

## **CLASSIFICAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE *PINUS SP* POR ULTRA-SOM**

M.R. Carreira

BR 369 Km 0,5 - Campo Mourão - PR CEP 87301-005

e-mail:mcarreira@cm.cefetpr.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A. B. Cheung

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos

F. G. R. Oliveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dias. A. A.

Universidade de São Paulo – EESC - LaMEM

Calil Júnior. C.

Universidade de São Paulo – EESC - LaMEM

Sales, A.

Universidade Federal de São Carlos – DeCIV

Candian, M.

Universidade Federal de São Carlos – DeCIV

### **RESUMO**

*Por ser um material gerado pela natureza, a madeira apresenta grande variabilidade em suas propriedades mecânicas. Neste sentido, a classificação estrutural da madeira é imprescindível para garantir a sua utilização racional e com o*

*mesmo nível de segurança de outros materiais estruturais como o aço e o concreto. Existem diversas técnicas e equipamentos para a classificação mecânica de peças estruturais de madeira. Todas elas fazem o uso de um estimador para prever a resistência do material. Na técnica ultra-sônica, a velocidade de propagação da onda é utilizada como estimador do módulo de elasticidade (MOE). Este método apresenta-se na literatura como uma boa alternativa para a classificação de peças estruturais de madeira, sobretudo quando a estrutura estiver em uso. Este trabalho tem por objetivo verificar a precisão da técnica de emissão ultra-sônica na determinação do módulo de elasticidade longitudinal à flexão estática ( $E_M$ ) de peças estruturais. Nos testes foram utilizadas 600 peças estruturais de *Pinus sp* que foram coletadas em uma indústria localizada em Lages-SC. Os testes estatísticos apresentaram uma boa correlação entre os dados, mostrando a eficiência do equipamento de ultra-som na classificação de peças estruturais de madeira.*

Palavras-chave: *madeira, avaliação não-destrutiva, ultra-som, Pinus.*

## INTRODUÇÃO

Todo sistema de classificação estrutural da madeira emprega um estimador para avaliar a resistência mecânica da madeira. Dentre os diversos métodos para a classificação da madeira, os que mais têm se destacado são a classificação mecânica por tensões (MSR), as técnicas de vibração transversal, *stress wave* e ultra-som.

A avaliação não destrutiva da madeira por qualquer um dos métodos citados anteriormente não é totalmente livre de erros, pois, as equações que regem o comportamento de cada uma destas técnicas consideram o material como sendo homogêneo, isotrópico e contínuo. Entretanto, como se sabe, a madeira apresenta descontinuidade das fibras devido ao processo de desdobro e devido a presença de nós, é um material heterogêneo e anisotrópico. Nos materiais como os metais, os plásticos e as cerâmicas, cujas propriedades mecânicas são conhecidas e rigorosamente controladas por processos de produção, as técnicas de avaliação não-destrutiva são usadas somente para detectar a presença de descontinuidade, vazios, ou impurezas.

De acordo com Ross & Pellerin<sup>(1)</sup>, a hipótese fundamental da avaliação não-destrutiva da madeira foi fundamentada por Jayne<sup>(2)</sup>. Ele propôs que a energia armazenada e as propriedades de dissipação da madeira podem ser medidas por meios não-destrutivos, sendo que tais mecanismos determinam o comportamento estático da madeira. Como consequência, convenientes relações matemáticas entre

as propriedades de dissipação de energia e as propriedades estáticas de resistência e elasticidade podem ser obtidas por meio de análises de regressão estatística.

Neste trabalho foi realizado o teste de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia em 600 peças de *Pinus taeda*, com dimensões nominais de 3,5cm x 12,5cm, para a medida do módulo de elasticidade à flexão (MOE). Em seguida, estas peças foram avaliadas pela técnica de ultra-som utilizando o equipamento Sylvatest. Foram feitas correlações entre o MOE estático médio no teste de flexão estática e o MOE dinâmico medido pelo equipamento de ultra-som.

### Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a correlação entre o MOE medido no teste de flexão estática de 600 peças de *Pinus sp* e o MOE medido com a técnica de ultra-som.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Oliveira & Sales<sup>(3)</sup> *apud* Santos *et al*<sup>(4)</sup> explicam que a utilização de métodos de ensaios não destrutivos para avaliação das propriedades físicas e mecânicas da madeira tem sido crescente e 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.

Conforme Emerson *et al*<sup>(5)</sup>, a técnica de inspeção ultra-sônica tem sido explorada para a detecção de características que reduzem a resistência da madeira tais como nós, inclinação de fibras e apodrecimento na madeira. Entretanto, a maioria das aplicações de inspeção ultra-sônica para peças de madeira tem sido direcionada para estimar a qualidade de um produto na linha de produção, ao invés de condições locais de estruturas de madeira.

De acordo com Gonçalves & Puccini<sup>(6)</sup>, o uso da técnica de emissão ultra-sônica na engenharia civil teve início na década de 50 na Europa, sendo inicialmente utilizada na avaliação do concreto. Posteriormente investigadores iniciaram estudos

teóricos para a aplicação do ultra-som na madeira, encontrando sérias dificuldades dadas as peculiaridades anatômicas deste material.

Wolfe<sup>(7)</sup>, salienta que o tempo de propagação, a freqüência natural e a atenuação da onda são os melhores parâmetros para serem correlacionados com a resistência e a rigidez da madeira.

O princípio da técnica ultra-sônica para a determinação das constantes elásticas da madeira consiste na emissão de uma onda de alta freqüência ( $f_r \geq 20\text{KHz}$ ) na direção que se deseja estudar e medir o tempo necessário para que esta onda atinja a face oposta. Conhecida a distância entre o transdutor emissor e o transdutor receptor e medindo-se o tempo necessário para a onda percorrer este caminho pode-se determinar a velocidade de propagação da onda no interior do material pela seguinte equação:

$$C = \frac{L}{\Delta t} \quad (\text{A})$$

Sendo:

$L$  = distância entre os pontos de emissão e recepção da onda (m);

$\Delta t$  = tempo decorrido para a onda atravessar a madeira (s).

O valor do MOE pode ser determinado usando a velocidade de propagação  $C$  e a densidade do material ( $\rho$ ).

$$MOE = C^2 \cdot \rho \quad (\text{B})$$

Sendo:

$C$  = velocidade de propagação da onda (m/s);

$\rho$  = Densidade da madeira ( $\text{Kg/m}^3$ ).

A compreensão dos fatores que influem na propagação das ondas ultra-sônicas na madeira é de fundamental importância para o emprego correto desta técnica. Segundo Mantilla Carrasco & Azevedo Júnior<sup>(8)</sup>, os fatores que influenciam a propagação das ondas ultra-sônicas na madeira são a umidade da madeira, a densidade, a temperatura ambiente, a natureza biológica da madeira e as dimensões dos elementos estruturais.

Segundo Santos *et al*<sup>(4)</sup>, o teor de umidade, influi diretamente na elasticidade e na densidade da madeira ocasionando significativas variações nas leituras do tempo de propagação das ondas do ultra-som; a densidade e a concentração dos anéis de crescimento ocasionam mudança na estrutura da madeira influenciando a velocidade de propagação de ondas.

Para Costa & Gonçalves<sup>(9)</sup>, a variação da velocidade de propagação das ondas é mais significativa no trecho de teores de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras. Acima do ponto de saturação a variação é significativamente menor.

Sales *et al*<sup>(10)</sup>, explicam que a velocidade de propagação das ondas é maior na direção longitudinal devido à orientação das células nesse eixo, que propiciam um caminho contínuo para as ondas. De acordo com Oliveira<sup>(11)</sup> e Bucur<sup>(12)</sup> citados por Sales *et al* (2004), quando as ondas viajam através da direção transversal, as mesmas cruzam a lignina mais amorfa e inelástica, e assim estão sujeitas a grandes atenuações.

Santos *et al*<sup>(4)</sup>, confeccionaram-se seis corpos-de-prova para cada orientação (0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 55°, 70° e 90°) para a espécie Amarelinho e para a espécie Tatajuba, sete corpos-de-prova para cada orientação (0°, 10°, 20°, 30°, 55°, e 90°). Na seqüência, os corpos-de-prova foram ensaiados, no sentido da maior extensão, pela técnica de avaliação não destrutiva de emissão de ondas de ultra-som, utilizando-se o equipamento PUNDIT 6, da CNS Farnell, com transdutor de freqüência de 200 kHz e resolução de 0,1 µs. Os autores concluíram que a maior velocidade é obtida quando a propagação das ondas ocorre na direção paralela às fibras. Para a espécie Amarelinho, observaram uma redução de cerca de 15% para cada incremento de 10° e 15° no desvio das fibras entre o ângulo de 0° a 55°, redução na ordem de 9% para o desvio de 55° para 70° e redução na ordem de 4% para o desvio de 70° para 90°. Para a espécie Tatajuba, observou-se uma redução da ordem de 7 a 8% para cada incremento de 5° no desvio das fibras entre o ângulo de 0° a 55° e redução na ordem de 15% para o desvio de 55° para 90°.

Baradit & Fuentealba<sup>(13)</sup> aplicaram a técnica de ultra-som em corpos-de-prova de *Pinus radiata* com teor de umidade de 12% e compararam com valores obtidos em testes destrutivos. Foi observada uma alta correlação entre os valores do MOE determinado pelo equipamento ultra-sônico e pelo teste destrutivo. Como conseqüência, Baradit & Fuentealba<sup>(13)</sup> concluíram que a técnica do ultra-som é um meio eficiente de se determinar o valor do MOE.

Sales *et al* (2004) empregaram a técnica ultra-sônica para a avaliação de propriedades mecânicas de 25 postes de eucalipto citriodora. Os postes foram ensaiados à flexão estática até a ruptura e posteriormente foram extraídas duas toras de 50 cm de comprimento de regiões não afetadas pela ruptura, sendo uma do topo e outra da base dos postes. As toras foram submetidas à emissão ultra-sônica nas direções axial e radial como mostra a Figura A.

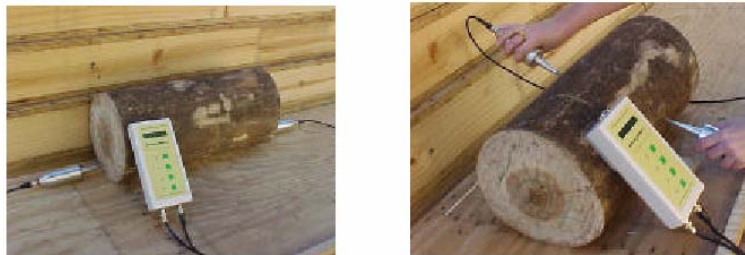


Figura A – Utilização do equipamento de emissão ultra-sônica nas direções axial e radial.

Fonte: Sales *et al* (2004).

A Figura B apresenta as correlações entre o MOE estático e o MOE dinâmico e entre o MOE dinâmico e o módulo de ruptura à flexão (MOR).

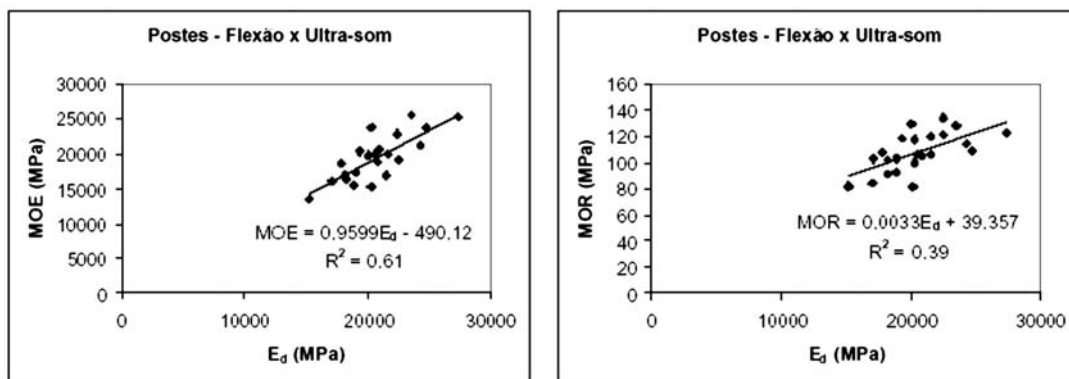


Figura B – Correlação entre MOE estático e MOE dinâmico e entre o MOE dinâmico e o MOR.

Fonte: Sales *et al* (2004).

Para Sales *et al*<sup>(10)</sup>, os resultados mostram uma boa relação entre as propriedades determinadas por emissão ultra-sônica e flexão estática, indicando que esta técnica de avaliação não destrutiva pode ser usada para avaliar o módulo de flexão estática de postes de madeira. 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.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Material utilizado

Foram utilizadas 600 pranchas de madeira de dimensões nominais 3,5cm x 12,5cm x 2,60m, das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. A madeira utilizada nos testes foi seca em estufa. Foi medido o teor de umidade de algumas peças retiradas aleatoriamente do lote com um medido elétrico Digisystem, modelo DUP 8805 e constatou-se que a umidade das mesmas estava em torno de 11,8%. As peças de madeira foram doadas pela Battistella Indústria e Comércio de Madeiras Ltda e são provenientes do Planalto Catarinense, região de Lages, Santa Catarina.

### Testes de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia

Os testes de flexão estática foram conduzidos seguindo-se os procedimentos da norma ASTM D4761<sup>(14)</sup>. As pranchas de madeira foram colocadas sobre apoios de aço distanciados de 2,40m. Considerando-se a altura nominal de 3,5cm, as peças foram flexionadas com uma relação L/h igual a 69. No centro dos apoios foi colocado um relógio comparador com resolução de 0,01mm e curso máximo de 50mm (Figura C). Foi aplicada uma força no centro das pranchas, com duas intensidades: 100 N e 200 N.



Figura C – Teste de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia das pranchas.

A intensidade da força foi definida limitando-se o deslocamento vertical máximo em L/200, considerando-se um MOE médio de 10.000 MPa. O MOE à flexão em relação ao eixo de menor inércia foi determinado no segundo incremento de força utilizando-se a seguinte expressão:

$$MOE = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot \Delta v \cdot I} \quad (C)$$

Sendo:

MOE = Módulo de elasticidade (MPa);  
 $\Delta P = (F_2 - F_1)$ , Incremento de força (N);  
 $L =$  Vão da prancha (mm);  
 $\Delta v = (v_2 - v_1)$ , Incremento de deslocamento (mm);  
 $I =$  Momento de inércia da seção transversal (mm<sup>4</sup>).

### Classificação por ultra-som

Na classificação por meio de ultra-som foi utilizado o equipamento Sylvatest da Psion Ind. Os testes com o equipamento de ultra-som foram realizados na seqüência dos testes de flexão estática. O equipamento emite uma onda ultra-sônica e mede o tempo necessário para onda atravessar a peça. A emissão do sinal foi feita no sentido longitudinal. Tendo-se o comprimento das peças, a dimensão da seção transversal e a massa das mesmas, o MOE foi determinado utilizando-se as equações (A) e (B). A classificação mecânica por meio de ultra-som foi bastante rápida. A Figura D mostra o equipamento utilizado nos testes, e o desenvolvimento da classificação por meio de ultra-som.



Figura D – Equipamento de ultra-som e desenvolvimento da classificação mecânica por emissão ultra-sônica.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva dos resultados do MOE obtidos na avaliação não-destrutiva com a emissão ultra-sônica e com a flexão estática.

Tabela 1 – Estatística descritiva dos resultados dos testes estático e dinâmicos.

<b>Resultados</b>	<b>Flexão estática</b>	<b>Emissão ultra-sônica</b>
<b>Média</b>	13069.07	13855.66
<b>Erro padrão</b>	165.87	165.90
<b>Desvio padrão</b>	4062.86	4063.58
<b>Variância da amostra</b>	16506855.62	16512702.23
<b>Curtose</b>	-0.67	-0.82
<b>Mínimo</b>	4330.08	4537.91
<b>Máximo</b>	26170.91	24620.65
<b>Soma</b>	7841442.63	8313396.12
<b>Contagem</b>	600	600

Correlação entre o MOE estático e o MOE medido com o equipamento de emissão ultra-sônica

Foi realizada a análise de regressão linear simples entre os dados do MOE medido por testes de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia e pelo equipamento de ultra-som.

A Figura E apresenta o gráfico de dispersão e a reta de regressão entre os dados do MOE medidos nos testes de flexão estática e pelo equipamento de ultra-som.

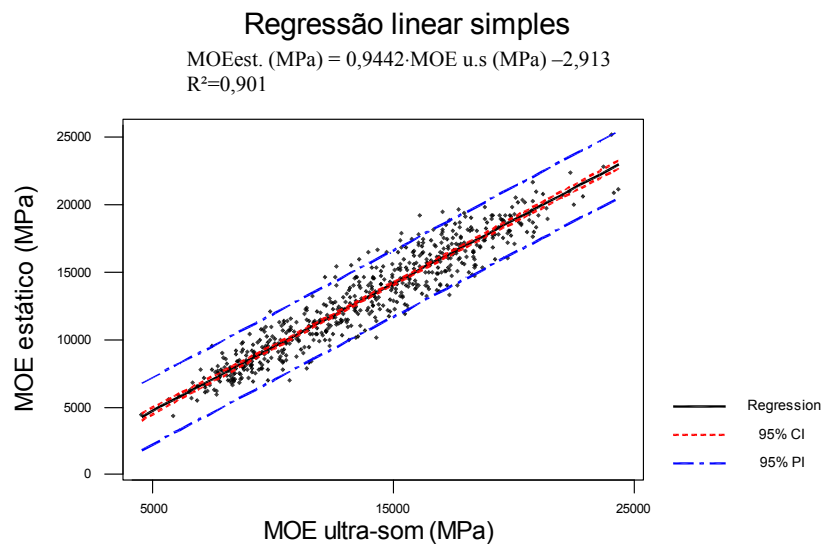


Figura E – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre  $MOE_{estático}$  e  $MOE_{ultra-som}$ .

É necessário testar a validade do modelo estatístico de regressão linear aos dados obtidos. Para tanto, verificou-se a homogeneidade da variância e a normalidade dos resíduos. A Figura F apresenta o gráfico dos resíduos contra os

valores estimados para os dados do MOE obtidos com o equipamento de ultra-som, no qual se observa a homogeneidade da variância.

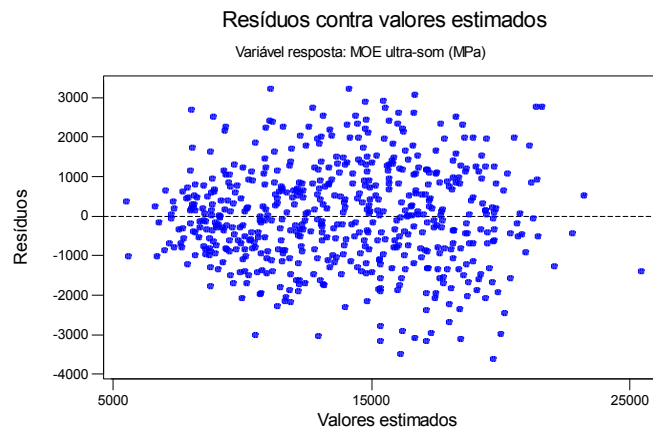


Figura F – Resíduos contra valores estimados para os dados do MOE obtido com o equipamento de ultra-som.

A Figura G apresenta o gráfico dos resíduos contra os escores normais, no qual se observa que os resíduos se distribuem segundo um padrão aproximadamente normal.

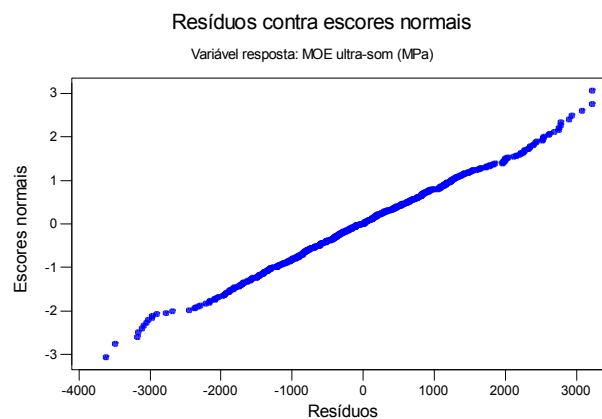


Figura G – Resíduos contra escores normais para os dados do MOE obtido com o equipamento de ultra-som.

Confirmada a validade do modelo, é necessário verificar a qualidade do modelo ajustado. Para isso, foi utilizado o quadro de ANOVA (Tabela 2).

Tabela 2 – Quadro de ANOVA para os dados do  $MOE_{estático}$  e do  $MOE_{ultra-som}$ .

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F <sub>cal</sub>	Valor-p
Regressão	8200671142	1	8200671142	5159,7	0,000
Erro	901160683	567	1589349		
Total	9101831824	568			

Como  $F_{cal} = 5159,77 > F_{0,05; 1,574} = 3,840$  rejeita-se  $H_0$  ao nível de significância  $\alpha = 0,05$ . Portanto, de acordo com os dados, a um nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela equação de regressão é altamente significativa. Logo, o modelo de regressão linear dado por  $MOE_{estático} (MPa) = 0,9442 \cdot MOE_{ultra-som} (MPa) - 2,913$  é adequado para representar a relação entre o  $MOE_{estático}$  e o  $MOE_{ultra-som}$ , para a espécie e dimensões consideradas.

## CONCLUSÕES

A reta de regressão entre o  $MOE_{estático}$  e o  $MOE_{ultra-som}$  apresentou para o coeficiente angular o valor de 0,944, indicando que os valores do módulo de elasticidade medidos pela avaliação ultra-sônica são bastante próximos dos valores obtidos pelo ensaio de flexão estática. O coeficiente de determinação obtido para a equação de regressão ( $R^2 = 0,901$ ) foi altamente significativo para o *Pinus sp.* Estes resultados mostram que a técnica ultra-sônica pode ser utilizada como um método rápido e eficiente para a classificação de peças estruturais de *Pinus sp.*

## AGRADECIMENTOS

A Battistella Indústria e Comércio de Madeiras Ltda, pelo fornecimento de toda a madeira utilizada nos testes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ROSS, J. R. ; PELLERIN, R. F. (1994). *Nondestructive testing for assessing wood members in structures*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70 USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison, WI.42 p.
- JAYNE, B.A. (1959). Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*. 9(11):

3. OLIVEIRA F. G. R.; SALES A. (2000). Propagação de Ondas Acústicas na Madeira. In: VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, São Carlos, 2000. São Carlos, IBRAMEM/LaMEM. p.35.
4. SANTOS, A. C. ; SZÜCS, C. A.; DÍAZ, A.D;TELES, C.D.M. (2002). Influência do ângulo de inclinação das fibras da madeira na propagação do ultra-som. In: VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Uberlândia, 2002. IBRAMEM/LaMEM.
5. EMERSON, N. R. ; POLLOCK, D. G. ; KAINZ, J. A. ; FRIDLEY, K. J. ; MCLEAN, D. L. ; ROSS, R. J. (1998). Nondestructive Evaluation Techniques for Timber Brides. In: 5<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering. Montreux, Switzerland.
6. GONÇALVES, R.; PUCCINI, C.T. (2000). Utilização do ultra-som na avaliação de aspectos de qualidade da madeira. In: VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, São Carlos, 2000. São Carlos, IBRAMEM/LaMEM
7. WOLFE, R. (2000). Research challenges for structural use of small-diameter round timbers. Forest Products Journal. Vol. 50. N°2.
8. MANTILLA CARRASCO, E.V; AZEVEDO JUNIOR, A.P. (2002). Princípios gerais de propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras. In: VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Uberlândia, 2002. IBRAMEM/LaMEM.
9. COSTA, O. L.; R. GONÇALVES (2002). Influência da umidade na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira de *Pinus sp*, nas direções radial, tangencial e longitudinal. In: VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Uberlândia, 2002. IBRAMEM/LaMEM.
10. SALES, A.; PELIZAN, T. R.; OLIVEIRA, F. G. R.; CANDIAN, M.;LUCCHETTE, F.F.;SALGON, J.F.; MILLER, K.P. (2004). avaliação de propriedades mecânicas de peças roliças de eucalipto por meio de ultra-som. In: IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Cuiabá, 2004. IBRAMEM/LaMEM.
11. OLIVEIRA, F. G. R. (2001). Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som. São Carlos, Dissertação (Mestrado) – EESC, USP.
12. BUCUR, V.; BÖHNKE, I. (1994). Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. Ultrasonics, v. 32, n. 5, p.385-390.
13. BARADIT, E. ; FUENTEALBA, C. (2000). Determinacion de las Constantes Elásticas del *Pinus radiata* por Ultrasonido. VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, São Carlos, SP.
14. ASTM D4761(1996). Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material. American Society of Testing and Materials: West Conshohoken, PA.

## ULTRASONIC GRADING OF PINUS DIMENSION LUMBER

### ABSTRACT

Abstract: Because of wood to be a material generate by nature, it present great variability in its mechanical properties. In this sense, the structural gradind of lumber is indispensable to warrant its rational utilisation and with the same safety level of others structural materials as steel and concrete. Several techniques and equipments exist to mechanical grading of lumber. All them employ a predictor to estimate the strength of material. In the ultra-sonic method, the velocity of wave propagation is used as predictor of modulus of elasticity (MOE). This method present in literature with a good alternative to grading lumber, above all when the structure to be in use. The aim of this work is verify the precision of ultra-sonic technique in measurement of longitudinal MOE ( $E_M$ ) of lumber. In the tests were used 600 lumber of Pinus sp harvested in a mill localized in city of Lages-SC. The statistic tests presents a good correlation between the data, showing the eficiencia of ultra-sonic equipment in grading of lumber.

Key-words: *lumber, non-destructive evaluation, grading.*