



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

GEISE APARECIDA PEREIRA

**INFLUÊNCIA DO FORMATO E DA DIMENSÃO DO CORPO DE PROVA
POLIÉDRICO NA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA POR
ULTRASSOM**

**INFLUENCE OF THE SHAPE AND SIZE OF THE POLYEDRAL
SPECIMEN ON THE CHARACTERIZATION OF WOOD BY
ULTRASOUND**

**CAMPINAS
2023**

GEISE APARECIDA PEREIRA

**INFLUÊNCIA DO FORMATO E DA DIMENSÃO DO CORPO DE PROVA
POLIÉDRICO NA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA POR ULTRASSOM**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola na área de Métodos Não Destrutivos Aplicados a Materiais, Estruturas e Árvores.

Orientadora: Cinthya Bertoldo Pedroso

Este trabalho corresponde à versão final da dissertação defendida pela aluna Geise Aparecida Pereira orientada pela profa. Dra. Cinthya Bertoldo Pedroso.

CAMPINAS
2023

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): FAPESP, 2016/00654-4

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

P414i Pereira, Geise Aparecida, 1981-
Influência do formato e da dimensão do corpo de prova poliédrico na
caracterização da madeira por ultrassom / Geise Aparecida Pereira. –
Campinas, SP : [s.n.], 2023.

 Orientador: Cinthya Bertoldo Pedroso.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Agrícola.

 1. Propagação de ondas ultrassônicas. 2. Método não destrutivo. 3.
Constantes elásticas. 4. Matriz de flexibilidade. I. Pedroso, Cinthya Bertoldo,
1982-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Agrícola. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Influence of the shape and size of the polyedral specimen on the characterization of the wood by ultrasound

Palavras-chave em inglês:

Wave propagation

Ultrasonic waves

Non-destructive tests

Elastic constants

Área de concentração: Métodos Não Destrutivos Aplicados a Materiais, Estruturas e Árvores

Titulação: Mestra em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Cinthy Bertoldo Pedroso [Orientador]

Raquel Gonçalves

Rejane Costa Alves

Julio Soriano

Alex Trinca

Data de defesa: 28-02-2023

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: 0009-0001-8036-6365

- Currículo Lattes do autor: <https://lattes.cnpq.br/5847960177242178>

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Geise Aparecida Pereira**, aprovada pela Comissão Julgadora em 28 de fevereiro de 2023, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Prof.^a Dr.^a Cinthya Bertoldo Pedroso – Presidente e Orientadora

Prof.^a Dr.^a Raquel Gonçalves – Membro Titular

Prof.^a Dr.^a Rejane Costa Alves – Membro Titular

Prof. Dr. Julio Soriano – Membro Suplente

Dr. Alex Trinca – Membro Suplente

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

DEDICATÓRIA

A Deus dono de toda ciência, toda honra, toda glória e louvor para sempre.

A orientadora e amiga Cinthya Bertoldo Pedroso.

A minha filha Beatriz Pereira Pacini.

A amiga Eva Antônia Alves de Freitas.

Fontes de alegria, apoio e energia que não desistem de acreditar em mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo seu infinito amor.

A minha filha Beatriz Pereira Pacini minha fonte inesgotável de energia.

A meus pais Maria e Joaquim, e meus irmãos Silvana e Anderson por acreditar sempre em mim.

A professora Doutora Cinthya Bertoldo Pedroso, pelo incentivo, amizade e apoio para o desenvolvimento deste trabalho, imprescindíveis para a conclusão desse projeto.

Aos professores e funcionários da FEAGRI e LabEND/UNICAMP, pela dedicação, ajuda e pelos conhecimentos compartilhados.

Aos amigos Paulo Gustavo Krejci Nunes, Beatriz Achilles, Carlos Bento e Julio Soma por todo apoio.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP –Processo nº 2016/00654-4) pelo financiamento dessa pesquisa.

RESUMO

O apelo por construções sustentáveis e ecológicas é crescente e a madeira ganha espaço, se destacando nesse quesito para tal finalidade. Frente a essa demanda está a utilização de softwares dia a dia mais precisos no dimensionamento, que necessitam da inserção das propriedades elásticas de forma completa do material utilizado no dimensionamento. A caracterização completa da madeira pode ser feita de forma relativamente simplificada com a utilização de ensaios não destrutivos, por meio do uso de apenas um corpo de prova no formato poliédrico. O tamanho e o formato do corpo de prova poliédrico utilizado para a caracterização elástica da madeira por ultrassom já estão bem estabelecidos e já foi utilizado em diversas pesquisas, porém nota-se dificuldade na obtenção dos termos fora da diagonal principal da matriz de rigidez, ocasionada pela inclinação dos anéis de crescimento presente nas faces radial-tangencial, isso devido à dimensão do corpo de prova atualmente empregado na caracterização da madeira. Tendo em vista esse aspecto, o objetivo da pesquisa foi verificar se a redução das dimensões e do número de faces do corpo de prova poliédrico tradicionalmente utilizado (26 faces partindo de cubo de 70 mm de aresta) altera os resultados dos parâmetros elásticos obtidos na caracterização da madeira por ultrassom. Para atingir os objetivos da pesquisa três espécies de madeira com diferentes densidades foram caracterizadas por ensaios de ultrassom, utilizando-se para isso corpos de prova poliédricos de 26 faces de dimensões tradicionalmente utilizadas na literatura, considerado como referência, poliedros de 26 faces de dimensão reduzida e poliedros de 18 faces, ambos partindo-se de cubos de aresta com aproximadamente metade da dimensão poliedro tradicional ($\cong 35$ mm). Os resultados da pesquisa nos permitiram concluir que, com a redução do número de faces, passando de 26 para 18, foi possível reduzir a inclinação dos anéis de crescimento, apesar de não ter sido possível verificar alterações significativas nos valores das propriedades elásticas e seus coeficientes de variação.

Palavras-chave: propagação de ondas ultrassônicas, método não destrutivo, constante elásticas, matriz de flexibilidade.

ABSTRACT

The appeal for sustainable and ecological buildings is growing and wood is gaining space and stands out in this regard for this purpose. Faced with this demand is the use of more accurate day-to-day software for dimensioning, which requires the complete insertion of the complete elastic properties of the material used in the dimensioning. The complete characterization of the wood can be done in a relatively simplified way with the use of non-destructive tests, through the use of only one specimen in polyhedral format. The size and shape of the polyhedral specimen used for the elastic characterization of wood by ultrasound are already well established and it has already been used in several studies, but it is difficult to obtain terms outside the main diagonal of the stiffness matrix, caused by inclination of the growth rings present in the radial-tangential faces, this due to the size of the specimen currently used in the characterization of the wood. In view of this aspect, the objective of the research was to verify whether the reduction of dimensions and the number of faces of the traditionally used polyhedral specimen (26 faces starting from a cube with a 70 mm edge) alters the results of the elastic parameters obtained in the characterization of the wood by ultrasound. To achieve the research objectives, three wood species with different densities were characterized by ultrasound tests, using 26-sided polyhedral specimens with dimensions traditionally used in the literature, considered as a reference, polyhedral with 26 faces of reduced dimension and polyhedral with 18 faces, both starting from cubes with edges approximately half the traditional polyhedron dimension ($\cong 35$ mm). The research results allowed us to conclude that, by reducing the number of faces, from 26 to 18, it was possible to reduce the inclination of the growth rings, although it was not possible to verify significant changes in the values of the elastic properties and their coefficients of variation.

Keywords: propagation of ultrasonic waves, non-destructive method, elastic constants, flexibility matrix.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	10
2. ARTIGO.....	12
2.1 Artigo: EFEITO DA REDUÇÃO DA DIMENSÃO E DO NÚMERO DE FACES DO CORPO DE PROVA POLIÉDRICO NA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA POR ULTRASSOM.	12
3. DISCUSSÃO GERAL	40
4. CONCLUSÃO GERAL	42
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO GERAL

A cobertura florestal brasileira é de cerca de 495 milhões de hectares, o que corresponde a 60% do território nacional e cerca de 98% dessa área é representada por florestas nativas (ABIMCI, 2022), mesmo assim o emprego da madeira, não é destaque na construção civil. Isso ocorre devido o costume do emprego do concreto e alvenaria na área, acrescido da falta de conhecimento das propriedades mecânicas da madeira. O uso da madeira tem como vantagem durabilidade, economia de energia, além de conforto térmico e estético capaz de trazer a natureza para meios urbanos. Mesmo tendo essa gama de finalidades a madeira ainda é mal aproveitada devido à divulgação insuficiente de informações tecnológicas e falta de projetos específicos (Calil Junior, 2003).

Crespo et al. (2017) citam que para a análise de estruturas de madeira há a necessidade de se obter características elásticas confiáveis relacionadas a um modelo teórico que descreva o comportamento elástico do material.

No Brasil, a maioria dos trabalhos sobre as propriedades elásticas da madeira inclui apenas o módulo de elasticidade na direção longitudinal. Isso ocorre devido a dificuldade em determinar o módulo de cisalhamento nos três planos de simetria, além dos coeficientes de Poisson (Gonçalves et al., 2011).

A madeira é considerada um material ortotrópico, pois responde de forma distinta para os três eixos de simetria (longitudinal - L, radial - R e tangencial - T). O eixo L é paralelo à direção da grã (fibras e/ou traqueídes), o eixo R é perpendicular à grã, na direção dos raios, e o eixo T é perpendicular à grã, mas tangencia os anéis de crescimento. Sendo assim, para a caracterização completa desse material é necessária a determinação de doze constantes elásticas: três módulos de elasticidade longitudinais (E_L , E_R , E_T), três módulos de elasticidade transversais (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}) e seis coeficientes de Poisson (μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TR} , μ_{LT} , μ_{TL}).

Determinar estas constantes utilizando métodos estáticos, como por exemplo ensaio de compressão, é viável, porém trabalhoso, complexo em termos da necessidade de equipamentos (máquina de ensaios e sistema de aquisição de dados) e onerosos, pois é necessário o uso de grande quantidade de extensômetros. De acordo com Gonçalves et al. (2011) estudos sobre a caracterização de propriedades da madeira tem se mostrado eficiente através do ensaio por meio de ultrassom.

Atualmente o grupo de pesquisas do laboratório de ensaios não destrutivos (LabEND) da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP) já apresenta metodologia e geometria do corpo de prova definidos para caracterização da madeira por ultrassom, porém há dificuldades e divergências de resultados quando da obtenção dos termos fora da diagonal principal da matriz de rigidez. Uma das possíveis causas para esse problema são os desvios das frentes de ondas ocasionados pela inclinação dos anéis de crescimento que, teoricamente poderiam ser minimizados, com a redução do corpo de prova poliédrico atualmente utilizado para a caracterização da madeira por ultrassom.

Ao discutirem a questão da discrepância de alguns dos resultados dos coeficientes de Poisson, os autores Trinca (2011); Gonçalves et al. (2011) e Gonçalves et al. (2014) indicam a hipótese de que a dimensão do corpo de prova seja a principal responsável, citando que a inclinação dos anéis de crescimento estaria afetando a precisão dos ensaios. Em materiais heterogêneos a propagação da onda pode sofrer interferências significativas ao passar por elementos diferenciados, desta forma, quanto maior o corpo de prova, maiores as chances de ocorrerem tais discrepâncias. A inclinação dos anéis de crescimento só pode ser minimizada em corpos de prova de pequenas dimensões.

A questão central desse trabalho foi verificar a influência da redução do número de faces e da dimensão do poliedro nos parâmetros elásticos obtidos através da caracterização da madeira por ultrassom. A dissertação foi elaborada em formato alternativo como prevê a Instituição. De acordo com esse formato, a dissertação está apresentada em quatro partes principais: Introdução geral, o artigo que atualmente está em fase de envio à publicação, por fim Discussão Geral e Conclusão Geral.

2. ARTIGO

2.1 Artigo: EFEITO DA REDUÇÃO DA DIMENSÃO E DO NÚMERO DE FACES DO CORPO DE PROVA POLIÉDRICO NA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA POR ULTRASSOM.

Artigo submetido a: Materials

Data de submissão: 30 de maio de 2023.

EFEITO DA REDUÇÃO DA DIMENSÃO E DO NÚMERO DE FACES DE CORPO DE PROVA POLIÉDRICO NA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA POR ULTRASSOM

RESUMO

A caracterização completa da madeira, com a determinação das doze constantes elásticas que representam sua ortotropia, é de grande importância em aplicações nas quais softwares de cálculo estrutural são utilizados. O ultrassom permite essa caracterização com relativa simplicidade quando comparado a outros métodos, sendo o poliedro considerado como o formato mais adequado por permitir que as doze constantes possam ser calculadas com o uso de um único corpo de prova. A precisão desta técnica tende a ser reduzida com o aumento da inclinação dos anéis de crescimento, uma vez que as ondas se desviam das direções principais de ortotropia. O objetivo desta pesquisa foi verificar se a redução das dimensões e do número de faces do corpo de prova poliédrico tradicionalmente utilizado (26 faces partindo de cubo de 70 mm de aresta) altera os resultados dos parâmetros elásticos obtidos na caracterização da madeira por ultrassom. Os resultados mostram que a redução do número de faces (26 para 18) permite a obtenção de anéis de crescimento mais retilíneos, mas que, em geral, os parâmetros elásticos não sofrem variações estatisticamente significativas.

Palavras-chave: módulo de elasticidade longitudinal; módulo de cisalhamento; coeficientes de Poisson; inclinação de anéis de crescimento.

ABSTRAT

The complete characterization of wood, with the determination of the 12 elastic constants that represent its orthotropy, is greatly relevant in applications employing structural calculation software programs. Ultrasound allows for such characterization with relative simplicity when compared to other methods. Polyhedron is considered the most appropriate format for allowing the 12 constants to be calculated with a single specimen. The accuracy of this technique tends to be reduced when increasing growth rings inclination, since the waves deviate from the main directions of orthotropy. This research aimed to verify whether the reduction of the dimensions and number

of faces of the traditionally used polyhedral specimen (26 faces starting from a 70 mm edge cube) changes the results of the elastic parameters obtained in wood characterization by ultrasound. The results show that the reduction of the number of faces (from 26 to 18) allows for obtaining more rectilinear growth rings, but that, in general, the elastic parameters do not statistically significantly variate.

Keywords: Longitudinal modulus of elasticity; shear modulus; Poisson coefficients; slope of growth rings.

2.1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material viável e adequado para uso em diferentes aplicações. Na construção civil tem sido altamente recomendada em várias partes do mundo por suas características de sustentabilidade, já que se trata de recurso natural renovável, de baixo consumo energético e de grande contribuição na redução de gases efeito estufa (Mitterpach et al., 2022; Amiri et al., 2020).

Atualmente há, no mercado, softwares de cálculo estrutural que permitem dimensionamentos precisos de estruturas, mesmo daquelas que apresentam grandes complexidades. No entanto, a precisão dessas ferramentas depende da inserção de dados de forma completa e coerente com o tipo de material (isotrópico, ortotrópico e isotrópico transversalmente), tornado esse conhecimento fundamental. Além da construção civil, a madeira tem grande importância na fabricação de instrumentos musicais, sendo outro exemplo de área para a qual o conhecimento das propriedades elásticas é fundamental (Dinulica et al., 2021; Krüger et al., 2018; Sproßmann, 2017; Brémaud, 2012; Alves et al., 2008; Schumacher, 1988; Bucur, 1983). No entanto, por ser um material de grande complexidade por suas características de anisotropia e de heterogeneidade, o conhecimento de suas propriedades mecânicas ainda se constitui em desafio (Longo et al., 2012; Dahmen et al., 2010).

De forma simplificada a madeira é considerada ortotrópica, com três eixos principais de simetria (longitudinal - L, radial - R e tangencial - T) que respondem de forma distinta à ação de cargas. O eixo L é paralelo à direção da grã (fibras e/ou traqueídes), o eixo R é perpendicular à grã,

na direção dos raios, e o eixo T é perpendicular à grã, mas tangencia os anéis de crescimento. Sendo assim, para a caracterização completa desse material é necessária a determinação de doze constantes elásticas (nove delas independentes): três módulos de elasticidade longitudinais (E_L , E_R , E_T), três módulos de elasticidade transversais (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}) e seis coeficientes de Poisson (μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TR} , μ_{LT} , μ_{TL}).

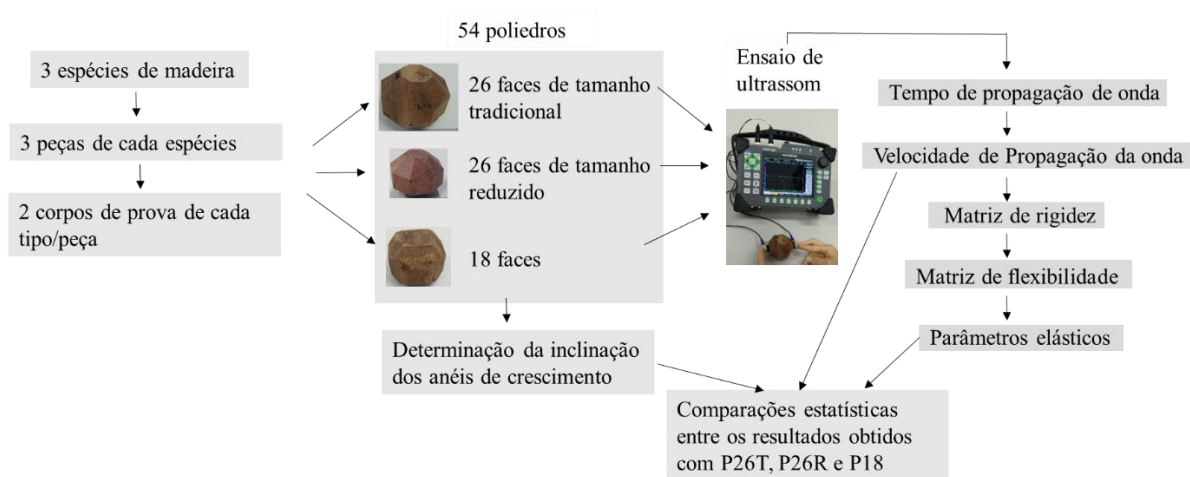
A tecnologia de ultrassom permite determinar, de forma não destrutiva, todas as constantes elásticas de materiais ortotrópicos, como é o caso da madeira, sendo as bases teóricas discutidas por Bucur (2006), Musgrave (1970) e Hearmon (1961). Ao longo dos anos, com o desenvolvimento de equipamentos, diversos estudos vêm sendo conduzidos corroborando a eficácia e a precisão da tecnologia de ultrassom na caracterização e na inferência de propriedades da madeira (Feio et al., 2007; Keunecke et al., 2007; Trinca, 2011; Bertoldo, 2011; Gonçalves et al., 2011a e b; Bertoldo et al., 2013; Gonçalves et al., 2014; Pinto et al., 2014; Vázquez et al., 2015; Espinosa et al., 2018). Para a caracterização completa da madeira por ultrassom é possível a utilização de diversos formatos de corpo de prova, como por exemplo os esféricos (Longo et al., 2012; El Mouridi et al., 2011), os prismáticos (Dinulica et al., 2021; Dauad et al., 2017; Gonçalves et al., 2014; Kohlhauser e Hellmich, 2012; Bucur e Archer, 1984), os poliédricos (Vazquez et al., 2015; Gonçalves et al., 2014, Bucur, 2006) e os discos multifacetados (Gonçalves et al., 2014, Bucur, 2006). Os corpos de prova poliédricos foram propostos inicialmente por Francóis (1995) em dois formatos, com 26 e 18 faces.

No processo de caracterização completa da madeira por ultrassom, alguns autores relatam problemas na determinação dos termos fora da diagonal principal da matriz de rigidez (Bucur, 2006; Gonçalves et al., 2014), uma vez que há a distorção da frente de onda provocada pela inclinação dos anéis de crescimento da madeira. Segundo Bucur e Archer (1984), a redução da dimensão do corpo de prova favorece a aproximação da ortotropia, pois a curvatura dos anéis de crescimento pode ser desprezada, enquanto em seções maiores as curvaturas dos anéis de crescimento são significativas (Perlin et al., 2019). Por outro lado, a redução do corpo de prova deve ser feita de forma compatível com a manutenção da propagação de ondas planas em meios infinitos, sendo para isso necessário compatibilizar a redução das dimensões com a frequência do transdutor utilizado (Bucur, 2006). Considerando a identificação de interferências da inclinação dos anéis de crescimento nos resultados da caracterização por ultrassom e maior viabilidade de se obter corpos de prova com anéis de crescimento mais retilíneos reduzindo a dimensão do corpo de

prova, o objetivo da pesquisa foi verificar se a redução do corpo de prova poliédrico em relação ao tradicionalmente utilizado (26 faces partindo de cubo de 70 mm de aresta), altera os resultados dos parâmetros elásticos obtidos na caracterização da madeira por ultrassom. Para atingir os objetivos o delineamento experimental envolveu a determinação dos parâmetros elásticos de três espécies de madeira utilizando corpos de prova poliédricos de 26 faces e dimensões tradicionalmente utilizadas na literatura (partindo-se de cubos de 70 mm de aresta), considerado como referência, poliedros de 26 faces de dimensão reduzida e poliedros de 18 faces, ambos partindo-se de cubos de aresta com aproximadamente metade da dimensão poliedro tradicional ($\cong 35$ mm). Para minimizar interferências provocadas por outros parâmetros, as reduções de dimensão foram feitas de forma a continuarem garantindo as bases teóricas de propagação de ondas em meios infinitos.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Esquema do Delineamento Experimental



2.2.2 Material

Para os ensaios foram selecionadas três espécies de madeira: Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), Angelim vermelho (*Dinizia excelsa*) e Cedrorana (*Cedrelinga catenaeformis*). A escolha das espécies foi realizada visando abranger intervalo de densidades que permitisse maior generalização dos resultados.

Para cada espécie foram obtidas três peças de 0,10 x 0,20 x 1,0 m³, as quais já foram

adquiridas com umidades em torno de 12% (entre 11% e 13%). As peças tiveram seu peso e volume mensurados, para o cálculo das densidades (Tabela 1) e acompanhamento das umidades por meio de equipamento de medição por contato (Merlin, PM1-E, Austria).

Tabela 1. Densidades aparentes ($\approx 12\%$ de umidade) das peças de cada espécie.

Espécies	Densidade (kg.m^{-3})				CV (%)
	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Média	
Garapeira (<i>Apuleia leiocarpa</i>)	806	885	715	802	11
Angelim vermelho (<i>Dinizia excelsa</i>)	1115	1067	1069	1083	3
Cedrorana (<i>Cedrelinga catenaeformis</i>)	443	478	583	501	14

CV = coeficiente de variação.

Para a madeira, material com grande variabilidade dentro da mesma espécie e até mesmo dentro da mesma árvore, as comparações com amostragens de outros autores, visando a validação de ensaios, são feitas apenas com base na ordem de grandeza dos resultados. De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2022) a Garapeira e o Angelim vermelho apresentam densidades aparentes médias (12% de umidade) de 830 kg.m^{-3} e de 1090 kg.m^{-3} , respectivamente, valores com diferenças médias em torno de 2,5% dos obtidos nessa pesquisa. No caso da Cedrorana a diferença foi de 22% quando comparada à obtida por Dias e Lahr (2004), de 566 kg.m^{-3} . Essa espécie foi também a que apresentou maior variabilidade de densidade entre as peças (Tabela 01). Apesar da maior diferença obtida para a Cedrorana, a ordem de grandeza das densidades obtidas nesta pesquisa é compatível com a obtida por outros autores.

2.2.3 Obtenção dos corpos de prova poliédricos

Das peças de $0,10 \times 0,20 \times 1,0 \text{ m}^3$ (Tabela 01) foram obtidos os poliedros que compuseram a amostragem da pesquisa e que foram utilizados nos ensaios de ultrassom. Para cada uma das espécies foram confeccionados 6 poliedros de cada formato e dimensão adotados na pesquisa (Figura 1), totalizando 54 poliedros, sendo 18 poliedros de 26 faces (P26R) com dimensão tradicionalmente utilizada na literatura, 18 poliedros de 26 faces de dimensão reduzida (P26R), e 18 poliedros de 18 faces (P18).

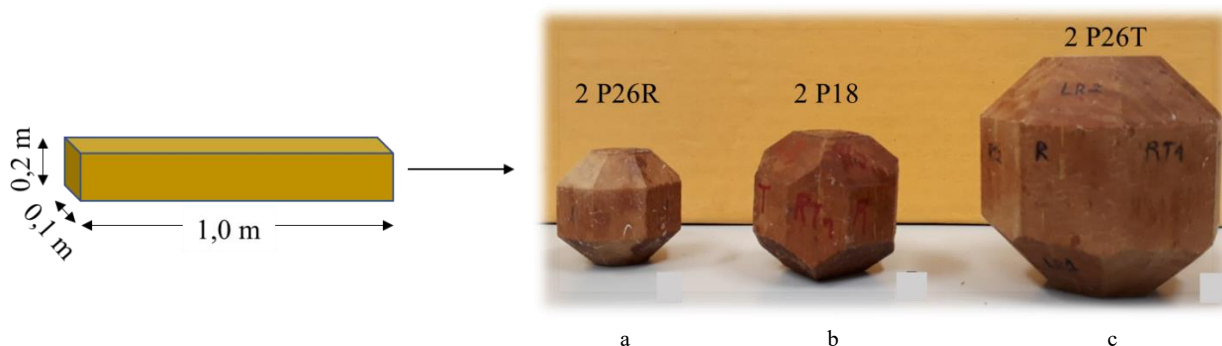


Figura 1. Representação esquemática dos corpos de prova confeccionados a partir das peças. Poliedro de 26 faces de dimensão reduzida (P26R - a); poliedro de 18 faces (P18 - b) e poliedro de 26 faces de dimensão tradicional (P26R - c).

Os poliedros foram retirados a partir de cubos orientados nas três direções principais da madeira (L ou 1, R ou 2 e T ou 3), com os anéis de crescimento mais retilíneos e paralelos quanto possíveis em relação a aresta do cubo. O poliedro de 26 faces de dimensões tradicionalmente utilizadas (Vasques et al., 2015; Gonçalves et al., 2014; Bertoldo et al, 2013; Trinca, 2011; Bertoldo, 2011; Gonçalves et al., 2011a e b) foi obtido a partir de um cubo de 70 mm de aresta (Figura 2c). O poliedro de 26 faces e dimensões reduzidas foi confeccionado a partir de um cubo de 35 mm de aresta (Figura 2a), metade da dimensão da aresta do cubo (70 mm) que originou o poliedro tradicionalmente utilizado (Figura 2c). A dimensão da aresta do cubo que originou o poliedro de 18 faces (Figura 2b) foi adotada de forma a manter, como dimensão mínima das faces, o diâmetro do transdutor de 1,0 MHz de frequência (12 mm), garantindo que o transdutor pudesse ficar circunscrito à face do poliedro, evitando-se o efeito parede durante a propagação da onda (Bucur, 2006). O transdutor de 1,0 MHz de frequência foi adotado como referência para a proposta das dimensões dos corpos de prova porque esse nível de frequência é considerado como o máximo que permite manter o comprimento de onda compatível com as dimensões dos elementos anatômicos da madeira, minimizando problemas de atenuação do sinal (Bucur, 2006).

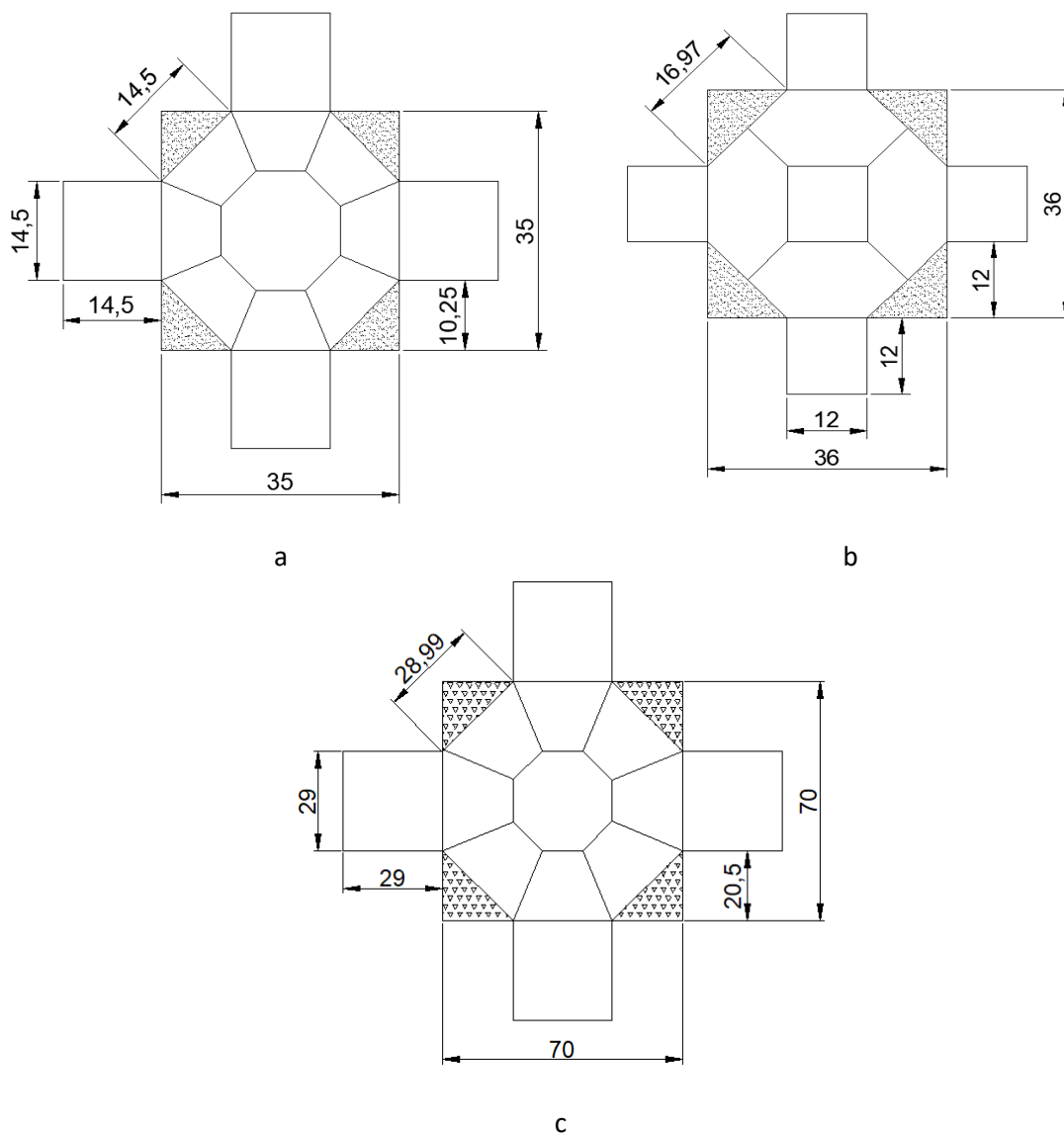


Figura 2. Vista superior dos poliedros de 26 faces de dimensões reduzidas (a), dos poliedros de 18 faces (b) e dos poliedros de 26 faces de dimensões tradicionalmente utilizadas (adaptado de Vasques et al. 2015), dimensões em mm.

2.2.4 Medição da inclinação dos anéis de crescimento na face do poliedro

Tendo em vista que a redução da dimensão dos poliedros é proposta para testar a hipótese de que ela permite reduzir a inclinação dos anéis de crescimento em relação a face radial ou tangencial, e que essa redução minimiza efeitos de dispersão da onda melhorando a propagação mais pura nos eixos ou nos planos, a inclinação dos anéis foi mensurada. Para a mensuração da inclinação dos anéis de crescimento primeiramente foi necessário lixar a seção transversal (RT) de cada poliedro até que fosse possível identificar claramente os anéis, sendo para isso utilizadas lixas nas gramaturas 120 e 400. Inicialmente as amostras foram lixadas na lixadeira orbital (DeWalt,

DWE6411, Brasil) e, em seguida, para permitir um acabamento mais fino, foi utilizado uma politriz (Panambra, DP-10, Brasil). A seção transversal (RT) dos poliedros foi então fotografada, utilizando máquina fotográfica (NIKON, D7000 – com lente AF-S DX VR Zoom-Nikkor 18-105mm $f3.5-5.6$) fixada em um tripé. As amostras foram posicionadas de forma que as imagens ficassem com as direções radial e tangencial paralelas aos eixos Y e X (Figura 3). As imagens foram então abertas em aplicativo (*Paint*) onde foi demarcada a direção do anel de crescimento (linha azul – Figura 3) e as direções radial (R) e tangencial (T) – linhas vermelhas na Figura 3, sendo a linha vermelha que cruza a seção transversal indicativa da direção de propagação da onda de ultrassom (Figura 3). As linhas (azul e vermelha) foram utilizadas para determinar o ângulo α (Figura 3) entre a direção dos anéis de crescimento e a direção de propagação da onda de ultrassom por meio do software ImajeJ.

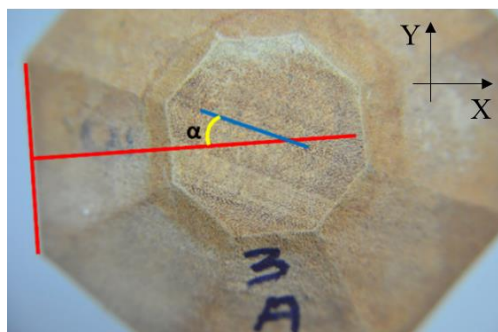


Figura 3. Direção do anel de crescimento (linha azul) e direções radial (R) e tangencial (T) paralelas aos eixos Y e X (linhas vermelhas), com a linha vermelha que atravessa a seção transversal representativa da direção de propagação da onda de ultrassom.

2.2.5 Ensaios de ultrassom nos poliedros

Os ensaios nos corpos de prova poliédricos foram realizados com equipamento de ultrassom (EP1000, Olympus, EUA) e transdutores de ondas de compressão e de cisalhamento de 1 MHz de frequência (Figura 4). O acoplamento entre o transdutor e o material a ser ensaiado é um fator de grande importância para a precisão dos resultados, sendo indicada a utilização de material viscoso, de forma a eliminar o ar entre os transdutores e a superfície do corpo de prova avaliado. O acoplante tem também a função de reduzir a diferença de impedância da passagem da onda para o material sob inspeção, minimizando a atenuação do sinal em função do desvio da onda (Lei de Snell), tendo

sido adotado nesta pesquisa a glucose de amido que, segundo Gonçalves et al. (2011), apresentam bons resultados para a onda de cisalhamento na madeira.



Figura 4. Ensaio de ultrassom nos poliedros para caracterização da madeira.

2.2.6 Cálculo das velocidades de propagação das ondas

Para o cálculo das velocidades longitudinais (V_{11} , V_{22} e V_{33}) foi utilizada a Equação 1, na qual o comprimento de percurso corresponde a distância entre as faces dos transdutores e o tempo de propagação da onda nas direções 1 (longitudinal), 2 (radial) e 3 (tangencial), respectivamente, é obtido utilizando o transdutor longitudinal.

$$V = \frac{L}{t} * 10^6 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

V = velocidade de propagação da onda em uma determinada direção (m.s-1)

L = comprimento de percurso da onda (m)

t = tempo de propagação da onda em uma determinada direção (μ s)

Considerando as mesmas direções, mas com o uso do transdutor de cisalhamento, as velocidades transversais (V_{12} , V_{13} , V_{21} , V_{31} , V_{32} e V_{23}) foram calculadas, a partir da obtenção do tempo de percurso da onda (t_{12} , t_{13} , t_{21} , t_{31} , t_{32} e t_{23}) com propagação em uma determinada direção (primeiro índice numérico) e sua polarização na direção perpendicular (segundo índice numérico).

Para a determinação das velocidades correspondentes à propagação da onda fora dos eixos de simetria, o tempo de propagação da onda foi obtido utilizando transdutores de cisalhamento, porém nas faces que representam eixos inclinados de 45° em relação a cada plano.

2.2.7 Cálculo das matrizes de rigidez [C] e de flexibilidade [S]

Com os dados de velocidade foi determinada a matriz de rigidez [C] através das equações de Christoffel (Equações de 2 a 5). Os valores de densidade nas equações foram os obtidos para as peças utilizadas para a confecção dos poliedros (Tabela 01). Os coeficientes de rigidez da diagonal principal (C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} e C_{66}) foram obtidos por meio da equação de Christoffel (Equação 2) com as velocidades longitudinais (V_{11} , V_{22} e V_{33}) se propagando e polarizando na direção dos eixos principais de simetria (longitudinal, radial e tangencial – Figura 5). Para o cálculo dos coeficientes C_{44} , C_{55} e C_{66} , foram utilizadas as velocidades cujos tempos de propagação de onda nos eixos foram obtidos com o transdutor de cisalhamento, com propagação da onda em um eixo e a sua polarização no eixo perpendicular, tendo a numeração relacionada com os eixos (propagação/polarização) a seguinte nomenclatura: 44 = propagação no eixo 2 e polarização no eixo 3 ou propagação no eixo 3 e polarização no eixo 2 (plano 2-3); 55 = propagação no eixo 1 e polarização no eixo 3 ou propagação no eixo 3 e polarização no eixo 1 (plano 1-3) e 66 = propagação no eixo 1 e polarização no eixo 2 ou propagação no eixo 2 e polarização no eixo 1 (plano 1-2). Da mesma forma (resolvendo-se a equação de Christoffel) podem ser obtidos os 3 termos fora da diagonal (C_{12} , C_{13} e C_{23}). Para isso é necessário que a propagação ocorra de forma inclinada aos eixos de simetria (45° nessa pesquisa). As fórmulas gerais, deduzidas do tensor de Christoffel para a determinação das constantes nos Planos 1-2 (LR), 2-3 (RT) e 1-3 (LT) são dadas pelas Equações 3, 4 e 5.

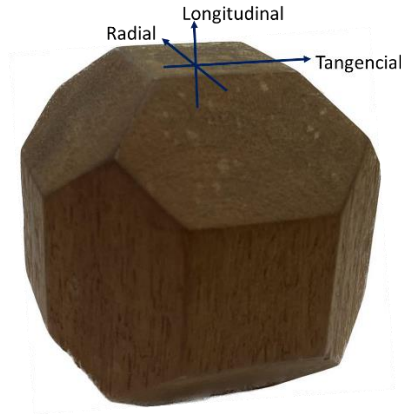


Figura 5. Representação no poliedro dos três principais eixos de simetria da madeira.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

$$C_{ii} = \rho \cdot V_{ii}^2 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$i = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ e } 6$

ρ = densidade do material ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

V = velocidade de propagação da onda na direção considerada ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$(C_{12} + C_{66}) n_1 n_2 = [(C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equação 3}$$

$$(C_{23} + C_{44}) n_2 n_3 = [(C_{22} n_2^2 + C_{44} n_3^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{44} n_2^2 + C_{33} n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equação 4}$$

$$(C_{13} + C_{55}) n_1 n_3 = [(C_{11} n_1^2 + C_{55} n_3^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{55} n_1^2 + C_{33} n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

α = ângulo (45°)

$n_1 = \cos \alpha$; $n_2 = \sin \alpha$ e $n_3 = 0$ [α é tomado em relação ao eixo 1] (Plano 1-2)

$n_1 = \cos \alpha$; $n_3 = \sin \alpha$ e $n_2 = 0$ [α é tomado em relação ao eixo 1] (Plano 1-3)

$n_2 = \cos \alpha$; $n_3 = \sin \alpha$ e $n_1 = 0$ [α é tomado em relação ao eixo 2] (Plano 2-3)

Por meio da inversão da matriz $[C]^{-1}$, foi possível obter a matriz de flexibilidade $[S]$, a qual está associada aos parâmetros elásticos do material (módulos de elasticidade longitudinal – E, módulos de elasticidade transversal – G e coeficientes de Poisson - ν).

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

2.2.8 Verificação de aspectos básicos da propagação das ondas em meios infinitos

Devido ao fato de utilizarmos na pesquisa corpos de prova poliédricos de dimensões reduzidas (18 faces e 26 faces reduzido) é importante analisar se os aspectos teóricos que dizem respeito a propagação da onda em meios infinitos estão sendo atendidos. Para que essa propagação ocorra em meios infinitos é necessário que a distância entre transdutores (dimensão da peça na direção de propagação da onda) seja algumas vezes maior que o comprimento de onda (λ). Para a madeira alguns pesquisadores (Bucur, 2006; Oliveira et al., 2006; Trinca e Gonçalves, 2009) indicaram valores de 2λ a 5λ para que essa condição seja atendida. A dimensão mínima da peça está atrelada à frequência do transdutor (f) e à velocidade de propagação da onda no material (V), pois λ é dado pela relação entre esses dois parâmetros ($\lambda = V/f$). Quando essa condição teórica é infringida os resultados dos parâmetros elásticos obtidos por ultrassom podem ser afetados (Bucur, 2006; Trinca e Gonçalves, 2009; Kohlhauser e Hellmich, 2012).

Devido a atenuação da onda na madeira, a frequência efetiva (FEF) é diferente da frequência nominal do transdutor (f), que no caso dessa pesquisa é de 1 MHz. Para obter a frequência efetiva (FEF) é necessário obter a diferença de tempo (Δt) entre dois picos sucessivos da onda ($FEF = 1/\Delta t$) e, portanto, o sinal deve ser avaliado (exemplo na Figura 6). Considerando a frequência do transdutor e as dimensões dos corpos de prova adotados nesta pesquisa, verificou-se que, mesmo nos casos mais críticos (menor comprimento de percurso e maior velocidade), pelo

menos duas ondas completas passavam pelo material (Tabela 2), atendendo, portanto, as condições teóricas de meios infinitos.

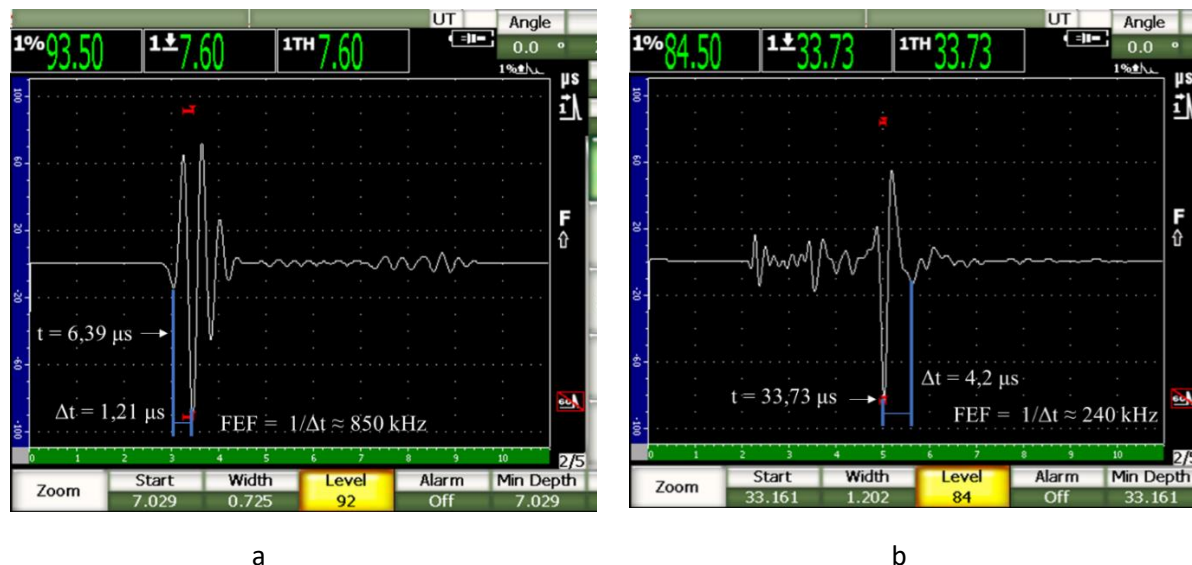


Figura 6. Exemplo de tela de captura da onda de compressão na direção longitudinal (a) e da onda de cisalhamento no plano radial-tangencial (b) com cálculos das frequências efetivas (FEF).

Tabela 2. Número de comprimentos de ondas se propagando pelos três tipos de corpos de prova (P26T, P26R e P18) considerando as diferentes direções/planos de propagação da onda (exemplo para espécie *Apuleia leiocarpa*).

Direção ou plano de propagação	P26T	P26R	P18
11 (propagação e polarização da onda de compressão na direção longitudinal)	8,6	5,3	5,7
22 (propagação e polarização da onda de compressão na direção radial)	17,6	10,7	11,7
33 (propagação e polarização da onda de compressão na direção tangencial)	18,1	11,1	11,4
66 (propagação da onda de cisalhamento na direção longitudinal e polarização na direção radial e vice-versa)	24,1	4,9	2,9
55 (propagação da onda de cisalhamento na direção longitudinal e polarização na direção tangencial e vice-versa)	21,2	7,6	5,8
44 (propagação da onda de cisalhamento na direção radial e polarização na direção tangencial e vice-versa)	12,6	8,0	9,4
12_45° (Nas faces inclinadas: propagação da onda de cisalhamento na direção longitudinal e polarização na direção radial e vice-versa)	12,3	9,4	11,5
13_45° (Nas faces inclinadas: propagação da onda de cisalhamento na direção longitudinal e polarização na direção tangencial e vice-versa)	10,2	4,8	7,9
23_45° (Nas faces inclinadas: propagação da onda de cisalhamento na direção radial e polarização na direção tangencial e vice-versa)	15,8	7,8	12,1

2.2.9 Análise dos Resultados

Os resultados de inclinação dos anéis de crescimento, de velocidades de propagação de ondas, longitudinais e de cisalhamento, nas diferentes direções e planos e dos parâmetros elásticos foram inicialmente avaliados quanto a normalidade, de forma a garantir a viabilidade de uso de estatística paramétrica. Para as comparações dos resultados utilizando os poliedros de 26 faces tradicional, de 26 faces reduzido e de 18 faces foram utilizados o *Multiple Range Test*.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Inclinação dos anéis de crescimento nas faces RT dos poliedros

Para o poliedro de 26 faces tradicional (P26T), estatisticamente, com 95% de nível de confiança, a inclinação dos anéis de crescimento não dependeu da peça de onde foram retirados os poliedros (P-valor 0,3041) mas, com o mesmo nível de segurança, foi influenciado pela espécie (P-valor 0,0460), sendo os maiores ângulos obtidos para a Garapeira (13°). Para o poliedro de 26 faces reduzido (P26R) nem a peça (P-valor 0,9287) nem a espécie (P-valor 0,7615) afetaram estatisticamente o ângulo dos anéis de crescimento. Finalmente, para o poliedro de 18 faces a peça também não teve influência estatisticamente significativa no ângulo de inclinação dos anéis de crescimento (P-valor 0,0749) mas a espécie sim (P-valor 0,0167) sendo a Cedrorana a que apresentou maior ângulo (5,9°).

Para todas as espécies estudadas as inclinações dos anéis foram estatisticamente inferiores para o P18, diferenciando-se mais das amostras P26R, que em geral apresentaram os valores superiores (Tabela 3). Esse resultado mostra que a redução do número de faces foi mais efetiva na redução da inclinação dos anéis de crescimento do que a redução da dimensão do poliedro, que para o caso do P18 foi cerca de 50% inferior e para o P26R foi cerca de 50% superior em relação ao P26T.

Tabela 3. Valores médios e coeficientes de variação (entre parêntesis) dos ângulos de inclinação dos anéis de crescimento nas faces RT dos poliedros de 26 faces tradicional (P26T), de 26 faces reduzido (P26R) e de 18 faces (P18) nas diferentes espécies e média geral independente da espécie.

	P26T	P26R	P18
Garapeira <i>(Apuleia leiocarpa)</i>	13,0° (81%) b	12,9° (66,9%) b	1,8° (20,1%) a
Angelim vermelho (<i>Dinizia excelsa</i>)	3,3° (49,8%) a	9,4° (79,6%) b	2,6° (51,5%) a
Cedrorana <i>(Cedrelinga catenaeformis)</i>	5,1° (71,7%) a	10° (84,9%) a	5,9° (46,0%) a
Média Geral	7,1° (105%) ab	10,8° (72%) b	3,5° (72%) a

*Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas com 95% de nível de confiança.

2.3.2 Velocidades de propagação das ondas de ultrassom

Considerando aspectos teóricos da propagação de ondas na madeira (Bucur, 1983; Keuneck et al., 2007 e Gonçalves et al., 2014), espera-se que $V_{11} > V_{22} > V_{33}$; $V_{66} > V_{55} > V_{44}$ e $V_{12\ 45^\circ} > V_{13\ 45^\circ} > V_{23\ 45^\circ}$. Na direção longitudinal da madeira, paralela as fibras ou traqueídes (direção 1 ou L), a continuidade do elemento anatômico permite uma propagação de ondas com velocidade mais alta (Bucur, 2006). Na direção radial, os raios, por serem menos contínuos, induzem a velocidades muito inferiores às da direção longitudinal, mas, ainda um pouco superiores à propagação na direção tangencial, na qual não há uma estrutura anatômica organizada de forma continua para seu percurso (Bucur, 2006). De acordo com Gonçalves et al. (2014), a consistência observada desta relação para todas as espécies analisadas e para os distintos formatos de corpos de prova avaliados, corroboram a eficácia e coerência do método aplicado nos poliedros. Esse comportamento das velocidades foi verificado para todos os corpos de prova ensaiados nesta pesquisa, exceto para um dos corpos de prova da espécie *Dinizia excelsa*, que com o corpo de prova poliédrico de 26 faces de dimensões tradicionais (P26T) apresentou V_{44} com valor superior ao V_{55} e, por isso, foi o único valor eliminado da análise estatística. Todos os demais valores, além de se comportarem de forma coerente em termos de bases teóricas, tiveram distribuição normal, validando a aplicação dos métodos estatísticos paramétricos. Os valores médios (Tabelas 3 a 5) também mostraram comportamento de magnitudes das velocidades coerentes com as bases teóricas de propagação de ondas na madeira para todos os tipos de corpo de prova.

Para o conjunto das espécies, em 96% dos casos os valores de velocidade obtidos para o poliedro de 26 faces reduzido foram estatisticamente equivalentes ao poliedro de 26 faces

convencional (Tabelas 4 a 6), enquanto em 85% dos casos a equivalência foi obtida para o poliedro de 18 faces, indicando, mais uma vez, a maior influência da alteração do número de faces no corpo de prova poliédrico nas velocidades de propagação das ondas do que de sua dimensão. O único caso de diferenças entre velocidades longitudinais ocorreu para a direção longitudinal na espécie *Cedrelinga catenaeformis*, tanto para o poliedro de 26 faces reduzido quanto para o poliedro de 18 faces (Tabela 6). No restante dos casos as diferenças foram todas para o poliedro de 18 faces e nas velocidades transversais nos eixos (V_{44}) da espécie *Dinizia excelsa* (Tabela 5) ou fora dos eixos ($V_{13\ 45^\circ}$ da espécie *Apuleia leiocarpa* (Tabela 5) e $V_{23\ 45^\circ}$ da espécie *Dinizia excelsa* (Tabela 5)).

Importante destacar que, segundo a metodologia adotada para a retirada dos corpos de prova, para cada espécie foram utilizadas três peças, de onde foram obtidos dois corpos de prova de cada tipo, totalizando assim os seis corpos de prova de cada tipo que constituíram a amostra. O material de base, de onde os corpos de prova foram retirados, apresentavam variabilidade natural, constatada pelas diferenças entre densidades observada entre as peças de mesma espécie (Tabela 1). Assim, além da influência esperada pela variação da inclinação dos anéis de crescimento, a variabilidade natural da madeira não pode ser descartada como uma das causas da diferenciação das velocidades. Portanto, é importante verificar se as diferenças nas velocidades obtidas nos diferentes tipos de poliedros foram suficientes para provocar diferenças nos parâmetros elásticos.

Tabela 4. Velocidades médias (m.s^{-1}) e coeficientes de variação (%) obtidos para os corpos de prova poliédricos com 26 faces de dimensão tradicional (P26T), poliédricos com 26 faces de dimensões reduzidas (P26R) e poliédricos com 18 faces (P18F). Espécie: Garapeira (*Apuleia leiocarpa*).

Garapeira (<i>Apuleia leiocarpa</i>)			
	P26T	P26R	P18F
V₁₁	5009 (3,6%) a	4864 (5,4%) a	5038 (3,9%) a
V₂₂	2249 (2,6%) a	2258 (4,5%) a	2239 (7,2%) a
V₃₃	1912 (3,6%) a	1916 (4,1%) a	1865 (6,4%) a
V₆₆	1374 (2,0%) a	1385 (2,6%) a	1358 (3,0%) a
V₅₅	1216 (3,3%) a	1211 (6,6%) a	1180 (6,3%) a
V₄₄	913 (3,7%) a	933 (4,6%) a	907 (5,3%) a
V_{12 45°}	1578 (5,2%) a	1637 (5,9%) a	1556 (3,1%) a
V_{13 45°}	1406 (4,4%) b	1439 (1,5%) b	1344 (3,1%) a
V_{23 45°}	964 (4,2%) a	947 (2,0%) a	963 (3,0%) a

*Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas com 95% de nível de confiança.

Tabela 5. Velocidades médias (m.s^{-1}) e coeficientes de variação (%) obtidos para os corpos de prova poliédricos com 26 faces de dimensão tradicional (P26T), poliédricos com 26 faces de dimensões reduzidas (P26R) e poliédricos com 18 faces (P18F). Espécie: Angelim-vermelho (*Dinizia excelsa*).

Angelim vermelho (<i>Dinizia excelsa</i>)			
	P26T	P26R	P18F
V₁₁	5137 (2,1%) a	5227 (4,9%) a	5183 (6,2%) a
V₂₂	2232 (0,4%) a	2186 (2,6%) a	2188 (3,6%) a
V₃₃	1868 (5,5%) a	1900 (6,3%) a	1896 (3,5%) a
V₆₆	1382 (6,5%) a	1264 (2,7%) a	1387 (10,7%) a
V₅₅	1166 (1,1%) a	1150 (3,3%) a	1140 (1,5%) a
V₄₄	907 (0,3%) b	889 (2,7%) ab	886 (1,2%) a
V_{12 45°}	1533 (2,5%) a	1484 (3,9%) a	1525 (1,9%) a
V_{13 45°}	1349 (3,3%) a	1346 (3,2%) a	1348 (3,2%) a
V_{23 45°}	937 (0,9%) ab	922 (1,1%) a	944 (2,1%) c

*Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas com 95% de nível de confiança

Tabela 6. Velocidades médias (m.s-1) e coeficientes de variação (%) obtidos para os corpos de prova poliédricos com 26 faces de dimensão tradicional (P26T), poliédricos com 26 faces de dimensões reduzidas (P26R) e poliédricos com 18 faces (P18F). Espécie: Cedrorana (*Cedrelinga catenaeformis*).

Cedrorana (<i>Cedrelinga catenaeformis</i>)			
	P26T	P26R	P18F
V₁₁	5305 (8,7%) b	4478 (11,4%) a	4622 (13,1%) a
V₂₂	2011 (1,9%) a	2098 (9,4%) a	2011 (1,9%) a
V₃₃	1438 (10,5%) a	1529 (13,9%) a	1506 (11,3%) a
V₆₆	1355 (3,0%) ab	1395 (1,9%) b	1331 (4,0%) a
V₅₅	1092 (7,2%) a	1109 (3,5%) a	1127 (3,9%) a
V₄₄	725 (4,3%) a	705 (3,1%) a	714 (5,2%) a
V_{12 45°}	1512 (1,4%) a	1486 (7,2%) a	1484 (3,5%) a
V_{13 45°}	1151 (5,7%) a	1185 (5,5%) a	1174 (5,3%) a
V_{23 45°}	725 (4,3%) a	705 (3,1%) a	714 (5,2%) a

*Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas com 95% de nível de confiança

2.3.3 Parâmetros Elásticos obtidos com os diferentes poliedros

Os valores médios dos parâmetros elásticos obtidos do ensaio de ultrassom nesta pesquisa (Tabelas 7 a 9) estão dentro da faixa esperada para a madeira. A *Apuleia leiocarpa* foi caracterizada utilizando ensaio de ultrassom em prismas (Gonçalves et al., 2011a) e em poliedros de 26 faces de dimensões tradicionais (Gonçalves et al. 2014), tendo sido obtidos resultados de mesma ordem de grandeza dos obtidos para os parâmetros elásticos nesta pesquisa. Assim como nos resultados da literatura (Gonçalves et al., 2011a; Longo et al., 2012; Gonçalves et al., 2014; Vázquez et al., 2015), as maiores variabilidades foram verificadas para os coeficientes de Poisson, que são obtidos a partir de ondas de cisalhamento e com propagação fora dos eixos de simetria, condição na qual se verificam as maiores imprecisões do método. Contudo, os valores dos coeficientes de Poisson obtidos nesta pesquisa não apresentaram valores iguais ou superiores a 1,0 como os obtidos por Bucur (2006) e Ozyhar et al. (2013). Bucur (2006) demonstra que, embora não usuais, tendo em vista que a ortotropia da madeira é uma simplificação, valores maiores do que 1,0 poderiam ocorrer, principalmente para os coeficientes ν_{TR} e ν_{LT} . Dessa forma, os parâmetros elásticos obtidos utilizando os corpos de prova poliédricos de dimensões ou formato alterados, indicaram valores

compatíveis com os obtidos da literatura e, também, com os esperados considerando as propriedades acústicas e mecânicas da madeira.

Em cerca de 93% dos casos não houve diferença estatística entre os parâmetros elásticos obtidos com a redução da dimensão dos poliedros, quer seja com 26 ou com 18 faces (Tabelas 7 a 9). A velocidade longitudinal tinha sido afetada na espécie *Cedrelinga catenaeformis* com a redução do corpo de prova (Tabela 6), tanto de 26 quanto de 18 faces, mas essa interferência não se refletiu no módulo de elasticidade longitudinal para o corpo de prova de 18 faces (Tabela 9). Os módulos transversais nos planos RT e RL foram afetados pela redução dos corpos de prova de 26 e 18 faces para a espécie *Dinizia excelsa* (Tabela 8) e o coeficiente de Poisson no plano TR apenas para o corpo de prova de 18 faces na espécie *Apuleia leiocarpa* (Tabela 7). Esta baixa incidência de diferenças em termos gerais (cerca de 7%) indica que a redução não alterou, de forma significativa, os resultados quando se compara com os obtidos com o corpo de prova tradicional.

Segundo Kohlhauser e Hellmich (2012) quando a relação entre o comprimento da amostra (sentido de propagação da onda) e o raio de curvatura dos anéis de crescimento se aproxima de zero, a influência da curvatura do anel de crescimento nas medições de ultrassom pode ser desconsiderada. De maneira geral, para o poliedro P18 a inclinação média dos anéis de crescimento foi da ordem de 3° , valor mais próximo da condição de não influência descrita por Kohlhauser e Hellmich (2012) quando comparados aos poliedros P26T (da ordem de 7°) e P26R (da ordem de 10°). A redução da inclinação dos anéis de crescimento tende a aumentar a precisão dos parâmetros elásticos, uma vez que viabiliza direções transversais (radiais e tangenciais) mais puras. Bucur e Archer (1984) utilizaram cubos de 16 mm de aresta para caracterização por ultrassom de seis espécies de madeira, e argumentaram que a menor dimensão do corpo de prova permite melhor aproximação da ortotropia, pois a curvatura dos anéis de crescimento pode ser desprezada.

No entanto, no caso desta pesquisa é importante destacar que, em alguns casos (Tabelas 7 e 9), os valores de módulos transversais e, principalmente, de coeficientes de Poisson, apresentaram valores elevados de coeficiente de variação para os corpos de prova com dimensões reduzidas, o que indica que a redução não foi tão efetiva quanto o esperado para reduzir, pela redução da inclinação dos anéis de crescimento, a variabilidade dos resultados obtidos pelo método. Além disso, valores de coeficientes de variação elevados podem ter influenciado, em alguns casos, a equivalência estatística dos resultados.

Tabela 7. Parâmetros elásticos e coeficientes de variação (%) obtidos na caracterização utilizando os corpos de prova poliédricos com 26 faces de dimensão tradicional (P26T), poliédricos com 26 faces de dimensões reduzidas (P26R) e poliédricos com 18 faces (P18F). Espécie: Garapeira (*Apuleia leiocarpa*).

	P26T	P26R	P18F
E_L (MPa)	16136 (24,5%) a	16252 (18,7%) a	15749 (22,7%) a
E_R (MPa)	2574 (13,9%) a	2583 (9,6%) a	2599 (9,8%) a
E_T (MPa)	1904 (7,8%) a	1886 (8,5%) a	1808 (9,9%) a
G_{RT} (MPa)	673 (15,6%) a	704 (18,0%) a	662 (14,7%) a
G_{LT} (MPa)	1193 (15,8%) a	1191 (20,8%) a	1130 (20,4%) a
G_{LR} (MPa)	1514 (9,8%) a	1541(12,2%) a	1479 (9,7%) a
ν_{RL}	0,10 (49,6%) a	0,08 (34,1%) a	0,11 (29,3%) a
ν_{TL}	0,07 (39,2%) a	0,06 (35,0%) a	0,08 (36,1%) a
ν_{LR}	0,62 (29,3%) a	0,51 (28,7%) a	0,62 (25,2%) a
ν_{TR}	0,44 (4,3%) b	0,44 (1,9%) b	0,37 (11,7%) a
ν_{LT}	0,58 (27,8%) a	0,49 (34,3%) a	0,71 (30,8%) a
ν_{RT}	0,55 (14,9%) a	0,60 (4,98%) a	0,54 (13,2%) a

*Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas com 95% de nível de confiança

Tabela 8. Parâmetros elásticos e coeficientes de variação (%) obtidos na caracterização utilizando os corpos de prova poliédricos com 26 faces de dimensão tradicional (P26T), poliédricos com 26 faces de dimensões reduzidas (P26R) e poliédricos com 18 faces (P18F). Espécie: Angelim-vermelho (*Dinizia excelsa*).

	P26T	P26R	P18F
E_L (MPa)	21767 (7,3%) a	22303 (16,5%) a	22107 (9,9%) a
E_R (MPa)	3346 (6,5%) a	3155 (8,4%) a	3293 (4,6%) a
E_T (MPa)	2446 (6,0%) a	2450 (5,5%) a	2519 (7,6%) a
G_{RT} (MPa)	918 (0,7%) b	849 (3,7%) a	864 (4,2%) a
G_{LT} (MPa)	1496 (4,1%) b	1422 (3,5%) a	1430 (3,0%) a
G_{LR} (MPa)	2111 (14,6%) a	1758(6,0%) a	2132 (20,6%) a
v_{RL}	0,12 (15,3%) a	0,11 (19,7%) a	0,11 (20,3%) a
v_{TL}	0,07 (31,3%) a	0,08 (45,2%) a	0,08 (26,2%) a
v_{LR}	0,76 (18,4%) a	0,77 (21,2%) a	0,71 (16,1%) a
v_{TR}	0,41 (9,4%) a	0,44 (1,9%) a	0,41 (6,9%) a
v_{LT}	0,63 (25,3%) a	0,74 (18,6%) a	0,71 (32,2%) a
v_{RT}	0,55 (2,2%) a	0,55 (5,3%) a	0,53 (3,6%) a

*Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas com 95% de nível de confiança.

Tabela 9. Parâmetros elásticos e coeficientes de variação (%) obtidos na caracterização utilizando os corpos de prova poliédricos com 26 faces de dimensão tradicional (P26T), poliédricos com 26 faces de dimensões reduzidas (P26R) e poliédricos com 18 faces (P18F). Espécie: Cedrorana (*Cedrelinga catenaeformis*).

	P26T	P26R	P18F
E_L (MPa)	11723 (10,0%) b	8323 (26,1%) a	10182 (19,8%) ab
E_R (MPa)	1250 (21,2%) a	1163 (17,6%) a	1126 (17,0%) a
E_T (MPa)	624 (23,7%) a	604 (21,4%) a	620 (26,7%) a
G_{RT} (MPa)	183 (10,2%) a	239 (47,8%) a	229 (36,1%) a
G_{LT} (MPa)	602 (19,9%) a	618 (17,2%) a	643 (19,6%) a
G_{LR} (MPa)	921 (14,1%) a	967(12,4%) a	884 (10,5%) a
v_{RL}	0,05 (22,7%) a	0,08 (37,4%) a	0,07 (27,2%) a
v_{TL}	0,05 (25,8%) a	0,05 (80,7%) a	0,05 (79%) a
v_{LR}	0,50 (22,1%) a	0,55 (29,0%) a	0,66 (38,5%) a
v_{TR}	0,39 (12,7%) a	0,44 (11,5%) a	0,44 (11,9%) a
v_{LT}	0,85 (14,2%) a	0,59 (47,3%) a	0,69 (36,8%) a
v_{RT}	0,79 (6,7%) a	0,84 (7,1%) a	0,84 (5,0%) a

*Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas com 95% de nível de confiança.

2.4 CONCLUSÃO

Os resultados da pesquisa permitem concluir que, em geral, a redução na dimensão ou no número de faces do poliedro não afeta significativamente os resultados e os coeficientes de variação dos parâmetros elásticos da madeira obtidos na caracterização por propagação de ondas ultrassônicas. No entanto, a redução no número de faces do poliedro, passando de 26 para 18, permite a redução da inclinação dos anéis de crescimento que, de acordo com as bases do ensaio, tende a aumentar a precisão dos parâmetros elásticos, uma vez que viabiliza direções transversais (radiais e tangenciais) mais puras. Adicionalmente, o corpo de prova de 18 faces permite simplificar a confecção do poliedro, sendo um aspecto positivo para a metodologia do ensaio de caracterização da madeira.

2.5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao grupo de pesquisa do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LabEND - FEAGRI/UNICAMP) pelo suporte nos ensaios e ao Laboratório de Protótipos (FEAGRI/UNICAMP) pela confecção dos corpos de prova necessários para a conclusão desse trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP - Processo nº 2016/00658-4) pelo financiamento dessa pesquisa.

2.6 BIBLIOGRAFIA

AMIRI A.; OTTELIN J.; SORVARI J.; JUNNILA S. Cities as carbon sinks - classification of wooden buildings. *Environment Research Letters*, v. 15 (n. 9), 2020. DOI 10.1088/1748-9326/aba134

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – NBR 7190/97 - Projetos de estruturas de madeira 107p. Rio de Janeiro (RJ), 1997.

BERTOLDO C. Estimativa de propriedades de rigidez da madeira a partir de avaliação acústica na árvore e em toras recém abatidas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Na área de concentração de Construções Rurais e Ambiente, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2011.

BERTOLDO C.; GONÇALVES, R.; MERLO, E.S.; SANTACLARA, O.; RUY, M.; MOREIRA, M.E.M. Elastic constants of *Pinus pinaster* wood determined by wave propagation. In: 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Madison, EUA, setembro de 2013.

BRÉMAUD, I. Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones : Biological and cultural diversity, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 131, p. 807-818. DOI:10.1121/1.3651233, 2012.

BUCUR, V. Vers une appréciation objective des propriétés des bois du violon, *Rev. Forest. Française*, v. 35, p. 130-137, 1983.

BUCUR, V. ARCHER R.R Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Sci Technol* v.18, p.255-265, 1984.

BUCUR, V. *Acoustics of Wood*. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 393 pp, 2006.

DAHMEN, S.; KETATA, H.; GHOZLEN, M. H. B.; HOSTEN, B. Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave, *Ultrasonics*, v. 50, p. 502-507, 2010.

DAUAD, A. N. M.; JAAFAR, R.; AYOP, S. K.; YAACOB, M. I. H.; ROHANI, M, S. Elastic constant determination of hardwoods using ultrasonic insertion technique, *Ultrasonics*, v. 75, p. 194-198, 2017.

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

DINULICA, F.; STANCIU, M. D.; SAVIN, A. Correlation between anatomical grading and acoustic-elastic properties of resonant spruce wood used for musical instruments, *Forests*, v. 12, p.2-18, 2021.

ESPINOSA, L.; BRANCHERIAU, L.; PRIETO, F.; LASAYGUES, P. Sensitive of ultrasonic wave velocity estimation using the Christoffel equation for wood non-destructive characterization, *Bioresources*, v. 13, p. 918-928, 2018.

FEIO, A. O.; LOURENÇO, P.B.; MACHADO, J.S. Non-Destructive Evaluation of the Mechanical Behavior of Chestnut Wood in Tension and Compression Parallel to Grain, *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, v. 1(3), p.272-292, 2007.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; FERREIRA, G.S. Effect of coupling media on velocity and attenuation of ultrasonic waves in Brazilian wood. *Journal of Wood Science*. v. 54 (4), p. 282-287, 2011a.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. P. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing. *Journal Wood and Fiber Science*, v. 43(1), p. 64-75, 2011b.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; PELLIS, B.P. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Science and Technology*, 48 :269-287, 2014.

HEARMON, R. F. S. *An introduction to applied anisotropic elasticity*, Oxford University Press, Oxford, 1961.

INSTITUTO DE PESQUISAS TÉCNICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). Disponível em <<https://www.ipt.br>> acessado em agosto de 2022.

KEUNECKE, D.; SONDEREGGER, W.; PERETEANU, K.; LÜTHI, T.; NIEMZ, P. Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology*. V. 41, p. 309-327, 2007.

KOHLHAUSER, C.; HELLMICH, C. Determination of Poisson's ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: Application to metals and wood, *European Journal of Mechanics A/Solids*, v. 33, p. 82-98, 2012.

KRÜGER, R.; ZAUER, M.; WAGENFÜHR, A. Physical properties of native and thermally treated European woods as potential alternative to Indian rosewood for the use in classical guitars. *European Journal of Wood and Wood Products*, v.76 (6), p. 1663-1668, 2018.

LONGO, R.; DELAUNAY, T.; LAUX, D.; EL MOURIDI, M.; ARNOULD, O.; LE CLÉZIO, E. Wood elast characterization from a silgle sample by resonant ultrasound spectroscopy, *Ultrasonics*, v. 52, p. 971-974, 2012.

EL MOURIDI, M.; LAURENT, T.; BRANCHERIAU, L.; ARNOULD, O.; FAMIRI, A.; HAKAM, A.; GRIL, J. Searching for material symmetries in the burr wood of thuja by a direct contact ultrasonic method on spherical samples, *Maderas. Ciencia y tecnologia*, v. 13, p. 285-296, 2011.

MITTERPACH, J.; VAŇOVÁ, R.; SEDIVKA, P.; STEFKO, J. A Comparison of the Environmental Performance between Construction Materials and Operational Energy of Nearly Zero-Energy Wood-Based Educational Building. *Forests*, 2022. doi.org/10.3390/f13020220

MUSGRAVE, M. J. P. *Crystal Acoustics*, Holden Day, San Francisco, 1970.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A.; LUCCHETTE F. F.; CANDIAN, M. Efeito do comprimento do corpo de prova na velocidade ultrassônica em madeiras (Effect of specimen length on ultrasonic velocity of wood). *Revista Árvore*, v. 30(1), p. 141–145, 2006.

OZYHAR, T.; HERING, S.; SANABRIA, S.J.; NIEMZ, P. Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. *Wood Sci. Technology*, v. 47 (2), p.329-341, 2013.

PERLIN, L. P.; PINTO, R. C. A.; VALLE, A. Ultrasonic tomography in wood with anisotropy consideration. *Construction and Building Materials*, v. 229, p. 1-9, 2019.

PINTO, J. M. A.; CHAHUD, E.; JÚNIOR, C.A.C. Evaluation of compressive strength for the wood *Eucalyptus grandis* using ultrasonic wave propagation. *European Journal of Wood and Wood Products*, v.73(1), p.127-129, 2014.

SCHUMACHER, R. T. Compliances of wood for violin top plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 84, p. 1223-1235, 1988. DOI: 10.1121/1.396623

SPROßMANN, R.; ZAUER, M.; WAGENFUHR, A. Characterization of acoustic and mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars. *Results in Physics*, v. 7, p.1737-1742, 2017.

TRINCA, A. J. Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Na área de concentração de Construções Rurais e Ambiente, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2011.

TRINCA, A J.; GONÇALVES, R. Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na Madeira, *Revista Arvore*, v.33, p.177-184, (2009).

VÁZQUEZ, C.; GONÇALVES, R.; BERTOLDO, C.; BAÑO, V.; VEGA, A.; CRESPO, J.; GUAITA, M. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* (Mill) using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods, *Wood Science and Technology*, v.49(3), p.607-622, (2015).

3. DISCUSSÃO GERAL

A análise da inclinação dos anéis de crescimento mostrou que os maiores valores para esse parâmetro foram apresentados para a garapeira no poliedro de 26 faces tradicional (P26T), porém não houve diferença estatística significativa quando comparado com a inclinação dos anéis de crescimento obtida para a mesma espécie e o poliedro com o mesmo número de faces de dimensões reduzidas (P26R), diferença estatística foi somente apresentada para o poliedro de 18 faces, que apresentou uma redução de 86% na inclinação do anel de crescimento para essa espécie.

A inclinação dos anéis de crescimento foi influenciada apenas pelo número de faces do poliedro e não pela dimensão do corpo de prova, o poliedro de 18F apresentou redução média para a inclinação dos anéis de crescimento de 51% em relação aos poliedros de 26 faces tradicional e de 68% com relação ao poliedro de 26 faces reduzido. Os valores superiores para a inclinação dos anéis de crescimento para o poliedro de 26 faces de dimensões reduzidas provavelmente foram decorrentes da dificuldade no manuseio e posicionamento na fresadora ferramenteira durante a sua confecção, devido ao elevado número de faces e as dimensões reduzidas do corpo de prova.

De forma geral, os valores de velocidade nas diferentes direções e, obtidas com os dois transdutores (longitudinal e de cisalhamento), apresentaram comportamento e magnitudes coerentes com as bases teóricas de propagação de ondas na madeira para todos os tipos de corpos de prova. Ao comparar os valores de velocidade para as diferentes espécies, para a maior parte dos casos, os valores de velocidade obtidos para o poliedro 26R foram estatisticamente equivalentes ao poliedro 26T, porém essa equivalência foi inferior para os valores de velocidade do poliedro 18F e o 26T, havendo uma diferença em 15% dos valores. Essas diferenças podem estar atreladas, além da diferença existente entre a inclinação dos anéis de crescimento, na própria variabilidade de densidade das peças de onde os corpos de prova foram retirados.

Os parâmetros elásticos obtidos utilizando os corpos de prova poliédricos de dimensões ou formato alterados, indicaram valores compatíveis com os obtidos da literatura e, também, com os esperados considerando as propriedades acústicas e mecânicas da madeira. A comparação dos valores dos parâmetros elásticos obtidos pelas diferentes dimensões e formatos dos poliedros, indicou diferença estatística (2 módulos de cisalhamento e 1 coeficiente de Poisson) em 7% dos parâmetros obtidos. Esta baixa incidência de diferenças indica que a redução não alterou, de forma significativa, os resultados quando se compara com os obtidos com o corpo de prova tradicional.

Apesar de diversos autores relatarem melhor aproximação à condição da ortotropia da madeira quanto menor a inclinação dos anéis de crescimento, mesmo no caso dos poliedros de 18 faces, que apresentaram a menor inclinação (3°), não foi observada a redução dos coeficientes de variação, principalmente dos módulos de cisalhamento e dos coeficientes de Poisson, o que indica que a redução não foi tão efetiva quanto o esperado para reduzir, pela redução da inclinação dos anéis de crescimento, a variabilidade dos resultados obtidos pelo método.

4. CONCLUSÃO GERAL

Com os resultados da pesquisa foi possível concluir que a alteração na dimensão ou no formato do corpo de prova poliédrico não afeta a obtenção dos parâmetros elásticos da madeira por meio da caracterização por ultrassom. A diminuição do número de faces do poliedro, passando de 26 para 18, permitiu reduzir a inclinação dos anéis de crescimento presentes na seção transversal do corpo de prova, fato que não ocorreu com a redução da dimensão do poliedro de 26 faces. Com a diminuição no número de faces do poliedro, passando de 26 para 18 faces, é possível simplificar a confecção do poliedro, facilitando a metodologia do ensaio de caracterização da madeira.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMCI. Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. Estudo setorial 2022 ano base 2021: 2022.

AMIRI A.; OTTELIN J.; SORVARI J.; JUNNILA S. Cities as carbon sinks - classification of wooden buildings. *Environment Research Letters*, v. 15 (n. 9), 2020. DOI 10.1088/1748-9326/aba134

ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – NBR 7190/97 - Projetos de estruturas de madeira 107p. Rio de Janeiro (RJ), 1997.

ALVES, E.S.; LONGUI, E.L.; AMANO, E. Pernambuco wood (*Caesalpinia echinata*) used in the manufacture of bows for string instruments. *IAWA Journal*, v.29 (3), p.323-335, 2008.

ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – NBR 7190/97 - Projetos de estruturas de madeira 107p. Rio de Janeiro (RJ), 1997.

BERTOLDO C. Estimativa de propriedades de rigidez da madeira a partir de avaliação acústica na árvore e em toras recém abatidas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Na área de concentração de Construções Rurais e Ambiente, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2011.

BERTOLDO C.; GONÇALVES, R.; MERLO, E.S.; SANTACLARA, O.; RUY, M.; MOREIRA, M.E.M. Elastic constants of *Pinus pinaster* wood determined by wave propagation. In: 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Madison, EUA, setembro de 2013.

BRÉMAUD, I. Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones : Biological and cultural diversity, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 131, p. 807-818. DOI:10.1121/1.3651233

BUCUR, V. Vers une appréciation objective des propriétés des bois du violon, *Rev. Forest. Française*, v. 35, p. 130-137, 1983.

BUCUR, V. ARCHER R.R Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Sci Technol* v.18, p.255-265, 1984.

BUCUR, V. 2006 *Acoustics of Wood*. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 393 pp.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. Editora Manole, 2003.

CAMARGO, E. C. G.; FELGUEIRAS, A. A.; MONTEIRO, A. M. V. A importância da modelagem da anisotropia na distribuição espacial de variáveis ambientais utilizando procedimentos geoestatísticos. In: *Anais X SBSR*, Foz do Iguaçu, INPE–Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, p. 395-402, 2001.

CRESPO, J.; AIRA, J. R.; VÁZQUEZ, C.; GUAITA, M. Comparative Analysis of the Elastic Constants Measured Via Conventional, Ultrasound, and 3-D Digital Image Correlation Methods in *Eucalyptus Globulus* Labill. *Bioresources*. v. 12 (2), p. 3728-3743, 2017.

DAHMEN, S. ; KETATA, H. ; GHOZLEN, M. H. B. ; HOSTEN, B. Elastic constants measurement of anisotrop Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave, *Ultrasonics*, v. 50, p. 502-507, 2010.

DAUAD, A. N. M.; JAAFAR, R.; AYOP, S. K.; YAACOB, M. I. H.; ROHANI, M, S. Elastic constant determination of hardwoods using ultrasonic insertion technique, *Ultrasonics*, v. 75, p. 194-198, 2017.

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

DINULICA, F.; STANCIU, M. D.; SAVIN, A. Correlation between anatomical grading and acoustic-elastic properties of resonant spruce wood used for musical instruments, *Forests*, v. 12, p.2-18, 2021.

EL MOURIDI, M.; LAURENT, T.; BRANCHERIAU, L.; ARNOULD, O.; FAMIRI, A.; HAKAM, A.; GRIL, J. Searching for material symmetries in the burr wood of thuja by a direct contact ultrasonic method on spherical samples, *Maderas. Ciencia y tecnologia*, v. 13, p. 285-296, 2011.

ESPINOSA, L; BRANCHERIAU, L.; PRIETO, F.; LASAYGUES, P. Sensitive of ultrasonic wave velocity estimation using the Christoffel equation for wood non-destructive characterization, *Bioresources*, v. 13, p. 918-928, 2018.

FEIO, A. O.; LOURENÇO, P.B.; MACHADO, J.S. Non-Destructive Evaluation of the Mechanical Behavior of Chestnut Wood in Tension and Compression Parallel to Grain, *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, v. 1(3), p.272-292, 2007.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; PELLIS, B. P. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Sci Technol* (2014) 48:269-287, 2014.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; FERREIRA, G.S. Effect of coupling media on velocity and attenuation of ultrasonic waves in Brazilian wood. *Journal of Wood Science*. v. 54 (4), p. 282-287, 2011a.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. P. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing. *Journal Wood and Fiber Science*, v. 43(1), p. 64-75, 2011b.

GONÇALEZ, J. C.; VALLE, A. T.; COSTA, A. F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som) *CERNE*, vol. 7, núm. 2, pp. 81-92 Universidade Federal de Lavras Lavras, Brasil, 2001.

HEARMON, R. F. S. An introduction to applied anisotropic elasticity, Oxford University Press, Oxford, 1961.

INSTITUTO DE PESQUISAS TÉCNICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). Disponível em <<https://www.ipt.br>> acessado em agosto de 2022.

KEUNECKE, D.; SONDEREGGER, W.; PERETEANU, K.; LÜTHI, T.; NIEMZ, P. Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. Wood Science and Technology. V. 41, p. 309-327, 2007.

KOHLHAUSER, C.; HELLMICH, C. Determination of Poisson's ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: Application to metals and wood, European Journal of Mechanics A/Solids, v. 33, p. 82-98, 2012.

KRÜGER, R.; ZAUER, M.; WAGENFÜHR, A. Physical properties of native and thermally treated European woods as potential alternative to Indian rosewood for the use in classical guitars. European Journal of Wood and Wood Products, v.76 (6), p. 1663-1668, 2018.

LONGO, R.; DELAUNAY, T.; LAUX, D.; EL MOURIDI, M.; ARNOULD, O.; LE CLÉZIO, E. Wood elast characterization from a single sample by resonant ultrasound spectroscopy, Ultrasonics, v. 52, p. 971-974, 2012.

MITTERPACH, J.; VAŇOVÁ, R.; SEDIVKA, P.; STEFKO, J. A Comparison of the Environmental Performance between Construction Materials and Operational Energy of Nearly Zero-Energy Wood-Based Educational Building. Forests, 2022. doi.org/10.3390/f13020220

MUSGRAVE, M. J. P. Crystal Acoustics, Holden Day, San Francisco, 1970.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A.; LUCCHETTE F. F.; Candian, M. Efeito do comprimento do corpo de prova na velocidade ultrassônica em madeiras (Effect of specimen length on ultrasonic velocity of wood). *Revista Árvore*, v. 30(1), p. 141–145, 2006.

OZYHAR, T.; HERING, S.; SANABRIA, S.J.; NIEMZ, P. Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. *Wood Sci. Technology*, v. 47 (2), p.329-341, 2013.

PEDROSO, C. B.; GONÇALVES, R.; MOREIRA, M. E.; SANCHEZ, E. M.; SANTACLARA, O. Characterization of *Pinus pinaster* wood by means of ultrasound. In: 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Madison. 18th WoodNDT, 2013.

PERLIN, L. P.; PINTO, R. C. A.; VALLE, A. Ultrasonic tomography in wood with anisotropy consideration. *Construction and Building Materials*, v. 229, p. 1-9, 2019.

PINTO, J. M. A.; CHAHUD, E.; JÚNIOR, C.A.C. Evaluation of compressive strength for the wood *Eucalyptus grandis* using ultrasonic wave propagation. *European Journal of Wood and Wood Products*, v.73(1), p.127-129, 2014.

SCHUMACHER, R. T. Compliances of wood for violin top plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 84, p. 1223-1235, 1988. DOI: 10.1121/1.396623

SPROßMANN, R.; ZAUER, M.; WAGENFUHR, A. Characterization of acoustic and mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars. *Results in Physics*, v. 7, p.1737-1742, 2017.

TRINCA, A. J. Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Na área de concentração de Construções Rurais e Ambiente, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2011.

TRINCA, A J.; GONÇALVES, R. Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na Madeira, *Revista Arvore*, v.33, p.177-184, (2009).

VÁZQUEZ, C.; GONÇALVES, R.; BERTOLDO, C.; BAÑO, V.; VEGA, A.; CRESPO, J.; GUAITA, M. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* (Mill) using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods, *Wood Science and Technology*, v.49(3), p.607-622, (2015).