Campus de São Carlos

“Estudo de Propriedades Mecânicas de
Dicotiledôneas por meio de ensaio não-
destrutivo utilizando equipamentos de
ultra-som”

Mestranda: Fabiana Goia Rosa de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Almir Sales (UFSCar)

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ÁREA INTERUNIDADES EM
“CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS”**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
DICOTILEDÔNEAS POR MEIO DE ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO
UTILIZANDO EQUIPAMENTO DE ULTRA-SOM.**

Fabiana Goia Rosa de Oliveira

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036069

Dissertação apresentada à Área Interunidades
em Ciência e Engenharia de Materiais,
para obtenção do título de Mestre
em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Almir Sales

São Carlos
2001

Class.	TESE- EESC
Cutl.	04073
Tombo	T0139/01

st 1190994

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

048e

Oliveira, Fabiana Goia Rosa de

Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamento de ultra-som / Fabiana Goia Rosa de Oliveira. -- São Carlos, 2001.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.

Área interunidades: Ciências e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Almir Sales.

1. Madeira. 2. Ultra-som. 3. Avaliação não destrutiva.
I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal 369 – CEP 13560-970 - São Carlos-SP – Brasil

Tel: (0xx16) 2739589/ Fax: (0xx16) 2739777

E-mail: erica@if.sc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE *FABIANA GOLA ROSA DE OLIVEIRA*, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO INTERUNIDADES, ÁREA EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 08/05/2001.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. **ALMIR SALES** (Orientador) – UFSCar

Profª. Dra. **RAQUEL GONÇALVES** – UNICAMP

Prof. Dr. **ADRIANO WAGNER BALLARIN** - UNESP/Botucatu

Dedicatória:

A meus pais, Manoel e Maria de Lourdes.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador, Almir Sales, pela dedicação e amizade.

A meus pais, Manoel e Maria de Lurdes, e a meus irmãos Sheila e Maurício, pelo incentivo em todos os momentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro.

Aos professores, funcionários e colegas do LaMEM.

À professora Raquel Gonçalves e ao colega Carlos Teixeira Puccini, pelo auxílio na experimentação.

À Madeireira César, pela doação de madeira para a presente pesquisa.

Publicações

OLIVEIRA, F. G. R; SALES, A. (2000). Caracterização de propriedades físicas de dicotiledôneas nativas por meio de técnicas de ultra-som. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 14. São Pedro. **Anais**. Cd rom, arquivo digital.

OLIVEIRA, F. G. R; SALES, A. (2000). Propagação de ondas acústicas na madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6. São Carlos. **Anais**. São Carlos. Cd rom, arquivo digital.

OLIVEIRA, F. G. R. (2000). Ultra-som em madeiras. **Jornal Primeira Página**. São Carlos.

CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE DICOTILEDÔNEAS NATIVAS POR MEIO DE TÉCNICAS DE ULTRA-SOM.

Fabiana Goia R de Oliveira ⁽¹⁾, Almir Sales ⁽²⁾

*(1) Escola de Engenharia de São Carlos, USP – Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira.
e-mail : fabiana@sc.usp.br*

*(2) Universidade Federal de São Carlos – Prof. Departamento de Eng. Civil.
e-mail : almir@power.ufscar.br*

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a aplicação de ondas acústicas na madeira visando a caracterização de suas propriedades físicas e mecânicas. A avaliação da madeira com ondas ultra-sônicas é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade. Sensores piezo-elétricos são posicionados em dois pontos da peça e permitem a determinação do tempo de passagem da onda. A velocidade de transmissão é sensível a fatores que determinam a qualidade do material, deste modo, esta técnica torna-se uma importante ferramenta nas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos através do controle da variabilidade da matéria prima e de seus derivados. Outra aplicação ocorre na avaliação in loco de estruturas, possibilitando a manutenção das mesmas, por meio de um mapeamento das áreas deterioradas, o que possibilita uma avaliação da integridade das peças sem a necessidade de remoção de parte da estrutura. As espécies utilizadas no procedimento experimental foram escolhidas de modo a manter boa representatividade dos dados em relação às possíveis inferências a serem realizadas, são elas: *Goupia glabra* e *Planchonella pachycarpa*. Foram realizados ensaios para a determinação das seguintes propriedades físicas e mecânicas: densidade aparente a um teor de umidade de 12%, teor de umidade, resistência e módulo de elasticidade longitudinal à compressão paralela às fibras. Numa segunda etapa, foram feitos ensaios com ultra-som para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico (E_d), a fim de comparação com os resultados estáticos. Os resultados obtidos permitem afirmar que o E_d pode ser utilizado como parâmetro para avaliar as propriedades mecânicas da madeira, mas não para realizar o enquadramento em uma classe de resistência. Todavia, para melhor ratificar a eficiência desta técnica na avaliação mecânica de peças de madeira, torna-se necessário o estudo com outras espécies.

Palavras-chave: ondas acústicas, ultra-som, dicotiledôneas nativas.

ABSTRACT

This paper presents a review of the application of acoustic waves in wood to establish its mechanical and physical properties. It's possible to grade wood by using nondestructive methods. In these techniques, it's not necessary to remove samples from wood, because the evaluation is done directly in the piece of interest. The determination of properties of wood is based on the relationship between the speed of the propagation of an ultrasonic wave and the modulus of elasticity and density of wood itself. The propagation speed depends on factors that affect wood quality, so this technique becomes an important tool at the industry to improve and rationalize the manufacturing control of wood and wood products. The ultrasonic measurements have also been used for the evaluation in locus of the structures of wood, to get their maintenance or rehabilitation by using a contour map of the deteriorated regions. Therefore, at the evaluation in locus of structures as well as at the process of manufacture of wood and wood products, the techniques of acoustic wave achieve economic and effective results, contributing to the rationalization of wood and structures of wood. The species selected in this research are: *Goupia glabra* and *Planchonella pachycarpa*. The experiments were made to get some physics and mechanics properties like specific gravity, moisture content, strength and modulus of elasticity. In a second stage, it was used an equipment of ultrasound to obtain the dynamic modulus of elasticity (E_d), and then compare this results with the static ones. The achieved results allow to end that E_d can be used as parameter to evaluate the mechanical properties of wood, but not to accomplish the framing in a resistance class. Although, to improve this technique for the evaluation of rigidity properties and resistance of wood, it's necessary to develop researchs in others species of this material.

Keywords: acoustic waves, ultrasonic, brazilian hardwoods.

1. INTRODUÇÃO

A madeira, por ser um material natural, apresenta grande variabilidade em suas características. Os fatores que determinam esse comportamento estão relacionados à fisiologia das árvores, à classificação botânica e às condições ambientais e climáticas. Também influenciam as propriedades da madeira : a geometria dos anéis de crescimento, a idade das diferentes camadas, o nível de lenhificação das paredes das células componentes dos elementos anatômicos, a incidência de nós ou fibras reversas, a distribuição e a concentração dos constituintes celulares.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo caracterizar as propriedades físicas de dicotiledôneas nativas utilizando técnicas de ultra-som. Assim como analisar a confiabilidade deste método na avaliação de peças de madeira, favorecendo a utilização deste material e melhorando suas vantagens em relação a outros materiais como aço e concreto.

2. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA EM MADEIRAS

O método de caracterização destrutiva de corpos de prova de madeira pode ter certa variabilidade em seus resultados devido a fatores como uma amostragem inadequada ou problemas na confecção do corpo de prova. Além disso, ao se utilizar uma peça num ensaio, esta pode ser classificada como aceitável, quando a estrutura da qual foi obtida pode ser de má qualidade, ou ao contrário, uma prova pode dar um resultado negativo levando ao descarte de uma estrutura boa.

É possível uma caracterização eficaz da madeira por meio de métodos não destrutivos, nos quais não se faz necessária a extração de corpos de prova, uma vez que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura. A avaliação não destrutiva é definida como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar suas capacidades de uso final.

A utilização de classes de resistência poderá facilitar a disseminação de madeiras nativas pouco utilizadas na construção civil. Segundo SALES (1996), existem várias dicotiledôneas nativas pouco utilizadas por serem desconhecidas comercialmente, mas que possuem propriedades mecânicas compatíveis com o enquadramento nas classes de resistência, de modo a proporcionar uma redução do custo da madeira pelo uso extensivo de várias espécies.

Outra aplicação dos métodos não destrutivos é a avaliação de estruturas em uso, ou seja, avaliação in loco, possibilitando a manutenção ou reabilitação das mesmas, por meio de um mapeamento das áreas deterioradas, o que possibilita uma avaliação da integridade estrutural das peças sem a necessidade de remoção de parte da estrutura.

As propriedades da madeira de armazenar e dissipar energia são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam as propriedades mecânicas deste material. Em termos microscópicos, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a elasticidade estática e resistência. As propriedades de dissipação de energia são controladas por características de fricção interna, onde o comportamento dos constituintes contribui significativamente.

A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ultra-som é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade do material, OLIVEIRA & SALES (2000). O ultra-som é caracterizado por frequências acima de 20000 Hz. Entre as vantagens de sua utilização, vale destacar o baixo custo de aquisição do equipamento se comparado ao das máquinas de classificação automática (muito utilizadas nos Estados Unidos e na Europa), e o treinamento relativamente simples da mão de obra para utilização do equipamento, possibilitando que o método seja facilmente difundido em revendedores e indústrias de madeiras e derivados.

A propagação das ondas acústicas na madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular. A velocidade de propagação da onda longitudinal na madeira depende do seu módulo de elasticidade, na direção de propagação, e de sua densidade.

A aplicação e medição de ondas acústicas consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A onda acústica é introduzida no material por um dos transdutores e captada pelo outro transdutor, sendo a contagem de tempo, em microssegundos, realizada pelo próprio instrumento de ultra-som. Os tempos registrados são utilizados no cálculo da velocidade de propagação do ultra-som e consequentemente do módulo de elasticidade dinâmico, utilizando-se a seguinte equação:

$$E_d = \rho \times v^2 \quad (1)$$

Onde:

E_d - módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

ρ - densidade da madeira (Kg/m^3);

v - velocidade da onda longitudinal (m/s).

A intensidade de uma onda ultra-sônica diminui a medida em que se afasta da fonte, sendo a diminuição da amplitude da onda no material denominada atenuação ou decréscimo acústico. As causas dessa diminuição podem ser divididas em duas categorias: fatores geométricos e mecanismos de absorção e dispersão.

A atenuação também é provocada pela não homogeneidade estrutural da madeira. É um parâmetro sensível às condições higroscópicas e implica na estimativa da porosidade do material.

Em geral, as perdas aumentam com a frequência e segundo BUCUR (1983), a diminuição da velocidade com o aumento da frequência se deve provavelmente ao fato de que o comprimento de onda se torna próximo ao dos elementos anatômicos da madeira.

Como a madeira é um material higroscópico, suas propriedades físicas são afetadas pela umidade e segundo BUCUR (1992), do ponto de vista elástico, a madeira pode ser considerada um sólido ortotrópico. Quando saturada com água torna-se um material poroso anisotrópico de duas fases, uma sólida, o esqueleto da estrutura, correspondente aos elementos anatômicos e uma fluida, representada pelo volume de água nos poros.

Existe uma forte relação entre velocidade de propagação de ondas e umidade. A umidade afeta a velocidade de propagação de dois modos: no efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira. A água livre aumenta a atenuação resultando numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial, KABIR (1997).

A velocidade de propagação diminui drasticamente com o aumento da umidade até o ponto de saturação das fibras, a partir deste ponto, a variação da velocidade torna-se pequena. A atenuação é praticamente constante em baixos valores de umidade, mas aumenta a partir de um ponto crítico no qual as paredes da células começam a reter água livre, BUCUR (1995).

A velocidade de propagação das ondas é maior na direção longitudinal devido à orientação das células nesse eixo, propiciando um caminho contínuo para as ondas. As menores velocidades ocorrem na direção tangencial e segundo MATOS (1997), quando as ondas viajam através da direção transversal, cruzam camadas de lignina, mais amorfa e inelástica, e assim estão sujeitas a grandes atenuações.

3. METODOLOGIA

Duas espécies de dicotiledôneas nativas, a goupia glabra e a planchonella pachycarpa, foram avaliadas pela técnica de ultra-som, sendo as amostras retiradas de duas vigas de dimensões 6 cm x 12 cm x 100 cm para cada espécie.

Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações da NBR 7190/97 e permitiram verificar as seguintes propriedades físicas e mecânicas: densidade aparente a um teor de umidade de 12% ($\rho_{ap,12\%}$), teor de umidade, resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras (E_{c0}) e módulo de elasticidade dinâmico (E_d). Estes ensaios foram realizados com a madeira com teor de umidade $U \approx 12\%$, considerada a umidade de equilíbrio ao ar para a região de São Carlos-SP.

Os ensaios com ultra-som, para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, foram realizados com o equipamento de emissão de ondas ultra-sônicas da marca Steinkamp BP-7 com transdutores de 50 kHz, ilustrado na Figura 1. Antes dos ensaios, o equipamento foi calibrado com a utilização de um corpo de prova de acrílico, o qual apresenta velocidade de propagação conhecida.

Figura 1 - Equipamento de ultra-som.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios com ultra-som apresentavam forma prismática com seção transversal de 5 cm x 5 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 5 cm, sendo que as medições foram feitas na direção longitudinal das fibras.

Um total de dezesseis amostras foram preparadas para cada espécie analisada, sendo que para cada corpo de prova foram feitas três leituras do tempo de propagação da onda: no centro da peça e nas partes superior e inferior. O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado a partir da média das três medições e da densidade aparente a um teor de umidade de 12%.

Os ensaios para determinação da resistência à compressão paralela às fibras e do módulo de elasticidade longitudinal foram realizados com corpos de prova prismáticos com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 15 cm.

A resistência foi determinada introduzindo-se um carregamento monotônico crescente no corpo de prova com uma taxa em torno de 10 MPa por minuto. Por meio dos resultados experimentais e da determinação da área dos corpos de prova, obteve-se a resistência à compressão paralela às fibras:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (2)$$

Onde:

$F_{c0,max}$ - máxima força de compressão (N);

A - área inicial da seção transversal comprimida (m^2);

f_{c0} - resistência à compressão paralela às fibras (MPa).

Para determinar o módulo de elasticidade longitudinal, a partir da resistência estimada da amostra $f_{c0,est}$, o carregamento foi aplicado em dois ciclos de carga e descarga. A taxa de carregamento foi de 10 MPa por minuto. Os ensaios foram realizados com extensômetros mecânicos fixados por meio de duas cantoneiras metálicas pregadas no corpo de prova, com distância normal de 10 cm entre as duas linhas de pregação. As deformações foram registradas até 70% da carga estimada. Em seguida tirou-se a instrumentação e elevou-se o carregamento até a ruptura do corpo de prova. Para a determinação do módulo de elasticidade foram construídos diagramas de tensão versus deformação específica para todos os ensaios realizados. O diagrama referido está indicado na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama tensão deformação específica. Fonte: NBR 7190/97.

O módulo de elasticidade foi determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão deformação, definida pelos pontos $(\sigma_{10\%}; \epsilon_{10\%})$ e $(\sigma_{50\%}; \epsilon_{50\%})$ correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (3)$$

Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ - tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{c0} ;

$\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$ - deformações específicas medidas no corpo de prova correspondentes às tensões de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados dos valores mínimos, médios, máximos e os respectivos coeficientes de variação para a densidade aparente a 12%, resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), módulo de elasticidade estático (E_{c0}) e módulo de elasticidade dinâmico (E_d), foram sumarizados nas Tabelas I e II.

Tabela I - Resultados obtidos para a espécie *planchonella pachycarpa* (n=16).

Característica	Valores			
	mínimo	médio	máximo	CV (%)
$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)	840	899	938	3,1
f_{c0} (MPa)	59,24	69,03	76,32	8,6
E_{c0} (MPa)	15474	21893	29826	18,5
E_d (MPa)	16039	22059	27329	13,8

Tabela II – Resultados obtidos para a espécie *goupia glabra* (n=16).

Característica	Valores			
	mínimo	médio	máximo	CV (%)
$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)	728	883	1007	8,1
f_{c0} (MPa)	43,71	51,15	58,39	7,7
E_{c0} (MPa)	11226	15439	19063	15,7
E_d (MPa)	12105	15975	20231	14,4

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os pares de valores dos módulos de elasticidade dinâmico (E_d) e estático (E_{c0}), obtidos para cada um dos corpos de prova, foram realizadas regressões lineares simples. Da mesma maneira, efetuou-se a análise de regressão utilizando os pares de valores do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e da resistência à compressão paralela (f_{c0}). A Tabela III apresenta as regressões obtidas e a Figura 3 mostra os diagramas de dispersão para as espécies estudadas.

Tabela III - Regressões entre a resistência e módulo de elasticidade na compressão paralela em função do módulo de elasticidade dinâmico.

Equação da regressão	R
Planchonella pachycarpa (n=16)	
$E_{c0} = 3281,55 + 0,84 E_d$	0,64
$f_{c0} = 33,04 + 0,00163 E_d$	0,84
Goupia glabra (n=16)	
$E_{c0} = 9662,31 + 0,362 E_d$	0,34
$f_{c0} = 43,61 + 0,00163 E_d$	0,27
Conjunto das duas espécies (n=32)	
$E_{c0} = 1774,38 + 0,888 E_d$	0,77
$f_{c0} = 18,67 + 0,00218 E_d$	0,86

Figura 3 – Resistência e módulo de elasticidade na compressão paralela versus módulo de elasticidade dinâmico, respectivamente, para as espécies *Planchonella pachycarpa* (●) e *Goupia glabra* (■).

A análise dos resultados obtidos permite afirmar que:

- ◆ Os coeficiente de variação dos ensaios estáticos para a resistência à compressão paralela (f_{c0}) variaram no intervalo de 7% a 9% e para o módulo de elasticidade (E_{c0}), variaram no intervalo de 15% a 19%. Segundo HERZIG apud GONÇALVES (1998), os coeficientes de variação ligados à rigidez são sempre maiores que os ligados à resistência. Portanto, os coeficientes de variação obtidos para a resistência à compressão e para o módulo de elasticidade longitudinal no ensaio de compressão paralela às fibras estão próximos dos valores encontrados na literatura, sendo que as pesquisas realizadas por ROCCO LAHR (1990) também ratificam os valores obtidos.
- ◆ Os coeficientes de variação obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico também ficaram próximos dos valores encontrados na literatura, BUCUR (1995). Além disso, estes valores ficaram abaixo dos correspondentes nos ensaios estáticos. Isto denota a menor variabilidade inerente a esta determinação não destrutiva em relação aos ensaios estáticos.

- ♦ As correlações entre os valores dinâmicos e estáticos do módulo de elasticidade considerados para as espécies separadamente podem ser consideradas estatisticamente baixas. Todavia, estes valores estão próximos dos valores obtidos por alguns pesquisadores para outras dicotiledôneas nativas. BARTHOLOMEU (2000) e PUCCINI (2000) obtiveram valores semelhantes para as correlações entre as mesmas propriedades da presente pesquisa. BARADIT (1998) realizando ensaios com *pinus radiata* chegou a valores maiores para a correlação entre E_{c0} e E_d , mas as diferenças anatômicas entre folhosas e coníferas podem ter influenciado na propagação das ondas na madeira.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas é possível tecer as seguintes conclusões:

- ♦ Em termos das classes de resistência para dicotiledôneas, pode-se afirmar que o E_d pode ser utilizado como parâmetro para avaliar as propriedades mecânicas da madeira, mas não para realizar o enquadramento em uma classe de resistência.
- ♦ Os resultados obtidos permitem concluir que é possível utilizar satisfatoriamente a técnica de ultra-som para a avaliação de propriedades de rigidez e resistência da madeira. Todavia, para melhor ratificar a eficiência desta técnica na avaliação mecânica de peças de madeira, torna-se necessário o estudo com outras espécies.

Salienta-se ainda, a necessidade de pesquisas referentes à propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras nativas e cultivadas no Brasil, pois a maior parte do conhecimento existente nesta área foi desenvolvido com coníferas européias, as quais possuem complexidade anatômica bem diferenciada das essências tropicais e cultivadas em nosso país.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - pelo incentivo e apoio para o desenvolvimento deste trabalho. Os autores também agradecem a pesquisadora Raquel Gonçalves (FEAGRI/UNICAMP) pelo auxílio na experimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARADIT, E. et al. (1998). Aplicacion de ultrasonido en la evaluacion de madera de *pinus radiata*. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, v. 1, p.27-33.
- BARTHOLOMEU, A. & GONÇALVES, R. (2000). O uso do ultra-som na determinação de constante elástica da madeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 19. São Paulo. *Anais*, Cd-rom, arquivo digital.
- BUCUR, V. (1995). *Acoustics of wood*. New York, CRC Press Inc.
- BUCUR, V. (1983). An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. *Ultrasonics*, v. 21, n. 3, p.116-126.
- BUCUR, V. (1992). An experimental study of ultrasonic waves propagation in dry and water saturated solid wood. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4. São Carlos. *Anais*, v. 2, p.127-138.
- GONÇALVES, R. (1998). Montagem de equipamento para ensaios não destrutivos em madeira utilizando ultra-som. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6. Florianópolis. *Anais*, v. 2, p.344-353.

- KABIR, M. F. et al. (1997). Effect of moisture content and grain angle on the ultrasonic properties of rubber wood. *Holzforschung*, v. 51, n.3, p.263-267.
- MATOS, J. L. M. (1997). **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** Curitiba, 117p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Paraná.
- OLIVEIRA, F. G. R. & SALES, A. (2000). Propagação de ondas acústicas na madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6. São Carlos. *Anais*. São Carlos. Cd rom, arquivo digital.
- PUCCINI, C.T. & GONÇALVES, R. (2000). Uso do ultra-som na avaliação da qualidade da madeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 19. São Paulo. *Anais*, Cd-rom, arquivo digital.
- ROCCO LAHR, F.A. (1990). **Considerações a respeito da variabilidade de propriedades de resistência e de elasticidade da madeira.** São Carlos. p.5-104. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- SALES, A. (1996). **Proposição de classes de resistência para madeira.** São Paulo. 223p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, USP.

PROPAGAÇÃO DE ONDAS ACÚSTICAS NA MADEIRA

Fabiana Goia R de Oliveira e Almir Sales

RESUMO: Este trabalho apresenta uma revisão sobre a aplicação de ondas acústicas na madeira visando a caracterização de suas propriedades físicas e mecânicas. É possível uma classificação eficaz de peças de madeira por meio de métodos não destrutivos, nos quais não se faz necessária a extração de corpos de prova, uma vez que a avaliação é realizada na própria peça ou elemento estrutural. A avaliação da madeira com ondas acústicas é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a massa específica. A velocidade de transmissão é sensível a fatores que determinam a qualidade do material, deste modo, esta técnica torna-se uma importante ferramenta nas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos através de uma melhor uniformidade na matéria prima e em seus derivados. Outra aplicação ocorre na avaliação in loco de estruturas, possibilitando a manutenção ou reabilitação das mesmas, por meio de um mapeamento das áreas deterioradas, o que possibilita uma avaliação da integridade das peças sem a necessidade de remoção de parte da estrutura. Portanto, na avaliação de estruturas em uso e no processo de fabricação de derivados de madeira, as técnicas com ondas acústicas propiciam resultados econômicos e eficientes, contribuindo para a racionalização do uso da madeira e das estruturas de madeira.

Palavras-chave: ondas acústicas, ultra-som, madeira.

PROPAGATION OF ACOUSTIC WAVES IN WOOD

ABSTRACT: This paper presents a review of the application of acoustic waves in wood to establish its mechanical and physical properties. It's possible to grade wood by using nondestructive methods. In these techniques, it's not necessary to remove samples from wood, because the evaluation is done directly in the piece of interest. The determination of properties of wood is based on the relationship between the speed of the propagation of an ultrasonic wave and the modulus of elasticity and density of wood itself. The propagation speed depends on factors that affect wood quality, so this technique becomes an important tool at the industry to improve and rationalize the process control of wood and wood products. The ultrasonic measurements have also been used for the evaluation in place of structures of wood, to get their maintenance or rehabilitation by using a contour map of the deteriorated regions. Therefore, at the evaluation in place of structures as well as at the process of manufacture of wood and wood products, the techniques of acoustic wave achieve economic and effective results, contributing to the rationalization of wood and structures of wood.

Keywords: acoustic waves, ultrasonic, wood.

1. INTRODUÇÃO

Segundo MATOS (1997), a exploração adequada dos recursos florestais torna-se obrigatória por dois motivos: o primeiro relativo a valorização ambiental dos recursos florestais, e o segundo econômico, uma vez que, a viabilização da produção só ocorre com a racionalização do uso integral de matéria-prima e meios de produção.

As técnicas de controle de qualidade por meio de ondas acústicas propiciam resultados eficientes na avaliação de estruturas em uso e no processo de fabricação de derivados de madeira, contribuindo para o aprimoramento do uso da madeira e das estruturas de madeira.

2. CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA

A madeira, por ser um material natural, apresenta grande variabilidade em suas características. Os fatores que determinam esse comportamento estão relacionados à fisiologia das árvores, à classificação botânica e às condições ambientais e climáticas. Também influenciam as propriedades da madeira: a geometria dos anéis de crescimento, a idade das diferentes camadas, o nível de lenhificação das paredes das células componentes dos elementos anatômicos, a incidência de nós ou fibras reversas, a distribuição e a concentração dos constituintes celulares.

Segundo BUCUR (1995), a arquitetura da madeira é responsável pelo seu comportamento altamente anisotrópico e viscoelástico. A figura a seguir apresenta a estrutura hierárquica da madeira, desde o nível molecular até o macroscópico, possibilitando um melhor entendimento do comportamento deste material.

Fig. 1: Estrutura hierárquica da madeira. Fonte: BUCUR (1995).

3. PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM MATERIAIS SÓLIDOS

Ondas mecânicas se originam no deslocamento de parte de um meio elástico em relação à sua posição normal, ocasionando a oscilação desta em torno de uma posição de equilíbrio. É necessário haver um meio material para transmitir ondas mecânicas.

Uma onda transversal é aquela em que a vibração das partículas do meio é perpendicular à direção de propagação da onda. Em uma onda longitudinal a vibração do meio é paralela à direção de propagação da onda.

3.1 Propagação de Ondas Sonoras

Quando o som viaja de um lugar para outro na forma de ondas, o que é realmente transmitido é uma perturbação do arranjo de equilíbrio dos átomos no material. É importante salientar que o material não se movimenta, apenas a perturbação é propagada.

As ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais que podem se propagar em sólidos, líquidos e gases. As partículas materiais que transmitem a onda oscilam paralelamente à direção de propagação da própria onda.

As ondas sonoras são constituídas por aquelas cujas frequências situam-se em um intervalo capaz de estimular a sensação de audição no ouvido e no cérebro humano. Este intervalo está entre 20 Hz e 20000 Hz e é denominado intervalo audível. Uma onda mecânica longitudinal cuja frequência está abaixo de intervalo audível é denominada onda infra-sônica, se a frequência estiver acima desse intervalo tem-se uma onda ultra-sônica.

Diferentemente das ondas elétricas ou luminosas, a onda sonora exige um meio material para se propagar, o que foi verificado por Boyle, após Kircher ter demonstrado que o som não se propaga no vácuo, em 1605.

Durante o movimento existem aglomerações e rarefações momentâneas das moléculas e tais vibrações formam a 'pressão do som'. Quando as vibrações ocorrem no mesmo sentido da propagação da onda, têm-se a polarização longitudinal. Se as moléculas se movimentam perpendicularmente à propagação da onda, ocorre a polarização transversal.

A velocidade da onda sonora não depende da intensidade, mas somente da densidade e das constantes elásticas do material. A velocidade é característica do material e em geral, é constante para qualquer frequência e comprimento de onda.

3.2 Atenuação de Ondas Sonoras

Os materiais enfraquecem a propagação do som devido a dois fatores: difusão e absorção, que podem ser combinados no termo atenuação.

A difusão é resultante da não homogeneidade do material, que contém contornos onde a impedância acústica muda devido à diferença de densidade.

A absorção é a conversão direta da energia do som em calor e segundo KRAUTRÄMER (1990), pode ser visualizada como um freio na oscilação das partículas, tornando claro porque uma oscilação rápida perde mais energia que uma lenta. A absorção aumenta com a frequência, mas em uma taxa menor que a difusão.

4. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA EM MADEIRAS

O método de caracterização destrutiva de corpos de prova pode ter certa variabilidade em seus resultados devido a fatores como uma amostragem inadequada ou problemas na confecção do corpo de prova. Além disso, ao se utilizar uma peça num ensaio, esta pode ser classificada como aceitável, quando a estrutura da qual foi obtida pode ser de má qualidade, ou ao contrário, uma prova pode dar um resultado negativo levando ao descarte de uma estrutura boa.

É possível uma caracterização eficaz da madeira por meio de métodos não destrutivos, nos quais não se faz necessária a extração de corpos de prova, uma vez que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura.

A avaliação não destrutiva é definida como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar suas capacidades de uso final.

Segundo MCDONALD (1990), em materiais homogêneos e isotrópicos como aço, plásticos e cerâmicas, a avaliação não destrutiva detecta falhas surgidas no processo de fabricação. Na madeira, essas irregularidades ocorrem naturalmente e a influência dessas sobre as propriedades mecânicas pode ser avaliada através de métodos não destrutivos.

De acordo com GONÇALVES (1998), muitas técnicas podem ser enquadradas como avaliação não destrutiva, desde a avaliação visual até os testes químicos e o uso de técnicas de vibração, propagação de ondas, emissões acústicas, raio x, etc.

4.1 Vantagens e Aplicações dos Métodos Não Destrutivos

Os métodos não destrutivos apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais para caracterização da madeira: possibilidade de avaliar a integridade estrutural de uma peça sem a extração de corpos de prova; maior rapidez para analisar uma grande população e versatilidade para se adequar a uma rotina padronizada numa linha de produção.

Atualmente, a escolha de uma determinada madeira para um projeto estrutural pode ser feita em função dos valores de resistência do material, independente da espécie, utilizando-se o sistema de classes de resistência. Esse sistema permite a utilização da madeira disponível na região da construção, o que propicia um melhor aproveitamento da diversidade de espécies nativas e de florestamento.

A utilização de classes de resistência poderá facilitar a disseminação de madeiras de florestamento na construção civil. Segundo SALES (1996), a madeira de eucalipto além de apresentar menor custo quando disponível em locais próximos aos de sua utilização, sua extração pode se dar em menor idade relativamente às dicotiledôneas da floresta amazônica usualmente empregadas no sul e sudeste brasileiros.

De acordo com a NBR 7190/97, no dimensionamento de estruturas de madeira deve-se minorar os valores de resistência e rigidez, o que acaba propiciando um superdimensionamento da estrutura. Porém, conhecendo-se as propriedades específicas de cada peça, a norma citada permite a adoção de valores maiores de resistência, o que leva a uma melhor adequação do uso da madeira, resultando em estruturas seguras e econômicas.

Segundo KEINERT & MATOS (1998), a avaliação não destrutiva é uma importante ferramenta para a caracterização da madeira, podendo ser utilizada pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos através de uma maior uniformidade na matéria prima e em seus derivados.

Outra aplicação dos métodos não destrutivos é a avaliação de estruturas em uso, ou seja, avaliação in loco, possibilitando a manutenção ou reabilitação das mesmas, por meio de um mapeamento das áreas deterioradas, o que possibilita uma avaliação da integridade estrutural das peças sem a necessidade de remoção de parte da estrutura.

5. UTILIZAÇÃO DE ULTRA-SOM NA MADEIRA

O conceito de propagação de som na madeira tem sido empregado por gerações como modo não destrutivo de avaliação. Usado para avaliar a condição da madeira, este método conta com a habilidade de um inspetor para distinguir sons produzidos por batidas de martelo, que indicam a presença de deterioração. Além de subjetivo, este método é limitado à frequência percebida pelo ouvido humano.

Em resposta a essa limitação, pesquisas utilizaram sensores elétricos contendo cristais piezoelétricos. Eles detectam frequências de vibração sonora maiores que o ouvido humano e servem de base para a maioria das técnicas acústicas de testes não destrutivos.

O ultra-som é caracterizado por frequências acima de 20000 Hz. Entre as vantagens de sua utilização, vale destacar o baixo custo de aquisição do equipamento se comparado ao das máquinas de classificação automática (muito utilizadas nos Estados Unidos e na Europa), e o treinamento relativamente simples da mão de obra para utilização do equipamento, possibilitando que o método seja facilmente difundido em revendedores e indústrias de madeiras e derivados.

5.1 Relações entre o Ultra-som e as Propriedades Mecânicas da Madeira

A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ultra-som é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a massa específica do material.

As propriedades da madeira de armazenar e dissipar energia são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam as propriedades mecânicas deste material. Em termos microscópicos, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a elasticidade estática e resistência. As propriedades de dissipação de energia são controladas por características de fricção interna, onde o comportamento dos constituintes contribui significativamente.

5.2 Princípio de Medição de Ultra-som na Madeira

O processo é baseado no princípio da relação física entre a velocidade de propagação de uma onda ultra-sônica na madeira e as propriedades mecânicas da peça. O equipamento de emissão de ondas ultra-sônicas pode ser usado para classificar lotes de madeira em diferentes categorias de resistência e para determinar a resistência mecânica de uma peça individual.

Esse instrumento possui entrada e saída de dados que possibilitam o armazenamento dos mesmos por meio da utilização de um notebook. É equipado com três testes de sonda, dos quais, dois consistem em transdutores piezo-elétricos: um gera a onda (transmissor), o outro recebe a onda (receptor), ambos trabalham diretamente em contato com a madeira. A terceira sonda estimula outros dois sensores produzindo simultaneamente a medida de umidade e temperatura da madeira.

Por meio da utilização de controle com microprocessador, o equipamento permite testes com diferentes parâmetros como seleção da espécie, tipo de seção e dimensão da peça.

A propagação das ondas acústicas na madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular. O cálculo da velocidade de propagação da onda longitudinal depende do módulo de elasticidade da madeira, na direção de propagação, e da massa específica do material.

Segundo MATOS (1997), a massa específica da parede celular é razoavelmente constante, mas há ampla variação do módulo de elasticidade devido à variações na estrutura da parede celular, desse modo, pode-se esperar um largo intervalo de valores para a velocidade de propagação.

A aplicação e medição de ondas acústicas consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. Uma onda acústica é induzida no material e uma contagem de tempo em microssegundos é feita pelo instrumento. Os tempos registrados são utilizados no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, utilizando-se a seguinte equação:

$$E_d = \rho \times v^2 \quad (1)$$

Onde:

E_d - módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

ρ - densidade da madeira (kg/m^3)

v - velocidade da onda longitudinal (m/s)

O equipamento de ultra-som está apresentado na figura a seguir. Nota-se que o posicionamento dos transdutores de transmissão e recepção (dispositivos localizados próximos às extremidades de peça), sugere um tipo de transmissão de onda na direção longitudinal.

Fig. 2 : Equipamento de ultra-som. Fonte: catálogo SYLVATEST

5.3 Fatores que Influenciam a Propagação de Ondas na Madeira

A intensidade de uma onda ultra-sônica diminui quando a distância até a fonte aumenta, a diminuição da amplitude da onda no material é denominada atenuação ou decréscimo acústico. As causas dessa diminuição podem ser divididas em duas categorias: fatores geométricos e mecanismos de absorção e difusão.

Os mecanismos de perda acústica nos sólidos são consideravelmente mais numerosos e complexos que nos líquidos e gases. Na madeira, os fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas são: propriedades físicas do substrato, características geométricas da espécie, condições do meio e o procedimento utilizado para tomada das medidas, BUCUR & BÖNHKE (1994).

A atenuação também é provocada pela não homogeneidade estrutural da madeira. É um parâmetro sensível às condições higroscópicas e implica na estimativa da porosidade do material. É possível obter relações entre a velocidade de propagação e atenuação das ondas e a elasticidade e a resistência da madeira. Segundo BUCUR & BÖNHKE (1994), a base da avaliação ultra-sônica da madeira está associada a medidas de velocidade e coeficientes de atenuação.

5.3.1 Freqüência do Equipamento

Em geral, as perdas aumentam com a freqüência e segundo BUCUR (1983), a diminuição da velocidade com o aumento da freqüência se deve provavelmente ao fato de que o comprimento de onda se torna próximo ao dos elementos anatômicos da madeira. Em testes com este material, freqüências maiores que 1 MHz devem ser evitados porque a atenuação se torna muito elevada.

5.3.2 Umidade da Madeira

Como a madeira é um material higroscópico, suas propriedades físicas são afetadas pela umidade e segundo BUCUR (1992), do ponto de vista elástico, a madeira pode ser considerada um sólido ortotrópico. Quando saturada com água torna-se um material poroso anisotrópico de duas fases, uma sólida, o esqueleto da estrutura, correspondente aos elementos anatômicos e uma fluida, representada pelo volume de água nos poros.

Existe uma forte relação entre velocidade de propagação de ondas e umidade. A umidade afeta a velocidade de propagação de dois modos: no efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira. A

água livre aumenta a atenuação resultando numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial, KABIR (1997).

Segundo BUCUR (1995), em um baixo valor de umidade (menor que 18%), quando a água está presente nas paredes celulares, o pulso ultra-sônico é espalhado pela células da madeira. Neste caso, o mecanismo de atenuação relacionado com as paredes celulósicas do material é provavelmente o fator mais importante.

Em valores maiores de umidade mas ainda abaixo do ponto de saturação, o espalhamento nos limites da células pode ser considerado o mais importante mecanismo de perdas. Após o ponto de saturação das fibras, quando a água está presente nas cavidades celulares, a porosidade do material intervém como fator predominante na difusão ultra-sônica.

Conforme a figura a seguir, a velocidade de propagação diminui drasticamente com o aumento da umidade até o ponto de saturação das fibras, a partir deste ponto, a variação da velocidade torna-se pequena. A atenuação é praticamente constante em baixos valores de umidade, mas aumenta a partir de um ponto crítico no qual as paredes da células começam a reter água livre, BUCUR (1995).

Fig. 3 : Gráfico - Velocidade e atenuação versus umidade. Fonte: BUCUR (1995)

5.3.3 Direção de Propagação da Onda

Os coeficientes de atenuação das ondas estão relacionados com a geometria do campo de radiação e com a dispersão e absorção de energia ultra-sônica pelo sólido. Segundo BUCUR & FEENEY (1992), a menor e a maior atenuações são observadas respectivamente nas direções longitudinal e tangencial.

A velocidade de propagação das ondas é maior na direção longitudinal devido à orientação das células nesse eixo, propiciando um caminho contínuo para as ondas. As menores velocidades ocorrem na direção tangencial e segundo MATOS (1997), quando as ondas viajam através da direção transversal, cruzam a lignina, mais amorfa e inelástica, e assim estão sujeitas a grandes atenuações.

Quando uma onda longitudinal contínua se propaga ao longo da espécie, a onda se torna dispersiva e vários modos de propagação podem ocorrer, assim o pulso inicial pode perder sua identidade. As tomadas de medida devem ser feitas em uma distância suficiente para evitar a região do campo próximo ao transdutor, BUCUR (1983).

5.3.4 Densidade da Madeira

De modo geral, para um valor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade propicia uma maior velocidade de propagação em qualquer das três direções da madeira.

Segundo ROMERO (1996), a confiabilidade da estimativa do módulo de elasticidade, pela técnica de ultra-som, aumenta com o emprego de amostras com maiores densidades e menores teores de umidade. Isso se explica, em ambos os casos, pelo aumento na rigidez do material, o que propicia a propagação das ondas elásticas.

5.3.5 Temperatura da Madeira

A velocidade ultra-sônica geralmente aumenta linearmente com a diminuição da temperatura. Segundo BUCUR (1995), a discussão sobre a influência da temperatura na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas é convenientemente aproximada usando-se três classes de temperatura: baixas, intermediárias e altas (em torno de 0 °C, 180 °C e 1000 °C respectivamente).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A madeira tem servido a humanidade desde sua origem, devido a sua facilidade de transformação e por ser uma matéria prima renovável, cujo aproveitamento não danifica o meio ambiente. Os avanços tecnológicos tem permitido melhorar as propriedades de seus derivados, criar novos produtos e ampliar sua esfera de aplicação, possibilitando que a madeira seja um material ainda mais versátil e empregado no futuro.

O uso de propagação de ondas acústicas como técnica de avaliação não destrutiva, se mostra um método viável para a caracterização da madeira. Pesquisas realizadas com técnicas de ultra-som tem produzido resultados que evidenciam a eficácia deste método para determinar as propriedades mecânicas da madeira. A validade desta técnica é testada por meio da comparação entre seu resultados e os obtidos em ensaios destrutivos, os quais fornecem altos índices de correlação.

Esta técnica apresenta como vantagens em relação aos métodos convencionais de caracterização, maior rapidez e versatilidade a um custo menor, podendo assim, ser empregado em indústrias e distribuidores de madeira e derivados e também na avaliação in loco de estruturas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro.
- BUCUR, V. (1995). **Acoustics of wood**. New York, CRC Press Inc.
- BUCUR, V. (1983). An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. *Ultrasonics*, v. 21, n. 3, p.116-126.
- BUCUR, V. (1992). An experimental study of ultrasonic waves propagation in dry and water saturated solid wood. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4. São Carlos. *Anais*, v. 2, p.127-138.
- BUCUR, V. & FEENEY, F. (1992). Attenuation of ultrasound in solid wood. *Ultrasonics*, v. 30, n.2, p.76-81.
- BUCUR, V. & BÖHNKE, I. (1994). Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. *Ultrasonics*, v. 32, n. 5, p.385-390.

- GONÇALVES, R. et al. (1998). Montagem de equipamento para ensaios não destrutivos em madeira utilizando ultra-som. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 6. Florianópolis, 1998. *Anais*, v.4 p.343-354.
- KABIR, M. F. et al. (1997). Effect of moisture content and grain angle on the ultrasonic properties of rubber wood. *Holzforschung*, v. 51, n.3, p.263-267.
- KEINERT, J.R. & MATOS, J. L. M. (1998). Uso de emissão de ondas acústicas para classificação de lâminas e produção de painéis estruturais de lâminas paralelas. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., Florianópolis, 1998. *Anais*, v.4 p.331-341.
- KRAUTKRÄMER, J. & KRAUTKRÄMER, H. (1990). *Ultrasonic testing of materials*. 4ed. New York, Springer-Verlag.
- MATOS, J. L. M. (1997). Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L. Curitiba, 117p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Paraná.
- MC DONALD, K.A. et al. (1990). *Nondestructive testing of wood products and structures: state of the art and research needs*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. p. 137-147.
- ROMERO, I. J. B. (1996). Evaluación preliminar de la anisotropía y determinación del módulo de elasticidad de la madera de *pinus radiata* D. Don. por ultrasonido. Concepción, 60p. Dissertação – Universidad del Bio Bio.
- SALES, A. (1996). Proposição de classes de resistência para madeira. São Paulo. 223p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, USP.

Centro de Divulgação Científica e Cultural

Ultra-som em madeiras

Entre os materiais utilizados em estruturas para a construção civil, a madeira é o que apresenta maior variabilidade em suas características de resistência.

A qualidade resultante da madeira pode ser muito diferente entre diversas árvores de uma mesma espécie. Os fatores que determinam essa variação estão relacionados com o crescimento das árvores, a classificação botânica e as condições ambientais e climáticas.

A madeira possui estrutura microscópica complexa, tendo diferenças significativas na sua composição celular.

Para o uso na construção civil, os engenheiros utilizam uma divisão das espécies em dicotiledôneas (madeiras de lei) e coníferas (pinho-do-paraná e pinnus). Esta divisão é resultante da diversidade de elementos celulares e das diferenças nas quantidades de celulose e de outros constituintes.

Também existe uma grande variedade de defeitos naturais que colaboram no sentido de tornar a madeira menos homogênea que outros materiais estruturais como o aço e o concreto. Entre estes defeitos, merecem destaque: a presença, quantidade e dimensão de nós, resultantes da formação dos galhos durante o crescimento da árvore; a existência de bolsas e canais contendo resinas; a presença de rachaduras e fendas.

Vale destacar que as árvores, assim como qualquer ser vivo, nascem, crescem e morrem. Durante o seu processo de envelhecimento, muitas vezes ocorre o apodrecimento do material localizado no centro do tronco, conhecido como medula. Em alguns casos, a medula desaparece dando lugar a um espaço vazio que pode ser visto no tronco serrado de árvores velhas.

Portanto, muitos destes defeitos encontram-se no interior da madeira, sendo imperceptíveis numa inspeção visual e possibilitando a utilização de peças de ótima aparência externa mas que, na verdade, são defeituosas.

Estes defeitos podem ocasionar problemas nas estruturas de madeira provocando prejuízos materiais para o dono da edificação e até acidentes.

Um dos modos de prevenção destes defeitos internos da madeira está sendo estudado por pesquisadores da Escola de Engenharia de São Carlos, USP, e do Departamento de Engenharia Civil, UFSCar.

Para prever a existência de defeitos internos na madeira, utiliza-se equipamentos que geram ondas de ultra-som.

O som é uma vibração mecânica que é transmitida através da matéria. Esta vibração é percebida pelo homem quando sua frequência está entre os limites de 16 e 20000 Hz. Frequências acima desse último valor caracterizam o ultra-som. As ondas ultra-sônicas são geradas por transdutores que convertem energia elétrica em energia mecânica. As aplicações do ultra-som têm como propósito transmitir a energia através do material para obter informações sobre o mesmo.

O princípio de funcionamento do aparelho de ultra-som está baseado na propagação de ondas nos materiais. Em uma das extremidades da peça de madeira coloca-se um dispositivo que envia um sinal até outro medidor localizado na extremidade oposta da peça. Medindo-se o tempo que este sinal leva para atravessar a madeira, pode-se calcular a velocidade de propagação da onda.

O procedimento é análogo ao utilizado nos filmes de faroeste quando o bandido coloca o ouvido nos trilhos para calcular a distância do trem que será assaltado.

Comparando-se os resultados de ensaios de peças sem defeitos internos e de peças defeituosas, que apresentam diferentes velocidades, é possível identificar quais peças possuem defeitos internos não visíveis.

Este ensaio que é não destrutivo possibilita o conhecimento do interior da peça de madeira sem a necessidade de destruí-la para verificar o seu estado interno.

Esta técnica pode ser utilizada no tronco de árvores vivas de modo a verificar se o seu interior está defeituoso. Muitas vezes, árvores consideradas saudáveis podem apresentar vazios internos que enfraquecem o seu tronco, tornando-as suscetíveis de quedas por ocasião de ventanias ou de chuvas intensas.

O método de ultra-som também é eficiente para medir a qualidade das árvores vivas.

O uso da técnica de emissão acústica em árvores em pé fornece excelentes resultados para detecção de deterioração da madeira, da presença de defeitos e do ataque de insetos e fungos.

Em uma árvore saudável, a velocidade ultra-sônica no eixo radial (que vai do centro do tronco até a casca) é praticamente constante. Porém a velocidade de propagação da onda acústica reduz drasticamente ao encontrar um defeito. Isso significa que praticamente todos os defeitos ou deteriorações onde a madeira é destruída podem ser detectados. A precisão do diagnóstico aumenta com o tamanho do defeito.

A aplicação desta técnica em árvores em pé, permite a seleção na floresta da melhor madeira para os fins a que se destinam.

O método ultra-sônico também é bastante útil para árvores urbanas. Testes aplicados na base da árvore fornecem informações sobre a presença de deterioração interna ou cavidades. Aplicado na superfície das raízes, o ultra-som possibilita uma análise em termos de estabilidade e saúde da árvore.

Outra aplicação deste método ocorre na avaliação de estruturas de madeira em uso, ou seja, obras que já foram executadas e estão sendo utilizadas, permitindo um diagnóstico sem a necessidade de interdição das atividades que são desenvolvidas na edificação. Isto possibilita a manutenção ou reabilitação das mesmas, por meio de um mapeamento das áreas deterioradas, o que permite uma avaliação da integridade estrutural das peças sem a necessidade de remoção de parte da estrutura.

A técnica de ultra-som apresenta como vantagens adicionais o baixo custo de aquisição do equipamento e o treinamento relativamente simples da mão de obra para utilização do mesmo, possibilitando que o método seja facilmente difundido em revendedores e indústrias de madeiras e derivados.

Apesar do uso desta técnica ainda estar restrito à pesquisa de laboratório, acredita-se que a médio prazo ela será amplamente utilizada na construção civil, pois permitirá a verificação rápida de lotes de madeiras de modo a facilitar e melhorar o controle de qualidade nas obras.

*Fabiana Goia R. de Oliveira, pós-graduanda em
Ciência e Engenharia de Materiais, USP/SCarlos
fabiana@sc.usp.br*

SUMÁRIO

Lista de tabelas.....	i
Lista de figuras.....	ii
Lista de símbolos.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo proposto.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Propagação de ondas sonoras.....	4
2.2 Técnicas de avaliação não destrutiva em madeiras.....	6
2.2.1 Máquinas de classificação mecânica.....	7
2.2.2 Vantagens e aplicações dos métodos não destrutivos.....	8
2.3 Utilização de ultra-som na madeira.....	9
2.3.1 Relações entre o ultra-som e as propriedades mecânicas da madeira.....	10
2.3.2 Princípio de medição de ultra-som na madeira.....	11
2.3.3 Preparação e geometria das amostras.....	13
2.3.4 Atenuação de ondas ultra-sônicas na madeira.....	14
2.3.5 Fatores que influenciam a propagação de ondas na madeira.....	16
2.4 Comentários finais.....	19

3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Critérios para definição das espécies.....	21
3.2 Procedimentos para secagem das peças de madeira.....	22
3.3 Metodologia experimental.....	23
3.3.1 Determinação da densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$).....	27
3.3.2 Determinação do teor de umidade (U).....	27
3.3.3 Determinação da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}).....	27
3.3.4 Determinação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}).....	28
3.3.5 Determinação do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (E_M) na flexão estática.....	28
3.3.6 Determinação do coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL}).....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1 Características do conjunto de dados.....	34
4.2 Metodologia estatística utilizada para os resultados e discussões.....	37
4.3 Procedimento estatístico aplicado aos corpos-de-prova pequenos.....	39
4.3.1 Relações entre E_{c0} e C_{LL}	39
4.3.2 Relações entre f_{c0} e C_{LL}	41
4.3.3 Comentários dos resultados para os corpos-de-prova pequenos.....	43
4.4 Procedimento estatístico aplicado para as peças com dimensão estrutural.....	44
4.4.1 Relações entre E_M e C_{LL}	44
4.4.2 Relações entre MOR e C_{LL}	46
4.4.3 Comentários dos resultados para as peças com dimensão estrutural.....	48
5 CONCLUSÕES.....	49
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

ANEXOS

Lista de tabelas

Tabela I:	Valores médios e coeficientes de variação para os corpos-de-prova pequenos.....	34
Tabela II:	Valores médios e coeficientes de variação para os corpos-de-prova com dimensão estrutural.....	35
Tabela III:	Quadro de análise de variância (E_{c0} em função de C_{LL}).....	40
Tabela IV:	Coeficientes de regressão (E_{c0} em função de C_{LL}).....	40
Tabela V:	Regressões entre o módulo de elasticidade na compressão paralela em função de C_{LL}	41
Tabela VI:	Quadro de análise de variância (f_{c0} em função de C_{LL}).....	42
Tabela VII:	Coeficientes de regressão (f_{c0} em função de C_{LL}).....	42
Tabela VIII:	Regressões entre a resistência na compressão paralela em função de C_{LL}	43
Tabela IX:	Quadro de análise de variância (E_M em função de C_{LL}).....	45
Tabela X:	Coeficientes de regressão (E_M em função de C_{LL}).....	45
Tabela XI:	Regressões entre o módulo de elasticidade na flexão em função de C_{LL}	46
Tabela XII:	Quadro de análise de variância (MOR em função de C_{LL}).....	47
Tabela XIII:	Coeficientes de regressão (MOR em função de C_{LL}).....	47
Tabela XIV:	Regressões entre o módulo de ruptura em função de C_{LL}	48

Lista de figuras

Figura 01:	Velocidade e atenuação em função do teor de umidade na madeira.....	18
Figura 02:	Esquema da seqüência das etapas da experimentação para corpos-de-prova pequenos.....	25
Figura 03:	Esquema da retirada dos corpos-de-prova pequenos.....	25
Figura 04:	Esquema da seqüência das etapas da experimentação para corpos-de-prova com dimensão estrutural.....	26
Figura 05:	Ensaio de flexão estática em caibros.....	28
Figura 06:	Ruptura do corpo-de-prova.....	28
Figura 07:	Ensaio de flexão estática em vigas.....	29
Figura 08:	Equipamento de ultra-som STEINKAMP BP-7.....	30
Figura 09:	Calibração do equipamento.....	30
Figura 10:	Aplicação de gel medicinal.....	31
Figura 11:	Corpos-de-prova para ensaio de ultra-som.....	31
Figura 12:	Posicionamento dos transdutores no centro do corpo-de-prova.....	32
Figura 13:	Equipamento de ultra-som SYLVATEST.....	32
Figura 14:	Ensaio de ultra-som em peça estrutural.....	33
Figura 15:	Posicionamento dos transdutores.....	33
Figura 16:	E_{c0} em função de C_{LL}	39
Figura 17:	f_{c0} em função de C_{LL}	41
Figura 18:	E_M em função de C_{LL}	44
Figura 19:	MOR em função de C_{LL}	46

Lista de símbolos

f_{c0} – resistência à compressão paralela às fibras

m_{atual} – massa da amostra de referência

m_i – massa inicial do corpo-de-prova

m_s – massa seca do corpo-de-prova

U – teor de umidade

U_{atual} – teor de umidade da amostra de referência

U_i – teor de umidade inicial da amostra de referência

V – velocidade da onda

V_{LL} – velocidade na direção longitudinal

E_{c0} – módulo de elasticidade na compressão paralela

C_{LL} – coeficiente da matriz de rigidez

$\rho_{ap, 12\%}$ - densidade a um teor de umidade de 12%

d – distância entre os transdutores

t – tempo de propagação

E_M – módulo de elasticidade na flexão estática

MOR – módulo de ruptura

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a aplicação de ondas ultra-sônicas na madeira visando a avaliação de suas propriedades mecânicas. Esta avaliação é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade. Utilizaram-se as seguintes espécies: eucalipto grandis, eucalipto citriodora, cupiúba e jatobá. O procedimento experimental foi dividido em duas etapas: a primeira referente a corpos-de-prova pequenos e a segunda com peças de dimensão estrutural. Foram realizados ensaios para a determinação das seguintes propriedades físicas e mecânicas: densidade aparente a um teor de umidade de 12% ($\rho_{ap,12\%}$), resistência e módulo de elasticidade longitudinal à compressão paralela às fibras (f_{c0} e E_{c0}), módulo de elasticidade na flexão estática (E_M) e módulo de ruptura (MOR). Também foram feitos ensaios com ultra-som para obtenção do coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL}), a fim de comparação com os resultados estáticos. Com os dados obtidos, realizou-se análise estatística com o intuito de verificar a existência de relações entre as variáveis em estudo. Os resultados obtidos e as análises realizadas permitem concluir que o método não destrutivo por meio de ultra-som, pode ser utilizado para caracterizar as propriedades mecânicas de dicotiledôneas nativas e de florestamento com confiabilidade.

ABSTRACT

This work presents a study of an application of ultrasonic techniques in order to characterize mechanical properties of wood. The ultrasonic wave application is based on the relationship between the speed of the sound, the modulus of elasticity and the density. The species of wood used were: eucalipto grandis, eucalipto citriodora, cupiúba and jatobá. The experimental program was divided in two steps: the first related to small samples, and the second one related to samples with structural dimensions. Rehearsals were accomplish for the determination of the following physical and mechanical properties: apparent density at 12% ($\rho_{ap,12\%}$), strength and modulus of elasticity in compression parallel to the grain (f_{c0} and E_{c0}), modulus of elasticity (E_M) and modulus of rupture (MOR). They were also made ultrasonic measurements for obtaining the elastic stiffness (C_{LL}), in order to comparison with the static results. The experimental results show that it is possible to use the ultrasonic technique satisfactorily to characterize wood mechanically, obtaining reliable relationships.

1. INTRODUÇÃO

A madeira tem servido à humanidade desde sua origem, devido a sua facilidade de transformação e por ser uma matéria-prima renovável, cujo aproveitamento não danifica o meio ambiente.

A exploração adequada dos recursos florestais torna-se obrigatória por dois motivos: a valorização ambiental dos recursos florestais, e a viabilização da produção, que só ocorre com a racionalização do uso integral de matéria-prima e meios de produção.

A madeira possui um potencial altamente propício ao meio ambiente para utilização como material de construção, por representar um recurso renovável, não fóssil, de baixa demanda energética em seu processo de produção, além de ter um importante papel como medida estratégica na diminuição da concentração de CO₂ na atmosfera, BARBOSA; INO (2000).

Os avanços tecnológicos têm permitido melhorar o aproveitamento das propriedades da madeira e de seus derivados, criando novos produtos e ampliando sua esfera de aplicação, o que possibilitará que a madeira seja um material ainda mais versátil e empregado no futuro.

Dentre esses avanços, pode-se destacar a técnica de ultra-som para a caracterização da madeira, uma importante ferramenta com potencial para melhorar a qualidade e a competitividade deste material. Mas, para isso, é necessária a compreensão do fenômeno de propagação da onda ultra-sônica no material, através do estabelecimento de relações entre as diversas variáveis envolvidas.

O uso de propagação de ondas ultra-sônicas como técnica de avaliação não destrutiva, se mostra um método viável para a caracterização da madeira. BARTHOLOMEU; GONÇALVES (2000) realizaram pesquisas com técnicas de ultra-som e obtiveram resultados que evidenciam a eficácia deste método para determinar as propriedades mecânicas da madeira. A validade desta técnica é testada por meio da comparação com resultados obtidos em ensaios destrutivos, os quais fornecem parâmetros de correlação significativos.

É neste contexto que, compreendendo-se as relações entre os fatores que afetam as condições e os parâmetros físicos da técnica de ultra-som, pode-se melhorar seu potencial de aplicação.

Deste modo, a presente pesquisa poderá contribuir para ampliar os conhecimentos sobre a técnica de propagação de ondas ultra-sônicas nas madeiras nativas e cultivadas no Brasil, favorecendo a utilização de ensaios não destrutivos para a caracterização de propriedades mecânicas deste material.

1.1 Objetivo proposto

Dentro do contexto apresentado, o presente trabalho possui o seguinte objetivo:

- ⇒ Analisar a confiabilidade do método não destrutivo utilizando ultra-som na avaliação de peças de madeira, por meio da comparação dos resultados obtidos com os valores determinados em ensaios destrutivos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Esta revisão tem como finalidade o levantamento da bibliografia relacionada com emissão ultra-sônica na madeira, descrevendo-se alguns conhecimentos referentes à propagação de ondas na madeira e também considerações a respeito da utilização de ultra-som como ferramenta de avaliação deste material.

2.1 Propagação de ondas sonoras

Segundo NEPOMUCENO (1968), as ondas mecânicas se originam no deslocamento de um meio elástico em relação à sua posição normal, ocasionando a oscilação deste em torno de uma posição de equilíbrio, sendo necessário um meio material para transmitir estas ondas.

Quando o som viaja de um lugar para outro na forma de ondas, o que é realmente transmitido é uma perturbação do arranjo de equilíbrio dos átomos no material. É importante salientar que o material não se movimenta, apenas a perturbação é propagada.

Segundo KRAUTKRÄMER (1990), as ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais que podem se propagar em sólidos, líquidos e gases. As partículas

materiais que transmitem a onda oscilam paralelamente à direção de propagação da própria onda.

As ondas sonoras possuem frequências que situam-se em um intervalo capaz de estimular a sensação de audição no ouvido humano. Este intervalo está entre 20 e 20000 Hz e é denominado intervalo audível. Uma onda mecânica longitudinal cuja frequência está abaixo do intervalo audível é denominada onda infra-sônica, e se a frequência estiver acima desse intervalo tem-se uma onda ultra-sônica, VARY (1987).

As altas frequências associadas aos ultra-sons podem ser produzidas por vibrações elásticas de um cristal de quartzo induzidas por ressonância com um campo elétrico alternado (efeito piezoelétrico). É possível produzir frequências ultra-sônicas muito altas, de até 600 MHz por meio deste processo. O comprimento de onda correspondente a esta frequência é de aproximadamente 5×10^{-5} cm, considerando a propagação no ar, sendo semelhante ao comprimento de onda de luz visível, KRAUTKRÄMER (1990).

Se não encontrarem obstáculos, as ondas sonoras se propagarão em todas as direções a partir da fonte. Entretanto, é mais simples tratar da propagação em apenas uma direção.

Segundo NEPOMUCENO (1968), os fundamentos do estudo sobre propagação de ondas foram feitos por Newton, Laplace e Euler, que estabeleceram as expressões matemáticas que explicam o processo. Diferentemente das ondas elétricas ou

luminosas, a onda sonora exige um meio material para se propagar, o que foi verificado por Boyle, após Kircher ter demonstrado que o som não se propaga no vácuo, em 1605.

Quando as vibrações ocorrem no mesmo sentido da propagação da onda, têm-se a polarização longitudinal. Se as moléculas se movimentam perpendicularmente à propagação da onda, ocorre a polarização transversal.

Segundo BUCUR (1995), nas proximidades da fonte, as ondas são esféricas, cilíndricas ou planas, dependendo da relação entre as dimensões da fonte e a frequência radiada. A velocidade da onda sonora depende da densidade e constantes elásticas do material, sendo em geral, constante para qualquer frequência e comprimento de onda.

2.2 Técnicas de avaliação não destrutiva em madeiras

O método de caracterização destrutiva de corpos-de-prova de madeira pode apresentar certa variabilidade em seus resultados devido a fatores como amostragem inadequada ou problemas na confecção do corpo-de-prova. Além disso, ao se ensaiar uma peça, esta pode ser classificada como aceitável, apesar do lote do qual foi obtida ser de má qualidade, ou ao contrário, um corpo-de-prova pode fornecer um resultado negativo levando ao descarte de um lote bom.

É possível uma caracterização eficaz da madeira por meio de métodos não destrutivos, nos quais não se faz necessária a extração de corpos-de-prova, uma vez que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura. A avaliação não destrutiva é

definida como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar suas capacidades de uso final, ROSS et al. (1998).

Segundo MCDONALD et al. (1990), em materiais homogêneos e isotrópicos como aço, plásticos e cerâmicas, a avaliação não destrutiva detecta falhas surgidas no processo de fabricação. Na madeira, essas irregularidades ocorrem naturalmente e a influência dessas sobre as propriedades mecânicas pode ser avaliada através de métodos não destrutivos.

De acordo com GONÇALVES et al. (1998), muitas técnicas podem ser enquadradas como avaliação não destrutiva, desde a avaliação visual até os testes químicos e o uso de técnicas de vibração, propagação de ondas, emissões acústicas, raio x, etc.

Na avaliação visual, a qualidade da madeira é analisada apenas pela dimensão e distribuição de anomalias que podem ser vistas na superfície da peça, tendo como desvantagens o fato de considerar apenas os defeitos aparentes e admitir resistência igual para as peças com os mesmos defeitos. Segundo MELO (1984), as principais características visuais observadas são: nós, rachaduras, inclinação das fibras, deterioração e empenamento.

2.2.1 Máquinas de classificação mecânica

Os primeiros métodos aplicados para classificação de madeiras foram essencialmente mecânicos e, segundo MELO (1984), possibilitaram um avanço da

metodologia para a caracterização estrutural de peças de madeira, substituindo os ensaios de corpos-de-prova isentos de defeitos pelo ensaio não destrutivo da peça.

A significativa correlação existente entre a resistência à ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade na flexão (E_M), possibilitou a avaliação da resistência máxima de peças de madeira através do desenvolvimento de máquinas de classificação mecânica, BLASS; GARD (1994).

Do ponto de vista industrial, a utilização dessas máquinas de classificação mecânica tem limitações, uma vez que as mesmas trabalham com seções transversais restritas, não podendo ser utilizadas para controle de qualidade de material bruto da floresta ou para avaliações no local de estruturas de madeira. Além disso, esta tecnologia é cara e complexa, o que dificulta sua utilização por indústrias de madeira de pequeno porte.

2.2.2 Vantagens e aplicações dos métodos não destrutivos

Segundo OLIVEIRA; SALES (2000), os métodos não destrutivos apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais para caracterização da madeira: possibilidade de avaliar a integridade estrutural de uma peça sem a extração de corpos-de-prova; maior rapidez para analisar uma grande população e versatilidade para se adequar a uma rotina padronizada numa linha de produção.

Atualmente, a escolha de uma determinada madeira para um projeto estrutural pode ser feita em função dos valores de resistência do material, independente da espécie, utilizando-se o sistema de classes de resistência. Esse sistema permite a utilização da

madeira disponível na região da construção, o que propicia um melhor aproveitamento da diversidade de espécies nativas e de florestamento.

A utilização de classes de resistência pode facilitar a disseminação de madeiras de florestamento na construção civil. Segundo SALES (1996a), a madeira de eucalipto além de apresentar menor custo quando disponível em locais próximos aos de sua utilização, sua extração pode se dar em menor idade relativamente às dicotiledôneas da floresta amazônica, usualmente empregadas no sul e sudeste brasileiros.

Segundo KEINERT; MATOS (1998), a avaliação não destrutiva é uma importante ferramenta para a caracterização da madeira, podendo ser utilizada pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos através de uma maior uniformidade na matéria prima e em seus derivados.

Outra aplicação dos métodos não destrutivos é a avaliação de estruturas em uso, ou seja, avaliação *in loco*, possibilitando a manutenção ou reabilitação das mesmas, por meio de um mapeamento das áreas deterioradas, o que possibilita uma avaliação da integridade estrutural das peças sem a necessidade de remoção de parte da estrutura.

2.3 Utilização de ultra-som na madeira

O ultra-som é caracterizado por frequências acima de 20000 Hz. Entre as vantagens de sua utilização, vale destacar o baixo custo de aquisição do equipamento se comparado ao das máquinas de classificação automática (muito utilizadas nos Estados Unidos e na Europa), e o treinamento relativamente simples da mão de obra

para utilização do equipamento, possibilitando que o método seja facilmente difundido em revendedores e indústrias de madeiras e derivados, OLIVEIRA (2000).

2.3.1 Relações entre o ultra-som e as propriedades mecânicas da madeira

A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ultra-som é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade.

O comportamento mecânico da madeira é determinado pela caracterização de nove constantes: três módulos de elasticidade de Young, três módulos de elasticidade transversais e três coeficientes de Poisson. O módulo de Young é o principal parâmetro elástico e apresenta grande número de trabalhos científicos desenvolvidos.

Os termos da matriz de rigidez $[C]$ podem ser determinados pelas medições com ultra-som e os termos da matriz de flexibilidade $[S]$ por ensaios estáticos. A madeira é considerada um material ortotrópico e possui três eixos de simetria elástica (longitudinal, radial e transversal). Segundo BUCUR (1995), a análise dos sólidos ortotrópicos é mais complexa porque as constantes elásticas são influenciadas mutuamente pelos três planos de simetria. A matriz de rigidez para estes materiais contém nove constantes independentes: seis termos diagonais (C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} e C_{66}) e três termos não diagonais (C_{12} , C_{13} e C_{23}).

Os três módulos de elasticidade de Young são proporcionais à rigidez corrigidas dos coeficientes de Poisson. Assim, para corpos-de-prova longos (considerados

infinitos), o fator de correção é 1, sendo que deste modo, o C_{LL} pode representar o módulo de elasticidade dinâmico (E_d).

Segundo MCDONALD et al. (1990), as propriedades da madeira de armazenar e dissipar energia são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam as propriedades mecânicas deste material.

Em termos microscópicos, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a elasticidade estática e resistência. As propriedades de dissipação de energia são controladas por características de fricção interna, onde o comportamento dos constituintes contribui significativamente, ROSS et al. (1998).

2.3.2 Princípio de medição de ultra-som na madeira

Os aparelhos de ultra-som baseiam-se, no geral, na relação entre a velocidade de propagação de uma onda ultra-sônica na madeira e as propriedades mecânicas da peça.

Os equipamentos podem ser usados para classificar lotes de madeira em diferentes categorias de resistência e para determinar a resistência mecânica de uma peça individual. Possuem entrada e saída de dados que possibilitam o armazenamento dos mesmos por meio da utilização de um notebook. São equipados com dois transdutores piezo-elétricos: um gera a onda (transmissor), o outro recebe a onda (receptor), ambos trabalham diretamente em contato com a madeira.

O transdutor incorpora um elemento piezo-elétrico que converte sinais elétricos em vibração mecânica e segundo BUCUR (1995), seu desempenho está relacionado com parâmetros estruturais como área de superfície de radiação, amortecimento mecânico, características dos materiais piezo-elétricos e a conexão dos componentes elétricos e acústicos do sistema. O transdutor deve apresentar boa sensibilidade e desempenho constante sob diferentes condições de uso.

A propagação das ondas acústicas na madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular. Segundo MATOS (1997), a densidade da parede celular é razoavelmente constante, mas há variação do módulo de elasticidade devido à variações na estrutura da parede celular, desse modo, pode-se esperar um intervalo de valores para a velocidade de propagação.

A aplicação e medição consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A onda ultra-sônica é introduzida no material por um dos transdutores e captada pelo outro transdutor, sendo a contagem de tempo, em microssegundos, realizada pelo próprio instrumento de ultra-som. Os tempos registrados são utilizados no cálculo do coeficiente da matriz de rigidez, utilizando-se a equação (1).

$$C_{LL} = \rho \times v^2 \times 10^{-6} \quad (1)$$

onde:

C_{LL} - coeficiente da matriz de rigidez (MPa);

ρ - densidade da madeira (kg/m^3);

v - velocidade da onda longitudinal (m/s).

A velocidade pode ser obtida pela expressão:

$$V = \frac{d}{t} \quad (2)$$

onde:

V - velocidade (m/s);

d - distância entre os transdutores (m);

t - tempo de propagação (s).

Para estabelecer uma melhor relação entre a velocidade de propagação da onda e o coeficiente da matriz de rigidez, de tal modo a obter uma previsão da resistência da madeira, é preciso uma calibração que considere fatores como: umidade e temperatura da madeira, quantidade e tamanho dos nós, densidade da madeira e inclinação da grã.

Segundo BARTHOLOMEU; GONÇALVES (2000), pesquisadores como Waubke, Sandoz e Steiger propuseram métodos de classificação da madeira para estruturas baseados na aplicação do ultra-som.

BARADIT et al. (1998) obteve uma boa correlação entre os módulos de elasticidade obtidos pelo uso de ultra-som e por ensaios destrutivos, confirmando a viabilidade deste método como técnica de avaliação não destrutiva.

2.3.3 Preparação e geometria das amostras

Segundo BUCUR (1995), as condições para uma preparação satisfatória das amostras dependem da magnitude da atenuação da onda ultra-sônica na madeira.

As formas geométricas típicas são: paralelepípedos retangulares, cubos, barras e discos. Amostras maiores apresentam mais exatidão nos resultados devido ao maior tempo de propagação do sinal ultra-sônico na madeira, permitindo uma maior interação da onda com os constituintes da madeira.

A influência da variabilidade natural das espécies na velocidade e atenuação pode, de acordo com BUCUR (1995), ser analisada pela escolha de uma frequência da fonte na qual o comprimento de onda no material fique aproximadamente entre a dimensão máxima dos elementos anatômicos e a dimensão mínima da amostra.

A falta de homogeneidade da madeira limita a precisão das medidas de velocidade de propagação. Se uma amostra apresentar fissuras internas, o pulso ultra-sônico será atenuado por dispersão nas interfaces, mas se a dimensão da descontinuidade for muito menor que o comprimento de onda, a alteração do pulso será pequena, permitindo bons resultados.

2.3.4 Atenuação das ondas ultra-sônicas na madeira

De acordo com BUCUR; FEENEY (1992), os materiais enfraquecem a propagação do som devido a dois fatores: dispersão e absorção, que podem ser combinados no termo atenuação.

A dispersão é resultante da não homogeneidade do material, que contém contornos onde a impedância acústica muda devido à diferença de densidade.

A absorção é a conversão direta da energia do som em calor e segundo KRAUTKRÄMER (1990), pode ser visualizada como um freio na oscilação das partículas, tornando claro porque uma oscilação rápida perde mais energia que uma lenta. A absorção aumenta com a frequência, mas em uma taxa menor que a dispersão.

De acordo com KRAUTKRÄMER (1990), a intensidade de uma onda ultra-sônica diminui à medida que se afasta da fonte, sendo a diminuição da amplitude da onda no material denominada atenuação ou decréscimo acústico,. As causas dessa diminuição podem ser divididas em duas categorias: fatores geométricos e mecanismos de absorção e dispersão.

Segundo BUCUR; FEENEY (1992), a atenuação das ondas no ar está relacionada a três fatores: viscosidade, condução térmica e mecanismos de absorção. A atenuação da energia ultra-sônica nos líquidos ocorre devido a viscosidade e a absorção molecular. Os mecanismos de perda acústica nos sólidos são consideravelmente mais numerosos e complexos que nos líquidos e gases.

A atenuação também é provocada pela não homogeneidade estrutural da madeira. Trata-se de um parâmetro sensível às condições higroscópicas e implica na estimativa da porosidade do material.

É possível obter relações entre a velocidade de propagação e atenuação das ondas e a elasticidade e a resistência da madeira. Segundo BUCUR; BÖNHKE (1994), a base

da avaliação ultra-sônica da madeira está associada a medições de velocidade e coeficientes de atenuação.

2.3.5 Fatores que influenciam a propagação de ondas na madeira

Na madeira, os fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas são: propriedades físicas do substrato, características geométricas da espécie (macro e microestruturas), condições do meio (temperatura, umidade) e o procedimento utilizado para tomada das medidas (frequência e sensibilidade dos transdutores, seu tamanho e sua posição e características dinâmicas do equipamento), BUCUR; BÖNHKE (1994).

⇒ Frequência do equipamento

Em geral, as perdas aumentam com a frequência e segundo BUCUR (1983), a diminuição da velocidade com o aumento da frequência se deve provavelmente ao fato de que o comprimento de onda se torna próximo ao dos elementos anatômicos da madeira. Em testes com este material, frequências maiores que 1 MHz devem ser evitados porque a atenuação se torna muito elevada.

⇒ Umidade da madeira

Como a madeira é um material higroscópico, suas propriedades físicas são afetadas pela umidade e segundo BUCUR (1992), do ponto de vista elástico, a madeira pode ser considerada um sólido ortotrópico. Quando saturada com água torna-se um material poroso anisotrópico de duas fases, uma sólida, o esqueleto da estrutura, correspondente aos elementos anatômicos e uma fluída, representada pelo volume de água nos poros.

Segundo KABIR et al. (1997), existe uma forte relação entre velocidade de propagação de ondas e umidade. A umidade afeta a velocidade de propagação de dois modos: no efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira. A água livre aumenta a atenuação resultando numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial.

De acordo com BUCUR (1995), em um baixo valor de umidade (menor que 18%), quando a água está presente nas paredes celulares, o pulso ultra-sônico é espalhado pelas células da madeira. Neste caso, o mecanismo de atenuação relacionado com as paredes celulósicas do material é provavelmente o fator mais importante.

Em teores de umidade mais elevados, mas ainda abaixo do ponto de saturação, o espalhamento nos limites da células pode ser considerado o mais importante mecanismo de perdas. Após o ponto de saturação das fibras, quando a água está presente nas cavidades celulares, a porosidade do material intervém como fator predominante na dispersão ultra-sônica.

A velocidade de propagação diminui drasticamente com o aumento da umidade até o ponto de saturação das fibras, sendo que a partir deste ponto, a variação da velocidade torna-se pequena, conforme apresentado na Figura 1. A atenuação é praticamente constante em baixos valores de umidade, mas aumenta a partir de um ponto crítico no qual as paredes das células começam a reter água livre, BUCUR (1995).

Figura 1 - Velocidade e atenuação em função do teor de umidade na madeira.
Fonte: BUCUR (1995).

⇒ Direção de propagação da onda

Os coeficientes de atenuação das ondas estão relacionados com a geometria do campo de radiação e com a dispersão e absorção de energia ultra-sônica pelo sólido. Segundo BUCUR; FEENEY (1992), a menor e a maior atenuações são observadas respectivamente nas direções longitudinal e tangencial.

A velocidade de propagação das ondas é maior na direção longitudinal devido à orientação das células nesse eixo, propiciando um caminho contínuo para as ondas. As menores velocidades ocorrem na direção tangencial e segundo MATOS (1997), quando as ondas se propagam através da direção transversal, cruzam camadas de lignina, mais amorfa e inelástica, e assim estão sujeitas a grandes atenuações.

⇒ Densidade da madeira

De modo geral, para uma mesma espécie de madeira e com teor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade propicia uma maior velocidade de propagação em qualquer das três direções de propagação.

Segundo ROMERO (1996), a confiabilidade da técnica de ultra-som, aumenta com o emprego de amostras com maiores densidades e menores teores de umidade. Isso se explica, em ambos os casos, pelo aumento na rigidez do material, o que propicia a propagação das ondas elásticas.

⇒ Temperatura da madeira

As temperaturas usuais, nas quais a madeira é utilizada em estruturas no Brasil, enquadram-se em uma mesma classe segundo critérios definidos por BUCUR (1995), de tal modo que a influência da temperatura não é significativa na variabilidade da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas. A velocidade ultra-sônica geralmente aumenta linearmente com a diminuição da temperatura.

2.4 Comentários finais

O uso de propagação de ondas ultra-sônicas como técnica de avaliação não destrutiva, tem se mostrado um método viável para a caracterização da madeira. Esta técnica apresenta como vantagens em relação aos métodos convencionais de caracterização, maior rapidez e versatilidade a um custo menor, podendo assim, ser empregada em indústrias e distribuidores de madeira e derivados e também na avaliação *in loco* de estruturas.

Deste modo, a presente pesquisa poderá contribuir para ampliar os conhecimentos sobre a técnica de propagação de ondas ultra-sônicas nas madeiras nativas e cultivadas no Brasil, favorecendo a utilização de ensaios não destrutivos para a avaliação de propriedades mecânicas deste material.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este item apresenta a descrição dos métodos, materiais e equipamentos presentes nesta pesquisa. São descritos os critérios utilizados para a definição das espécies estudadas, o detalhamento dos procedimentos aplicados na experimentação e os adotados na secagem e confecção dos corpos-de-prova.

3.1 Critérios para a definição das espécies

Durante o desenvolvimento inicial, foram realizados estudos para a escolha das espécies utilizadas no procedimento experimental. De maneira a não ampliar demasiadamente o número de ensaios e manter uma boa representatividade dos dados em relação às possíveis inferências a serem realizadas, foram estudadas as folhosas das classes C-30 e C-40 com duas espécies por classe. Esta escolha levou em consideração os resultados de pesquisas que constatarem a maior frequência na utilização das classes C-30 e C-40 para a madeira serrada de dicotiledôneas, SALES (1996b) e ALMEIDA (1996).

As espécies e respectivas classes de resistência estão a seguir descritas, salientando-se que o enquadramento inicial nas classes de resistência foi efetuado pelos valores médios da resistência à compressão paralela às fibras, conforme anexo E da NBR 7190/97, e dados disponíveis no LaMEM/SET/EESC/USP.

- ⇒ Cupiúba (*Goupia glabra*)C-30
- ⇒ Eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*)C-30
- ⇒ Jatobá (*Hymenaea sp*).....C-40
- ⇒ Eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*)C-40

Visando facilitar o entendimento do presente texto, as espécies em estudo são denominadas pelo seu nome popular, sendo que os eucaliptos são tratados por grandis e citriodora.

3.2 Procedimentos para secagem das peças de madeira

A secagem das peças foi feita ao ar e o controle de umidade foi realizado por meio de verificações de diferenças de massas de pequenas amostras retiradas das vigas e pranchas, atribuídas como sendo correspondentes às perdas de água das amostras, com conseqüente alteração do teor de umidade da madeira.

Determinou-se a massa inicial do corpo-de-prova colocando-o na estufa, com temperatura máxima de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Durante a secagem, a massa foi medida a cada 6 horas, até que a variação entre duas medidas consecutivas fosse menor que 0,5% da última massa medida. Assim, esta última foi considerada a massa seca (m_s).

Conhecendo-se massas distintas das amostras, decorrentes do processo de secagem, utilizou-se a expressão (3), para obtenção do teor de umidade inicial da madeira:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

onde:

m_i – massa inicial da amostra (g);

m_s – massa seca da amostra (g);

U – teor de umidade (%).

Conhecidas a umidade e a massa úmida iniciais das amostras de referência, fizeram-se estimativas dos teores de umidade por meio de suas massas atuais. Esta relação foi possível com a utilização da expressão descrita a seguir:

$$U_{\text{atual}} (\%) = m_{\text{atual}} \times \frac{U_i + 100}{m} - 100 \quad (4)$$

onde:

U_{atual} - teor de umidade da amostra de referência (%);

m_{atual} - massa da amostra de referência (g);

U_i - teor de umidade inicial da amostra de referência (%);

m - massa úmida da amostra de referência (g).

A secagem foi cessada com a obtenção do teor de umidade de equilíbrio com o ar.

3.3 Metodologia experimental

Foram realizados ensaios com as espécies de dicotiledôneas definidas anteriormente, sendo avaliadas as seguintes propriedades físicas e mecânicas:

⇒ Densidade aparente a um teor de umidade de 12%: $\rho_{\text{ap},12\%}$ (Kg/m³);

⇒ Teor de umidade: U (%);

⇒ Resistência à compressão paralela às fibras: f_{c0} (MPa);

⇒ Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras: E_{c0} (MPa);

⇒ Módulo de elasticidade na flexão estática: E_M (MPa);

- ⇒ Módulo de ruptura (resistência convencional obtida no ensaio de flexão): MOR ou f_M (MPa);
- ⇒ Coeficiente da matriz de rigidez: C_{LL} (MPa).

A experimentação foi dividida em duas etapas: a primeira referente a corpos-de-prova pequenos, e a segunda, com peças de dimensão estrutural. As Figura 2 e 4 ilustram o esquema geral do processo abrangendo a seqüência das etapas da experimentação para corpos-de-prova pequenos e com dimensão estrutural, respectivamente.

Para os corpos-de-prova pequenos, a comparação dos resultados foi feita relacionando f_{c0} e E_{c0} com C_{LL} . Este procedimento foi adotado na presente pesquisa considerando o fato da NBR 7190/97 estabelecer a classificação de lotes de madeira a partir de uma amostragem de corpos-de-prova de pequena dimensão, além de utilizar a resistência à compressão paralela às fibras da madeira como principal parâmetro para o estabelecimento das classes de resistência.

Na segunda etapa, com peças com dimensão estrutural, a comparação foi realizada relacionando MOR e E_M com C_{LL} . Este procedimento foi adotado na presente pesquisa considerando que nas máquinas de classificação automática, o E_M e o MOR são os parâmetros predominantemente relacionados para a qualificação de lotes de madeira.

Figura 2 – Esquema da seqüência das etapas da experimentação para corpos-de-prova pequenos.

Para a realização dos ensaios relativos aos corpos-de-prova pequenos, foram adquiridas oito vigas de madeira com dimensões 6 cm x 12 cm x 100 cm, sendo duas de cada espécie. Foram produzidos 8 corpos-de-prova de cada viga.

Na Figura 3 está apresentado o esquema de retirada dos corpos-de-prova para a determinação do teor de umidade e para a realização dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras e ultra-som.

Figura 3 - Esquema da retirada dos corpos-de-prova pequenos.

onde:

D12 - corpo-de-prova para determinação da densidade no teor de umidade 12%,

RCP – corpo-de-prova para ensaio de compressão paralela às fibras;

AR – corpo-de-prova para ensaio de ultra-som.

Com o intuito de otimizar e permitir um controle eficiente da experimentação a ser realizada, foi desenvolvida uma codificação para identificar os corpos-de-prova. Esta codificação foi realizada simultaneamente à confecção dos corpos-de-prova evitando-se, com isto, possíveis trocas de espécies. Dessa forma, o corpo-de-prova identificado com o código CPX1 possui as seguintes informações:

CP, JA, GR, CI - corpo-de-prova da espécie cupiúba, jatobá, grandis e citriondora, respectivamente;

X - corpo-de-prova retirado da viga X;

1 - corpo-de-prova pertencente à série 1.

Figura 4 – Esquema da sequência das etapas da experimentação para corpos-de-prova com dimensão estrutural.

De forma análoga, fez-se a codificação dos corpos-de-prova com dimensão estrutural, partindo-se de pranchas com dimensões de 8 cm x 40 cm x 300 cm até obter-se caibros com 5 cm x 5 cm x 115 cm. Dessa forma, a peça identificada com os códigos a seguir descritos possui as seguintes informações:

G_1 – viga da espécie grandis com 6 cm x 16 cm x 260 cm;

G_{11} – $\frac{1}{2}$ viga da espécie grandis com 6 cm x 16 cm x 130 cm;

G_{111} – caibro da espécie grandis com 5 cm x 5 cm x 115 cm.

As espécies citriodora, cupiúba e jatobá são identificadas com as iniciais “E”, “C” e “J”, respectivamente.

3.3.1 Determinação da densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$)

A metodologia utilizada neste ensaio está de acordo com as recomendações da NBR 7190/97, anexo B6, na qual os corpos-de-prova devem apresentar forma prismática com seção transversal retangular de 2 cm x 3 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 5 cm. Além disso, na determinação da densidade na condição seca ao ar, o corpo-de-prova deve apresentar-se com teor de umidade de aproximadamente 12%.

3.3.2 Determinação do teor de umidade (U)

Para se conhecer o valor do teor de umidade, foram obtidas as massas inicial (m_i) e seca (m_s) do corpo-de-prova. Os procedimentos para a determinação do valor da massa seca são os mesmos dos utilizados na determinação da densidade, já descritos anteriormente. Conhecidos m_i e m_s , determinou-se o teor de umidade com o uso da equação (3) descrita no item 3.2.

3.3.3 Determinação da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})

A metodologia utilizada neste ensaio está de acordo com as recomendações da NBR 7190/97, anexo B8.

3.3.4 Determinação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0})

Seguindo as recomendações da NBR 7190/97, foi possível determinar os valores do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras das espécies em estudo por meio do ensaio de compressão paralela às fibras.

3.3.5 Determinação do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (E_M) na flexão estática

Os ensaios de flexão nos caibros foram feitos de acordo com a NBR 7190/97, anexo B14, conforme ilustrado nas Figuras 5 e 6. Metade das peças, ou seja, 8 caibros por espécie foram levados até a ruptura para determinação do módulo de ruptura (MOR).

Figura 5 - Ensaio de flexão estática em caibros.

Figura 6 - Ruptura do corpo-de-prova.

Com as vigas (6 x 16 x 260 cm) e as $\frac{1}{2}$ vigas (6 x 16 x 130 cm) foram realizados ensaios de flexão estática para obtenção do módulo de elasticidade à flexão estática (E_M). Para simplificar o ensaio, as peças foram colocadas na posição de menor inércia, conforme ilustrado na Figura 7. Nos ensaios, as peças foram submetidas a um carregamento aplicado no meio do vão e foram feitas 8 leituras de deformação. A partir dos dados de carga e deformação, foi calculado o módulo de elasticidade na flexão estática.

Figura 7 - Ensaio de flexão estática em vigas.

3.3.6 Determinação do coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL})

Foram utilizados dois equipamentos de ultra-som para obtenção do coeficiente da matriz de rigidez, pois é necessário adequar a frequência do equipamento com o tamanho do corpo-de-prova. Para melhorar a confiabilidade dos resultados é necessário que o comprimento de onda seja algumas vezes menor que o corpo-de-prova. Pesquisas em andamento indicam que a relação comprimento da peça/comprimento de onda (L/λ) deve ser superior a 5. Assim, para peças pequenas é indicado o uso de equipamento de ultra-som de frequência mais elevada.

Para os corpos-de-prova pequenos foi utilizado o equipamento comercialmente denominado STEINKAMP BP-7 (ilustrado na Figura 8), com frequência de 45 kHz. Para as peças estruturais, utilizou-se o equipamento SYLVATEST com transdutores de 22 kHz, ilustrado na Figura 13.

Figura 8 - Equipamento de ultra-som STEINKAMP BP-7.

Para a realização dos ensaios, o equipamento foi calibrado com uma peça de acrílico, a qual apresenta velocidade de propagação fornecida pelo fabricante.

Figura 9 - Calibração do equipamento.

Como ilustrado na Figura a seguir, aplicou-se gel medicinal nos corpos-de-prova a serem ensaiados para garantir o contato entre a madeira e os transdutores. Este gel permite uma melhor transmissão da onda ultra-sônica na interface, evitando que ocorram interferências no sinal.

Figura 10 - Aplicação de gel medicinal.

Os corpos-de-prova apresentavam forma prismática com seção transversal de 5 cm x 5 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 5 cm. As medições foram feitas na direção longitudinal.

Figura 11 - Corpos-de-prova para ensaio de ultra-som.

Para cada corpo-de-prova foram feitas três leituras do tempo de propagação da onda: no centro da peça e nas partes superior e inferior. O coeficiente C_{LL} foi calculado a partir da média das três medições e da densidade aparente a um teor de umidade em torno de 12%, conforme a equação (1).

Figura 12 - Posicionamento dos transdutores no centro do corpo-de-prova.

Na segunda etapa, com peças de dimensão estrutural, utilizou-se o equipamento de emissão de ondas ultra-sônicas ilustrado na Figura a seguir:

Figura 13 - Equipamento de ultra-som SYLVATEST.

Os corpos-de-prova utilizados apresentavam dimensões iniciais de 6 cm x 16 cm x 260 cm. Em seguida, o comprimento inicial das peças foi reduzido para 130 cm. Para estes dois comprimentos foram realizados ensaios para determinação do E_M e do C_{LL} conforme esquema apresentado na Figura 4.

Finalizando o procedimento experimental para peças estruturais, desdobraram-se as peças de comprimento de 130 cm (1/2 vigas) em caibros com seção de 5 cm x 5 cm. Em seguida, realizaram-se os ensaios para determinação do E_M , MOR e C_{LL} , Figura 4.

Figura 14 - Ensaio de ultra-som em peça estrutural.

Analogamente aos ensaios com corpos-de-prova pequenos, aplicou-se gel medicinal nas extremidades das peças de madeira e a seguir, foram feitas três leituras do tempo de propagação da onda: no centro da peça e nas partes superior e inferior, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Posicionamento dos transdutores.

Os ensaios não destrutivos precederam os estáticos visando minorar possíveis variabilidades ocasionadas pela deformação introduzida no ensaio de flexão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item está apresentada a análise estatística aplicada aos dados obtidos na experimentação, de modo a possibilitar algumas constatações fundamentais, relacionadas aos valores das propriedades obtidos nos ensaios com as espécies de dicotiledôneas. Utilizou-se o software estatístico MINITAB.

4.1 Características do conjunto de dados

As características do conjunto de dados para cada espécie estudada estão apresentadas em tabelas, sendo que na Tabela I têm-se a média e o coeficiente de variação das propriedades determinadas com corpos-de-prova pequenos e na Tabela II, os valores obtidos para os corpos com dimensão estrutural.

Tabela I – Valores médios e coeficientes de variação para corpos-de-prova pequenos.

		$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (MPa)
Grandis (n=16)	Média	767	61,9	19999	5436	22717
	CV	2,3	3,3	13,3	4,1	7,4
Citriodora (n=16)	Média	1044	66,1	23058	4870	24864
	CV	3,3	4,3	15,8	6,3	10,3
Cupiúba (n=16)	Média	883	51,2	15439	4239	15975
	CV	8,1	7,7	15,7	7,1	14,4
Jatobá (n=16)	Média	830	72,4	21472	5365	24050
	CV	3,4	4,0	20,9	4,9	11,0

A Tabela I possibilita tecer as seguintes constatações relativas ao valor médio e ao coeficiente de variação obtidos para cada propriedade:

- ⇒ $\rho_{ap,12\%}$: variou de 767 a 1044 Kg/m³ e o coeficiente de variação de 2,3 a 8,1;
- ⇒ f_{c0} : variou de 51,2 a 72,4 MPa e o coeficiente de variação de 3,3 a 7,7;
- ⇒ E_{c0} : variou de 15439 a 23058 MPa e o coeficiente de variação de 13,3 a 20,9;
- ⇒ V_{LL} : variou de 4239 a 5436 m/s e o coeficiente de variação de 4,1 a 7,1;
- ⇒ C_{LL} : variou de 15975 a 24864 MPa e o coeficiente de variação de 7,4 a 14,4.

Tabela II – Valores médios e coeficientes de variação para corpos-de-prova com dimensão estrutural.

		$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³) (n=16)	E_M (MPa) (n=28)	MOR (MPa) (n=8)	V_{LL} (m/s) (n=28)	C_{LL} (MPa) (n=28)
Grandis	Média	860	13823	100,9	4286	15833
	CV	2,5	7,7	6,0	4,5	9,0
Citriod.	Média	937	18119	140,5	4927	22812
	CV	2,5	13,8	15,8	5,4	10,8
Cupiúba	Média	827	14458	110,8	4514	16876
	CV	1,5	12,8	9,5	3,8	7,7
Jatobá	Média	1149	17507	119,9	4279	20579
	CV	1,4	7,6	7,9	3,8	7,5

A Tabela II possibilita tecer as seguintes constatações relativas ao valor médio e ao coeficiente de variação obtidos para cada propriedade:

- ⇒ $\rho_{ap,12\%}$: variou de 827 a 1149 Kg/m³ e o coeficiente de variação de 1,4 a 2,5;
- ⇒ E_M : variou de 13823 a 18119 MPa e o coeficiente de variação de 7,6 a 13,8;
- ⇒ MOR: variou de 100,9 a 140,5 MPa e o coeficiente de variação de 6,0 a 15,8;
- ⇒ V_{LL} : variou de 4279 a 4927 m/s e o coeficiente de variação de 3,8 a 5,4;
- ⇒ C_{LL} : variou de 15833 a 22812 MPa e o coeficiente de variação de 7,5 a 10,8.

Os valores médios obtidos para as propriedades estudadas estão compatíveis com os usualmente encontrados na experimentação com dicotiledôneas.

Segundo HERZIG apud GONÇALVES (1998), os coeficientes de variação ligados à rigidez são sempre maiores que os ligados à resistência. Desse modo, os coeficientes de variação obtidos para a resistência à compressão e para o módulo de elasticidade longitudinal no ensaio de compressão paralela às fibras estão próximos dos valores encontrados na literatura, sendo que as pesquisas realizadas por ROCCO LAHR (1990) também ratificam os valores obtidos.

Os coeficientes de variação obtidos para C_{LL} também ficaram próximos dos valores encontrados na literatura, BUCUR (1995). Além disso, na maioria dos casos, estes valores ficaram abaixo dos correspondentes nos ensaios estáticos. Isto denota a menor variabilidade inerente a esta determinação não destrutiva em relação aos ensaios estáticos.

Para os corpos-de-prova pequenos, os valores de C_{LL} foram 10% mais altos que os valores obtidos para E_{c0} . Os resultados nos ensaios dinâmicos (C_{LL}) para as peças com dimensão estrutural foram 19% superior aos ensaios estáticos (E_M). De acordo com BARTHOLOMEU; GONÇALVES (2000), o termo C_{LL} é 22% mais alto que os métodos estáticos quando não se aplica a correção com o coeficiente de Poisson.

A seguir, está apresentada a análise estatística que foi desenvolvida com o intuito de verificar a existência de relações entre as variáveis em estudo e os níveis de significância dos parâmetros obtidos.

Primeiramente, são analisadas as relações entre as propriedades (E_{c0} , f_{c0} e C_{LL}) obtidas em ensaios com pequenos corpos-de-prova, para cada espécie separadamente. Em seguida, são analisadas as relações entre as propriedades (E_M , MOR e C_{LL}), considerando os valores obtidos em ensaios com peças estruturais.

4.2 Metodologia estatística utilizada para os resultados e discussões

Para a análise estatística dos dados obtidos seguiu-se uma sequência que permitiu a obtenção dos diversos modelos para a representação dos dados em estudo. Esta sequência está apresentada a seguir.

Com os pares de valores do coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL}) e módulo de elasticidade na compressão paralela (E_{c0}), obtidos para cada um dos corpos-de-prova pequenos, foram realizadas regressões para cada espécie separadamente. Da mesma forma este procedimento foi repetido para os pares de valores de f_{c0} e C_{LL} .

A partir daí, efetuou-se as análises de regressão e de variância, de modo a permitir a avaliação dos níveis de significância dos parâmetros envolvidos, para cada espécie separadamente.

Os dados obtidos nessas análises permitiram avaliar o comportamento da variável independente em relação ao acréscimo na variável resposta. Para os casos nos quais verificou-se a existência de uma correlação linear, optou-se por desenvolver a análise de variância pertinente.

Com isto, pode-se construir os quadros de análise de variância os quais permitem verificar o nível de significância, a dependência linear neste nível e o comportamento dos principais parâmetros estimados nas análises desenvolvidas: F , t , R^2 , F_{dados} , $F_{0.5}$ e t_{dados} .

A partir dos coeficientes, foi possível afirmar o quanto da variação de cada uma das variáveis em estudo poderia ser explicado pela variável resposta (C_{LL}). De maneira a garantir a verossimilhança dos dados obtidos, foram analisados os resíduos dos modelos verificando-se se estes apresentavam distribuição aleatória em torno de zero.

Em alguns casos, optou-se por efetuar alguns tratamentos, sendo verificadas transformações não lineares entre as quais podem ser destacadas: x^2 , x^3 , $\sqrt{x}$, $\log(x)$ e $1/x$.

Finalizando a análise estatística, pode-se verificar a significância para todos os modelos de regressão obtidos, permitindo desse modo explicar a variabilidade dos dados.

Todo este procedimento desenvolvido para a análise estatística dos dados relativos aos corpos-de-prova pequenos foi também aplicado para os dados de E_M , MOR e C_{LL} referentes as peças com dimensão estrutural.

4.3 Procedimento estatístico aplicado aos corpos-de-prova pequenos

Para a análise estatística dos dados obtidos com os corpos-de-prova pequenos, seguiu-se a sequência descrita no item 4.2, a qual permitiu a obtenção dos diversos modelos para a representação dos dados, conforme apresentado a seguir.

4.3.1 Relações entre E_{c0} e C_{LL}

Foram obtidos os seguintes gráficos para estas relações:

Figura 16 – E_{c0} em função de C_{LL} .

Seguindo-se o procedimento estatístico já descrito, elaborou-se os quadros de análise de variância para as espécies em estudo apresentadas na Tabela III.

Tabela III - Quadro de análise de variância (E_{c0} em função de C_{LL}).

	Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	F_{05}
Grandis	Devido à regressão	193253	1	193253	0,02	4,54
	Residual	113330032	14	8095003		
	Total	113523288	15			
Citriodora	Devido à regressão	74182936	1	7482936	7,51	4,54
	Residual	138283760	14	9877411		
	Total	212466688	15			
Cupiúba	Devido à regressão	11052460	1	11052460	1,86	4,54
	Residual	83029648	14	5930689		
	Total	94082112	15			
Jatobá	Devido à regressão	36205264	1	36205264	1,78	4,54
	Residual	285271648	14	20376546		
	Total	321476928	15			

Seguindo-se o procedimento estatístico, elaborou-se os quadros com os coeficientes de regressão para as espécies em estudo apresentadas na Tabela IV.

Tabela IV - Coeficientes de regressão (E_{c0} em função de C_{LL}).

	Variável	Coefficiente	t_{dados}	t_{05}
Grandis	Constante	18519	1,93	1,753
	C_{LL}	0,0652	0,15	1,753
	n = 15 $r^2 = 0,2\%$			
Citriodora	Constante	2179	0,28	1,753
	C_{LL}	0,8397	2,74	1,753
	n = 15 $r^2 = 34,9\%$			
Cupiúba	Constante	9662	2,26	1,753
	C_{LL}	0,3616	1,37	1,753
	n = 15 $r^2 = 11,7\%$			
Jatobá	Constante	7784	0,75	1,753
	C_{LL}	0,5692	1,33	1,753
	n = 15 $r^2 = 11,3\%$			

De posse dessas análises, foi possível construir o seguinte quadro que sintetiza a significância dos modelos obtidos.

Tabela V - Regressões entre o módulo de elasticidade na compressão paralela em função de C_{LL} .

	Equação da regressão	R^2	Significância
Grandis	$E_{c0} = 0,0652 C_{LL} + 18519$	0,002	Não sig.
Citriodora	$E_{c0} = 0,8397 C_{LL} + 2179$	0,35	Sig.
Cupiúba	$E_{c0} = 0,3616 C_{LL} + 9662$	0,12	Não sig.
Jatobá	$E_{c0} = 0,5692 C_{LL} + 7784$	0,11	Não sig.

4.3.2 Relações entre f_{c0} e C_{LL}

Foram obtidos os seguintes gráficos para estas relações:

Figura 17 – f_{c0} em função de C_{LL} .

Seguindo-se o procedimento estatístico já descrito, elaborou-se os quadros de análise de variância para as espécies em estudo apresentadas na Tabela VI.

Tabela VI - Quadro de análise de variância (f_{c0} em função de C_{LL}).

	Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	F_{05}
Grandis	Devido à regressão	3570	1	3570	0,81	4,54
	Residual	61789	14	4414		
	Total	65360	15			
Citriodora	Devido à regressão	44047	1	44047	7,21	4,54
	Residual	85498	14	6107		
	Total	129545	15			
Cupiúba	Devido à regressão	18,86	1	18,86	1,13	4,54
	Residual	223,04	14	16,65		
	Total	251,90	15			
Jatobá	Devido à regressão	0,357	1	0,357	0,04	4,54
	Residual	113730	14	9,552		
	Total	134087	15			

Seguindo-se o procedimento estatístico, elaborou-se os quadros com os coeficientes de regressão para as espécies em estudo apresentadas na Tabela VII.

Tabela VII - Coeficientes de regressão (f_{c0} em função de C_{LL}).

	Variável	Coefficiente	t_{dados}	t_{05}
Grandis	Constante	55520	7,83	1,753
	C_{LL}	0,0002801	0,90	1,753
	n = 15 $r^2 = 5,5 \%$			
Citriodora	Constante	50029	8,31	1,753
	C_{LL}	0,0006471	2,69	1,753
	n = 15 $r^2 = 34 \%$			
Cupiúba	Constante	43,606	6,09	1,753
	C_{LL}	0,0004724	1,06	1,753
	n = 15 $r^2 = 7,5 \%$			
Jatobá	Constante	71,043	10,04	1,753
	C_{LL}	0,0000565	0,19	1,753
	n = 15 $r^2 = 0,3 \%$			

De posse dessas análises, foi possível construir o seguinte quadro que sintetiza a significância dos modelos obtidos.

Tabela VIII - Regressões entre a resistência na compressão paralela em função de C_{LL} .

	Equação da regressão	R^2	Significância
Grandis	$f_{c0} = 0,0003 C_{LL} + 55,52$	0,06	Não sig.
Citriodora	$f_{c0} = 0,0006 C_{LL} + 50,03$	0,34	Sig.
Cupiúba	$f_{c0} = 0,0005 C_{LL} + 43,61$	0,08	Não sig.
Jatobá	$f_{c0} = 0,00006 C_{LL} + 71,04$	0,003	Não sig.

4.3.3 Comentários dos resultados para os corpos-de-prova pequenos

Os resultados obtidos para os corpos-de-prova pequenos foram pouco significativos estatisticamente. A utilização de um comprimento de onda maior que o comprimento do corpo-de-prova pode ter contribuído de modo negativo. A relação L/λ ficou em torno de 0,5, ou seja, as medições foram afetadas pela influência da frequência, e como já mencionado anteriormente, a velocidade começa a se tornar constante para uma mesma seção a partir de L/λ maior que 5.

Outro fator que influenciou os resultados obtidos, foi o fato de que as medições nos ensaios dinâmicos (C_{LL}) e estáticos (f_{c0} e E_{c0}) foram feitas em corpos-de-prova distintos, aumentando assim, a variabilidade dos resultados.

4.4 Procedimento estatístico aplicado para as peças com dimensão estrutural

Para a análise estatística dos dados obtidos com as peças com dimensão estrutural, seguiu-se a sequência descrita no item 4.2, a qual permitiu a obtenção dos diversos modelos para a representação dos dados, conforme apresentado a seguir.

4.4.1 Relações entre E_M e C_{LL}

Foram obtidos os seguintes gráficos para estas relações:

Figura 18 – E_M em função de C_{LL} .

Seguindo-se o procedimento estatístico já descrito, elaborou-se os quadros de análise de variância para as espécies em estudo apresentadas na Tabela IX.

Tabela IX - Quadro de análise de variância (E_M em função de C_{LL}).

	Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	F_{05}
Grandis	Devido à regressão	4599926	1	4599926	4,36	4,21
	Residual	27444956	26	1055575		
	Total	32044882	27			
Citriodora	Devido à regressão	410220032	1	41022032	7,88	4,21
	Residual	135345648	26	5205602		
	Total	176367680	27			
Cupiúba	Devido à regressão	60513680	1	60513680	43,41	4,21
	Residual	36240096	26	1393850		
	Total	96753776	27			
Jatobá	Devido à regressão	24829858	1	24829858	36,84	4,21
	Residual	17524292	26	674011		
	Total	42354152	27			

Seguindo-se o procedimento estatístico, elaborou-se os quadros com os coeficientes de regressão para as espécies em estudo apresentadas na Tabela X.

Tabela X - Coeficientes de regressão (E_M em função de C_{LL}).

	Variável	Coefficiente	t_{dados}	t_{05}
Grandis	Constante	9337	4,33	1,703
	C_{LL}	0,2834	2,09	1,703
	$n = 27 \quad r^2 = 14,4 \%$			
Citriodora	Constante	6911	1,72	1,703
	C_{LL}	0,4913	2,81	1,703
	$n = 27 \quad r^2 = 23,3 \%$			
Cupiúba	Constante	-4736	-1,62	1,703
	C_{LL}	1,1374	6,59	1,703
	$n = 27 \quad r^2 = 62,5 \%$			
Jatobá	Constante	4787	2,28	1,703
	C_{LL}	0,6196	6,07	1,703
	$n = 27 \quad r^2 = 58,6 \%$			

De posse dessas análises, foi possível construir o seguinte quadro que sintetiza a significância dos modelos obtidos.

Tabela XI - Regressões entre o módulo de elasticidade na flexão em função de C_{LL} .

	Equação da regressão	R^2	Significância
Grandis	$E_M = 0,2834 C_{LL} + 9336$	0,14	Sig.
Citriodora	$E_M = 0,4913 C_{LL} + 6911$	0,23	Sig.
Cupiúba	$E_M = 1,1374 C_{LL} - 4736$	0,63	Alt. sig.
Jatobá	$E_M = 0,6196 C_{LL} + 4787$	0,59	Alt. sig.

4.4.2 Relações entre MOR e C_{LL}

Foram obtidos os seguintes gráficos para estas relações:

Figura 19 – MOR em função de C_{LL} .

Seguindo-se o procedimento estatístico já descrito, elaborou-se os quadros de análise de variância para as espécies em estudo apresentadas na Tabela XII.

Tabela XII - Quadro de análise de variância (MOR em função de C_{LL}).

	Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	F_{05}
Grandis	Devido à regressão	243,70	1	243,70	29,95	5,59
	Residual	48,81	6	8,14		
	Total	292,52	7			
Citriodora	Devido à regressão	2243,7	1	2243,7	7,85	5,59
	Residual	1714,7	6	285,8		
	Total	3958,4	7			
Cupiúba	Devido à regressão	321	1	321	3,41	5,59
	Residual	565,61	6	94,27		
	Total	886,61	7			
Jatobá	Devido à regressão	396,64	1	396,64	7,44	5,59
	Residual	319,74	6	53,29		
	Total	716,38	7			

Seguindo-se o procedimento, elaborou-se os quadros com os coeficientes de regressão para as espécies em estudo apresentadas na Tabela XIII.

Tabela XIII - Coeficientes de regressão (MOR em função de C_{LL}).

	Variável	Coefficiente	t_{dados}	t_{05}
Grandis	Constante	32,78	2,62	1,895
	C_{LL}	0,0040661	5,47	1,895
	n = 7 $r^2 = 83,3 \%$			
Citriodora	Constante	- 79,34	- 1,01	1,895
	C_{LL}	0,009383	2,80	1,895
	n = 7 $r^2 = 56,7 \%$			
Cupiúba	Constante	-49,97	-0,57	1,895
	C_{LL}	0,009308	1,85	1,895
	n = 7 $r^2 = 36,2 \%$			
Jatobá	Constante	26,38	0,77	1,895
	C_{LL}	0,004497	2,73	1,895
	n = 7 $r^2 = 55,4 \%$			

De posse dessas análises, foi possível construir o seguinte quadro que sintetiza a significância dos modelos obtidos.

Tabela XIV - Regressões entre o módulo de ruptura em função de C_{LL} .

	Equação da regressão	R^2	Significância
Grandis	$MOR = 0,0041 C_{LL} + 32,78$	0,83	Alt. Sig.
Citriodora	$MOR = 0,0094 C_{LL} - 79,34$	0,56	Sig.
Cupiúba	$MOR = 0,0093 C_{LL} - 49,97$	0,36	Não sig.
Jatobá	$MOR = 0,0045 C_{LL} + 26,38$	0,55	Sig.

4.4.3 Comentários dos resultados para as peças com dimensão estrutural

Os resultados obtidos para as peças com dimensão estrutural foram significativos estatisticamente. Nesses ensaios, a relação L/λ foi maior que 5, ou seja, as medições foram realizadas em uma região onde a velocidade de propagação não foi afetada. Nas peças estruturais, os defeitos naturais são embutidos, o que aumenta a variação da velocidade e, desse modo, o ultra-som indica melhor as diferenças de resistência e elasticidade das peças, levando a melhores modelos estatísticos comparados aos obtidos com corpos-de-prova pequenos.

Além disso, os ensaios estáticos e dinâmicos foram realizados nas mesmas peças, diminuindo assim a variabilidade dos resultados.

5. CONCLUSÕES

Com base nas análises apresentadas no Capítulo 4 desse trabalho, registram-se as seguintes conclusões:

- ⇒ Os coeficientes de variação obtidos para o coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL}), na maioria dos casos, foram menores do que os obtidos para o módulo de elasticidade em ensaios estáticos (E_{c0} e E_M). Isto denota a menor variabilidade inerente aos ensaios não destrutivos, tanto em corpos-de-prova pequenos como também em peças com dimensões estruturais.
- ⇒ As relações entre E_{c0} , f_{c0} e C_{LL} , utilizando os valores obtidos para os corpos-de-prova pequenos não apresentaram coeficientes significativos. Somente para o eucalipto citriodora obteve-se um modelo significativo estatisticamente, apesar dos baixos valores encontrados para r^2 . A utilização de um comprimento de onda maior que o comprimento do corpo-de-prova pode ter contribuído de modo negativo. A relação L/λ ficou em torno de 0,5, ou seja, as medições foram afetadas pela influência da frequência, e como já mencionado anteriormente, a velocidade começa a se tornar constante para uma mesma seção a partir de L/λ maior que 5. Outro fator que influenciou os resultados obtidos, foi o fato de que

as medições nos ensaios dinâmicos (C_{LL}) e estáticos (f_{c0} e E_{c0}) foram feitas em corpos-de-prova distintos, aumentando assim, a variabilidade dos resultados.

- ⇒ As relações entre E_M e C_{LL} , utilizando os valores obtidos para peças com dimensão estrutural, apresentaram coeficientes significativos para todas as espécies, sendo que para as dicotiledôneas nativas, foram obtidos melhores valores para r^2 .
- ⇒ As relações entre MOR e C_{LL} , utilizando os valores obtidos para peças com dimensão estrutural, apresentaram coeficientes significativos, com exceção da cupiúba. Salienta-se que para as dicotiledôneas de florestamento, foram obtidos melhores valores para r^2 .
- ⇒ Algumas das expressões obtidas para relacionar C_{LL} com as propriedades estimadas em ensaios estáticos, apresentaram coeficientes que apesar de significativos, estão abaixo dos valores encontrados na literatura. Um aspecto que pode ter contribuído para o aumento da variabilidade dos dados obtidos e, consequentemente para os baixos valores de r^2 registrados, pode estar relacionado ao processo de secagem, necessário para que as peças de madeira atingissem o teor de umidade de equilíbrio com o ar.

Portanto, os resultados obtidos e as análises realizadas permitem concluir que o método não destrutivo por meio de ultra-som, pode ser utilizado para avaliar as propriedades mecânicas de dicotiledôneas nativas e de florestamento com confiabilidade.

Em continuidade a essa linha de pesquisa entende-se como necessários os seguintes trabalhos:

- ⇒ Avaliação da influência do teor de umidade da madeira na velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas em peças de madeira;
- ⇒ Avaliação da influência da dimensão e geometria do corpo-de-prova no uso da técnica de ultra-som em peças de madeira.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro.

ALMEIDA, P. A. O. (1996). **Considerações sobre a resistência da madeira serrada brasileira**. Boletim Técnico da Escola Politécnica BT/PEF/9609. São Paulo, 8p.

BARADIT, E. et al. (1998). Aplicacion de ultrasonido en la evaluacion de madera de pinus radiata. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 1, p.27-33.

BARBOSA, J. C; INO, A. (2000). Cadeia produtiva de habitação em madeira de reflorestamento – análise do ciclo de vida (lca) e indicadores de sustentabilidade. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6. São Carlos. **Anais**. São Carlos. Cd rom, arquivo digital.

BARTHOLOMEU, A; GONÇALVES, R. (2000). O uso do ultra-som na determinação de constante elástica da madeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 19. São Paulo. **Anais**, Cd-rom, arquivo digital.

BLASS, H; GARD, W. (1994). Machine strength grading of timber. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Gold Coast Australia. **Anais**. v.2, p.598-603.

BUCUR, V. (1995). **Acoustics of wood**. New York, CRC Press Inc.

- BUCUR, V. (1983). An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. **Ultrasonics**, v. 21, n. 3, p.116-126.
- BUCUR, V. (1992). An experimental study of ultrasonic waves propagation in dry and water saturated solid wood. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4. São Carlos. **Anais**. São Carlos, v. 2, p.127-138.
- BUCUR, V; FEENEY, F. (1992). Attenuation of ultrasound in solid wood. **Ultrasonics**, v. 30, n.2, p.76-81.
- BUCUR, V; BÖHNKE, I. (1994). Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. **Ultrasonics**, v. 32, n. 5, p.385-390.
- GONÇALVES, R. et al. (1998). Montagem de equipamento para ensaios não destrutivos em madeira utilizando ultra-som. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 6. Florianópolis, 1998. **Anais**, Florianópolis. v.4 p.343-354.
- KABIR, M. F. et al. (1997). Effect of moisture content and grain angle on the ultrasonic properties of rubber wood. **Holzforschung**, v. 51, n.3, p.263-267.
- KEINERT, J. R; MATOS, J. L. M. (1998). Uso de emissão de ondas acústicas para classificação de lâminas e produção de painéis estruturais de lâminas paralelas. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., Florianópolis, 1998. **Anais**. Florianópolis, v.4 p.331-341.
- KRAUTKRÄMER, J; KRAUTKRÄMER, H. (1990). **Ultrasonic testing of materials**. 4ed. New York, Springer-Verlag.

- MATOS, J. L. M. (1997). **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** Curitiba, 117p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Paraná.
- MC DONALD, K. A. et al. (1990). **Nondestructive testing of wood products and structures: state of the art and research needs.** Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. p. 137-147.
- MELO, J. E. (1984). **Classificação mecânica de peças estruturais de madeira.** São Carlos, 84 p. Dissertação - EESC, USP.
- MINITAB. **Reference manual, pc version, release 8.0.** Rosemont, PA, Quickset, 1991.
- NEPOMUCENO, L. X. (1968). **Acústica técnica.** São Paulo, Etegil.
- OLIVEIRA, F. G. R. (2000). **Ultra-som em madeiras.** **Jornal Primeira Página.** São Carlos.
- OLIVEIRA, F. G. R; SALES, A. (2000). **Propagação de ondas acústicas na madeira.** In: **ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**, 6. São Carlos. **Anais.** São Carlos. Cd rom, arquivo digital.
- ROCCO LAHR, F. A. (1990). **Considerações a respeito da variabilidade de propriedades de resistência e de elasticidade da madeira.** São Carlos. p.5-104. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- ROMERO, I. J. B. (1996). **Evaluación preliminar de la anisotropía y determinación del módulo de elasticidad de la madera de pinus radiata D. Don. por ultrasonido.** Concepción, 60p. Dissertação – Universidad del Bio Bio.

ROSS, R. J; BRASHWA, B. K; PELLERIN, R. F. (1998). Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, v. 48, n.1, p. 14-19.

SALES, A. (1996a). **Proposição de classes de resistência para madeira**. São Paulo. 223p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, USP.

SALES, A. (1996b). Agrupamento de espécies nativas e cultivadas no Brasil segundo o sistema de classes de resistência proposto na NBR 7190/96. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS, 12, Águas de Lindóia, 1996. **Anais**. São Carlos, ABPOL, v.1, p. 1334-1337.

VARY, A. (1987). **Materials analysis by ultrasonics**. New Jersey, Noyes Data Corporation.

ANEXOS

Resultados de f_{c0} , E_{c0} , V_{LL} e C_{LL} obtidos para corpos-de-prova pequenos.

CP	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (MPa)
GRX1	63,36	22619	5429	23193
GRX2	63,39	18999	5568	24171
GRX3	61,49	18929	5566	24640
GRX4	62,36	17816	5600	23120
GRX5	66,21	22965	5566	23474
GRX6	62,69	19760	5706	25174
GRX7	61,38	22285	5692	24334
GRX8	59,63	19114	5747	24292
GRZ1	62,22	27946	5299	21276
GRZ2	63,80	20041	5462	22529
GRZ3	62,15	17323	5231	21385
GRZ4	62,80	17207	5299	21218
GRZ5	61,09	18369	5372	22957
GRZ6	61,37	18621	5102	20018
GRZ7	57,22	18673	5438	22727
GRZ8	58,97	19322	4902	18959
CIX1	69,92	20417	4439	21119
CIX2	62,76	18247	4640	23343
CIX3	63,45	21111	4617	23006
CIX4	65,36	20297	4778	24376
CIX5	64,04	23079	4491	22825
CIX6	66,65	21724	4720	24236
CIX7	63,07	19331	4698	23289
CIX8	60,86	18702	4379	20289
CIZ1	70,64	22706	5325	29839
CIZ2	63,94	24463	5101	26185
CIZ3	66,94	23498	5266	28077
CIZ4	68,89	29822	4942	24565
CIZ5	67,64	24991	5042	25652
CIZ6	69,18	23400	5138	26455
CIZ7	65,45	25133	5017	25638
CIZ8	69,10	32007	5336	28932

Continuação

CP	f_{co} (MPa)	E_{co} (MPa)	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (MPa)
CPX1	51,25	14675	4195	14486
CPX2	49,36	13768	4594	20231
CPX3	50,74	13198	4352	17699
CPX4	50,70	12046	4189	15937
CPX5	50,06	18839	4806	19859
CPX6	44,69	15942	3957	13183
CPX7	51,34	16909	4263	15127
CPX8	54,30	16187	4420	16419
CPZ1	54,38	19063	4421	17492
CPZ2	43,71	11697	3505	12105
CPZ3	52,48	17855	4327	19075
CPZ4	50,09	18166	4101	16051
CPZ5	56,73	15351	4247	14399
CPZ6	58,39	11226	4570	15252
CPZ7	54,64	16652	3959	14790
CPZ8	45,58	15454	3925	13502
JAX1	70,13	16980	5261	23320
JAX2	72,74	21487	4933	20150
JAX3	74,95	27602	5477	25918
JAX4	73,86	35608	5269	24450
JAX5	75,11	21807	5341	23074
JAX6	70,89	23371	5705	26975
JAX7	67,11	19906	5279	22764
JAX8	72,80	22130	5976	31379
JAZ1	77,42	21115	5540	25527
JAZ2	73,35	18311	5304	22286
JAZ3	71,39	19363	5540	24194
JAZ4	65,91	20603	5307	23125
JAZ5	73,71	17849	5025	20864
JAZ6	74,39	17009	4940	21173
JAZ7	74,27	18516	5478	23861
JAZ8	70,40	21904	5470	25741

Resultados de E_M , V_{LL} e C_{LL} obtidos para corpos-de-prova com dimensão estrutural.

	CP	C_{LL} (MPa)	V_{LL} (m/s)	E_M (MPa)
VIGAS	G1	12751	3851	13593
	G2	13378	3944	13457
	G3	14056	4043	15783
	G4	14273	4047	13588
	E1	20190	4642	20983
	E2	19427	4553	20130
	E3	18671	4464	18164
	E4	16869	4243	14252
	C1	16818	4510	15259
	C2	15392	4314	14439
	C3	14744	4222	12956
	C4	18077	4675	18046
	J1	21454	4394	19920
	J2	20118	4255	18158
	J3	17655	3986	16378
	J4	19742	4212	18152
½ VIGAS	G11	15059	4185	12316
	G12	14741	4140	12533
	G21	16330	4358	13229
	G22	14867	4158	11906
	G31	17046	4452	13710
	G32	15866	4295	12567
	G41	17645	4530	13104
	G42	16815	4422	12096
	E11	23069	4962	17692
	E12	24674	5132	18212
	E21	24289	5091	15686
	E22	25472	5214	16327
	E31	22952	4949	15640
	E32	22157	4863	16028
	E41	20889	4722	12200
	E42	21509	4791	14197
	C11	16581	4478	14018
	C12	17561	4608	14527
	C21	16517	4469	14110
	C22	15680	4354	13632
	C31	15762	4366	13249
	C32	14883	4242	12127
	C41	18407	4718	18874
	C42	18968	4789	16515
	J11	22585	4509	18494
	J12	22274	4478	19727
	J21	20154	4259	16919
	J22	21624	4412	18611
	J31	18096	4036	16044
	J32	18209	4048	15772
	J41	20502	4295	17607
	J42	20478	4283	17583

Continuação

CAIBROS	CP	C _{LL} (MPa)	V _{LL} (m/s)	E _M (MPa)
	G111	15602	4259	13712
	G112	15335	4223	14344
	G121	15640	4265	13119
	G122	14611	4122	13147
	G211	18053	4582	14843
	G212	15113	4192	13738
	G221	16278	4351	14930
	G222	15186	4202	13828
	G311	19208	4726	15982
	G312	16278	4351	14175
	G321	15835	4291	14008
	G322	15373	4228	14852
	G411	17629	4528	15358
	G412	16825	4423	14798
	G421	17722	4539	15160
	G422	15796	4286	13170
	E111	26725	5341	23217
	E112	24770	5142	21356
	E121	28099	5476	21439
	E122	21454	4785	19411
	E211	24844	5149	21212
	E212	23290	4986	19198
	E221	26155	5283	20073
	E222	25219	5188	18540
	E311	22375	4887	18415
	E312	22503	4901	18858
	E321	22696	4922	18435
	E322	21877	4832	18817
	E411	22249	4873	17413
	E412	20701	4700	14779
	E421	24262	5088	19346
	E422	21335	4772	17317
	C111	17927	4656	14799
	C112	17406	4588	14991
	C121	17879	4650	14120
	C122	17546	4606	13033
	C211	16997	4534	14685
	C212	17087	4545	14907
	C221	15496	4329	12481
	C222	16014	4401	12176
	C311	16820	4510	13987
	C312	15933	4389	13658
	C321	15380	4313	11557
	C322	14711	4218	11150
	C411	18122	4681	17123
	C412	17927	4656	17188
	C421	19071	4798	15528
	C422	18831	4772	15690
	J111	24083	4656	19846
	J112	22188	4469	18981

Continuação

CAIBROS	CP	C _{LL} (MPa)	V _{LL} (m/s)	E _M (MPa)
	J121	22188	4367	17874
	J122	23322	4582	18687
	J211	20766	4323	16645
	J212	19476	4187	17489
	J221	21459	4395	16514
	J222	20155	4259	16498
	J311	19242	4162	16112
	J312	19149	4152	17760
	J321	19957	4238	16066
	J322	18303	4059	15342
	J411	20784	4210	17800
	J412	20764	4205	17810
	J421	20789	4182	16842
	J422	20757	4212	16818

Resultados de C_{LL} e MOR obtidos para corpos-de-prova com dimensão estrutural.

CP	C _{LL} (MPa)	MOR (MPa)
G111	15602	96,64
G112	15335	100,10
G211	18053	104,86
G212	15113	92,66
G311	19208	113,04
G312	16278	96,81
G411	17629	105,12
G412	16825	98,03
E111	26725	176,96
E112	24770	159,86
E211	24844	160,44
E212	23290	121,19
E311	22375	132,85
E312	22503	127,09
E411	22249	105,21
E412	20701	140,51
C111	17927	107,33
C112	17406	112,55
C211	16997	103,32
C212	17087	109,78
C311	16820	92,66
C312	15933	108,54
C411	18122	125,18
C412	17927	127,34
J111	24083	131,20
J112	22188	138,12
J211	20766	107,20
J212	19476	116,13
J311	19242	113,21
J312	19149	113,86
J411	20762	127,95
J412	20786	119,83