ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

# Revisão sobre a utilização do ultrassom na caracterização das propriedades e defeitos da madeira

## Review on the use of ultrasound in characterizing wood properties and defects

**Elidiani Melissa de Moura**
Universidade Estadual de Campinas | Campinas | Brasil | e214622@dac.unicamp.br
**Tiago Montanha Padilha**
Universidade Estadual de Campinas | Campinas | Brasil | t271024@dac.unicamp.br

**Resumo**

A madeira é um material anisotrópico e por isso apresenta grande variabilidade em suas propriedades físicas e mecânicas. Por tanto, é necessário que sejam realizadas análises para classificação de peças quando essas forem utilizadas como material estrutural. Para isso, pode-se utilizar métodos não-destrutivos, como o ultrassom, a fim de preservar suas características iniciais. O objetivo desse artigo é verificar como os estudos atuais têm utilizado o ultrassom na madeira. Para isso, artigos de revistas e jornais científicos publicados em meio eletrônico foram analisados. Com esta revisão, foi possível identificar que o ensaio de ultrassom tem sido muito utilizado para determinar defeitos e as propriedades da madeira, visto que ele não afeta a qualidade do corpo de prova e possibilita que o mesmo seja usado posteriormente sem nenhum ônus. O módulo de elasticidade dinâmico foi o parâmetro mais estudado nesse tipo de ensaio. Para trabalhos futuros recomenda-se também o estudo de parâmetros como o fator anisotrópico, o módulo de cisalhamento, a resistência à tração e o Coeficiente de Poisson que foram pouco ou nada estudados nos trabalhos encontrados para essa revisão.

Palavras-chave: Propriedades da madeira. Ensaios não-destrutivos. Ultrassom em madeira.

**Abstract**

*Wood is an anisotropic material and therefore presents great variability in its physical and mechanical properties. Therefore, it is necessary to carry out analyzes to classify parts when they are used as structural material, and this can be done using non-destructive methods, such as ultrasound, in order to preserve their initial characteristics. The aim of this article is to investigate how current studies have used ultrasound on wood. For this purpose, articles from scientific magazines and newspapers published electronically were analyzed. And it was possible to identify that this classification method has been widely used to determine defects and properties of wood as it does not interfere with its quality and allows it to be used later without any burden. The dynamic modulus of elasticity was the most studied parameter in this type of test. For future work, it is also recommended to study parameters such as the anisotropic factor, shear modulus, tensile strength and Poisson's Ratio, which were little or not studied in the works found for this review.*

*Keywords: Wood properties. Non-destructive testing. Ultrasound in wood.*

Como citar:
MOURA, E. M., PADILHA, T. M. Revisão sobre a utilização do ultrassom na caracterização das propriedades e defeitos da madeira. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

## INTRODUÇÃO

A natureza não destrutiva do ultrassom é de particular interesse na silvicultura para avaliação de árvores em pé, na indústria para avaliação de peças de madeira e na construção civil para a avaliação de estruturas montadas e outros componentes. Além da natureza não destrutiva do ensaio de ultrassom, tem-se a vantagem da simplicidade no manuseio, sem necessidade de cursos extensivos ou certificação, e a alta portabilidade que permite deslocar o equipamento sem dificuldades de um laboratório para outro e até para algum campo experimental ou florestas. Além disso, a aplicabilidade da técnica de ultrassom tem se mostrado diversificada, desde avaliações quantitativas quanto qualitativas. Esses são alguns dos motivos que tem alavancado pesquisas por todo o mundo. Entre os objetivos dessas pesquisas, encontram-se a busca pelo aprimoramento da precisão dos resultados obtidos por ultrassom, assim como as suas correlações com as propriedades da madeira, sejam físicas, mecânicas ou ainda falhas por deterioração biológica e nós de crescimento. A determinação das propriedades mecânicas da madeira, através da utilização do ultrassom, pode ser fundamentada na relação entre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico e propriedades físicas, como a densidade. No decorrer do texto, são mostradas algumas formulações com essas relações. Existem diferentes métodos para analisar a propagação de ondas sonoras, um deles é o método de transmissão, muito utilizado para ensaios com madeira e, por isso, foi o foco de estudo desse presente trabalho.

## METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão narrativa de literatura, descrevendo-se um cenário geral do tema com discussões. A busca foi realizada nas plataformas eletrônicas DOAJ, Science Direct, Scopus, SciELO e Google Scholar entre o mês de março e maio de 2024 com foco em publicações dos últimos 10 anos e, eventualmente, 20 anos. Foram utilizadas as mesmas palavras chaves apresentadas após resumo e abstract deste trabalho. Pesquisas com ensaios não destrutivos sem ultrassom foram descartadas, assim como trabalhos com ultrassom relacionados às propriedades não mecânicas como físico-térmicas, elétricas, colorimetria, etc. Foram selecionados 4 trabalhos de repositórios, 4 publicados em congressos e 20 em revistas, todos descritos a seguir.

## O ULTRASSOM

Com a obtenção da velocidade de propagação de ondas sonoras é possível determinar o módulo de elasticidade e outras propriedades mecânicas, desde que conhecida a densidade da madeira [1]. As ondas sonoras podem ser classificadas em três grupos de acordo com a faixa ou espectro de frequência: Infrassons - abaixo de 20 Hz; sons - entre 20 Hz e 20 kHz; ultrassons - acima 20 kHz [2].

Existem algumas vantagens na utilização de frequências ultrassônicas ao invés de infrassons e sons [3]. São elas:

1) Quanto maior a frequência, menor será o comprimento de onda. Isto permite que se consiga, com maior facilidade, as condições necessárias à propagação de ondas planas no material, o que é essencialmente importante para pequenos corpos;

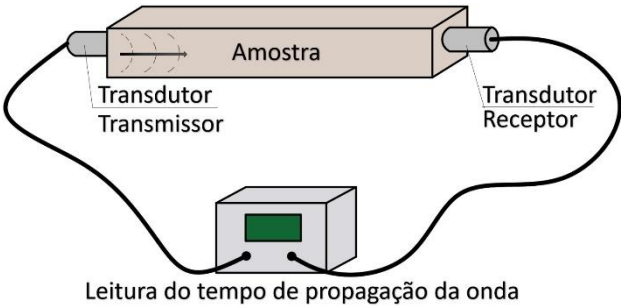
2) Os coeficientes de absorção são usualmente mais altos e, consequentemente, muito mais fáceis de serem mensurados em altas frequências;

3) Os ultrassons são inaudíveis;

4) As ondas associadas às altas frequências são mais facilmente direcionadas.

A análise da propagação de ondas sonoras pode ser realizada por métodos distintos: método de eco pulsado, de ressonância, de transmissão e de imersão. O método de transmissão é o mais utilizado para materiais heterogêneos porque possui maior capacidade de tornear os defeitos e, portanto, é a técnica mais utilizada em ensaios de madeira. Ela consiste na propagação de ondas ultrassônicas mais baixas e utiliza duas sondas (uma transmissora e uma receptora) em faces opostas da peça [2], conforme a Figura 1.

**Figura 1: Esquema de um aparelho de ultrassom com método de transmissão e disposição direta dos transdutores.**




Fonte: o autor.

Nem sempre é possível realizar a medição direta, nesse caso pode ser utilizada medição indireta ou semidireta [4][5][6][7], Figura 2.

**Figura 2: Formas de disposição dos transdutores para ensaios de ultrassom**




Fonte: o autor.

Vários dispositivos podem ser utilizados para realizar essas medições. Na sequência são listados os aparelhos utilizados nos trabalhos relatados nessa revisão.

- Proceq Pundit Lab – transdutores de face plana, 150 kHz [5]
- Proceq Pundit Lab – transdutores de face plana, 24 kHz [8]
- James Instruments V-Meter MK II – transdutores de face plana, 180 kHz [9]
- James Instruments V-Meter MK IV – transdutores de face plana, 500 kHz [10]
- Agricef USLab – transdutores de face plana, 45 kHz [11][12]
- CIRAD UScan® – transdutores piezoelétricos de face plana, 45 kHz [13]

• ACS UK1401 Surfer - transdutores de face plana, 50 kHz [6]
• ACS A1410 Pulsar – transdutor de ponto seco, 50 kHz [6]
• JPR-10CK – transdutor monolítico composto (14 x 20 mm), 200 kHz [14]
• JPN-10CK – transdutor monolítico composto (14 x 20 mm), 200 kHz [15]
• Owon AG1022F e Owon TDS7104 – transdutores de face plana, 200 kHz [16]
• Proceq Pundit PL 200 – transdutores de face plana, 54 kHz [17][18]

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### MÓDULO DE ELASTICIDADE POR ULTRASSOM

Nos trabalhos encontrados na literatura, foi recorrente o uso da Equação 1 descrita por [19] para determinar o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) da madeira [5][7][8][9][10][11][12][14][20][21].

$$E_d = v^2 \cdot \rho \qquad \text{Equação 1}$$

Em que: $E_d$ é o MOEd, v é a velocidade do pulso ultrassônico (VPU) e $\rho$ é a densidade da madeira. Além disso, é possível determinar o módulo de elasticidade estático (MOEe) longitudinal com as VPUs obtidas [5]. Em outros trabalhos [7][8][9][10][12][14][15][16][21] essa propriedade foi obtida por ensaios destrutivos. Para obter o MOEe por VPUs, foi utilizada a Equação 2.

$$E_e = \frac{v^2 \cdot \rho}{(1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})} k \qquad \text{Equação 2}$$

Em que $E_e$ é o MOEe e $\nu_{xy}$ é o coeficiente de Poisson no plano xy e $\nu_{yx}$ é o coeficiente de Poisson no plano oposto. E k é obtido pela Equação 3.

$$k = 1 - \nu_{zx} \cdot \nu_{xz} - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx} - \nu_{zy} \cdot \nu_{yz} - 2 \cdot \nu_{xz} \cdot \nu_{yx} \cdot \nu_{yz} \qquad \text{Equação 3}$$

Os índices indicam o plano de um espaço tridimensional xyz em que o coeficiente de Poisson atua.

### TIPOS DE LEITURA E ANÁLISES DE DETERIORAÇÃO

Pode-se utilizar tanto a medida direta quanto a indireta para obter a VPU e aplicar na Equação 1 e Equação 2 para calcular MOEd e MOEe. Para a madeira de *Apuleia leiocarpa*, por exemplo, existe equivalência entre medida direta e indireta comprovada através do teste F, com F = 0,55 para as médias de velocidades e F = 0,52 para os MOEd e MOEe, em que o F crítico a 5% de significância seria igual a 3,13 para todos os casos [5]. Os resultados mensurados estão na Tabela 1.

**Tabela 1: Valores médios de VPU, MOEd e MOEe para *Apuleia leiocarpa*.**

| Disposição dos transdutores | VPU (m/s) | MOEd (MPa) | MOEe (MPa) |
|---|---|---|---|
| Direta | 5278 | 22600 | 14443 |
| Indireta TL | 5263 | 22952 | 14668 |
| Indireta RL | 5413 | 23953 | 15308 |

TL é a medida tangencial longitudinal. RL é a medida radial longitudinal.

Fonte: adaptado de [5].

A comprovação da equivalência entre os tipos de medidas possibilita que elementos estruturais com as extremidades engastadas sejam avaliados [6].

No estudo de caso apresentado em [6] a técnica de ultrassom com medida indireta foi aplicada na estrutura da cobertura da igreja Sagrado Coração de Jesus em Jastrzębie Zdrój na Polônia. Além dessa técnica, foi realizado o teste de esclerometria para verificar a resistência mecânica dos elementos estruturais. Neste ensaio, semidestrutivo, o esclerômetro perfura o corpo de prova com uma agulha. Obtiveram resultados de penetrações de agulha maiores que 30 mm, com o esclerômetro, e com o ultrassom obtiveram média de VPU igual a 4900 m/s (medida indireta) e 1360 m/s (medida direta) indicando deterioração da madeira. Enquanto as penetrações próximas a 25 mm, com VPU = 5500 m/s (medida indireta) e VPU = 1900 m/s (medida direta), indicariam a não deterioração.

A resistência da madeira à deterioração por patógenos, resistência natural, foi avaliada em [20]. Os exemplares foram submetidos aos testes em dois ambientes, campo aberto e floresta. Utilizaram o ensaio de ultrassom para verificar o MOEd durante os diferentes estágios de deterioração das madeiras amazônicas *Dipteryx odorata, Erisma uncinnatum e Schizolobium amazonicum*.

## CARACTERIZAÇÃO POR ULTRASSOM E TÉCNICAS DESTRUTIVAS

A comparação de resultados de ensaios destrutivos, como o ensaio de compressão [8][9][15] ou de flexão [7][8][16], possibilita a validação dos resultados das propriedades mecânicas obtidos com o ultrassom.

Além de relacionar VPU com a densidade e a resistência à compressão, tanto ao longo da altura quanto do diâmetro da árvore, encontra-se em [15], a VPU correlacionada ao comprimento da fibra da madeira da espécie *Melia azedarach*. Amostras da madeira foram coletadas em diferentes posições radiais e alturas do tronco para obter a velocidade ultrassônica, o comprimento da fibra, a densidade da madeira e a resistência à compressão, Tabela 2.

**Tabela 2: VPU, $f_c$, densidade e comprimento das fibras da *Melia azedarach*.**

| Propriedade *(Melia Azedarach)* | Altura do chão [m] | | | | | Posição radial da medula [%] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,3 | 1,3 | 3,3 | 5,3 | 7,3 | 10 | 50 | 90 |
| VPU [m/s] | 3955 | 4047 | 4042 | 4048 | 4074 | 3683 | 4178 | 4237 |
| $f_c$ [MPa] | 38,2 | 38,5 | 38,6 | 37,8 | 38,5 | 33,1 | 38,9 | 42,9 |
| Densidade [g/cm³] | 0,51 | 0,5 | 0,5 | 0,49 | 0,51 | 0,43 | 0,51 | 0,56 |
| Comprimento da fibra [mm] | 1,07 | 1,06 | 1,05 | 1,04 | 1,03 | 0,87 | 1,10 | 1,19 |

$f_c$ é a resistência à compressão.

Fonte: adaptado de [15].

Foram encontradas as seguintes correlações estatísticas entre VPU e as propriedades da madeira: 0,67 para densidade; 0,69 para comprimento da fibra; 0,70 para resistência à compressão, tanto maior a correlação quanto mais próximo de 1,0. Portanto, a variação de VPU 3955 - 4173 [m/s] ao longo da altura, foi considerada não significativa, com ligeiro aumento acompanhando a altura. E ao longo do diâmetro foi

considerada significativa com variação de VPU 3683-4237 [m/s], sendo a menor próximo a medula.

Ensaios de compressão foram realizados em sete diferentes espécies de madeira nos três sentidos anatômicos (longitudinal, tangencial e radial) para comparar MOEe com MOEd em [9]. Com os resultados, Tabela 3, foram obtidos os coeficientes de determinação ($R^2$) 52%, 76% e 80% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente.

**Tabela 3: Resultados do MOEe e do MOEd em compressão, [9].**

| Espécies | MOEeL (MPa) | MOEeT (MPa) | MOEeR (MPa) | MOEdL (MPa) | MOEdT (MPa) | MOEdR (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Hymenolobium petraeum* | 12077 | 750 | 1052 | 17104 | 1612 | 2152 |
| *Dinizia excelsa* | 9909 | 1228 | 1600 | 22155 | 2308 | 4662 |
| *Bertholletia excelsa* | 9007 | 678 | 969 | 15906 | 1196 | 1533 |
| *Apuleia leiocarpa* | 12258 | 1048 | 1483 | 21304 | 2192 | - |
| *Astronium lecointei* | 8729 | 788 | 1055 | 13969 | 1469 | 2278 |
| *Caryocar villosum* | 7345 | 821 | 911 | 15078 | 1663 | 2913 |
| *Peltogyne discolor* | 12024 | 911 | 1486 | 23958 | 2362 | 3801 |

MOEeL, MOEeT e MOEeR: módulo de elasticidade estático no sentido longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. MOEdL, MOEdT e MOEdR: módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, tangencial e radial, respectivamente.

Fonte: adaptado de [9].

Para a espécie de *Eucalyptus camaldulensis*, foi encontrado $R^2 = 0{,}67$ entre a densidade e o MOEd, através das leituras de VPU, em [8]. Também foram realizados testes mecânicos de compressão paralela e ortogonal, flexão e Dureza Janka, testes físicos de densidade, retração e fator de anisotropia (FA), calculado pela Equação 4. Os valores das propriedades mecânicas e MOEd estão na Tabela 4.

$$FA = \frac{R_T}{R_R} \qquad \text{Equação 4}$$

Em que $R_T$ é a retração tangencial e $R_R$ a radial.

**Tabela 4: MOEd para *Eucalyptus camaldulensis*.**

| Espécie | Módulo de elasticidade médio [MPa] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Flexão | Compressão 0° | Compressão 90° | Ultrassom |
| *Eucalyptus camaldulensis* | 7019 | 10736 | 388 | 16975 |

Fonte: adaptado de [8].

Os resultados de VPU podem variar com o teor de umidade da amostra [16]. Enquanto esse parâmetro pode ser controlado em laboratório, não é possível gerenciá-lo na floresta. Por isso, um método para melhorar a precisão da análise por VPU para determinar o módulo de elasticidade da madeira em 4 diferentes faixas de teor de umidade 50-60%, 60-70%, 80-90% e 90-100% foi desenvolvido em [16]. O método de propagação de ondas Lamb guiadas leva em conta a mudança de fase de ondas de compressão e ondas de cisalhamento em medidas indiretas de ultrassom. Os resultados obtidos com VPU, Tabela 5, foram comparados com resultados de flexão em 3 pontos, obtendo-se a maior variação igual a 2%, validando, assim, o método proposto para caracterização não destrutiva da madeira.

**Tabela 5: Densidade, VPU, MOEe e MOEd para Green poplar.**

| Espécie | Densidade [kg/m³] | $VPU_{Lamb}$ [m/s] | Módulo de elasticidade médio [MPa] | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Flexão | Lamb Ultrassom |
| Green poplar | 571 | 1760 | 5436 | 5517 |
| | 583 | 1703 | 5197 | 5263 |
| | 636 | 1597 | 4993 | 5032 |
| | 730 | 1430 | 4600 | 4625 |

Fonte: adaptado de [16].

O uso de métodos de propagação de ondas ultrassônicas para estimar as propriedades mecânicas de flexão da madeira de *Peltophorum dubium* foi feito com duas disposições (semidireta e indireta) dos transdutores para estimar o MOEd [7]. Obtiveram valores de 4175,39 MPa e 3583,28 MPa para o MOEd nas medições semidireta e indireta, respectivamente. Os valores do MOEe e módulo de ruptura (MOR) foram, respectivamente, de 5738,81 MPa e 77,38 MPa. E verificaram que por meio dos parâmetros de regressão (maior coeficiente de determinação ajustado, menor erro padrão de estimativa e maior valor de F calculado), o melhor ajuste de predição do MOEe e do MOR à flexão estática em função do método ultrassonoro ocorre ao considerar o método semidireto de propagação de ondas.

## ULTRASSOM E OUTRAS TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS

Todos os trabalhos citados até o momento foram desenvolvidos com diversos ensaios, sendo o ultrassom a única técnica não destrutiva. Outros trabalhos [10][11][12][13][14][18][21], no entanto, realizaram comparações entre o MOEd obtido em ensaios de ultrassom e resultados de alguma outra técnica não destrutiva. Esses trabalhos são comentados na sequência.

Vibração por frequência natural é outro ensaio não destrutivo. Este ensaio foi utilizado em [21], além do ultrassom e flexão em 4 pontos, para obter o módulo de elasticidade, tanto dinâmico quanto estático, de seis espécies de madeira. Os resultados obtidos em [21] são apresentados na Tabela 6. Ambos os ensaios não destrutivos apresentam uma alta precisão na previsão do MOEd. Os resultados do ensaio de vibração resultaram mais precisos do que os resultados de ultrassom, quando comparados ao ensaio de flexão. Para cada um dos ensaios não destrutivos o $R^2$ resultou igual a 0,96 e 0,94 para o ensaio de vibração e de ultrassom, respectivamente.

**Tabela 6: Resultados dos módulos de elasticidade em [21].**

| Espécie | Módulo de elasticidade médio [MPa] | | |
|---|---|---|---|
| | Flexão | Vibração | Ultrassom |
| *Populus- euramericana I-214* | 9173,9 | 9271,2 | 12570,5 |
| *Fagus sylvatica L.* | 12139,0 | 13855,4 | 15894,6 |
| *Quercus pyrenaica L.* | 12437,3 | 14493,5 | 15917,1 |
| *Paulownia elongata* | 4933,1 | 5239,8 | 7060,8 |
| *Pinus sylvestris L.* | 13462,6 | 13105,4 | 16780,3 |
| *Picea sitchensis* | 6649,3 | - | 9405,0 |

Fonte: adaptado de [21].

Ondas de tensão é outro ensaio não destrutivo. Foi utilizado em [10][11][12][14] juntamente com ensaios de ultrassom.

Na avaliação da madeira *Acacia mangium* foi encontrada correlação não significativa entre a velocidade de propagação do som e a densidade da madeira em [14], com correlação Pearson igual a -0,37 para a onda de tensão e -0,12 para o ultrassom. O resultado indica que essa correlação depende da espécie. Por outro lado, foi encontrada correlação igual a 0,84 entre densidade e módulo de elasticidade estático. Outro destaque encontrado em [14] é a correlação entre o aumento do comprimento da fibra e o aumento da velocidade de propagação do som ao longo da fibra, também identificado em [19]. Entre os ensaios não destrutivos, o MOEd do teste com ultrassom resultou mais próximo do MOEe com ensaio de flexão, 4,75% maior, enquanto o teste com tensão de onda resultou em MOEd 9,29% maior. E os valores de VPU resultaram em média de 4257 m/s para ondas de tensão e 4183 m/s para o ultrassom.

Em outros trabalhos [10][11][12] também foram relatados valores do MOEd com ultrassom, maiores que o MOEd com ondas de tensão, sendo que, em [10][12], os valores obtidos nos ensaios não destrutivos resultaram maiores do que os valores obtidos em ensaios de flexão, conforme Tabela 7.

**Tabela 7: Valores do MOE obtidos em ensaios destrutivos e não destrutivos.**

| Autores | Ultrassom (MPa) | Onda de tensão (MPa) | Flexão (MPa) |
|---|---|---|---|
| [11] *Dipteryx odorata* | 26242 | 18359 | - |
| [12] *Qualea brevipedicellata* | 21532 | 13500 | 12808 |
| [12] *Erisma uncinatum* | 19678 | 16756 | 8103 |
| [10] *Eucalyptus sp.* | 16138 | 10611 | 10280 |

Fonte: o autor.

Até aqui, os trabalhos analisados utilizaram a densidade e a VPU para determinar o MOEd, apresentando correlações elevadas. Em [13] foram utilizados dispositivos desenvolvidos pelo CIRAD (Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento) que mostram diretamente o MOEd. Esses dispositivos obtêm o MOEd por testes dinâmicos de vibrações de flexão, pelo sistema acústico BING® e de compressão, por um dispositivo ultrassonoro específico UScan®. Foram analisados corpos de prova retirados das regiões internas e externas do tronco. Embora não tenham apresentado coeficiente Pearson, os autores relatam baixa correlação entre densidade e MOEd, com $R^2$ igual a 0,39 e 0,66 para flexão (MOEdf) e compressão (MOEdc), respectivamente. Por fim, concluem que, para a espécie *Eucalyptus urophylla*, a densidade não é um parâmetro com precisão aceitável para determinar o MOEd. O MOEd de flexão e compressão foram comparados à densidade da madeira, conforme Tabela 8.

**Tabela 8: Médias de MOEd e densidade obtidos por BING® e UScan®.**

| Posição | MOEdf (MPa) | MOEdc (MPa) | Densidade (Kg/m³) |
|---|---|---|---|
| Interior | 10537 | 13043 | 521 |
| Exterior | 17149 | 18999 | 591 |

MOEdf: módulo de elasticidade dinâmico em flexão por vibração. MOEdc: módulo de elasticidade dinâmico em compressão por ultrassom.

Fonte: adaptado de [13].

Foram conduzidos ensaios de ultrassom por transmissão e escaneamento por ecopulso/reflexão em [18] para avaliação de *Eucalyptus nitens*. Foram retirados discos

de tora da base, do meio e do topo da árvore para avaliar defeitos em madeiras que tiveram poda e que não tiveram poda. Uma câmera térmica auxiliou na identificação de água e, consequentemente, de nós e rachaduras dentro dos troncos. Foram utilizados equipamentos para complementar os experimentos, como radiografia e tomografia. Os testes ultrassônicos mostraram diferenças na propagação de ondas entre os discos de árvores que foram podadas e de árvores que não foram podadas. A radiografia e a tomografia computadorizada identificaram defeitos internos, como nós e traços de galhos nos discos, auxiliando na calibração de dados para testes ultrassônicos. O estudo demonstrou a viabilidade do uso de dispositivos ultrassônicos para detecção não destrutiva de defeitos internos em plantações de *E. nitens*, fornecendo uma alternativa econômica à equipamentos de imagem médica caros e menos portáteis. Os autores destacam a necessidade de identificar o número, posição, orientação, forma e tamanho dos defeitos para obter resultados efetivos. Para minimizar a variabilidade dos resultados, sugerem coletar amostras da base dos troncos, sem variar a altura da coleta, e obter a VPU em medida direta de várias posições ao redor do disco. Também sugerem o uso de machine learning para clarificar a análise das VPUs possibilitando uma melhor interpretação dos resultados.

## TÉCNICAS COMPUTACIONAIS

Assim como sugerido em [18], o uso de *machine learning* já vem sendo estudado para aperfeiçoar as leituras de VPUs [17][22] enquanto outros trabalhos são realizados através de simulações computacionais [23][24][25].

O tempo de propagação da onda, no ensaio de ultrassom, é muito sensível a uma grande quantidade de aspectos, entre eles a pressão exercida pelo operador, a quantidade de gel aplicada e o desalinhamento entre o receptor e o transdutor. Para aumentar a precisão dos resultados, foi utilizado em [17] técnicas de *machine learning* com um algoritmo de decomposição de sinal chamado VMD e depois dois classificadores (Bayes Gaussiano e Bayes Kernel). Neste trabalho, realizaram testes de ultrassom na direção radial e tangencial dos anéis de crescimento da madeira para detectar regiões intactas, ou com pequenas ou grandes falhas. Dessa forma, obtiveram 100% de precisão na validação cruzada dez vezes em avaliação por espécie e 93,6% com espécies variadas.

Em outro trabalho [22], as próprias técnicas de *machine learning* foram avaliadas. 72 modelos foram criados, combinando diversos parâmetros de entrada, dentre eles a densidade, teor de umidade, VPU, métodos e técnicas de treinamento que após processamento foram comparados com os resultados experimentais. Foram utilizados dados de experimentos da literatura [26][27][28] para determinar o MOE da madeira na direção longitudinal, tangencial e radial. Três técnicas foram empregadas: regressão linear multivariável (MLR), rede neural artificial (RNA) e regressão por vetores de apoio (SVR). O coeficiente de correlação resultou entre 0,934-0,943 para MLR, 0,9623-0,9907 para SVR e 0,9596-0,9945 para RNA. A maior precisão foi alcançada com a regressão por vetores de apoio, como relatado em [22].

Por meio de simulações computacionais em [23] foram determinadas as configurações iniciais do pulso ultrassônico que resultariam em resultados mais precisos para identificar defeitos em troncos de árvores. Com o pacote computacional COMSOL, elaboraram modelos bidimensionais da seção do tronco de árvores com e sem furos, simulando defeitos. O pulso ultrassônico foi gerado com a imposição de deslocamentos em pontos estratégicos na borda da seção, enquanto em outros pontos foi realizada a leitura do sinal. Utilizaram oscilações de 30 Hz, 50 Hz e 70 Hz e amplitude de 0,02 mm, 0,05 mm e 0,08 mm. Seus resultados indicaram maior precisão com as configurações de 50 Hz de frequência e 0,08 mm de amplitude para esse modo de simulação.

## CONCLUSÃO

Existe um interesse crescente no uso e no tratamento de dados obtidos por técnicas de ultrassom para identificar defeitos e determinar as propriedades mecânicas da madeira. Os trabalhos que utilizam o ultrassom têm comparado seus resultados com outros ensaios, destrutivos (compressão e flexão), semidestrutivos (esclerômetro) e não destrutivos (ondas de tensão, vibração, tomografia, radiografia e simulação computacional). Além disso, técnicas têm sido propostas para aumentar a precisão durante a coleta de dados (ondas guiadas) e outras para melhorar a análise de resultados (*machine learning*). O módulo de elasticidade dinâmico obtido pela densidade da madeira e a velocidade que a onda ultrassonora leva para percorrer o espaço entre os transdutores, é o parâmetro mais estudado nesse tipo de ensaio. Parâmetros como o fator anisotrópico, o coeficiente de Poisson, a resistência à tração e o módulo de cisalhamento, obtidos por correlações de ultrassom, foram pouco ou nada explorados nos trabalhos encontrados nesta revisão. Sugere-se, portanto, que sejam parâmetros incluídos em estudos futuros.

## REFERÊNCIAS


[1] OLIVEIRA, Fabiana Goia Rosa. **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som.** 2001. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

[2] CARDIN, Viviane de Salles. **Ensaios não destrutivos aplicados à madeira serrada e estruturas: técnicas potenciais para uso no Brasil.** 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

[3] AZEVEDO JÚNIOR, Antônio Pires. **Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através da técnica de ultra-som: fundamentos físicos e resultados experimentais.** 2002. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

[4] CALEGARI, Leandro. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira.** 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

[5] MACENA, S. M. F. et al. Estudo da disposição de transdutores ultrassônicos na madeira. In: WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE SISTEMAS E PROCESSOS CONSTRUTIVOS, 4, 2023, Porto Alegre/Rio Grande do Sul. **TECSIC 2023.** Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 142-147.

[6] DROBIEC, J.; NOWOGOŃSKA, B. Restrictions and new possibilities of technical and conservation diagnostics of wood in heritage buildings. **Civil and Environmental Engineering Reports**, v. 33 (2), p. 0106-0116, 2023. DOI: 10.59440/ceer/174568.

[7] STANGERLIN, D. M. *et al*. Propagação indireta e semidireta de ondas ultrassonoras na estimativa de propriedades mecânicas da madeira. **Ciência da Madeira**, v. 02, p. 85-95, 2011.

[8] MELO, R. R. *et al*. Ultrasound to determine physical-mechanical properties of *Eucalyptus camaldulensis* wood. **Wood Material Science & Engineering**, 16:6, 407-413, 2020. https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1830435.

[9] ALVES, R. C.; PIZZOL, V. T.; CARRASCO, E. V. M. Estimativa do módulo de elasticidade das madeiras tropicais por meio do ultrassom. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE ESTRUCTURAS DE MADERA, 2 e CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DE LA MADERA EM LA CONSTRUCCIÓN, 2, 2017, Buenos Aires/Argentina. **CLEM+CIMAD 2017**. Buenos Aires: Universidad Nacional Noroeste, 2017. T3-31, 9 p.

[10] CARVALHO, R. A. *et al*. Predição do módulo de elasticidade estático de *Eucalyptus sp*. por meio de duas técnicas não destrutivas. **Ciência Florestal**, v.33, n. 3, e70019, p. 1-15, 2023. https://doi.org/10.5902/1980509870019.

[11] PAULA, M. H. *et al*. Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* Willd). **Biodiversidade**, v. 15, n2, p. 136-149, 2016.

[12] RIBEIRO, E. S. *et al*. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. **Nativa - Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v. 4, n. 2, p. 103-106, 2016. ISSN: 2318-7670. DOI: 10.14583/2318-7670.v04n02a09.

[13] ASSIS, M. R. *et al*. Estimativa de propriedades elásticas da madeira por emissão acústica e ultrassom. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 14, 2014, Natal/Rio Grande do Norte. **EBRAMEM 2014.** Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014. p. 28-30.

[14] DUONG, D. V.; HASEGAWA, M. Relationship between acoustic wave velocity and mechanical properties in *Acacia mangium* wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 26, p. 1-10, 2024. https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.33.

[15] DUONG, D. V.; HASEGAWA, M.; MATSUMURA, J. The relations of fiber length, wood density, and compressive strength to ultrasonic wave velocity within stem of *Melia azedarach*. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 16, p. 1-8, 2018. https://doi.org/10.1007/s13196-018-0227-0.

[16] FATHI, H.; KAZEMIRAD, S.; NASIR, V. Lamb wave propagation method for nondestructive characterization of the elastic properties of wood. **Applied Acoustics**, v. 171, 107565, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107565.

[17] MOUSAVI, M.; GANDOMI, A.H. Wood hole-damage detection and classification via contact ultrasonic testing. **Construction and Building Materials**, v. 307, 124999, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124999.

[18] TASKHIRI, M. S. *et al*. Ultrasonic and thermal testing to non-destructively identify internal defects in plantation eucalypts. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, 105396, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105396.

[19] BUCUR, Voichita. **Acoustics of wood**, Berlin: Springer, 2ª ed., 2006, 394p.

[20] PILOCELLI, A. *et al*. Resistência natural das madeiras de cumaru, cedrinho e paricá submetidas a ensaios de deterioração de campo. **Ciência da Madeira**, v. 06, p. 1-10, 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n1p1-10.

[21] ACUÑA, L. *et al*. Modulus of elasticity prediction through transversal vibration in cantilever beams and ultrasound technique of different wood species. **Construction and Building Materials**, 371, 130750, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130750.

[22] PALIZI, S.; TOUFIGH, V.; KAMI, M. R. Ultrasonic pulse velocity for mechanical properties determination of wood. **Wood Material Science & Engineering**, v. 18, p. 1966-1977, 2023. DOI: https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2208556.

[23] SHEYKHOLESLAMI, M. *et al*. Numerical Optimization of Non-destructive Ultrasonic Testing in Identifying Defects in Composite Structure of Pine Tree Trunk. **Mechanics of Advanced Composite Structures**, v. 11, p. 249-258, 2024.

[24] TALLAVO, F.; PANDEY, M. D.; CASCANTE, G. Experimental and numerical methods for detection of voids in wood poles using ultrasonic testing. **Journal of materials in civil engineering**, v. 25, n. 6, pp.772-780, 2013.

[25] SEBERA, V.; et al. Numerical simulation of elastic wave propagation in wood with defined tree rings. **Wood Research**, v. 55, n. 3, pp.1-10, 2010.

[26] KEUNECKE, D. *et* al. 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, 2006. DOI: 10.1007/s00226-006-0107-4.

[27] OZYHAR, T. *et al*. Determining moisture - dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. **Wood Science and Technology**, v. 47, p. 329–341, 2013. DOI: 10.1007/s00226-012-0499-2.

[28] GÜNTEKIN, E., AYDIN, T. Y.; NIEMZ, P. Prediction of compression properties in three orthotropic Directions for some important Turkish wood species using ultrasound. In: 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. **General Technical Report FPL-GTR-239.** V. 10 (4), 2015. p. 7252–7262.