



## CLASSIFICAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA DE USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL COM EMPREGO DE TÉCNICAS NÃO-DESTRUTIVAS

**Marcela Candian (1); Almir Sales (2); Fabiana Goia Rosa de Oliveira (3); Viviane de Salles Cardin (4)**

(1) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de São Carlos, Brasil – e-mail: marcela\_candian@yahoo.com.br

(2) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de São Carlos, Brasil – e-mail: almir@power.ufscar.br

(3) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de São Carlos, Brasil – e-mail: fabiana@sc.usp.br

(4) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de São Carlos, Brasil – e-mail: g243795@polvo.ufscar.br

### RESUMO

**Proposta:** As peças estruturais de madeira podem ser classificadas por meio da utilização de técnicas não-destrutivas, as quais podem melhorar o processo de avaliação mecânica, não sendo necessário a extração de corpos-de-prova. Dentre as técnicas de avaliação não-destrutiva, podem se destacar as técnicas de ultra-som e vibração transversal. O objetivo deste trabalho é verificar a correlação entre o módulo de elasticidade, obtido na flexão estática e o módulo de elasticidade dinâmico, obtido através de ensaios de ultra-som e de vibração transversal. **Método de pesquisa/Abordagens:** Na metodologia experimental foram realizados estudos com a espécie *Pinus hondurensis*, as quais foram classificadas mecanicamente utilizando as técnicas de vibração transversal e ultra-som. Simultaneamente foram realizados ensaios de flexão estática. **Resultados:** Os resultados deste trabalho permitem verificar que existe uma boa correlação entre os valores obtidos com as técnicas não-destrutivas de ultra-som e vibração transversal e os valores obtidos através de ensaios estáticos. **Contribuições/Originalidade:** Este trabalho busca estimular e fomentar a cultura de classificação de madeira para estruturas no meio técnico, da mesma forma que outros materiais como o concreto e o aço.

Palavras-chave: classificação mecânica, madeira, ultra-som, vibração transversal.

### ABSTRACT

**Propose:** The structural wooden pieces can be classified by means of the use of nondestructive techniques, which can improve the mechanics evaluation, not being necessary the extraction of specimens. Amongst the used techniques of nondestructive evaluation, the techniques of ultrasound and transversal vibration can be distinguished. The objective of this work is to verify the correlation enters the modulus of elasticity in static bending, gotten in the static testing and the dynamic modulus of elasticity, gotten in the tests of ultrasound and transversal vibration. **Methods:** In the experimental methodology they were carried through studies with *Pinus hondurensis*, which were classified using the techniques of transversal vibration and ultrasound. Simultaneously they were carried through tests of static bending. **Findings:** The results of this work allow to verify that a good correlation exists enters the values gotten with the nondestructive techniques of ultrasound and transversal vibration and the values gotten through static tests. **Originality/value:** This work searches to stimulate and to foment the culture of wooden classification for structures in the way technician, in the same way that other materials as the concrete and the steel.

Keywords: mechanics classification, wood, ultrasound, transversal vibration.

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico, de origem vegetal, sendo uma matéria-prima inesgotável, pois se encontra em contínua formação sob a forma de árvores, em florestas naturais ou florestas artificiais resultantes de reflorestamento. Pode-se considerar a madeira como o mais antigo material de construção utilizado pelo homem. Sua utilização precede o uso da pedra, tendo sido utilizada nas construções palafíticas. Mesmo com os meios escassos existentes, a madeira era bastante empregada pela população primitiva devido a sua facilidade de obtenção e facilidade de se adaptar aos fins previstos.

Diferentemente de outros materiais homogêneos e isotrópicos como os metais, os plásticos e as cerâmicas, cujas propriedades mecânicas são conhecidas e rigorosamente controladas por processos de produção, a madeira é gerada pela natureza e devido a esta característica apresenta grande variabilidade em suas propriedades mecânicas (CARREIRA *et al.*, 2004).

Devido a esta elevada variabilidade das propriedades mecânicas da madeira, o uso racional desta pode ser alcançado com a classificação de todas as peças de madeira a serem empregadas. A classificação de peças de madeira permite a melhoria da eficiência e qualidade das estruturas de madeira, tais como, pontes e passarelas.

Com a classificação mecânica da madeira é possível majorar o coeficiente  $K_{mod,3}$ , resultando em um ganho imediato de resistência, que é de 25% na resistência (CARREIRA *et al.*, 2004).

Os coeficientes de modificação  $K_{mod}$  afetam os valores de cálculo das propriedades da madeira em função da classe de carregamento da estrutura, da classe de umidade admitida, e do eventual emprego de madeira de segunda qualidade (NBR 7190, 1997).

O coeficiente de modificação  $K_{mod}$  é formado pelo produto:

$$K_{mod} = K_{mod,1} \cdot K_{mod,2} \cdot K_{mod,3} \quad (\text{eq. 1})$$

O coeficiente parcial de modificação  $K_{mod,1}$ , leva em conta a classe de carregamento e o tipo de material empregado. O coeficiente de modificação  $K_{mod,2}$ , leva em conta a classe de umidade e o tipo de material empregado.

O coeficiente de modificação  $K_{mod,3}$ , leva em conta se a madeira é de primeira ou segunda categoria. No caso de madeira de segunda categoria, admite-se  $K_{mod,3} = 0,8$ , e no caso de primeira categoria,  $K_{mod,3} = 1$ .

A madeira somente pode ser considerada de primeira categoria se todas as peças forem classificadas como isentas de defeitos, através de método visual normalizado, além de serem submetidas a uma classificação mecânica que garanta uma homogeneidade da rigidez das peças que compõe o lote de madeira a ser empregado. Não é possível realizar a classificação da madeira como sendo de primeira categoria, sem a realização da classificação mecânica. Por precaução para as coníferas na forma de peças estruturais maciças de madeira serrada, deve ser empregado o valor de  $K_{mod,3}$  igual a 0,8, para levar em consideração a presença de nós, que não são detectados pela classificação visual (NBR 7190, 1997).

A madeira tem suas propriedades atualmente avaliadas pelo emprego de métodos destrutivos, que utilizam corpos-de-prova para a avaliação. Uma amostragem incorreta pode acarretar resultados não coerentes, e em alguns casos o corpo-de-prova pode não ser representativo de um lote de madeira.

Uma melhor avaliação pode ser realizada utilizando-se de métodos não-destrutivos, pois esta avaliação permite a avaliação no próprio elemento, sem a necessidade de extração de corpos-de-prova. 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).

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 (BUCUR, 1995).

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.

A hipótese fundamental para a avaliação não-destrutiva da madeira, propõe 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 estático deste material. A nível microscópico, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a elasticidade estática. Tais propriedades são observáveis como frequência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade do som. 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 (JAYNE, 1959).

Existem diversas técnicas de avaliação não-destrutiva que são empregadas para a classificação da madeira, dentre as quais podem se destacar: a classificação visual, o ultra-som e a vibração transversal.

A classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas das peças estruturais diferem das mesmas propriedades de corpos-de-prova isentos de defeitos, devido suas características que podem ser observadas, julgando as peças visualmente (KRESTSCHMANN; GREEN, 1999).

A classificação visual pode ser definida como a classificação da resistência baseada em relações estatísticas entre fatores visuais e a capacidade de carregamento, considerando as duas principais desvantagens: a impossibilidade de redigir um conjunto de regras cobrindo todas as complexas combinações de fatores de resistência de uma peça, e que as propriedades que são relacionadas intimamente com a resistência são apenas avaliadas visualmente, tais como a densidade e o módulo de elasticidade (BLASS; GARD, 1994).

De toda madeira produzida na América do Norte, cerca de 95% a 98% ainda é classificada apenas visualmente, sendo estimada em 235.000.000 m<sup>3</sup>/ano de madeira classificada visualmente, correspondendo a um valor aproximado de 10 bilhões de dólares (MADSEN, 1992).

A técnica utilizando o ultra-som se trata de um fenômeno físico que auxilia na determinação da resistência e rigidez de peças de madeira bem como possibilita a detecção de aspectos de qualidade como, por exemplo, nós e medulas (PUCCINI *et al.*, 2002).

O ultra-som é uma das novas gerações de técnicas não-destrutivas, baseada em propagação de ondas, tendo este método uma larga extensão de aplicação desde a própria árvore até os produtos finais da madeira (SANDOZ, 1993).

A técnica de ultra-som apresenta diversas vantagens tais como: baixo custo de aquisição do equipamento quando comparado com o custo de máquinas de classificação automática, facilidade de treinamento da mão-de-obra para a utilização, pode ser utilizada pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos através de uma maior uniformidade na matéria-prima e em seus derivados.

A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando a técnica de ultra-som é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade (OLIVEIRA, 2005).

O ultra-som se apresenta como um processo de análise de diversificada finalidade, variando desde a determinação da existência de nós, presença de ataque de microorganismos ou insetos, direcionamento das fibras, decomposição, passando pela avaliação de elementos estruturais de madeira em uso, até a determinação de parâmetros como módulos de elasticidade e ruptura (GORNIK; MATOS, 2000).

A avaliação não-destrutiva com o emprego de vibração transversal é baseada na relação existente entre a rigidez e a frequência natural de vibração (CARREIRA *et al.*, 2004).

A técnica de vibração transversal foi um dos primeiros métodos não-destrutivos investigados para a determinação do módulo de elasticidade da madeira. Apesar de sua concepção simples, e a despeito dos grandes avanços obtidos nessa área com outros métodos, o método revela-se como de grande potencial de aplicação, sobretudo pela precisão do modelo matemático a ele associado e pela possibilidade de sua aplicação em peças de dimensões estruturais (*in-grade testing*) (BALLARIN *et al.*, 2002).

## 2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo verificar a acuracidade das técnicas de vibração transversal e ultra-som comparativamente aos valores obtidos em ensaios estáticos, além de calibrar o coeficiente de modificação ( $K_{mod,3}$ ) da NBR 7190 para as técnicas de ultra-som e vibração transversal.

## 3 METODOLOGIA

Foram empregadas 12 peças de madeira da espécie *Pinus hondurensis* com dimensões aproximadas de 5,0 cm x 15,0 cm x 430 cm, as quais foram classificadas mecanicamente utilizando as técnicas de ultra-som e vibração transversal, para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ). Simultaneamente aos ensaios com ultra-som e vibração transversal realizou-se a classificação visual das peças e ensaios de flexão estática (MOE). O teor de umidade encontrado nas peças foi em torno de 12%, portanto não foi necessária a correção das propriedades mecânicas em função da umidade.

Para a realização da classificação visual, cada peça foi avaliada em relação à proporção da área da seção transversal ocupada pelos nós mais críticos, bem como a inclinação das fibras, presença de rachas e fendas e em relação à quantidade de anéis de crescimento.

A classificação mecânica utilizando a técnica de ultra-som foi realizada utilizando o equipamento Sylvatest com transdutores de 22 kHz. Este instrumento é equipado com dois transdutores piezo-eletrônicos, sendo que um gera a onda (transmissor) e o outro recebe a onda (receptor) e ambos trabalham diretamente em contato com a madeira. O equipamento de ultra-som Sylvatest está apresentado na Figura 1.



Figura 1 - Equipamento de ultra-som Sylvatest

O equipamento permite registrar o tempo de passagem da onda, em microssegundos, que possibilita o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico por meio da expressão:

$$E_{d, us} = \delta \times V^2 \quad (\text{eq. 2})$$

Sendo:

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico ( $10^{-6}$  MPa)

$\delta$  = massa específica da madeira ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  = velocidade da onda longitudinal (m/s)

A velocidade pode ser obtida pela expressão dada a seguir.

$$V = \frac{d}{t} \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:

$V$  = velocidade (m/s)

$d$  = distância entre os transdutores (m)

$t$  = tempo de propagação (s)

Foram realizadas três leituras de tempo em microssegundos em cada peça, e a partir destas realizou-se a média das leituras. Com o tempo médio foi possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{d, us}$ ).

A avaliação não-destrutiva por meio da técnica de vibração transversal que foi empregada neste trabalho se baseia na relação existente entre a rigidez e a frequência natural de vibração. Este método consiste em aplicar um golpe em uma peça de madeira biapoiada, tendo um apoio em forma de lâmina em uma de suas extremidades e uma célula de carga na outra. A peça de madeira irá vibrar na sua frequência natural de vibração até que a vibração cesse em função do amortecimento. A frequência em que a peça irá vibrar dependerá do módulo de elasticidade da madeira, do vão, da densidade e do tipo de apoio. A célula de carga capta a vibração da viga e transfere o sinal a um circuito condicionador que amplifica e filtra o mesmo. Amplificado o sinal, o mesmo é digitalizado e enviado a um microcomputador que determina a frequência do sinal oscilante. O módulo de elasticidade dinâmico é determinado pela expressão:

$$MOE = \frac{fr^2 x W x L^3}{2,46 x I x g} \quad (\text{eq. 4})$$

Sendo:

$fr$  = frequência de ressonância (Hz);

$W$  = massa da viga (Kg);

$L$  = vão da peça (m);

$I$  = momento de inércia da seção transversal ( $\text{cm}^4$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

A Figura 2 ilustra um equipamento para a determinação do módulo de elasticidade por meio da vibração transversal.



**Figura 2 - Equipamento de vibração transversal**

Aplicou-se um impacto no centro de cada viga e a partir da vibração da peça foram fornecidos pelo equipamento os valores de frequência e massa da peça. Com as dimensões das peças e com o valor de vão empregado foi possível determinar o valor do módulo de elasticidade dinâmico de cada peça em estudo.

Simultaneamente aos ensaios descritos acima foram realizados ensaios de flexão estática (MOE) para obtenção de correlações entre os valores do módulo de elasticidade obtidos. As peças foram dispostas na posição de menor inércia, e foram submetidas a um carregamento na região central, sendo realizadas seis leituras de deformação.

O MOE à flexão em relação ao eixo de menor inércia foi determinado utilizando-se a seguinte expressão:

$$MOE = \frac{\Delta F x L^3}{48 x \Delta v x I} \quad (\text{eq. 5})$$

Sendo:

MOE = Módulo de elasticidade (MPa);

$\Delta F = (F_2 - F_1)$ , Incremento de carga (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>).

## **4 ANÁLISE DE RESULTADOS**

Neste item estão analisados os resultados obtidos na realização dos ensaios para a espécie *Pinus hondurensis*, utilizando as técnicas de ultra-som e vibração transversal, os quais foram comparados com resultados obtidos no ensaio de flexão estática para verificação da acuracidade das técnicas não-destrutivas em estudo. Também são apresentados valores de  $K_{\text{mod}, 3}$  em função das técnicas de ultra-som e de vibração transversal.

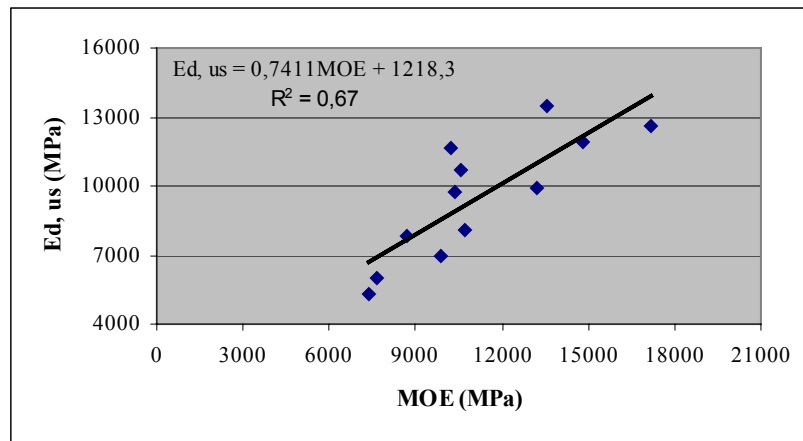
### **4.1 Correlação entre o módulo de elasticidade longitudinal e o módulo de elasticidade dinâmico obtido com a técnica de ultra-som**

Na Tabela 1 estão apresentados os valores referentes à densidade, à velocidade ultra-sônica na direção longitudinal, ao módulo de elasticidade dinâmico e também ao módulo de elasticidade longitudinal, para as vigas em estudo.

**Tabela 1 - Valores máximos, mínimos e médios, desvios padrões e coeficientes de variação**

Espécie		$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_{LL}$ (m/s)	$E_{d, us}$ (MPa)	MOE (MPa)
<i>Pinus hondurensis</i>	<b>Valor máximo</b>	603,33	5004,2	13442,8	17148,6
	<b>Valor mínimo</b>	353,33	3607,91	5316,1	7351,7
	<b>Média</b>	494,72	4363,73	9514	11193,6
	<b>CV (%)</b>	18,58	11,73	28,09	26,35

Com os pares de valores dos módulos de elasticidade dinâmico e longitudinal, obtidos para cada uma das vigas, realizou-se a regressão linear, apresentada no gráfico a seguir.



**Gráfico 1 - MOE versus  $E_{d, us}$**

O coeficiente de determinação  $R^2 = 0,67$  obtido para a espécie *Pinus hondurensis* é significativo, estando compatível com os valores usualmente encontrados na literatura, permitindo assim afirmar que o método não-destrutivo por meio de ultra-som pode ser utilizado para avaliar as propriedades mecânicas da espécie em questão com dimensões estruturais.

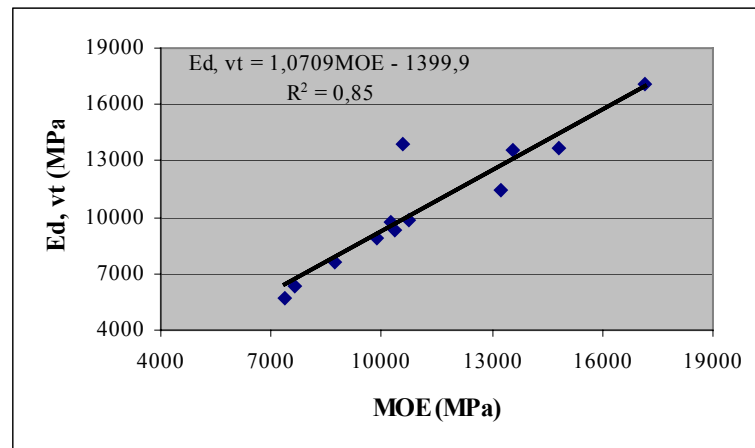
#### **4.2 Correlação entre o módulo de elasticidade longitudinal e o módulo de elasticidade dinâmico obtido com a técnica de vibração transversal**

Na Tabela 2 estão apresentados os valores referentes ao módulo de elasticidade dinâmico e também ao módulo de elasticidade longitudinal obtidos para as vigas em estudo.

**Tabela 2 - Valores máximos, mínimos e médios de módulo de elasticidade dinâmico e longitudinal e coeficientes de variação**

Espécie		$E_{d, vt}$ (MPa)	MOE (MPa)
<i>Pinus hondurensis</i>	<b>Valor máximo</b>	17089,7	17148,6
	<b>Valor mínimo</b>	5696,6	7351,7
	<b>Média</b>	10587	11193,6
	<b>CV (%)</b>	32,37	26,35

Com os pares de valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático, obtidos para cada uma das vigas, realizou-se a regressão linear, apresentada no gráfico a seguir.



**Gráfico 2 - MOE versus  $E_{d, vt}$**

O valor do coeficiente de determinação obtido ( $R^2 = 0,85$ ) está compatível com os usualmente encontrados na literatura, e são considerados satisfatórios, mostrando a validade da técnica de vibração transversal na avaliação das propriedades mecânicas da madeira.

#### **4.3 Valores de $K_{mod, 3}$ em função da utilização da técnica de ultra-som e da técnica de vibração transversal**

As peças em estudo foram classificadas visualmente e se enquadraram na classe C3, sendo esta a pior condição de classificação de uma peça estrutural. Assim foi determinado através da variação percentual média dos valores obtidos de módulo de elasticidade, o valor de  $K_{mod, 3}$  para a classe C3 e a partir desta determinou-se o valor de  $K_{mod, 3}$  para as demais classes (SS, C1 e C2). A variação percentual para cada viga foi determinada utilizando-se da seguinte expressão:

$$\text{Variação percentual (\%)} = \frac{|MOE - E_d|}{MOE} \times 100 \quad (\text{eq. 6})$$



Após a determinação da variação percentual de cada viga, determinou-se a média da variação percentual das vigas para cada uma das técnicas em estudo, os valores obtidos da variação percentual média estão apresentados Tabela 3.

**Tabela 3 – Variação percentual média do módulo de elasticidade**

<b>Técnica não-destrutiva</b>	<b>Variação percentual média</b>
Ultra-som	17,3%
Vibração transversal	9,5%

Para uma peça pertencente a classe SS que é a melhor condição de classificação de uma peça estrutural, se esta for classificada visualmente e através de uma classificação mecânica confiável, sendo neste estudo empregado o ensaio destrutivo de flexão estática, o valor de  $K_{mod,3}$  corresponde a 1. Considerando uma variação de 5% para menos conforme a condição de classificação da peça vai piorando, obtêm-se os valores de 0,95 para a classe C1, 0,90 para a classe C2 e 0,85 para a classe C3. Como todas as vigas em estudo se enquadraram na classe C3, e para esta classe o valor de  $K_{mod,3}$  corresponde a 0,85 quando se classifica a peça visualmente e mecanicamente pelo ensaio de flexão estática, para a determinação de  $K_{mod,3}$  para esta classe quando se emprega as técnicas de ultra-som e vibração transversal como classificação mecânica, aplicou-se sobre o valor de 0,85 a variação percentual média obtida para cada uma das técnicas, reduzindo-se assim o valor de  $K_{mod,3}$ , e para as demais classes aplicou-se um acréscimo de 5%. Essa redução do  $K_{mod,3}$  para as duas técnicas não-destrutivas em estudo, ocorre pois as técnicas de ultra-som e de vibração transversal apresentam uma menor confiabilidade em relação aos ensaios destrutivos. Na Tabela 4 são apresentados os valores obtidos de  $K_{mod,3}$  para cada uma das técnicas em estudo: ultra-som e vibração transversal, de acordo com a classe em que a espécie se enquadra, além de valores de  $K_{mod,3}$  para o emprego da classificação mecânica por flexão estática.

**Tabela 4 - Valores de  $K_{mod,3}$  para o emprego do ensaio de flexão estática, ultra-som e vibração transversal**

<b>Classe</b>	<b><math>K_{mod,3}</math> (classificação visual + flexão estática)</b>	<b><math>K_{mod,3}</math> (classificação visual + ultra-som)</b>	<b><math>K_{mod,3}</math> (classificação visual + vibração transversal)</b>
SS	1	0,85	0,92
C1	0,95	0,80	0,87
C2	0,90	0,75	0,82
C3	0,85	0,70	0,77

Verifica-se que entre as duas técnicas não-destrutivas em estudo, a técnica de vibração transversal apresentou valores superiores de  $K_{mod,3}$ , uma vez que apresentou uma menor variabilidade do módulo de elasticidade em relação ao módulo de elasticidade obtido na flexão estática, mostrando que esta técnica apresenta uma melhor acuracidade quando comparada à técnica de ultra-som.

## 5 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento do presente trabalho são possíveis as seguintes conclusões:

- As técnicas de ultra-som e de vibração transversal revelam-se como importante ferramenta para inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira;
- Verifica-se que o coeficiente de correlação obtido com a técnica de vibração transversal ( $R^2=0,85$ ) foi superior ao valor obtido com a técnica de ultra-som ( $R^2=0,67$ ), mostrando assim que a técnica de vibração transversal apresenta menor variabilidade para estimar o módulo de elasticidade comparativamente à técnica de ultra-som. A técnica de vibração transversal apresentou valores superiores de  $K_{mod,3}$  em relação a técnica de ultra-som, pois esta permite

uma classificação mais próxima dos valores reais. Ambas as técnicas podem ser utilizadas no recebimento e classificação de peças estruturais de madeira, com a vantagem adicional de permitir o exame individual das peças.

- Com a proposição de valores de  $K_{mod,3}$  a partir do desenvolvimento da presente experimentação, o meio técnico terá importante contribuição no sentido de especificar e dimensionar projetos de estruturas de madeira com maior confiabilidade. Além disso, estes resultados representam importante contribuição para a revisão da NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira.

## 6 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- BALLARIN, A. W.; TARGA, L. A.; PALMA, H. A. L. **Ensaio não-destrutivo de vibração transversal na avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento**. VIII Encontro Brasileiro de Madeira. Uberlândia – MG, 2002.
- BLASS, H.; GARD, W. (1994). **Machine strength grading of timber**. In: Pacific Timber Engineering Conference. Gold Coast Australia, Proceedings, p.598-603.
- BUCUR, V. **Acoustics of wood**. New York, CRC Press Inc, 1995.
- CARREIRA, M. R.; DIAS, A.A.; CHEUNG, A. B.; CALIL Jr, C. **Classificação estrutural de *Pinus sp* por vibração transversal**. IX Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. Cuiabá, 2004.
- GORNIK, E.; DE MATOS, J. L. M. **Métodos não-destrutivos para determinação e avaliação de propriedades da madeira**. In: VII Encontro Brasileiro em Madeira e em Estrutura de Madeira, São Carlos. Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeira e em Estrutura de Madeira. São Carlos: USP, 2000.
- JAYNE, B. A. **Vibrational properties of wood as indices of quality**. Forest Products Journal. v. 9, n. 11, p. 413-416, 1959.
- KRESTSCHMANN, D. E.; GREEN, D. W. **Lumber stress grades and design properties**. In: Forest Products Laboratory, Wood handbook: wood as engineering material. Report FPL-GTR-113. Madison. Cap.6, p.6-1/6-14, 1999.
- MADSEN, B. **Structural behavior of timber**. Vancouver: Timber Engineering, 1992.
- OLIVEIRA, F. G. R. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para ensaios não-destrutivos em madeira serrada por meio de ondas de ultra-som**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.
- PUCCINI, C. T.; GONÇALVES, R.; MONTEIRO, M. E. A. **Avaliação estatística da variação da velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira em presença de defeitos**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.3, p.499-503, Campina Grande, PB, 2002.
- ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. **Nondestructive evaluation of wood**. Forest Products Journal. v. 48, n.1, p. 14-19, 1989.
- SANDOZ, J. L. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. **Wood Science and Technology**. v. 27. p.373-380, 1993.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao CNPq, ao LaMEM/USP e a UFSCar.