

AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRAS ATRAVÉS DE ULTRA-SOM – FUNDAMENTOS FÍSICOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco¹ e Antonio Pires Azevedo Júnior²

(Recebido: 26 de junho de 2002; aceito: 20 de novembro de 2003)

RESUMO: A propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras pode ser descrita por meio de relações físicas fundamentais (conhecidas como equação de Christoffel), estabelecidas para um sólido anisotrópico, entre a velocidade de fase, a densidade e as constantes elásticas da madeira. Entretanto, diferentemente de outros sólidos, a propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras constitui um fenômeno de considerável complexidade. As constantes de propagação, ou seja, as velocidades (de fase e de grupo) e os coeficientes de absorção são significativamente afetados não somente pela heterogeneidade da composição química, pela sua microestrutura, pela irregularidade na disposição dos elementos anatômicos, inerentes à estrutura biológica da madeira, como também pela sua natureza higroscópica. A sensibilidade da velocidade de grupo ou de propagação do pulso ultra-sônico, ao longo da madeira, a fatores que determinam suas características mecânicas, permite concluir que seja possível estabelecer correlações estatísticas entre aquela velocidade e as propriedades mecânicas de madeiras.

Palavras-chave: ondas ultra-sônicas, equação de Christoffel, velocidade de propagação, propriedades mecânicas.

NON DESTRUCTIVE EVALUATION OF WOOD MECHANICAL PROPERTIES THROUGH ULTRASONIC SOUND WAVES - PHYSICAL FOUNDATIONS AND EXPERIMENTAL RESULTS

ABSTRACT: *The propagation of ultra-sonic waves in wood can be described through fundamental physical relationships (known as equation of Christoffel), established for an anisotropic solid, among the phase speed, the density and the elastic constants of the wood. However, differently of other solids, the propagation of ultra-sonic waves in wood constitutes a phenomenon of considerable complexity. The propagation constants, the speed (of phase and of group) and the absorption coefficients, are significantly affected, not only by the heterogeneity of the chemical composition, by its microstructure, by the irregularity in the anatomical elements disposition, inherent to the biological nature of the wood, but also by its hygroscopic nature. The sensibility of the group speed or of ultrasonic pulse propagation, along the wood, to factors that determine their mechanical characteristics, indicated that it is possible to establish statistical correlations between speed and wood mechanical properties*

Key-words: ultra-sonic waves, equation of Christoffel, propagation speed, mechanical properties.

¹ Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais. (mantilla@dees.ufmg.br)

² Departamento Engenharia de Estruturas - Universidade Federal de Minas Gerais. (pires@dees.ufmg.br)
Avenida do Contorno, 842, 2º andar, CEP-30110-060, Belo Horizonte, MG.

1 INTRODUÇÃO

Com a possibilidade de escassez dos recursos minerais não renováveis, pode-se dizer que a madeira será, por excelência, o material de construção do futuro. Suas excelentes propriedades físicas e mecânicas, além do fato de ser um material continuamente renovável, colocam-na numa posição de destaque frente a outros materiais.

O profundo conhecimento de suas propriedades torna-se, dessa forma, fundamental para que sejam garantidos, principalmente, os requisitos de segurança e durabilidade. Atualmente, esse conhecimento se baseia em resultados obtidos a partir de ensaios de natureza destrutiva que, além de onerosos e laboriosos, muitas vezes inviabilizam a utilização futura do material. É importante salientar, também, que tais resultados podem gerar dúvidas concernentes à sua confiabilidade, uma vez que são representativos apenas para um determinado lote de madeiras.

Nesse sentido, a avaliação não destrutiva de madeiras assume um importante papel, pois permite obter e analisar o maior número de informações sobre o material, objetivando não apenas maior precisão dos resultados, como também estabelecer critérios práticos de classificação e caracterização do material. Existem diversos métodos e técnicas de avaliação não destrutiva de madeiras, sendo cada um deles adequado à avaliação de determinadas propriedades e características desse material.

Baseada nos princípios de propagação de ondas mecânicas em meios materiais, a avaliação não destrutiva de madeiras por meio da técnica de ultra-som surge como uma das opções mais difundidas e promissoras, devido à relevância das informações que podem ser obtidas, à facilidade de operação e ao custo relativamente baixo do equipamento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O objetivo do presente trabalho foi estabelecer correlações estatísticas entre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico longitudinalmente às fibras e os parâmetros físicos e mecânicos de madeiras.

2.1 Princípios gerais de propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras

2.1.1 Considerações gerais

A acústica, como ramo da física, é a ciência que se encarrega do estudo das vibrações e ondas mecânicas em meios materiais.

De acordo com a faixa ou o espectro de frequências, as vibrações mecânicas e, conseqüentemente, as ondas a elas associadas podem ser classificadas, basicamente, em três grupos:

- os infra-sons, produzidos a partir de vibrações com frequências muito baixas, inferiores a 20 Hz;
- os sons, constituídos por frequências situadas entre 20 Hz e 20 kHz;
- os ultra-sons, produzidos por frequências superiores a 20 kHz.

Esta classificação baseia-se exclusivamente em medidas fisiológicas bem determinadas e a faixa compreendida entre 20 Hz e 20 kHz, conhecida como audiodiferença, refere-se ao intervalo de frequências capaz de sensibilizar o ouvido humano.

Embora as constantes de propagação, isto é, as velocidades e o coeficiente de absorção de um determinado material independam, em geral, da faixa de frequências, existem algumas vantagens do uso de frequências ultra-sônicas no lugar dos infra-sons e das audiodiferenças na avaliação não destrutiva de materiais:

- 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;
- os coeficientes de absorção são usualmente mais altos e, conseqüentemente, muito mais fáceis de serem mensurados em altas frequências;
- os ultra-sons são inaudíveis;
- as ondas associadas às altas frequências são mais facilmente direcionadas.

2.1.2 Propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras

A propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras é descrita pelas equações de movimento estabelecidas para um sólido anisotrópico, que podem ser encontradas por meio da combinação entre a lei de Newton,

$$\frac{\partial s_{ik}}{\partial x_k} = ? \ddot{u}_i \quad (1)$$

e a Lei de Hooke generalizada,

$$s_{ik} = C_{iklm} e_{lm} \quad (2)$$

fornecendo,

$$? \ddot{u}_i = C_{iklm} \frac{\partial e_{lm}}{\partial x_k} \quad (3)$$

Pela definição de deformação, pode-se escrever:

$$e_{lm} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_m} \right) \quad (4)$$

Substituindo e_{lm} na equação (3), obtém-se:

$$? \ddot{u}_i = C_{iklm} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_m} \right) \right] \quad \therefore$$

$$? \ddot{u}_i = \frac{1}{2} C_{iklm} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_m} \right) \quad (5)$$

em que C_{iklm} é um tensor de quarto grau conhecido como tensor de constantes elásticas.

Uma vez que C_{iklm} é simétrico em relação a l e m, pode-se permutar estes índices no segundo termo dentro dos parênteses da equação anterior:

$$? \ddot{u}_i = \frac{1}{2} C_{iklm} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} + \frac{\partial u_m}{\partial x_l} \right) \quad \therefore$$

$$? \ddot{u}_i = C_{iklm} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} \right) \quad (6)$$

Assumindo-se que ondas harmônicas planas estejam se propagando no corpo, a solução da equação diferencial (6) será:

$$u_i = u_{0i} \exp [i(? t - k_j x_j)] \quad (7)$$

em que u_{0i} representa as amplitudes das componentes do vetor deslocamento e k_j as componentes do vetor de onda. O valor u_{0i} pode também ser escrito como $u_0 a_i$, em que u_0 representa a amplitude do deslocamento e a_i os cossenos diretores do vetor deslocamento da partícula. Substituindo o valor expresso pela equação (7) na equação (6), obtém-se:

$$? ?^2 u_i = C_{iklm} k_k k_l u_m \quad (8)$$

Esta equação pode ser escrita de forma mais homogênea fazendo-se $u_i = u_m d_{im}$, em

que o tensor d_{im} é denominado tensor unitário ou delta de Kronecker, ou seja,

$$(\delta_{im} - C_{iklm} k_k k_l) u_m = 0 \quad (9)$$

A equação (9) foi desenvolvida por Christoffel e é comumente conhecida como equação de Christoffel. Ela representa um conjunto de três equações homogêneas de primeiro grau (lineares) em u_1, u_2 e u_3 . Estas equações terão soluções não nulas, não triviais, se, e somente se, o determinante da matriz dos coeficientes for igual a zero, ou seja:

$$\left| C_{iklm} k_k k_l - \delta_{im} \right| = 0 \quad (10)$$

O desenvolvimento da equação (10) fornece uma equação cúbica em v^2 (ou em termos de v^2). As três raízes desta equação são diferentes, gerando três diferentes valores de velocidades de propagação.

Em geral, é mais conveniente escrever a equação (9) na forma:

$$\left(\delta_{im} - v^2 d_{im} \right) u_m = 0 \quad (11)$$

ou ainda, matricialmente:

$$\begin{bmatrix} \delta_{11} - v^2 & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} - v^2 & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} - v^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

em que o tensor δ_{im} , conhecido como tensor de Christoffel, é definido como:

$$\delta_{im} = C_{iklm} n_k n_l \quad (13)$$

Na equação (11), v representa a velocidade de fase das ondas e n_i , implícito em δ_{im} , denota os cossenos diretores da

normal às frentes de onda. Portanto, o novo determinante a ser calculado será:

$$\left| \delta_{im} - v^2 d_{im} \right| = 0 \quad (14)$$

O tensor δ_{im} depende da simetria estrutural do corpo e da orientação das ondas neste corpo. A equação (14) pode ser reescrita, sob a forma matricial, como:

$$\begin{bmatrix} (\delta_{11} - v^2) & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{12} & (\delta_{22} - v^2) & \delta_{23} \\ \delta_{13} & \delta_{23} & (\delta_{33} - v^2) \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$

Muitas vezes, é conveniente utilizar a notação matricial em vez da notação tensorial. Para isso, o seguinte esquema é adotado:

Notação tensorial: 11 22 33 23,32 13,31 12,21

Notação matricial: 1 2 3 4 5 6

Dessa forma, expandindo-se a equação (13) e utilizando a simetria do tensor C_{iklm} , obtêm-se:

$$\delta_1 = C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 + C_{55} n_3^2 + 2C_{16} n_1 n_2 + 2C_{15} n_1 n_3 + 2C_{56} n_2 n_3$$

$$\delta_2 = C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 + C_{44} n_3^2 + 2C_{26} n_1 n_2 + 2C_{46} n_1 n_3 + 2C_{24} n_2 n_3$$

$$\delta_3 = C_{55} n_1^2 + C_{44} n_2^2 + C_{33} n_3^2 + 2C_{45} n_1 n_2 + 2C_{35} n_1 n_3 + 2C_{34} n_2 n_3$$

$$\delta_4 = C_{65} n_1^2 + C_{24} n_2^2 + C_{43} n_3^2 + C_{64} n_1 n_2 + C_{63} n_1 n_3 + C_{25} n_2 n_1 + C_{23} n_2 n_3 + C_{45} n_3 n_1 + C_{44} n_3 n_2$$

$$\delta_5 = C_{15} n_1^2 + C_{64} n_2^2 + C_{53} n_3^2 + C_{14} n_1 n_2 + C_{15} n_1 n_3 + C_{65} n_2 n_1 + C_{63} n_2 n_3 + C_{55} n_3 n_1 + C_{54} n_3 n_2$$

$$\delta_6 = C_{15} n_1^2 + C_{62} n_2^2 + C_{54} n_3^2 + C_{12} n_1 n_2 + C_{14} n_1 n_3 + C_{66} n_2 n_1 + C_{64} n_2 n_3 + C_{56} n_3 n_1 + C_{52} n_3 n_2$$

$$(16)$$

O exame cuidadoso da equação (15) mostra que os vetores deslocamento (autovetores) associados a cada autovalor,

v^2 , são mutuamente perpendiculares. Para uma dada direção de propagação, definida pelo vetor de onda \vec{k} , três ondas se propagam com vetores deslocamento mutuamente perpendiculares entre si e com velocidades diferentes.

Em geral, estas ondas não são puramente longitudinais ou puramente transversais. Entretanto, para certas direções de propagação em um dado meio material, em que \vec{k} é um autovetor de ρ_{im} , uma onda é puramente longitudinal e as outras duas são puramente transversais.

Para uma onda longitudinal pura, o vetor deslocamento da partícula \vec{u} é paralelo ao vetor unitário normal às frentes de onda \vec{n} . Por conseguinte, o produto vetorial $\vec{u} \times \vec{n}$ é nulo. Por outro lado, para uma onda transversal pura, os mesmos vetores são perpendiculares entre si e, conseqüentemente, o produto escalar $\vec{u} \cdot \vec{n}$ é igual a zero.

Christoffel demonstrou que os cossenos diretores a_i do deslocamento das partículas das frentes de onda estão relacionados às correspondentes velocidades de onda por:

$$\begin{aligned} a_1 v_{11}^2 + a_2 v_{12}^2 + a_3 v_{13}^2 &= a_1 v^2 \\ a_1 v_{12}^2 + a_2 v_{22}^2 + a_3 v_{23}^2 &= a_2 v^2 \\ a_1 v_{13}^2 + a_2 v_{23}^2 + a_3 v_{33}^2 &= a_3 v^2 \end{aligned} \quad (17)$$

Este conjunto de equações pode ser facilmente deduzido a partir da equação (11), substituindo u_m pelos cossenos diretores a_i do vetor deslocamento da partícula \vec{u} ,

$$\begin{aligned} \rho_{mi} a_i - \rho v^2 d_{mi} a_i &= 0 \quad \therefore \\ \rho_{mi} a_i &= \rho v^2 d_{mi} a_i \end{aligned} \quad (18)$$

Dessa maneira, conhecidas a velocidade de propagação da onda, a direção de propagação e a densidade da madeira, pode-se determinar os elementos da matriz de constantes elásticas.

A determinação das constantes elásticas da madeira pode ser simplificada ao se considerá-la, numa primeira aproximação, como um sólido ortogonalmente anisotrópico ou, simplesmente, ortotrópico. A matriz dos coeficientes elásticos de um sólido ortotrópico é dada por:

$$[c]_{\text{Ortotrópico}} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Dessa forma, desprezando-se a não homogeneidade e a curvatura das camadas de crescimento anual, é possível distinguir-se, em uma peça de madeira, três planos de simetria elástica, conforme ilustrado na Figura 1.

O primeiro plano, denotado por x_2Ox_3 , cujo vetor normal unitário é paralelo ao eixo x_1 , é perpendicular à direção das fibras da madeira. O segundo plano, também denominado plano tangencial, definido por x_1Ox_2 e cujo vetor normal unitário está na direção do eixo x_3 , é paralelo às camadas de crescimento anual. O terceiro plano, conhecido como plano radial, denotado por x_1Ox_3 , é mutuamente perpendicular aos outros dois planos e seu vetor normal unitário é paralelo à direção do eixo x_1 . Todos os planos paralelos a x_2Ox_3 , x_1Ox_2 e x_1Ox_3 são também planos de simetria elástica. As direções dos eixos de simetria x_1 , x_2 e x_3 são especialmente denominadas direção longitudinal L, tangencial T e radial R, respectivamente.

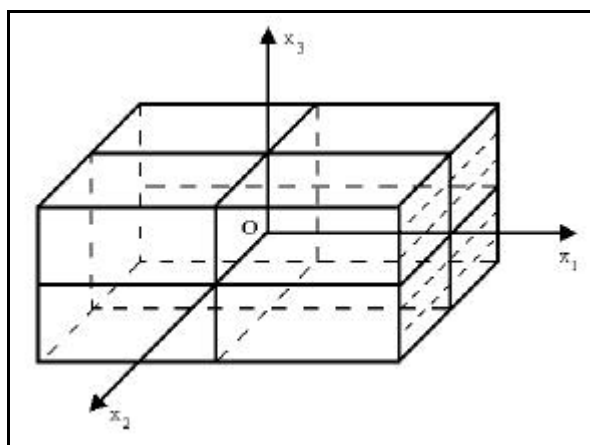


Figura 1. Planos e direções de simetria da madeira.

Figure 1. Plans and directions of wood symmetry.

Entretanto, diferentemente de outros sólidos ortotrópicos, a propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras constitui um fenômeno de considerável complexidade. As constantes de propagação, isto é, a velocidade e os coeficientes de absorção, são significativamente afetadas não somente pela heterogeneidade da composição química, pela sua microestrutura, pela irregularidade na disposição dos elementos anatômicos, inerentes à estrutura biológica da madeira, como também pela sua natureza higroscópica.

2.2 Fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras

2.2.1 Umidade da madeira

A madeira constitui, por natureza, um material higroscópico, ou seja, é capaz de interagir com o meio ambiente absorvendo ou perdendo umidade para ele. Esta característica peculiar da madeira e de alguns outros materiais afeta sensivelmente suas propriedades físicas e mecânicas.

De acordo com a interação com a parede celular, a água existente no interior da madeira pode ser encontrada sob as seguintes formas:

- água livre ou de embebição, que ocupa parcial ou completamente o lúmen das células e os interstícios celulares;
- água de adesão ou impregnação, que está quimicamente ligada, por pontes de hidrogênio, às cadeias de celulose das paredes celulares.

As árvores vivas, por exemplo, possuem grandes quantidades de água sob as duas formas, podendo chegar, segundo Zimmermann (1983), a valores superiores a 200% de conteúdo de umidade, conforme sua densidade.

O início do processo de remoção da água de adesão ou impregnação das paredes celulares corresponde ao ponto de saturação das fibras. O ponto de saturação das fibras pode ser também definido como o valor de umidade abaixo do qual as propriedades físicas e mecânicas da madeira são afetadas pelo conteúdo de umidade. O valor de umidade do ponto de saturação é de aproximadamente 33%, variando ligeiramente de uma espécie para outra.

De maneira geral, o conteúdo de umidade da madeira abaixo do ponto de

saturação da fibra é função da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente. Há, entretanto, um valor de umidade no qual a madeira, após um determinado tempo em contato com o ar atmosférico, estabiliza-se, ou seja, nem ganha nem perde água para o meio ambiente. Este valor de umidade é definido como umidade de equilíbrio higroscópico da madeira.

Conforme foi demonstrado anteriormente, as constantes de propagação de ondas ultra-sônicas estão intrinsecamente relacionadas às propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Em madeiras, particularmente, estas propriedades são sensivelmente afetadas pelo conteúdo de umidade. Portanto, o estudo da influência da umidade naquelas propriedades constitui o primeiro passo para se compreender, de maneira mais inteligível, a relação entre as constantes de propagação e o conteúdo de umidade da madeira.

Tiemann (1906) foi quem primeiro observou que as propriedades mecânicas da madeira são afetadas somente pela água de adesão ou de impregnação, uma vez que apenas a parede celular contribui efetivamente para a resistência. A redução da resistência e do módulo de elasticidade com o aumento do conteúdo de umidade, até o ponto de saturação, é mostrada na Figura 2. Nesta figura, as letras E_L , E_R e E_T representam os módulos nas direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente.

O aumento do conteúdo de umidade, acima do ponto de saturação, não influencia significativamente aqueles dois parâmetros mecânicos.

A relação existente entre a velocidade de propagação, a correspondente atenuação e o conteúdo de umidade pode ser vista na Figura 3. Como pode ser verificado, a velocidade diminui à medida em que o conteúdo de umidade aumenta, ao passo que a atenuação aumenta conforme aumenta o conteúdo de

umidade. O máximo valor de velocidade e o mínimo valor de atenuação são obtidos quando a madeira se encontra seca.

É interessante observar, na Figura 3, que a variação da velocidade em função do conteúdo de umidade possui um ponto crítico, U_1 , correspondente ao ponto de saturação das fibras, enquanto a variação da atenuação em função do conteúdo de umidade possui um ponto crítico U_2 , diferente de U_1 e abaixo deste.

A análise cuidadosa dessa figura permite concluir que:

- a velocidade de propagação decresce rapidamente à medida em que o conteúdo de umidade aumenta, até o ponto de saturação U_1 . A partir deste ponto, a variação é muito pequena;
- a atenuação é praticamente constante para pequenos valores de umidade, mas aumenta sensivelmente a partir do ponto crítico U_2 .

Para baixos valores de umidade, ou seja, $U < U_2$, quando toda água existente na madeira se encontra ligada às moléculas de celulose da parede celular, o pulso ultra-sônico é praticamente dispersado pelos elementos anatômicos e pelos contornos destes elementos. Nestes contornos, analogamente ao que ocorre nos contornos dos grãos de um sólido policristalino, há uma descontinuidade do módulo de elasticidade e, conseqüentemente, da impedância acústica característica. A tensão ou pressão de radiação que atua nas partículas das moléculas de celulosas, resultante da passagem da onda ultra-sônica através do elemento anatômico, reorienta a posição da hidroxila (OH) ou outro radical pertencentes àquelas moléculas. Neste caso, o mecanismo de atenuação relacionado às características das paredes celulares constitui, provavelmente, o fator mais importante.

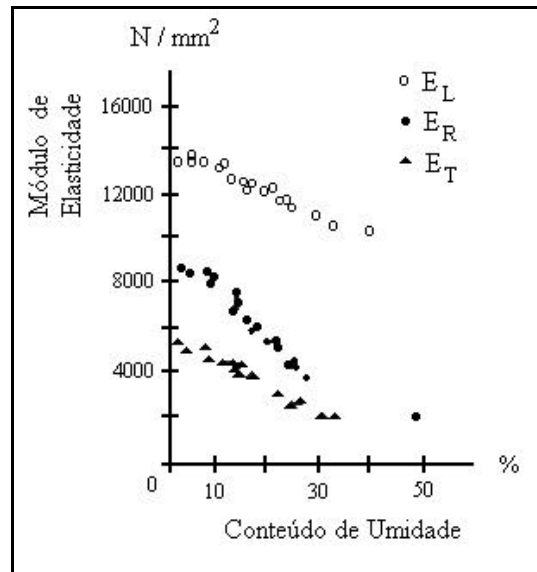


Figura 2. Influência do conteúdo de umidade nos módulos de elasticidade de Sitka spruce. (Fonte – Bucur, 1995. p. 199).

Figure 2. Influence of the moisture content on modules of elasticity of Sitka spruce. (Source -Bucur, 1995. p. 199).

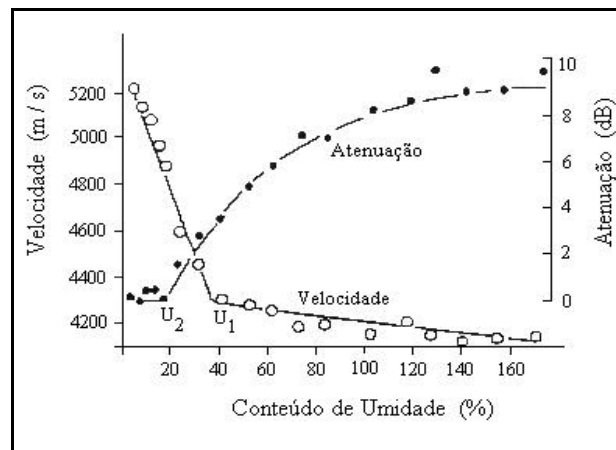


Figura 3. Velocidade ultra-sônica ao longo da direção longitudinal e a correspondente atenuação como funções do conteúdo de umidade para Metasequoias. (Fonte – Bucur, 1995. p. 200).

Figure 3. Ultra-sonic Speed along longitudinal direction and its corresponding attenuation, as functions of the moisture content for Metasequoias. (Source -Bucur, 1995. p. 200)

Para valores de conteúdos de umidade compreendidos entre o ponto crítico U_2 e o ponto de saturação das fibras U_1 , a dispersão nos contornos dos elementos anatômicos, é,

possivelmente, o mais importante mecanismo de atenuação. Após o ponto de saturação U_1 , em que há água livre ou de embebição no interior das cavidades dos elementos

anatômicos, a porosidade da madeira atua como fator preponderante na dispersão do pulso ultra-sônico.

Dessa forma, pode-se concluir que a velocidade de propagação é consideravelmente influenciada pela existência de água de constituição, enquanto a atenuação é sensivelmente influenciada pela presença de água livre. O ponto crítico U_1 corresponde ao ponto de saturação das fibras e o ponto crítico U_2 corresponde ao valor de umidade a partir do qual os elementos anatômicos começam a reter água livre.

Finalmente, é interessante analisar a variação da rigidez em função do conteúdo de umidade. Assim como na variação da velocidade em função da umidade, a variação da rigidez com a umidade possui um ponto crítico, correspondente também ao ponto de saturação das fibras. Para valores de umidade abaixo deste ponto, a rigidez diminui conforme o conteúdo de umidade aumenta. Entretanto, para valores de umidade superiores ao ponto de saturação, a rigidez aumenta à medida em que o conteúdo de umidade aumenta, devido, principalmente, ao fato da densidade da madeira aumentar com o aumento da umidade e à presença de água livre, que está relacionada à porosidade da madeira.

2.2.2 Densidade da madeira

Segundo Oliveira & Sales (2000), o aumento da densidade propicia, para um valor de umidade constante ao longo da amostra, uma maior velocidade de propagação em qualquer das três direções da madeira.

Porém, não é propriamente o aumento da densidade que acarreta o aumento na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas em madeiras. Ao contrário, o aumento da densidade deveria provocar a diminuição da velocidade de propagação, visto que a velocidade é, conforme demonstrado no item

2.1.2, inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade.

Entretanto, considerando-se um valor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade pode decorrer da maior deposição de celulose na face interna da parede celular. Esta deposição acarreta aumento mais significativo nos valores de rigidez do que nos valores de densidade da madeira. Dessa forma, mesmo que haja aumento da densidade, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo apreciável aumento da rigidez. A densidade da madeira, assim como a rigidez, é sensivelmente afetada pelo teor de umidade. Todavia, o efeito da umidade na rigidez é também muito mais expressivo do que na densidade. Portanto, as maiores velocidades ultra-sônicas são geralmente alcançadas em espécimes de madeiras com maiores densidades e menores teores de umidade.

2.2.3 Natureza biológica da madeira

De acordo com Bucur (1995), o fenômeno de propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras, em escala estrutural, pode ser melhor compreendido usando-se um modelo acústico simplificado. Neste modelo, os elementos anatômicos são considerados “tubos” constituídos por uma substância cristalina, ou seja, a celulose, embutidos em uma matriz de substância amorfa de hemicelulose e lignina. Portanto, a madeira sólida é constituída por uma fileira retangular de “tubos” embutidos em uma matriz. A orientação longitudinal destes “tubos” é levemente alterada pelos elementos horizontais ou raios medulares.

Ao longo da direção dos “tubos”, os mecanismos de dissipação de energia acústica estão relacionados, principalmente, à reflexão ou à difração da onda ultra-sônica nas extremidades destes “tubos”. Em geral, naquela direção, os valores de atenuação são

relativamente pequenos, enquanto os valores de velocidade são os mais altos possíveis, em razão da continuidade entre os elementos anatômicos e da alta cristalinidade das microfibrilas celulósicas.

Dessa forma, pode-se concluir que as maiores atenuações e as menores velocidades ocorrem na direção tangencial, em virtude da descontinuidade dos elementos estruturais e da presença de lignina, substância amorfa e inelástica, ao longo da direção de propagação da onda.

2.2.4 Dimensões dos elementos estruturais

Os mecanismos de dispersão da onda ultra-sônica ao longo da madeira estão intrinsecamente relacionados às dimensões dos elementos estruturais desse material.

Segundo Bucur (1995), quando uma onda longitudinal se propaga ao longo da direção das fibras da madeira, os comprimentos de onda e o comprimento das células são da mesma ordem de grandeza. A propagação ocorre, dessa forma, no regime de dispersão estocástico. Por outro lado, ao longo das direções radial e tangencial, os comprimentos de onda são consideravelmente maiores que as dimensões médias das células e a propagação ocorre, provavelmente, dentro de um regime de dispersão conhecido como dispersão de Rayleigh.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Quando um pulso ultra-sônico mantém sua forma à medida que se desloca em um meio material, todas as ondas harmônicas que o compõem terão a mesma velocidade, o que acontecerá somente se as velocidades destas ondas não dependerem do comprimento de onda ou da frequência das vibrações. Um meio no qual a velocidade de propagação da onda independe do comprimento de onda, ou da frequência, é denominado meio não dispersivo.

Entretanto, na madeira, por ser um meio dispersivo, as velocidades das ondas que constituem o pulso dependerão das frequências e dos comprimentos de onda, e o pulso ultra-sônico terá sua forma alterada à medida em que avança naquele material. Neste caso, a velocidade do pulso (por exemplo, a velocidade do centro do pulso) não é a mesma que a velocidade média das ondas que o constituem. A velocidade média das ondas harmônicas é denominada velocidade de fase e a velocidade do pulso é denominada velocidade de grupo. Rayleigh foi quem introduziu o conceito de velocidade de grupo ao estudo das ondas. A velocidade de grupo está relacionada à velocidade de fase por meio da expressão:

$$v_g = v - v \frac{dv}{v} \quad (20)$$

Para meios em que não exista dispersão, ou seja, $\frac{dv}{v} = 0$, a velocidade de grupo será igual à velocidade de fase.

A velocidade de grupo pode ser determinada utilizando-se a seguinte relação cinemática:

$$v_g = \frac{d}{t} \quad (21)$$

em que d é a distância percorrida pelo pulso e t é tempo gasto para percorrê-la.

Como pode ser verificado, a determinação experimental da velocidade de fase do pulso ultra-sônico ao longo da madeira é consideravelmente difícil.

Entretanto, ao se propagar através da madeira, a velocidade do pulso (ou velocidade de grupo), assim como a velocidade de fase, pode ser afetada por uma série de fatores que estão intrinsecamente relacionados às propriedades mecânicas daquele material.

Dessa maneira, imagina-se ser possível estabelecer relações estatísticas que possam expressar estas propriedades como função daquela velocidade.

Com o objetivo de se estabelecer as correlações estatísticas entre a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico longitudinalmente às fibras e parâmetros físicos e mecânicos de madeiras, foram determinadas, experimentalmente, a velocidade de propagação, a umidade, a densidade aparente, as resistências à compressão paralela e normal às fibras, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e os módulos de elasticidade longitudinal e normal às fibras. Os dados experimentais obtidos foram, posteriormente, estatisticamente tratados e, por meio de regressão linear múltipla, procurou-se estabelecer correlações.

Para esse propósito, foram escolhidas duas espécies de madeiras nativas e uma espécie de madeira de reflorestamento. As espécies nativas escolhidas foram a *Manilkara spp* e a *Hyminaea spp*, conhecidas, popularmente, como Maçaranduba e Jatobá e a espécie de reflorestamento foi o *Eucalyptus tereticornis*. A escolha destas espécies se baseou no fato de serem madeiras amplamente empregadas em estruturas correntes.

Para cada uma das três espécies escolhidas, selecionou-se, aleatoriamente, uma amostra constituída por dez pranchas com espessuras variando entre 4,0 cm e 5,0 cm, larguras entre 25,0 cm e 30,0 cm e comprimentos variados.

As pranchas provenientes das madeiras nativas possuíam altos teores de umidade, pois eram procedentes de toras recentemente cortadas. As pranchas de Eucalipto já tinham sido secadas em estufa e suas umidades estavam muito próximas da umidade equilíbrio. Isso possibilitou que se trabalhasse com uma larga faixa de valores de umidade.

Depois da seleção, as pranchas de Maçaranduba e Jatobá foram cortadas em

comprimentos aproximados de 1,0 m e as pranchas de eucalipto em comprimentos aproximados de 0,75 m. A diferença entre os comprimentos das pranchas se deveu, exclusivamente, ao fato de não se encontrarem pranchas de eucalipto com comprimentos superiores a 0,80 m. Os cortes foram cuidadosamente feitos no esquadro, objetivando, dessa maneira, que as superfícies da seção transversal pudessem ficar mais paralelas.

Determinados os comprimento reais e os tempos de propagação do pulso ultra-sônico (fornecidos diretamente pelo aparelho de ultrassom), calcularam-se as velocidades de propagação por meio da equação (21).

Em seguida, as pranchas foram cortadas ao meio. Selecionou-se, então, uma das metades de cada prancha e outra foi hermeticamente acondicionada em sacos plásticos, evitando, assim, o contato com o meio ambiente. Das metades selecionadas, foram extraídos os corpos de prova para caracterização física e mecânica das espécies, seguindo os critérios prescritos pela NBR 7190/1997 da ABNT.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1. Nesta tabela, os símbolos do cabeçalho representam:

CP = corpo-de-prova;

v_g = velocidade de grupo ou velocidade do pulso;

U = teor de umidade do corpo de prova;

ρ_{ap} = densidade aparente do corpo-de-prova;

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras;

f_{c90} = resistência à compressão normal às fibras;

f_{v0} = resistência ao cisalhamento na presença de tensões tangenciais paralelas às fibras;

E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal ou paralelo às fibras;

E_{c90} = módulo de elasticidade normal às fibras da madeira.

Os resultados experimentais, listados na Tabela 1, foram estatisticamente tratados e, com auxílio do programa Minitab, versão 13, foi desenvolvida uma análise de regressão linear múltipla em que vários modelos matemáticos foram testados. Após algumas

tentativas, selecionaram-se aqueles modelos que melhor representavam as relações entre as variáveis dependentes (resistências e módulos de elasticidade) e as variáveis independentes (velocidades, umidades e densidades).

Tabela 1. Velocidade de propagação e propriedades físicas e mecânicas das três espécies de madeira em estudo.

Table 1. Propagation speed and physical and mechanical wood properties of three tree species.

CP	v_g (m/s)	U (%)	ρ_{ap} (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{c90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{c90} (MPa)
1M	4290±20	29,64±0,02	1200±10	59,8±0,5	7,7±0,2	11,3±0,1	41000±2000	3000±1000
2M	4530	30,89	1160	56,8	9,7	13,5	52000	5000
3M	4260	30,29	1210	68,2	7,9	11,6	48000	6000
4M	4230	30,34	1210	69,3	8,5	13,0	55000	7000
5M	4270	28,95	1190	66,8	7,5	13,1	40000	11000
6M	4390	30,75	1150	49,3	7,9	14,2	27000	14000
7M	4530	29,11	1140	66,7	8,6	13,4	61000	4000
8M	4540	22,48	1120	70,5	6,6	13,4	46000	9000
9M	4240	27,14	1180	68,0	8,6	14,3	45000	11000
10M	4290	28,17	1180	67,0	7,6	14,6	48000	14000
1J	5100±30	21,50±0,03	1130±10	84,4±0,5	11,0±0,2	10,8±0,1	62000±3000	14000±1000
2J	4460	45,02	1090	48,1	...	10,6	63000	...
3J	5010	20,33	1150	80,1	10,4	17,4	53000	9000
4J	5100	21,89	910	63,8	5,9	10,5	65000	5000
5J	4840	20,38	960	61,3	9,4	14,7	52000	5000
6J	3700	60,77	880	39,9	...	12,6	33000	...
7J	3870	45,65	870	43,9	4,6	10,8	33000	2000
8J	5170	21,24	900	52,3	4,7	14,7	55000	2000
9J	4830	18,78	830	46,1	3,6	14,7	29000	2000
10J	4160	25,70	660	26,5	...	6,0	35000	...
1E	5750±50	11,92±0,01	980±9	71,9±0,5	8,1±0,2	14,3±0,1	51000±5000	4000±1000
2E	5060	12,29	940	62,2	5,8	17,7	40000	3000
3E	5370	12,22	1010	92,3	9,1	11,8	95000	5000
4E	5370	11,70	680	55,3	4,0	15,3	49000	2000
5E	5650	12,50	950	80,4	5,5	18,6	92000	3000
6E	5110	11,82	1030	61,7	6,1	18,1	41000	5000
7E	5240	13,34	930	65,1	8,5	15,3	52000	6000
8E	4930	12,75	940	54,2	4,0	19,3	38000	3000
9E	5490	13,23	970	81,3	...	18,5	54000	...
10E	5740	11,56	910	81,2	6,6	17,5	68000	5000

NOTA – As letras M, J e E, que acompanham os números dos corpos-de-prova, designam, respectivamente, a Maçaranduba, o Jatobá e o *Eucalyptus tereticornis*.

4.1 Descrição das variáveis

4.1.1 Variáveis indicadoras

Como a variável madeira é qualitativa e tem 3 níveis, são necessárias duas variáveis indicadoras, ou seja:

$$I_1 = \begin{cases} 1, & \text{se madeira} = 1 \\ 0, & \text{se madeira} = 2 \\ 0, & \text{se madeira} = 3 \end{cases}$$

$$I_2 = \begin{cases} 0, & \text{se madeira} = 1 \\ 1, & \text{se madeira} = 2 \\ 0, & \text{se madeira} = 3 \end{cases}$$

Para se fazer a predição com a variável madeira significativa, serão usados os seguintes códigos:

$I_1=1$ e $I_2=0$ para a madeira 1 (Maçaranduba);

$I_1=0$ e $I_2=1$ para a madeira 2 (Jatobá);

$I_1=0$ e $I_2=0$ para a madeira 3 (Eucalipto).

4.1.2 Variáveis preditoras

As variáveis preditoras dos modelos são:

- Umidade (U);
- Velocidade de Propagação (v_g);
- Densidade aparente (ρ_{ap});
- Tipo de madeira: Maçaranduba, Jatobá, eucalipto.

4.1.3 Variáveis resposta

As variáveis respostas dos modelos são:

- Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0});
- Resistência à compressão normal às fibras (f_{c90});
- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0});
- Módulo de elasticidade longitudinal (E_{c0});
- Módulo de elasticidade normal às fibras (E_{c90}).

Após algumas tentativas, os modelos que melhor representaram as relações entre as variáveis foram:

$$f_{c0} = 205 - 0,101 v - 0,305 u + 0,0693 \rho_{ap} + 0,000012 v^2 \quad (R^2=77,9 \%) \quad 22$$

$$f_{c90} = -14,0 + 0,00159 v + 0,0131 \rho_{ap} \quad (R^2 = 54,8 \%) \quad 23$$

$$\text{Log}(E_{c0}) = 6,55 + 0,000763 v + 0,0173 u + 0,420 I_1 + 0,143 I_2 \quad (R^2 = 56,2 \%) \quad 24$$

5 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que é possível prever algumas das propriedades mecânicas de madeiras por meio de propagação de ondas ultra-sônicas ao longo da direção das fibras.

A Equação (22), que estabelece a relação entre a resistência à compressão paralela às fibras e a velocidade, umidade e densidade aparente, constitui o modelo mais representativo, com um coeficiente de regressão $R^2 = 77,9 \%$. Isto significa que 77,9 % dos dados podem ser explicados com segurança pelo modelo.

Para a Equação (23), que expressa a resistência normal às fibras como função da velocidade e da densidade aparente, apenas 54,8 % dos dados podem ser representados com segurança pela equação.

O módulo de elasticidade paralelo às fibras pode ser obtido pela equação (24), em que 56,2 % dos dados podem ser seguramente representados.

Para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e o módulo de elasticidade normal às fibras, não foi possível estabelecer nenhuma equação que permitisse expressá-los como funções da velocidade de propagação do pulso ao longo da direção paralela às fibras. Este resultado se justifica pelo fato de não existirem relações físicas entre aquelas propriedades mecânicas e a velocidade de propagação do pulso longitudinalmente às fibras.

De maneira geral, tendo em vista que se está trabalhando com um material de natureza orgânica, anisotrópico, não homogêneo e

higroscópico, pode-se concluir que os resultados obtidos foram consideravelmente satisfatórios.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BEDFORD, A.; DRUMHELLER, D. S. **Introduction to elastic wave propagation**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 297 p.

BLITZ, J. **Fundamentals of ultrasonics**. 2. ed. London: Butterworths, 1967. 220 p.

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. USA: CRC Press, 1995. 284 p.

NEPOMUCENO, L. X. **Acústica técnica**. Brasil: ETEGIL, 1968. 578 p.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Propagação de ondas acústicas na madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, VII, 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2000.

POLLARD, H. F. **Sound waves in solid**. London: Pion Limited, 1977. 366 p.

TIEMANN, H. D. **Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood**. Washington: USA, 1906. 144 p. (Forest Service Bulletin, 70)

ZIMMERMANN, M. H. **Xylem structure and ascent of sap**. Berlin: Springer Verlag, 1983. 143 p.