4° Workshop de tecnologia de sistemas e processos construtivos
TECSIC 2023

Porto Alegre, RS, Brasil, 23 e 24 de agosto de 2023

Estudo da disposição de transdutores ultrassônicos na madeira

Study of the arrangement of ultrasonic transducers in wood

Suelem Maurício Fontes Macena
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP) | São Paulo | Brasil | suelemmacena@usp.br
Fabiana Lopes de Oliveira
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP) | São Paulo | Brasil | floliveira@usp.br
Elton Belarmino de Sousa
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP) | São Paulo | Brasil | eltonbelsousa@usp.br
Takashi Yojo
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo| Brasil | yojos@ipt.br
Cassiano Oliveira de Souza
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo | Brasil | cassianos@ipt.br

Resumo
Em inspeções de estruturas de madeira, o uso de técnicas não destrutivas para a avaliação das propriedades mecânicas é imprescindível. O ultrassom se mostra como um ensaio não-destrutivo potencial nesse tipo de análise. No entanto, há algumas limitações de acesso para a medição direta com ultrassom em campo, uma vez que dificilmente é possível posicionar os transdutores nos topos opostos para propagar ondas na direção longitudinal de uma peça estrutural, pois estes pontos costumam estar engastados na parede ou ligados a outras peças. Considerando-se essa dificuldade prática, o objetivo deste estudo foi verificar se a configuração de medição indireta de propriedades mecânicas com os transdutores em duas disposições diferentes é equivalente à configuração de medição direta para a obtenção da velocidade de propagação das ondas, do módulo de elasticidade dinâmico e do módulo de elasticidade estático. Concluiu-se que as três configurações avaliadas são equivalentes e, portanto, podem ser utilizadas na obtenção dessas propriedades em inspeções de campo.

Palavras-chave: Ensaios não-destrutivos. Ultrassom. Módulo de elasticidade. Inspeção de campo. Madeira.

Como citar:
MACENA, S. M. F.; OLIVEIRA, F. L. de; SOUSA, E. B. de; YOJO, T.; SOUZA, C. O. de Estudo da disposição de transdutores ultrassônicos na madeira. TECSIC 2023. In: WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE SISTEMAS E PROCESSOS CONSTRUTIVOS, 23 e 24 AGO 2023, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 142-147.

Abstract

In inspections of wooden structures, the use of non-destructive techniques to evaluate the mechanical properties is necessary. Ultrasonic technique is shown to be a potential non-destructive test in this type of analysis. However, there is some access limitation for direct measurement with ultrasound in-situ, since it is hardly possible to position the transducers at opposite ends to propagate waves in the longitudinal direction of a structural part, as these points are usually embedded in the wall or connected to other parts. Considering this practical difficulty, the objective of this study was to verify if the configuration of indirect measurement of mechanical properties with the transducers in two different arrangements are equivalent to the configuration of direct measurement to obtain the speed of waves, the dynamic modulus of elasticity and the static modulus of elasticity. It was concluded that the three evaluated configurations are equivalent and, therefore, can be used to obtain these properties in-situ assessment.

Keywords: Non-destructive tests, Ultrasonic technique, Modulus of elasticity, In-situ assessment, Wood.

INTRODUÇÃO

A madeira é um importante material de construção presente tanto em estruturas de patrimônios históricos como em edificações modernas. Para a manutenção dessas estruturas é importante que se faça uma avaliação minuciosa da condição das peças por meio de inspeções para que se possa sugerir intervenções adequadas.

Em inspeções em campo, a avaliação de algumas peças estruturais se torna difícil devido ao acesso limitado onde estas estão localizadas [1]. Em algumas situações, há apenas um pequeno trecho livre para a verificação da condição do elemento estrutural.

Considerando essas dificuldades e a importância de se avaliar de forma não invasiva essas estruturas, as técnicas não destrutivas têm se apresentado como uma solução viável para este tipo de avaliação [1].

O ultrassom tem sido aplicado para avaliação de propriedades mecânicas da madeira e tem apresentado bons resultados [2][3][4]. O uso do ultrassom, dentre outras técnicas não destrutivas, foi adotado por BAAR et al., 2015 [3] para a estimativa de propriedades mecânicas de cinco diferentes espécies de madeira com boa correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à flexão estática.

Alguns dos fatores que influenciam fortemente a propagação de ondas na madeira são o teor de umidade, a anatomia da madeira, a densidade e a inclinação da grã [1].

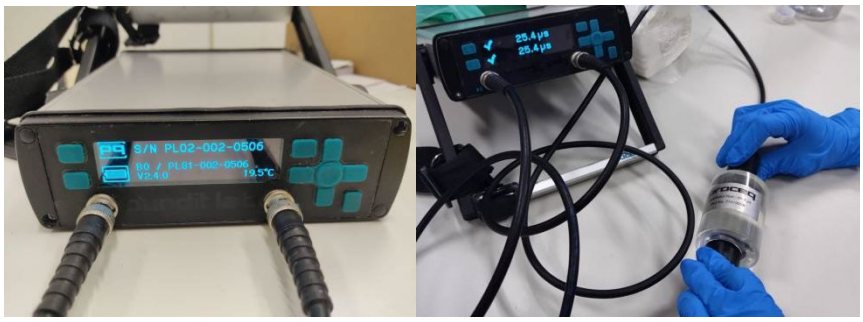
A disposição dos transdutores de forma direta, ou seja, nos topos de uma peça estrutural em muitas situações não é viável na prática, uma vez que essas regiões normalmente estão engastadas nas paredes ou terminam fazendo ligação com outras peças. Considerando essas limitações, STANGERLIN et al. (2011) [1] analisaram duas diferentes disposições, semidireta e indireta, de transdutores de pontos secos para estimar o módulo de elasticidade dinâmico de madeira da espécie *peltophorum dubium* e compararam com o módulo de elasticidade estático obtido no ensaio de flexão.

O presente trabalho propõe o estudo do uso do ultrassom com os transdutores dispostos lado a lado comparado a um posicionamento de medição direta, nos topos opostos, na espécie *Apuleia leiocarpa*, como uma forma viável de avaliação não destrutiva do módulo de elasticidade de maneira a contribuir para inspeção de peças estruturais em campo.

Material e Métodos

Utilizou-se o equipamento de ultrassom *Pundit Lab* com transdutores de 150 kHz e antes de iniciar as medições foi realizada uma calibração com o uso de um padrão de 25,4 μs apresentados na Figura 1.

Figura 1: Equipamento de ultrassom (à esquerda) e calibração com padrão de 25,4 μs (à direita).



Fonte: o autor.

Foram utilizados os transdutores com frequência de 150 kHz para que fosse possível medições com alcance de pelo menos três comprimentos de onda conforme orientado pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007) [5].

Para este estudo foi utilizada uma amostra de madeira da espécie *Apuleia leiocarpa*, vulgarmente conhecida como garapa, composta por 25 corpos de prova de 150 mm de comprimento e seção quadrada com 50 mm de lado com cortes orientados nas direções principais longitudinal, radial e tangencial (Figura 2).

Figura 2: Foto do corpo de prova cortado nas direções principais ortogonais.



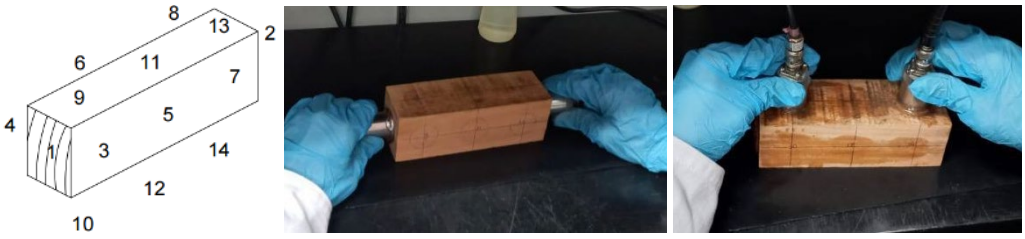
Fonte: o autor.

Foram realizadas medições da velocidade ultrassônica com os transdutores dispostos em três configurações diferentes. Primeiramente, a medição direta se deu com os transdutores dispostos nas extremidades opostas dos corpos de prova com distância de 150 mm. Após, as medições indiretas se deram com os transdutores dispostos na

superfície do plano longitudinal tangencial, posicionados lado a lado, alinhados às fibras e distanciados de 100 mm. A terceira medição foi realizada exatamente como a anterior, porém com os transdutores dispostos na superfície do plano longitudinal radial com o mesmo distanciamento. Nos três casos, a propagação da onda ocorreu na direção longitudinal.

Foi realizado um mapeamento do corpo de prova, sendo as posições 1 e 2 (longitudinal) a primeira configuração, as posições 3 e 7 (plano longitudinal tangencial), a segunda e por último as posições 9 e 13 (plano longitudinal radial) (Figura 3).

Figura 3: Mapeamento do corpo de prova (à esquerda), posicionamento dos transdutores para medição direta (ao centro) e posicionamento para medição indireta ou de superfície (à direita).



Fonte: o autor.

De acordo com o manual de instruções do equipamento de ultrassom *Pundit Lab* e ARRIAGA et al (2022) [2], as medições diretas são as que proporcionam a máxima transmissão de sinal entre os transdutores, portanto melhores resultados.

O cálculo do módulo de elasticidade foi realizado por meio das equações descritas por BUCUR (2006) [6]. O módulo de elasticidade dinâmico é definido conforme equação 1.

$$(1)\quad E_d = C_{11} = \rho v^2$$

Onde E_d é o módulo de elasticidade dinâmico em MPa, $\boldsymbol{\rho}$ é a densidade em kg/m³ e v é a velocidade da onda em m/s.

O cálculo do módulo de elasticidade estático longitudinal é dado pela equação 2.

$$(2)\quad E_1 = \frac{C_{11}}{(1-\nu_{23}\nu_{32})}k$$

Onde k é dado pela equação 3.

$$(3)\quad k = 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{31}$$

Onde $\boldsymbol{\nu}_{12}$, $\boldsymbol{\nu}_{21}$, $\boldsymbol{\nu}_{23}$, $\boldsymbol{\nu}_{32}$, $\boldsymbol{\nu}_{13}$ e $\boldsymbol{\nu}_{31}$ são os coeficientes de Poisson nas direções longitudinal radial, radial longitudinal, radial tangencial, tangencial radial, longitudinal tangencial e tangencial longitudinal, respectivamente.

Utilizou-se os coeficientes de Poisson obtidos por SENALIK e FARBER (2021) [7] para espécies de angiospermas adotados para a garapa e foram reorganizados conforme a convenção apresentada por BUCUR (2006) [7].

Para a avaliação dos resultados utilizou-se a análise de variância por comparação de médias entre as velocidades de propagação de onda nas disposições 1 e 2 (método direto), na superfície do plano tangencial longitudinal, 3 e 7, e na superfície do plano

radial longitudinal, 9 e 13, (métodos indiretos), também se compararam os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos nas três configurações comentadas.

Resultados e Discussão

Os valores médios e respectivos desvios padrões dos resultados da velocidade de propagação de onda, do módulo de elasticidade dinâmico e do módulo de elasticidade estático nas três disposições avaliadas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores médios e respectivos desvios padrões dos resultados obtidos.

Disposição dos transdutores	Velocidade (m/s)	Desvio padrão	Módulo de Elasticidade dinâmico (MPa)	Desvio padrão	Módulo de elasticidade estático (MPa)	Desvio padrão
Posições 1 e 2	5278	263	22600	2870	14443	1834
Posições 3 e 7	5263	774	22952	6425	14668	4106
Posições 9 e 13	5413	499	23953	4718	15308	3015

Fonte: o autor.

A análise de comparação de médias entre as velocidades nas posições (1 e 2), (3 e 7) e (9 e 13) resultou em F de 0,55 sendo que o F crítico a nível de 5% de significância é de 3,13 e, portanto, os resultados são estatisticamente equivalentes. A análise de comparação entre os módulos de elasticidade dinâmicos nas três disposições testadas, assim como na comparação entre os módulos de elasticidade estáticos calculados resultaram em F de 0,52 sendo que o F crítico a nível de 5% de significância é de 3,13 e, portanto, também são estatisticamente equivalentes entre si.

Conclusão

Os resultados mostraram que os métodos diretos e indiretos de medição com ultrassom para a obtenção da velocidade, do módulo de elasticidade dinâmico e do módulo de elasticidade estático, em uma amostra da espécie *Apuleia leiocarpa*, não dependem da disposição dos transdutores para os casos avaliados. Embora sejam necessários estudos para qualquer outra situação, conclui-se que, no contexto desta pesquisa, qualquer uma das configurações consideradas, tem potencial para a obtenção do módulo de elasticidade na avaliação de estruturas de madeira em campo.

REFERÊNCIAS

[1] STANGERLIN, Diego Martins et al. Propagação indireta e semidireta de ondas ultrassonoras na estimativa de propriedades mecânicas da madeira. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science**), Pelotas, v. 2, n. 2, p. 85-95, nov. de 2011.

[2] ARRIAGA, Francisco et al. Prediction of the mechanical properties of timber members in existing structures using the dynamic modulus of elasticity and visual grading parameters. **Construction and Building Materials**, v. 322, p. 126512, 2022.

[3] BAAR, Jan; TIPPNER, Jan; RADEMACHER, Peter. Prediction of mechanical properties-modulus of rupture and modulus of elasticity-of five tropical species by nondestructive methods. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 17, n. 2, p. 239-252, 2015.
[4] MISSIO, André Luiz et al. Propriedades mecânicas da madeira resinada de Pinus elliottii. **Ciência Rural**, v. 45, p. 1432-1438, 2015.
[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15521**: Ensaios não destrutivos - Ultra-som - Classificação mecânica de madeira serrada de dicitiledôneas. Rio de Janeiro, 2007.
[6] BUCUR, Voichita. **Acoustics of wood**. Springer Science & Business Media, 2006.
[7] SENALIK, C. A.; FARBER, B. Mechanical properties of wood. **Wood Handbook-wood as an engineering material**, General Technical Report FPL-GTR-282. Madison: USDA, 2021. p. 5.2-5.3.