

CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PEÇAS DE MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* POR MEIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDO POR ONDAS DE TENSÃO LONGITUDINAIS

STRUCTURAL GRADING OF *PINUS ELLIOTTII* TIMBER USING THE MODULUS OF ELASTICITY OBTAINED BY LONGITUDINAL STRESS WAVE METHOD

Jairo Ribas de Andrade Junior ⁽¹⁾, **Antônio Alves Dias** ⁽²⁾

(1) Mestrando em Engenharia Civil (Estruturas), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil

(2) Prof. Dr., Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil
Endereço de contato: dias@sc.usp.br

Código de identificação: T3-03

Resumo

Peças de madeira com dimensões estruturais apresentam irregularidades e defeitos de crescimento, que podem reduzir sua resistência, sendo que a qualidade da sua classificação visual depende da experiência do classificador. Adicionalmente aos métodos de ensaio estáticos, podem ser aplicados métodos dinâmicos baseados em medições das frequências naturais do material, com vistas à determinação do módulo de elasticidade dinâmico da madeira, com a finalidade de estimar a sua classe de resistência estrutural. O objetivo deste trabalho foi classificar as peças de madeira visualmente e avaliar os valores de módulo de elasticidade de 260 peças estruturais de madeira de reflorestamento da espécie *Pinus elliottii*, provenientes da região do sudoeste paulista, para aplicação em estruturas. A classificação dinâmica foi feita por meio de ensaios não-destrutivos de vibração longitudinal, utilizando o aparelho Brookhuis Micro Timber Grader (MTG), sendo os resultados comparados com ensaios de flexão estática tradicionais. Os resultados obtidos desta classificação dinâmica são indicados para a classificação estrutural de todas as peças de madeira na saída da serraria, contribuindo para o enquadramento da madeira em diferentes classes estruturais de acordo com a ABNT NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira.

Palavras chave: estruturas de madeira; ensaio não-destrutivo; madeira laminada colada; construção industrializada

Abstract

*Wood pieces at structural sizes have growth defects and irregularities, which can reduce its strength and stiffness compared with small clear wood specimens. The visual stress-grading of wood depends on the classifier experience and of pre-determined rules. In addition to the static testing methods may be applied dynamic methods based on measurement of the natural frequencies and density of the material to determine the modulus of elasticity (MOE) of the wood with non-destructive methods, which can be used to estimate the wood structural strength class. The objective of this work is to grade visually structural size specimen of wood and evaluate the stiffness values of wood reforestation species of *Pinus elliottii*, for use in structures, by nondestructive testing of longitudinal vibration, using the portable device Brookhuis Micro Timber Grader (MTG) and compare the results with static bending tests. This method allows the structural grade of all the pieces of wood in the output of the sawmill, with a fast and practice way, contributing to the structural strength classes of wood according to the Brazilian Standard ABNT NBR 7190 - Wooden Structures Project.*

Keywords: timber structures; non-destructive examination; glued laminated timber; industrialization building

1. INTRODUÇÃO

A madeira serrada de dimensões estruturais é um material heterogêneo, que apresenta defeitos devido ao crescimento (nós, desvios das fibras, etc.), que reduzem a resistência do material.

Um ensaio mecânico não-destrutivo de um material deve ser baseado em correlações conhecidas entre as resistências e outras propriedades que podem ser avaliadas, sem danificar o material. No caso da madeira, a propriedade mecânica que é estimada, na maioria dos casos, é o módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade pode ser obtido por meio de ensaios de flexão estática que são de execução mais difícil e custosa. Métodos dinâmicos como vibração transversal, vibração longitudinal e ultrassom, não destrutivos são uma alternativa para a obtenção do módulo de elasticidade.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização do método de ensaio não destrutivo, por meio de vibração longitudinal, com o uso do aparelho portátil MTG *BrookHuis*, para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais, utilizando um lote de *Pinus elliottii*, classificado visualmente, segundo as regras do SPIB (*Southern Pine Inspection Bureau*).

A classificação mecânica e a estimativa das propriedades mecânicas da madeira utilizada em estruturas constituem um ponto crítico para o dimensionamento e construção com este material. As peças de madeira com dimensões estruturais contêm defeitos naturais que interferem nas propriedades mecânicas do material, proporcionando comportamentos diferentes dos obtidos nos ensaios de peças pequenas e livres de defeitos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A norma norte-americana *American Society for Testing and Materials* (ASTM D4761), trata especificamente de ensaios estáticos para peças estruturais, com os procedimentos de ensaio para madeira serrada na flexão. Vigas com dimensões estruturais são sujeitas à flexão em quatro pontos, bi apoiadas e com a aplicação de cargas em dois pontos, e razão entre vão entre apoios e espessura da peça entre 18 e 21 vezes. Este tipo de carregamento, não tem interferência significativa da tensão de cisalhamento nos valores do MOE [1].

Métodos dinâmicos, como a vibração longitudinal, baseados em medições das frequências naturais podem ser utilizados para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, *Ed*. Uma vantagem das medições dinâmicas é a curta duração do ensaio. Em geral, o módulo de elasticidade obtido pelos ensaios de vibração é um pouco maior do que os dos ensaios estáticos, mas as diferenças são pequenas, da ordem de 5% a 15% [2].

A classificação visual da madeira depende exclusivamente da estimativa da resistência mecânica a partir de características externas visíveis, como exemplo, os nós e quantidade dos anéis de crescimento. Por outro lado, na classificação de resistência mecânica é possível, em determinados métodos, medir o módulo de elasticidade, a densidade, o teor de umidade e a proporção dos nós. A precisão com que as propriedades podem ser estimadas permite atingir graus mais elevados de qualidade [3].

A classificação visual de peças estruturais de madeira é realizada por meio de regras de classificação. Na América do Norte, essas regras são escritas por uma associação de indústrias que representam uma área onde as espécies específicas são recolhidas, a *Southern Pine Inspection Bureau* (SPIB). O *Pinus elliottii*, se enquadra no grupo Southern Pine classificado segundo as regras do (SPIB). Os critérios para a limitação dos defeitos descritos em todas as regras de classificação visual em vigor na América do Norte [4].

O SPIB divide a classificação visual em 4 classes, para especificação em projetos, as peças enquadradas na Classe Visual SS são indicadas para os usos principais da estrutura, onde sejam requeridas as maiores cargas. As peças das classes visuais S1 e S2 são indicadas para uso

secundário nas estruturas e as peças da classe visual S3 ou desclassificadas não são indicadas para uso na estrutura. A medição dos defeitos é realizada visualmente, sem o auxílio de ferramentas complexas.

2.1 Ensaios não destrutivos

Os ensaios não-destrutivos apresentam algumas vantagens na sua aplicação:

- Qualquer amostra pode ser examinada, incluindo elementos estruturais, partes de edificações, árvores em pé ou postes.
- Um corpo de prova pode ser ensaiado diversas vezes sem sofrer danos, isso permite que em cada ensaio, as variáveis sejam alteradas, estudando influências nas propriedades físicas e mecânicas da madeira.
- Diferentes propriedades ensaiadas em uma amostra podem ser correlacionadas.

2.2 Ensaio estático

A força deve ser aplicada em dois pontos situados nos terços do vão entre os apoios, medindo-se a flecha no centro do vão. O MOE é determinado pela Eq. (1).

$$MOE = \frac{23 \cdot \Delta F \cdot L^3}{1296 \cdot \Delta u \cdot I} \quad (1)$$

Sendo:

MOE = Módulo de elasticidade estático (MPa);

ΔF = Incremento da força (N);

L = Vão entre os apoios da viga (mm);

Δu = Incremento do deslocamento (mm);

I = Momento de inércia da seção transversal (mm⁴);

2.3 Vibração longitudinal

A força deve ser aplicada em dois pontos situados nos terços do vão entre os apoios, medindo-se a flecha no centro do vão. O MOE é determinado pela Eq. (1).

$$E_d = \frac{400 \cdot l^2 \cdot f^2 \cdot m}{V} \quad (2)$$

Sendo:

f = Frequência de ressonância fundamental (kHz);

m = massa (g);

l = Vão (mm);

V = Volume (mm³).

2.4 Brookhuis Microelectronics Timber Grader – MTG

O aparelho BrookHuis Micro Timber Grader (MTG) é um dispositivo portátil que utiliza o método de vibração longitudinal por ondas de tensão para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico da madeira. Através de um software interno, com a seleção da espécie ensaiada, o MTG estima os valores do módulo de elasticidade à 12% de umidade. Fig. (1).



Figura 1: MTG dispositivo portátil.

A obtenção do módulo de elasticidade dinâmico a partir da frequência natural é a base de formulação utilizada pelo MTG. O equipamento aplica uma correção para modificar o E dinâmico obtido, em função da espécie ensaiada, resultando em valores estimados do Módulo de Elasticidade (E_{MTG}).

Previamente devem ser informados ao software do MTG, características do corpo de prova como: dimensões, teor de umidade, temperatura e peso. O equipamento portátil deve ser levemente pressionado na extremidade da seção transversal da peça de madeira. Ao pressionar o botão central, o ativador mecânico interno impacta o corpo de prova, então o sensor de onda de tensão grava o sinal da vibração. O software converte esse sinal em resultados (Frequência natural, Módulo de Elasticidade, classe de resistência, etc.). Os resultados são transferidos a um PC / laptop por Bluetooth. Esses resultados podem ser “traduzidos” em um dos muitos padrões internacionais usados para classificação mecânica da madeira. Durante a ação o equipamento portátil não pode ser movimentado [5].

2.5 Trabalhos técnico-científicos sobre obtenção de módulo de elasticidade para madeira

Carreira (2003) [6] classificou visualmente 600 peças de *Pinus sp*, com densidade média de 520 kgf/m³. As peças foram separadas em quatro grupos: Classe de Seleção Estrutural com alta densidade (SS-D), com baixa densidade (SS-ND), Classe secundária densa (Nº2-D) e não-densa (Nº2-ND). As madeiras foram ensaiadas na flexão estática, na vibração transversal e na máquina MSR. Para espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* com seção transversal de 3,5cm x 12,5cm. A estimativa do E por vibração transversal apresentou correlação com o MOE na flexão estática de $R^2 = 0,98$. O E obtido pela máquina MSR apresentou correlação de $R = 0,92$ para o MOE na flexão estática, ocorreu aumento da dispersão com o aumento da densidade.

Segundinho (2012) [7] avaliou a eficácia de métodos de ensaio baseados nas frequências naturais de vibração, com utilização do aparelho *Sonelastic® Stand Alone*, em vigas de *Pinus oocarpa*, sendo 14 peças de dimensões (45x90x2300 mm) com $R^2=0,98$, 30 peças de dimensões (40x240x2010 mm) com $R^2=0,88$ e 30 peças de dimensões (40x240x3050 mm) com $R^2=0,89$. A vibração longitudinal apresentou resultados confiáveis e um método prático, para a obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira, reduzindo o tempo de execução dos ensaios. O módulo de elasticidade na vibração longitudinal foi superior ao MOE em 11,08%, 13,73%, 10,62% respectivamente para as seções ensaiadas.

Horacek e Tippner (2012) [8] avaliaram as propriedades da madeira da espécie *Pinus sylvestris L.*, com massa específica entre 370kgf/m³ e 543kgf/m³, correlacionando o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) estimado pela técnica de onda de tensão longitudinal e propriedades de flexão estática, módulo de elasticidade na flexão estática (MOE). Os resultados apresentaram E_d maior

que o MOE na flexão estática. Existiu correlação significativa $R^2=0,96$ entre o Ed e o MOE na flexão estática.

Segundo Oliveira, Campos e Sales (2002) [9] os valores de MOE dinâmico são mais altos que os valores para MOE estático, com resultados obtidos dos testes dinâmicos 17% maiores que os estáticos.

Os trabalhos apresentados na literatura reforçam a viabilidade dos ensaios para obtenção do módulo de elasticidade por meios dinâmicos, com correlações altas nas estimativas do módulo de elasticidade estático da madeira. Os valores do E dinâmico são superiores aos valores do MOE. Também destaca-se a importância da verificação dos valores de teor de umidade, densidade e também da realização de classificação visual dos defeitos na madeira para complementar a acurácia dos resultados dos ensaios dinâmicos em comparação com os ensaios estáticos normatizados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente foi realizada a classificação visual no lote de *Pinus elliottii*, provenientes da região sudoeste do Estado de São Paulo.

Após a classificação visual, foram realizados os ensaios de vibração longitudinal por ondas de tensão, com determinação do módulo de elasticidade (E_{MTG}) estimado pelo MTG. Em seguida foram realizados os ensaios de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia, sendo determinados os valores de MOE.

Todos os ensaios e procedimentos foram realizados no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP).

3.1 Materiais

Foi adquirido um lote de 260 peças de madeira da espécie *Pinus elliottii*, adquirido na empresa Sguário Madeiras, sendo proveniente da região Sudoeste do Estado de São Paulo, com dimensões nominais de 45mm x 105mm x 2500mm. As peças foram previamente secas em estufa.

3.2 Métodos

Foram determinados os teores de umidade de cada peça ensaiada, com medidor por contato modelo M52 da marca Marrari. E os valores foram corrigidos para a condição padrão de referência de umidade à 12%.

As peças foram classificadas visualmente de acordo com o as regras do SPIB, para determinar o efeito dos defeitos naturais e de processamento que possam afetar o MOE. As peças com deformações excessivas, esmoados e bolsas de resina, foram eliminadas.

Foram limitados os diâmetros dos nós no centro da face larga, nós na borda da face larga, nós na face estreita, inclinação das fibras, presença de fendas, rachas, esmoados e bolsas de resina de acordo com a Tab. (1).

As peças foram distribuídas em 4 classes, SS, S1, S2 e S3, em função do tamanho dos defeitos.

Tabela 1: Limitações dos defeitos em cada classe para peças com seção transversal de 45x105mm.

Classe	Nós		Inclinação das Fibras	Rachas Anelares		Fendas
	Borda	Centro		Passante	Superficial	
SS	9 mm	37 mm	8%	105 mm	600 mm	105 mm
S1	11 mm	47 mm	10%	105 mm	600 mm	105 mm
S2	15 mm	53 mm	12,5%	157 mm	625 mm	157 mm
S3	23 mm	79 mm	25%	416 mm	-	416 mm

Para medição dos defeitos foi elaborada uma régua com dimensões limite para a seção. Fig. (2).



Figura 2: Modelo da régua com os limites de dimensões dos nós.

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido pelo equipamento MTG seguindo os procedimentos apresentados no item 2.4. Fig. (3).



Figura 3: Computador com bluetooth e software de aquisição de dados e display do aparelho.

Conforme apresentado no item 2.2, no ensaio de flexão estática as peças foram apoiadas em suportes rotulados com uma relação (L/h) de 18. A força é aplicada sobre uma viga metálica que divide a carga em dois pontos equidistantes do vão entre os apoios (Fig. 4). A deformação foi medida com um relógio comparador, posicionado no ponto central do vão. O MOE estático foi determinado de acordo com a Eq. (1).

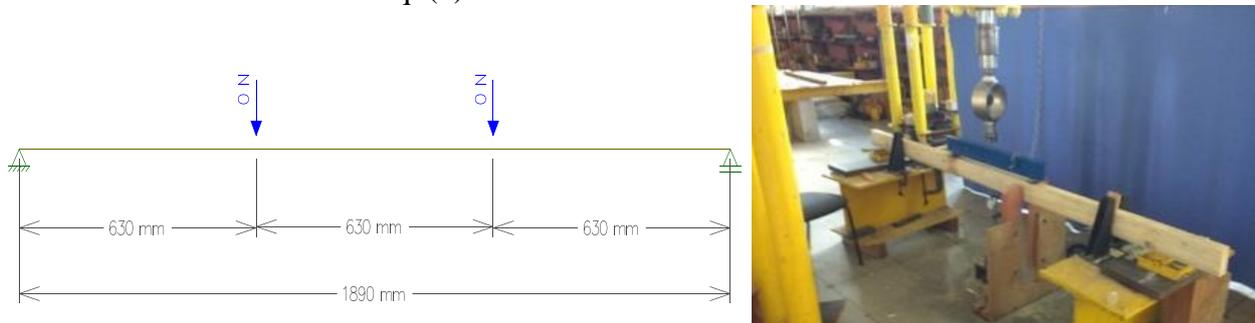


Figura 5: Montagem do ensaio estático para obtenção do MOE.

4. RESULTADOS

O valor médio da umidade das peças foi de 9,5%. O valor médio de densidade aparente à 12% de umidade, para o lote completo foi de 484 kg/m³, variando entre 470 kg/m³ (-2,9%) e 502 kg/m³ (+3,7%) entre as classes visuais.

Das 260 peças do lote, 47 peças (18%) foram eliminadas na classificação visual, restando 213 peças para a determinação das propriedades.

As Tabelas 2 e 3 apresentam as estatísticas descritivas dos resultados obtidos para cada o MOE e para o E_{MTG} considerando o lote completo e cada uma das classes separadamente.

Tabela 3: Estatística descritiva dos resultados de Módulo de Elasticidade na flexão estática.

MOE	Lote Completo	SS	S1	S2	S3
Média (MPa)	7270	8250	7071	7019	6875
Desvio padrão (MPa)	1960	2112	1652	1938	1709
Mínimo (MPa)	3183	4076	3183	3325	3349
Máximo (MPa)	14728	14728	10715	14366	12341
Coeficiente de Variação	27%	26%	23%	28%	25%
Quantidade de peças	213	72	43	42	56

O aparelho MTG calcula por meio da frequência natural o módulo de elasticidade dinâmico, E_{DIN}, e o software interno reduz os valores dinâmicos, por um fator de correção, que variou de 0,9166 à 0,9206, em função da espécie, resultando no valor do E_{MTG}.

Tabela 4: Estatística descritiva dos resultados de Módulo de Elasticidade obtido pelo MTG.

E _{MTG}	Lote Completo	SS	S1	S2	S3
Média (MPa)	7558	8611	7214	7162	7254
Erro padrão (MPa)	143	293	284	322	261
Desvio padrão (MPa)	2203	2489	1861	2084	1950
Mínimo (MPa)	3432	3769	3541	3432	3845
Máximo (MPa)	16006	15999	12545	16006	12831
Coeficiente de Variação	29%	29%	26%	29%	27%
Quantidade de peças	213	72	43	42	56

4.1 Correlação entre o E_{MTG} e o MOE

Para a análise comparativa entre os dados do módulo de elasticidade obtido com o MTG, E_{MTG}, e o módulo de elasticidade obtido pelo ensaio estático, MOE, foi utilizado o modelo de regressão linear simples.

A análise foi feita determinando a equação da regressão linear, o coeficiente de correlação e analisando os resíduos, para verificar o atendimento dos requisitos. Após, foi feita a análise da variância para verificar a condição do modelo ajustado.

A Figura 6 (A) apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{MTG} e o MOE, para os dados do lote completo e (B). o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o E_{MTG}, podendo ser observada a homogeneidade da variância.

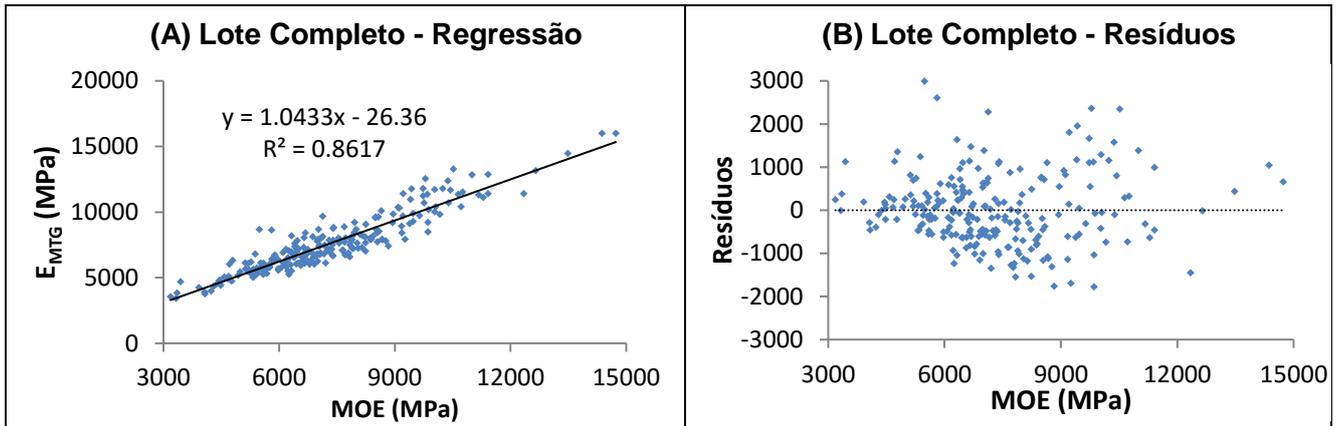


Figura 6: (A) Dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} e (B) Resíduos padronizados.

A Figura 7 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

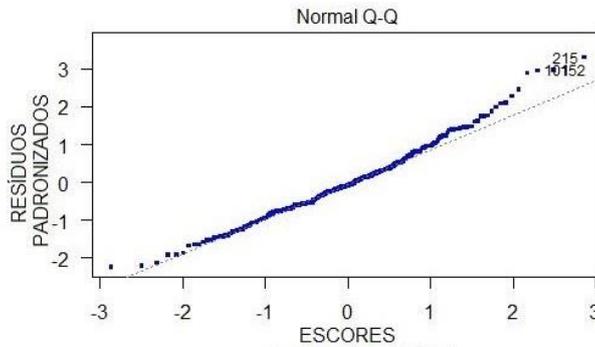


Figura 7: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} do lote completo.

Atendidas as suposições da regressão, foi realizada a análise de variância. Para os graus de liberdade (1,211), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,86. Como o valor calculado de F é igual a 1457,6, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa.

Para as diferentes classes visuais Fig. (8 e 9), foram realizados os mesmos procedimentos estatísticos do lote completo.

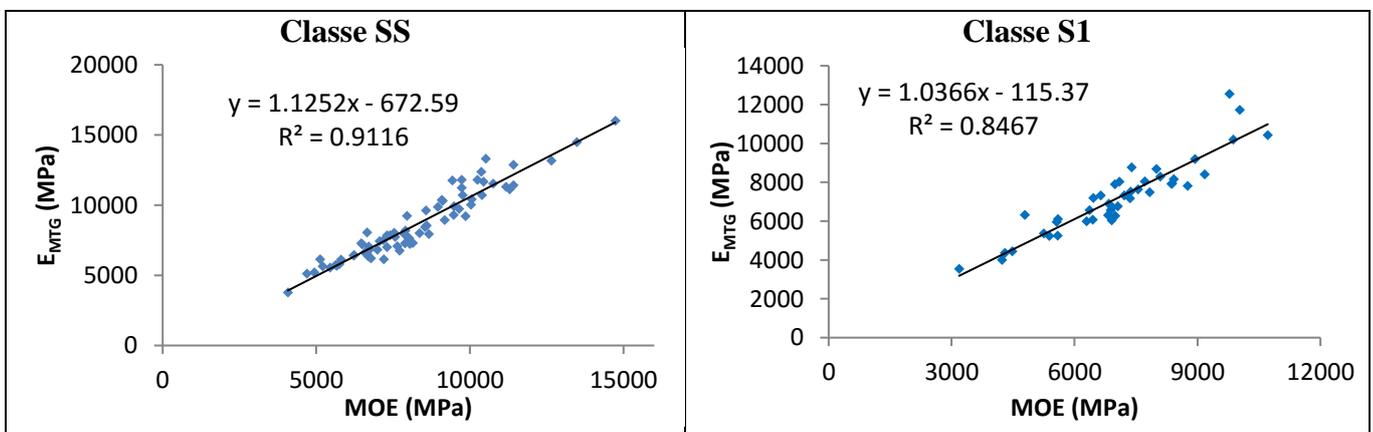


Figura 9: Dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} para as classes visuais SS e S1.

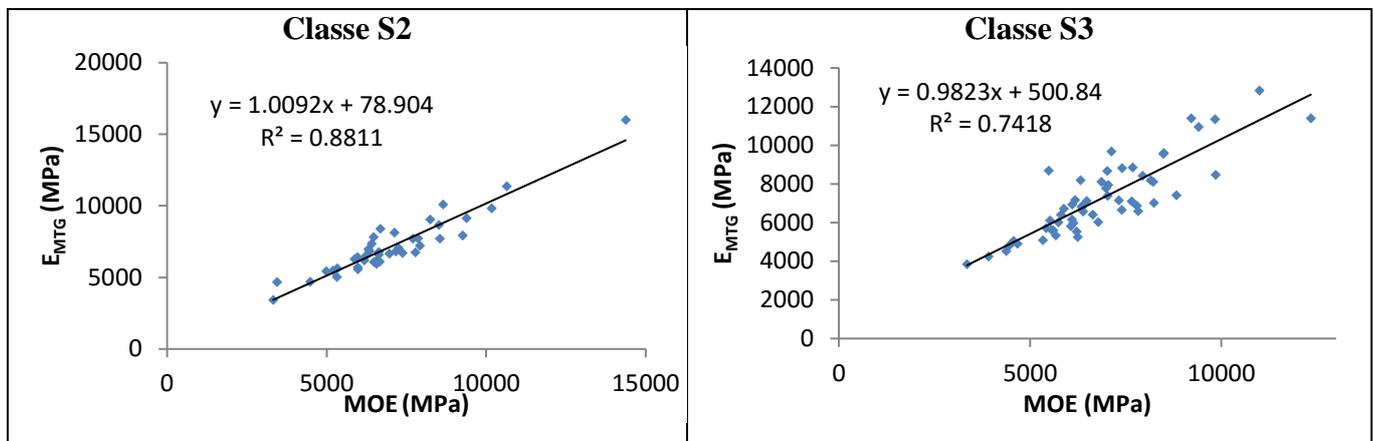


Figura 10: Dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} para as classes visuais S2 e S3.

A Tabela 5 apresenta o resumo dos valores das correlações da regressão linear entre o E_{MTG} e o MOE na flexão estática para as diferentes classes de madeira.

Tabela 5: Correlação da regressão linear entre o E_{MTG} e o MOE.

Classe	Coefficiente de Correlação	Equação
Lote Completo	0,86	1,0433.MOE-26,36
SS	0,91	1,1252.MOE-672,59
S1	0,85	1,0366.MOE-115,37
S2	0,88	1,0092.MOE+78,904
S3	0,74	0,9823.MOE+500,84

5. CONCLUSÃO

O E_{MTG} médio para o lote completo foi 3,96% superior ao MOE na flexão estática. Em cada classe visual, para o *Pinus elliottii* os valores do E_{MTG} foram SS (+4,38%), S1 (+2,02%), S2 (+2,04%) e S3 (+5,50%), sempre superiores ao valor do MOE.

A correlação da regressão linear entre o E_{MTG} e o MOE foi 0,86 para o lote completo e para cada classe: 0,91 (SS), 0,85 (S1), 0,88 (S2) e 0,74 (S3), apresentando boas correlações com o MOE na flexão estática. Foi observada uma maior correlação da regressão linear nas peças da classe SS, havendo uma diminuição na correlação à medida que aumenta a presença dos defeitos naturais. O aparelho portátil de classificação estrutural MTG, por meio da vibração longitudinal apresentou bons resultados para a estimativa do MOE, e é recomendável a utilização do método para a classificação estrutural de peças serradas de madeira.

A técnica pode contribuir para uma maior velocidade de classificação estrutural das peças de madeira, com baixo custo de instalação e podendo ser aplicado nas serrarias ou na classificação das lamelas para melhor racionalização de vigas de madeira laminada colada (MLC), contribuindo para a evolução da classificação no mercado brasileiro de madeiras estruturais, racionalizando a execução das estruturas.

REFERÊNCIAS

- [1] BODIG, J.; JAYNE, B. A.. Mechanics of Wood and Wood Composites. New York: van Nostrand Reinhold, 1993. 712 p.
- [2] KOLLMANN, Frans F.P.; COTE, Wilfred A.. Physics of Wood. In: KOLLMANN, Frans F.p.. Principles of Wood Science and Technology: Solid Wood. Heidelberg: Springer-verlag, 1968. Cap. 6. p. 160-291.
- [3] WIEGAND, Tobias. Grading an improvement of solid timber products. In: HERZOG, Thomas. Timber Construction Manual. Berlin: Friedemann Zeitler, 2008. Cap. 3. p. 55-59.
- [4] CARREIRA, Marcelo Rodrigo. Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus sp. 2006. Cadernos de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, v. 8, n. 34, p.17-43, 2006.
- [5] ROZEMA, Peter. Timber Grader MTG: Operational instructions. Holanda: Enschede Institutenweg, 2013. 93 p.
- [6] CARREIRA, Marcelo Rodrigo. Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus sp. 2003. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [7] SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcantara et al. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. Revista Arvore, Viçosa, v. 36, n. 6, p.1155-1162, jun. 2012.
- [8] HORÁČEK, Petr; TIPPNER, Jan. Nondestructive Evaluation of Static Bending Properties of Scots Pine Wood using stress wave technique. Wood Research, Brno, República Checa, v. 57, n. 3, p.359-366, 2012.
- [9] OLIVEIRA, Fabiana Goia R.; CAMPOS, Janaina Anadia Goes de; SALES, Almir. Ultrasonic Measurements In Brazilian Hardwood. Materials Research, São Carlos, v. 5, n. 1, p.51-55, 2002.