



DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus pellita* POR MÉTODO NÃO DESTRUTIVO

NONDESTRUCTIVE TEST METHOD TO DETERMINE THE MODULUS OF ELASTICITY OF *Eucalyptus pellita* TIMBER

Sena, Caroline¹; Silva, Gabriel²; Santos, Filipe²; Fábio César, Sandro²; Cunha, Rita²

¹UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, Brazil ;

²Universidade Federal da Bahia, Brazil

CÓDIGO: 4611012

Resumo

A aplicação de técnicas não destrutivas para avaliação da resistência mecânica da madeira é muito atrativa, sobretudo por não exigir a extração de protótipo. Pesquisas desenvolvidas com técnicas de ultrassom mostraram o potencial para a determinação de propriedades mecânicas da madeira validadas por meio da comparação com resultados de ensaios destrutivos. Tendo em vista que a concepção da norma brasileira NBR 15521 (ABNT, 2007) foi feita baseado em madeiras adultas, esse artigo tem como objetivo discutir as faixas de classificação de resistência prevista norma brasileira para a madeira de eucalipto jovem. Para este trabalho foram realizados os ensaios estabelecidos pela NBR 15521 (2007) que visa à classificação mecânica da madeira serrada por meio de ultrassom e o ensaio destrutivos de flexão estática e compressão paralela às fibras conforme os procedimentos descritos na NBR 7190 (1997). Os resultados deste estudo mostraram uma boa relação entre a determinação da resistência a flexão estática e da resistência a compressão paralela às fibras da madeira, no entanto, foi encontrada baixa relação para determinação do módulo de elasticidade à flexão (MOE) e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}). Os resultados indicaram que esta técnica de avaliação não destrutiva pode ser usada para avaliação da resistência a flexão simples e compressão paralela às fibras de peças de madeira de eucalipto jovem.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo; Ultrassom. Módulo de elasticidade.

Abstract

Non-destructive test to evaluate the timber mechanical properties is very attractive especially because it does not require prototype extraction. Researchers indicated that ultrasound techniques have potential for determining validated mechanical properties of wood by comparing it with destructive tests. Known that the conception of the Brazilian standard NBR 15521 (ABNT, 2007) was based on adult woods, this article aims to discuss the resistance classification ranges foreseen Brazilian standard for young eucalyptus wood. For this result, the paper carried out tests established by NBR 15521 (2007) which aims at the mechanical classification of sawn wood by ultrasound test method and the destructive testing of static flexion and parallel compression to grain according to the procedures described in NBR 7190 (1997). The results of this study showed a good relationship between the determination of the static flexural strength and the compressive strength parallel to the wood fibers. However, a low relation was found to determine the flexural modulus of elasticity (MOE) and the modulus of elasticity. in parallel compression to grain (E_{c0}). The results indicated that this non-destructive evaluation technique can be used to evaluate the resistance to bending and parallel compression to grain of juvenile eucalyptus wood.

Keywords: Non-destructive test; Ultrasonic waves test; Modulus of elasticity.



1. INTRODUÇÃO

A caracterização das propriedades mecânicas da madeira é fundamental para garantia dos requisitos de segurança e durabilidade em elementos estruturais. A norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) determina as propriedades mecânicas da madeira a partir de ensaios destrutivos realizados em corpos de prova pequenos e isentos de defeitos retirados da amostragem de um lote considerado homogêneo. Kretschmann e Hernandez (2006) explicam que a caracterização da madeira partir desse método produzem valores característicos de projeto superiores do que se considerado os defeitos existentes nas peças.

O método de determinação das características mecânicas da madeira a partir de ensaios destrutivos foi proposto no momento em que era comum a utilização de madeira proveniente de árvores com grande diâmetro de tronco, onde podia-se selecionar peças com pouco ou nenhum defeito (Kretschmann; Hernandez, 2006). No entanto, atualmente grande parte da madeira destinada para a construção civil é produzida em florestas plantadas que possuem idades variando entre 5 e 15 anos e pequeno diâmetro de tronco (Boscana; Boragno, 2019; IBÁ, 2017), o que dificulta a extração de peças sem a presença de defeitos como rachaduras, nós e bolsas de resina.

Dessa forma, os ensaios não-destrutivos surgem como uma opção eficaz para avaliar as peças de madeira com a existência de defeitos, descontinuidades ou indícios de degradação biológica, sem alteração da dimensão e das propriedades físicas, químicas e mecânicas. Assim, este método proporciona a determinação das propriedades de uma peça para sua correta destinação ou avaliação de uma estrutura existente (Targa; Ballarin; Biaggioni, 2005).

Diversos métodos não destrutivos podem ser utilizados para a caracterização da madeira, dentre eles: propagação de ondas de tensão (*stress wave timer*), espectrofotometria do infravermelho próximo, tomografia, raio X e a propagação de ondas ultrassônicas. Dentre os ensaios de ondas acústicas, o ensaio por ondas ultrassônicas é interessante por ser de fácil manuseio, baixo custo de obtenção e a facilidade de orientar as ondas.

A norma brasileira NBR 15521 – Ensaio não destrutivo – ultrassom – Classificação mecânica da madeira serrada de dicotiledôneas (ABNT, 2007) apresenta faixas de caracterização da resistência da madeira por meio de ensaio de ultrassom de acordo com a velocidade de propagação das ondas ou da constante de rigidez das peças. Para esta norma, foi utilizado uma amostragem de madeira nativa com idade de 45 anos e densidade aparente entre 450 kg/m³ e 1100 kg/m³. Tendo em vista que a concepção da norma foi feita baseado em madeiras adultas, esse artigo tem como objetivo discutir as faixas de classificação de resistência prevista norma brasileira NBR 15521 (ABNT, 2007) para a madeira de eucalipto jovem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ensaio de propagação de ondas ultrassônicas é composto por um gerador que transforma energia elétrica em pulsos de ondas ultrassônicas com frequência entre 20 Hz e 20 kHz emitidos por um transdutor emissor e recebido por um transdutor receptor. Esse ensaio é baseado em mensurar o tempo de viagem da onda entre o transdutor emissor e o



transdutor receptor da máquina. O tempo de viagem é influenciado pela frequência, sendo que à medida que a frequência aumenta, menor é o comprimento de onda e maior são as perdas de energia durante viagem no material. Os defeitos da madeira como descontinuidades, nós, trincas, rachaduras, mudança na orientação das fibras, anatomia da madeira e umidade são fatores que variam a velocidade da onda (Ross, 2015).

Após a combinação entre a segunda Lei de Newton e a Lei de Hooke generalizada, em que se relaciona as tensões e deformações em um material, por meio deduções da equação de Cristoffel, foi possível descrever a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em materiais ortotrópicos a partir da matriz de rigidez (Buccur, 2006). A simplificação apresentada por Buccur (2006) diz que a madeira possui doze constantes elásticas principais: três módulos de elasticidades (E_L, E_T, E_R), três módulos de cisalhamento (G_{RT}, G_{TL}, G_{RL}) e seis coeficientes de Poisson ($\nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}, \nu_{RL}, \nu_{TR}, \nu_{TL}$). Para o estudo de madeira, é comum a utilização da relação entre a constante de rigidez longitudinal (C_{LL}) e o módulo de elasticidade longitudinal (MOE) na mesma direção. A Equação (1) mostra como determinar a constante de rigidez longitudinal, em megapascals, em função da densidade aparente da madeira e a velocidade de transporte das ondas ultrassônicas.

$$C_{LL} = \rho_{12} \cdot V_{LL}^2 \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

Onde, ρ_{12} é a densidade aparente na condição de umidade de equilíbrio, em kg/m^3 , e V_{LL} é a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na mesma condição de umidade, em m/s. A velocidade de propagação das ondas é determinada pela Equação (2).

$$V_{LL} = \frac{L}{t} \quad (2)$$

Onde, L é o comprimento da peça, em metros, e t é o tempo de viagem da onda, em segundos.

O ensaio de ultrassom é eficiente para determinação da resistência a flexão estática em espécies adultas de madeira nativa. Gonzalez, Valle e Costa (2001) mostram equações de relação entre o módulo de elasticidade, módulo de ruptura e o módulo de elasticidade dinâmico, sua pesquisa obteve coeficientes de determinação (R^2) para as equações propostos superior a 0,67. Faria et al. (2018) estudaram o ensaio de ultrassom em lâminas de madeira de seringueira, este estudo identificou que quanto menor a quantidade de vazios, maior seria a velocidade de propagação da onda. Wimmer et al. (2018) ensaiaram peças prismáticas de 5 x 5 x 76 cm de 50 árvores de espécies nativas do interior do nordeste brasileiro, o estudo mostrou boa relação entre a caracterização por meio de ensaio de ultrassom e ensaios destrutivos ($R^2 = 0,87$).

Para a espécie de eucalipto, o estudo feito por Andrade Jr et al. (2016) mostram uma correlação satisfatório ($R^2 = 0,93$) entre os resultados por ensaio não-destrutivo e ensaio destrutivo e concluiu que o método é confiável para classificação da madeira da espécie de *E. grandis* com 25 anos de idade. Miná et al. (2004) ensaiaram postes de madeira com comprimento entre 7,5 e 9,0 metros da espécie *E. citriodora* com idade entre 12 e 15 anos de idade, após o estudo, os autores concluíram que os ensaios são satisfatórios para a



avaliação de postes, no entanto, foi encontrado baixa correlação ($R^2 = 0,55$), indicando que método é menos eficaz em madeiras jovens.

Carrasco e Azevedo Junior (2003) buscaram relacionar os valores de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas com a resistência a compressão paralela às fibras, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e resistência a tração normal às fibras em madeiras da espécie de *Manilkara spp.* (maçaranduba), *Hyminaea spp.* (jatobá) e *Eucalyptus tereticornis*. Esse estudo mostra uma forte relação entre a equação apresentada em função da velocidade de propagação das ondas e a resistência a compressão paralela às fibras ($R^2 = 0,77$), os valores encontrados nessa relação são próximos aos relatados por Stangerlin et al. (2008). No entanto, mostra baixa relação entre o resultado no ensaio e a resistência a tração normal às fibras ($R^2 = 0,56$), assim como não foi possível encontrar relação entre o ensaio de ultrassom e a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

A NBR 15521 (ABNT, 2007) propõe classes de resistência para o módulo de elasticidade à flexão (MOE), a compressão paralela às fibras ($f_{c0,k} 12\%$) e módulo de elasticidade à compressão ($E_{c0} 12\%$) na condição de umidade a 12%, de acordo com a constante de rigidez ou velocidade de propagação das ondas. A tabela 1 mostra os valores de resistência para as classes apresentados na NBR 15521 (ABNT, 2007).

Tabela 1: Classes de rigidez, segundo NBR 15521 (ABNT, 2007).

Classe	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (MPa)	MOE (MPa)	$f_{c0,k} 12\%$ (MPa)	$E_{c0} 12\%$ (MPa)
UD-20	< 3040	< 10620	< 6750	20	8000
UD-25	3040 – 3690	10620 – 13000	6750 – 10420	25	12000
UD-30	3690 – 3950	13000 – 15400	10420 – 13020	30	14000
UD-35	3950 – 4140	15400 – 17800	13020 – 14920	35	15000
UD-40	4140 – 4300	17800 – 20150	14920 – 16520	40	16500
UD-45	4300 – 4390	20150 – 22500	16520 – 17420	45	18500
UD-50	4390 – 4490	22500 – 24900	17420 – 18420	50	19500
UD-55	4490 – 4600	24900 – 27300	18420 – 19120	55	20500
UD-60	> 4600	> 27300	> 19120	60	21200

3. METODOLOGIA

3.1. Ensaio de propagação de ondas ultrassônicas

Para a realização dessa pesquisa foram utilizadas 12 toras de madeira de *Eucalyptus pellita* com 1,75 metros de comprimento, diâmetro médio de 15,0 cm no topo e idade variando entre 7 e 10 anos de idade. A determinação da umidade foi feita com medidor de umidade com agulhas Digisystem DL 2000 com faixa de umidade entre 6% e 60%, sendo coletado dados em três pontos da tora (base, meio e topo). As peças estavam em condição saturada no momento de realização do ensaio ($U_{médio} > 30\%$), sendo necessário a correção da velocidade para a condição de equilíbrio ($12\% < U_{médio} < 30\%$), de acordo com a Equação (3).

$$V_{LL} = V_{LL,sat} - 16 \cdot U - \rho_{ap} + 1745 \quad (3)$$



A determinação da densidade aparente do lote foi feito através de retirada de corpo de prova de cada peça com dimensão de 2,0 x 3,0 x 5,0 cm e realizado a partir de método previsto na norma brasileira NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeiras (ABNT, 1997) em estufa SL-100 com secagem em temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Foi utilizado emissor de ondas ultrassônicas Proceq Pundit Lab com resolução de $0,1 \mu\text{s}$ e frequência de 54 kHz.

O ensaio foi feito segundo métodos previstos na NBR 15521 – Ensaio não destrutivo – ultrassom – Classificação mecânica de madeira de dicotiledôneas. Para determinação da velocidade de percurso do pulso ultrassônico foram obtidas leituras de tempo de propagação da onda em três pontos diferentes na face da peça considerando a posição do transdutor de compressão na direção paralela às fibras da madeira (Figura 1). A velocidade foi determinada de acordo com a Equação (2). O da velocidade média ($V_{LL,m}$) foi determinado pelo valor intermediário entre os três valores encontrados, sendo desconsiderado medições com diferença superior a 10%. A constante de rigidez (C_{LL}) foi determinada de acordo com a Equação (1).

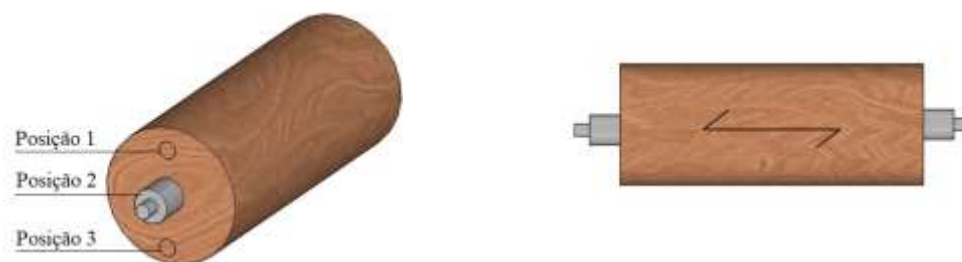


Figura 1: Pontos de medição das velocidades

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi dado pela Equação (4). Segundo Pedroso (2014), os coeficientes de Poisson para a madeira de *Eucalyptus pellita* são: $\nu_{RL} = 0,128$; $\nu_{TL} = 0,101$; $\nu_{LR} = 0,771$; $\nu_{TR} = 0,397$; $\nu_{LT} = 0,951$; $\nu_{RT} = 0,623$.

$$E_d = C_{LL} \frac{(1 - \nu_{LR} \cdot \nu_{RL} - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR} - \nu_{TL} \cdot \nu_{TL} - 2 \cdot \nu_{RL} \cdot \nu_{TR} \cdot \nu_{LT})}{(1 - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR})} \quad (4)$$

3.2. Ensaio de flexão estática e compressão paralela às fibras

Para determinação da resistência a flexão estática, foram produzidos corpos de prova com dimensão de 5 x 5 x 115 cm ao longo das fibras (Figura 2). O procedimento adotado seguiu as recomendações de ensaio da NBR 7190 (ABNT, 1997), onde o corpo de prova foi vinculado a dois apoios articulados móveis e efetuada a aplicação de carga monotônica no meio do vão, por meio de um cutelo acoplado ao atuador.

O módulo de elasticidade na flexão (MOE) é determinado pela Equação (6), onde $F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ são correspondentes a 10% e 50% da carga máxima e $v_{10\%}$ e $v_{50\%}$ são os deslocamentos no meio do vão a 10% e 50% da carga máxima, respectivamente.

$$\text{MOE} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%})} \quad (6)$$



O procedimento adotado para determinação da resistência a compressão paralela às fibras segue as recomendações de ensaio da NBR 7190 (ABNT, 1997), para isso, foram confeccionados corpos de prova com seção quadrada de 5 x 5 cm e comprimento de 15 cm ao longo das fibras. A determinação da resistência (f_{c0}) foi obtida por meio da Equação (7):

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (7)$$

Onde f_{c0} , resistência a compressão paralela às fibras; $F_{c0,máx}$, força máxima de compressão aplicada no corpo de prova; A é a área resistente. Para a determinação da rigidez por meio do módulo de elasticidade, aplicou-se a Equação (8):

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (8)$$

Sendo E_{c0} , módulo de elasticidade a compressão paralela às fibras; $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$, tensão de compressão a 50% e 10% da tensão máxima (f_{c0}); $\varepsilon_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$, deformações específicas correspondentes às tensões de $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

A Tabela 2 mostra os valores de densidade aparente, constante de rigidez, módulo de elasticidade dinâmico, módulo de elasticidade na flexão, resistência e módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras na condição de umidade de equilíbrio.

Tabela 2: Valores de densidade aparente, módulo de elasticidade dinâmico e propriedades mecânicas da madeira de E. pellita.

Amostra	ρ_{ap} (g/cm ³)	C_{LL} (GPa)	E_d (GPa)	MOE (GPa)	$f_{c0}12\%$ (MPa)	$E_{c0} 12\%$ (MPa)
1	1,038	30743,7	16,59	12,94	49,96	9,76
2	1,005	20096,7	10,85	8,68	52,69	9,93
3	1,139	22485,8	12,14	9,95	50,07	8,15
4	0,975	19230,6	10,38	8,72	39,93	9,04
5	0,955	25518,0	13,77	11,85	36,75	11,50
6	1,105	22195,7	11,98	10,54	39,94	8,20
7	0,649	19770,9	10,67	9,60	55,44	11,66
8	1,140	20914,7	11,29	10,39	53,82	10,12
9	1,074	27587,0	14,89	14,00	38,31	8,18
10	0,775	19012,1	10,26	9,85	47,37	9,87
11	1,194	21706,9	11,72	11,48	45,15	10,92
12	0,832	18424,4	9,94	9,94	43,79	9,92
Média	0,990	22307,21	12,04	10,66	46,10	9,77
CV(%)	16,63	17,01	17,01	15,23	13,92	12,43
Máximo	1,194	30743,73	16,59	14,00	55,44	11,66
Mínimo	0,649	18424,42	9,94	8,68	36,75	8,15



A densidade aparente média do lote está dentro da faixa estudada na norma NBR 15521 (ABNT, 2007) para madeiras de dicotiledôneas ($0,450 \text{ g/cm}^3 < \rho_{ap} < 1,100 \text{ g/cm}^3$). A velocidade de propagação das ondas é diretamente afetada pela porosidade da madeira, onde, quanto mais porosa a madeira, mais tempo a onda levará para viajar no corpo. No lote ensaiado, a amostra 6 registrou a menor densidade aparente (menos porosa), no entanto, não registrou o menor valor de constante de rigidez (C_{LL}). Esse fato pode ser explicado devido a não conformidade do corpo de prova de densidade para representar a tora, ou devido a tortuosidade das toras no momento de leitura do ensaio. Dessa forma, nota-se que o procedimento do ensaio de ultrassom é mais eficiente em peças aparelhadas com seção prismática.

As peças que contenham somente alborno, ou somente cerne, também aumentam a confiabilidade do ensaio. Poubel et al. (2011) mostram que na madeira de *E. pellita* a densidade pode variar em torno de 12% entre o cerne e alborno. De modo geral, o coeficiente de variância (CV) encontrado para C_{LL} foi satisfatório para ensaios em madeira. Os valores registrados para o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) são similares ao encontrados por Lorensani (2013) e Silva (2018), respectivamente: 11,22 GPa e 12,23 GPa.

Os valores de E_d e MOE variaram até 28% na amostra e, em média, o valor de E_d foi 13% maior que MOE. Miná et al. (2004) encontraram valores médios de E_d de 5% a 14% mais altos que o de MOE em peças roliças de eucalipto, com coeficiente de variância de 8,1% e 12,7%, valores compatíveis ao encontrado. Os fatores que levam essa variação ainda são discutidos por autores. Para Gonçalves et al. (2018), a correção da velocidade de propagação em madeira saturada ($U > 30\%$) para a velocidade em condição de equilíbrio por meio da Equação (3), apresentada na NBR 15521 (ABNT, 2007) resultam em valores até 9% mais altos.

O coeficiente de determinação entre módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade estático (MOE) é apresentado na Figura 2. O lote registrou valor de $R^2 = 0,7478$ e está dentro do intervalo esperado pela literatura mencionado na revisão bibliográfica.

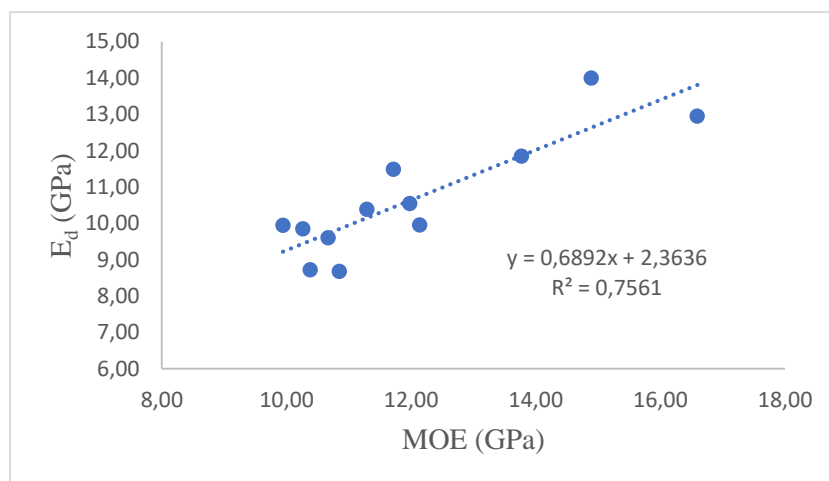


Figura 2- Linha de tendência e determinação de correlação entre E_d e MOE do lote



Quanto a classificação apresentada na NBR 15521 (ABNT, 2007), mostrada na Tabela 1, o lote ensaiado seria caracterizado, de acordo com o coeficiente de rigidez (C_{LL}), como classe UD-45 ($20150 < C_{LL} = 22307,21 < 22500$). Dentro dessa classe, são esperados valores de MOE entre 16,52 GPa e 17,42 GPa, valores consideravelmente maiores que o E_d calculado pela própria norma e os valores de MOE encontrados em ensaio destrutivo. Nesse caso, conclui-se que para a madeira estudada a classificação da norma não é adequado, pois oferece valores superestimados que podem comprometer a segurança de projeto ou avaliação de estruturas existentes.

Ruy (2016) afirma que para se obter valores de segurança deve-se aplicar coeficientes de minoração de até 28% dos valores encontrados na Tabela 1. Para esta pesquisa, se for aplicado o coeficiente de minoração de 1,28 sobre o valor mínimo de MOE para classe UD-45 (16,52 GPa), será encontrado 12,90 GPa, sendo este valor ainda maior do que o encontrado experimentalmente. Para madeiras jovens de eucalipto, a faixa proposta pela Tabela 1 é inadequada, sendo recomendado a aproximação do valor real de MOE pelo cálculo de E_d .

Para a classificação da resistência a compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$ 12%), pela classificação da Tabela 1, a classe UD-45 deve atingir resistência de 45 MPa. Nesse caso, o lote obteve resistência característica de compressão paralela às fibras de 44,95 MPa, não havendo diferença entre o valor indicado por norma e o encontrado por meio de ensaios destrutivos. Para a comparação do módulo de elasticidade à compressão (E_{c0}), o valor obtido no ensaio (9,91 GPa) foi 86% maior que o esperado pela classificação da norma (18,50 GPa).

Os valores encontrados na pesquisa divergem dos encontrados por Stangerlin et al. (2008), onde afirma que, para a madeira de eucalipto, os valores de módulo de elasticidade a compressão medido do ensaio de ultrassom podem ser entre 19% e 29% superiores do que determinados por ensaios destrutivos. Essa divergência pode ser explicada pela proporção de madeira juvenil presente no tronco da amostra ensaiada. Em madeiras jovens, a quantidade de extrativos e a angulação microfibrilar reduz significativamente o módulo de elasticidade da peça, mas alterando pouco a resistência à compressão paralela às fibras, sendo esta propriedade mais influenciada pela presença de nós e rachaduras de crescimento.

5. CONCLUSÃO

A pesquisa mostra que os métodos de avaliação não destrutivos por meio de ensaio de propagação de ondas ultrassônicas é eficiente para determinação das propriedades mecânicas da madeira, destacando:

- Foi encontrado uma forte relação ($R^2 = 0,7478$) entre o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade estático (MOE);
- O valor de módulo de elasticidade pelo ensaio de ultrassom (E_d) foi 13% superior que o determinado por ensaios destrutivos (MOE), sendo necessário aplicação de coeficiente de minoração em favor da segurança.



- A classificação da norma NBR 15521 (ABNT, 2007) para determinação do módulo de elasticidade, neste estudo, não é recomendado, pois os valores de módulo de elasticidade na flexão (MOE) foram superestimados em até 54%.
- A classificação da norma NBR 15521 (ABNT, 2007) foi satisfatória para a classificação da resistência na compressão paralela às fibras. No entanto, os valores de módulo de elasticidade foram, em média, 86% mais altos, mostrando grande discrepância.
- A presença de madeira juvenil reduz significativamente as propriedades de rigidez da madeira, logo, a classificação segundo a norma NBR 15521 (ABNT, 2007) deve ser utilizada com cautela. São necessários novos estudos para determinação de novas classes para madeiras jovens de dicotiledôneas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Madeiras (LabMad/UFBA), ao Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais (LEDMA/UFBA) da Universidade Federal da Bahia e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Governo Federal do Brasil pelo apoio oferecido na realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1997). NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro.

_____. (2007). NBR 15521 - Ensaio não destrutivo - ultrassom - Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. Rio de Janeiro.

Andrade Jr, J. et al. (2016). Comparação entre o módulo de elasticidade obtido por ondas de tensão e por flexão em madeiras de *E. grandis*. Anais do XV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Curitiba.

Boscana, M.; Boragno, L (2018). Actualidad del sector forestal - Anuario 2018 - Análisis sectorial y cadenas productivas. Ministério de Ganadería, Agricultura y Pesca. Montevideo.

Bucur, V. (2006) Acoustics of Wood. 2 ed. Springer, p. 393. New York, USA.

Carrasco, E.; Azevedo Jr, A. (2003). Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som – fundamentos físicos e resultados experimentais. Revista Cerne, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178–191.

Faria, D. et al. (2018). Relação entre o módulo de elasticidade (MOE) e o Módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) de lâminas da madeira de seringueira para produção de vigas de madeira laminada colada (MLC). Anais do XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira e III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira, São Carlos.

Gonçalez, J.; Valle, A.; Costa, A (2001). Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). Revista Cerne, Lavras, v. 7, n. 2, p. 81–92.



Gonçalves, R. et al (2018). Moisture-related adjustment factor to obtain a reference ultrasonic velocity in structural lumber of plantation hardwood. *Journal of Wood Material Science and Engineering*, v. 13, n. 5, p. 254–261.

Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2017). Relatório Anual. Indústria Brasileira de Árvores, Brasília.

Kretschmann, D.; Hernandez, R. (2006). Grading timber and glued structural members. In: *Forest Products Laboratory. Primary Wood Processing: Principles and Practice*. Madison: US Department of Agriculture, Forest Service, v. 2, p. 339–390.

Lorensani, R (2013). Classificação mecânica de peças estruturais de eucalipto utilizando ultrassom. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas.

Miná, A. et al (2004). Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultrassom. *Scientia Forestalis*, n. 1995, p. 188–196.

Pedroso, C. (2014). Propriedades de resistência e de rigidez da madeira obtidas a partir da avaliação acústica na árvore. Tese, Universidade Estadual de Campinas.

Poubel, D. et al. (2011). Estrutura Anatômica e Propriedades Físicas da Madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Floresta e Ambiente*, v. 18, n. 2, p. 117–126.

Ross, R. (2015). *Nondestructive evaluation of wood*. 2. ed. US Department of Agriculture, Forest Service. Madison.

Ruy, M. (2016). Classificação de madeira roliça de eucalipto por ultrassom. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas.

Silva, J. (2018). Parâmetros construtivos para painéis verticais adaptados do sistema wood frame em madeira de eucalipto jovem. Dissertação, Universidade Federal da Bahia.

Stangerlin, D. et al. (2008). Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não-destrutivo. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 3, n. 2, p. 145–150.

Targa, L.; Ballarin, A.; Biaggioni, M. (2005). Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não-destrutivo de vibração transversal. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 25, n. 2, p. 291–299.

Wimmer, P. et al. (2018). Correlação entre avaliações não destrutivas e flexão estática para madeira de dez espécies da caatinga. *Anais do XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira e III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira*, São Carlos, Março.