



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

RAYNORD MAYARD

**RELAÇÕES ENTRE ANÉIS DE CRESCIMENTO E PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Pinus* spp.**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2020

RAYNORD MAYARD

**RELAÇÕES ENTRE ANÉIS DE CRESCIMENTO E PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Pinus* spp.**

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
Coorientador: Lorenzo Lube dos Santos

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2020

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

M466r Mayard, Raynord, 1984-
Relações entre anéis de crescimento e propriedades físico
mecânicas da madeira de Pinus spp. / Raynord Mayard. - 2020.
49 f. : il.

Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho.
Coorientador: Lorenzo Lube dos Santos.
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias.

1. Anéis de crescimento. 2. Densidade aparente. 3. Módulo
de elasticidade. 4. madeira de Pinus spp. I. Segundinho, Pedro
Gutemberg de Alcântara. II. Santos, Lorenzo Lube dos. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630

RELAÇÕES ENTRE ANÉIS DE CRESCIMENTO E PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Pinus* spp.

Raynord Mayard

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.

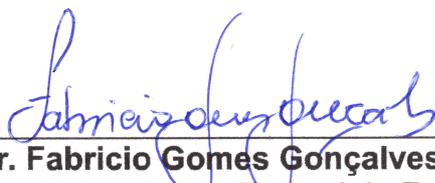
Aprovada em 17 de julho de 2020.



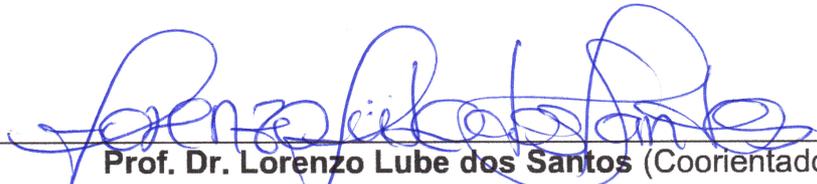
Dr. João Gabriel Missia da Silva (Examinador externo)
Pesquisador



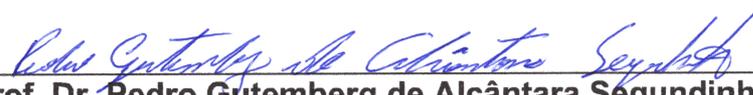
Prof^a. Dr^a. Rejane Costa Alves (Examinadora externa)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Lorenzo Lube dos Santos (Coorientador)
FAESA – Centro Universitário



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

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me proporcionar a vida e sabedoria para realizar este trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo financiamento da bolsa de estudo.

À Universidade Federal de Espírito Santo, pela oportunidade de realizar o curso de Mestrado no Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais.

Aos professores, Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho e Lorenzo Lube dos Santos, pela orientação deste trabalho e pela paciência que tiveram para atender às minhas dúvidas a respeito deste trabalho.

Aos meus pais e meus irmãos, pelo carinho, amor e apoio incondicional concedidos durante toda minha carreira até aqui.

À minha esposa Magali Pereira de Souza Mayard, pelo incentivo e pela compreensão, mesmo estando distante para realizar este estudo.

A todos os professores do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da UFES, particularmente, à Professora Rejane Costa Alves e ao Professor Fabricio Gomes Gonçalves, pela paciência que tiveram em atender minhas dúvidas.

Ao Professor João Gabriel, pelas contribuições propostas para adequar a dissertação e pelo seu auxílio na análise estatística.

Aos amigos do Laboratório de Estruturas de Madeira (LEMAD), Ramon Oliveira, que muito ajudou na parte prática e Leonor da Cunha Mastela, que ajudou nas revisões gramaticais do português.

Ao meu amigo de infância, Paul André, que, mesmo distante, sempre esteve próximo com seus conselhos e torcendo para o sucesso deste trabalho. Agradeço imensamente pela amizade.

Ao técnico em marcenaria Elecir Palacio, que me ensinou a lixar os corpos de prova, e à Fernanda Catein, que me auxiliou nesse processo.

Ao Laboratório de Qualidade da Madeira, por disponibilizar o *scanner* que possibilitou o escaneamento dos corpos de prova. À Ana Paula e ao Jean Carlos, que me ensinaram a trabalhar com este *scanner*.

Por fim, agradeço a todas as pessoas, que não foram citadas, mas que contribuíram de forma direta ou indireta para a execução do trabalho.

RESUMO

MAYARD, Raynord. **Relações entre anéis de crescimento e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* spp.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro – ES. Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho; Coorientador: Lorenzo Lube dos Santos.

O emprego estrutural da madeira do gênero *Pinus* é crescente, devido à carência de madeiras nativas, convencionalmente utilizadas para fins estruturais. Por isso, é importante identificar as características desse material estrutural para suas determinadas aplicações a fim de garantir o bom desempenho e resistência durante a sua vida útil nas construções. Nesse sentido, o objetivo geral foi avaliar a relação dos anéis de crescimento com as características físico-mecânicas e visuais da madeira de *Pinus* spp. Foram utilizados corpos de prova da madeira de *Pinus* spp., com dimensões de aproximadamente 89 x 39 x 90 [mm³]. Na metodologia, a densidade aparente foi avaliada conforme norma técnica, e foram contados os anéis de crescimento de cada amostra. Foi analisada a proporção de lenho tardio de cada corpo de prova mediante o software *image J*. Em seguida, foram realizados os ensaios mecânicos e compararam-se os valores da resistência à compressão normal de acordo com os requisitos de três normas estudadas. Os corpos de prova, com maior número de anéis de crescimento por polegada, tiveram maior densidade aparente, e por consequência maiores foram as propriedades mecânicas; módulo de elasticidade médio (E_{c90}) de 451,89 [MPa] e a resistência à compressão normal às fibras média 10,83 [MPa] pelo método da ABNT; 11,92 [MPa] pelo método da ISO e 10,50 [MPa] pelo método da ASTM. Os resultados de F_{c90} das três normas analisadas entre as classes Tangencial denso, Tangencial não denso, Radial tangencial denso, Radial tangencial não denso e Medular foram diferentes. A avaliação dos anéis de crescimento e densidade aparente demonstraram contribuições significativas para as propriedades mecânicas do *Pinus* spp.

Palavras-chave: Lenho tardio; Densidade aparente; Módulo de elasticidade; Compressão normal às fibras.

ABSTRACT

MAYARD, Raynord. **Relationships between growth rings and physical-mechanical properties of Pine spp.** 2020. Dissertation (Master in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro - ES. Advisor: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho; Co-advisor: Lorenzo Lube dos Santos.

The structural use of wood of the Pine genus is increasing, due to the lack of native woods, conventionally used for structural purposes. Therefore, it is important to identify the characteristics of this structural material for its specific applications in order to guarantee good performance and resistance during its useful life in buildings. In this sense, the aim was to evaluate the relationship between the growth rings and the physical-mechanical and visual characteristics of Pine spp. Specimens of Pine spp. Wood, with dimensions of approximately $89 \times 39 \times 90$ [mm³], were used. In the methodology, the apparent density was evaluated according to the technical standard and the growth rings of each sample were counted. The proportion of latewood in each specimen was analyzed using the image J software. Then, the mechanical tests were performed and the normal compressive strength values were compared according to the requirements of three studied standards. The specimens with the highest number of growth rings per inch had a higher apparent density, and as a consequence, greater were the mechanical properties; average modulus of elasticity (E_{c90}) of 451.89 [MPa] and the average compressive strength of fibers 10.83 [MPa] by the ABNT method; 11.92 [MPa] by the ISO method and 10.50 [MPa] by the ASTM method. The F_{c90} results of the three norms analyzed among the five class: Tangential dense, Tangential non-dense, Radial tangential dense, Radial tangential non-dense and Medular were different. The evaluation of the growth rings and apparent density showed significant contributions to the mechanical properties of *Pinus* spp.

Keywords: Latewood, Apparent density; Modulus of elasticity; Perpendicular compression to grain.

SUMARIO

1- INTRODUÇÃO.....	9
1.1- Objetivos	11
1.1.1 Objetivo geral.....	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	11
2- REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1- Anéis de crescimento da madeira.....	12
2.2- Densidade aparente da madeira....	16
2.3- Resistência da madeira à compressão normal às fibras.....	17
2.4- Módulo de elasticidade.....	18
2.5- Normas para avaliação das deformações no ensaio de compressão normal às fibras.....	20
2.5.1- ISO 13910:2013.....	20
2.5.2-COPANT (1972)	21
2.5.3-ASTM D143	21
2.5.4 -NBR 7190:1997.....	22
2.6- Comparação entre os resultados dos ensaios ISO 13910 e a Norma NBR 7190	23
3- Metodologia.....	25
3.1- Espécie e origem da madeira.....	25
3.2- Métodos de análise da madeira	25
3.2- Ensaio de compressão normal às fibras.....	28
3.3- Análise dos dados.....	29
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1- Caracterização física do <i>Pinus</i> spp	30
4.2- Caracterização da resistência e rigidez à compressão normal às fibras (F_{c90}) do <i>Pinus</i> spp.	32
4.3- Análise da correlação entre as propriedades físico-mecânicos do <i>Pinus</i> spp....	34
4.4- Análise de regressões múltiplas das propriedades físico-mecânicos do <i>Pinus</i> spp.....	37
5- CONCLUSÕES	39
REFERENCIAS.....	40
APÊNDICES	45

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a produção de matéria-prima, destinada a suprir as necessidades da indústria madeireira, concentra-se no emprego de madeira de rápido crescimento, principalmente, dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. O cultivo do gênero *Pinus* iniciou-se no Brasil há cerca de cem anos, porém, a sua silvicultura intensificou-se a partir de 1966, com a Lei Federal de incentivos fiscais (TRIANOSKI, 2012).

Nesse sentido, as principais espécies, utilizadas nas plantações, resumiam-se fundamentalmente em *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* (TRIANOSKI, 2012). Essas espécies proporcionaram rápido crescimento, intensa reprodução e facilidade de aproveitamento das práticas silviculturais e de manejo, suprimindo a carência de matéria-prima da indústria madeireira. Essas duas espécies também foram as que melhor se adaptaram ao clima da região Sul e Sudeste do País, tornando-se fontes renováveis de ciclo rápido (MISSIO *et al.*, 2015).

No Brasil, a área total de árvores plantadas chegou a 7,83 milhões de hectares em 2018 (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ, 2019). Nessa avaliação, as plantações de *Pinus* ocupavam 1,6 milhões de hectares predominantemente nos estados do Paraná (42%), Santa Catarina (34%), Rio Grande do Sul (12%) e São Paulo (8%), uma vez que a região Sul do Brasil possui as melhores condições de solo e clima para o gênero *Pinus*.

Grande parte das espécies de coníferas possui anéis de crescimento distintos a olho nu. Nos anéis de crescimento da madeira de *Pinus*, o lenho tardio é formado no final do período vegetativo, opostamente ao lenho inicial, caracteristicamente, possui ainda parede espessa e menor diâmetro lume, de coloração mais escura e maior densidade (FERREIRA, 2009). Essas características tendem a proporcionar maior resistência mecânica na madeira.

O número de anéis de crescimento está relacionado com a idade da madeira e é avaliado pela quantidade presente por 25,4 [mm], medidos em uma linha radial representativa em peças, contendo medula ou não (CARREIRA; DIAS, 2003). Enquanto que quanto mais largos os anéis de crescimento, menores são as resistências mecânicas esperadas (RALL, 2006).

As propriedades físicas e mecânicas da madeira de uma espécie podem variar muito, de acordo com o sítio (profundidade, fertilidade, estrutura do solo etc.), tratos

silviculturais, origem (florestas plantadas ou nativas) e tipo de povoamento (HASELEIN, 2000). Para a caracterização das propriedades mecânicas, é necessário que sejam consideradas algumas características físicas, anatômicas e químicas, já que são as mesmas que dão origem a essa resistência mecânica.

A escassez por madeira nativa fez surgir a preocupação por espécies de rápido crescimento para suprir o mercado madeireiro, e com isso, a utilização desse gênero vem crescendo. Tal fato acarreta a opção pela madeira de *Pinus* para o mercado, preferencialmente, quanto à utilização em estruturas (SANTOS, 2016). Para o uso correto da madeira para fins estruturais, é necessária a aplicação de ensaios mecânicos em corpos de prova isentos de defeitos, particularmente a resistência à compressão normal às fibras (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1997; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, 2013).

Dentre suas propriedades, a densidade é a mais usada em pesquisas relacionadas à qualidade da madeira, visto que ela se relaciona com as demais propriedades. A quantidade de anéis de crescimento da madeira por polegada tem grande influência sobre a densidade e, conseqüentemente, nas resistências e nos módulos de elasticidade. No mesmo sentido, vários estudos demonstraram que os anéis de crescimento e a densidade da madeira têm uma forte relação com a resistência mecânica (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1991; RALL, 2010; MARQUES *et al.*, 2012). Em adição, quanto maior a proporção de lenho tardio, mais densa é a madeira, com a tendência de ser mais resistente à compressão normal às fibras (RALL, 2006).

Dentre as propriedades mecânicas, utilizadas na caracterização da madeira, a solicitação à compressão normal às fibras ocorre com maior frequência na região de apoio dos elementos estruturais. Esse fenômeno é realizado quando as forças, aplicadas em uma determinada direção, são perpendiculares à disposição dos elementos anatômicos da madeira (traqueoides). Por meio desse plano, com base na sua estrutura anatômica, a madeira apresenta menor resistência comparada à compressão paralela (DIAS, 1994).

Em suas prescrições, a NBR 7190 (ABNT, 1997) deixa claro que, por ser um material anisotrópico, as caracterizações das madeiras são influenciadas pela direção de estudo, uma vez que elas possuem elementos anatômicos diferenciados de acordo com a direção de aplicação da força. De modo geral, a norma diferencia as direções de orientações das análises em duas, paralelo às fibras e normal às fibras.

A norma cita ainda que os procedimentos, para a determinação das propriedades da madeira a serem consideradas em um projeto estrutural, ou seja, resistência, rigidez e módulo de elasticidade, devem respeitar essa regra, o que não influencia tanto a determinação da densidade e o teor de umidade, por levarem em conta apenas o volume e a massa de todo corpo de prova. Nesse sentido, o foco principal deste trabalho é estudar a relação dos anéis de crescimento e as características físico-mecânicas da madeira de *Pinus* spp.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a relação dos anéis de crescimento com as características físico-mecânicas da madeira de *Pinus* spp.

1.1.2 Objetivos específicos

- Relacionar a densidade aparente da madeira com o número de anéis de crescimento por polegada, a espessura e a proporção do lenho tardio.
- Comparar os resultados dos ensaios da resistência à compressão normal às fibras, realizados de acordo com Organização Internacional de Normalização, a Norma Brasileira Regulamentadora e a *American Society for Testing and Materials*.
- Desenvolver modelos matemáticos para estimar as propriedades físico-mecânicas da madeira em função das características dos anéis de crescimento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Anéis de crescimento da madeira de coníferas

O número de anéis de crescimento anuais por centímetro é um indicador da taxa de crescimento de uma árvore e, geralmente, está associado à formação do lenho inicial e tardio. Taxas de crescimento rápidas produzem maiores proporções de lenho inicial, que, por sua vez, influenciam a resistência mecânica da madeira (CARDOSO; MOYA; BORGES, 2019).

A maioria das espécies de coníferas possui anéis de crescimento distintos a olho nu. Essa característica facilita a sua identificação, mas também possibilita a estimativa da sua densidade. Particularmente, o gênero *Pinus* que possui em suas características anatômicas fundamentais a presença de anéis de crescimento bem definidos e estrutura anatômica macroscópica simplificada (SANTOS, 2019).

Os anéis de crescimento, de modo geral, são adicionados anualmente, motivo pelo qual são também chamados como anéis anuais e, pela sua contagem, pode-se saber a idade do indivíduo (SOARES FILHO, 2014). Em um anel de crescimento típico, o lenho inicial é produzido em períodos nos quais a atividade fisiológica da árvore está em vigor, ou seja, em atividade cambial, formando madeira de coloração mais clara. O lenho tardio, formado em estações de baixa atividade fisiológica ou dormência, tem coloração de tonalidade mais escura (RALL, 2010; SOARES FILHO, 2014).

Além disso, os anéis de crescimentos possuem os traqueoides como os elementos predominantes, sobretudo, nas *gymnospermas*. Esses traqueoides são células orientadas verticalmente com paredes grossas e lignificadas, que morrem quando se tornam funcionais ao parênquima, cujas paredes são finas, além de poder funcionar como células vivas (FRITTS, 1976). Avaliando a anatomia de treze espécies de coníferas, foram apresentadas as características do *Pinus elliotii*, que são traqueoides axiais de seção poligonal e retangular com espaços intercelulares; de comprimento ($s = 472$), com paredes finas no lenho inicial e espessas no lenho tardio (SIEGLOCH; MARCHIORI, 2015).

A produção de madeira difere de acordo com a época do ano. Na primavera e no verão, as células formadas são mais largas, com paredes mais finas, gerando madeira menos densa, menos resistente, mais clara e mais acessível à água,

constituindo o lenho inicial (PINHEIRO, 2014). No entanto, durante o outono e o inverno, as novas células originadas são menores e suas paredes celulares são mais espessas, por conseguinte, a madeira formada é mais densa, escura, resistente e menos permeável, constituindo o lenho tardio. Pinheiro (2014) descreveu que a densidade acresce à medida que aumenta a porcentagem de células de lenho tardio.

Uma pesquisa de caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf., destacou que a densidade aparente média do lenho das árvores da classe de diâmetro alta (50,7 a 60,0 cm) e da classe baixa (32,0 a 41,3 cm), demonstrou diferença expressiva pela espessura e proporção dos lenhos inicial/tardio dos anéis de crescimento (FERREIRA; TOMAZELLO FILHO, 2009). A madeira dessa espécie demonstrou que os valores da proporção de lenho tardio e do módulo de elasticidade foram crescentes da medula para casca, observados nas árvores adultas, em todas as alturas de toras estudadas (FLORSHEIM, 2010).

A influência das características dos anéis de crescimento na densidade, na resistência e na rigidez da madeira de *Pinus taeda* L. foi estudada por Rall (2006). O autor afirmou que a classificação da madeira por densidade, a partir das características dos anéis de crescimento, deve ser realizada em função da observação de dois parâmetros diferentes e independentes: o número de anéis por polegada e a proporção de lenho tardio.

Um estudo, realizado sobre a caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia*, demonstrou que a utilização de caracteres macroscópicos de fácil visualização, como proporção de lenho tardio ou número de anéis de crescimento por centímetro linear, pode ser empregada para a predição da resistência mecânica da madeira (MELO *et al.*, 2010).

As propriedades da madeira são variáveis no sentido medula-casca, pois, nos primeiros anéis de crescimento, a madeira proporciona menor densidade e menor comprimento das fibras (VIDAURRE *et al.*, 2011). Essa pesquisa alegou que, em anéis consecutivos, saindo da medula, verifica-se o aumento da densidade e das características anatômicas, como comprimento, diâmetro do lúmen e espessura da parede das fibras.

Nesse sentido, ao relacionar os anéis de crescimento com a resistência mecânica da madeira de coníferas, observou-se que quanto mais largos os anéis, menores serão suas resistências mecânicas e densidade (RALL, 2006). Em geral, pode-se perceber que, nas madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* os anéis de

crescimento mais estreitos, encontram-se mais próximos à casca e, opostamente, os mais largos localizam-se mais próximos à medula (Figura 1).

Figura 1 – Estrutura dos anéis de crescimento próximos da medula e da casca da madeira de *Pinus* spp.



Fonte: Autor.

A norma Americana D245-06 (ASTM, 2011) estabelece classes de densidade para a madeira de coníferas em função da taxa de crescimento. Para ser considerada densa, a peça de madeira deve ter seis ou mais anéis de crescimento por polegada e além disso, mais de um terço ($1/3$) da seção transversal deve ser de madeira de inverno, ou seja, lenho tardio (Tabela 1).

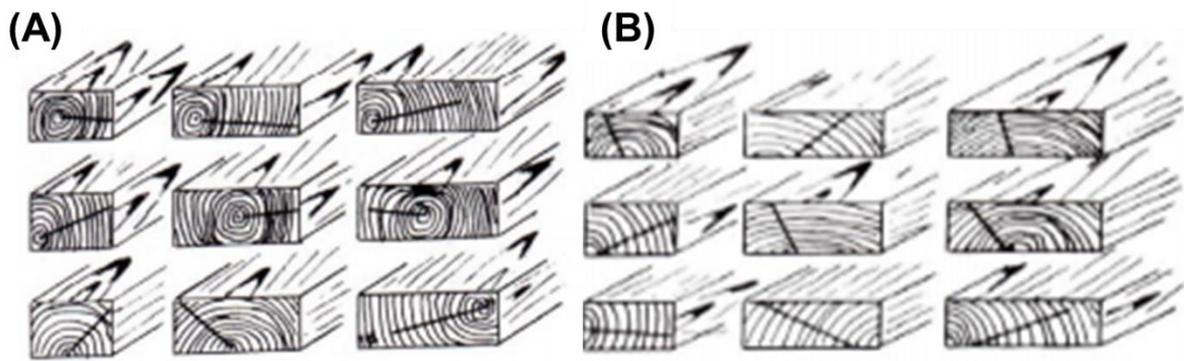
Tabela 1 – Classes de densidade com base nos anéis de crescimento para a madeira de coníferas

Classe	Anéis / 2,54 cm (1")	Proporção de lenho tardio
Densa	≥ 6	$>1/3$
	≥ 4	$>1/2$
Média	≥ 4	$<1/2$
Leve	<4	$<1/2$

Fonte: ASTM (2011), adaptado pelo autor.

O índice de crescimento se refere à quantidade de anéis de crescimento presentes em 2,54 cm (1"), distância medida em uma linha radial representativa, considerando a direção medula-casca. A partir da Figura 2, é possível perceber que as análises para quantificação dos anéis de crescimento devem levar em consideração a presença ou não da medula nos corpos de prova (ASTM, 2011).

Figura 2 – Linha radial representativa em peças contendo medula (A) e sem medula (B) para mensuração da quantidade de anéis de crescimento



Fonte: Carreira, Dias e Calil Jr. (2004, p. 14-15).

Peças com quatro ou mais anéis de crescimento, e com mais da metade da seção transversal, formada por lenho tardio, podem ser consideradas como de alta densidade tanto para o caso A quanto para o caso B (Figura 2). Para ser considerada de média densidade, a peça deve ter quatro ou mais anéis de crescimento. Peças com menos de quatro anéis de crescimento são consideradas de baixa densidade (ASTM, 2011) e, nesse caso, não podem ter finalidades estruturais.

Uma pesquisa sobre a qualidade da madeira juvenil de coníferas avaliou o número de anéis de crescimento por polegada em peças com e sem medula de *Pinus taeda*, *P. elliotii* e *Araucaria angustifolia*, com idades respectivas de 13, 13 e 19 anos, obtiveram 3, 3, 4 anéis de crescimento por polegada, respectivamente (DELUCIS *et al.*, 2013). Nesse estudo, foi mensurado o número de anéis por polegada nas peças com e sem medula e os autores concluíram que o número de anéis de crescimento apresentou comportamento satisfatório, como variável independente, na estimativa da massa específica aparente a 12% de umidade, do módulo de elasticidade (MOE) e do módulo de ruptura (MOR).

A comparação de três metodologias para medição de anéis de crescimento de *Mimosa Scabrella* e *Pinus taeda* foi realizada com o intuito de determinar a largura dos anéis de crescimento, sendo a manual e a digital, pelos programas *ArcView* e *WinDENDRO* (NUTTO *et al.* 2012). Os autores verificaram que, no método manual e *WinDENDRO*, o tempo gasto para a avaliação dos anéis de crescimento foi equivalente, sendo o *WinDENDRO* o mais prático, uma vez que as metodologias digitais possibilitaram a redução de possíveis erros de medição e agilidade no processo. Quanto ao emprego do *ArcView* para o processo de digitalização dos anéis, os autores afirmaram que, apesar de ser laborioso por exigir muito tempo e profissional habilitado, o processo não foi complexo.

2.2 Densidade aparente da madeira

A densidade aparente constitui uma das características mais relevantes da madeira, pois a ela está relacionada a maior parte de suas propriedades físicas e mecânicas utilizada na prática como uma referência para a sua classificação (RALL, 2010). Assim, o autor concluiu que, de maneira geral, madeiras densas possuem maiores resistências mecânicas e são mais rígidas.

Em um estudo sobre a caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* com diferentes densidades, Lobão *et al.* (2004) verificaram que a madeira de menor densidade, em todas as análises, resultou em menor resistência mecânica quando comparada com a madeira de alta densidade. Isso demonstra a forte relação entre a densidade da madeira e as suas propriedades mecânicas.

A densidade aparente média de 12% de umidade, considerada para a madeira de *Pinus elliottii* e *P. taeda*, possui valores respectivos de 560 [kg m⁻³] e 645 [kg m⁻³], apresentada pela norma NBR 7190 (ABNT,1997). A densidade da madeira do gênero *Pinus*, dependendo da espécie, pode se encontrar na faixa de média densidade. Estudos sobre as propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. encontraram densidade aparente (U12%) de 420 [kg m⁻³] a 787 kg m⁻³, variando entre baixa e média densidade (BALLARIN; LARA PALMA, 2003).

Em um diagrama tensão-deformação, a tenacidade é considerada como a energia absorvida pelo material desde a origem até a ruptura e é numericamente igual à área sob toda a extensão da curva (ROSA, 2014). Nesse caso, analisando a tenacidade da madeira como função da densidade aparente, Almeida *et al.* (2014) avaliaram a densidade do gênero *Pinus* encontrando valores entre 390 a 640 [kg m⁻³], sendo classificada como C20, conforme a norma NBR 7190 (ABNT,1997).

A densidade aparente média de 540 [kg m⁻³] foi observada para a madeira de *Pinus caribaea var. hondurensis* com idade de 17 anos, determinada por meio da densitometria de raios-X (CASTRO *et al.*, 2014). Os autores ressaltaram que os perfis diametrais de densidade aparente do lenho demonstraram o acréscimo da medula para a casca e a estabilização no lenho próximo à casca. Já para *Pinus* sp., a densidade aparente da madeira oscilou entre 470 e 690 [kg m⁻³], o que demonstrou que a espécie tem propriedades que possibilitam um amplo aproveitamento para várias finalidades (LADEIRA *et al.*, 2018).

2.3 Resistência da madeira à compressão normal às fibras

Na Tabela 2, são apresentadas as classes de resistências de acordo com a NBR 7190 (1997) em que considera o f_{c0k} como o principal parâmetro. A norma faz uma aproximação de f_{c90k} igual a 25% do valor de f_{c0k} e, a partir deste, os dimensionamentos são realizados. No entanto, a madeira é um material anisotrópico, com grandes variações de suas propriedades, e o uso de equações para estimativas podem não apresentar a precisão que se deseja para todas as espécies.

Tabela 2 – Classes de resistência da madeira de coníferas com valores na condição padrão de umidade de referência (U=12%)

Classes	$f_{c0,k}$ [MPa]	$f_{v0,k}$ [MPa]	$E_{c0,m}$ [MPa]	ρ_{bas} [kg m ⁻³]	ρ_{ap} [kg m ⁻³]
C20	20	4	3.500	400	500
C25	25	5	8.500	450	550
C30	30	6	14.500	500	600

* $f_{c0,k}$: resistência característica à compressão paralela às fibras; $f_{v0,k}$: resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras; $E_{c0,m}$: módulo de elasticidade à compressão paralela; P_{bas} : densidade básica e P_{ap} : densidade aparente.

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997), adaptado pelo autor.

A resistência à compressão normal às fibras ($f_{wc,90}$ ou f_{c90}) é o valor tradicional calculado pela deformação específica residual de 2%, obtida em um ensaio de compressão constante em corpos de prova prismáticos pela NBR 7190 (ABNT, 1997).

A caracterização da madeira à compressão normal às fibras para fixar a geometria do corpo de prova foi realizada através de ensaios para avaliar a influência de alguns fatores geométricos (largura e comprimento) e o método de medição de deformações, que podem ter influência nos resultados adquiridos nos ensaios (DIAS, 1994). Em primeiro lugar, o autor manteve a largura nominal dos corpos de prova constante e igual a 50 [mm]. E para o comprimento, variaram-se os valores nominais igualando a 50 [mm], 100 [mm] e 150 [mm]. Com base nesses experimentos, o autor concluiu que:

- A altura do corpo de prova e formas de medição das deformações empregadas têm maior influência que o comprimento dos corpos de prova, embora esse fator também altere, de forma significativa, os valores das deformações;
- Referente ao comprimento dos corpos de prova, ele deve ser considerado igual à largura, de modo a diminuir a interferência desse fator nos ensaios;

- A medida de deformações, em toda a extensão dos corpos de prova, provoca maiores distorções nos resultados em função de eventuais irregularidades na superfície de aplicação das cargas destas em relação à leitura de deformações em uma parte central apenas.

A compressão normal às fibras pode ser estimada com base na compressão paralela às fibras da madeira, visto que esta última é reconhecida como a propriedade mecânica de referência pela NBR 7190 (ABNT, 1997), sendo possível, a partir dela, determinar outras propriedades mecânicas. Tendo por base tal afirmação, a estimativa da compressão normal às fibras foi considerada equivalente a 25% da compressão paralela às fibras da madeira. A Tabela 3 demonstra resultados de pesquisas realizadas sobre a avaliação da resistência à compressão normal às fibras.

Tabela 3 – Resistência à compressão normal às fibras da madeira de espécies de *Pinus*

Espécie	F _{c90} [MPa]	Autor
Coníferas	2 a 5	ISO (2014)
Gênero <i>Pinus</i>	1,3 - 7	Kretschmann (2010)
<i>Pinus spp.</i>	4,16 a 14,03	Santos (2019)
<i>Pinus canariensis</i>	14,8	Rodriguez e Vergara (2008)
<i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	4,55 – 4,66	Zylkowski (2002)
<i>Pinus elliottii</i>	7,1	Moya <i>et al.</i> (2013)
<i>Pinus taeda</i>	9,7	
<i>Pinus taeda</i>	11,2	(Kretschmann, 1997).
<i>Pinus taeda</i>	7,10 a 16,74	Moritani (2018)

F_{c90}: Resistência à compressão normal às fibras.

Fonte: Autor.

Estudos descreveram que, em uma floresta, não apenas as práticas silviculturais, mas também o tipo de solo e o clima dentre outros afetam a densidade, o comprimento dos traqueoides, o ângulo da grã e a proporção de madeira juvenil, que impactam na adequação da madeira para fins estruturais (BOWYER *et al.*, 2003 *apud* MOYA *et al.*, 2013).

2.4 Módulo de elasticidade da madeira

Os materiais, quando submetidos a uma tensão, podem apresentar dois tipos de deformações: a elástica ou a plástica (KRETSCHMANN, 2010). Dessa forma, a

deformação elástica, que é encontrada na madeira até o limite de elasticidade, é aquela que, após a supressão da tensão, o material retorna à sua posição inicial. Ultrapassando a deformação elástica, já se inicia a fase de deformação plástica, em que o material não retorna à sua forma original quando a tensão for suprimida.

Ao se conhecer a força atuante e a deformação provocada sobre o material, Kretschmann (2010) mencionou que é possível determinar uma das principais propriedades mecânicas dos materiais, o Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young. Nesse caso, a razão entre a tensão, que o material está submetido, e a deformação resultante é chamada de Lei de Hooke (Equação 1). Na Tabela 4, foram apresentadas as avaliações realizadas sobre o módulo de elasticidade.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

Em que: E: módulo de elasticidade [MPa]; σ : tensão aplicada [MPa]; ϵ : adimensional

Tabela 4 – Módulo de Elasticidade à compressão paralela e normal às fibras da madeira de espécies de *Pinus*

Espécie	Idade (Anos)	E_{c0} [MPa]	E_{c90} estimado de acordo com NBR 7190 (ABNT, 1997) [MPa]	Autor
<i>Pinus spp.</i>	-	19.093	954,65	Carrasco, Pereira e Alves (2013)
<i>Pinus elliottii</i>	-	11.596	579,8	Zangiàcomo, Christoforo e Rocco Lahr (2013)
<i>Pinus elliotti</i>	-	5.726	286,30	Moya e Baño (2017)
<i>Pinus taeda</i>	-	5.035	251,75	
<i>Pinus patula</i>	12	9.003	450,15	Mustefaga <i>et al.</i> (2019)
<i>Pinus taeda</i>	12	7.532	376,6	
<i>Pinus taeda</i>	34	13.376	668,80	Ballarim e Nogueira (2005)
<i>Pinus taeda</i>	17-18	12.432	621,60	Trianoski <i>et al.</i> (2014)
<i>Pinus taeda</i>	-	7.413	370,65	Moritani (2018)

E_{c0} : módulo de elasticidade à compressão paralela; E_{c90} : módulo de elasticidade à compressão perpendicular.

Fonte: Autor.

As diferenças dos resultados podem ser consideradas como resultantes da idade, tipo de solo, da amostragem e outros fatores. A grande proporção de madeira

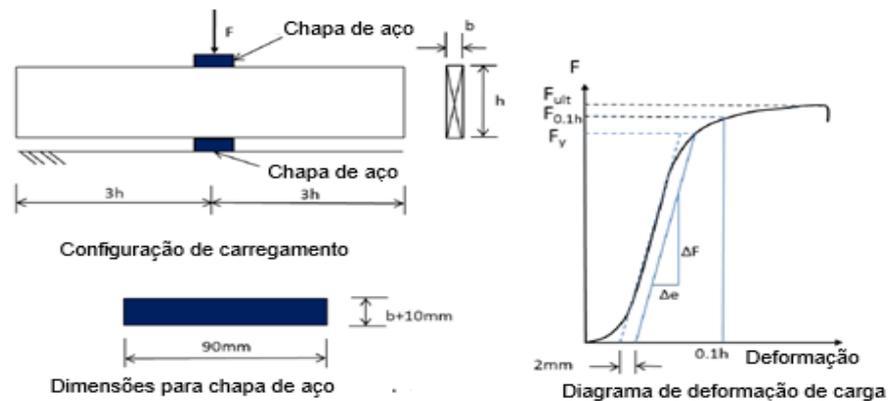
juvenil, observada na maioria das amostras, proporciona baixa rigidez (MOYA e BAÑO, 2017).

2.5 Normas para avaliação das deformações no ensaio de compressão normal às fibras da madeira

2.5.1 ISO 13910:2013

A Norma ISO 13910 (2013) apresenta a configuração de teste para resistência à compressão e rigidez normal às fibras que devem ter a dimensão de 90 [mm] x b + 10 [mm] para a placa de rolamento de aço, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Configuração da carga e diagrama de deformação no ensaio de compressão normal às fibras da madeira



Fonte: Norma ISO (2013, p. 11).

A força de compressão ($f_{c,90}$) é calculada considerando a menor das duas forças, conforme pode-se observar nas Equações 2 e 3; e o limite de plastificação, calculado conforme a Equação 4.

$$f_{c,90} = \frac{F_{ult}}{90 b} \quad (2) \quad f_{c,90} = \frac{F_{0.1h}}{90 b} \quad (3) \quad f_{c,90} = \frac{F_y}{90 b} \quad (4)$$

Em que: F_{ult} : carga aplicada no estado limite último (carga final); b : largura da seção transversal; $F_{0.1h}$: carga em uma deformação de 0.1h [mm]; F_y : carga na interseção de uma linha paralela à inclinação elástica do gráfico de deformação de carga e deslocamento por 2 [mm] conforme mostrado na Figura 3 C.

A rigidez à compressão perpendicular às fibras ($K_{c,90}$) da madeira é calculada pela Equação 5.

$$K_{c,90} = \frac{\frac{\Delta F}{\Delta E}}{90b} \quad (5)$$

Em que: $\Delta F / \Delta E$: inclinação elástica do gráfico carga-deformação.

2.5.2 COPANT (1972)

A Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas – COPANT 466 (COPANT, 1972) destaca quais procedimentos devem ser seguidos para os ensaios de compressão perpendicular às fibras. Essa norma recomenda que a amostra deve ser centralizada na base do equipamento, de modo que a força seja aplicada sobre a face radial. Além disso, a pressão da chapa deve ser colocada sobre o corpo de prova, perfeitamente centralizada com a amostra e nas extremidades dos braços, repousando sobre o cilindro basculante, e um dos quais opera o deflectômetro. Durante todo o teste, a velocidade de 0,3 [mm/min] deve ser mantida constante.

Na expressão dos resultados do ensaio, é estipulado que, com os valores adquiridos, é construído um gráfico no qual o ponto em que a parte reta termina e a parte curva se inicia. Esse ponto corresponde à carga até o limite proporcional. Além disso, é determinado o ponto correspondente à carga máxima, ou seja, a carga utilizada para obter a penetração de 2,5 mm.

A resistência ao limite proporcional e a resistência máxima da unidade devem ser calculadas com os dados, aplicando as Equações 6 e 7.

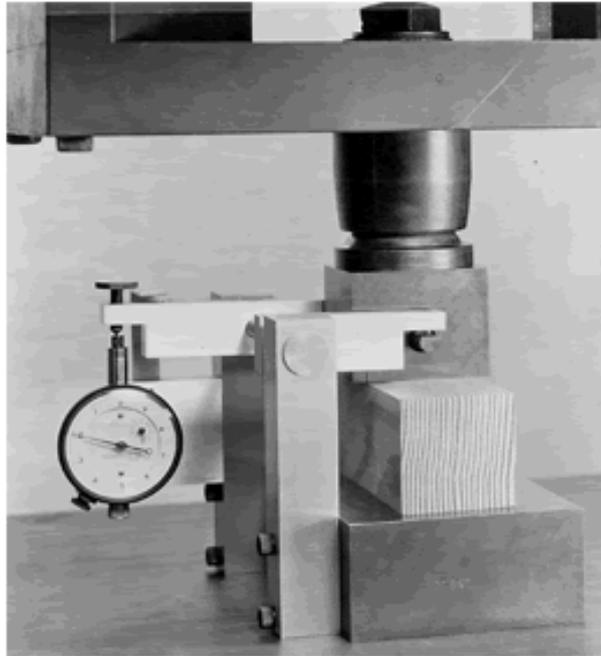
$$RLP = \frac{P_1}{S} \quad (6) \qquad RUM = \frac{P}{S} \quad (7)$$

Em que: RLP: resistência ao limite proporcional [kgf cm²]; P₁: carga ao limite proporcional [kgf]; S: superfície impressa sobre o corpo de prova pela peça de pressão [cm²]; e RUM: resistência unitária máxima [kgf cm²]; e P: carga [kgf] utilizada para obter a penetração de 2,5 [mm].

2.5.3 ASTM D143

A *American Society for Testing and Materials* D143 (ASTM, 2014) orienta que os testes de compressão perpendicular às fibras sejam realizados com amostras de 50 x 50 x 150 [mm] (largura x altura x comprimento), acomodadas de forma adequada sobre o suporte da máquina de ensaio (Figura 4).

Figura 4 - Conjunto de teste de compressão perpendicular às fibras da madeira, demonstrando o método de aplicação de carga e medição de deformação por meios de extensômetro do tipo médio



Fonte: ASTM (2014, p. 13).

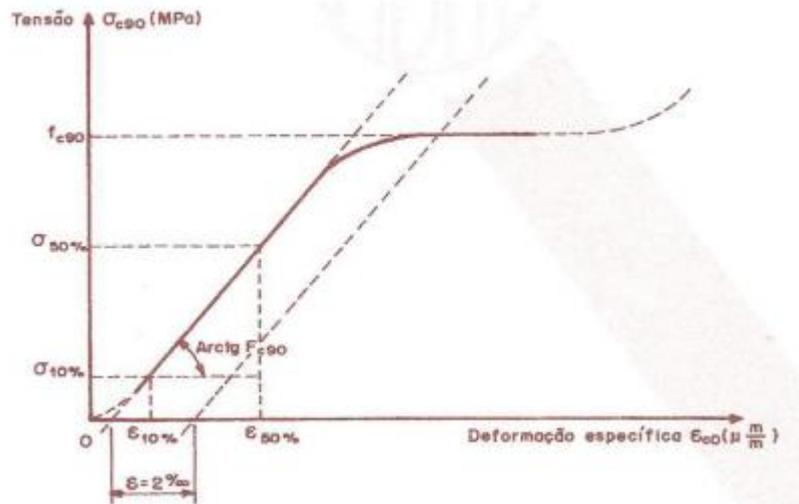
As curvas de carga-compressão devem ser realizadas para todas as amostras com compressão de até 2,54 [mm]. A compressão deve ser medida entre as superfícies de carga, e as deformações devem ser registradas usando dispositivos de medição de deslocamento capazes de gerar uma classificação.

As amostras devem ser colocadas de modo que a carga seja aplicada através da placa de suporte a uma superfície radial. Referente à velocidade de teste, a carga deve ser aplicada, continuamente ao longo do ensaio, a uma velocidade de movimento da cruzeta móvel de 0,305 [mm].

2.5.4 NBR 7190:1997

A NBR 7190 (ABNT,1997) considera a resistência à compressão normal às fibras da madeira como o valor convencional, determinado pela deformação específica residual de 0,2%, obtida em ensaio de compressão uniforme de corpos de prova prismáticos (Figura 5).

Figura 5 – Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras



Fonte: ABNT (1997, p. 56).

A rigidez da madeira, na direção normal às fibras, deve ser determinada por seu módulo de elasticidade, obtido no trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, conforme indicado na Figura 5.

Nesse caso, a norma recomenda que a velocidade de carregamento seja aplicada a 10 [MPa min⁻¹], e o carregamento deve ser realizado em dois ciclos de carga.

2.6 Comparação entre as metodologias de avaliações das propriedades físico-mecânicas ISO 13910, Norma NBR 7190, ASTM D143 e COPANT 466

Entre as normas, que avaliam a resistência mecânica da madeira, destacam-se: ISO 13910 (ISO, 2013), NBR 7190 (ABNT, 1997), ASTM D143 (ASTM, 2014) e COPANT 466 (COPANT, 1972). Analisando essas normas, pode-se ressaltar que existem metodologias de avaliação similares e diferentes, conforme mostrado na Tabela 5. Os pontos comuns dessas normas são o teor de umidade padrão e a avaliação da densidade aparente. Enquanto as diferenças estão no método de avaliar a resistência à compressão normal às fibras e o módulo de elasticidade à compressão normal às fibras.

Dentre as diferenças entre a ISO 13910 (ISO, 2013) e as outras três normas, pode-se citar o módulo de elasticidade E_{w0} na direção paralela às fibras, que é avaliado no ensaio de compressão paralela às fibras, e o módulo de elasticidade (E_{w90})

na direção perpendicular às fibras, calculado no ensaio de compressão normal às fibras pela NBR 7190 (ABNT, 1997), conforme a Equação 8.

Tabela 5 – Avaliação das propriedades físico-mecânicas, conforme as quatro normas

Propriedades	NBR7190 (ABNT, 1997)	ISO 13910 (2013)	ASTM D143 (ASTM, 2014)	COPANT 466 (COPANT, 1972)
Umidade	12%	12%	12%	12%
Densidade	M/V	M/V	M/V	M/V
$f_{c,90}$	Até 0,2% de deformação	$\frac{f_{c,90,max}}{A}$	Até 2,54 [mm] de deslocamento	Até 2,50 [mm] de deslocamento
E_{c90}	$\frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}}$	$\frac{(F_{40} - F_{10})h_0}{(w_{40} - w_{10})bL}$	Não se aplica	P1l / sd

M: massa da amostra; V: volume da amostra; $f_{c,90}$: resistência à compressão normal às fibras; $f_{c,90,max}$: carga máxima; A: área da seção; Inclinação da reta secante à curva tensão x deformação específica, definida pelos pontos ($\sigma_{10\%}$ e $\epsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$ e $\epsilon_{50\%}$), correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à compressão normal às fibras relacionado a E_{c90} ; $F_{40} - F_{10}$: incremento de carga na porção reta da curva carga-deformação; F_{10} : 10% de $F_{c,90,max}$; F_{40} : 40% de $F_{c,90,max}$; $W_{40} - W_{10}$: incremento de deformação correspondente a $F_{40} - F_{10}$; P1: carga no limite de proporcionalidade em kgf; l: distância entre as braçadeiras de deflectômetro; s: superfície da seção transversal do corpo de prova, em cm²; d: deformação registrada debaixo do corpo de prova.

Fonte: Autor.

Além disso, o valor da resistência à compressão normal às fibras equivale aproximadamente a 25% do valor da compressão paralela às fibras, de acordo com a Equação 9. No entanto, as normas ISO 13 910 (ISO, 2013), ASTM D143 (ASTM, 2014) e COPANT 466 (COPANT, 1972) não apresentam essas duas relações, que possibilitam a avaliação de E_{w90} e F_{c90} na falta de ensaios mecânicos.

$$E_{w90} = \frac{1}{20} E_{w0} \quad (8)$$

$$\frac{F_{c90,k}}{F_{c0,k}} = 0,25 \quad (9)$$

Em que: $F_{c90,k}$: resistência característica à compressão normal às fibras; e $F_{c0,k}$: resistência característica à compressão paralela às fibras.

3. METODOLOGIA

Neste Capítulo, são apresentados os materiais e os métodos empregados no trabalho para que o leitor consiga vislumbrar o passo a passo desta pesquisa.

3.1 Espécie e origem da madeira

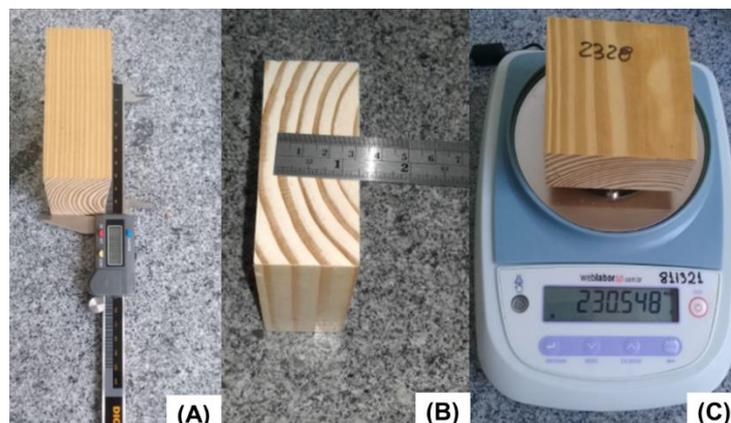
Os ensaios foram realizados no laboratório de Estruturas de Madeiras (LEMAD) da Universidade Federal do Espírito Santo. As madeiras ensaiadas foram doadas pela empresa Berneck S.A. painéis e serrados. As madeiras ensaiadas são da espécie *Pinus spp.* com densidade variando de 320 a 770 [kg m⁻³].

Os corpos de provas (CPs), utilizados para os ensaios de compressão, também foram utilizados para determinar o teor de umidade e densidade aparente da madeira. Os procedimentos de ensaio para determinação de características mecânicas seguiram as prescrições da NBR 7190 (1997), ISO 13910 (2013), ASTM D143 (ASTM, 2014) e COPANT 466 (COPANT, 1972).

3.2 Métodos de análise da madeira

Os CPs foram lixados para melhor visualização e contagem dos anéis de crescimento. Depois de serem lixados, todos os corpos de prova foram medidos e pesados (Figura 6) para a determinação da densidade aparente, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997).

Figura 6 – Análises físicas e visuais da madeira de *Pinus spp.*: mensuração das dimensões dos corpos de prova (A); contagem de número de anéis de crescimento por polegada (B); e pesagem dos corpos de prova (C)



Fonte: Autor.

A correção da densidade aparente com o teor de umidade de referência de 12%, foi avaliada através da Equação 10 da ISO 3130 (1975). Esta equação se mostra necessária, uma vez que, na prática, não é possível colocar os corpos de prova na estufa para secar, antes da realização dos ensaios, pelo único intuito de preservar suas propriedades originais.

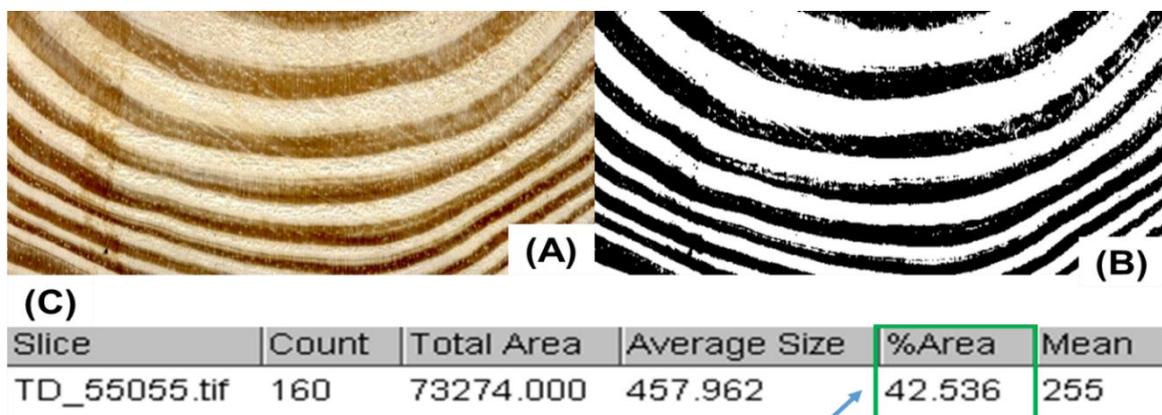
$$\rho_{12} = \rho_u \left[1 - \frac{(1-k)(u-12)}{100} \right] \quad (10)$$

Em que: k é o coeficiente volumétrico para mudança de 1% de umidade, cujo valor é $= 0,85 \cdot 10^{-3} \rho_u$; u é o teor de umidade em que se encontra o corpo de prova, em %; ρ_u é a densidade aparente a u % de teor de umidade, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Para a classificação da densidade das amostras, foi levado em consideração o número de anéis de crescimento por polegada (ASTM, 2011). Os corpos de prova foram divididos em três orientações diferentes: tangencial, radial tangencial e medular. As duas primeiras classes foram divididas em denso e não denso, de acordo com o número de anéis, e a classe medular foi única. Ao todo, foram utilizadas 250 amostras, considerando 50 para cada tratamento.

As amostras de madeira foram escaneadas no *scanner* Epson Perfection V750. Em seguida, foram analisadas no software livre *Image J*® versão 1.49 (SCHNEIDER; RASBAND, 2012) com conversão para a resolução de 8 bits (em preto e branco), conforme ilustrado na Figura 7. A partir da imagem, foi determinada a área de lenho tardio.

Figura 7 – Processo de determinação do lenho tardio em *software* analisador de imagem. (A) Entrada da face do corpo de prova; (B) Processamento da imagem; e (C) resultado do cálculo da proporção de lenho tardio

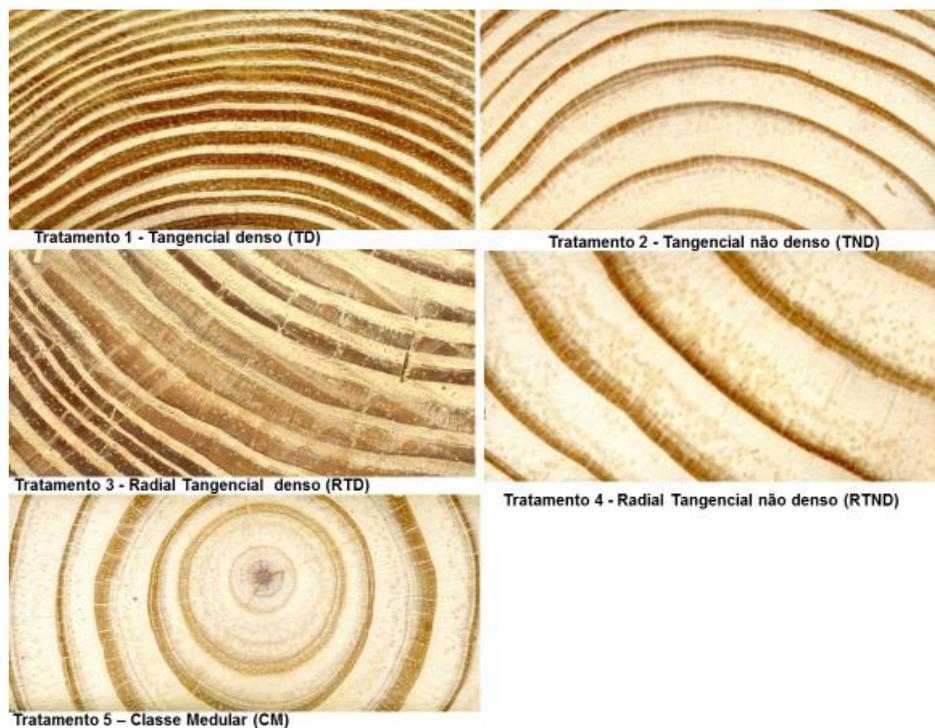


Área de lenho tardio na amostra

A partir da Figura 7, é possível dimensionar a área do lenho tardio e inicial. Nota-se que as tonalidades escuras representam a área de lenho tardio por polegada, e por subtração, é possível determinar os valores de lenho inicial.

Para a análise dos anéis de crescimento, os corpos de provas foram divididos em cinco tratamentos (Figura 8). Os 250 corpos de prova foram subdivididos em 5 grupos: tangencial denso (TD), tangencial não denso (TND), Radial tangencial denso (RTD), Radial tangencial não denso (RTND) e Classe medular (CM). Na classe medular (CM), não foi possível a classificação em dois tratamentos, tendo em vista não haver corpos de prova com anéis de crescimento densos. Nessa classe, foram considerados todos os corpos de prova que continham medula ou com anéis de crescimento próximos a ela (Figura 8).

Figura 8 – Definição do enquadramento das classes em função da posição dos anéis de crescimento e da medula nos corpos de prova



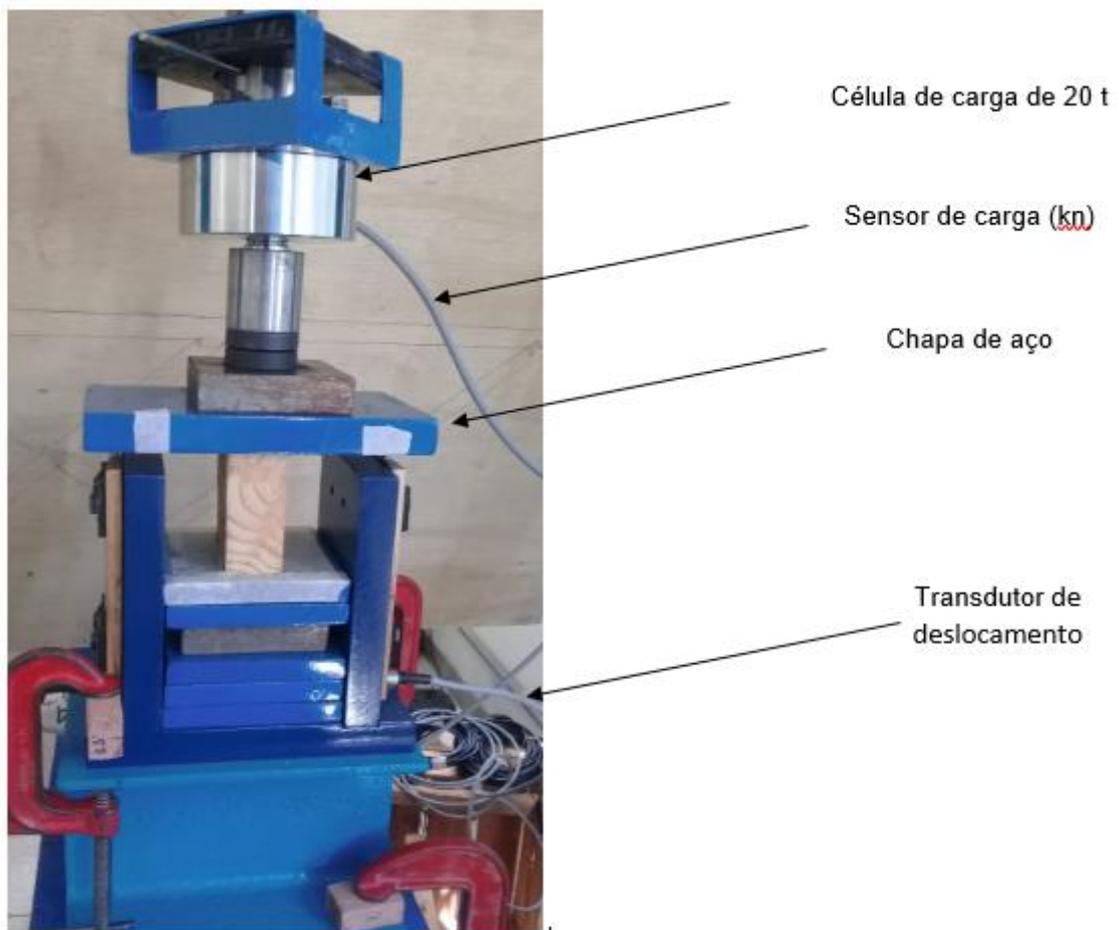
Fonte: Autor

3.3 Ensaio de compressão normal às fibras da madeira

Para a determinação da resistência à compressão normal às fibras e de seu respectivo módulo de elasticidade, foram utilizados os requisitos da norma NBR 7190

(ABNT, 1997). Os ensaios foram realizados nos 250 corpos de prova, cujos anéis de crescimento foram avaliados. Foi aplicada uma carga F no centro da placa de aço superior, e esta foi responsável pela deformação distribuída pela amostra (Figura 9). Para determinação do módulo de elasticidade, é acoplado, na máquina (Bomba hidráulica manual e cilindro de compressão – ENERPAC, P80), um par de transdutores de deslocamento (LVDTs), um em cada lado do corpo de prova. Com eles, é possível captar o deslocamento das amostras durante os ensaios e, por consequência, as deformações e, então, correlacionar com a tensão submetida, conforme descrito na Lei de *Hooke*.

Figura 9 – Configuração de carregamento e notação para carga e deformação resposta



Fonte: Autor.

Para adquirir o valor da resistência à compressão normal às fibras (F_{c90}) referente, foi aplicada a ISO 13910 (ISO, 2013). Enquanto que, para obter F_{c90} conforme a ASTM D143 (ASTM, 2014), foi considerado a carga proporcional ao deslocamento equivalente a 2,5 mm. A rigidez e a resistência a compressão normal às fibras foram corrigidas a 12% de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997).

3.4 Análise dos dados

Para as análises estatísticas, utilizou-se o software *SigmaPlot* 13 e *minitab* (19.1.1.0 versão 2020). Os dados das características dos anéis de crescimento, as propriedades mecânicas e a densidade aparente da madeira foram submetidas à análise de normalidade pelo teste de *Shapiro-Wilk* e de homocedasticidade pelo teste de *Cochran*. Para esses testes, houve diferença significativa ($p < 0,05$), por isso os dados foram transformados pela raiz quadrada de x (\sqrt{x}), sendo analisados novamente. Contudo, nos resultados, foram apresentados os valores originais. Nessa transformação, E_{c90} , número de anéis de crescimento – NAC, proporção de lenho tardio – PLT e espessura do lenho tardio – ELT não seguiram uma distribuição normal. De fato, foi apresentada uma análise estatística descritiva (média e desvio padrão) para essas variáveis.

A relação funcional entre as características dos anéis de crescimento, a densidade aparente e as propriedades mecânicas foi avaliada pela correlação linear de Pearson. As estimativas da densidade aparente, em função do NAC, ELT e PLT, e das propriedades mecânicas em função da densidade aparente – DA, NAC, ELT e PLT, foram realizadas pela análise de regressão linear para o conjunto dos 250 corpos de prova. Foi testada a significância de todos os coeficientes de cada equação pelo teste de t , em que foram mantidas apenas as equações, cujos coeficientes foram significativos. A qualidade de ajuste dos modelos foi obtida em função de coeficiente de determinação R^2 , o erro padrão e a significância de valores dos modelos.

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

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios mecânicos realizados foram a resistência à compressão normal às fibras, o módulo de elasticidade e rigidez à compressão normal às fibras. Os valores desses últimos e a densidade aparente foram corrigidos a 12 % de umidade. Também foram apresentados a avaliação da proporção de lenho tardio, da espessura do lenho tardio, dos números de anéis de crescimento por polegada e da densidade aparente. Os resultados desses ensaios e avaliações foram apresentados de forma detalhada seguindo seus respectivos tratamentos no APÊNDICE A, simbologia dos termos utilizados; e nos APÊNDICES B a F, as propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova e as caracterizações dos anéis de crescimento.

4.1 Densidade aparente e caracterização dos anéis de crescimento da madeira de *Pinus* spp.

Na Tabela 6, foi apresentada a estatística descritiva geral das características dos anéis de crescimento e da densidade aparente da madeira de *Pinus* spp. para os 250 corpos de prova avaliados.

Tabela 6 – Estatística descritiva geral das características dos anéis de crescimento e densidade aparente da madeira de *Pinus* spp.

Estatística descritiva	PLT [%]	ELT [mm pol ⁻¹]	NAC [unid. pol ⁻¹]	DA [kg m ⁻³]
Média	30,17	8,08	3,82	476,85
Máximo	96,26	14,86	10,00	777,18
Mínimo	3,11	1,69	2,00	300,87
Desvio Padrão	19,07	3,27	1,52	83,42

PLT: Proporção de lenho tardio, ELT: Espessura de lenho tardio, NAC: Número de anéis de crescimento, DA: Densidade aparente.

Na Tabela 7, é possível notar que os valores médios de PLT, ELT, NAC e DA variaram de acordo com o grupo correspondente. Observa-se ainda que os maiores valores das características dos anéis de crescimento e densidade aparente da madeira foram apresentados pelo tratamento Tangencial denso e os menores, na Classe medular.

Comparando os valores médios da densidade aparente dos tratamentos Tangencial denso e Radial tangencial denso (Tabela 7), pode-se observar que não

houve diferença significativa entre as médias. Quanto aos tratamentos Tangencial não denso e Radial tangencial não denso, não houve diferença entre si.

Tabela 7 – Médias das características dos anéis de crescimento e da densidade aparente da madeira de *Pinus* spp.

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

±: desvio padrão; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si (TUKEY, $p \geq 0,05$). PLT: Proporção de lenho tardio, ELT: Espessura de lenho tardio, NAC (unidade por polegada): Número de anéis de crescimento e DA: Densidade aparente.

O valor médio de anéis de crescimento por polegada, encontrado neste trabalho, pode ser considerado satisfatório, tendo em vista a maior quantidade dos corpos de prova utilizados, classificados como tendo anéis de crescimento não densos. O estudo sobre a qualidade da madeira juvenil de coníferas, em que foi avaliado o número de anéis por polegada com medula e sem medula de *Pinus taeda*, *P. elliottii* e *Araucaria angustifolia*, com idades respectivas de 13, 13 e 19 anos, obteve resultados médios, 3, 3, 4 anéis, respectivamente (DELUCIS *et al.*, 2013). Os autores consideraram o número de anéis de crescimento como uma variável independente satisfatória na estimativa da densidade aparente com 12% de umidade.

Os valores médios de anéis de crescimento por polegada, encontrados nos tratamentos, foram próximos aos de Haselein *et al.* (2000), que encontraram 3,5 anéis para a região próxima da medula de toras de *Pinus elliottii*. Esse fato era esperado, sabendo-se que o número de anéis de crescimento por polegada está relacionado à maturidade da madeira, consequentemente quanto mais adulta for, maior será o número de anéis de crescimento por polegada.

Os valores médios da proporção de lenho tardio da madeira de *Pinus* spp. (Tabela 6), foram próximos aos valores encontrados por Schilling *et al.* (1998) para *Pinus elliottii*, que obtiveram 27,04%. Clark III, Daniels e Jordan (2006) também avaliaram essa espécie, proveniente de várias regiões dos Estados Unidos, e encontraram uma porcentagem média de lenho tardio de 41,33%, próxima dos valores médios, observados para os tratamentos Tangencial denso e Radial Tangencial denso

(Tabela 7). Essa diferença pode ser explicada pela idade das árvores, pois quanto mais juvenil for a madeira, menor será a proporção de lenho tardio.

A densidade aparente média do material estudado foi de 476,85 [kg m⁻³] e teor de umidade médio de 12%. Essa densidade média foi similar ao valor de 500 [kg m⁻³], encontrados por Haselein *et al.* (2000) e Almeida *et al.* (2014) em seus trabalhos também com 12%. Em madeiras de coníferas, a proporção de lenho tardio e a espessura da parede das células exercem influência na densidade aparente, isso porque o lenho tardio apresenta fibras com paredes mais espessas quando confrontadas com as do lenho inicial (SIEGLOCH; MARCHIORI, 2015).

A espessura do lenho tardio, a proporção da área de lenho tardio e o número de anéis de crescimento são relacionadas à densidade aparente dos corpos de prova. Observa-se ainda que quanto maiores forem ELT, PLT e NAC, maior será a densidade aparente da madeira de *Pinus* spp.

Uma análise do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Bar. et Golf. demonstrou que aquelas de maior porcentagem de lenho tardio também obtiveram maior densidade aparente, sobretudo, na madeira adulta, além da impregnação do lume das células com resina, resultando em acréscimo da sua densidade aparente média pela maior atenuação dos raios X (CASTRO; TOMAZELLO FILHO; SURDI, 2014). Os autores ressaltaram que árvores de maior porcentagem de lenho inicial, na madeira juvenil, proporcionaram menor densidade aparente do lenho, diminuindo o valor médio da densidade aparente. O contrário ocorre para árvores de maior proporção de lenho tardio.

4.2 Caracterização da resistência e rigidez à compressão normal às fibras (f_{c90}) da madeira de *Pinus* spp.

Pode-se observar que a madeira da Classe medular apresentou menor valor médio de resistência mecânica em relação aos demais tratamentos (Tabela 8), o mesmo ocorreu com a densidade aparente da madeira. Ao passo que o tratamento Tangencial denso proporcionou o maior valor médio de resistência mecânica e maior valor de densidade aparente da madeira.

Para a comparação da resistência à compressão normal às fibras (F_{c90}), seguindo requisitos das três normas, a NBR 1990 (ABNT, 1997), ISO 13910 (ISO, 2013) e ASTM D143 (ASTM, 2014), tiveram diferenças significativas em 5% de significância.

Tabela 8 – Média da rigidez e módulo de elasticidade a compressão normal às fibras da madeira de *Pinus* spp. por tratamento.

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

±: desvio padrão; F_{c90}: resistência à compressão normal às fibras; ¹ Conforme a Norma NBR 7190:1997, ² ISO 13910:2013, ³ ASTM D 143:2014; E_{c90}: módulo de elasticidade à compressão normal às fibras; K_{c90}: rigidez à compressão normal às fibras. Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não se diferenciam entre si (Tukey ≥ 0,05).

Observa-se ainda, na Tabela 8, que não houve diferença significativa entre as três normas avaliadas (F_{c90}¹, F_{c90}² e F_{c90}³), apenas para o tratamento Tangencial não denso. Já nos tratamentos Radial tangencial denso, Tangencial denso e Classe medular, não houve diferença significativa entre f_{c90}¹ e f_{c90}³. Enquanto que, no tratamento Radial tangencial não denso, teve diferença significativa entre as três normas avaliadas.

Tais resultados da resistência à compressão normal às fibras foram próximos aos dos estudos de Moya *et al.* (2013), Santos (2019) e Moritani (2018), que obtiveram valores médios de 9,3, 9,06 e 10,54 [MPa], respectivamente, e foram maiores que os 7,52 [MPa] encontrados por Mustefaga *et al.* (2019) para a madeira de *Pinus taeda*. Ao passo que Rodriguez e Vergara (2008) encontraram 14,8 [MPa] para *Pinus canariensis*.

Também foram verificadas diferenças significativas entre as médias da rigidez à compressão normal às fibras (K_{c90}), que demonstram que os tratamentos densos tiveram maior valor de K_{c90}, semelhante ao observado para F_{c90}. E o módulo de elasticidade à compressão normal às fibras (E_{c90}) teve o maior valor para o Tratamento denso.

Os resultados de E_{c90} (Tabela 8) foram semelhantes ao da pesquisa de Mustefaga *et al.* (2019). Os autores encontraram valores de E_{c90} para a madeira juvenil

de *Pinus patula* igual a 211 [MPa] e 341 [MPa] para *Pinus taeda*. Já o estudo de Aira *et al.* (2014) encontrou valor médio de 814 [MPa] para a espécie *Pinus sylvestris* L., superior ao encontrado neste trabalho.

Os valores médios de K_{c90} deste trabalho superaram o encontrado por Moritani (2018) para a madeira de *Pinus taeda*, que foi de 3,65 [MPa mm⁻¹] em 44 tábuas. Essa diferença pode ser justificada pela amostragem, idade da madeira avaliada e dimensões das peças utilizadas.

Estudos desenvolvidos por Ballarin e Lara Palma (2003) e Melo *et al.* (2010) avaliaram o módulo de elasticidade da madeira adulta de *Pinus taeda* L. Essas pesquisas sustentaram que os resultados gerais do módulo de elasticidade da madeira juvenil foram sempre menores que o da madeira adulta. Também a densidade aparente e o número de anéis por polegada foram superiores na madeira adulta. Logo, a utilização de caracteres macroscópicos de fácil visualização, como proporção de lenho tardio e/ou número de anéis de crescimento por centímetro linear, podem ser utilizados para a predição da resistência da madeira.

4.3 Correlação entre as características dos anéis de crescimento, densidade aparente e propriedades mecânicas da madeira de *Pinus* spp.

As correlações entre as características dos anéis de crescimento, a densidade aparente e as propriedades mecânicas foram avaliadas utilizando a matriz de correlações conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Matriz de correlações entre as propriedades físico-mecânicas e características dos anéis de crescimento (correlação de Pearson)

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

F_{c90} : resistência à compressão normal às fibras; ¹Conforme a Norma NBR 7190:1997; ²ISO 13910:2013; ³ASTM D 143:2014; E_{c90} : módulo de elasticidade à compressão normal às fibras; K_{c90} : rigidez à compressão normal às fibras; PLT: Proporção da área de lenho tardio; ELT: Espessura de lenho tardio;

NAC: Número de anéis de crescimento por polegada; DA: Densidade aparente. Todos os valores apresentados foram significativos ao nível de 1% de significância (**).

Para todas as propriedades, houve correlações significativas mesmo sendo baixas em algumas situações. É possível notar a interação dos métodos de análises para determinação de F_{c90} . Os valores de coeficientes de Pearson variaram de 0,980 a 0,940, a depender da norma utilizada. No entanto, para E_{c90} os valores tiveram correlações moderadas, mostrando a influência nos resultados decorrentes da norma utilizada.

O máximo coeficiente de correlação encontrado entre F_{c90}^1 e F_{c90}^2 foi de 0,980; e o menor valor estatisticamente significativo foi 0,317 entre K_{c90} e PLT. Referente às características dos anéis de crescimento e as propriedades mecânicas, o maior valor foi entre ELT e F_{c90}^1 (0,548) e o menor estatisticamente significativo foi entre PLT e K_{c90} (0,317).

O valor da correlação entre F_{c90}^2 e DA foi de 0,450, que se aproximou do resultado de Moritani (2018), que encontrou valor de 0,555 para *Pinus taeda*. Enquanto que a correlação entre E_{c90} e DA teve valor igual a 0,412, inferior aos valores de 0,800 encontrados para a madeira de *Pinus taeda* (SHIMMOYA, 2005). Essa diferença pode ser explicada por divergências na metodologia de ensaio e a maturidade das árvores avaliadas.

A correlação entre DA e PLT atingiu 0,610, que é próxima da que Trianoski *et al.* (2013) encontraram (0,63) em seu estudo sobre o *Pinus taeda*. Em um outro estudo, que avaliou a compressão paralela em 8 espécies de *Pinus* tropicais, foram encontrados valores dessa correlação entre 0,35 e 0,81 (TRIANOSKI *et al.*, 2014); valores compatíveis ao valor médio encontrado neste trabalho.

Uma possível explicação foi apresentada por Kellinson (1981), citado por Trianoski *et al.* (2013) que afirmaram que, em árvores de rápido crescimento, com elevada proporção de madeira juvenil, a correlação entre essas duas propriedades (DA e PLT) tende a ser menor por causa da maior variabilidade da densidade, das propriedades morfológicas dos traqueídeos e do alto teor de polioses.

O número de anéis de crescimento e a densidade aparente apresentaram correlações entre si e estas também podem influenciar na resistência e na rigidez à compressão normal às fibras da madeira (Tabela 10). Ao testar a significância dos coeficientes de cada modelo de regressão, quase todos foram significativos ao nível de 5%, apenas E_{c90} em função da densidade aparente, que resultou em um valor não significativo, não sendo apresentado.

Tabela 10 – Modelos de regressão para a DA em função de NAC, ELT e PLT e E_{c90} ; K_{c90} ; F_{c90} em função de DA, NAC, ELT e PLT

Equação	R ² %	S _{xy}	F	P-valor
DA = 323,77** + 40,20** NAC	54,28	56,16	296,58	0,000**
DA = 346,79** + 16,16** ELT	40,32	64,16	169,24	0,000**
DA = 397,17** + 2,66** PLT	36,95	65,94	146,98	0,000**
$E_{c90} = 299** + 41,30** NAC$	17,50	135,52	53,66	0,000**
$E_{c90} = 313** + 17,70** ELT$	14,80	137,69	44,23	0,000**
$E_{c90} = 378** + 2,60** PLT$	10,70	140,95	30,86	0,000**
$K_{c90} = 3,54** + 0,55** NAC$	20,80	1,63	66,37	0,000**
$K_{c90} = 3,56** + 0,26** ELT$	21,10	1,63	67,63	0,000**
$K_{c90} = 4,73** + 0,031** PLT$	9,70	1,74	27,69	0,000**
$F_{c90}^1 = 3,88** + 0,015** DA$	19,80	2,41	62,53	0,000**
$F_{c90}^1 = 7,81** + 0,79** NAC$	19,70	2,42	62,16	0,000**
$F_{c90}^1 = 7,19** + 0,45** ELT$	29,70	2,26	106,34	0,000**
$F_{c90}^1 = 9,35** + 0,05** PLT$	11,70	2,53	33,98	0,000**
$F_{c90}^2 = 4,85** + 0,02** DA$	20,00	2,44	63,07	0,000**
$F_{c90}^2 = 8,93** + 0,78** NAC$	18,80	2,46	58,53	0,000**
$F_{c90}^2 = 8,25** + 0,45** ELT$	29,30	2,30	104,32	0,000**
$F_{c90}^2 = 10,4** + 0,049** PLT$	11,60	2,57	33,52	0,000**
$F_{c90}^3 = 4,54** + 0,01** DA$	15,90	2,36	47,97	0,000**
$F_{c90}^3 = 7,82** + 0,70** NAC$	16,88	2,35	51,59	0,000**
$F_{c90}^3 = 7,17** + 0,41** 2ELT$	27,10	2,20	93,64	0,000**
$F_{c90}^3 = 9,10** + 0,05** PLT$	11,40	2,43	33,04	0,000**

R²: coeficiente de determinação; S_{xy}: erro médio padrão absoluto; F: F calculado; P-valor e os coeficientes a nível de probabilidade de erro em 1% de significância(**); DA: Densidade aparente em [kg m⁻³]; NAC: Número de anéis de crescimento por polegada; ELT: Espessura de lenho tardio em [mm pol⁻¹]; PLT: Proporção da área de lenho tardio em [%]; E_{c90} : Módulo de elasticidade à compressão normal às fibras em [MPa]; K_{c90} : rigidez à compressão normal às fibras; F_{c90} : resistência à compressão normal às fibras em [MPa]; ¹ Conforme a Norma NBR 7190:1997; ² ISO 13910:2013 ³ ASTM D 143:2014.

O coeficiente de determinação encontrado entre F_{c90}^2 e DA foi igual a 20 %, resultado compatível com a pesquisa de Irby *et al.* (2020), que apresentaram R² igual a 22% para resistência à compressão paralela e densidade aparente menor que 500 kg m⁻³. Porém, esse coeficiente foi inferior ao encontrado por Mustefaga *et al.* (2019), relacionando densidade aparente com a resistência à compressão normal às fibras, em que R² é igual a 78,70% para *Pinus taeda*.

Os R² encontrados para as características dos anéis de crescimento, densidade aparente e propriedades mecânicas, foram baixos. Esses resultados são similares ao R² de 15%, encontrados por Moya *et al.* (2013), que avaliaram a relação entre a

densidade e a resistência à compressão normal às fibras de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Os autores ressaltaram que essa baixa precisão dos modelos pode ocorrer, visto que, no crescimento inicial das árvores de pinus, o lenho tardio é bastante próximo em densidade, e as propriedades mecânicas nessa fase são mais influenciadas pelo ângulo das microfibrilas e pela composição química da madeira.

A influência da composição química pode ser explicada pelo fato de que algumas madeiras apresentam teores de extrativos que ultrapassam 30% do peso total da madeira (DIAS, ROCCO LAHR, 2002). Os autores afirmaram que isso aumenta a coloração, a densidade e a durabilidade da madeira, logo, sua extração não modifica a estrutura celular da madeira, mas diminui a densidade.

As características dos anéis de crescimento e a densidade aparente tiveram correlação entre si, pelos coeficientes de Pearson. Porém, nas análises de regressão, os coeficientes de determinação foram baixos, ou seja, a densidade aparente não é explicada com precisão pela variação das características de anéis de crescimento, pois não teve correlação.

4.4 Modelos de regressão múltipla das propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* spp.

Com intuito de aprimorar as estimativas das propriedades mecânicas, os modelos de regressão múltipla foram ajustados (Tabela 11). Os modelos múltiplos de E_{c90} , K_{c90} e F_{c90} , em função de número de anéis de crescimento e densidade aparente, apresentaram evolução dos valores de R^2 , mas permaneceram baixos. De todos os modelos múltiplos significativos, o de F_{c90}^1 foi o mais preciso (R^2 igual a 22,50%) e o de F_{c90}^3 apresentou o menor valor de R^2 (18,60). A constante dos modelos k_{c90} em função de DA e A F_{c90}^3 em função de ELT não foram significativas, por esse motivo não foram apresentadas. De fato, os modelos não apresentaram correção.

Tabela 11 – Modelos de regressão múltipla das propriedades mecânicas em função de número de anéis de crescimento e densidade aparente

Equação	R ² %	S _{xy}	P-valor
Número de anéis de crescimento e densidade aparente (variáveis independentes)			
$E_{c90} = 170,973^{**} + 25,36^{**} \text{ NAC} + 0,3955^{**} \text{ DA}$	19,35	133,95	0,000 ^{**}
$F_{c90}^1 = 5,08^{**} + 0,452^{**} \text{ NAC} + 0,0084^{**} \text{ DA}$	22,50	2,37	0,000 ^{**}
$F_{c90}^2 = 5,594^{**} + 0,412^{**} \text{ NAC} + 0,009^{**} \text{ DA}$	22,10	2,41	0,000 ^{**}
$F_{c90}^3 = 5,70^{**} + 0,437^{**} \text{ NAC} + 0,007^* \text{ DA}$	18,60	2,32	0,000 ^{**}
Densidade aparente e espessura de lenho tardio (variáveis independentes)			
$E_{c90} = 142^{**} + 0,495^{**} \text{ DA} + 9,74^{**} \text{ ELT}$	19,00	134,25	0,000 ^{**}
$K_{c90} = 1,46 + 1,006^* \text{ DA} + 0,162^{**} \text{ ELT}$	25,28	1,59	0,000 ^{**}
$F_{c90}^1 = 5,30^{**} + 0,005^* \text{ DA} + 0,363^{**} \text{ ELT}$	31,10	2,24	0,000 ^{**}
$F_{c90}^2 = 6,26^{**} + 0,00574^* \text{ DA} + 0,362^{**} \text{ ELT}$	30,90	2,27	0,000 ^{**}

R²: coeficiente de determinação; S_{xy}: erro médio padrão absoluto; P-valor e os coeficientes a nível de probabilidade de erro em 1% e 5% de significância (**, * respectivamente), E_{c90}: módulo de elasticidade à compressão normal às fibras [MPa]; NAC: Número de anéis de crescimento por polegada; DA: Densidade aparente [kg m⁻³]; K_{c90}: rigidez à compressão normal às fibras [MPa mm⁻¹]; F_{c90}: a resistência à compressão normal às fibras em [MPa]; *¹ Conforme a Norma NBR 7190:1997; *² ISO 13910:2013; *³ ASTM D 143:2014.

Foram ajustados os modelos múltiplos de E_{c90}, K_{c90} e F_{c90} em função da densidade aparente a 12% e as espessuras do lenho tardio e lenho inicial. Porém, a espessura do lenho inicial não foi apresentada, pois não teve contribuição significativa no aumento das propriedades mecânicas. Todos os coeficientes de determinação (R²) foram considerados significativos mesmo sendo baixos. Enquanto, o modelo de F_{c90}², em função da ELT, obteve a maior precisão (R² igual a 30,90%), o modelo de E_{c90} teve o menor valor (R² igual a 19,00%), no entanto, comparados a regressão linear, todos os coeficientes (R²) aumentaram. Isso demonstra que a combinação de várias propriedades físicas e características dos anéis de crescimento podem melhorar a estimação das propriedades mecânicas.

No mesmo sentido, Irby *et al.* (2020) avaliaram a compressão paralela às fibras em corpos de prova com número de anéis de crescimento maior que 5 e obtiveram modelos mais precisos (R² igual a 46%). Isso demonstra que os valores baixos encontrados podem estar relacionados à alta porcentagem de amostras que tiveram número de anéis de crescimento por polegada, menor que 5 no lote utilizado.

A densidade aparente, o número de anéis de crescimento, a proporção da área e a espessura de lenho tardio não tiveram uma boa correlação com as propriedades mecânicas dos corpos de prova. Mesmo que tenha sido observado que a madeira com maior número de anéis de crescimento também tenha apresentado maior densidade aparente.

5. CONCLUSÕES

A densidade aparente da madeira, foi explicada em parte pelos números de anéis de crescimento, a espessura de lenho tardio e a proporção do lenho tardio.

A resistência à compressão normal às fibras mostrou diferença significativa entre as normas ISO 13910, NBR 7190 e ASTM D143. Além disso, a rigidez e o módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras variaram entre os tratamentos, sobretudo, para a madeira com anéis mais densos.

Embora sejam necessárias mais pesquisas com maior amplitude e corpos de prova com maiores dimensões, a madeira com anéis de crescimento densos é mais resistente. Uma evidência de que essas madeiras são mais adequadas para aplicações estruturais, assumindo que critérios de classificação possam ser estabelecidos para a seleção de peças mais aptas ao uso.

REFERÊNCIAS¹

AIRA, J. R.; ARRIAGA, F.; INIGUEZ-GONZALEZ, G. Determination of the elastic constants of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood by means of compression tests. **Biosystems Engineering**, v.126, p.12-22, 2014.

ALMEIDA, D. H.; SACALIANTE, R. M.; CHRISTOFORO, A. L.; VARANDA, D. L.; ROCCO LAHR, 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 OF TESTING AND MATERIAL – ASTM. **D143-14**. Standard test methods for small clear specimens of timber. PA. United States, 2014.

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

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

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

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Agricultural Engineering**, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

CARDOSO, A.; MOYA, L.; BORGES, A. Prediction of the bending stiffness of uruguayan loblolly and slash pine timber applying different statistical techniques. **BioResources**, v. 14, n. 1, p. 755-768, 2019.

CARRASCO, E. V.M.; PEREIRA, N. C. S.; ALVES, R. C. Estimativa da densidade aparente, resistência à compressão e módulo de elasticidade da madeira por meio do resistógrafo. **Construindo**, v. 5, n. 1, p. 45-51, 2013.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Critérios para classificação visual de peças estruturais de *Pinus sp.* **Pan American Conference for Nondestructive Testing Panndt**, Rio Janeiro, 2003.

CARREIRA, R. C.; DIAS, A. A. CALIL JR. C. Proposta de método para classificação visual estrutural de coníferas. **MADEIRA: arquitetura e engenharia**, v. 2, n. 2, p. 23. 2004.

CASTRO, V. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; SURDI, P. G. Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de *Pinus (Pinus caribaea var. hondurensis Barr. et Golf.)* por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 353-360, 2014.

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

CLARK III, A.; DANIELS, R.; JORDAN, L. Juvenile/mature wood transition in loblolly pine as defined by annual ring specific gravity, proportion of latewood, and microfibril angle. **Wood and Fibers Science**, v. 38, n. 2, p. 292-299, 2006.

COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT**. Maderas: Método de determinación de la compresión perpendicular al grano. 466. 1972.

DELUCIS, R. A; GATTO, D. A; SATANGERLIN, D. M; BELTRAME, R.; TREVISAN, R. Qualificação da madeira de três espécies de coníferas oriundas de reflorestamentos jovens. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 477-484, 2013.

DIAS, A. A. **Estudo da solicitação de compressão normal às fibras da madeira**. 1994. 161p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1994.

DIAS, F. M.; ROCCO LARH, F. A. A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira. **MADEIRA: arquitetura e engenharia**, v. 3, n. 8, p. 1-54, 2002.

FERREIRA, A. T. B. **Caracterização da estrutura anatômica do lenho, dos anéis de crescimento e dos canais de resina de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf**. (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2009.

FERREIRA, A. T. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 83, p. 287-298, 2009.

FLORSHEIM, S. M. B. **Isopropriedades da madeira em árvores de *Pinus caribaea* var. *bahamensis***. 2010. 226 p. Tese (Doutorado em Ciência área Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

FRITTS, H. C. **Tree Rings and Climate**. Laboratory of Tree-Ring Research University of Arizona, Tucson, Arizona, U.S.A. 571p. 1976.

HASELEIN, C. R.; CECHIN, E.; SANTINI, E. J.; GATTO, D. A. Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* Engelm aos 30 anos de idade. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 2, p. 135-144, 2000.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório 2019**. Brasil, 2019. p. 80.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – **ISO 16598**. Timber structures. Structural classification for sawn timber. Switzerland. 2014. 25 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **FDIS 13910 2013: N810** Timber structures – Strength graded timber – Test methods for structural properties. Revision: Oct 2013. 25 p.

IRBY, N. E.; FRANÇA, F. J. N.; BAMES, H. M.; SEALE, R. D.; SHMULSKY, R. Effect of growth rings per inch and density on compression parallel to grain in southern pine lumber. **Bioresources**, v. 15, n. 2, p. 2310-2325, 2020.

KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI, 508 p., 2010.

KRETSCHMANN, D. E. **Effect of Juvenile Wood on Shear Parallel and Compression Perpendicular-to-Grain Strength for Loblolly Pine**. USDA Forest Service Forest Products Laboratory, One Gifford Pinchot Drive, Madison, WI USA. 9p., 1997.

LADEIRA, L. A.; PEREIRA, C. C. A.; COUTO, L. C.; REIS, A. B. Determinação das propriedades físicas da madeira de *Pinus*. spp. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 7, p. 2244-2251, 2018.

LOBÃO, M. S.; LUCIA, R. M. D.; MOREIRA, M. S. S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004.

MARQUES, S. S.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, E. S.; SILVA, A. G.; FIELDER, 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.; STANGERLIN, D. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L. Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 67-73, 2010.

MISSIO, A. L.; CADEMARTORI, P. H. G.; MATTOS, B. D.; WEILER, M.; GATTO, DA Propriedades mecânicas da madeira resinada de *Pinus elliottii*. **Ciência Rural**, v. 45, n. 8, p. 1432-1438, 2015.

MORITANI, F. Y. **Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira: *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá)**. 2018.178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

MOYA, L.; BAÑO, V. Elastic behavior of fast-growth Uruguayan pine determined from compression and bending tests. **BioResources**, v. 12, n. 3, p. 5896-5912, 2017.

MOYA, L.; LAGUARDA, M.; MATÍAS, C.; Physical and Mechanical Properties of Loblolly and Slash Pine Wood from Uruguayan Plantations. **Forest Products Journal**, v. 63, n. 3/4, p. 128-137, 2013.

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

NUTTO, L.; MACHADO, S. A.; CAVALHEIRO, R.; SILVA, L. C. R. Comparação de metodologias para medição de anéis de crescimento de *Mimosa scabrella* e *Pinus taeda*. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 94, p. 135-144, 2012.

PINHEIRO, C. **Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de *Pinus elliottii***. 2014. 124 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2014.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2018.

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 Ciências Agrônomicas) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu SP, 2006.

RALL, R. **Processamento de imagens digitais para detecção e quantificação de defeitos na madeira serrada de coníferas de reflorestamento de uso não estrutural**. 2010. 128 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrônomicas) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2010.

RODRIGUEZ, C.; VERGARA, E. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus canariensis*. **Bosque**, v. 29, n. 3, p. 192-196, 2008.

ROSA, R. S. **Efeito sinérgico da associação exercício/aquecimento nas propriedades mecânicas e estruturais do tendão calcâneo**. (Doutorado em Bioengenharia) – Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

SANTOS, C. V. F. **Métodos de ensaios para a determinação da resistência ao cisalhamento em elementos estruturais de madeira de *Pinus spp.*** 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

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

SCHILLING, A.C. SCHNEIDER, P.R.; HASELEIN, C.R. FINGER, C.A.G. Influence of different pruning intensities on the percentage of summerwood and quantity of knots from first thinning of *pinus elliottii engelmann*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.8, n.1, p.115-127

SCHNEIDER, C.A., RASBAND, W.S., Eliceiri, K.W. "NIH Image to **ImageJ**: 25 years of image analysis". *Nature Methods* 9, 671-675, 2012.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Estimativas de propriedades da madeira de *pinus taeda* através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado**. 2005. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Paraná. Curitiba, 2005.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. **Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.*** In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 24. 1991, São Paulo. Anais. São Paulo: ABTCP, 1991. p. 178-183.

SIEGLOCH, A. M.; MARCHIORI, J. N. C. Anatomia da madeira de treze espécies de coníferas. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. v. 6, n. 3, p. 149-165, 2015.

SOARES FILHO, M. P. **Anatro UFPR – Software para análise de tronco, em meio digital, utilizando Sistema Polar**. 2014. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2014.

TRIANOSKI, R. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de *pinus* tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos**. 2012. 554 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2012.

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

VIDAURRE, G. B.; 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.

ZANGIÀCOMO, 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 Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 283-291, jun. 2013.

ZYLKOWSKI, S. 2002. **Introduction to wood as an engineering material**. APA Engineered wood handbook. Thomas G. Williamson, PE, Editor. McGraw-Hill Publishing, ISBN 0-07-136029-8.

APÊNDICES

Apêndice A – Simbologia apresentada ao longo das definições dos apêndices

Sigla	Unidade	Definição
ID	Adimensional	Identificação da amostra
F_{c90}^1	[MPa]	Resistência à compressão normal às fibras avaliada conforme os requisitos da Norma NBR 7190:1997
F_{c90}^2	[MPa]	Resistência à compressão normal às fibras avaliada conforme os requisitos da Norma ISO: 13910
F_{c90}^3	[MPa]	Resistência à compressão normal às fibras avaliada conforme os requisitos da Norma ASTM
E_{c90}	[MPa]	Módulo de elasticidade na compressão perpendicular às fibras
K_{c90}	[MPa) mm ⁻¹]	Rigidez à compressão perpendicular às fibras
PLT	[%]	Proporção de lenho tardio
ELT	[mm]	Espessura do lenho tardio
NAC	[Unidade/polegada]	Número de anéis de crescimento
DA	[kg m ⁻³]	Densidade aparente a 12% de umidade

Apêndice B – Características dos anéis de crescimento e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* spp. da classe Tangencial densa

ID	F _{c90} ¹	F _{c90} ²	F _{c90} ³	E _{c90}	K _{c90}	PLT	ELT	NAC	DA
1	14,36	16,24	15,80	797,06	9,15	50,32	12,55	4	530,00
55	15,50	16,35	15,80	799,78	10,31	43,66	13,35	6	653,63
88	11,87	12,73	10,85	455,47	6,78	34,88	12,91	6	540,58
234	15,55	16,43	15,55	660,96	8,64	64,72	12,72	5	495,69
274	13,04	13,93	13,02	768,50	8,65	37,98	12,31	7	577,65
285	12,88	13,49	12,44	531,29	7,99	58,22	12,14	4	537,08
300	12,68	12,91	11,73	664,38	8,85	35,32	12,96	9	538,54
302	10,32	10,90	10,55	412,52	6,31	34,58	10,81	4	496,55
321	15,23	15,48	14,09	864,92	9,70	33,14	12,95	6	515,07
420	14,64	15,91	13,84	630,23	7,09	58,06	11,19	6	619,41
438	12,81	13,58	11,94	527,10	8,15	37,31	11,08	6	533,28
527	15,36	16,24	13,84	723,24	8,14	50,95	11,33	4	481,71
773	13,04	14,17	10,66	550,88	7,72	36,28	10,09	6	540,00
779	12,29	12,73	10,41	567,60	6,32	33,97	10,39	5	514,20
847	18,31	19,53	16,33	799,93	7,93	34,22	12,96	7	560,59
860	11,01	12,57	9,56	515,56	5,87	43,85	10,67	4	638,54
1136	12,02	13,06	10,58	483,14	7,71	35,67	8,77	10	777,18
1154	20,54	19,55	17,97	892,79	11,11	39,28	11,43	6	504,51
1178	14,24	15,25	14,07	630,27	8,84	38,22	9,43	6	625,90
1208	7,26	9,13	6,53	430,85	4,83	37,84	10,66	6	560,00
1212	11,12	11,66	10,88	436,34	4,91	39,03	10,34	6	537,08
1226	10,08	10,42	9,82	440,87	6,64	36,15	9,87	5	534,37
1233	8,14	9,94	8,36	465,50	5,87	30,59	12,00	5	530,29
1283	11,47	12,47	11,48	406,28	7,44	46,59	12,86	6	691,43
1302	12,45	14,46	12,70	481,93	5,40	54,90	9,38	5	586,76
1347	12,33	13,68	12,98	580,00	6,51	36,70	11,81	6	509,71
1406	8,92	9,79	8,81	399,82	4,52	60,42	7,97	5	517,51
1598	14,96	16,71	15,09	652,79	7,34	34,49	10,62	6	424,00
1802	13,28	14,06	12,71	499,16	5,61	37,12	12,26	6	537,08
1805	15,40	16,97	15,94	831,78	9,35	50,76	14,72	4	563,52
2013	10,20	11,01	8,23	398,87	4,49	47,88	11,34	6	570,88
2014	17,38	18,64	12,44	526,55	9,04	30,10	14,86	4	476,87
2064	13,97	14,63	12,82	633,62	7,13	89,78	13,19	4	592,36
2079	11,01	11,52	9,63	450,52	5,09	68,09	11,71	4	527,96
2081	16,20	16,93	14,80	645,81	9,20	34,32	10,48	6	504,51
2092	14,99	15,85	14,59	658,99	9,28	12,36	12,82	4	523,88
2126	13,19	14,13	11,78	679,79	7,65	8,79	13,58	4	554,72
2207	18,66	20,71	16,88	614,43	9,94	30,52	11,56	6	498,44
2255	13,36	14,46	13,76	705,89	7,97	35,71	13,58	6	552,66
2287	10,40	11,91	8,39	441,39	5,71	39,67	11,30	7	621,22
2295	12,82	14,74	12,44	556,75	6,28	43,11	13,29	6	540,88
2296	13,76	14,28	12,42	478,98	7,57	45,40	11,88	7	688,86
2304	11,55	11,64	9,89	533,87	7,74	42,52	11,30	6	578,53
2305	18,64	20,50	17,20	769,83	9,53	46,18	10,34	6	592,65
2325	10,61	13,19	8,83	471,21	9,08	41,20	13,35	6	610,00
2373	11,34	11,89	9,91	331,21	4,61	44,89	12,96	6	481,99
2395	15,07	16,44	15,10	629,50	7,10	40,49	13,19	4	575,30
2396	15,14	16,27	13,42	635,09	7,26	43,11	10,29	6	585,88
2455	9,05	10,56	8,70	347,88	5,37	96,26	9,38	5	467,18
2486	12,00	12,59	10,82	507,95	7,42	24,04	10,08	5	515,49

Apêndice C – Características dos anéis de crescimento e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* spp. da classe Tangencial não densa

ID	F _{c90} ¹	F _{c90} ²	F _{c90} ³	E _{c90}	K _{c90}	PLT	ELT	NAC	DA
16	8,03	8,97	8,44	265,94	3,03	20,04	5,10	2	365,69
66	9,70	10,63	10,14	281,89	3,16	27,67	3,96	4	472,33
86	8,10	9,02	8,61	255,50	2,87	21,83	5,48	2	423,78
95	10,26	11,03	10,00	252,97	3,41	5,23	7,48	3	360,36
108	8,00	8,67	7,81	297,02	3,33	33,17	3,91	3	358,25
254	12,66	13,56	12,81	480,47	5,28	68,91	8,62	3	457,48
403	8,81	9,37	8,57	258,06	2,90	16,00	10,00	3	414,01
430	9,73	10,88	10,18	340,63	3,83	40,18	3,90	3	421,35
468	16,04	17,59	15,96	419,02	4,72	5,92	12,43	4	483,42
488	12,66	13,76	13,53	557,77	6,69	6,39	11,09	4	502,01
534	8,10	9,07	8,23	313,01	3,53	31,01	7,48	4	451,11
645	12,19	12,76	11,66	423,27	4,85	11,01	4,96	3	379,57
736	8,65	9,36	8,12	288,70	3,85	5,63	6,53	2	470,05
750	14,02	15,06	13,56	429,91	4,83	20,30	7,57	3	383,48
800	8,17	9,16	8,30	232,08	3,13	25,58	6,67	2	408,13
813	11,50	12,28	11,79	406,43	4,58	29,36	7,62	3	425,09
859	10,05	10,88	9,64	393,26	4,45	39,45	9,40	4	501,73
907	13,16	15,59	14,70	415,46	4,23	31,52	10,52	4	382,18
963	7,17	8,04	6,81	254,61	2,87	20,54	7,67	2	397,89
1031	8,34	9,40	8,64	242,70	3,19	26,48	4,15	3	397,89
1090	9,22	10,01	9,21	324,03	3,65	21,67	8,05	2	398,68
1098	7,90	9,02	7,75	339,50	4,02	25,01	8,52	3	403,96
1101	10,05	10,97	9,56	350,78	3,96	26,79	8,48	4	463,51
1192	8,72	10,29	8,98	349,17	4,72	3,93	10,44	4	490,23
1201	10,60	11,77	11,33	337,99	4,35	27,02	10,10	4	488,86
1258	9,60	10,24	9,73	502,17	5,66	5,23	7,38	4	445,28
1296	10,83	12,55	10,99	424,00	4,08	21,44	4,72	3	379,23
1353	12,97	13,68	13,57	515,91	4,88	26,14	4,48	3	431,36
1355	10,68	11,68	11,45	364,93	4,31	30,25	7,60	3	380,35
1383	9,37	9,96	9,79	237,86	3,29	26,29	5,10	3	420,00
1721	8,26	8,77	8,52	281,26	2,67	25,67	5,71	4	424,32
1884	11,19	11,45	10,65	353,58	4,60	17,94	4,87	3	373,57
1908	8,22	8,97	8,28	270,20	3,52	26,14	2,38	2	434,22
1961	10,76	12,16	10,37	311,68	4,65	60,85	6,20	2	488,21
1986	14,91	15,64	12,47	463,92	6,83	35,34	5,36	3	456,73
1990	13,13	13,46	11,61	489,84	6,59	33,21	8,14	3	426,73
2015	11,69	12,42	11,60	561,49	6,38	34,63	4,01	4	547,07
2023	15,84	16,19	14,30	645,13	7,29	32,11	7,67	4	549,71
2036	12,94	13,76	13,36	483,26	5,45	35,76	4,53	4	461,40
2037	8,92	9,48	8,93	336,58	3,78	32,40	8,48	4	494,83
2051	10,45	11,07	10,36	408,89	4,66	17,26	6,58	2	410,00
2106	10,01	10,88	9,80	368,82	3,87	6,28	8,00	2	403,32
2117	9,55	10,23	9,34	339,00	3,86	25,09	5,67	3	439,45
2172	12,03	12,80	12,31	371,55	5,21	6,83	6,43	3	393,40
2245	12,28	13,15	11,88	631,79	6,33	40,66	7,72	3	472,90
2254	12,77	13,44	13,07	546,55	4,90	38,83	4,86	3	459,44
2311	11,17	11,78	10,20	384,90	4,27	23,42	5,67	3	399,47
2341	9,99	10,54	10,33	372,01	4,20	28,82	7,40	4	404,92
2477	11,21	11,90	10,54	368,49	4,13	5,56	10,57	2	403,06
2497	11,96	12,84	11,13	530,25	6,10	23,56	7,75	2	359,09

Apêndice D – Características dos anéis de crescimento e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* spp. da classe Radial tangencial densa

ID	F _{c90} ¹	F _{c90} ²	F _{c90} ³	E _{c90}	K _{c90}	PLT	ELT	NAC	DA
51	13,71	15,14	13,38	661,95	7,56	49,26	9,43	7	612,94
79	13,29	13,80	14,00	488,77	5,48	45,65	10,77	6	574,11
88	12,64	14,07	13,37	749,89	8,73	79,29	10,17	4	482,57
230	8,88	10,52	9,37	334,92	3,74	76,82	12,55	5	581,47
247	10,65	11,18	11,06	358,30	5,19	32,88	8,25	4	526,80
292	11,38	12,37	10,77	441,52	5,90	36,01	10,22	6	484,55
485	9,93	10,26	9,98	332,95	3,75	31,49	10,98	4	587,06
503	13,71	14,90	12,97	547,81	9,56	31,49	11,60	4	475,99
754	13,01	13,98	13,02	551,83	6,24	38,28	10,10	4	484,00
819	10,23	11,97	9,16	456,94	5,16	31,62	9,26	6	511,16
1071	14,14	16,08	15,00	809,28	9,16	37,06	12,09	6	521,45
1260	7,96	9,65	9,13	356,96	4,82	72,13	9,99	5	590,00
1263	9,48	11,10	8,49	557,63	6,39	50,91	10,12	4	618,22
1271	9,79	11,80	10,24	486,40	5,50	36,73	8,97	6	528,84
1290	12,67	14,65	12,73	829,25	7,85	73,00	10,12	5	672,60
1291	10,77	11,74	10,19	519,43	5,83	67,97	12,86	7	596,76
1312	14,89	16,37	15,83	807,28	9,08	42,26	10,24	6	571,47
1314	10,16	11,33	11,05	550,37	6,19	45,34	11,00	6	625,57
1317	12,77	14,03	13,17	444,65	4,26	38,03	10,55	6	441,94
1346	10,43	11,58	10,24	358,20	5,17	28,58	11,36	4	448,61
1347	10,82	11,38	11,02	523,40	4,83	42,65	11,72	6	554,13
1358	16,94	18,25	17,20	702,91	9,42	39,47	10,22	4	552,34
1375	11,77	13,23	11,47	529,37	5,94	33,61	11,48	4	531,46
1437	10,63	11,18	10,84	436,00	4,96	31,63	10,00	4	485,43
1808	10,65	11,35	10,44	310,82	5,35	35,16	13,54	5	622,35
1863	13,42	14,53	14,20	569,44	7,41	13,40	12,62	4	519,13
1888	10,08	10,59	9,64	392,80	5,77	74,63	11,58	6	568,82
1909	13,06	14,51	12,42	482,60	8,00	51,86	10,56	6	630,00
1942	13,10	14,90	12,23	701,14	9,36	39,81	11,74	4	608,53
1996	15,20	16,26	14,91	609,95	6,88	66,15	11,10	6	550,61
2013	9,28	9,87	8,84	384,13	5,10	60,21	10,02	6	530,36
2062	10,26	10,92	10,17	388,72	5,34	34,73	12,50	6	482,57
2096	12,81	15,60	10,04	409,20	4,92	36,83	12,41	4	537,41
2145	10,21	10,86	10,15	397,26	6,05	60,07	11,37	5	585,59
2147	14,32	15,75	14,33	566,60	8,23	41,69	11,09	3	511,44
2235	12,24	13,69	12,56	438,01	6,83	66,02	12,70	4	553,54
2241	16,97	17,94	16,30	743,42	8,31	65,12	10,30	4	666,54
2263	10,46	12,71	10,41	500,19	5,73	77,59	11,35	5	582,94
2266	13,34	14,11	13,29	480,39	5,37	73,92	9,17	6	659,42
2267	9,88	10,66	10,42	445,43	5,00	35,17	9,73	6	486,57
2272	8,89	9,48	8,65	359,93	4,82	37,14	9,15	4	541,17
2280	13,22	14,00	13,73	461,25	6,61	43,52	11,96	6	519,42
2290	6,93	8,52	6,63	296,19	3,51	28,05	12,83	6	529,13
2313	9,87	11,00	8,72	500,65	5,87	46,85	11,01	6	635,04
2343	17,70	18,41	17,35	774,66	9,67	48,14	9,29	6	590,00
2351	10,85	11,97	9,88	323,45	4,51	66,91	11,80	4	580,88
2356	15,47	16,55	14,49	471,12	5,51	29,96	11,09	4	484,57
2383	12,17	13,22	12,66	518,24	6,20	33,07	10,31	6	516,23
2385	11,84	13,53	11,61	470,30	5,39	51,58	11,46	4	545,31
2476	11,84	12,75	12,45	429,36	5,16	34,07	11,77	4	509,98

Apêndice E – Características dos anéis de crescimento e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* spp. da classe Radial tangencial não densa

ID	F _{c90} ¹	F _{c90} ²	F _{c90} ³	E _{c90}	K _{c90}	PLT	ELT	NAC	DA
61	10,22	11,08	10,01	609,14	6,79	62,39	2,15	3	543,56
98	9,89	11,74	9,01	614,17	7,01	43,76	4,80	2	472,04
123	8,85	11,17	7,58	381,85	5,05	32,69	6,03	3	499,14
127	12,37	13,32	8,48	449,19	5,81	39,79	4,91	3	485,40
439	10,41	11,77	9,90	315,89	4,92	69,61	4,54	3	483,71
530	10,84	12,19	10,50	569,18	4,62	74,93	5,61	3	480,28
535	11,65	12,46	11,33	492,30	7,68	26,84	7,41	3	422,09
826	8,67	9,07	7,68	334,66	5,37	15,46	4,24	2	469,15
855	8,03	8,71	7,90	582,53	5,13	8,11	4,62	4	547,95
884	10,77	11,77	9,61	545,01	5,52	15,79	5,29	3	420,45
926	11,98	12,60	10,64	122,02	1,61	13,50	5,96	3	483,71
928	7,47	8,02	7,23	459,80	6,11	6,08	3,14	2	425,36
952	11,19	12,49	10,91	362,24	3,87	20,84	5,96	2	334,92
1017	9,60	10,22	9,18	297,84	4,44	28,63	10,12	2	442,22
1127	8,31	8,75	8,69	373,01	5,99	26,12	9,00	3	522,90
1194	11,36	12,30	11,08	59,67	3,77	8,71	10,34	3	539,12
1381	6,59	7,06	6,13	485,09	6,71	22,66	6,31	5	421,62
1409	8,38	8,98	7,78	466,92	5,52	6,82	5,39	2	454,68
1742	12,26	14,00	10,62	328,71	3,76	9,61	5,01	2	300,87
1926	8,90	9,02	8,70	555,01	6,52	60,13	6,48	2	386,61
1955	14,89	16,00	14,43	484,07	5,90	9,17	7,52	2	455,80
1956	10,84	12,85	8,65	382,28	5,13	6,66	8,02	3	526,80
1987	7,93	9,56	6,97	332,15	3,69	7,59	3,33	3	548,54
2022	11,24	11,97	10,25	378,27	4,80	7,56	3,34	2	379,31
2050	7,72	9,41	6,28	593,47	7,98	3,97	4,87	3	428,98
2052	10,29	11,38	9,19	372,12	4,43	26,37	7,49	3	435,32
2065	9,30	9,78	7,71	525,40	5,92	38,37	7,21	3	514,49
2074	10,43	10,50	8,48	497,96	6,00	11,35	5,64	2	391,29
2085	7,82	9,09	6,77	187,12	2,74	12,83	8,74	3	380,09
2104	9,45	10,08	8,28	414,77	4,65	9,02	1,69	2	398,68
2128	11,40	12,38	9,83	527,65	5,91	9,26	5,74	3	461,82
2182	10,57	11,61	10,12	301,86	3,70	7,15	5,62	2	457,48
2191	10,45	11,36	9,83	428,20	5,33	26,89	5,21	3	451,88
2216	10,65	11,62	10,17	199,57	2,26	16,93	5,41	3	434,77
2219	12,02	12,82	10,54	323,85	3,03	36,59	6,67	3	468,63
2227	13,12	13,55	12,58	379,99	5,07	10,71	4,24	2	440,00
2228	10,89	11,86	9,54	782,12	9,05	7,53	6,36	3	498,28
2240	12,52	13,56	12,36	218,47	2,48	7,25	6,90	2	460,69
2247	9,17	10,85	8,97	513,91	6,52	37,23	5,33	3	529,78
2264	8,39	9,00	7,41	352,60	4,51	26,38	1,74	3	461,82
2274	9,53	10,27	8,57	404,81	5,56	7,39	7,08	2	354,50
2310	12,23	13,38	11,13	548,48	6,93	7,61	6,00	3	409,47
2318	8,59	9,05	7,28	290,01	4,18	30,24	3,90	3	466,64
2327	10,51	11,26	9,29	456,72	5,26	21,13	7,21	3	372,27
2344	9,33	10,01	8,73	438,18	5,59	30,48	7,43	4	463,52
2355	11,47	13,69	11,21	334,27	3,79	24,53	5,61	2	405,99
2389	11,19	11,61	10,16	315,48	4,67	6,45	6,90	3	499,43
2404	6,92	8,22	5,93	444,69	4,99	5,65	5,24	2	415,95
2417	10,03	11,26	9,98	614,52	8,62	16,00	7,95	3	353,25
2425	8,58	9,34	8,80	477,44	6,03	29,79	5,57	3	470,00

Apêndice F – Características dos anéis de crescimento e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus* spp. da Classe medular

ID	F _{c90} ¹	F _{c90} ²	F _{c90} ³	E _{c90}	K _{c90}	PLT	ELT	NAC	DA
7	8,91	10,75	9,74	320,10	4,79	13,89	3,00	3	371,51
8	9,71	11,98	10,71	387,03	5,27	8,76	5,43	2	448,33
15	6,80	8,35	7,11	312,77	3,37	10,50	2,43	3	358,75
17	8,60	10,34	9,22	477,01	5,62	6,18	4,43	2	409,20
20	7,75	9,11	8,44	328,62	5,61	4,06	10,41	2	377,43
22	10,49	11,66	10,70	364,17	5,38	17,44	8,33	3	419,19
23	9,16	10,06	9,81	447,46	6,56	54,74	5,38	2	407,86
24	6,95	8,57	7,36	280,67	3,19	20,90	4,30	3	419,46
25	8,24	10,06	8,81	236,75	2,55	19,78	2,67	3	437,80
26	8,18	9,74	8,85	323,03	3,36	28,99	5,04	2	396,04
31	3,22	3,83	3,56	456,30	5,13	20,56	4,41	3	477,44
33	8,01	10,71	9,34	181,40	2,64	20,10	8,00	2	419,46
34	7,78	8,88	8,00	482,86	5,44	10,86	9,28	3	406,53
36	7,40	8,12	7,33	294,75	4,19	11,35	4,99	3	406,26
39	7,18	7,63	7,12	335,44	3,77	8,41	3,88	3	377,43
48	6,77	7,15	5,63	400,97	6,65	16,94	4,33	3	418,11
50	10,43	12,83	11,46	245,07	3,26	13,05	4,53	3	456,64
119	7,41	8,93	8,76	254,03	3,43	16,71	6,77	3	448,89
121	7,53	8,61	6,61	459,41	5,17	12,56	3,10	3	384,79
210	8,34	9,44	8,28	275,01	3,56	24,83	4,38	3	337,34
268	8,28	9,58	8,65	586,69	8,06	20,94	3,57	3	376,14
464	8,38	10,16	8,60	480,64	5,48	10,89	2,42	3	408,93
470	6,13	7,22	5,96	346,04	3,97	12,25	3,76	3	366,70
489	8,67	10,55	9,14	383,30	5,14	31,48	8,86	2	328,64
718	8,83	9,09	7,98	212,46	2,62	14,79	7,29	3	413,47
772	9,51	10,06	7,72	386,66	4,35	26,36	4,30	3	437,77
841	10,67	11,79	10,90	337,83	4,76	18,62	4,14	3	417,84
855	9,32	10,53	9,23	341,97	4,53	3,94	2,95	2	350,01
890	6,73	7,65	6,71	253,49	3,45	4,68	5,53	2	352,25
923	9,32	10,28	9,17	319,89	4,51	13,42	6,19	3	363,66
1144	8,72	10,40	9,60	417,52	5,21	3,13	2,76	3	401,99
1167	6,65	7,50	6,50	375,79	4,19	3,81	3,72	2	427,00
1235	7,59	9,47	8,21	417,60	4,70	3,96	6,05	2	438,62
1236	6,17	6,99	5,93	360,57	4,07	3,11	2,14	2	328,58
1360	8,15	10,02	9,50	458,59	5,04	11,74	2,28	2	366,96
1401	7,48	8,90	7,84	474,70	5,34	10,20	2,71	3	364,67
1417	9,91	10,88	10,25	452,76	5,09	12,33	7,52	2	343,61
1448	6,40	8,00	6,70	634,82	7,56	16,85	3,57	3	380,35
1755	10,56	11,81	11,37	382,25	3,88	5,94	3,00	2	409,73
1869	7,95	9,27	8,46	262,32	3,15	24,46	6,48	2	409,47
1881	9,40	10,38	9,38	364,19	4,84	4,48	1,95	2	378,46
1914	10,15	11,58	10,59	538,84	6,51	7,67	7,38	2	400,79
1957	8,54	9,41	7,40	245,41	3,06	22,24	5,86	3	416,49
2076	8,32	10,69	9,21	439,94	5,02	12,62	4,14	3	402,25
2107	8,20	9,17	8,53	324,24	3,66	9,15	4,05	3	368,73
2198	8,55	9,65	7,94	628,97	7,12	19,92	10,22	3	411,34
2237	7,44	8,58	7,63	452,71	5,16	19,67	4,52	4	428,64
2281	8,77	10,53	8,70	206,48	2,32	13,12	6,24	4	456,92
2426	12,63	15,49	13,12	442,86	4,99	7,14	3,33	3	456,64
2451	9,02	10,22	9,80	401,83	4,49	18,34	8,57	2	375,37