

Avaliação da coerência entre três métodos de determinação do módulo de elasticidade da madeira de *Pinnus Oocarpa*

Leiliane Cristina Cossolino e Antônio Henrique Alves Pereira, ATCP Engenharia Física, São Carlos, SP. e-mail: apl@atcp.com.br e ha@atcp.com.br

Felipe Hideyoshi Icimoto e Fabiane Salles Ferro, Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Itapeva, Engenharia Industrial Madeireira, Itapeva, SP. e-mail: lipe@grad.itapeva.unesp.br e fabferro@grad.itapeva.unesp.br

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho e Carlito Calil Júnior, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP. e-mail: p_gutemberg2001@yahoo.com.br e calil@sc.usp.br

Resumo: Existem diversas técnicas para caracterização do módulo de elasticidade de madeiras, e dentre as atualmente empregadas, destacam-se aquelas que utilizam as frequências naturais de vibração por serem técnicas não-destrutivas e, portanto, apresentam resultados que podem ser repetidos e comparados ao longo do tempo. Este trabalho tem como objetivo avaliar a coerência dos resultados obtidos pelos ensaios de vibração transversal e flexão estática, usualmente empregados, com os resultados obtidos com uma nova solução tecnológica de caracterização não-destrutiva baseada na frequência de ressonância longitudinal, desenvolvido pela ATCP – Engenharia Física. E ainda, classificá-los quanto à facilidade de realização. Foram utilizadas 30 vigas de *Pinnus Oocarpa* com dimensões de 4 x 24 x 200 cm e 30 com dimensões de 4 x 24 x 300 cm. Observou-se coerência entre os resultados obtidos pelas três técnicas e maior facilidade de execução quando o equipamento Sonelastic® é empregado, uma vez que não requer um suporte de amostra específico e calibrações, reduzindo assim o tempo de execução e favorecendo o ensaio de grande quantidade de amostras.

Palavras-chave: Ensaio não-destrutivo, frequências naturais e módulo de elasticidade.

Abstract: There are several techniques for characterizing the elastic modulus of wood, and among those currently employed, we highlight those that use the natural frequencies of vibration for being non-destructive techniques, and thus present results that can be repeated and compared over time. This study aims to assess the consistency of the results obtained by testing of transverse vibration and static bending, usually employed, with the results obtained with a new technology solution for non-destructive characterization based on resonance frequency of longitudinal developed by ATCP – Physical Engineering. And yet, qualify them for ease of accomplishment. We used 30 beams *Pinnus Oocarpa* with dimensions of 4 x 24 x 200 cm and 30 with dimensions of 4 x 24 x 300 cm. There is consistency between the results obtained by three techniques and ease of implementation when the equipment Sonelastic® is employed, since it does not require a specific sample holder and calibration, thus reducing the execution time and favoring large amount of test samples.

Keywords: Non-destructive testing, natural frequencies and modulus of elasticity.

1. Introdução

A análise dinâmica de estruturas de madeira está se tornando cada vez mais relevante uma vez que propriedades como alta resistência mecânica, baixo custo, beleza estética, baixa emissão de poluentes para sua produção, dentre outras, tornam-na um excelente material de construção, que quando tratada, atinge alta durabilidade podendo ser empregada nas mais diversas aplicações, como por exemplo, pontes, coberturas, esquadrias, etc.

A classificação mecânica da madeira é um processo no qual os ensaios não-destrutivos são realizados, seguidos por uma inspeção visual a fim de examinar algumas características que o equipamento não consegue avaliar adequadamente. O intuito da classificação não é o de separar as peças de melhor qualidade desprezando-se as de qualidade inferior, e sim, conhecer as propriedades mecânicas de cada peça possibilitando seu uso adequado e seguro.

Atualmente há diversas técnicas de ensaios não-destrutivos aplicáveis à classificação estrutural da madeira, algumas delas são: a classificação visual, o ultra-som, o raio X, as ondas de tensão e a vibração transversal. Na técnica de vibração transversal, a frequência natural de vibração do material é associada com sua rigidez na flexão.

Neste contexto, insere-se a tecnologia do Sonelastic[®], um equipamento nacional, desenvolvido pela ATCP – Engenharia Física, que utiliza a frequência natural de vibração longitudinal, obtida pela Técnica de Excitação por Impulso [1], no cálculo do módulo de elasticidade e do amortecimento, com o diferencial de que não é necessário o emprego de um suporte de corpo de prova e a realização de calibrações, como ocorre na maioria dos sistemas de aquisição para ensaios não-destrutivos, como por exemplo, o sistema de aquisição da Metriguard empregado como referência neste trabalho.

Sendo assim, o objetivo principal é avaliar a coerência dos resultados obtidos com os três ensaios: vibração transversal, flexão estática (usualmente empregados) e ressonância longitudinal (Sonelastic[®]), além de classificá-los quanto à facilidade de realização.

1.1. Técnica de Excitação por Impulso

Na Técnica de Excitação por Impulso [1] o corpo de prova sofre um impacto de curta duração que o induz a uma resposta acústica composta por uma ou mais frequências naturais de vibração, a partir das quais é calculado o módulo de elasticidade. O Sonelastic[®] utiliza esta técnica, em acordo com as Normas ASTM E1876 [2], C215 [3] e correlatas, para determinar os módulos de elasticidade e amortecimento de diversos tipos de materiais. As frequências naturais de vibração são relacionadas com os módulos de elasticidade, enquanto que o decremento logarítmico da amplitude de vibração de cada modo fornece o amortecimento [4].

Os itens e acessórios do Sonelastic[®] possibilitam a caracterização em função do tempo, tanto em temperatura ambiente quanto para altas e baixas temperaturas, sendo adequado para uma ampla gama de materiais [5].

A particularidade deste equipamento está no fato de capturar a resposta acústica do corpo de prova empregando um microfone e dispensando a utilização de um suporte específico para o corpo de prova e a realização de calibrações, o que facilita os ensaios e reduz significativamente o tempo.

No cálculo do módulo de elasticidade de madeira com o Sonelastic[®], (técnica de excitação por impulso) o modo de vibração excitado é o longitudinal (no qual a vibração ocorre na mesma direção do movimento da onda) e seu valor é dado pela eq. 1 [3]:

$$E = 4 \left(\frac{mf_l^2}{b} \right) \left(\frac{L}{t} \right) \quad (1)$$

Onde:

m é a massa do corpo de prova, f_i é a frequência longitudinal, b é a largura, L é o comprimento e t é a altura.

O Sonelastic® é empregável para madeira natural, lâminas coladas e partículas aglomeradas.

1.2 Técnica de vibração transversal

O cálculo do módulo de elasticidade para o ensaio de vibração transversal é feito pela eq. 2 [6,7]:

$$E = \frac{0,946 \rho A f_r^2 L^4}{h^2} \quad (2)$$

Onde:

ρ é a densidade do material, f_r é a frequência de vibração, A é a área da seção transversal, L é o vão da peça e h é a altura da peça.

2. Materiais e métodos

Foram utilizadas 30 vigas de Pinnus Oocarpa com dimensões de 4 x 24 x 200 cm e 30 com dimensões de 4 x 24 x 300 cm. As peças estavam armazenadas em local coberto. Os ensaios foram divididos em duas etapas, sendo a primeira realizada pela ATCP Engenharia Física e a segunda pelo Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM). Ambas as etapas fizeram uso das instalações do LaMEM para a execução.

Primeira etapa – correspondente aos ensaios de caracterização pela Técnica de Excitação por Impulso, utilizando-se o equipamento Sonelastic®.

Segunda etapa – consistiu nos ensaios de vibração transversal realizados com o equipamento da Metriguard, utilizado nos ensaios não-destrutivos para caracterização de estruturas de madeira do LaMEM-USP. Em seguida, realizou-se o ensaio destrutivo, de flexão estática, com a peça bi-apoiada e a força aplicada no centro do vão.

2.1. Descrição dos ensaios

As dimensões e peso das vigas de Pinnus Oocarpa foram medidas com uma trena e uma balança, respectivamente, antes da realização dos ensaios.

2.2. Método de ressonância longitudinal com o Sonelastic® Stand Alone

A tecnologia utilizada nos ensaios aqui apresentados é denominada Sonelastic® Stand Alone, fig. 1, onde um software embarcado em um hardware faz o processamento do sinal captado pelo microfone retornando as frequências naturais de vibração. A configuração do sistema consiste em: um martelo comum (utilizado para excitar o corpo de prova) e um microfone direcional pedestal (CA-CP-PD) para a captura de frequências de até 20 kHz. A viga pode ser apoiada sobre qualquer superfície.



Figura 1 - Sonelastic® Stand Alone.

Uma vez que o equipamento Sonelastic® não demanda de um suporte de corpo de prova específico e de calibrações, o tempo de preparação pré-ensaio é muito pequeno, ou seja, grosso modo, basta ligar o equipamento, posicionar o microfone próximo a uma das extremidades da viga e dar uma leve pancada com o martelo na extremidade oposta. Não há necessidade de nenhuma calibração ou processamento para que o ensaio seja realizado, reduzindo significativamente o seu tempo e favorecendo a medição em série de grande número de corpos de prova. A fig. 2 ilustra um ensaio realizado com o equipamento Sonelastic® para a caracterização das vigas de Pinnus Oocarpa do LaMEM.



Figura 2 - Ensaio com o Sonelastic®.

2.3. Ensaios para validação do Sonelastic®

Em paralelo à realização dos ensaios das vigas de Pinnus Oocarpa, outros testes foram aplicados com intuito de validar o Sonelastic® para a caracterização de madeiras. Esta validação objetivou a confirmação da não necessidade de uso de um suporte específico para as vigas nem de calibração do equipamento.

Uma das grandes vantagens do Sonelastic®, e do uso do módulo de elasticidade longitudinal, é a insensibilidade ao tipo de apoio empregado. Ao contrário do que ocorre no caso do método de vibração transversal que requer um posicionamento preciso, e calibrações em função dos parâmetros geométricos.

Uma viga de Pinnus Oocarpa foi ensaiada em diversas condições de apoio: a primeira sequência de variações foi empregando-se duas bases metálicas com diferentes

espaçamentos, e a segunda, colocando-se a viga sobre diferentes superfícies. Também foi avaliada a variação intrínseca do equipamento.

2.3.1 Estudo da influência do apoio das amostras nos resultados

A sequência de fotos ilustra as posições das duas bases metálicas utilizadas como apoio, fig. 3, e a tabela apresenta os dados dos ensaios e valores médios, tab. 1.

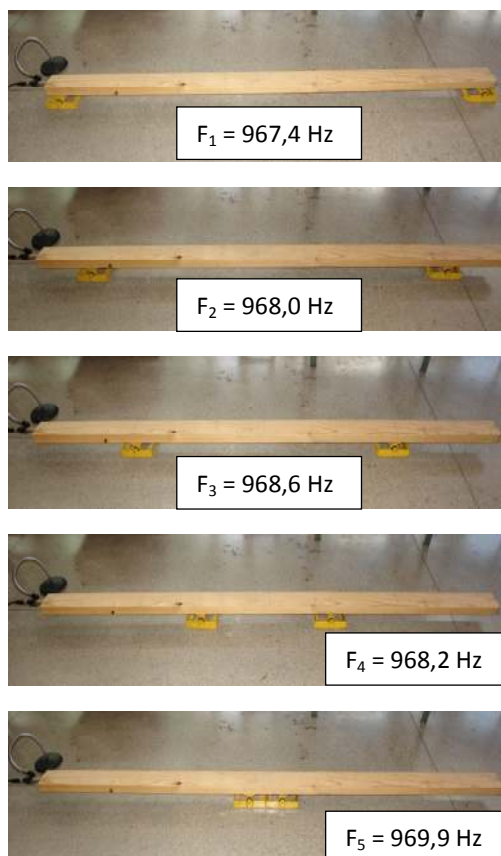


Figura 3 - Ilustração da abertura entre os apoios metálicos.

Tabela 1. Frequências encontradas variando-se o local de apoio.

Ensaio	Frequência (Hz)
1	967,4
2	968,0
3	968,6
4	968,2
5	969,9
Média	968,4
Desvio padrão	0,9
Desvio padrão %	0,1%

Uma vez que o desvio padrão ficou em torno de 0,1% pode-se afirmar que a posição do apoio tem influência desprezível. Lembrando que o módulo de elasticidade é proporcional à frequência.

2.3.2 Estudo da influência do apoio em diferentes pisos

A sequência de fotos mostra os locais onde a viga de Pinnus Oocarpa foi apoiada para a realização dos ensaios, fig. 4, e a tabela os valores das frequências encontradas, tab. 2.

Viga apoiada diretamente no chão (concreto polido):



Viga livremente apoiada na balança:



Viga apoiada em uma banqueta:



Viga apoiada nas mãos: Sem foto (F = 967,8 Hz)

Figura 4 - Ilustração dos locais de apoio das vigas.

Tabela 2. Frequências encontradas com a viga apoiada em superfícies diversas.

Superfície	Frequência (Hz)
Concreto polido (chão)	970,8
Base de uma balança	969,0
Banqueta de madeira	967,7
Sendo suportado manualmente	967,8
Média	968,8
Desvio padrão	1,4
Desvio padrão %	0,15%

O desvio padrão foi de 0,15%, mostrando que a superfície onde a amostra está apoiada apresenta influência desprezível no resultado.

2.3.3 Estudo da reprodutibilidade do Sonelastic®

Neste ensaio a viga manteve-se apoiada no centro e foram realizadas 10 medições sem que o apoio e as condições mecânicas se alterassem, fig. 5. Na tab. 3 têm-se os valores médios.



Figura 5 - Posição da viga para o ensaio de reprodutibilidade do Sonelastic®.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de reprodutibilidade do Sonelastic®.

Ensaio	Frequência (Hz)
1	968,6
2	968,6
3	968,5
4	968,5
5	968,7
6	968,5
7	968,7
8	968,5
9	968,3
10	968,5
Média	968,5
Desvio padrão	0,12
Desvio padrão %	0,02 %

O desvio de 0,02% confirma a alta reprodutibilidade do equipamento Sonelastic®.

2.4. Método de vibração transversal com o equipamento da Medriguard

Os ensaios de vibração transversal das vigas foram realizados com um aparelho E-computer 340 da Metriguard. Na fig. 6 é apresentada uma vista deste ensaio.



Figura 6 - Equipamento E-computer modelo 340 da Metriguard [8].

2.5. Método de flexão estática

O ensaio de flexão estática foi realizado aplicando-se uma força no centro do vão das peças. A força foi medida por meio de um anel dinamômetro. A fig. 7 ilustra a realização do ensaio.



Figura 7 - Ensaio de flexão estática [8].

3. Resultados e discussões

Os resultados obtidos nos ensaios com o Sonelastic[®], ensaio de vibração transversal e o ensaio de flexão estática são apresentados na tab. 4.

Observa-se uma diferença, em torno de 3%, nos valores dos módulos de elasticidade obtidos com o Sonelastic[®] e pela vibração transversal com o sistema Medriguard, e uma diferença de 7% entre os valores obtidos com o Sonelastic[®] e pelo ensaio de flexão estática.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos dados da madeira de Pinnus Oocarpa com dimensões de 4 x 24 x 300 cm.

Estatística descritiva	Ensaio		
	Sonelastic [®]	Vibração transversal	Flexão estática
Média (GPa)	14,14	14,61	13,18
Desvio Padrão (GPa)	2,26	1,81	1,92
Coefficiente de Variação (%)	15,98	12,39	14,58
Mínimo (GPa)	10,62	10,44	11,19
Máximo (GPa)	20,87	18,17	18,13

A fig. 8 mostra o gráfico de dispersão e a reta de regressão entre os valores do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios com o Sonelastic[®] e nos de vibração transversal para as vigas de 4 x 24 x 300 cm.

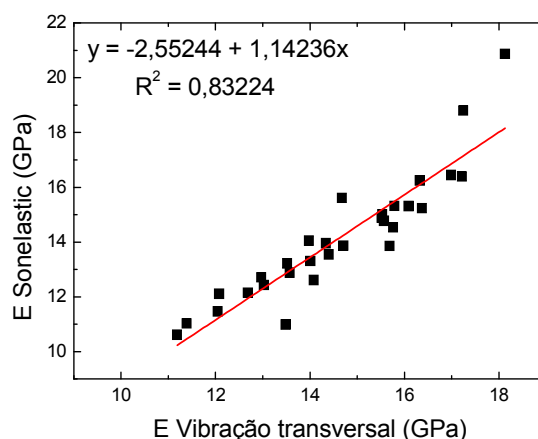


Figura 8 - Relação entre os módulos de elasticidade calculados pelo Sonelastic[®] e pelo equipamento de vibração transversal para as vigas de 4 x 24 x 300 cm.

Pela regressão linear temos que:

$$E_{\text{Sonelastic}} = 1,14236 E_{\text{Vibração transversal}} - 2,55244$$

Observa-se que o coeficiente angular da reta de regressão é muito próximo de 1,0, indicando a elevada exatidão do equipamento Sonelastic[®] para a avaliação não-destrutiva de vigas de madeira.

A fig. 9 apresenta a correlação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos com o Sonelastic[®] e pelo ensaio de flexão estática para as vigas de 4 x 24 x 300 cm.

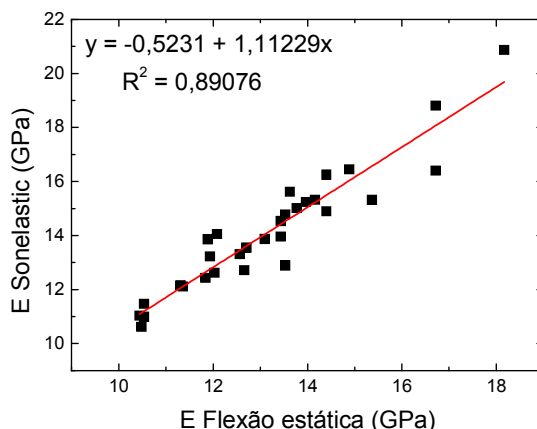


Figura 9 - Relação entre os módulos de elasticidade obtidos pelo Sonelastic® e o ensaio de flexão estática para as vigas de 4 x 24 x 300 cm.

Novamente, notamos que a regressão linear ($E_{\text{Sonelastic}} = 1,11229 E_{\text{Flexão estática}} - 0,5231$) possui o coeficiente angular da reta de regressão muito próximo de 1,0.

Observando-se a tab. 4 e os gráficos das fig. 8 e 9 notamos que os três métodos de determinação do módulo de elasticidade resultam em valores bem próximos, sugerindo que a escolha entre um ou outro método seja feita pela praticidade. Neste contexto a tab. 5 é inserida.

Tabela 5 - Comparação entre os ensaios com o Sonelastic®, de vibração transversal e de flexão estática.

	Ensaio Destrutivo	Coefficiente de Variação	Tempo de Ensaio*
Sonelastic®	Não	15,98%	~ 2 horas
Vibração Transversal	Não	12,39%	~ 4 horas
Flexão Estática	Sim	14,58%	~ 7 horas

*O tempo de ensaio inclui a preparação da amostra: posicionamento e calibrações (ensaios de vibração transversal e flexão estática) bem como a pesagem das vigas ensaiadas (30 vigas de 4 x 24 x 200 cm e 30 vigas de 4 x 24 x 300 cm).

Uma vez que as dimensões das vigas são padronizadas, não há necessidade de medir uma a uma e, portanto, o tempo gasto em cada ensaio inclui a manipulação das vigas (carregamento e posicionamento das mesmas nos respectivos suportes ou locais de execução), a pesagem e as calibrações (no caso dos ensaios de vibração transversal). Notamos que o tempo de ensaio reduz consideravelmente empregando-se o Sonelastic®.

4. Conclusões

Os resultados dos módulos de elasticidade obtidos pelos três ensaios: com o Sonelastic®, pela vibração transversal e pela flexão estática, apresentam boa coerência entre si.

Dada à proximidade dos resultados alcançados com o equipamento Sonelastic® e aqueles obtidos pelo já consolidado equipamento da Metrigrard (vibração transversal) pode-se afirmar que o Sonelastic® responde com eficiência aos ensaios de caracterização dos

módulos de elasticidade de vigas de madeira, estando validado, portanto, os seus resultados.

A particularidade do Sonelastic® em não necessitar de suporte de corpo de prova e de calibrações facilita e reduz significativamente o tempo de caracterização.

5. Referências bibliográficas

[1] COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Módulos Elásticos: Visão Geral e Métodos de Caracterização. Informativo Técnico Científico. Disponível em: <http://www.atcp.com.br/imagens/produtos/sonelastic/artigos/RT03-ATCP.pdf> (publicado online em: 21/10/2010). Acesso em: Maio de 2011.

[2] ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1876-07: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by Impulse Excitation of Vibration. United States, 2007.

[3] ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C215-08: Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Philadelphia, 2008.

[4] SILVA, C. W. Vibration Damping, control, and design. Vancouver, Canada: Taylor & Francis Group, 2007.

[5] SONELASTIC. Disponível em: <http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/sonelastic.html>. Acesso em: Maio de 2011.

[6] ALMEIDA, M. T. Análise de vibrações pelo método das matrizes de transferência. In: _____. Vibrações mecânicas para engenheiros. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

[7] SETO, W. W. Vibrações transversais de vigas. In: _____. Vibrações mecânicas. São Paulo: McGRAW HILL, 1964.

[8] CARREIRA, M. R., CANDIAN, M. Teste de um equipamento para classificação de peças estruturais de madeira pela técnica da vibração transversal. Semina: Ciências Exatas e da Terra, v. 29, n. 1, p. 3-14, 2008.