

ESTIMATIVAS DAS CONSTANTES ELÁSTICAS DA MADEIRA POR MEIO DE ONDAS ULTRA-SONORAS (ULTRA-SOM)

Joaquim Carlos Gonzalez¹, Ailton Teixeira do Valle¹, Alexandre Florian da Costa¹

RESUMO: O trabalho tem como principal objetivo estimar as constantes elásticas da madeira, empregando-se uma metodologia não destrutiva, de ondas ultra-sonoras (ultra-som). Foram utilizadas madeiras de quatro espécies: Fava Amargosa (*Vataireopsis speciosa*), Jequitiba Rosa (*Cariniana micrantha*), Peroba d'Água (*Rauwolfia paraensis*) e Peroba Mico (*Aspidosperma macrocarpum*). Por meio da determinação das velocidades de propagação das ondas ultra-sonoras, baseando-se na equação $V^2 = E_i/\rho$, (em que: V - velocidade de propagação da onda; E_i - módulo de elasticidade da madeira, segundo o eixo (longitudinal, radial ou tangencial); ρ - densidade), estimaram-se as principais constantes elásticas da madeira. Os valores médios da velocidade dos ultra-sons entre as três direções da madeira foram sempre significativamente diferentes para as quatro espécies, a 1% de probabilidade. Estas diferenças das ondas ultra-sonoras segundo os eixos da madeira podem ser explicadas pela própria estrutura anatômica do material. A utilização da propagação das ondas ultra-sonoras é uma alternativa para determinar as propriedades mecânicas da madeira, principalmente as constantes elásticas.

Palavras-chaves: Madeira, ultra-som, constantes elásticas.

THE USE OF ULTRASONIC METHOD FOR ESTIMATING WOOD ELASTIC CONSTANTS

ABSTRACT: The objective of this work was to estimate wood elastic constants, applying ultrasonic non destructive tests. Wood from: Fava Amargosa (*Vataireopsis speciosa*), Jequitiba Rosa (*Cariniana micrantha*), Peroba d'Água (*Rauwolfia paraensis*) e Peroba Mico (*Aspidosperma macrocarpum*) was used. The main wood elastic constants were estimated by means of the determination of the velocities of ultrasonic propagation, based on the equation: $V^2 = E_i / \rho$; where: V – wave propagation velocity; E_i – modulus of the wood elasticity in relation to the axis (longitudinal, radial or tangential); ρ – volumetric mass. Mean values obtained for ultrasonic velocity in the three wood perpendicular directions (longitudinal, radial or tangential) showed always a statistically significant difference for the species studied, at 1% level of probability (F test). These differences in the ultrasonic waves propagation, in relation to the wood axe, are explained by the anatomic structure of the material. The ultra sonic non-destructive methodology showed to be an alternative for studying wood mechanical properties, mainly on the elastic constants determination.

Key words: Wood, ultrasonic, elastic constants

¹ Professores do Departamento de Engenharia Florestal – Universidade de Brasília, Brasília – DF.

1. INTRODUÇÃO

As características mecânicas são importante base tecnológica para utilização racional da madeira. Vários métodos podem ser utilizados para avaliação da qualidade da madeira e as técnicas não-destrutivas são utilizadas com alguma frequência para esta finalidade.

Os métodos que utilizam as ondas ultra-sonoras estão sendo empregados, principalmente, para determinar as constantes elásticas, ilustrar as modificações biológicas da estrutura da madeira e avaliar a qualidade de desdobro. Métodos empregando a frequência de ressonância, velocidade de ultra-som e emissão acústica conseguem avaliar a integridade estrutural e funcional de diversos produtos à base de madeira.

Por meio das ondas ultra-sonoras é possível estimar as constantes elásticas da madeira. As equações de Christiffel (citadas em Guitard, 1987) fornecem as relações entre as constantes elásticas e as velocidades ultra-sonoras.

O objetivo principal deste trabalho é colocar à disposição dos usuários da madeira uma metodologia alternativa para estimar as constantes elásticas de diferentes madeiras, por meio da determinação das velocidades de propagação das ondas ultra-sonoras.

1.2. Considerações teóricas

Convencionalmente, as ondas acústicas de frequência superior a 20.000 Hz são chamadas de ultra-som. O método ultra-sonoro se apóia na análise da propagação de uma onda e sua relação entre a resposta ao ultra-som e às constantes elásticas da madeira. Em geral, o método consiste em gerar, no interior de um corpo de prova, uma ou várias ondas elásticas com a ajuda de uma sonda "piézo-elétrica". As ondas se propagam com velocidades que dependem da direção de propagação e das constantes elásticas do

material. A medição do tempo de propagação da onda, isto é, de sua velocidade, permite determinar estas constantes.

Segundo Bucur (1989), as ondas que se propagam em um material sólido podem ser de dois tipos: de volume ou de superfície. As ondas de volume podem ser longitudinais, em que a polarização das partículas é paralela à direção de propagação da onda e transversais, e a direção de polarização das partículas é perpendicular à direção da propagação da onda.

A caracterização do comportamento dos sólidos ortotrópicos está estreitamente ligada aos fenômenos de propagação das ondas elásticas. Segundo Sandoz (1989), os ensaios de laboratórios mostraram uma boa correlação entre as características mecânicas da madeira (módulo de ruptura e módulo de elasticidade em flexão) com o quadrado da velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras.

A equação simplificada da propagação de uma onda nos eixos principais da madeira pode ser representada como segue: $V^2 = E_i/\rho$, (em que: V - velocidade de propagação da onda; E_i - módulo de elasticidade da madeira, segundo o eixo (longitudinal, radial ou tangencial) e ρ - massa volumétrica). No total, são nove equações, assim distribuídas: três equações representando as ondas longitudinais em cada eixo natural da madeira e três vezes duas equações representando as ondas transversais também nestes eixos. A equação relativa à propagação de uma onda (sobre o eixo longitudinal da madeira) mais utilizada é $V^2 = C_{11}/\rho$; sendo C_{11} o primeiro termo da matriz de rigidez. Quando não se levam em consideração os coeficientes de Poisson, tem-se: $V^2 = E_L/\rho$; em que E_L é o módulo de Young no eixo longitudinal que, segundo Sandoz (1990), é muito próximo do módulo de elasticidade dado pelas normas técnicas. A determinação da velocidade de propagação desta onda longitudinal, no eixo

radial, permite aproximar a constante elástica deste eixo. No eixo tangencial, a determinação da constante elástica é mais trabalhosa.

O comportamento elástico linear da madeira considerada como um sólido anisotrópico, seguindo as direções de crescimento natural da árvore (longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T)) segue uma relação entre deformação e tensão (lei de Hook).

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad \varepsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j ;$$

em que :

σ_i é a matriz das tensões ou vetor tensão;

C_{ij} é a matriz ou o tensor de rigidez;

ε_i é a matriz das deformações ou vetor deformação;

S_{ij} é a matriz de flexibilidade.

O número de constantes S_{ij} para a madeira, considerada como material simétrico ortotrópico (Figura 1) é de nove (três módulos de Young, três módulos de cisalhamento e três módulos de Poisson).

Considerando a Figura 1, pode-se obter:

- no plano 1,2 - C_{LL} , C_{RR} e C_{LR} (C_{11} , C_{22} e C_{66}) ou, ainda, S_{LL} , S_{RR} e S_{LR} (S_{11} , S_{22} e S_{66});

- no plano 1,3 - C_{LL} , C_{TT} e C_{LT} (C_{11} , C_{33} e C_{55}) ou, ainda, S_{LL} , S_{TT} e S_{LT} (S_{11} , S_{33} e S_{55});

- no plano 2,3 - C_{RR} , C_{TT} e C_{RT} (C_{22} , C_{33} e C_{44}) ou, ainda, S_{RR} , S_{TT} e S_{RT} (S_{22} , S_{33} e S_{44}).

A lei de comportamento em termos da matriz de rigidez é a seguinte:

$$C = \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{vmatrix}$$

sendo simétricos $C_{12} = C_{21} = ; C_{13} = C_{31}$ e $C_{23} = C_{32}$, baseando-se nos termos não diagonais da matriz de rigidez. Segundo Bucur (1989), as constantes não diagonais exigem providências mais complexas, seja utilizando-se ondas de volume transversais, que se propagam segundo uma direção oblíqua em relação aos eixos de simetria do material (o cálculo de otimização é bastante complexo), seja ondas de superfícies, que se propagam nas direções principais do material. A matriz inversa de $C : S = C^{-1}$ é a matriz de "compliance" elástica. Pode-se, então, escrever a matriz de complacência elástica conforme segue:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{vmatrix}$$

com $S_{12} = S_{21}$; $S_{13} = S_{31}$ e $S_{23} = S_{32}$.

Geralmente, os componentes da matriz de complacência (S) são dados por medidas provenientes de métodos estáticos. Os componentes da matriz de rigidez (C) são dados por medidas determinadas por métodos ultra-sonoros.

Segundo Vinh (1981), as relações entre os termos da matriz de rigidez (C) e as velocidades de propagação das ondas ultra-sonoras são determinadas pela equação de Christoffel:

$\Gamma_{ij} - \rho V^2 = 0$ (em que Γ_{ij} = tensor de Christoffel; ρ = densidade; V = velocidade de propagação da onda).

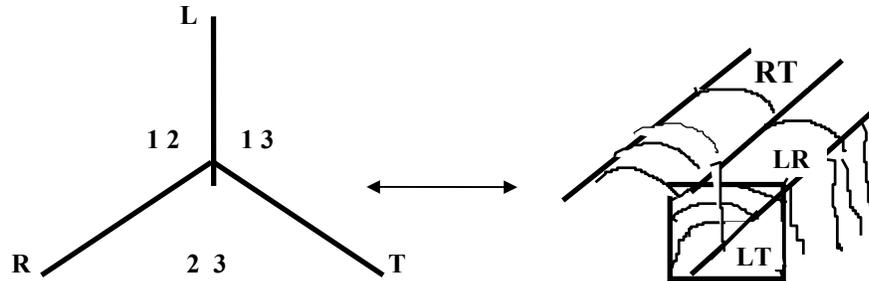


Figura 1. Esquema dos eixos elásticos da madeira
Figure 1. Diagram of elastic axis of wood

Segundo Jayne (1972), citado por Guitard (1987), podem-se obter relações entre os componentes das matrizes de complacência e de rigidez:

$$C_{11} = \frac{S_{22} \cdot S_{33} - (S_{23})^2}{/S/};$$

$$C_{22} = \frac{S_{11} \cdot S_{33} - (S_{13})^2}{/S/};$$

$$C_{33} = \frac{S_{11} \cdot S_{22} - (S_{12})^2}{/S/}$$

considerando:

$$/S/ = S_{11} \cdot S_{22} \cdot S_{33} + 2 (S_{12} \cdot S_{23} \cdot S_{31}) - S_{11} (S_{23})^2 - S_{22} (S_{13})^2 - S_{33} (S_{12})^2;$$

ou, ainda:

$$/C/ = C_{11} \cdot C_{22} \cdot C_{33} + 2 (C_{12} \cdot C_{23} \cdot C_{31}) - C_{11} (C_{23})^2 - C_{22} (C_{13})^2 - C_{33} (C_{12})^2$$

Considerando-se as bases de elasticidade linear da madeira para as três direções (radial - R, tangencial - T, e longitudinal - L) com as

constantes técnicas: três módulos de Young (E_R , E_T , E_L), seis coeficientes de Poisson (ν_{TR} , ν_{RT} , ν_{RL} , ν_{LT} , ν_{TL}) e três módulos de cisalhamento (G_{TL} , G_{LR} , G_{RT}), pode-se escrever os componentes da matriz de elasticidade:

$$S_{ijkl} = \begin{vmatrix} \frac{1}{E_R} & -\nu_{TR} & -\nu_{LR} & 0 & 0 & 0 \\ E_R & E_T & E_L & & & \\ -\nu_{RT} & \frac{1}{E_T} & -\nu_{LT} & 0 & 0 & 0 \\ E_R & E_T & E_L & & & \\ -\nu_{RL} & -\nu_{TL} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ E_R & E_T & E_L & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{vmatrix}$$

com as três condições:

$$\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}; \quad \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}; \quad \frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R}$$

Estas constantes obtêm-se facilmente com base nas constantes elásticas do material. Já foi mostrado que:

$$/C/ = C_{11} \cdot C_{22} \cdot C_{33} + 2 (C_{12} \cdot C_{23} \cdot C_{31}) -$$

$$C_{11} (C_{23})^2 - C_{22} (C_{31})^2 - C_{33} (C_{12})^2$$

$$E_R = \frac{/C/}{(C_{22} \cdot C_{33} - (C_{23})^2)} ;$$

$$E_T = \frac{/C/}{(C_{33} \cdot C_{11} - (C_{31})^2)} ;$$

$$E_L = \frac{/C/}{(C_{11} \cdot C_{22} - (C_{12})^2)} ;$$

$$v_{TR} = \frac{(C_{31} \cdot C_{23} - C_{12} \cdot C_{33})}{(C_{33} \cdot C_{11} - (C_{31})^2)} ;$$

$$v_{LT} = \frac{(C_{12} \cdot C_{31} - C_{23} \cdot C_{11})}{(C_{11} \cdot C_{22} - (C_{12})^2)} ;$$

$$v_{RL} = \frac{(C_{23} \cdot C_{12} - C_{31} \cdot C_{22})}{(C_{23} \cdot C_{33} - (C_{23})^2)}$$

$$G_{TL} = C_{44}; G_{LR} = C_{55}; G_{RT} = C_{66}$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa, utilizou-se a madeira de quatro espécies: Fava Amargosa (*Vataireopsis speciosa*), Jequitibá Rosa (*Cariniana micrantha*), Peroba d'Água (*Rauwolfia paraensis*) e Peroba Mico (*Aspidosperma macrocarpum*). De cada espécie confeccionaram-se 10 corpos de prova, medindo 2 cm x 2 cm x 30 cm. Os corpos de prova utilizados para a medição das ondas ultra-sonoras também foram usados para os ensaios de flexão estática. Estas amostras tinham uma orientação longitudinal e as duas faces planas rigorosamente paralelas.

As quatro espécies estudadas fazem parte do projeto de valorização de madeiras menos conhecidas, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília.

Para comparar os resultados do método ultra-sonoro (ensaios dinâmicos) foram realizados ensaios estáticos (flexão estática, segundo norma francesa NF 51-008). Após as medições das ondas ultra-sonoras, os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina tipo "Wolpert" de cinco toneladas, para determinação do módulo de ruptura e do módulo de elasticidade (módulo de Young). Também foram realizados ensaios de flexão estática, segundo a norma COPANT (Nº 30:1-006, 1972), em corpos de prova de dimensões 5 cm x 5 cm x 75 cm.

Para medir as diferentes velocidades de propagação das ondas ultra-sonoras, utilizou-se, para as ondas longitudinais, o aparelho de auscultação dinâmica AU80 (SATEC), cuja frequência é de 80 kHz. Para as ondas transversais, utilizou-se um aparelho analisador de ultra-som, de frequência de 1 MHz, PANAMETRICS UA5052.

Os dois aparelhos estão baseados em uma técnica clássica de transmissão do sinal ultra-sonoro por contato direto entre os transdutores (receptor e transmissor) "piézo-elétricos" e o corpo de prova.

De uma forma resumida, a técnica de medição das ondas ultra-sonoras é a seguinte: o gerador gera impulsos periódicos sob forma de uma "rede de sinais", também chamada de rede em forma de "crinas". O sinal elétrico é convertido em ondas elásticas pela cerâmica "piezo-elétrica" do transmissor-emissor; as vibrações mecânicas são transmitidas pelo emissor ao corpo de prova. Assim, as ondas elásticas deslocam-se alguns milímetros em microsegundos no material que retardam o sinal emitido pelo gerador. O sinal retardado é recuperado pelo transdutor-receptor. A medição do sinal retardado é dada pela diferença do tempo entre o sinal emitido e o recebido, servindo, assim, para determinar o tempo de propagação da impulsão no material estudado (Figura 2). O emissor é embebido de

uma camada de gel medicinal protegido por uma folha de papel celofane para favorecer um bom contato entre ele (emissor) e o receptor.

Um osciloscópio permite a leitura do tempo retardado do sinal que atravessa o corpo-de-prova em relação ao sinal de referência saído do gerador de impulsão. A rede de sinais em forma de "crina" utilizada para marcar o tempo pode ser deslocada manualmente por meio de um potenciômetro de vários giros. O retardamento de propagação da onda pela passagem em um corpo-de-prova é a diferença ($t - t_0$) dos tempos de propagação medidos com e sem o corpo de prova. O retardo entre a partida da varredura e o instante de aparição da rede de "crinas" é medido por um cronômetro eletrônico. Para as ondas longitudinais adotou-se, como medida do tempo de propagação, o instante do aparecimento da rede de "crinas" (Figura 3a). Para as ondas transversais, adotou-se, para medir o tempo de propagação, o terceiro pico mais elevado do início do sinal (Figura 3b).

A velocidade de propagação das ondas é obtida pelas fórmulas seguintes:

$$V_{LL} = d_L/t_{LL} ; V_{TT} = d_T/t_{TT} ; V_{RR} = d_R/t_{RR}$$

$$V_{TR} = d_T/t_{TR} ; V_{LT} = d_L/t_{LT} ; V_{LR} = d_L/t_{LR}$$

em que:

V - velocidade de propagação das ondas em m/s

dL - dimensão no sentido axial em m

dT - dimensão no sentido tangencial em m

dR - dimensão no sentido radial em m

t - tempo de retardo em μ s

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, determinaram-se as velocidades de propagação das ondas ultra-sonoras (ultra-som) e os módulos de rigidez diagonais da matriz de rigidez, segundo as principais direções da madeira (Tabelas 1 e 2). As medições foram realizadas nos corpos-de-prova secos ao ar (a umidade dos corpos de prova das madeiras de Fava Amargosa e Peroba Mico estavam entre 10% e 11%; já os corpos de prova das espécies Jequitibá Rosa e Peroba d'Água mostraram valores para o teor de umidade variando entre 11% e 12,5%. Segundo Preziosa (1982), a variação do teor de umidade na faixa de equilíbrio higroscópico da madeira apresenta influências não significativas nas medições dos ultra-som.

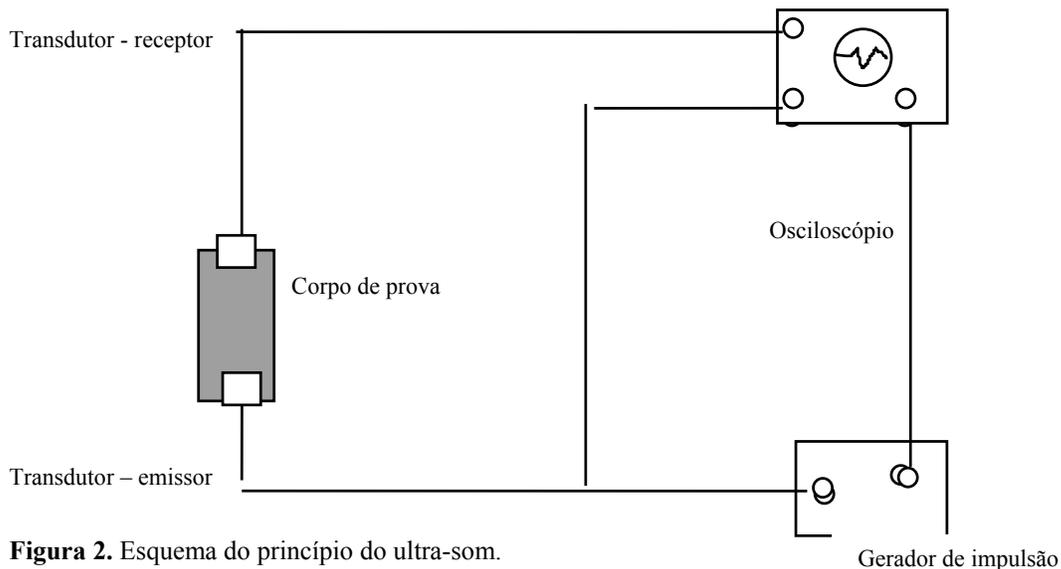


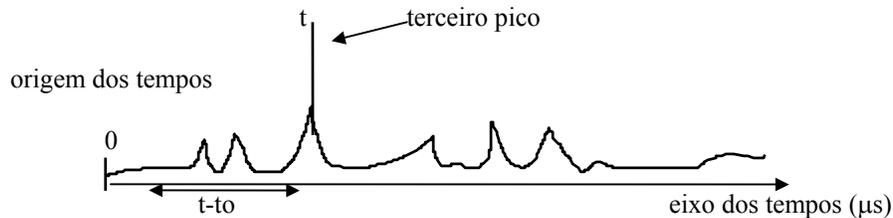
Figura 2. Esquema do princípio do ultra-som.

Figure 2. Diagram of ultrasonic principle

origem dos tempos



a) Medida do tempo para as ondas longitudinais



b) Medida do tempo para as ondas transversais

Figura 3. Medida dos tempos das ondas longitudinais (a) transversais (b).

Figure 3. Time measure of longitudinal (a) and transversal waves (b).

Observa-se que os valores da velocidade de propagação dos ultra-sons são diferentes segundo os eixos de ortotropia da madeira. Para as quatro espécies, as velocidades dos ultra-som são mais elevadas na direção longitudinal que nas duas outras direções (tangencial e radial). A direção radial mostra velocidades maiores que a direção tangencial. Como consequência, os módulos de rigidez seguem as mesmas tendências.

Para as ondas transversais, a velocidade dos ultra-sons no sentido longitudinal também é superior à velocidade no sentido tangencial. Analisando-se a velocidade dos ultra-sons longitudinal e os sentidos de polarizações tangencial e radial, parece existir uma ligeira tendência da velocidade ser superior no sentido de polarização radial. Os termos da matriz de rigidez diagonais (C44, C55, C66) mostram as mesmas tendências.

Em seguida, realizou-se uma análise de variância entre as velocidades de propagações dos ultra-som considerando os três eixos principais (longitudinal (LL), radial (LR) e tangencial (LT)), para as espécies estudadas (Tabela 3).

Os valores médios da velocidade dos ultra-sons entre as três direções da madeira são sempre significativamente diferentes para as quatro espécies, a 1% de probabilidade. Essas diferenças das ondas ultra-sonoras segundo os eixos da madeira podem ser explicadas pela estrutura anatômica do material (Okyere & Cousin, 1980; Bucur, 1984; Martin, 1992).

Na direção longitudinal, as células da madeira (principalmente as fibras e os vasos) são as principais responsáveis pela condução dos sinais ultra-sonoros. Estes sinais encontram, ao longo das fibras e dos vasos, condições favoráveis de propagação (as microfibri-

las de celulose são mais alinhadas, traduzindo-se em um amortecimento das ondas mais suave), ou seja, segue orientação da grã, resultando em velocidades mais elevadas.

Tabela 1. Velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras

Table 1. Velocity of waves-ultrasonic propagation

Espécies	Ondas longitudinais			Ondas transversais			Densidade (kg/m ³)
	Velocidades dos ultra-sons (m/s)						
	V _{LL}	V _{TT}	V _{RR}	V _{TR}	V _{LT}	V _{LR}	
Fava	5169	1764	2212	386	1403	1414	740
Amargosa							
Jequitibá	5317	1568	1963	381	1434	1508	670
Rosa							
Peroba	5319	1650	2304	401	1386	1422	710
d'Água							
Peroba	5146	1846	2381	416	1336	1351	780
Mico							

V_{LL} - Velocidade longitudinal dos ultra-sons ; V_{TT} - Velocidade tangencial dos ultra-sons ; V_{RR} - Velocidade radial dos ultra-sons ; V_{TR} - Velocidade tang.-rad. dos ultra-sons ; V_{LT} - Velocidade long.-tang. dos ultra-sons ; V_{LR} - Velocidade long.-rad. dos ultra-sons.

Tabela 2. Módulos de rigidez das madeiras estudadas.

Table 2. Rigidity modulus of studied woods

Espécie	Módulos de rigidez						Densidade (kg/m ³)
	x (10 ⁸ N/m ²)						
	C ₁₁	C ₃₃	C ₂₂	C ₄₄	C ₅₅	C ₆₆	
Fava	197,7	23,03	36,21	1,11	14,56	14,79	740
Amargosa							
Jequitibá	189,4	16,47	25,82	0,97	13,78	15,24	670
Rosa							
Peroba	200,9	19,33	37,69	1,14	13,64	14,36	710
d'Água							
Peroba	206,5	26,58	44,22	1,35	13,92	14,24	780
Mico							

C₁₁ C₆₆ - Módulos de rigidez, termos da diagonal da matriz de rigidez

Tabela 3. Análise de variância das velocidades dos ultra-sons, segundo os eixos principais da madeira (comparação entre direções para uma mesma espécie).

Table 3. Analyse of variance of ultrasonic velocityes, according to main axis of wood

Espécie	Direção	Velocidade	Desvio	F (2, 27)		
		(m/s)	Padrão	(***)		
	LL	5169	365		LL x LR	***
Fava	LR	2212	154	673	LL x LT	***
Amargosa	LT	1764	102		LR x LT	***
	LL	5317	136		LL x LR	***
Jequitibá	LR	1963	76	1670	LL x LT	***
Rosa	LT	1518	44		LR x LT	***
	LL	5319	393		LL x LR	***
Peroba	LR	2304	202	563	LL x LT	***
d'Água	LT	1650	158		LR x LT	***
	LL	5146	218		LL x LR	***
Peroba	LR	2381	109	1300	LL x LT	***
Mico	LT	1846	87		LR x LT	***

F = Teste F - 3 fontes de variação menos 1 grau de liberdade = 2; 30 medidas menos 3 graus de liberdade = 27; portanto F (2,27) *** - Significativo a 1%.

Na direção radial, a continuidade do sinal é assegurada, principalmente, pelos raios lenhosos presentes em quantidades bem menores em relação às fibras. Logo, os valores da velocidade radial são mais baixos que os valores da velocidade longitudinal.

A direção tangencial é a mais desfavorável para a propagação das ondas ultra-sonoras, pois o sinal não encontra nenhum substrato contínuo de propagação. A cada passagem de uma célula a outra, o sinal perde energia devido à própria parede celular. Este fator ajuda a explicar o valor mais baixo da velocidade no eixo longitudinal.

Não se pode esquecer que, na direção transversal, as células da madeira possuem as fibras celulósicas perpendicular à direção sonora,

envoltas em uma matriz de lignina. Logo, o amortecimento acústico é mais importante em relação à direção longitudinal, mostrando menores valores da velocidade de propagação.

Supõe-se que um modelo global pode ser adotado para as quatro espécies estudadas, para mostrar a velocidade de propagação dos ultra-sons, segundo as principais direções naturais da madeira (Figura 4).

Em seguida, realizou-se um estudo comparativo dos valores médios dos módulos de elasticidade estáticos (norma AFNOR, corpo de prova 2 x 2 x 30cm e norma COPANT, corpo de prova 5 x 5 x 75cm) com os valores médios dos módulos de elasticidade dinâmicos (ultra-som) (Tabela 4).

Estimou-se o módulo de elasticidade dinâmico (Edy) com base na relação seguinte:

$E_d = V_{LL}^2 \cdot m_v$; onde V_{LL} - velocidade na direção longitudinal e m_v - massa volumétrica a 12% de umidade. Não foi levado em consideração o efeito "Poisson" (coeficiente de Poisson).

Observa-se que os valores estáticos (módulo de elasticidade e módulo de ruptura) mostram valores vizinhos entre as duas normas utilizadas (AFNOR, 1942 e COPANT, 1972). Isto já era esperado, pois, apesar dos corpos de prova possuírem dimensões diferentes, a relação (largura/altura; b/h) é a mesma.

O valor do módulo de elasticidade dinâmico (técnica dos ultra-sons) para as quatro espécies é mais elevado que o módulo de elasticidade estático (nomas AFNOR, 1942 e COPANT, 1972). As relações entre os módulos dinâmicos e estáticos estão compreendidas entre 1,4 e 1,6.

Duas hipóteses auxiliam na explicação das diferenças:

- o valor mais alto determinado por ultra-som é atribuído à natureza da "solicitação", pois sabe-se que o ensaio estático causa,

no corpo de prova, mudanças em suas propriedades reológicas, sendo que o ensaio dinâmico não causa modificações na estrutura do corpo de prova (Kolias, 1980 ; citado por Bucur, 1984);

- o módulo de elasticidade estático é conduzido por um fenômeno isotérmico, ao passo que o módulo dinâmico é, sobretudo, governado por uma lei adiabática (Hearmon, 1961 e Bucur, 1984).

Apesar dos valores absolutos dos módulos elásticos calculados com base em ultra-som não serem iguais aos módulos elásticos estáticos, permanece o interesse pelo método ultra-sonoro. Isso se deve ao fato de o mesmo colocar em evidência, de forma rápida e simples, as diferenças relativas à qualidade da madeira de espécies diferentes ou entre indivíduos da mesma espécie, do ponto de vista de sua elasticidade.

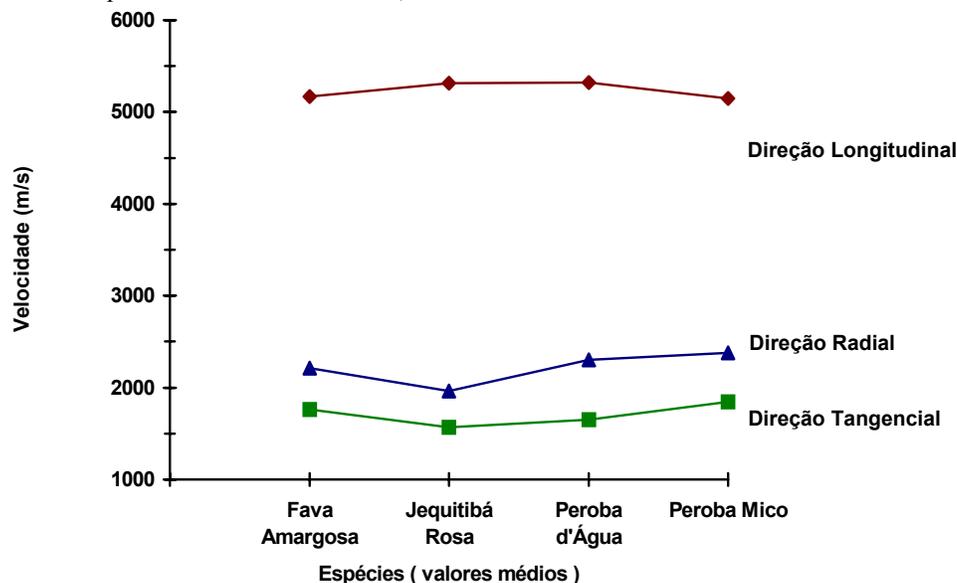


Figura 4. Modelo global da velocidade de propagação dos ultra-sons nas direções naturais das madeiras estudadas.
Figure 4. Global model of propagation velocity of ultrasonics on nature directions of woods.

Tabela 4. Valores de medidas dinâmica e estática para as quatro espécies.*Table 4.* Value of dynamic and static measures for the four species.

Características	Unidade de medida	Fava Amargosa	Jequitibá Rosa	Peroba d'Água	Peroba Mico
Peso específico	Kg/m ³	740	670	710	780
Velocidade (V _{LL})	m/s	5169	5317	5319	5146
Mód. elasticidade dinâmico	N/mm ² x 10 ⁸	197,7	189,4	200,9	206,5
Mód. elasticidade estático	N/mm ² x 10 ⁸	116,3	132,1	134,2	142,8
Mód. ruptura estático	N/mm ² x 10 ⁶	96,1	109,6	114,2	136,4
Mód. elasticidade (COPANT)	N/mm ² x 10 ⁸	115,1	132,0	128,1	141,1
Mód. ruptura (COPANT)	N/mm ² x 10 ⁶	95,8	100,5	113,5	135,3

O nível de intensidade de ligação entre as características dinâmicas e estáticas foi analisado com base em regressões simples.

As equações de 1 a 4 mostram as correlações existentes entre o módulo de elasticidade estático (Y), em função do módulo de elasticidade dinâmica (x) para cada espécie.

- Equação 1 – Fava Amargosa
 $Y = 50,46 + 1,13x$ $R^2 = 0,84$

- Equação 2 – Jequitibá Rosa
 $Y = 37,85 + 0,48x$ $R^2 = 0,67$

- Equação 3 – Peroba d'Água
 $Y = 54,80 + 0,55x$ $R^2 = 0,71$

- Equação 4 – Peroba Mico
 $Y = 46,60 + 0,47x$ $R^2 = 0,68$

As relações existentes entre as duas variáveis foram significativas a 1% de probabilidade pelo teste F. Uma boa correlação entre essas duas variáveis já era esperada, pois os dois módulos foram determinados nas mesmas amostras.

As equações de 5 a 8 mostram as correlações existentes entre o módulo de elasticidade dinâmico (Y) e módulo de ruptura estático (x) e

os respectivos coeficientes de determinação (R²).

- Equação 5 – Fava Amargosa
 $Y = 97,76 + 0,89x$ $R^2 = 0,72$

- Equação 6 – Jequitibá Rosa
 $Y = 90,05 + 0,95x$ $R^2 = 0,87$

- Equação 7 – Peroba d'Água
 $Y = 57,05 + 1,23x$ $R^2 = 0,75$

- Equação 8 – Peroba Mico
 $Y = 37,96 + 0,46x$ $R^2 = 0,73$

Esta correlação é sempre significativa a 1% para as quatro espécies estudadas. Os coeficientes de determinação (R²) para as espécies Peroba Mico, Peroba d'Água, Jequitibá Rosa e Fava Amargosa são, respectivamente, 0,73, 0,75, 0,87 e 0,72. Esta relação fornece uma informação importante, pois permite prever, com base na velocidade ultra-sonora e da densidade da madeira, o módulo de ruptura da madeira. Bucur (1984) e Sandoz (1989) mostraram uma boa relação entre estas duas variáveis para outras espécies de madeira.

4. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a velocidade ultrasonora na madeira é maior no sentido longitudinal que no sentido radial e esta, por sua vez, é maior que o sentido tangencial. Os resultados obtidos para os ensaios estáticos e dinâmicos fazem aparecer ligações estreitas entre essas duas medidas. Logo, pode-se deduzir que o estudo comparativo dos métodos estático e ultra-sonoro são úteis para a caracterização da madeira.

A utilização da propagação das ondas ultrasonoras surge como um meio útil para examinar as propriedades mecânicas da madeira, principalmente as constantes elásticas. Por meio deste método, podem-se caracterizar, assim, diferentes espécies ou verificar a influência de diferentes parâmetros, por exemplo, do ponto de vista silvicultural.

Apesar dos valores absolutos das constantes elásticas medidos em regime estáticos e dinâmicos serem diferentes, o método ultra-sonoro é interessante, por colocar, de forma rápida e simples, as diferenças relativas à qualidade da madeira.

Pode-se ainda acrescentar a estas conclusões que o método estudado também é indicado para se fazer uma triagem na madeira objetivando sua classificação, por exemplo, quando de sua utilização em estrutura. Medindo-se o tempo de propagação de uma onda ultra-sonora de baixa frequência é possível avaliar as propriedades mecânicas de uma viga de madeira.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFNOR-NORME FRANÇAISE **Bois, essai de flexion statique**. 1942. (NF B 51-008).
- BUCUR, V. **Ondes ultrasonores dans le bois: Caractérisation mécanique et qualité de certaines essences de bois**. 1984. 126 p. Thèse (Docteur en Ingenieur) – ISMCM, Paris.
- BUCUR, V. Ondes de volume et de surface pour la caractérisation des solides orthotropes. In: **Caractérisation Mécanique des Composites**. Paris: Editions Pluralis, 1989. p.106-113.
- COPANT - COMMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS **Maderas: método de determinación de la flexión estática**. COPANT 30, 1972 : 1-006.
- GUIARD, D. **Mécaniques du matériau bois et composites**. CEPADUES, 1987. 238 p.
- HEARMON, R. F. S. **An introduction to applied anisotropic elasticity**. Oxford: University Press, 1961.
- OKYERE, J. G.; COUSIN, A. J. **On flaw detection in line wood**. Materials Evaluation. 1980. p. 43-47.
- PREZIOSA, C. **Methode de détermination des constantes élastiques du matériau bois par utilisations des ultrasons**. 1982. 293 p. Thèse (Docteur en Ingénieur) - Université d'Orleans.
- MARTIN, P. **Bois et productique: les industries du bois et leurs modernisations par la productique**. CEPADUES éditions, 1992. 303 p.
- SANDOZ, J. L. Grading of construction timber by ultrasound. **Wood Science Technology**, New York, v.23, n. 1, p. 95-108, 1989.
- SANDOZ, J. L. **Triage et fiabilité des bois de construction. Validité de la méthode ultrason**. 1990. 183 p. Thèse (docteur en Sciences Techniques) – EPFL, Lausanne.
- VINH, T. **Mesures ultrasonores de constantes élastiques des matériaux composites**. In: "SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'ARMEMENT", 2ème fascicule. 1981. p 261-289.