

**USO DA AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA EM VIGOTAS DE ANGELIM
VERMELHO (*Dinizia excelsa* Ducke)**

Caio Felipe Araújo Morais de Almeida¹, Cláudio Henrique Soares Del Menezzi², Thyago
Carvalho da Silva¹

Resumo: O objetivo do trabalho foi avaliar a madeira de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) por meio de métodos não destrutivos (vibração transversal, ultrassom e ensaio estático) e determinar o método mais adequado para estimar o módulo de elasticidade estático. Cinquenta vigas estruturais de angelim vermelho foram avaliadas não destrutivamente determinando-se os módulos de elasticidade estático (E_M), o de vibração transversal (E_{dvt}) e a constante dinâmica ultrassônica (C_{LL}). Os resultados obtidos foram analisados por meio de regressão linear simples, utilizando como variáveis independentes o E_{dvt} , o C_{LL} e outras variáveis relacionadas para a estimativa de E_M . Os resultados apontaram que o E_{dvt} apresentou-se mais adequado do que o C_{LL} para a estimativa de E_M . Conclui-se que o método de vibração transversal foi o mais recomendado para o uso em *Dinizia excelsa* Ducke, sendo observados também bons resultados de rigidez para a espécie estudada.

Palavras-chave: Madeira tropical; ultrassom; vibração transversal; módulo de elasticidade.

**UTILIZATION OF NONDESTRUCTIVE METHODS IN BEAMS OF ANGELIM-
VERMELHO (*Dinizia excelsa* Ducke)**

Abstract: The objective of this paper was to evaluate the wood from Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa* Duck) by means of nondestructive methods (transverse vibration, ultrasound and static bending) and also to determine the most suitable method to estimate static bending modulus of elasticity. Fifty structural beams from angelim vermelho were nondestructively evaluated and static bending modulus of elasticity (E_M), transverse vibration (E_{dvt}) and ultrasound stiffness coefficient (C_{LL}) were calculated. Data was analyzed through linear simple regression using E_{dvt} and C_{LL} as predictors of E_M . The results pointed out that E_{dvt} was the most suitable variable to estimate E_M in comparison to C_{LL} . It could be concluded that

¹ Engenheiro Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília (UnB), <caioalmeida5@gmail.com>, <thyagocs@gmail.com>.

² Doutor em Engenharia Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília (UnB), <cmenezzi@unb.br>.

transverse vibration is recommended to grade wood from *Dinizia excelsa* Ducke, which presented good values of stiffness.

Keywords: Tropical wood; ultrasound; transverse vibration; modulus of elasticity.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a madeira serrada ainda é o principal produto empregado na construção civil, enquanto que em países desenvolvidos os produtos engenheirados têm participação significativa. O desempenho da madeira é um fator relativo, seja para a fabricação de compensados, para a produção de celulose e papel, ou após seu desdobro em serrarias; a madeira é julgada pela sua qualidade em função do uso a que foi destinada. A qualidade por sua vez é avaliada por parâmetros como densidade, comprimento de fibra e ângulo das fibrilas que afetam diretamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira (JANKOWSKY, 1979).

A ocorrência de defeitos em madeira compromete o seu uso como matéria prima nas suas diversas aplicações e finalidades. Os vários tipos de defeitos podem ter origem natural ou surgir tanto no tratamento e manejo silvicultural quanto nos processos de corte, secagem e usinagem, seja por negligência, descuido, ou até por deficiência tecnológica. Alguns defeitos como encanoamento, encurvamento, colapso, rachaduras superficiais e rachaduras de topo são visíveis externamente, sendo a separação de peças com tais defeitos simples. Outros tipos, no entanto, ocorrem no interior da árvore ou da peça de madeira e podem ser visualizados com o uso de técnicas não destrutivas (QUOIRIN, 2004).

A proposta de revisão da norma brasileira de dimensionamento de estruturas de madeira, NBR 7190 (ABNT, 2010), contempla a inclusão da avaliação não destrutiva de peças estruturais por meio da alteração do atual coeficiente de modificação (K_{mod3}). Segundo a proposta, que está sob avaliação, serão utilizados novos valores de K_{mod3} para madeiras classificadas que são, em sua grande maioria, superiores aos atualmente utilizados, demonstrando a confiabilidade dos métodos de classificação, principalmente os não destrutivos, cujos valores de K_{mod3} estarão bem próximos da madeira classificada por métodos mecânicos.

Assim, os métodos de classificação não destrutivos podem agregar valor ao produto de maneira simples e rápida, além de fornecer maior segurança no uso das peças de madeira em estruturas. Uma maneira de facilitar a classificação das peças em uma madeireira ou em um pátio de serraria é a partir do uso de equações ajustadas com base nas espécies de interesse e

nas condições de armazenamento. Porém, para isso, são necessárias equações e modelos precisos para repassar ao consumidor final um produto de qualidade e resistência reconhecidas, para que o uso racional da madeira sólida seja finalmente realizado no país e as normas na construção de estruturas de madeira possam ser aplicadas.

Segundo Targa et al. (2005), as primeiras pesquisas relativas à aplicação de ensaios não destrutivos na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizadas na década de 1950, nos Estados Unidos. Ainda que esse país detenha a primazia de conhecimentos nessa área específica, alguns outros como Suíça, Romênia, Alemanha, Japão e Reino Unido, entre outros, também já se destacam nesse cenário. Candian (2007) comenta que há um atraso no Brasil em relação à tecnologia empregada para a classificação de madeira, que deixa de ser realizada, na maioria das vezes, por falta de procedimentos corretos. Já Nogueira (2007) diz que o Brasil não pratica a classificação dos materiais à base de madeira, em geral. Frisa que tal afirmação é particularmente verdadeira para o caso da madeira serrada. Em outros segmentos de mercado, em que o país ocupa posição de destaque como fornecedor internacional, tem-se visto forçado a estabelecer padrões mínimos de qualidade e a atingir marcas de conformidade, para a continuidade dos fornecimentos.

Em relação às propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais, atualmente as principais pesquisas em desenvolvimento na área da madeira e os principais documentos normativos nacionais e internacionais utilizam valores de resistência determinados por meio de ensaios em corpos de prova de pequenas dimensões, caracterizando a análise destrutiva. Tais avaliações, apesar de serem de execução mais simples e de exigirem um recurso financeiro menor, principalmente em relação a equipamento de ensaio e material, não retratam a realidade das propriedades mecânicas do material (FIORELLI et al., 2009). Pelo fato de não retratarem a realidade é exercida uma margem de segurança, visando obter valores que após correção possam ser utilizados no cálculo de estruturas de madeira sem que haja preocupação com a resistência das mesmas.

Carrasco et al. (2008) estabeleceram uma discussão sobre a quantidade de normas e procuraram definir valores sobre a incerteza nas medições durante os ensaios, visto que madeira é um material heterogêneo com variações tanto em função de sua genética quanto do sítio em que se encontra. Tal heterogeneidade faz com que a madeira apresente grande variabilidade de suas propriedades, penalizando-a quando submetida à competição com outros materiais estruturais que possuem propriedades mecânicas mais uniformes, como aço ou concreto. Desta maneira, a classificação da madeira através do conhecimento das características de cada peça a ser usada, empregando-se testes não destrutivos, pode ser útil

para reverter esta situação. Peças de qualidade superior poderiam ser escolhidas para uso crítico, enquanto as de baixa qualidade poderiam ser usadas em pontos menos exigentes quanto à resistência e rigidez das peças. Assim, a avaliação não destrutiva de materiais é a ciência que identifica propriedades físicas ou mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar sua capacidade de uso (CALIL JÚNIOR; MINÁ, 2003).

O ultrassom é das técnicas não destrutivas e se baseia no princípio de aplicação de ondas inaudíveis pelo homem (acima de 20 kHz, aproximadamente), em madeiras para a determinação de suas constantes elásticas. Assim, a onda ultrassônica é emitida em determinada direção e ao encontrar um obstáculo à sua livre propagação é refletida, voltando ao aparelho emissor, ou então percorre o material e é captada por um receptor. Conhecendo-se a velocidade e propagação assim como a densidade do material é possível calcular sua constante elástica (DEL MENEZZI et al., 2010).

Porém há outras técnicas não destrutivas consideradas concorrentes do ultrassom. Uma delas é a vibração transversal que é abordada por Targa et al. (2005) como uma técnica que tem se destacado entre as empregadas em testes não destrutivos, sobretudo pela grande aderência entre o modelo físico do fenômeno e o correspondente modelo matemático teórico. Além disso, a dificuldade de mensuração das altas frequências observadas em outros métodos não destrutivos faz com que o método se torne ainda mais interessante.

Outro método não destrutivo de propagação de ondas acústicas é o método de ondas de tensão que envolve a mensuração do tempo de passagem de uma onda entre sua fonte geradora da tensão (pêndulo) e a receptora da onda (DEL MENEZZI et al., 2007). Através da velocidade de propagação e densidade do material pode ser calculado o módulo de elasticidade dinâmico, similarmente ao método do ultrassom. Entretanto, uma técnica não destrutiva que guarda grande aproximação com os ensaios destrutivos laboratoriais é o ensaio de flexão estática segundo a American Society for Testing and Materials D 4761 (ASTM, 2002). Tal ensaio permite avaliar o módulo de elasticidade de uma peça de madeira a partir da obtenção da flecha que determinada carga proporciona à peça de madeira.

Dinizia excelsa Ducke, também conhecida popularmente como Angelim Vermelho no Pará e Angelim Pedra em Manaus, possui posição taxonômica incerta, sendo incluída na tribo *Mimosae*, subfamília *Mimosoideae*, família Leguminosae. Possui ocorrência na região amazônica, em especial nos estados do Amazonas, Pará, Rondônia, Amapá, Acre e Roraima (EMBRAPA, 2004). Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar não destrutivamente peças estruturais de Angelim Vermelho que são usualmente utilizadas na construção civil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material lenhoso

Foram utilizadas 50 vigotas de Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) de uma madeireira no Distrito Federal (DF), as quais estavam entabicadas e estocadas ao ar livre. As vigotas possuíam a dimensão aproximada de 3050 mm x 105 mm x 50 mm (comprimento, largura e espessura, respectivamente).

2.2 Avaliação não destrutiva

Para a avaliação das vigotas foram utilizados três métodos não destrutivos: método da vibração transversal, método do ultrassom e método de flexão estática, sendo o último realizado segundo a norma ASTM D 4761 (ASTM, 2002) – com alterações. Os resultados do ensaio estático foram considerados padrão por se aproximar de ensaios laboratoriais. As vigotas também foram analisadas pelos três métodos em seqüência. O ensaio de vibração transversal foi o primeiro a ser realizado e sua estrutura com tripés metálicos serviu de base para os demais métodos.



Figura 1. Aparelho para determinação do módulo de elasticidade transversal das vigotas.

Figure 1. Device employed to determine the transverse vibration modulus of elasticity of the beams.

O equipamento utilizado foi o *Transverse Vibration E ó Computer* modelo E 340 da Metriguard (Figura 1). Os dados obtidos pelo sistema foram módulo de elasticidade (E_{dvt} , em GPa), frequência natural de vibração (f_r , em Hz), massa específica aparente (ρ , em g/cm^3) e peso da amostra (PA, em N). Para a calibragem do aparelho foi utilizada uma barra de alumínio com módulo de elasticidade conhecido. As vigotas foram posicionadas sobre os tripés, em um vão (L) de 2950 mm, vibrando a partir de um impacto não quantificado no centro do vão. A razão percentual entre L e comprimento total foi de 96%, aproximadamente, e a razão entre L e espessura da peça foi de 59 vezes. O módulo de elasticidade em vibração transversal (E_{dvt}) foi calculado conforme Equação 1, em que os valores médios de dez leituras de todas as variáveis em cada vigota foram utilizados.

$$E_{dvt} = \frac{f_r^2 \cdot PA \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: E_{dvt} = módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal, N/mm^2 ; f_r = frequência de vibração, Hz; g = aceleração da gravidade (9870 mm/s^2); I = momento de inércia, mm^4 ; L = vão livre, mm; PA = peso da amostra, N.

O ensaio de ultrassom foi realizado utilizando-se o equipamento Agricef USLab (Figura 2) e forneceu a constante dinâmica na direção longitudinal do material (C_{LL}) a partir da velocidade de propagação de uma onda ultrassônica na direção longitudinal (V_{LL}), a uma frequência de 45 kHz. Tal frequência permitiu a passagem de mais de 25 ciclos completos de ondas pelas vigotas, obtidas a partir de transdutores de face plana posicionados nas extremidades das vigotas. Para o ideal acoplamento dos transdutores foi utilizado gel condutor Mercur.



Figura 2. Aparelho de ultrassom para avaliação não destrutiva das vigas.
Figure 2. Ultrasonic device used to evaluate nondestructively the beams.

Os dados de V_{LL} e massa específica aparente (ρ) obtidos pela vibração transversal foram substituídos na Equação 2 para a obtenção do C_{LL} .

$$C_{LL} = \frac{V_{LL}^2}{2 \cdot 10^8} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: C_{LL} = constante dinâmica na direção longitudinal, N/mm²; ρ = massa específica aparente, g/m³; V_{LL} = velocidade de propagação da onda, (m/s);

O módulo de elasticidade pelo método estático (E_m), terceiro método utilizado, foi calculado a partir da flecha (δ) obtida no sentido de menor inércia e carregamento central. Para a classificação das vigotas foram utilizados os tripés metálicos do equipamento de vibração transversal (vão de 2950 mm). Utilizou-se relógio comparador (Starrett, modelo 3600M-5 de precisão de 0,01 mm) posicionado no centro da peça ($L/2$) para medição da flecha, conforme indicação da norma ASTM D 4761. Entretanto, a relação entre o vão e a espessura da peça foi reduzida para 59 vezes. Uma pré-carga de 19,6 N (2 kg) foi utilizada para acomodar a peça, então foi adicionada uma carga (P) de 29,4 N (3 kg) e aferida a flecha induzida por ele. As cargas aplicadas foram calibradas anteriormente com uso de balança com precisão de 0,1 kg. O módulo de elasticidade foi determinado conforme Equação 3.

$$E_m = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: E_M = módulo de elasticidade estático, N/mm²; P = carga aplicada, N; L = vão livre, mm; δ = flecha atuante, mm; I = momento de inércia, mm⁴



Figura 3. Determinação do módulo de elasticidade em flexão estática das vigas.
Figure 3. Determination of the static bending modulus of elasticity of the beams.

2.3 Análise estatística

Os dados obtidos foram avaliados por estatística descritiva e regressão linear. Primeiramente foram submetidos à estatística descritiva e extraídos os dados de correlação de Pearson (r) entre E_M , E_{dvt} , C_{LL} , δ , v , f_r e ρ . Foram rodadas regressões lineares ($y = a + bx$) para verificar as inter-relações $E_M \times E_{dvt}$, $E_M \times C_{LL}$, $E_M \times \delta$, $E_M \times V_{LL}$, $E_M \times f_r$ e $E_M \times \rho$. Em todas as análises o E_M foi utilizado como variável dependente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação não destrutiva

Observa-se pela Tabela 1 que existem dois grupos de variáveis quando verificadas com base em seus coeficientes de variação (CV). Para E_M , E_{dvt} , C_{LL} e δ tem-se CV mais elevados, entre 15 e 20%. As demais variáveis (ρ , f_r e V_{LL}) apresentaram CV entre 3,5 e 7,5%. Com a existência desses grupos de variáveis distinguíveis com base no CV é esperada a baixa correlação entre dados de variabilidade elevada com dados de baixa variabilidade, algo notado nos valores de correlação de Pearson (r) (Tabela 1).

Esses dados estão de acordo com Nogueira (2007) que, ao ensaiar madeira de *Eucalyptus sp.* por meio de ensaios não destrutivos (vibração transversal, ondas de tensão e ultrassom) obteve valores médios de E_{dvt} inferiores ao de C_{LL} . Os valores encontrados pelo autor foram de 14429 e 16807 MPa, para E_{dvt} e C_{LL} , respectivamente, assim como CV para f_r e V_{LL} baixos, 7,09 e 6,35%, e CV mais elevados para E_{dvt} e C_{LL} , 16,37 e 12,97%, respectivamente.

Tabela 1. Estatística descritiva dos módulos de elasticidade não destrutivos e parâmetros físicos. (N=50 vigotas)

Table 1. Descriptive statistic for moduli of elasticity and physical parameters of beams.

	Ensaio Estático		Vibração Transversal			Ultrassom	
	δ (mm)	E_M (N/mm ²)	ρ (g/cm ³)	f_r (Hz)	E_{dvt} (N/mm ²)	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (N/mm ²)
Média	0,76	19508	0,97	10,90	17409	5150	23919
Máximo	1,04	27759	1,06	12,23	26564	5977	32193
Mínimo	0,53	10872	0,86	9,66	11144	4545	17886
CV (%)	14,81	19,94	3,58	5,22	15,80	7,44	15,33

Onde: δ = flecha no ensaio de flexão estática; E_M = módulo de elasticidade em flexão estática; ρ = massa específica; f_r = frequência natural de vibração; E_{dvt} ; módulo de elasticidade em vibração transversal; V_{LL} = velocidade de propagação ultrassônica; C_{LL} = constante dinâmica ultrassônica.

A Tabela 2 mostra a existência de uma alta correlação (0,850) entre o E_M e o E_{dvt} , além de outras correlações entre a fr e δ , cujo valor foi de -0,723. A flecha da viga (δ) é fundamental para o estabelecimento do E_M , cuja correlação é obviamente alta também (-0,700). O E_M não apresentou correlação tão alta, em comparação a E_{dvt} , com o C_{LL} (0,637).

Tabela 2. Correlação de Pearson (r) entre as variáveis da avaliação não destrutiva, (*) significativa a 5%, (**) significativa a 1% ou não significativa (^{ns}).

Table 2. Descriptive statistic for moduli of elasticity and physical parameters of beams.

	E_M	E_{dvt}	C_{LL}	δ	V_{LL}	fr
E_M	1					
E_{dvt}	0,850**	1				
C_{LL}	0,637**	0,514**	1			
δ	-0,700**	-0,398**	-0,506**	1		
V_{LL}	0,612**	0,459**	0,971**	-0,494**	1	
fr	0,314*	0,325*	0,269 ^{ns}	-0,723**	0,257 ^{ns}	1
ρ	0,294*	0,404**	0,223 ^{ns}	-0,062 ^{ns}	0,008 ^{ns}	-0,062 ^{ns}

Onde: δ = flecha no ensaio de flexão estática; E_M = módulo de elasticidade em flexão estática; ρ = massa específica; fr = frequência natural de vibração; E_{dvt} ; módulo de elasticidade em vibração transversal; V_{LL} = velocidade de propagação ultrassônica; C_{LL} = constante dinâmica ultrassônica.

Esses valores estão de acordo com os obtidos por Teles et al. (2011), cuja correlação entre E_M e E_{dvt} foi de 0,973 e a correlação entre δ e fr foi de -0,761. Algo que não ficou de acordo, em sua totalidade, com o obtido por Teles et al. (2011) é o histograma dos dados de E_M , E_{dvt} e C_{LL} . No caso do referido autor foram comparados dados entre o método não destrutivo de ondas de tensão ao invés de ultrassom.

Na Figura 4 é perceptível que o histograma de E_{dvt} possui a curva de frequência acumulada em um formato mais semelhante à metade de um sino e uma distribuição de dados também semelhante a uma curva normal, o que enfatiza a tendência à normalidade destes dados. Os dados de E_M não apresentaram uma tendência como E_{dvt} , mas não foram como os dados do ultrassom, que, por sua vez, não apontaram uma tendência evidente, além de seus dados possuírem valores maiores (classes deslocadas à direita no eixo x) em relação aos demais métodos.

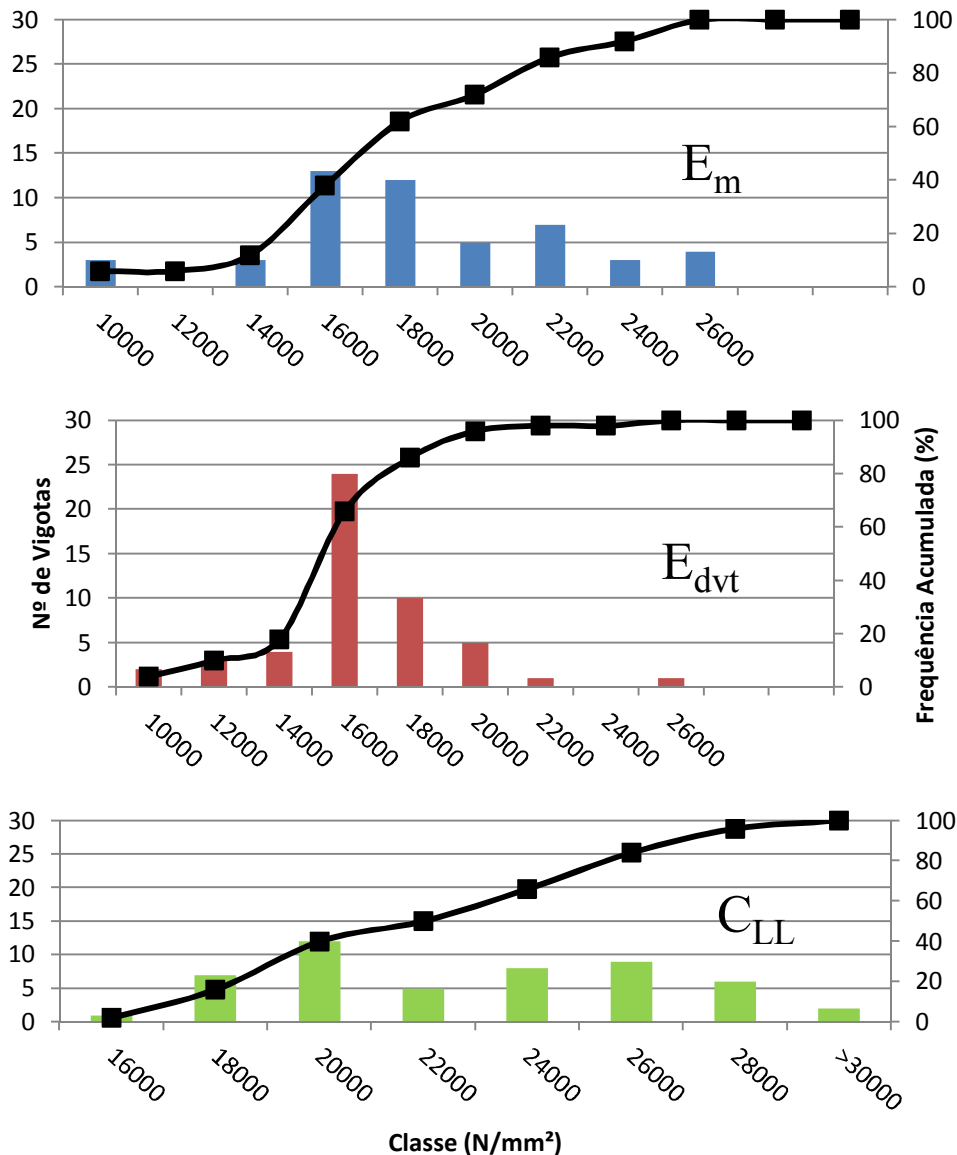


Figura 4. Frequência cumulativa para as vigas conforme a classe, para os três métodos estudados.

Figure 4. Cumulative frequency of the beams stiffness according to the three studied methods.

3.1 Inter-relação entre métodos e variáveis

As primeiras relações avaliadas foram entre E_M e E_{dvt} , e entre o E_M e C_{LL} , conforme Figura 5. Era esperado, conforme observado por Candian (2007), que o coeficiente de determinação (R^2) da equação relacionando E_M x E_{dvt} fosse superior ao da equação relacionando E_M x C_{LL} , porém a diferença foi superior à encontrada por Pires et al. (2011) e a própria Candian (2007).

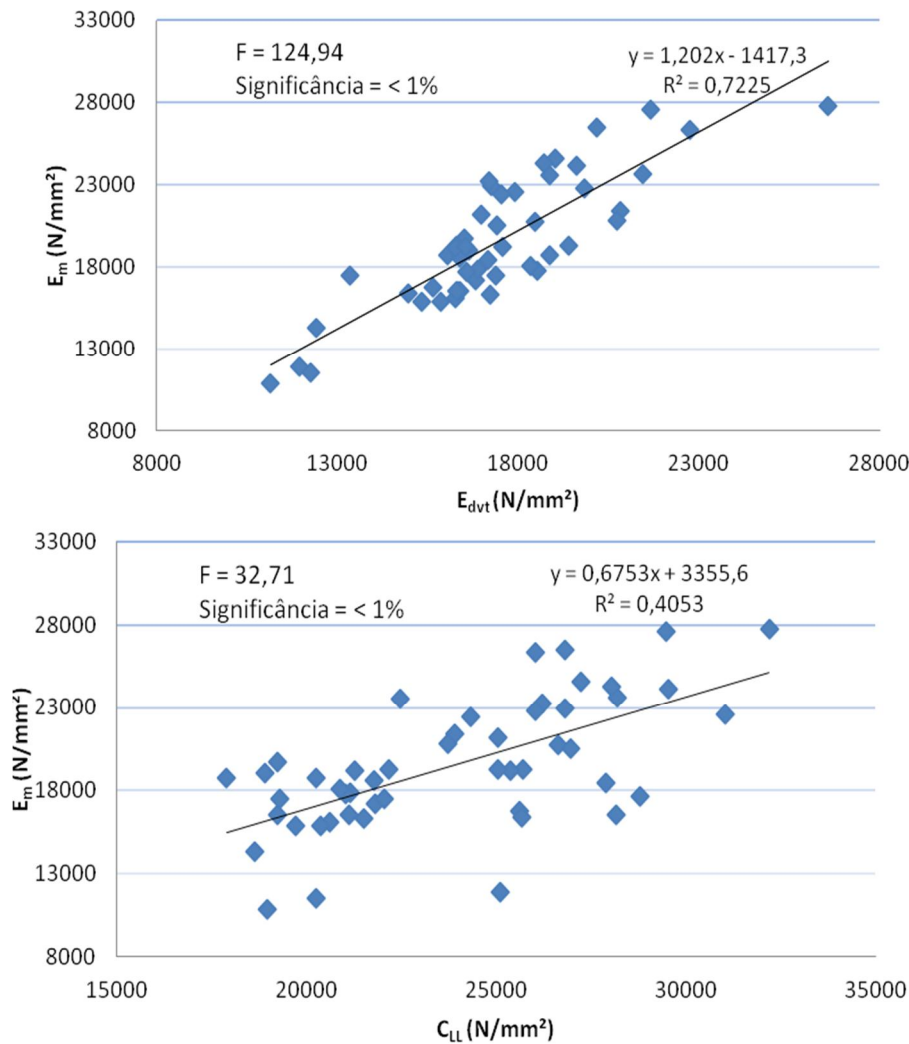


Figura 5. Modelos de regressão para estimativa do módulo de elasticidade estático das vigas utilizando o módulo de elasticidade transversal (E_{dvt}) e o coeficiente dinâmico (C_{LL}).

Figure 5. Regression models to estimate the static bending modulus of elasticity using transverse vibration modulus (E_{dvt}) and stiffness coefficient (C_{LL}).

Uma das possíveis explicações para o baixo R^2 da C_{LL} é a baixa dispersão dos valores ρ , sendo esta variável ligada diretamente ao teor de umidade nas vigotas e, o teor de umidade ligado ao armazenamento das vigotas ao ar livre. Somando-se a este fator o período dos ensaios, setembro e outubro (notadamente início do período chuvoso no Distrito Federal) é dedutível que a umidade influenciou nos resultados do ultrassom.

Por se tratar de um método com uma equação dotada de menos variáveis, principalmente comparada à vibração transversal (5 variáveis), onde velocidade de propagação (V_{LL}) e massa específica aparente (ρ) variam, o método do ultrassom apresentou-se mais sensível às variações de armazenamento comumente encontradas no Distrito Federal. O R^2 da equação entre $E_M \times E_{dvt}$ apresentou boa confiabilidade (0,72). Além disso, todas as

análises, realizadas a 95% de significância, obtiveram valores de F superiores ao valor tabelado, demonstrando validade estatística dos dados.

Provavelmente a umidade afetou também os dados de vibração transversal e o método estático, mas suas equações, com maior número de variáveis, mitigaram os efeitos da umidade. Em especial, as equações das relações $E_M \times E_{dvt}$ e $E_M \times C_{LL}$ apresentaram significância mais elevadas que as demais.

Targa et al. (2005) encontraram valores semelhantes de R^2 em estudos com *Eucalyptus saligna* (0,76), *Eucalyptus grandis* (0,87) e *Eucalyptus citriodora* (0,87), também comparando E_m com E_{dvt} . Já Stangerlin et al. (2008) obtiveram resultados melhores com o ultrassom, porém seu experimento teve maior controle desde a colheita até o acondicionamento dos corpos de prova, obtendo valores de R^2 para *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* oscilando entre 0,676 e 0,928. Outro fator importante foi que o E_m obtido pelos autores foi comparado com o uso de método destrutivo, que no caso foi a compressão paralela às fibras.

Del Menezzi et al. (2010) encontraram valores de R^2 mais baixos com o uso de ondas de tensão (*stress wave*) quando comparado à avaliação destrutiva (flexão estática segundo a ASTM D143-94) para madeiras amazônicas: Pau-marfim (*Balfourodendron riedelianum* (Engl)) e Freijó (*Cordia goeldiana* Huber). Os valores de R^2 foram de 0,53 para a primeira e de 0,43 para a segunda espécie. González et al. (2001) fizeram uso do ultrassom em espécies tropicais também, comparando seu módulo de elasticidade com os módulos estáticos obtidos a partir de ensaio de flexão estática, encontrando valores de R^2 de 0,84; 0,67; 0,71 e 0,68 para *Vataireopsis speciosa*, *Cariniana micrantha*, *Rauwolfia paraensis* e *Aspidosperma macrocarpum*, respectivamente. Já Pires et al. (2011) analisaram um lote misto com oito espécies de madeiras tropicais com ultrassom, vibração transversal e ondas de tensão, obtendo valor de R^2 de 0,66 para ultrassom, 0,54 para vibração transversal e 0,66 para o método de ondas de tensão.

Buscando variáveis de obtenção mais simples, porém com boa confiabilidade e significância para serem aplicadas em equações ajustadas, foram realizadas outras regressões entre E_M e as demais variáveis (δ , V_{LL} , f_T e ρ), tais como as apresentadas pelas Figuras 6 e 7.

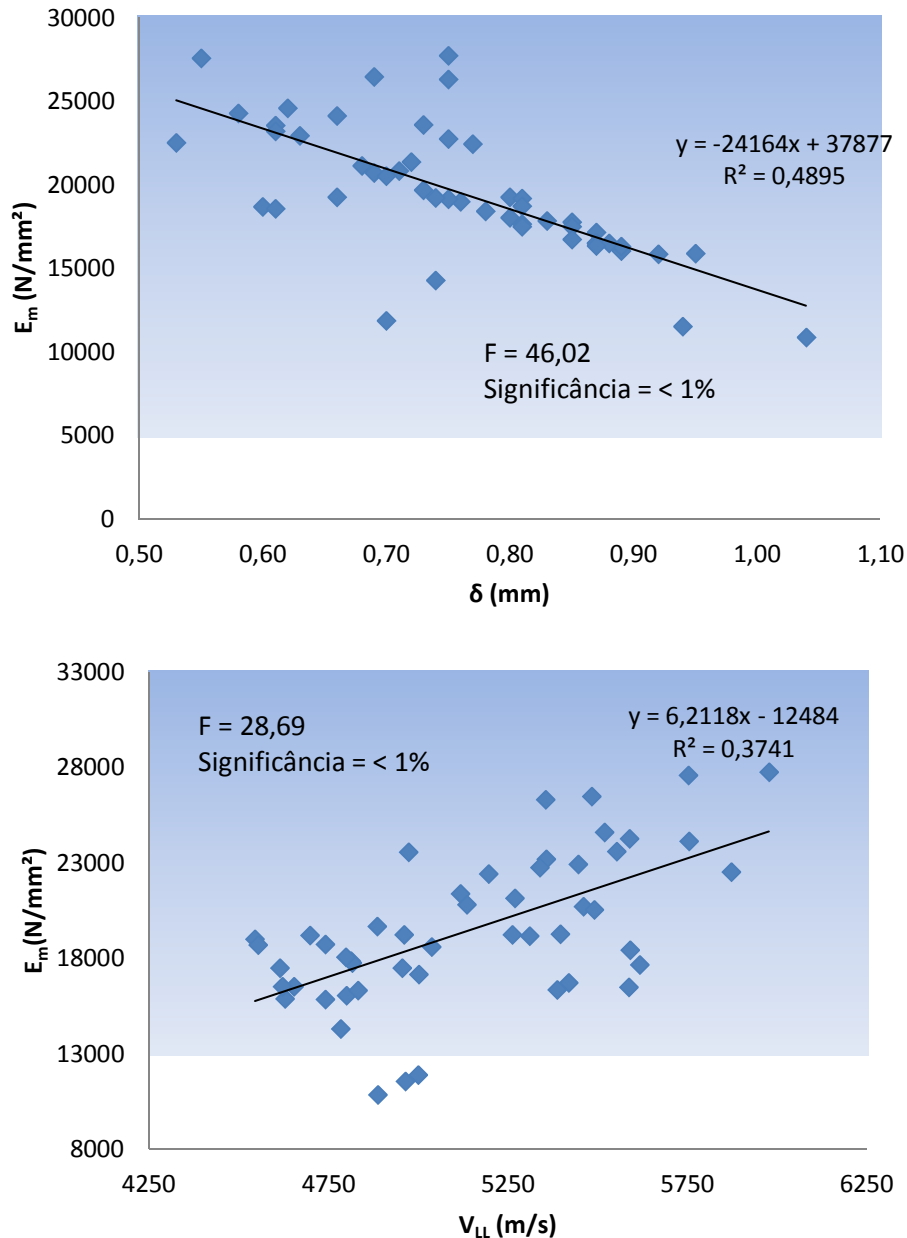


Figura 6. Modelos de regressão para estimativa do módulo de elasticidade estático das vigas por meio da flecha (\square) e da velocidade de propagação ultrassônica (V_{LL}).

Figure 6. Regression models to estimate the static bending modulus of elasticity using beam deflection (\square) and ultrasound velocity (V_{LL}).

Nota-se que V_{LL} ajustado em um modelo explicou melhor E_M do que f_r , sendo que obviamente δ deveria apresentar maior R^2 por ser o fator de maior correlação com E_M entre as demais variáveis. As dispersões possuíram uma distribuição relativamente homogênea ao longo da linha de tendência dos dados, porém a regressão $E_m \times \rho$ apresentou uma faixa de dispersão concentrada entre 0,975 e 1,000 g/cm^3 . Uma vez que, além da V_{LL} , é utilizada ρ no cálculo de C_{LL} , acredita-se que C_{LL} se torne mais susceptível a distorções causadas pela

umidade nas vigotas. Além disso, a existência de qualquer defeito no interior da peça como rachaduras de topo ou qualquer tipo de torcimento alteram V_{LL} , porém a influência destes erros deve ser menor, uma vez que o CV de V_{LL} foi inferior a 10%.

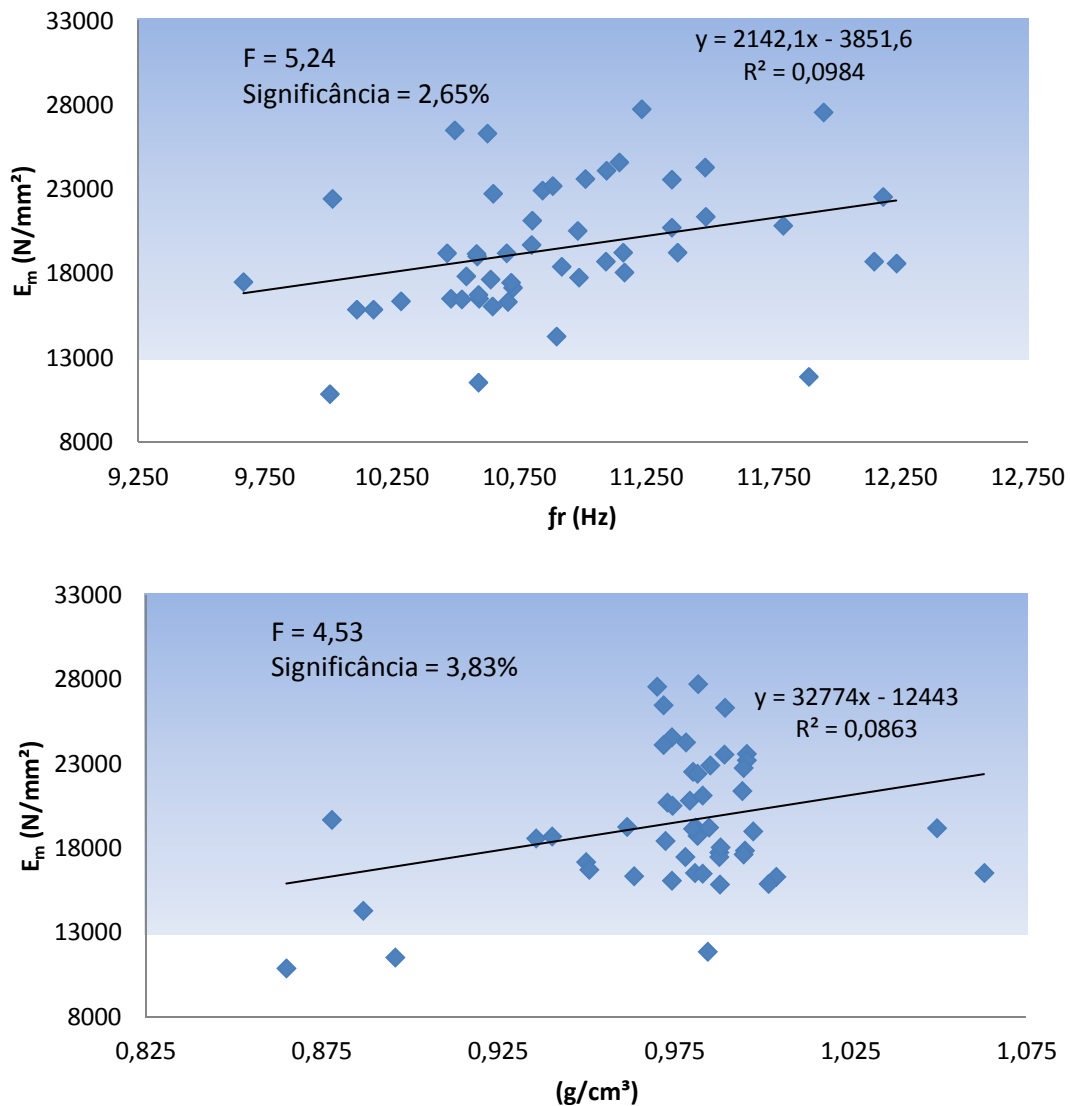


Figura 7. Modelos de regressão para estimativa do módulo de elasticidade estático das vigas por meio da frequência natural de vibração (fr) e da massa específica (ρ).

Figure 7. Regression models to estimate the static bending modulus of elasticity using natural vibration (fr) and density (ρ).

4 CONCLUSÕES

Observou-se a eficiência do método de vibração transversal na estimativa do módulo de elasticidade estático (E_M), com valor de coeficiente de determinação (R^2) considerado confiável, independente das condições dos ensaios. O método de ultrassom não apresentou

valores tão elevados, porém também foi significativo estatisticamente, além de apresentar uma logística melhor, principalmente pelo fato de tratar-se de um aparelho portátil. Com base nas condições as quais são expostas a maioria das peças estruturais de madeira em seu armazenamento no local de estudo, o método da vibração transversal é o mais recomendado para a classificação dos lotes de *Dinizia excelsa* Ducke. Recomenda-se a repetição deste experimento englobando mais espécies para constatar, de fato, qual o melhor método para ser aplicado nos pátios das madeiras.

5 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira (projeto de revisão). Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4761**: Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material. Philadelphia, 2002.
- CALIL JÚNIOR, C.; MINÁ, A. J. S. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p. 335-338, 2003.
- CANDIAN, M. **Estudo da classificação não-destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas**. 2007. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.
- CARRASCO, E. V. M.; CARVALHO, E. P.; OLIVEIRA, A. L. C. Determinação da incerteza de medição nos ensaios de compressão paralela às fibras. **Revista Árvore**, v.32, n.1, p. 119-127, 2008.
- DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I.; SOUZA, M. R. Avaliação não-destrutiva de painéis osb modificados termicamente: parte 1-efeito do tratamento térmico sobre a velocidade de propagação de ondas de tensão. **Scientia Forestalis**, n.76, p. 67-75, 2007.
- DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. S.; SOUZA, M. R. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. **Acta Amazonica**, v.40, n.2, p. 325- 332, 2010.
- EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL. **Espécies arbóreas da Amazônia no. 6: angelim-vermelho, *Dinizia excelsa***. 2004.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A.; COIADO, B. Propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais de *Pinus spp*: correlação entre resistência à tração e classificação visual. **Revista Árvore**, v.33, n.4, p. 741-750, 2009.

GONÇALEZ J. C.; VALE, A. T.; COSTA, A. F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, v.7, n.1, p. 81-92. 2001.

JANKOWSKY, I. P. **Circular técnica nº 81 IPEF**. Dezembro/1979.

NOGUEIRA, M. **Classificação de peças de madeira serrada de dimensões estruturais de *Eucalyptus sp.* com uso de ensaios não-destrutivos**. 2007. 204f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

PIRES, F. A. C.; DEL MENEZZI, C. H. S.; DE SOUZA, M. R. Grading structural tropical lumber using stress wave, transverse vibration and ultrasonic method. In: PROCEEDINGS 17TH INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 2011, Sopron, Hungria. **Anaisí** Sopron: University of West Hungary, 2011. p.223-230.

QUOIRIN, N. S. R. **Diagnóstico de defeitos em madeira por tomografia de raios x**. 2004. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; SANTINI, E. J.; DOMINGUES, J. M. X.; GATTO, D. A.; MELO, R. R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não-destrutivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.2, p. 145-150, 2008.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.2, p. 291-299, 2005.

TELES, R. F.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, F.; SOUZA, M. R. Nondestructive evaluation of a tropical hardwood: interrelationship between methods and physical-acoustical variables. **Ciência da Madeira**, v.2, n.1, p. 1-14, 2011.