

## Predição do Módulo de Elasticidade à Flexão em vigas de Eucalipto saturadas e secas ao ar utilizando a velocidade longitudinal de ultra-som

André Bartholomeu  
Molise Engenharia S/S Ltda.  
Itatiba, SP, 13250-320 - Brasil  
0055-11-45380266  
[bartholomeu@netwave.com.br](mailto:bartholomeu@netwave.com.br)

Raquel Gonçalves  
Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP  
Cidade Universitária Zeferino Vaz – Barão Geraldo  
0055-19-35211034  
[raquel@agr.unicamp.br](mailto:raquel@agr.unicamp.br)

### Resumo

Uma das formas mais simples de se separar a madeira em classes de rigidez é o uso direto da velocidade de propagação de ondas de ultra-som. Neste trabalho foi utilizada a velocidade longitudinal de ondas de ultra-som para comparar resultados de predição do Módulo de Elasticidade à Flexão ( $E_M$ ) de vigas de duas espécies de Eucalipto, *citriodora* (50 peças) e *grandis* (31 peças) em duas condições de teor de umidade: saturadas ( $PSF > 30\%$ ) e secas ao ar ( $U \approx 12\%$ ). Como variável resposta adotou-se  $E_M$  na condição seca ao ar, uma vez que essa é uma das propriedades mecânicas necessárias em projetos estruturais. Como variável de entrada utilizou-se a velocidade longitudinal de ultra-som nas vigas saturadas ( $V_{vsat}$ ) e a mesma velocidade nas vigas secas ao ar ( $V_{LL12}$ ). Resultados demonstraram a superioridade do modelo de predição de  $E_M$  quando se utiliza a velocidade na viga saturada ( $r = 0,69$  contra  $r = 0,52$  para o *E. citriodora* e  $r = 0,59$  contra  $r = 0,42$  para o *E. grandis*). Para o modelo utilizando os resultados das duas espécies a predição utilizando-se a velocidade nas vigas saturadas apresentou  $r = 0,83$  enquanto na viga seca não foi possível obter nenhuma correlação significativa.

### 1. Introdução

O conhecimento das propriedades mecânicas de vigas de madeira é fundamental para o projetista. Tendo em vista que no Brasil não existe a classificação de peças estruturais de madeira, o trabalho de projetar estruturas desse material torna-se difícil. Os ensaios não-destrutivos podem ser ferramentas eficientes para a

predição de propriedades mecânicas de vigas estruturais de madeira, destacando-se dentre eles o ultra-som.

Bucur <sup>(1)</sup> destaca que a interação da propagação das ondas de ultra-som com a estrutura do material fornece parâmetros para a caracterização de suas propriedades e salienta que a presença de defeitos no material modifica os parâmetros de propagação da onda de ultra-som. Segundo a mesma autora, a vinculação da velocidade com o fenômeno físico da sua propagação fornece a base para a interpretação dos resultados dos ensaios não-destrutivos em peças de madeira. Sandoz <sup>(2)</sup> desenvolveu método de classificação de vigas utilizando duas espécies, Sapin (*Abies Alba*) e Épicéa (*Picea abies*), com teor de umidade de 12%. Para os ensaios o autor utilizou equipamento de ultra-som Sylvatest. Como resultado o autor determinou faixas de velocidade de propagação de ondas de ultra-som associadas às classes de resistência da Norma Suíça SIA 164. As faixas foram obtidas com base em modelos de predição com  $r = 0,65$ .

Steiger <sup>(3)</sup>, ensaiando vigas da espécie Fichte (*Picea abies*) com teor de umidade de 12%, convalidou o método desenvolvido por Sandoz. O equipamento de ultra-som utilizado por este autor foi o Steikamp, de origem alemã. No caso desse autor, as faixas de velocidade longitudinal foram associadas às classes de resistência do Eurocode. As faixas foram obtidas com base em modelos de predição com  $r = 0,74$ .

Waubke <sup>(4)</sup> apresentou resultados de pesquisa realizada na Alemanha utilizando vigas da espécie Fichte (*Picea abies*). Nesse trabalho o autor avaliou correlações obtidas em diferentes situações, inclusive nas situações estudadas neste trabalho, ou seja, velocidade na viga saturada e velocidade na viga seca ao ar como parâmetro de inferência de  $E_M$  na viga seca ao ar. O modelo utilizando a velocidade na viga saturada apresentou  $r = 0,54$  enquanto o que utilizou a velocidade na viga seca ao ar  $r = 0,68$ .

Esses resultados fornecem diretrizes aos pesquisadores brasileiros para que se busque estabelecer, para o Brasil, faixas de velocidade que permitam a classificação mecânica da madeira de uso estrutural no país. Como consequência o material madeira poderá ser valorizado e utilizado de forma mais racional.

Embora o uso direto da velocidade de propagação do ultra-som apresente correlações com menor poder de predição (valores de  $r$  mais baixos) da rigidez da madeira do que o uso da constante de rigidez ( $C = \rho V^2$ ), sua utilização pelo setor industrial é mais imediata, uma vez que não é necessário determinar a densidade ( $\rho$ ) da peça avaliada. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi comparar resultados de predição do Módulo de Elasticidade à Flexão ( $E_M$ ) de vigas na condição seca ao ar, que é a condição de comercialização da madeira, com o ensaio de classificação por ultra-som realizado em duas condições de teor de umidade: saturadas (PSF>30%) e secas ao ar ( $U \approx 12\%$ ).

## 2. Material e Métodos

Para o presente estudo foram ensaiadas 50 vigas de Eucalipto Citriodora e 31 de Eucalipto Grandis, de dimensões 0,06 x 0,12 x 2,50m. Para os ensaios de propagação de ondas utilizou-se equipamento de ultra-som da marca Steinkamp, modelo BP-5 com transdutores de faces planas e frequência de 45 kHz. Os transdutores foram posicionados na direção longitudinal, conforme esquema da Figura 1. Na seção transversal da viga foram realizadas três leituras de tempo de propagação da onda tomando-se o valor intermediário, ou seja, eliminando-se os extremos (Figura 2).

Quando recém cortadas, as vigas apresentavam teor de umidade (U) acima do Ponto de saturação das fibras (PSF), adotado como sendo  $U > 30\%$ . Nessa condição a velocidade longitudinal de ultra-som, aqui denominada de  $V_{vsat}$ , é praticamente constante. Assim, inicialmente as vigas das duas espécies foram ensaiadas utilizando-se equipamento de ultra-som, obtendo-se as velocidades longitudinais na viga saturada ( $V_{vsat}$ ).

As mesmas vigas passaram por processo de secagem natural, ao ar livre, protegidas do sol e da chuva, e o teor de umidade estabilizou-se em torno de 12%. Esse ponto de estabilização é denominado ponto de equilíbrio (PE). Nessa condição realizaram-se, nas vigas, os ensaios de ultra-som e de flexão estática por 4 pontos, de acordo com a Norma ASTM D-198/84 (Figura 3). Para evitar problemas de estabilidade lateral as vigas foram ensaiadas na posição de menor inércia. Como resultado dessa etapa foi obtido a velocidade longitudinal, nessa situação denominada de  $V_{LL12}$ , e o Módulo de Elasticidade à Flexão, denominado  $E_M$ .

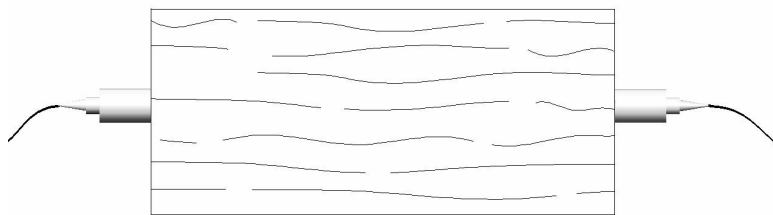


Figura 1. Posicionamento e alinhamento dos transdutores  
(Fonte: Projeto de Norma Ultra-som — Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas)

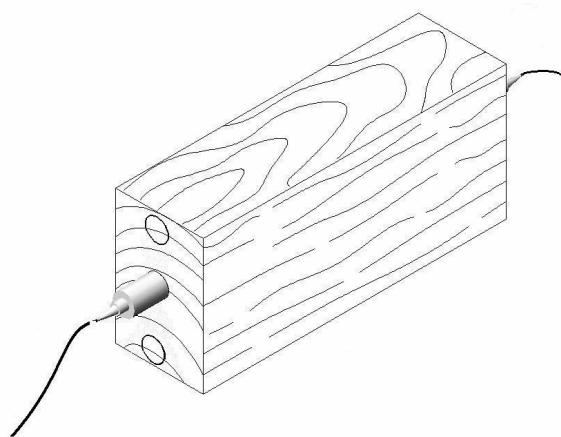


Figura 2. Medições na seção transversal  
(Fonte: Projeto de Norma Ultra-som — Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas)

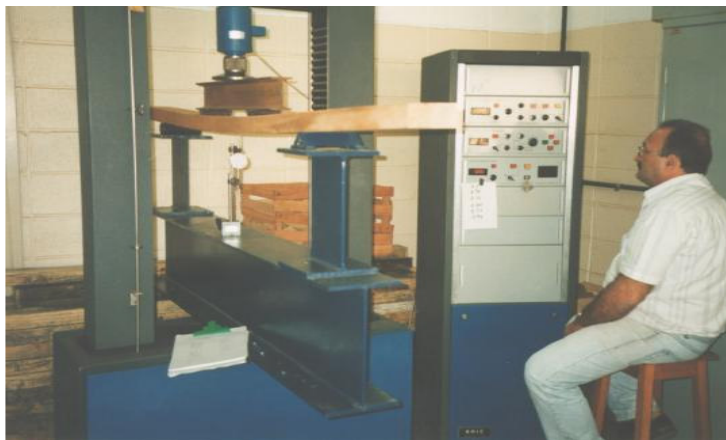


Figura 3. Ensaio de Flexão Estática nas vigas, segundo a norma ASTM D-198/84  
Com os resultados obtidos foram avaliadas as correlações entre  $V_{\text{vsat}}$  e  $E_M$  e entre  $V_{\text{LL12}}$  e  $E_M$  com o objetivo de verificar que condição de ensaio (viga com teor de umidade acima do PSF ou viga com umidade em torno de 12%) permitia a obtenção de melhores resultados em termos de modelo de predição de  $E_M$  na condição seca ao ar. Esse resultado embasa a decisão de se classificar por ultrassom as vigas recém cortadas, ainda saturadas, ao invés de fazê-lo somente quando seu teor de umidade atinja o equilíbrio.

### 3. Resultados

A Tabela 1 resume os resultados médios dos parâmetros envolvidos no estudo – velocidade de propagação da onda de ultra-som na direção longitudinal, módulo de elasticidade longitudinal e densidade aparente.

Tabela 1. Médias de velocidade na viga saturada ( $V_{vsat}$ ), velocidade na viga seca ao ar ( $V_{LL12}$ ), módulo de elasticidade à flexão estática ( $E_M$ ) e densidade aparente na condição seca ao ar ( $\rho_{12}$ ). Os valores entre parênteses representam os Coeficientes de Variação.

Parâmetro	Espécies		
	Euc. Citriodora	Euc. Grandis	Euc.Citr.+Grandis
$V_{vsat}$ (m/s)	4432 (3,0%)	4018 (6,1%)	4273 (6,4%)
$V_{LL12}$ (m/s)	4882 (3,1%)	4999 (3,9%)	4926 (3,5%)
$E_M$ (kN/cm <sup>2</sup> )	2023 (15,6%)	931 (19,0%)	1605 (37,2%)
$\rho_{12}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,05 (5,0%)	0,495 (10,0%)	0,84 (32,8%)

Os resultados da Tabela 1 permitem verificar que a variação da velocidade com a umidade foi mais significativa para o Eucalipto Grandis (24%) do que para o Eucalipto Citriodora (10%). Além disso a variabilidade do Eucalipto Grandis é maior do que a do Eucalipto Citriodora, o que pode ser visto pela variabilidade da densidade aparente.

As correlações entre  $V_{vsat}$  e  $E_M$  e entre  $V_{LL12}$  e  $E_M$  para as duas espécies de Eucalipto analisadas separadamente bem como para as duas espécies de Eucalipto consideradas conjuntamente são apresentadas nos gráficos das Figuras 4 a 6. Verifica-se que, para o Eucalipto Citriodora os pontos encontram-se mais ajustados ao modelo enquanto que os do Eucalipto Grandis apresentam maior dispersão.

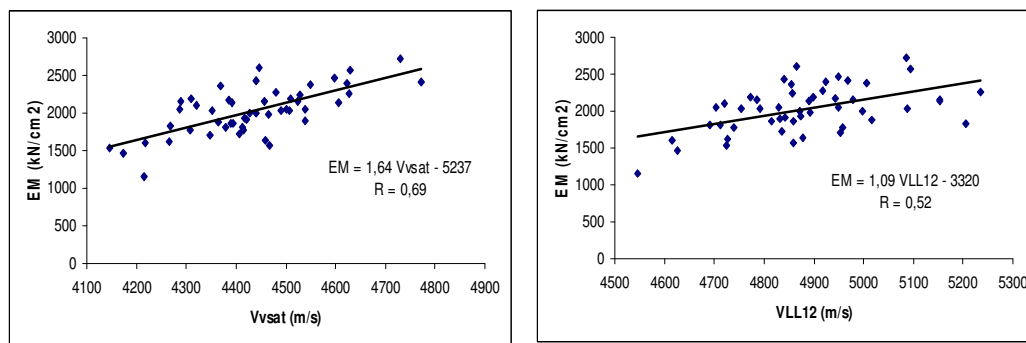


Figura 4 – Correlações  $V_{vsat}$  x  $E_M$  e  $V_{LL12}$  x  $E_M$  para o Eucalipto Citriodora

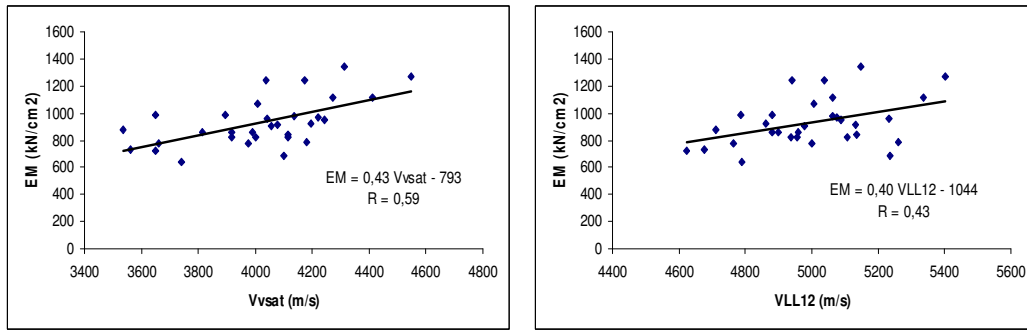


Figura 5 – Correlações  $V_{vsat} \times E_M$  e  $V_{LL12} \times E_M$  para o Eucalypto Grandis

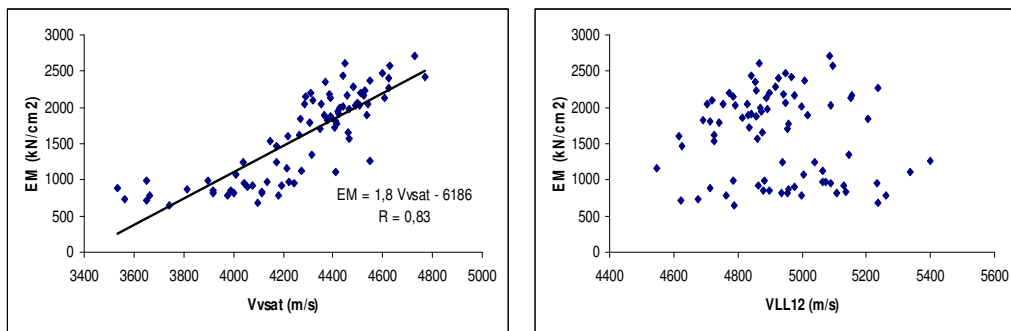


Figura 6 – Correlações  $V_{vsat} \times E_M$  e  $V_{LL12} \times E_M$  para o conjunto de vigas de Eucalypto Citriodora e Eucalypto Grandis

Com exceção do caso de  $V_{LL12} \times E_M$  para o conjunto de vigas de Eucalypto, para o qual não houve correlação, em todas as demais situações as correlações obtidas nesta pesquisa ( $r = 0,43$  a  $0,83$ ) foram de mesma ordem de grandeza das obtidas pelos autores mencionados na Introdução ( $r = 0,54$  a  $0,74$ ). No entanto é importante destacar que, no caso Sandoz <sup>(2)</sup> e de Steiger <sup>(3)</sup> as correlações foram obtidas na condição seca ao ar e, no caso de Waubke <sup>(4)</sup> as melhores correlações foram obtidas também na condição seca ao ar. Esse resultado é contrário ao obtido nesta pesquisa, mas as madeiras utilizadas nos trabalhos citados se tratavam de coníferas enquanto no caso desta pesquisa são dicotiledôneas. Observando-se o gráfico da Figura 6 ( $V_{LL12} \times E_M$ ) verifica-se que há dois grupos de pontos, os quais representam as duas espécies. Esse comportamento não ocorre no caso de  $V_{vsat} \times E_M$  onde se obteve uma correlação bastante forte ( $r = 0,83$ ). Esse comportamento parece demonstrar que, para o caso das espécies estudadas, a presença de água na estrutura celular da madeira homogeneizou o comportamento da propagação da onda, bem como sua relação com as propriedades de rigidez. Já no caso da madeira seca o comportamento de cada espécie foi muito diferenciado.

#### **4. Conclusões**

Para as espécies estudadas nesta pesquisa, a predição do Módulo de Elasticidade à Flexão ( $E_M$ ) seco ao ar, através da velocidade da onda longitudinal de ultrassom, foi mais eficiente quando o ensaio foi realizado nas vigas com teor de umidade acima do PSF ( $U > 30\%$ ).

Esse resultado foi verificado tanto para as duas espécies avaliadas individualmente quanto avaliadas no conjunto.

Tendo em vista resultados realizados por outros pesquisadores, com resultados contrários para o caso das coníferas, é provável que o comportamento observado tenha relação com a estrutura anatômica da madeira de dicotiledônea. Dessa forma é importante que trabalhos futuros sejam realizados utilizando madeiras provenientes de outras espécies de dicotiledôneas, bem como de coníferas crescidas no Brasil, permitindo confirmar ou refutar essa suposição.

#### **5. Referências Bibliográficas**

- 1 . Bucur, V. 'Acoustics of Wood'. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press Inc., 1995.
2. Sandoz, J. L. 'Triage et fiabilité des bois de construction'. 186p. Thèse (Doctorat en Sciences Techniques) – Departement de Génie Civil, Ecole Polytechnique Federal de Lausanne, Lausanne, Suisse, 1990.
- 3 . Steiger, R. 'Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege- Zug-, Druck- und kombinierter M/N Beanspruchung'. 168p. Doktorarbeit in Technischen Wissenschaften – Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich, Schweiz, 1996.
4. Waubke, Nils Valerian. Einsatz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Sortierung von Bauhölzern. Holzbauforschung, Deutschland, p.152-154, 03/1988.