22.36	9.83	3
1955	9.22	8.70	9.39	8.18	6.40	72.40	0.51	0.41	33.15	14.15	4
1956	7.1	6.82	7.19	7.12	6.31	68.57	0.52	0.44	23.18	5.25	3
2157	7.21	5.97	7.66	8.80	6.20	60.04	0.44	0.37	26.41	6.76	2
2285	15.64	14.50	13.78	12.03	8.14	104.87	0.54	0.52	25.55	14.73	8
2290	16.34	15.46	15.09	13.15	8.82	100.06	0.57	0.41	30.71	8.12	8
2294	7.5	6.66	7.64	5.57	5.32	55.62	0.39	0.29	16.77	5.07	3
2300	6.24	5.79	7.46	6.56	5.00	51.11	0.47	0.39	27.33	15.66	4
2321	8.3	7.91	7.89	7.27	7.48	70.53	0.42	0.35	21.69	8.68	4
2327	6.93	6.56	7.31	5.92	5.68	73.87	0.55	0.46	31.77	10.81	4
2329	5.58	4.95	5.77	6.24	4.76	48.07	0.36	0.31	22.55	10.64	3
2330	10.13	9.52	10.35	9.41	7.42	64.16	0.41	0.32	11.92	3.38	4
2333	5.5	5.21	5.96	5.12	4.72	61.80	0.47	0.38	22.31	9.83	3
2341	7.9	7.74	8.36	7.19	7.08	65.63	0.48	0.41	34.40	13.06	4
2343	11.36	10.72	11.53	10.43	7.66	83.88	0.54	0.44	34.04	10.89	8
2348	10.07	9.04	9.89	8.23	7.40	80.15	0.44	0.36	27.06	10.31	5
2355	8.8	8.61	8.01	8.16	7.32	66.12	0.40	0.34	16.54	4.41	3
2358	6.57	6.32	6.93	5.93	5.49	73.97	0.56	0.45	23.20	10.77	5
2365	7.36	6.82	7.14	6.30	5.86	46.01	0.37	0.34	22.97	9.66	3
2367	9.52	9.19	9.51	8.55	6.69	66.02	0.44	0.39	23.41	7.76	3
2368	8.29	7.79	8.49	8.39	7.31	59.25	0.45	0.39	18.82	9.28	4
2378	4.78	4.50	5.28	4.41	3.84	58.47	0.48	0.38	27.22	10.01	3
2383	12.16	12.01	11.06	10.21	7.61	90.06	0.54	0.46	29.30	9.72	3
2387	7.13	6.20	6.57	6.49	7.17	61.31	0.43	0.35	23.70	8.80	3
2410	3.36	3.13	3.59	3.44	2.88	42.87	0.44	0.39	22.58	8.36	2
100(2)	8.35	7.10	8.46	7.81	7.26	60.72	0.42	0.35	20.37	9.19	5
2317(2)	7.72	6.76	7.99	8.97	6.93	73.67	0.54	0.42	35.19	11.32	3
439(2)	9.85	9.57	9.33	9.05	6.68	73.77	0.47	0.41	34.99	12.67	4
524(2)	9.91	9.28	9.45	9.79	6.61	83.48	0.55	0.44	49.88	18.25	4
969(2)	9.07	7.80	8.35	8.14	7.04	62.59	0.39	0.35	13.45	9.13	3
IV	12.97	12.42	11.92	11.53	7.71	72.20	0.51	0.39	29.26	12.06	4

**APÊNDICE D – Propriedades mecânicas e características dos anéis de crescimento da madeira de *Pinus* sp. na orientação radial tangencial**

ID	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	PLT	ELT	NAC
46	9.74	9.02	9.55	9.31	6.54	58.86	0.44	0.33	20.18	7.01	5
201	6.3	5.92	6.50	5.88	4.57	63.37	0.47	0.38	24.00	15.46	5
228	6.44	6.01	6.79	6.47	4.66	48.85	0.35	0.29	7.49	4.58	3
231	11.74	10.81	10.52	9.30	6.76	71.81	0.40	0.35	20.66	10.36	6
232	6.61	6.33	7.26	7.31	5.91	53.37	0.40	0.34	23.29	11.87	4
241	15.91	13.51	14.08	13.30	7.98	98.30	0.52	0.43	21.79	11.85	9
255	7.06	6.34	6.93	6.50	6.15	53.76	0.37	0.33	9.78	8.47	4
259	7.91	7.43	7.80	7.80	6.25	68.96	0.45	0.37	24.94	12.74	5
265	6.57	6.27	6.92	6.30	6.13	55.33	0.37	0.31	13.37	5.69	3
274	15.11	14.38	13.94	13.05	7.63	107.22	0.60	0.48	12.20	5.54	3
416	8.56	8.10	8.42	8.08	6.37	68.47	0.45	0.39	21.55	11.34	4
419	5.38	5.39	5.88	6.63	4.63	48.07	0.36	0.29	15.06	8.85	4
422	8.9	9.09	8.65	8.34	6.43	69.85	0.46	0.40	21.40	13.06	4
425	5.87	5.67	5.87	4.85	4.98	52.09	0.37	0.31	14.32	5.46	2
426	8.13	8.06	7.96	7.68	7.30	61.12	0.41	0.32	25.64	10.98	5
432	7.87	7.22	8.26	7.78	6.09	59.06	0.42	0.35	21.77	9.96	6
433	10.39	9.66	9.56	9.56	6.54	65.92	0.44	0.35	27.27	11.72	5
435	8.33	7.98	8.03	7.69	6.93	54.84	0.39	0.33	18.54	6.19	3
436	5.63	5.34	5.74	5.04	4.83	57.78	0.41	0.50	13.01	8.02	3
440	7.38	6.97	6.89	7.06	4.62	40.61	0.37	0.30	14.76	7.93	3
441	10.02	9.24	9.21	9.58	6.57	59.45	0.43	0.37	27.52	11.73	3
442	8.14	7.92	7.94	7.60	6.61	60.43	0.39	0.32	15.54	6.23	3
444	9.7	8.97	9.38	8.73	7.46	61.51	0.41	0.32	27.34	12.39	5
447	8.77	8.28	9.11	8.14	7.16	54.45	0.38	0.31	14.56	7.88	4
448	6.04	5.92	6.52	5.72	4.85	44.73	0.42	0.34	21.39	11.33	3
449	7.96	7.81	8.11	7.14	5.64	61.31	0.48	0.40	19.26	9.15	4
450	5.36	5.44	5.93	5.02	4.92	41.50	0.39	0.34	7.85	5.95	3
452	3.64	3.62	3.76	3.67	2.96	50.23	0.43	0.36	23.94	12.63	3
453	6.69	6.36	6.75	6.48	5.90	57.19	0.39	0.34	20.31	11.16	3
455	10.71	10.27	10.33	10.06	6.81	72.10	0.44	0.36	19.87	14.49	4
457	7.14	6.69	7.48	6.79	6.24	75.14	0.53	0.46	39.52	21.62	6
462	9.62	9.35	8.83	8.55	7.71	67.00	0.42	0.33	15.16	8.38	4
471	10.79	7.39	10.01	10.49	7.67	72.20	0.45	0.39	27.16	19.31	5
472	3.92	3.60	4.15	3.91	3.15	53.76	0.47	0.38	23.72	29.29	3
473	9.53	9.28	9.34	8.85	7.53	74.85	0.49	0.40	21.82	7.05	3
474	10.9	10.31	10.44	9.34	7.62	72.59	0.44	0.37	26.09	14.18	5
476	12.67	11.97	11.54	10.73	8.11	85.54	0.49	0.40	21.95	13.25	4
481	10.88	10.65	10.97	10.05	6.89	85.54	0.52	0.42	31.47	17.55	6
482	10.93	10.44	10.54	10.33	6.74	74.75	0.44	0.37	28.41	14.21	5
483	5.88	5.08	6.49	6.49	4.70	60.53	0.43	0.39	19.66	10.27	3
484	8.96	8.46	8.37	7.75	7.07	61.12	0.45	0.37	12.11	7.36	3
487	9.4	9.03	9.14	8.69	6.47	70.73	0.44	0.34	19.25	9.12	7
492	9.1	8.78	9.42	8.17	6.50	70.04	0.44	0.35	21.57	12.28	4

ID	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	PLT	ELT	NAC
494	10.69	10.14	9.98	9.40	7.40	88.29	0.52	0.44	38.45	16.73	4
506	11.95	11.14	11.66	11.06	7.75	85.64	0.50	0.42	32.08	12.66	5
508	8.73	8.67	8.74	8.43	6.36	65.83	0.45	0.39	22.61	11.73	4
511	9.49	4.9	8.90	8.85	6.57	60.04	0.41	0.34	21.05	7.57	4
512	5.84	5.54	6.13	5.60	4.70	54.25	0.40	0.33	18.79	9.10	4
521	8.91	8.46	8.31	7.18	7.19	66.22	0.43	0.37	19.00	8.19	3
522	8.76	8.18	9.01	7.66	7.17	63.57	0.47	0.37	28.44	12.49	5
523	10.26	9.85	9.99	8.41	6.66	73.48	0.47	0.38	31.26	10.86	3
524	6.69	6.35	7.02	6.74	4.74	67.49	0.50	0.42	40.70	16.58	3
525	5.4	4.83	5.12	5.02	4.34	46.40	0.36	0.36	12.26	6.54	3
529	3.74	7.57	8.70	7.03	7.15	41.20	0.38	0.30	10.72	7.97	3
534	9.55	9.24	9.14	8.62	7.58	59.74	0.40	0.34	12.07	11.11	3
535	10.73	9.76	10.50	9.22	7.46	78.28	0.50	0.41	27.68	13.24	4
536	15.61	14.77	13.90	12.10	8.17	99.77	0.57	0.48	34.05	16.34	5
537	8.02	7.31	7.82	7.62	6.09	50.23	0.37	0.33	18.95	10.89	3
538	10.82	10.09	9.74	9.36	6.79	69.65	0.42	0.35	15.79	7.05	3
539	9.42	8.69	9.63	9.04	6.35	71.22	0.46	0.46	26.71	13.94	7
546	5.75	5.09	6.05	5.68	4.88	43.95	0.42	0.37	15.42	14.95	4
548	12.31	11.54	11.76	10.61	7.94	70.53	0.45	0.37	26.77	16.30	7
574	4.99	5.00	5.04	4.32	4.11	55.43	0.39	0.33	27.35	11.60	3
577	13.21	12.65	12.21	12.81	7.36	75.93	0.51	0.43	29.58	17.30	5
745	4.08	3.73	4.75	3.85	3.10	41.59	0.40	0.32	26.69	13.86	5
820	13.28	13.22	12.34	11.80	7.70	98.20	0.56	0.45	29.03	17.63	6
821	8.01	7.75	7.64	7.22	6.38	53.56	0.36	0.32	11.67	7.84	3
822	5.72	5.48	5.82	5.38	4.67	45.03	0.34	0.30	12.40	4.86	3
827	9.95	8.66	10.03	8.60	7.43	80.74	0.47	0.34	20.99	13.42	7
831	9.07	8.50	8.85	8.57	6.67	63.18	0.42	0.37	18.36	11.89	5
832	10.73	10.05	10.86	9.28	7.62	64.16	0.45	0.38	25.96	12.75	5
834	8.42	7.72	9.07	8.04	7.01	51.89	0.45	0.36	23.11	12.16	4
836	9.67	9.30	8.72	8.29	7.27	63.77	0.41	0.36	19.64	7.52	4
842	7.11	6.33	7.64	6.86	6.56	60.43	0.43	0.35	20.02	10.18	4
845	10.96	10.20	9.85	10.30	6.79	71.02	0.47	0.40	24.96	10.01	6
847	4.95	4.53	4.94	4.36	3.92	34.14	0.36	0.54	34.09	19.28	7
850	7.78	7.70	7.38	7.38	6.82	56.51	0.39	0.31	16.04	5.03	2
851	10.86	10.42	9.82	8.01	7.77	69.06	0.45	0.37	25.41	11.38	4
857	9.17	8.21	9.52	7.78	7.56	68.18	0.47	0.39	27.06	11.56	3
858	4.01	3.76	4.42	4.00	3.20	47.87	0.43	0.35	21.52	8.88	2
877	9.45	8.58	9.23	10.33	7.52	53.07	0.43	0.35	18.36	5.95	3
878	13.68	13.10	12.30	11.09	8.39	87.70	0.48	0.39	22.45	15.82	5
881	6.38	6.03	7.45	6.61	4.99	48.66	0.38	0.33	20.42	12.09	4
883	11.54	11.02	10.53	11.13	6.94	72.01	0.44	0.37	19.93	11.19	5
884	12.69	11.86	11.45	10.21	7.97	83.29	0.46	0.37	23.85	12.41	7
886	6.44	6.07	7.15	5.98	6.45	65.73	0.51	0.44	20.91	14.72	5
898	6.48	6.40	6.73	5.90	6.84	59.25	0.41	0.34	22.23	10.95	4
901	9.76	9.23	9.04	8.75	7.21	68.67	0.41	0.32	15.91	6.59	4
903	7.1	6.79	7.42	6.39	6.03	67.98	0.44	0.38	25.59	14.86	6
907	11.93	11.64	10.81	10.01	7.82	91.13	0.50	0.44	29.43	17.88	6



ID	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	PLT	ELT	NAC
914	9.79	8.93	9.45	9.21	7.60	63.47	0.41	0.36	13.40	11.92	5
915	10.02	9.35	9.36	8.75	7.48	71.61	0.47	0.40	31.36	15.29	6
917	9.88	8.41	9.68	9.43	6.55	65.73	0.44	0.36	25.59	13.06	6
918	8.7	8.33	8.09	7.50	7.22	68.28	0.45	0.37	22.31	14.91	5
930	7.41	6.98	8.02	7.11	6.87	65.92	0.48	0.41	35.00	17.03	7
931	8.55	7.95	8.48	7.82	7.18	62.10	0.41	0.32	18.76	13.39	5
933	6.17	5.99	6.13	5.26	5.06	53.27	0.37	0.30	12.35	5.84	3
943	9.86	9.40	9.39	8.98	7.16	71.32	0.45	0.34	12.64	8.26	4
945	6.28	5.88	6.44	6.48	5.09	47.77	0.34	0.28	10.20	5.92	3
946	9.34	9.08	8.75	7.76	7.43	73.77	0.44	0.36	24.29	15.09	5
954	8.48	8.36	8.90	8.90	6.25	70.34	0.50	0.47	36.53	19.75	5
955	9.26	8.48	8.58	7.91	7.18	64.75	0.40	0.33	18.76	7.61	3
957	7.37	7.01	7.48	7.04	6.69	55.92	0.38	0.31	16.74	9.70	3
959	8.69	8.28	8.76	7.48	7.40	66.81	0.43	0.31	19.95	9.80	3
968	7.06	7.07	7.17	6.75	6.18	51.70	0.37	0.32	16.87	8.12	4
970	10.1	9.97	9.56	8.67	7.81	73.08	0.48	0.38	31.13	13.75	5
972	8.01	7.68	7.96	7.40	7.11	64.06	0.40	0.35	11.05	7.52	3
973	6.04	6.09	7.56	7.14	5.32	44.83	0.37	0.30	15.95	6.84	4
975	5.59	5.41	6.06	5.33	4.49	57.00	0.41	0.35	27.26	15.50	5
981	10.76	10.76	9.70	8.46	7.44	76.42	0.49	0.41	31.86	17.12	5
984	7.66	10.47	7.50	7.11	7.21	54.35	0.40	0.33	11.53	9.71	4
985	6.15	5.64	6.06	5.14	4.99	37.18	0.35	0.29	16.62	7.41	3
990	9.06	8.32	8.22	7.92	7.26	54.54	0.39	0.35	24.79	12.69	5
992	5.68	4.97	6.76	5.44	3.83	51.70	0.42	0.37	18.09	8.00	3
997	9.65	8.86	9.38	7.84	7.33	67.39	0.46	0.43	34.40	18.03	6
1002	7.91	7.50	7.72	7.62	5.00	53.37	0.37	0.31	13.35	6.55	2
1004	9.96	9.46	9.34	8.50	7.36	71.51	0.43	0.34	21.43	11.73	5
1005	5.19	5.14	5.61	5.05	4.43	53.37	0.41	0.40	27.75	12.78	5
1007	8.79	8.42	8.71	8.87	7.06	69.55	0.44	0.36	14.05	11.92	5
1009	4.6	4.22	5.18	4.43	3.85	47.28	0.38	0.31	18.00	7.02	3
1017	12.23	11.67	11.50	10.97	7.69	79.76	0.49	0.41	25.10	12.17	5
1026	6.57	6.29	6.80	6.45	5.96	65.24	0.46	0.38	27.54	14.77	4
1027	5.42	5.21	5.93	5.04	4.19	41.10	0.44	0.35	19.77	6.86	2
1029	6.89	6.78	6.67	6.23	5.18	55.62	0.38	0.33	19.11	6.95	3
1033	7.09	6.28	7.41	6.70	6.63	58.76	0.39	0.32	16.39	9.58	4
1041	9.09	8.70	9.08	7.79	7.21	64.06	0.40	0.36	18.35	8.59	4
1083	8.25	7.76	8.55	8.04	6.57	61.90	0.42	0.34	17.78	8.04	5
1085	9.22	9.25	8.61	7.79	7.23	58.76	0.36	0.29	15.86	7.54	4
1086	11.1	11.12	10.14	8.78	7.55	66.81	0.42	0.31	17.08	10.60	5
1087	7.25	7.05	6.81	6.23	6.68	48.27	0.36	0.33	8.01	4.06	4
1121	7.66	7.32	7.85	7.30	5.33	123.12	0.55	0.57	35.01	23.95	5
1126	6.96	6.49	7.14	6.73	4.82	51.60	0.37	0.32	14.41	6.18	3
1137	9.29	8.95	8.61	7.97	7.22	37.87	0.38	0.33	15.79	10.22	4
1139	12.4	11.36	11.38	10.11	7.92	70.04	0.42	0.38	21.95	15.48	7
1142	8.32	7.80	8.19	8.23	6.95	82.40	0.54	0.49	29.52	14.03	4
1158	8.24	7.72	7.64	6.75	6.97	47.48	0.32	0.28	12.39	5.81	3
1159	8.44	8.04	8.96	7.26	5.46	66.32	0.43	0.37	23.94	9.61	3

ID	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	PLT	ELT	NAC
1160	10.06	9.02	9.18	8.95	7.21	61.31	0.45	0.36	16.57	7.92	3
1161	11.22	10.39	10.29	9.31	7.48	83.88	0.48	0.39	24.84	13.81	5
1174	11.73	11.32	10.79	10.27	7.13	64.55	0.41	0.32	19.31	11.99	5
1176	6.52	6.36	6.83	5.97	6.72	52.97	0.39	0.29	21.37	8.53	4
1178	12.71	12.30	11.35	10.99	7.82	88.29	0.51	0.46	23.86	15.19	7
1182	7.25	7.02	6.80	6.26	6.67	52.88	0.36	0.31	11.63	5.12	3
1183	9.29	8.98	8.92	8.81	7.24	64.45	0.42	0.31	15.00	6.90	4
1193	16.28	15.82	15.22	14.28	8.77	114.29	0.57	0.48	27.98	15.21	8
1194	6.97	6.81	7.13	6.31	5.43	68.38	0.46	0.37	25.36	9.82	3
1196	10.19	9.75	9.61	8.51	7.25	67.20	0.43	0.34	22.29	9.88	5
1197	7.24	6.88	6.93	6.24	5.47	50.52	0.33	0.29	8.27	6.00	3
1198	9.85	9.40	9.43	9.14	7.24	75.14	0.45	0.35	22.25	10.14	5
1199	9.75	8.42	9.15	8.65	7.17	62.29	0.44	0.37	23.76	11.76	4
1206	8.04	7.79	7.60	8.77	6.97	53.27	0.41	0.32	23.76	6.28	2
1214	3.93	3.91	4.24	3.42	3.18	49.83	0.39	0.32	20.63	8.48	3
1217	13.16	12.88	11.56	11.25	7.79	77.20	0.47	0.37	16.70	11.03	5
1219	9.88	9.05	9.43	8.62	7.42	71.61	0.49	0.41	24.70	14.30	5
1220	22.4	21.16	19.18	17.72	9.52	132.63	0.69	0.61	48.08	21.23	14
1224	15.18	14.66	12.71	10.52	8.16	96.63	0.52	0.48	30.17	14.17	8
1236	6.8	6.45	6.53	6.69	5.48	51.21	0.35	0.29	11.66	5.34	4
1242	7.17	6.35	6.70	6.58	5.24	50.13	0.37	0.31	18.24	7.12	4
1244	15.86	14.68	14.01	13.71	8.24	95.94	0.53	0.45	33.58	16.29	14
1249	8.04	7.77	7.77	7.41	6.97	63.77	0.42	0.36	22.66	9.71	4
1256	12.09	11.38	10.83	10.49	7.91	82.99	0.50	0.40	27.43	12.20	4
1257	10.4	9.49	10.05	9.19	7.06	64.45	0.45	0.37	15.81	9.31	4
1262	10.15	9.48	9.55	8.86	7.11	62.98	0.45	0.42	33.02	12.78	5
1266	11.78	11.16	10.38	9.40	7.42	77.99	0.43	0.38	24.45	11.92	4
1276	7.32	6.71	6.21	6.04	5.61	47.09	0.41	0.32	48.15	21.60	12
1281	8.46	8.13	8.11	8.00	6.95	56.02	0.35	0.28	16.93	6.56	3
1282	6.74	6.33	6.66	6.39	6.82	45.03	0.35	0.29	12.33	4.81	3
1283	19.07	17.70	16.28	15.94	8.72	115.66	0.60	0.46	29.55	17.17	12
1285	10.2	9.12	9.90	9.03	7.27	52.29	0.42	0.37	28.40	10.11	4
1286	4.87	4.85	5.35	4.66	3.75	45.91	0.43	0.35	21.26	8.66	3
1287	13.34	11.73	12.19	11.31	7.67	82.60	0.50	0.42	21.20	9.88	5
1295	10.74	10.26	10.86	10.16	7.42	75.83	0.46	0.40	25.86	13.03	6
1296	9.65	9.37	9.56	8.52	7.27	82.89	0.52	0.41	19.62	7.95	4
1301	10.77	9.52	10.33	9.14	7.72	82.99	0.45	0.36	25.15	9.37	4
1302	7.87	7.20	8.53	7.96	5.48	54.35	0.48	0.38	27.31	11.34	6
1306	12.95	12.03	12.97	11.70	7.87	103.69	0.57	0.49	30.78	14.19	7
1311	3.3	3.15	3.66	3.41	2.67	44.44	0.43	0.38	25.34	6.62	2
1312	9.34	8.74	10.25	9.23	7.30	84.07	0.56	0.50	22.38	15.08	6
1313	8.08	7.71	7.63	6.90	6.62	47.87	0.35	0.29	16.86	7.18	4
1315	9.11	8.38	8.83	7.96	7.16	41.69	0.38	0.32	15.51	5.19	3
1317	10.14	9.39	9.13	7.95	7.51	57.68	0.38	0.32	23.01	9.18	5
1321	8.03	7.48	8.27	7.65	7.04	64.35	0.42	0.35	23.27	9.33	3
1324	8.23	8.10	7.96	7.12	7.14	64.16	0.42	0.29	26.83	9.65	4
1326	8.1	7.78	9.00	8.78	7.01	70.83	0.47	0.41	25.24	8.88	5

ID	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	PLT	ELT	NAC
1329	7.29	6.79	7.63	7.09	6.91	62.69	0.45	0.41	25.41	10.14	4
1332	10.91	10.43	9.44	8.22	7.76	72.89	0.43	0.33	20.63	6.48	5
1335	11.35	10.42	11.08	10.04	7.81	77.01	0.54	0.53	32.27	12.92	5
1337	10.48	9.03	10.56	9.76	7.61	70.34	0.45	0.35	28.53	12.51	5
1339	8.43	6.74	7.88	7.37	6.76	44.34	0.40	0.35	15.76	7.61	3
1340	10.92	10.40	10.65	10.45	6.73	82.31	0.48	0.38	20.64	10.96	5
1345	3.48	3.26	3.82	3.42	2.94	41.69	0.36	0.30	18.34	4.78	2
1350	3.44	3.25	3.76	3.46	2.72	47.09	0.44	0.35	21.57	12.69	2
1353	9.77	8.98	9.61	8.49	7.26	64.94	0.41	0.34	27.52	12.04	5
1355	7.63	7.2	7.29	6.99	6.96	56.21	0.39	0.38	18.10	7.72	4
1358	9.42	9.03	9.06	9.01	7.42	84.66	0.55	0.47	28.42	13.52	7
1360	6.49	6.35	6.29	6.08	6.69	55.23	0.36	0.29	16.22	4.22	3
1363	15.25	14.78	13.88	12.53	8.35	120.37	0.63	0.51	44.32	21.79	6
1393	11.07	10.32	9.62	8.20	7.41	80.83	0.45	0.38	20.39	8.81	4
1413	10.42	10.06	9.96	9.23	7.25	77.20	0.45	0.38	24.61	10.21	5
1420	8.49	7.75	7.62	7.39	6.97	49.25	0.38	0.33	13.95	7.25	3
1463	5.65	5.29	5.79	5.41	4.78	61.80	0.45	0.35	30.80	14.57	6
1559	10.81	10.67	10.46	9.42	7.70	71.51	0.45	0.40	29.44	13.44	7
1584	5.07	4.88	5.59	5.00	4.04	55.03	0.43	0.35	23.80	9.90	3
1606	13.22	12.03	12.23	11.21	7.86	93.00	0.50	0.43	29.46	12.10	5
1793	8.06	7.66	8.98	8.01	6.32	67.00	0.44	0.37	22.67	10.55	5
1806	6.6	6.24	6.97	6.61	5.89	66.02	0.45	0.36	32.58	17.20	5
1816	9.03	8.32	8.60	7.96	6.65	62.59	0.39	0.33	14.06	8.33	3
1825	8.28	7.80	8.62	7.99	6.24	74.95	0.54	0.48	41.71	19.30	4
1826	3.93	3.77	4.36	4.08	3.15	47.48	0.38	0.32	19.56	6.83	2
1827	9.27	8.20	8.69	8.26	6.36	60.72	0.40	0.35	23.30	10.96	4
1837	10.47	9.99	10.12	9.85	6.17	73.97	0.44	0.35	20.34	10.03	5
1852	14.55	13.44	12.72	12.19	7.45	92.61	0.49	0.45	30.79	13.11	9
1855	7.79	7.47	7.69	7.16	6.48	60.43	0.39	0.33	15.99	7.44	3
1856	8.56	7.82	8.20	7.75	7.24	50.42	0.39	0.32	12.28	5.66	3
1858	8.45	8.89	9.74	10.31	4.82	49.15	0.49	0.40	14.17	9.13	3
1862	9.41	8.77	8.96	8.23	6.43	58.47	0.39	0.35	17.57	8.32	4
1874	12.78	12.14	11.43	11.43	7.12	92.90	0.50	0.40	31.68	16.31	7
1877	5.62	5.33	5.96	5.66	4.34	64.75	0.51	0.43	32.21	12.44	3
1880	16.38	15.15	14.92	14.19	7.60	101.73	0.54	0.43	34.80	16.31	9
1883	10.52	10.15	9.68	9.74	6.71	81.82	0.49	0.47	33.71	18.57	7
1885	13.66	13.27	12.25	12.59	7.25	95.26	0.51	0.40	19.59	8.85	5
1892	14.72	13.61	13.20	13.12	7.29	93.10	0.56	0.47	33.65	15.91	8
1899	12.73	12.38	11.72	11.33	7.05	89.66	0.48	0.37	29.92	13.22	8
1905	12.84	11.39	11.25	10.97	7.03	95.35	0.51	0.42	27.76	11.78	7
1914	10.89	10.41	10.12	10.05	6.98	70.14	0.43	0.37	26.79	10.61	7
1922	8.83	8.32	7.94	8.14	6.40	64.06	0.41	0.33	9.09	8.05	5
1925	9.24	8.82	9.22	9.33	6.69	81.13	0.51	0.44	30.68	13.33	5
1926	7.77	6.33	8.24	7.99	6.37	47.68	0.43	0.36	18.54	11.51	5
1928	10.05	9.48	9.28	9.05	6.58	71.51	0.44	0.35	21.66	9.52	4
1929	7.78	7.42	8.14	7.25	7.41	70.34	0.45	0.41	28.25	12.43	8
1942	15.1	13.38	14.32	14.02	7.11	97.90	0.56	0.46	28.40	14.16	5

ID	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	PLT	ELT	NAC
1944	8.83	8.65	8.48	7.34	7.14	57.98	0.42	0.36	22.28	11.62	4
1949	6.04	5.59	6.56	5.62	4.35	37.47	0.39	0.31	23.36	9.10	5
1951	9.89	9.81	10.00	9.86	6.64	60.14	0.42	0.35	16.65	8.08	3
1952	13.06	12.70	12.12	12.20	7.29	77.60	0.47	0.36	28.76	9.62	6
1954	13.25	12.59	12.00	12.08	7.32	96.04	0.55	0.44	29.06	13.62	5
2055	3.13	2.65	3.47	3.20	2.44	42.77	0.39	0.32	17.10	6.98	2
2076	7.18	6.20	7.73	6.83	7.14	47.09	0.44	0.38	16.67	7.92	3
2238	6.02	5.59	6.30	5.90	4.75	54.25	0.40	0.34	20.39	8.73	3
2275	7.81	7.40	7.87	6.89	5.72	66.22	0.46	0.38	18.65	10.42	3
2285	13.75	13.18	12.73	11.35	8.10	92.12	0.51	0.42	30.16	14.66	10
2286	8.96	8.62	8.55	7.10	7.38	69.55	0.44	0.35	26.44	12.93	6
2287	11.42	10.86	10.90	9.62	7.78	81.23	0.51	0.44	28.70	13.26	5
2292	11.14	10.31	10.32	10.82	7.76	74.95	0.45	0.35	19.91	12.45	5
2293	4.11	4.06	4.51	3.92	3.53	49.25	0.42	0.36	22.84	10.57	3
2295	20.71	19.24	18.14	15.21	9.41	115.76	0.65	0.52	37.75	13.54	10
2297	9.79	9.29	9.29	8.48	7.46	67.79	0.40	0.32	17.11	7.46	4
2302	5.27	5.15	5.45	4.16	4.68	55.52	0.41	0.34	19.09	7.47	2
2305	15.82	14.79	13.96	14.06	7.95	103.30	0.57	0.44	42.83	20.03	10
2306	7.62	7.12	7.56	6.50	5.68	53.66	0.40	0.38	22.51	11.25	5
2310	11.88	10.29	10.88	9.89	7.76	79.95	0.49	0.40	30.34	12.97	4
2314	7.97	7.20	7.26	7.04	7.02	51.89	0.37	0.32	15.28	7.04	4
2317	4.45	4.34	4.98	4.00	3.39	58.66	0.56	0.48	28.39	9.38	2
2319	12.89	11.92	11.49	11.02	8.18	78.19	0.46	0.39	25.68	11.92	5
2320	16.87	15.76	15.27	15.92	8.82	120.96	0.63	0.49	45.04	18.18	11
2331	12.31	11.28	11.65	10.62	7.58	73.58	0.49	0.39	30.07	17.08	5
2334	4.57	4.31	5.13	4.34	3.87	52.29	0.42	0.35	26.79	13.28	2
2335	9.8	9.67	9.48	9.37	7.49	81.91	0.54	0.45	34.65	15.41	6
2337	6.64	6.34	6.77	6.02	5.30	62.20	0.52	0.40	25.46	9.54	6
2342	7.26	6.61	6.72	6.43	5.62	57.68	0.41	0.34	20.55	7.85	4
2347	3.79	3.59	4.33	3.49	2.86	54.35	0.55	0.46	27.55	15.35	3
2353	8.83	8.56	8.6	7.50	7.19	70.14	0.44	0.37	26.15	12.66	4
2354	8.14	7.74	7.91	6.44	7.12	65.83	0.45	0.38	23.15	10.83	3
2356	8.16	7.13	8.82	9.78	7.22	68.67	0.48	0.44	28.46	13.73	5
2357	8.09	7.94	7.72	7.17	7.22	67.59	0.44	0.35	29.54	13.52	4
2359	6.58	6.20	6.29	5.58	5.55	51.01	0.36	0.33	15.75	5.85	2
2361	8.47	8.17	8.01	8.06	7.05	62.69	0.42	0.34	19.78	9.32	3
2363	9.39	9.16	9.19	9.08	7.43	80.25	0.49	0.41	33.59	18.25	4
2371	10.66	10.24	9.17	8.23	7.56	75.14	0.46	0.39	26.05	9.32	3
2373	7.97	7.51	8.09	7.22	7.00	75.24	0.51	0.43	25.88	15.32	4
2374	9.88	9.42	9.89	8.65	7.54	71.61	0.44	0.39	21.59	8.25	3
2377	7.02	6.96	7.44	7.06	7.11	49.93	0.42	0.37	21.88	10.44	3
2379	10.3	9.67	9.56	8.51	7.30	68.18	0.42	0.34	18.31	8.86	4
2385	13.41	12.46	12.15	12.15	8.15	87.01	0.51	0.40	32.83	14.20	7
2386	11.17	10.93	10.09	9.59	7.85	75.93	0.47	0.40	21.39	11.68	4
2512	6.68	6.84	6.76	6.18	4.95	62.98	0.41	0.34	18.35	6.82	3
2551	5.27	5.01	5.60	4.73	4.49	58.96	0.43	0.38	19.33	7.12	2
2599	6.99	6.51	6.88	6.45	7.01	65.73	0.44	0.36	14.61	6.81	2

ID	MOE <sub>al</sub>	MOE <sub>vt</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	E <sub>M</sub>	MOR	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	PLT	ELT	NAC
2600	9.02	8.59	8.54	7.87	7.40	68.47	0.40	0.34	14.21	7.80	4
1121 (3)	21.5	19.02	19.52	18.94	8.83	70.73	0.67	0.46	46.63	20.95	10
1121(2)	8.96	8.30	8.71	8.54	6.92	47.77	0.40	0.34	11.99	5.96	2
1137 (1)	5.69	5.30	5.95	5.33	4.44	53.17	0.37	0.33	22.22	11.00	3
1139(2)	7.93	7.66	7.64	6.84	7.04	57.29	0.41	0.34	17.01	8.70	3
1257(2)	9.62	8.92	8.98	9.10	6.57	54.15	0.41	0.34	27.00	10.64	4
2359 (1)	8.12	7.99	7.94	6.22	5.17	63.47	0.40	0.30	22.37	10.66	4
2383(2)	7.95	7.5	8.02	7.62	7.16	74.26	0.56	0.47	29.30	9.72	3
481(1)	10.38	9.99	10.54	10.34	6.85	85.64	0.46	0.37	19.90	14.11	4
490 (2)	12.1	11.41	11.63	11.04	3.20	51.70	0.52	0.41	35.65	15.42	4
493 (1)	7.18	6.82	7.20	7.08	6.04	66.12	0.46	0.39	25.48	11.91	3
842(1)	5.82	6.17	6.75	6.50	4.84	60.82	0.44	0.37	18.37	7.48	4
847(1)	13.93	13.96	13.01	11.26	8.53	114.09	0.65	0.31	18.24	8.67	4
884(1)	12.7	11.47	12.03	11.33	7.73	73.38	0.52	0.43	28.09	12.89	4
969(1)	8.52	8.14	8.12	8.02	7.02	66.51	0.42	0.34	24.84	12.88	4
985(2)	10.07	9.75	9.54	8.95	7.33	68.47	0.43	0.35	21.99	8.99	3
I	4.09	3.96	4.39	4.09	3.26	39.04	0.38	0.26	19.20	9.08	4
II	9.24	8.62	9.18	8.40	7.54	54.54	0.43	0.33	22.24	7.51	4
III	9.63	9.22	8.47	7.84	7.42	69.55	0.45	0.37	18.37	7.37	3
V	7.54	7.52	7.10	7.18	6.77	58.66	0.37	0.31	17.83	7.60	4
VI	5.01	4.74	5.15	4.71	3.93	60.53	0.44	0.35	25.05	8.17	3

**APÊNDICE E – Resultados do Teste do  $\chi^2$  para a independência das variáveis.**

Variável 1	Variável 2	$\chi^2$	p-valor
NAC	MOE <sub>al</sub>	4367	2.641*10 <sup>-2</sup>
NAC	MOE <sub>vt</sub>	4493.4	4.55*10 <sup>-6</sup>
NAC	MOE <sub>ds(M)</sub>	5112	4.501*10 <sup>-1</sup>
NAC	MOE <sub>ds(F)</sub>	5112	4.501*10 <sup>-1</sup>
NAC	E <sub>M</sub>	5108.3	4.177*10 <sup>-1</sup>
NAC	MOR	3883.8	6.467*10 <sup>-5</sup>
NAC	$\rho_{ap}$	5112	4.501*10 <sup>-1</sup>
NAC	$\rho_{bas}$	5112	4.501*10 <sup>-1</sup>
NAC	PLT	5095.4	3.31*10 <sup>-1</sup>
NAC	ELT	5028.2	3.127*10 <sup>-1</sup>
ELT	PLT	175512	8.893*10 <sup>-2</sup>
ELT	MOR	122883	4.647*10 <sup>-1</sup>
ELT	E <sub>M</sub>	176364	2.477*10 <sup>-1</sup>
ELT	$\rho_{bas}$	176790	2.422*10 <sup>-1</sup>
ELT	$\rho_{ap}$	176790	2.422*10 <sup>-1</sup>
ELT	MOE <sub>ds(F)</sub>	176790	2.422*10 <sup>-1</sup>
ELT	MOE <sub>ds(M)</sub>	176790	2.422*10 <sup>-1</sup>
ELT	MOE <sub>vt</sub>	141325	3.352*10 <sup>-1</sup>
ELT	MOE <sub>al</sub>	144946	4.175*10 <sup>-1</sup>
PLT	MOE <sub>al</sub>	147076	3.923*10 <sup>-1</sup>
PLT	MOE <sub>vt</sub>	143562	2.15*10 <sup>-1</sup>
PLT	MOR	124996	2.234*10 <sup>-1</sup>
PLT	E <sub>M</sub>	178920	2.43*10 <sup>-1</sup>
PLT	$\rho_{bas}$	179346	2.406*10 <sup>-1</sup>
PLT	$\rho_{ap}$	179346	2.406*10 <sup>-1</sup>
PLT	MOE <sub>ds(F)</sub>	179346	2.406*10 <sup>-1</sup>
PLT	MOE <sub>ds(M)</sub>	179346	2.406*10 <sup>-1</sup>
MOR	E <sub>M</sub>	125777	2.929*10 <sup>-1</sup>
MOR	$\rho_{bas}$	126096	2.773*10 <sup>-1</sup>
MOR	$\rho_{ap}$	126096	2.773*10 <sup>-1</sup>
MOR	MOE <sub>ds(F)</sub>	126096	2.773*10 <sup>-1</sup>
MOR	MOE <sub>ds(M)</sub>	126096	2.773*10 <sup>-1</sup>
MOR	MOE <sub>vt</sub>	103033	6.007*10 <sup>-8</sup>
MOR	MOE <sub>al</sub>	104867	3.098*10 <sup>-4</sup>
E <sub>M</sub>	$\rho_{bas}$	180624	2.398*10 <sup>-1</sup>
E <sub>M</sub>	$\rho_{ap}$	180624	2.398*10 <sup>-1</sup>
E <sub>M</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	180624	2.398*10 <sup>-1</sup>
E <sub>M</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	180624	2.398*10 <sup>-1</sup>
E <sub>M</sub>	MOE <sub>vt</sub>	144520	2.508*10 <sup>-1</sup>
E <sub>M</sub>	MOE <sub>al</sub>	148354	2.431*10 <sup>-1</sup>
$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$	181050	2.396*10 <sup>-1</sup>
$\rho_{ap}$	MOE <sub>ds(F)</sub>	181050	2.396*10 <sup>-1</sup>
$\rho_{ap}$	MOE <sub>ds(M)</sub>	181050	2.396*10 <sup>-1</sup>
$\rho_{ap}$	MOE <sub>vt</sub>	144840	2.633*10 <sup>-1</sup>
$\rho_{ap}$	MOE <sub>al</sub>	148674	2.606*10 <sup>-1</sup>

Variável 1	Variável 2	$\chi^2$	p-valor
$\rho_{\text{bas}}$	$\text{MOE}_{\text{ds(F)}}$	181050	$2.396 \cdot 10^{-1}$
$\rho_{\text{bas}}$	$\text{MOE}_{\text{ds(M)}}$	181050	$2.396 \cdot 10^{-1}$
$\rho_{\text{bas}}$	$\text{MOE}_{\text{vt}}$	144840	$2.633 \cdot 10^{-1}$
$\rho_{\text{bas}}$	$\text{MOE}_{\text{al}}$	148674	$2.606 \cdot 10^{-1}$
$\text{MOE}_{\text{ds(F)}}$	$\text{MOE}_{\text{ds(M)}}$	181050	$2.396 \cdot 10^{-1}$
$\text{MOE}_{\text{ds(F)}}$	$\text{MOE}_{\text{vt}}$	144840	$2.633 \cdot 10^{-1}$
$\text{MOE}_{\text{ds(F)}}$	$\text{MOE}_{\text{al}}$	148674	$2.606 \cdot 10^{-1}$
$\text{MOE}_{\text{ds(M)}}$	$\text{MOE}_{\text{vt}}$	144840	$2.633 \cdot 10^{-1}$
$\text{MOE}_{\text{ds(M)}}$	$\text{MOE}_{\text{al}}$	148674	$2.606 \cdot 10^{-1}$
$\text{MOE}_{\text{vt}}$	$\text{MOE}_{\text{al}}$	120670	$2.02 \cdot 10^{-5}$

**APÊNDICE F – Resultados do Teste de Kruskal-Wallis para comparação de medianas.**

Variável 1	Variável 2	H	p-valor
NAC	MOE <sub>ds(M)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
NAC	MOE <sub>ds(F)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
NAC	E <sub>M</sub>	424.54	4.835*10 <sup>-1</sup>
NAC	ρ <sub>ap</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
NAC	ρ <sub>bas</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
NAC	PLT	421.7	4.812*10 <sup>-1</sup>
NAC	ELT	422.67	3.868*10 <sup>-1</sup>
ELT	PLT	421.56	4.831*10 <sup>-1</sup>
ELT	MOR	337.7	4.78*10 <sup>-2</sup>
ELT	E <sub>M</sub>	424.09	4.896*10 <sup>-1</sup>
ELT	ρ <sub>bas</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
ELT	ρ <sub>ap</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
ELT	MOE <sub>ds(F)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
ELT	MOE <sub>ds(M)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
ELT	MOE <sub>vt</sub>	354.37	2.847*10 <sup>-1</sup>
ELT	MOE <sub>al</sub>	343.07	5.795*10 <sup>-1</sup>
PLT	MOE <sub>al</sub>	344.77	5.54*10 <sup>-1</sup>
PLT	MOE <sub>vt</sub>	349.63	3.477*10 <sup>-1</sup>
PLT	MOR	322.61	1.379*10 <sup>-1</sup>
PLT	E <sub>M</sub>	424.4	4.854*10 <sup>-1</sup>
PLT	ρ <sub>bas</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
PLT	ρ <sub>ap</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
PLT	MOE <sub>ds(F)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
PLT	MOE <sub>ds(M)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
MOR	E <sub>M</sub>	425	4.772*10 <sup>-1</sup>
MOR	ρ <sub>bas</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
MOR	ρ <sub>ap</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
MOR	MOE <sub>ds(F)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
MOR	MOE <sub>ds(M)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
E <sub>M</sub>	ρ <sub>bas</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
E <sub>M</sub>	ρ <sub>ap</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
E <sub>M</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
E <sub>M</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
E <sub>M</sub>	MOE <sub>vt</sub>	399.33	1.462*10 <sup>-2</sup>
E <sub>M</sub>	MOE <sub>al</sub>	398.3	3.516*10 <sup>-2</sup>
ρ <sub>ap</sub>	ρ <sub>bas</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
ρ <sub>ap</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
ρ <sub>ap</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
ρ <sub>ap</sub>	MOE <sub>vt</sub>	364.62	1.717*10 <sup>-1</sup>
ρ <sub>ap</sub>	MOE <sub>al</sub>	366.44	2.5*10 <sup>-1</sup>
ρ <sub>bas</sub>	MOE <sub>ds(F)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
ρ <sub>bas</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
ρ <sub>bas</sub>	MOE <sub>vt</sub>	357.28	2.492*10 <sup>-1</sup>



Variável 1	Variável 2	H	p-valor
$\rho_{bas}$	MOE <sub>al</sub>	350.36	4.694*10 <sup>-1</sup>
MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>ds(M)</sub>	425	4.909*10 <sup>-1</sup>
MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>vt</sub>	418.77	2.258*10 <sup>-3</sup>
MOE <sub>ds(F)</sub>	MOE <sub>al</sub>	421.92	4.488*10 <sup>-3</sup>
MOE <sub>ds(M)</sub>	MOE <sub>vt</sub>	416.72	2.793*10 <sup>-3</sup>
MOE <sub>ds(M)</sub>	MOE <sub>al</sub>	417.99	6.543*10 <sup>-3</sup>