

Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som

Nondestructive evaluation of logs using ultrasonic technique

Alexandre José Soares Miná
Fabiana Goia Rosa de Oliveira
Carlito Calil Jr.
Antonio Alves Dias
Almir Sales

RESUMO: Os avanços tecnológicos têm permitido melhorar o aproveitamento das propriedades da madeira e de seus derivados. Dentre esses avanços, pode-se destacar a técnica de ultra-som, uma importante ferramenta com potencial para aumentar a competitividade da madeira, por meio da avaliação da sua qualidade e posterior classificação. Esta avaliação é baseada na relação entre a velocidade de propagação das ondas no material e propriedades do material. Pesquisas realizadas com técnicas de ultra-som evidenciam a eficácia deste método na determinação das propriedades mecânicas da madeira validadas por meio da comparação com resultados obtidos em ensaios destrutivos, tendo sido obtidos parâmetros de correlação significativos. O objetivo deste trabalho foi investigar o uso da técnica de ultra-som para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) por meio da comparação com ensaio de flexão estática (MOE) em postes de madeira. Foram utilizados 50 postes de eucalipto com comprimentos de 7,5m e 9,0m. Os resultados deste estudo mostram uma boa relação entre as propriedades determinadas por emissão ultra-sônica e flexão estática, o que indica que esta técnica de avaliação não destrutiva pode ser usada para avaliar o módulo de flexão estática de peças de madeira.

PALAVRAS-CHAVE: Postes de madeira, Avaliação não destrutiva, Ultra-som

ABSTRACT: The advances in the technology have allowed to improve the use of wood and its derived materials. Among these advancements, the ultrasonic technique is a very important tool in order to increase the competitiveness of wood, through evaluation of its quality and subsequently classification. This evaluation is based on the relation between the sound velocity, the modulus of elasticity, and the density of the wood. Accomplished researches in ultrasonic technique make evident its efficiency to determine wood mechanical properties; the validity of this technique was put to the test by confrontation with destructive tests results, and significant correlations parameters were achieved. The objective of this work was to investigate the use of the ultrasonic technique to evaluate the dynamic modulus of elasticity (E_d) through confrontation with static bending results (MOE) of logs. Fifty eucalyptus logs with 7,5m and 9,0m of length were used. The results of this work show a good relation between the properties determined by the ultrasonic technique and the static bending test, and it indicates that this nondestructive technique can be used to evaluate the modulus of elasticity of wood.

KEYWORDS: wood, nondestructive evaluation, ultrasonic.

INTRODUÇÃO

A madeira apresenta grande variabilidade em suas propriedades, o que é resultado em parte, das condições de crescimento das árvores. As propriedades físicas da madeira também são influenciadas pela sua estrutura interna complexa,

resultando em um comportamento anisotrópico. Além da variabilidade natural e anisotropia, a madeira também apresenta como características a porosidade e a não homogeneidade.

Segundo Bucur (1995), o tronco da árvore é formado por camadas concêntricas que conferem

uma simetria cilíndrica para a madeira. Também pode ser considerada como um sólido ortorrômico com três planos de simetria, perpendiculares, definidos em função das direções principais: a direção radial, do centro da árvore até seu perímetro; a direção tangencial, tangente aos anéis de crescimento; e a direção longitudinal, paralela ao eixo da árvore.

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 sem prejuízo para a peça. Outra vantagem deste método é que ele pode ser aplicado mesmo quando a peça já se encontra em utilização estrutural. 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).

Jayne (1959) iniciou a hipótese fundamental para a avaliação não destrutiva da madeira, propondo que a armazenagem de energia e as propriedades de dissipação da madeira, que podem ser medidas por meio não destrutivo, são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento deste material frente a solicitações estáticas. A nível microscópico, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a definição das características de elasticidade da madeira nas solicitações estáticas. Tais propriedades são frequência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade de propagação da onda. Desse modo, as medidas das taxas de deterioração de vibrações livres ou atenuação de ondas acústicas são usadas para observar a propriedade de dissipação de energia na madeira.

Segundo Bucur (1995), 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 sua influência sobre as propriedades mecânicas pode ser avaliada através de métodos não destrutivos.

De acordo com Oliveira e Sales (2002), 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.

Segundo Erikson et al. (2000), 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.

De acordo com Ross (1999), várias tecnologias são usadas para avaliar a madeira de modo não destrutivo, tais como: raio-x, análise química, propriedades vibracionais e transmissão de ondas sonoras.

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, 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 (2001)

O sucesso da aplicação do método ultra-sônico está relacionado ao entendimento do fenômeno de propagação ultra-sônica em materiais e também à definição de como empregar os resultados das pesquisas para aprimorar esta tecnologia.

O comportamento elástico da madeira é avaliado por meio de doze constantes, sendo nove delas independentes: três módulos de Young, três módulos de elasticidade transversais e seis coeficientes de Poisson. O módulo de Young é o principal parâmetro elástico, sendo o que apresenta maior número de trabalhos científicos desenvolvidos a seu respeito.

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 tangencial). 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}).

A relação entre as matrizes de rigidez e flexibilidade é: $[C]^{-1} = [S]$ e o módulo de elasticidade relacionado com a matriz de flexibilidade é $E_{11} = 1/S_{11}$, usando os valores corrigidos do coeficiente de Poisson.

Segundo Halabe et al. (1996), a velocidade de uma onda ultra-sônica depende do modo de vibração, nas direções longitudinal e transversal, e das propriedades do material. A velocidade de propagação longitudinal em uma direção ao longo do comprimento de uma barra esbelta, e considerando-se uma barra com dimensões laterais muito menores que o comprimento de onda, é dada pela equação (1):

$$V = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1)$$

onde:

E_d – módulo de elasticidade dinâmico;

ρ – densidade da madeira;

V – velocidade de propagação da onda ultra-sônica.

A velocidade de propagação de uma onda longitudinal através de um corpo nas três direções é dada pela equação (2):

$$V = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu_{LT})}{\rho(1+\mu_{LT})(1-2\mu_{LT})}} \quad (2)$$

onde:

μ_{LT} – coeficiente de Poisson correspondente à direção longitudinal.

A escolha entre as equações (1) e (2) depende da magnitude do comprimento de onda quando comparado com as dimensões da peça analisada. De acordo com Halabe et al. (1996), a equação (2) foi derivada para um material isotrópico e é

apenas uma aproximação para um meio ortotrópico como a madeira.

A propagação das ondas ultra-sônicas na madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular. Segundo Kabir et al. (2002), a densidade da parede celular é razoavelmente constante, mas há variação do módulo de elasticidade devido a variações na estrutura da parede celular, desse modo, pode-se esperar um intervalo de valores para a velocidade de propagação.

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, posição e características dinâmicas do equipamento), Bucur e Böhneke (1994).

De acordo com McDonald et al. (1990), altas correlações têm sido observadas entre os módulos de elasticidade obtidos a partir das técnicas de ondas acústicas (E_d) e flexão estática (MOE). É mais difícil relacionar MOR com E_d , pois a presença de defeitos e a inclinação das fibras têm efeito mais significativo no MOR do que na velocidade longitudinal da onda. Como os defeitos na madeira afetam a inclinação das fibras, qualquer método que seja sensível a isso, terá alto potencial para determinar a resistência da madeira.

Halabe et al. (1995) obtiveram baixos coeficientes de determinação (R^2) para regressões entre MOR e E_d (obtido por meio da técnica de ondas de tensão) para a espécie southern pine. Os baixos valores de R^2 ocorrem também porque a tensão induzida na madeira durante os ensaios dinâmicos é muito pequena, ou seja, as medições dinâmicas são baseadas nas propriedades mecânicas apenas no limite elástico. O módulo de ruptura (MOR) acontece em maior tensão, acima do limite elástico resultando em pobre correlação com os parâmetros dos ensaios não destrutivos. Também se deve notar que o comportamento do MOR pode ser afetado significativamente pela presença de nós nas extremidades da seção transversal da peça.

Os valores do módulo de elasticidade obtidos no método de ultra-som são usualmente maiores que os encontrados na flexão estática. Segundo Simpson e Wang (2001), isso pode ser explicado considerando-se a madeira um material viscoelástico e altamente amortecedor. Na vibração de uma peça de madeira, a força elástica restaurada é proporcional ao deslocamento e a força dissipativa é proporcional à velocidade. Portanto, quando a força é aplicada com curta duração, o material se comporta como um sólido elástico, enquanto que para uma longa duração o comportamento é igual ao de um líquido viscoso. Este comportamento é mais proeminente no ensaio de flexão estática (longa duração) se comparado aos ensaios de ultra-som e ondas de tensão. Assim, o módulo de elasticidade determinado nesses métodos não destrutivos é usualmente maior que aquele obtido na flexão estática.

Ross et al. (2000) investigaram o uso da emissão acústica para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico em postes de pequeno diâmetro. Os resultados desta pesquisa demonstraram fortes correlações entre as propriedades determinadas pelos métodos de emissão acústica e flexão estática, indicando a eficácia da utilização desta técnica não-destrutiva na avaliação de postes de madeira.

Wang et al. (2002) pesquisaram o efeito do diâmetro do poste na avaliação do MOE pelo método de ondas de tensão. Um total de 201 postes de pequeno diâmetro das espécies jack pine (*Pinus banksiana*), red pine (*Pinus resinosa* Ait.), Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) e ponderosa pine (*Pinus ponderosa*) foram avaliados não-destrutivamente. Os resultados indicaram que o método de ondas de tensão é sensível ao tamanho e às imperfeições geométricas dos postes. Com o aumento do diâmetro do poste, ocorre um desvio maior entre os módulos de elasticidade obtidos nos métodos de ondas de tensão e flexão estática.

O quadro a seguir apresenta resultados de pesquisas que correlacionaram módulos de elasticidade obtidos em ensaios de flexão estática e ultra-som.

Tendo em vista os conceitos apresentados, pode-se intuir que a utilização do ensaio não destrutivo por ultra-som é promissor para a classificação estrutural de madeira. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi a obtenção de correlações entre o ensaio dinâmico por meio de ultra-som (E_d) e o ensaio estático de flexão (MOE) em postes de eucalipto, visando o estudo da viabilidade de aplicação do método de ultra-som na avaliação de propriedades da madeira.

Quadro 1

Resumo de pesquisas com aplicação de ondas acústicas.
(Summary of the researches applying ultrasonic techniques)

| Referência | Espécie | Coefficiente de determinação e/ou correlação |
|--------------------------------|---|--|
| Hellmeister (2003) | <i>Pinus taeda</i> L. | R ² = 0,57 |
| Bartholomeu (2001) | <i>Pinus elliottii</i> | R = 0,85 |
| | <i>Eucalyptus citriodora</i> | R = 0,87 |
| | Cupiúba | R = 0,63 |
| Oliveira (2001) | <i>Eucalyptus grandis</i> | R ² = 0,14 |
| | <i>Eucalyptus citriodora</i> | R ² = 0,23 |
| | Cupiúba | R ² = 0,63 |
| | Jatobá | R ² = 0,59 |
| Machado (2000) | <i>Pinus maritima</i> | R = 0,63 |
| Carrasco e Oliveira (1999) | Maçaranduba, jatobá, <i>Eucalyptus tereticornis</i> | R ² = 0,56 |
| Nogueira (2003) | <i>Pinus taeda</i> | R ² = 0,89 |
| Baradit et al. (1998) | <i>Pinus radiata</i> | R = 0,79 |
| Waubke apud Bartholomeu (2001) | Fichte | R = 0,84 |

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados 15 postes com 7,5m de comprimento (diâmetro médio de 21cm) e 35 postes com 9m de comprimento (diâmetro médio de 13,5cm) da espécie *Eucalyptus citriodora*, com idade provável entre 12 e 15 anos. A secagem das peças foi feita ao ar. O controle de umidade dos postes foi realizado através da retirada de corpos-de-prova de cada peça com as dimensões estabelecidas pela NBR-7190/97. Os resultados permitiram atribuir um valor médio de 12% de teor de umidade.

Foram realizados ensaios para a avaliação das seguintes propriedades físicas e mecânicas:

- ✓ densidade aparente a um teor de umidade em torno de 12% ($\rho_{ap,12\%}$);
- ✓ módulo de elasticidade na flexão estática (MOE);
- ✓ módulo de elasticidade dinâmico (E_d).

Os ensaios não destrutivos precederam os estáticos visando minorar possíveis variabilidades ocasionadas pela deformação introduzida no ensaio de flexão (realizado imediatamente após o ensaio com ultra-som).

Os ensaios dinâmicos foram feitos com o equipamento de ultra-som Sylvatest com transdutores de 22 kHz, mostrado na Figura 1.



Figura 1
Equipamento de ultra-som Sylvatest.
(Sylvatest equipment)

Foram feitas duas leituras do tempo de propagação da onda para cada poste e a partir do comprimento, calculou-se a velocidade de propagação para cada poste; o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi calculado a partir da média aritmética de cada par de velocidade e da densidade aparente, conforme equação (1).

Em função da conicidade das peças, os transdutores foram posicionados em pontos que representavam aproximadamente o terço do diâmetro. Evitou-se a colocação dos transdutores sobre fendas e outros defeitos inerentes ao topo e a base de postes de eucalipto.

Para o cálculo do volume, os postes foram idealizados como formados por duas partes tronco-cônicas de comprimentos iguais, sendo utilizada a equação (3).

$$V = \frac{\pi \cdot L}{24} (D_T^2 + D_T \cdot D_M + D_M^2) \frac{\pi \cdot L}{24} (D_M^2 + D_B + D_B^2) \quad (3)$$

onde:

L – comprimento;

D_T – diâmetro do topo (ponta mais delgada);

D_M – diâmetro no meio do poste;

D_B – diâmetro da base.

Os ensaios de flexão estática foram realizados com o esquema estático de vigas simplesmente apoiadas, com uma força concentrada aplicada no meio do vão, como apresentado na Figura 2. Com carregamento lento e crescente foram medidas (por meio de anel dinamométrico) duas forças, correspondentes aos deslocamentos verticais de 2cm e de 4cm. Os deslocamentos verticais foram medidos no meio do vão, utilizando um relógio comparador com sensibilidade de centésimo de milímetro.

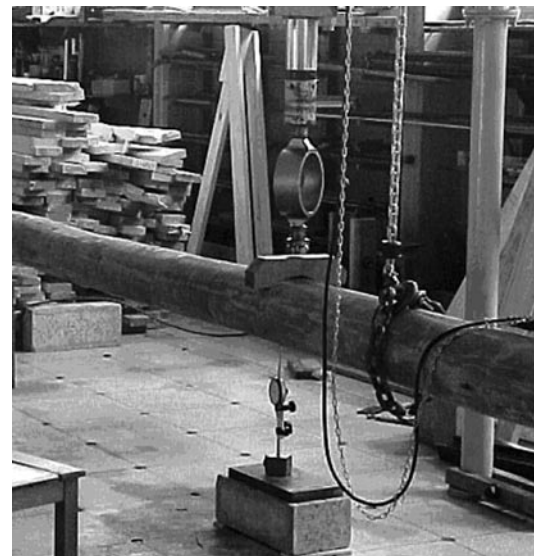


Figura 2
Ensaio de flexão estática.
(Static bending test)

Nos apoios e na interface da prensa com o poste (meio da peça) foram usadas peças semicirculares de madeira com 10cm de espessura. (Figura 3)

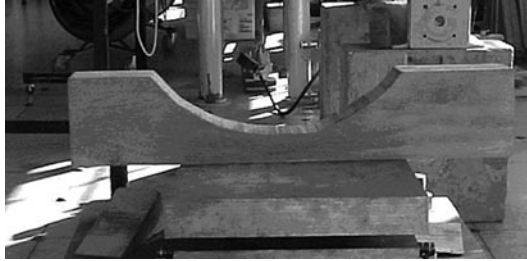


Figura 3
Peça semicircular de madeira usada como apoio.
(Semicircular piece of wood used as support)

O cálculo do MOE foi feito a partir da aplicação do princípio dos trabalhos virtuais (PTV), por meio do processo da carga unitária, considerando-se cada poste constituído de duas partes tronco-cônicas de comprimentos iguais a $L/2$.

Desta forma obteve-se a seguinte expressão para MOE:

$$MOE = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \Delta \cdot I_{EQ}} \quad (4)$$

Sendo Δ o deslocamento vertical no meio do vão e I_{EQ} o momento de inércia equivalente, dado pela equação:

$$I_{EQ} = \frac{\pi \cdot D_{EQ}^4}{64} \quad (5)$$

Em que DEQ é o diâmetro equivalente, dado pela seguinte equação:

$$D_{EQ} = \sqrt[4]{\frac{2 \cdot D_T \cdot D_M^3 \cdot D_B}{(D_T + D_B)}} \quad (6)$$

Tabela 1
Valores médios e coeficientes de variação dos postes de 9m.
(Mean values and coefficients of variation of the 9m posts)

| | ρ (kg/m ³) | V_{LL} (m/s) | E_d (MPa) | MOE (MPa) |
|--------|-----------------------------|----------------|-------------|-----------|
| Média | 1087 | 4396 | 21020 | 18392 |
| CV (%) | 4,2 | 4,2 | 8,1 | 9,0 |

Tabela 2
Valores médios e coeficientes de variação dos postes de 7,5m.
(Mean values and coefficients of variation of the 7,5m posts)

| | ρ (kg/m ³) | V_{LL} (m/s) | E_d (MPa) | MOE (MPa) |
|--------|-----------------------------|----------------|-------------|-----------|
| Média | 1035 | 4558 | 21572 | 20539 |
| CV (%) | 3,8 | 3,7 | 9,6 | 12,7 |

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Tabelas 1 e 2, têm-se a média e o coeficiente de variação das propriedades determinadas nos ensaios estáticos e dinâmicos para os postes de 9m e de 7,5m, respectivamente.

Os coeficientes de variação obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foram menores do que os obtidos para o módulo de elasticidade em ensaios estáticos (MOE).

Nas Figuras 4, 5 e 6 estão apresentadas as correlações lineares simples entre E_d e MOE, e também os coeficientes de determinação (R^2) para os postes de 9m, de 7,5m e para o conjunto de 50 postes, respectivamente.

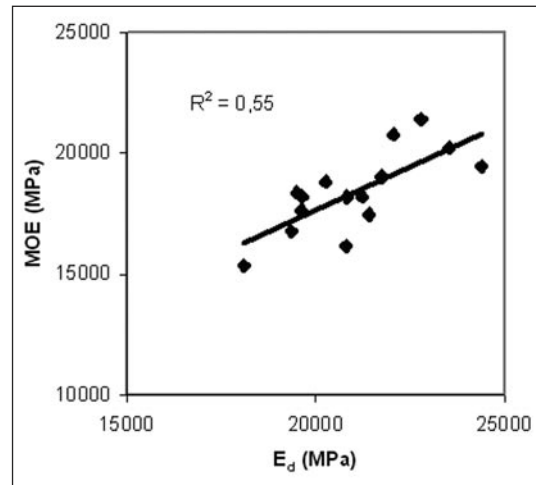
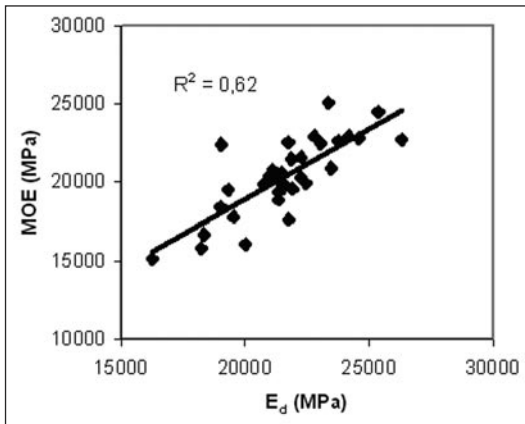
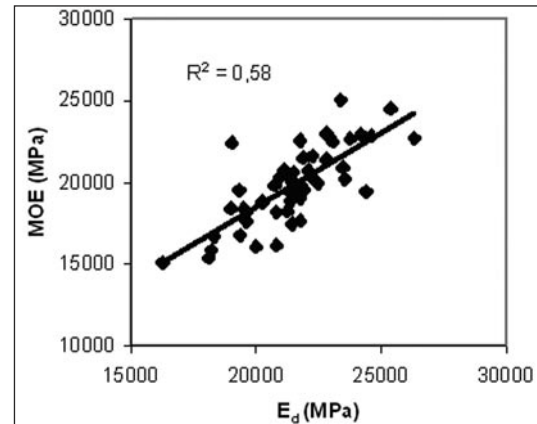


Figura 4
Correlação linear simples entre E_d e MOE para os postes de 9m.
(Simple linear correlation between E_d and MOE for the 9m posts)

**Figura 5**

Correlação linear simples entre E_d e MOE para os postes de 7,5m.

(Simple linear correlation between E_d and MOE for the 7,5m posts)

**Figura 6**

Correlação linear simples entre E_d e MOE para os postes em conjunto.

(Simple linear correlation between E_d and MOE for all the posts)

Os valores dos coeficientes de determinação estão compatíveis com os usualmente encontrados na literatura. As análises de variância desenvolvidas permitiram comparar os dados de E_d e MOE para os conjuntos de dados: postes de 9,0 metros de comprimento; postes de 7,5 metros de comprimento e para o conjunto total de postes.

Para o conjunto formado pelos dados referentes aos postes de 9,0 metros de comprimento foi possível obter os valores apresentados na Tabela 3, destacando-se que o valor da variável de teste $F_{\text{dados}} = 15,79$ é superior ao valor crítico $F_{05} = 3,84$, evidenciando estatisticamente a existência de dependência linear ao nível de $\alpha=5\%$. Os parâ-

metros estimados para a regressão linear apresentam magnitude superior ao valor crítico $t_{05} = 1,65$ ($t_{\text{dados}} = 3,97$) representando significância estatística com um coeficiente de determinação $r^2=0,55$.

Para o conjunto formado pelos dados referentes aos postes de 7,5 metros de comprimento foi possível obter os valores apresentados na Tabela 4, destacando-se que o valor da variável de teste $F_{\text{dados}} = 54,68$ é superior ao valor crítico $F_{05} = 3,84$, evidenciando estatisticamente a existência de dependência linear ao nível de $\alpha=5\%$. Os parâmetros estimados para a regressão linear apresentam magnitude superior ao valor crítico $t_{05} = 1,65$ ($t_{\text{dados}} = 7,39$) representando significância estatística com um coeficiente de determinação $r^2=0,62$.

Tabela 3

Quadro de análise de variância para os dados de E_d e MOE (postes de 9,0 metros de comprimento).

(Analysis of variance for the data of E_d and MOE (posts of 9.0 meters in length))

| Fonte de variação | Soma de quadrados | Graus de liberdade | Quadrado médio | F_{dados} | F_{05} |
|--------------------|-------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------|
| Devido à Regressão | 22322228 | 1 | 22322228 | 15,79 | 3,84 |
| Residual | 18373882 | 13 | 1413375 | | |
| Total | 40696112 | 14 | | | |

Tabela 4

Quadro de análise de variância para os dados de E_d e MOE (postes de 7,5 metros de comprimento).

(Analysis of variance for the data of E_d and MOE (posts of 7.5 meters in length))

| Fonte de variação | Soma de quadrados | Graus de liberdade | Quadrado médio | F_{dados} | F_{05} |
|--------------------|-------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------|
| Devido à Regressão | 91254864 | 1 | 91254864 | 54,68 | 3,84 |
| Residual | 55075036 | 33 | 1668941 | | |
| Total | 146329904 | 34 | | | |

Para o conjunto formado pela totalidade dos dados referentes aos postes foi possível obter os valores apresentados na Tabela 5, destacando-se que o valor da variável de teste $F_{\text{dados}} = 66,50$ é superior ao valor crítico $F_{05} = 3,84$, evidenciando estatisticamente a existência de dependência linear ao nível de $\alpha = 5\%$. Os parâmetros estimados para a regressão linear apresentam magnitude superior ao valor crítico $t_{05} = 1,65$ ($t_{\text{dados}} = 8,15$) representando significância estatística com um coeficiente de determinação $r^2 = 0,58$.

No prosseguimento da análise e validação estatística para cada um dos conjuntos de dados

em estudo, verificou-se que os resíduos apresentaram uma distribuição aleatória em torno do zero, indicando que os modelos lineares foram satisfatórios para a análise dos dados. Da mesma forma, a distribuição normal de frequência para os resíduos foi constatada para cada um dos conjuntos de dados analisados. A retirada de pontos com resíduos elevados conduziram a resultados semelhantes para a constatação da normalidade dos resíduos, e sem a ocorrência de aumento significativo nos valores de r^2 e na F , indicando assim a adequação dos modelos às variáveis estudadas.

Tabela 5

Quadro de análise de variância para os dados de E_d e MOE (totalidade dos postes).
(Analysis of variance for the data of E_d and MOE (totality of the posts))

| Fonte de variação | Soma de quadrados | Graus de liberdade | Quadrado médio | F_{dados} | F_{05} |
|--------------------|-------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------|
| Devido à Regressão | 110455312 | 1 | 110455312 | 66,50 | 3,84 |
| Residual | 79730968 | 48 | 1661062 | | |
| Total | 190186272 | 49 | | | |

CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais, pode-se concluir que o método de avaliação não-destrutivo por meio de ultra-som pode ser utilizado para a avaliação da rigidez de postes de madeira. Considerando-se a rapidez e facilidade de utilização desta técnica, o desenvolvimento de outras pesquisas poderá estabelecer os parâmetros relacionados à avaliação de propriedades mecânicas de postes de madeira, disseminando assim, o emprego da avaliação não destrutiva. O estudo da influência de variáveis como limite entre cerne e alburno, teor de umidade, degradação biológica e geometria da peça é necessário para melhorar os resultados obtidos.

Os valores dos coeficientes de determinação estão compatíveis com os usualmente encontrados na literatura, e são considerados altamente satisfatórios para um material de origem natural e anisotrópico como a madeira.

Os coeficientes de variação obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foram menores do que os obtidos para o módulo de elasticidade em ensaios estáticos (MOE). Isto denota a menor variabilidade inerente aos ensaios não destrutivos para peças com dimensões estruturais.

AUTORES E AGRADECIMENTOS

ALEXANDRE JOSÉ SOARES MINÁ é Professor do CFT da Universidade Federal da Paraíba – E-mail: alexpb@sc.usp.br

FABIANA GOIA ROSA DE OLIVEIRA é Doutora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia dos Materiais do LaMEM da Escola de Engenharia de São Carlos – E-mail: fabiana@sc.usp.br

CARLITO CALIL JR. é Professor Titular do LaMEM – SET – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-carlense, 400 São Carlos, SP - 13566-590 – E-mail: calil@sc.usp.br

ANTONIO ALVES DIAS é Professor Doutor do LaMEM – SET - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São-carlense, 400 - São Carlos, SP - 13566-590 – E-mail: dias@sc.usp.br

ALMIR SALES é Professor doutor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos - E-mail: almir@power.ufscar.br

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e a CAPES/PICDT (Programa de Incentivo à Capacitação Docente e Técnica) pelo suporte finan-

ceiro e ao LaMEM (Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira) pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. (NBR-7190/97)
- BARADIT, E.; ROZAS, C.; VARGAS, G. Aplicación de ultrasonido en la evaluación de madera de *Pinus radiata*. **Madeiras: ciencia y tecnologia**, v.1, p.27-33, 1998.
- BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças de madeira utilizando ultra-som**. Campinas, 2001. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas
- BUCUR, V. *Acoustics of wood*. New York: CRC Press, 1995.
- CARRASCO, E.V.M.; OLIVEIRA, S.V. Evaluation of eucalyptus mechanical properties by ultrasound (NDT). In: Rilem Symposium on Timber Engineering, Estocolmo, 1999. **Proceedings**. v.1, p.732-738
- ERIKSON, R.G.; GORMAN, T.M.; GREEN, D.W.; GRAHAM, D. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine and grand fir trees from northern Idaho. **Forest products journal**, v.50, n.7/8, p.59-65, 2000.
- HALABE, U.B.; BIDIGALU, G.M.; GANGARAO, H.V.S.; ROSS, R.J. Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. **Materials evaluation**, p.1013-1018, 1995.
- HALABE, U.B.; GANGARAO, H.V.S.; PETRO, S.H.; HOTA, V.R. Assessment of defects and mechanical properties of wood members using ultrasonic frequency analysis. **Materials evaluation**, p.314-322, 1996.
- HELLMEISTER, J.C. **Aplicação do método de ondas de tensão na caracterização mecânica de toras, pranchas e tábuas de *Pinus taeda* L.** Botucatu, 2003. Tese (Doutorado). Faculdade de Ciências Agrônomicas. Universidade Estadual Paulista
- JAYNE, B.A. Vibrational properties of wood as indices of quality. **Forest products journal**, v.9, n.11, p.413-416, 1959.
- KABIR, M.F.; SCHMOLDT, D.L.; SCHAFER, M.E. Time domain ultrasonic signal characterization for defects in thin surfaced hardwood lumber. **Wood and fiber science**, v.34, n.1, p.165-182, 2002.
- MCDONALD, K.A.; FALK, R.H.; PATTON-MALLORY, M. **Nondestructive testing of wood products and structures: state of the art and research needs**. Madison, USDA / Forest Service / Forest Products Laboratory, 1990. p.137-147
- MACHADO, J.M.S.R.S. **Avaliação da variação das propriedades mecânicas de pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) por meio de ultra-sons**. Lisboa, 2000. Tese (Doutorado). Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa.
- NOGUEIRA, M. **Determinação de módulos de elasticidade da madeira de *Pinus taeda* L. com uso de ultra-som**. Botucatu, 2003. Tese (Mestrado). Faculdade de Ciências Agrônomicas. Universidade Estadual Paulista
- OLIVEIRA, F.G.R. **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som**. São Carlos, 2001. Tese (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo
- OLIVEIRA, F.G.R.; SALES, A. Ultrasonic measurements in Brazilian hardwood. **Materials research**, v.5, n.1, p.51-55, 2002.
- ROSS, R.J. Using sound to evaluate standing timber: review. **Forest products journal**, p. 43-44, 1999.
- ROSS, R.J.; BRASHAW, B.K.; PELLERIN, R.F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest products journal**, v.48, n.1, p.14-19, 1998.
- ROSS, R.J.; WANG, X.; MATTSON, J.A.; ERICKSON, J.R.; FORSMAN, J.W.; GESKE, E.A.; WEHR, M.A. Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small diameter logs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 12, Sopron, 2000. **Proceedings**. p.155-163
- SIMPSON, W.T.; WANG, X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying. **Forest products journal**, v.51, n.10, p.51-54, 2001.
- WANG, X.; ROSS, R.J.; BRASHAW, B.K.; ERICKSON, J.R.; FORSMAN, J.W.; PELLERIN, R. Diameter effect on stress-wave evaluation of modulus of elasticity of logs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 13, BERKELEY, 2002. **Proceedings**. p.149-156