

Recebido: 03-06-2015 Aceito: 01-11-2015

## Propriedades mecânicas da madeira de acácia-negra aos quatro e sete anos de idade

Rafael de Avila Delucis<sup>1\*</sup>, André Luiz Missio<sup>2</sup>, Diego Martins Stangerlin<sup>3</sup>, Darci Alberto Gatto<sup>2,4</sup>, Rafael Beltrame<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

<sup>3</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

<sup>4</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

**RESUMO** O presente trabalho objetivou analisar propriedades mecânicas da madeira de acácia-negra proveniente de plantios abatidos aos quatro e sete anos de idade, com vistas a subsidiar sua utilização como material estrutural. Foram selecionadas 10 árvores em florestas do município de Piratini, estado do Rio Grande do Sul. As propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaios destrutivos (flexão, compressão paralela às fibras e dureza Janka) e não-destrutivos (técnica ultrassônica). Com base em suas propriedades mecânicas, analisadas comparativamente às obtidas em estudos antecedentes, a madeira de acácia-negra apresentou potencial para utilização em projetos estruturais. Como resultados atrativos, destacam-se os valores de 0,657 g.cm<sup>-3</sup>, 8368 MPa e 13859 MPa obtidos para massa específica e módulos de elasticidade à flexão e compressão paralela às fibras, respectivamente. Quanto à interação do fator idade, de maneira geral, verificou-se que a madeira proveniente da floresta de sete anos apresentou maiores propriedades mecânicas. O módulo de elasticidade dinâmico avaliado pelo método ultrassônico apresentou correlações satisfatórias com as propriedades mecânicas avaliadas pelos testes mecânicos de flexão e compressão paralela às fibras.

**Palavras-chave:** qualidade da madeira; ensaios destrutivos; ultrassom.

## Physical and mechanical properties of black wattle wood with four and seven years old

**ABSTRACT** This study aims to analyze mechanical properties of black wattle wood from forest plantations felled with four and seven years old, in order to subsidize their use as a structural material. Ten trees were selected from forests located in Piratini city, Rio Grande do Sul State. Mechanical properties were evaluated by destructive (static bending, compression parallel to grain and Janka hardness) and nondestructive (ultrasound method) tests. Based on mechanical properties analyzed - comparatively with previous studies - black wattle wood presented a potential use in structural building. As attractive results, the values of 0,657 g.cm<sup>-3</sup>, 8368 MPa and 13859 MPa obtained for specific gravity and modulus of elasticity at both static bending and compression parallel to grain, respectively, should be highlighted. Regarding the interaction of the age factor, in general, wood from the forest plantation with seven years presented greater mechanical properties than wood from the forest plantation with four years. Dynamic modulus of elasticity evaluated by ultrasound method presented satisfactory correlations with mechanical properties evaluated by static bending and compression parallel to grain tests.

**Keywords:** wood quality; destructive testing; ultrasound.

## Introdução

O dimensionamento dos materiais é o principal objetivo de sua caracterização mecânica. Nesse sentido, alguns fatores devem ser levados em consideração, tais como: o tipo e a intensidade da solicitação requerida, os tipos de tensões causadas por estas, a distribuição dessas tensões e as propriedades mecânicas do material (CALLISTER JR., 2002).

Tais características são os subsídios técnicos para um planejamento confiável, afim de prever as possibilidades de ocorrência de falha em um componente estrutural. A falha em materiais de engenharia trata-se de um evento bastante inconveniente, pois frequentemente põe em risco recursos econômicos, a disponibilidade de produtos e serviços, bem como a segurança de pessoas.

Na proposição de um projeto estrutural, as propriedades mecânicas dos materiais a serem utilizados em forma de estruturas têm papel central, pois em consórcio com os tipos de solicitações previstas, essas serão as características utilizadas no dimensionamento das peças. Os parâmetros mecânicos de um material refletem a relação entre sua resposta ou deformação durante um estímulo ou força aplicada. Com relação à madeira, na comparação com outros materiais, sua principal vantagem consiste na relação entre sua leveza e resistência mecânica.

Portanto, tendo em vista as particularidades das propriedades mecânicas da madeira, o seu estudo se faz importante. Nesse contexto, além de seu grau de dissimilaridade quando comparadas com metais e cerâmicas, Callister Jr. (2002) já atribuía a importância desse tipo de material à necessidade de utilização de matérias-primas, as quais a demanda de energia seja baixa em seu processamento de modo a promover a sustentabilidade.

Ainda no contexto da caracterização mecânica dos materiais, a avaliação de diversos parâmetros de resistência e rigidez por meio de ensaios não-destrutivos (END's) tem sido

aprimorada no sentido de consolidar-se no ramo industrial, principalmente em decorrência dos resultados apontados no meio científico acerca de sua exatidão. Com relação à madeira, o objetivo dos atuais estudos oferecidos pela literatura tem sido a definição da melhor técnica dentre os END's, capaz de prever de forma eficiente suas propriedades mecânicas (CADEMARTORI et al., 2014; BRANCHERIAU, 2014; WESSELS et al., 2015).

Dentre essas técnicas, o método ultrassônico configura-se como o principal END, mostrando-se eficaz não só como parâmetro estimativo de resistência e rigidez em peças (MISSIO et al., 2013a), como também para identificar peças com defeitos naturais de crescimento (BUCUR, 2006) e advindos do ataque de organismos xilófagos (GATTO et al., 2012; WEILER et al., 2013). As principais vantagens da técnica ultrassônica consistem na flexibilidade (possibilidade de utilização em árvores e amostras com dimensões variadas), na velocidade e no baixo custo de operação (OLIVEIRA et al., 2002).

No caso da madeira, por tratar-se de uma matéria-prima de origem vegetal, as características que condicionam suas propriedades englobam fatores endógenos (produção hormonal, estrutura anatômica e características químicas) e exógenos (sistema de plantio, condução da floresta, condições edafoclimáticas) (KOLLMANN; CÔTÉ JUNIOR, 1968; PANSIN; DE ZEEUW, 1980). O que faz com que a idade se torne um fator de grande relevância, haja vista que suas características de crescimento estão intimamente relacionadas com o amadurecimento de suas células meristemáticas localizadas no câmbio vascular (EVERT, 2006).

Com relação ao fator espécie florestal, dentre as principais espécies atualmente plantadas, a acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild) encontra-se dentre as mais relevantes no cenário econômico nacional e internacional. A madeira de acácia-negra tem por fins tradicionais, a produção de energia (lenha e

carvão), celulose e papel, e extração de tanino. No entanto, algumas outras finalidades com informações incipientes são justificativas recorrentes de pesquisas, como por exemplo, a confecção de produtos para fins estruturais (DELUCIS et al., 2015). Segundo a ABRAF (2013), os plantios de acácia-negra no Brasil passaram dos 148 mil hectares em 2012, sendo que o estado do Rio Grande do Sul aparece em destaque.

Dado o grande apelo em prol do uso de materiais renováveis, da caracterização através de END's e da relevância econômica da madeira acácia-negra, o presente estudo objetivou analisar propriedades mecânicas da madeira de acácia-negra aos quatro e sete anos de idade. Adicionalmente, visou-se estabelecer comparações entre os parâmetros mecânicos obtidos por ensaios destrutivos (flexão e compressão paralela às fibras) e não-destrutivos (propagação e ondas de ultrassom), com vistas a reportar subsídios para determinação dos fins mais adequados para seu emprego como material estrutural.

## Material e Métodos

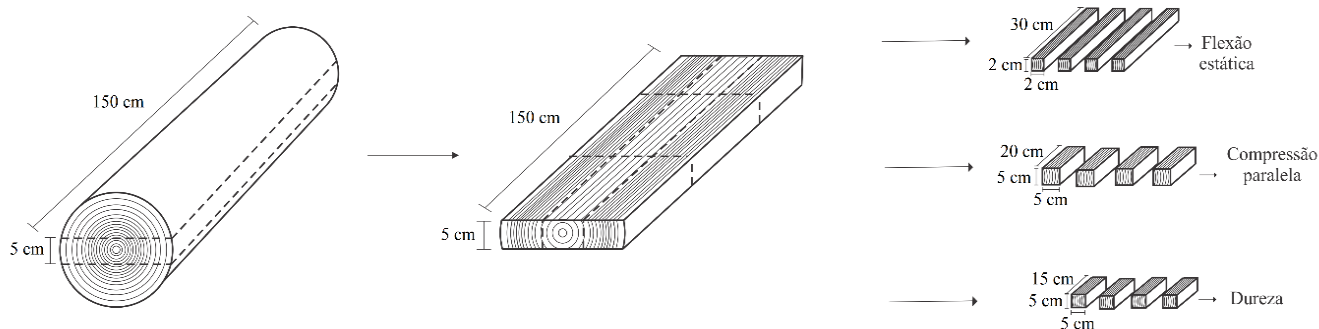
### *Seleção do material de estudo e confecção das amostras*

Para o estudo foram selecionadas 10 árvores de acácia-negra com diâmetro à altura 1,3 m do peito (DAP) entre 15 e 20 cm, provenientes de povoamentos com quatro e sete anos de

idade – sendo cinco árvores para cada idade. Os plantios foram implantados em um espaçamento inicial de 1,5 x 3,0 m e localizavam-se em propriedades de pequenos produtores florestais do município de Piratini, Rio Grande do Sul (31°30'09"S 53°05'12"O). A seleção ocorreu em conformidade com o procedimento normativo D 5536-94 da *American Society for Testing of Materials* – ASTM (2010).

De cada árvore amostrada, seccionou-se a primeira tora de 1,5 m de altura, a partir da qual foram desdobrados pranchões centrados pela medula com 5 cm de espessura. Após, por meio do desdobro secundário, foram descartadas as regiões contidas pela medula e proximidades da casca dos troncos.

Dessa maneira, foram confeccionadas um total de 180 amostras, divididas em três diferentes configurações geométricas (60 amostras para cada), as quais, conforme ilustra a Figura 1, tiveram as dimensões de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm, 5,0 x 5,0 x 20,0 cm e 5,0 x 5,0 x 15,0 cm (radial x tangencial x longitudinal), sendo destinadas para os ensaios de flexão, compressão paralela às fibras e dureza Janka, respectivamente. Em sequência, as amostras confeccionadas foram encaminhadas à uma câmara climática sob as condições de 65% de umidade relativa do ar e 20 °C de temperatura até atingirem teor de umidade de equilíbrio de 12%.



**Figura 1.** Esquema para a confecção das amostras.

**Figure 1.** Scheme for manufacturing of the samples.

### Ensaio não-destrutivo

A massa específica aparente a 12% de umidade foi mensurada utilizando-se um paquímetro digital (resolução de 0,01 mm) e uma balança analítica (resolução de 0,01 g) (Equação 1).

$$\rho_{a12\%} = m_{12\%} \cdot V_{12\%}^{-1} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:  $\rho_{a12\%}$  = massa específica aparente a 12% de umidade ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $m_{12\%}$  = massa a 12% (g);  $V_{12\%}$  = volume a 12% ( $\text{cm}^3$ ).

O ensaio não-destrutivo de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado com o auxílio de um aparelho de ultrassom da marca Proceq, modelo Tico, analogamente aos trabalhos de Missio et al. (2013a), Missio et al. (2013b) e Delucis et al. (2015). Para as amostras de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm, foram utilizados transdutores piezelétricos do tipo ponto seco com 54 kHz de frequência. Para as amostras de 5,0 x 5,0 x 20,0 cm, foram utilizados transdutores piezelétricos do tipo face plana com 45 kHz de frequência. Ressalta-se que as amostras de 5,0 x 5,0 x 15,0 cm não foram ensaiadas pelo uso do ultrassom em razão do comprimento das mesmas, que é menor do que a distância mínima entre os transdutores requerida para os modelos empregados.

Nas amostras avaliadas pelos transdutores do tipo face plana, uma fina camada de vaselina farmacêutica foi disposta nas faces transversais das amostras antes dos ensaios. Por meio da velocidade de propagação da onda ultrassônica (Equação 2) e da massa específica aparente a 12%, foi calculado o módulo de elasticidade dinâmico (Equação 3).

$$V_{\text{som}} = d \cdot t^{-1} \quad \text{Equação 2}$$

$$E_D = V_{\text{som}}^2 \cdot \rho_{a12\%} \cdot 10^{-3} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:  $V_{\text{som}}$  = velocidade de propagação da onda ultrassônica ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $d$  = comprimento da amostra (m);  $t$  = tempo de

propagação da onda ultrassônica (s);  $E_D$  = módulo de elasticidade estático (MPa);  $\rho_{a12\%}$  = massa específica aparente à 12% de umidade ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).

### Ensaio Destrutivo

As propriedades mecânicas da madeira foram avaliadas por meio de ensaios de flexão, compressão paralela às fibras e dureza Janka, segundo o procedimento D 143-94 (ASTM, 2007). No ensaio de dureza Janka, as amostras foram testadas nas três faces relativas a seus três planos anatômicos, de modo que as faces anatômicas transversal, longitudinal radial e longitudinal tangencial corresponderam as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. O teor de umidade à base seca das amostras foi mensurado pela Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1990).

Do gráfico força *versus* deformação gerado pelo ensaio de flexão, foi avaliada a fragilidade (F; em %) de cada amostra em conformidade com a metodologia proposta por Phuong et al. (2007). O método consiste em ajustar uma reta de regressão para a zona elástica do gráfico que obtenha um coeficiente de determinação de 0,999. Dessa forma, a zona abaixo e o restante da área são tidas respectivamente como zonas elástica e plástica da deformação ocorrida, dais quais é obtida a Fragilidade pela Equação 4.

$$F(\%) = AE \cdot (AE + AP)^{-1} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:  $F(\%)$  = Fragilidade (%);  $A_E$  = área elástica;  $A_P$  = área plástica.

### Análise estatística

Para o delineamento experimental, os dados foram considerados em um arranjo totalmente casualizado. Para a comparação entre as idades avaliadas (quatro e sete anos) foram realizadas análises de variância (ANOVA) simples.

Para explicar as relações funcionais entre a massa específica aparente a 12% e a velocidade ultrassônica com as propriedades mecânicas, foram realizadas análises de correlação simples (Pearson). Por fim, foram gerados modelos lineares por meio de análises de regressão, utilizando-se como variável independente o  $E_D$  e como variáveis dependentes os parâmetros de resistência e rigidez avaliados pelos ensaios mecânicos de flexão e compressão paralela às fibras.

## Resultados e Discussão

Conforme a Tabela 1, dentre os parâmetros que não apresentaram distinção estatística quando comparados entre idades, esteve a  $\rho_{a12\%}$ .

Contudo, tendo em vista que diversas propriedades mecânicas diferiram nessa comparação entre idades, é possível presumir que embora a massa específica seja a principal propriedade de qualificação da madeira (PANSHIN; DE

ZEEUW, 1980), não pode ser tida como um indicador de qualidade definitivo em um projeto estrutural, tornando-se necessária a quantificação de outros parâmetros tecnológicos para uma decisão conclusiva. Nesse sentido, pode-se ressaltar as propriedades mecânicas avaliadas pelo ensaio de compressão paralela às fibras, pelas diferenças obtidas atribuídas ao fator idade.

Ainda com relação ao fator idade, a superioridade do povoamento de sete anos com relação à algumas das propriedades mecânicas do presente estudo pode ser atribuída às características de crescimento das árvores, embora atualmente não existam subsídios literários conclusivos à respeito do período de maturação dos lenhos juvenil e adulto de acácia-negra. Conforme Evert (2006), a maturação dos tecidos lenhosos de um vegetal é um processo natural de movimentação e funcionalização de suas células meristemáticas, o qual culmina na formação de células fibrosas mais longas e espessas, o que consequentemente reflete-se em um incremento da rigidez e

**Tabela 1.** Valores das propriedades da madeira de *Acacia mearnsii*.

**Table 1.** Values of the properties of *Acacia mearnsii* wood.

Propriedade		4 anos	7 anos	Dp (%)	Teste F
$\rho_{a12\%}$	(g.cm <sup>-3</sup> )	0,647 (0,04)	0,657 (0,05)	1,52	0,45 <sup>ns</sup>
$E_M$	(MPa)	8.313,47 (2489,88)	8.368,80 (2173,38)	0,66	0,01 <sup>ns</sup>
$f_M$	(MPa)	56,19 (25,85)	59,85 (25,34)	6,12	0,3 <sup>ns</sup>
$E_{c0}$	(MPa)	12.236,8 (2836,49)	13.859,7 (2512,76)	11,71	6,52*
$f_{c0}$	(MPa)	38,21 (3,75)	39,87 (4,49)	4,16	7,08*
$f_{H0}$	(MPa)	42,911 (11,17)	42,992 (11,61)	0,19	0 <sup>ns</sup>
$f_{HR}$	(MPa)	35,23 (7,94)	39,49 (7,45)	10,79	2,28 <sup>ns</sup>
$f_{HT}$	(MPa)	36,86 (7,66)	37,61 (12,83)	1,99	0,37 <sup>ns</sup>
$V_{somM}$	(m.s <sup>-1</sup> )	4412 (420,02)	4563 (228,15)	3,31	2,95 <sup>ns</sup>
$V_{somc}$	(m.s <sup>-1</sup> )	5191 (224,77)	5357 (212,67)	3,10	6,34*
$E_{DM}$	(MPa)	12.621,1 (2844,79)	14.159,8 (3126,48)	10,87	3,83 <sup>ns</sup>
$E_{Dc}$	(MPa)	17.491,0 (2063,94)	18.484,5 (1279,13)	5,37	4,24*
F(%)	(%)	44,067 (14,88)	36,217 (6,48)	17,81	7,28**

Em que: Dp (%)= diferença percentual na comparação entre os valores médios das idades;  $\rho_{a12\%}$ = massa específica aparente a 12% de umidade;  $E_M$ = módulo de elasticidade à flexão;  $f_M$ = módulo de ruptura à flexão;  $E_{c0}$ = módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras;  $f_{c0}$ =resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{H0}$ = resistência à dureza Janka paralela às fibras;  $f_{HR}$ =resistência à dureza Janka radial;  $f_{HT}$ = resistência à dureza Janka tangencial;  $V_{somM}$ = velocidade ultrassônica das amostras de flexão;  $V_{somc}$ = velocidade ultrassônica das amostras ensaiadas à compressão paralela às fibras;  $E_{DM}$ = módulo de elasticidade dinâmico de flexão;  $E_{Dc}$ = módulo de elasticidade dinâmico de compressão paralela às fibras; F(%)= fragilidade; \* = significativo em 5% de probabilidade de erro; \*\* = significativo em 1% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup>= não significativo. Desvio padrão entre parênteses. resistência mecânica da madeira.

Em comparação com as resistências de madeiras tradicionalmente utilizadas para fins estruturais como as espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, verifica-se que a madeira de acácia-negra possui resistência adequada para esse uso, pois na comparação com os resultados obtidos por Delucis et al. (2013) e Cademartori et al. (2014), os valores médios obtidos no presente estudos foram intermediários aos dos estudos desses autores. Conforme Delucis et al. (2013), em ensaios de flexão, as madeiras de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, ambas aos 13 anos de idade, apresentaram  $E_M$  de 5.840 e 7.184 MPa, respectivamente. Por sua vez, Cademartori et al. (2014), utilizando esse mesmo ensaio mecânico, avaliaram a madeira de *Eucalyptus grandis*, aos 17 anos de idade, encontraram para  $E_M$  o valor médio de 11.169 MPa.

Com relação ao ensaio de compressão paralela às fibras, os resultados reportados na Tabela 1 também mostram como as propriedades obtidas no presente estudo são condizentes com os valores obtidos para espécies tradicionalmente utilizadas, pois os valores médios de módulo de elasticidade estiveram em uma faixa intermediária aos obtidos nos estudos de Stangerlin et al. (2008) com as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* e Serpa et al. (2003), estudando a madeira de *Pinus elliottii*.

Em análise da dureza Janka, também na comparação com estudos antecedentes, pela comparação com os resultados de Santini et al. (2000), verifica-se que os valores desse estudo foram maiores do que os obtidos para espécies tradicionais como o *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, pois os autores encontraram para a primeira madeira aos 13 anos de idade, os valores médios de 22, 29 e 33 MPa nas direções tangencial, radial e axial, respectivamente. Já para a segunda espécie de pinus, os mesmos autores encontraram valores de 22, 29 e 31 MPa para as direções tangencial, radial e axial, respectivamente.

Na comparação com uma espécie do mesmo gênero, analogamente às comparações feitas para espécies tradicionalmente utilizadas, verifica-se que os resultados estiveram dentro da faixa dos obtidos em estudos antecedentes, pois na comparação com os resultados obtidos por Ouypornprasert et al. (2005), que avaliaram a madeira de *Acacia mangium* obtida em povoamentos com idades entre 10 e 15 anos, oriundos da Tailândia, os valores médios para  $E_{c0}$  e  $f_{c0}$  foram de 5.541 e 36 MPa, respectivamente, os quais foram menores do que os apresentados no presente estudo. Já para a variável  $f_{H0}$ , os mesmos autores encontraram 52 MPa, valor mais elevado do que o desse estudo.

Ainda pela Tabela 1, verificou-se que a madeira de quatro anos apresentou um valor médio de  $F(\%)$  17,81% mais elevado do que a madeira de sete anos, o que do ponto de vista de suas características ao deformar-se em razão de solicitações mecânicas, indica a inferioridade da madeira mais nova comparada à mais velha, visto que a  $F(\%)$  pode ser entendida como o valor da proporção de resiliência em razão da tenacidade de um material.

Nas relações funcionais entre as propriedades físicas e mecânicas apresentadas na Tabela 2, ressalta-se a variável  $V_{som}$  por correlacionar-se significativamente com todas as propriedades mecânicas, exceto a  $f_{c0}$  do povoamento de sete anos.

Pela Tabela 2, verificou-se que a  $V_{som}$  correlacionou-se melhor com os módulos de elasticidade do que com os módulos de ruptura, tanto no ensaio de flexão, quanto no de compressão paralela às fibras. Isto pode ser atribuído ao mecanismo de obtenção dessas medições dinâmicas, pois em um ensaio de propagação de ondas de ultrassom, o equipamento é configurado para emitir pulsos dentro do regime elástico do material (LORENZI et al., 2014). Em outras palavras, os esforços gerados na amostra pela propagação das ondas mecânicas são poucos intensos, abrangendo somente o limite elástico de sua deformação. Dessa maneira, é possível explicar



porque fica comprometida a predição de propriedades mecânicas como o módulo de ruptura, as quais são obtidas acima do limite de proporcionalidade do material.

Ainda por meio da Tabela 2, verifica-se que a  $\rho_{a12\%}$  correlacionou-se significativamente com quase todas as propriedades mecânicas de ambas as idades (quatro e sete anos), exceto com as variáveis  $f_{c0}$  e  $f_{H0}$ , sendo que com a primeira das variáveis não houve correlação em ambas as idades, e já para a

segunda variável, somente não houve correlação no povoamento de quatro anos.

Em seu trabalho, Bucur (2006) explicou resultados semelhantes aos obtidos no presente estudo, reportando que a velocidade ultrassônica e a massa específica apresentam correlação positiva, em razão de que quanto maior a massa específica, menor são os espaços vazios no interior de uma peça de madeira, o que facilita a propagação da onda ultras-

**Tabela 2.** Relações funcionais entre a massa específica aparente a 12% e a velocidade ultrassônica com as propriedades mecânicas.

**Table 2.** Functional relationships between basic density at 12% and ultrasound velocity with mechanical properties.

Propriedade	Coeficiente de correlação (r)			
	$\rho_{a12\%}$		$V_{som}$	
	4 anos	7 anos	4 anos	7 anos
$E_M$	0,50**	0,72**	0,92**	0,75**
$f_M$	0,57**	0,63**	0,72**	0,63**
$E_{c0}$	0,44*	0,43*	0,67**	0,42**
$f_{c0}$	0,19 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,49**	-0,04 <sup>ns</sup>
$f_{H0}$	0,21 <sup>ns</sup>	0,37*	-	-
$f_{HR}$	0,60**	0,46*	-	-
$f_{HT}$	0,48*	0,68**	-	-

Em que:  $\rho_{a12\%}$  = massa específica aparente a 12% de umidade;  $E_M$  = módulo de elasticidade à flexão;  $f_M$  = módulo de ruptura à flexão;  $E_{c0}$  = módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{HR}$  = resistência a dureza Janka radial;  $f_{H0}$  = resistência à dureza Janka paralela às fibras;  $f_{HT}$  = resistência a dureza Janka tangencial;  $V_{som}$  = velocidade ultrassônica; \* = significativo em 5% de probabilidade de erro; \*\* = significativo em 1% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = não significativo.

**Tabela 3.** Relações entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos.

**Table 3.** Relations between static and dynamic modulus of elasticity.

Equação	$R^2$	Syx	Teste F
4 anos			
$E_M = -2959,99 + 0,917503 \cdot E_{DM}$	0,79	$\pm 1362,65$	99,06**
$f_M = -41,1018 + 0,00744723 \cdot E_{DM}$	0,74	$\pm 12,65$	73,98**
$E_{c0} = -5249,84 + 0,853595 \cdot E_{Dc}$	0,22	$\pm 3366,03$	7,95**
$f_{c0} = -0,824747 + 0,00223181 \cdot E_{Dc}$	0,22	$\pm 8,84$	7,87**
7 anos			
$E_M = -216,122 + 0,622966 \cdot E_{DM}$	0,61	$\pm 1590,37$	43,49**
$f_M = -19,7613 + 0,00562285 \cdot E_{DM}$	0,48	$\pm 18,58$	25,94**
$E_{c0} = -2392,5 + 0,73395 \cdot E_{Dc}$	0,22	$\pm 3023,05$	8,02**
$f_{c0} = 23,9956 + 0,000851161 \cdot E_{Dc}$	0,03	$\pm 11,30$	0,77 <sup>ns</sup>

Em que:  $E_M$  = módulo de elasticidade à flexão (MPa);  $f_M$  = módulo de ruptura à flexão (MPa);  $E_{c0}$  = módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (MPa);  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras (MPa);  $E_{DM}$  = módulo de elasticidade dinâmico de flexão (MPa);  $E_{Dc}$  = módulo de elasticidade dinâmico de compressão paralela às fibras (MPa);  $R^2$  = coeficiente de determinação do modelo; Syx = erro médio padrão (MPa); Teste F = valor de F calculado; \*\* = significativo em 1% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = não significativo.

sonora através da mesma. Nesse contexto, os modelos matemáticos gerados para a estimativa das propriedades mecânicas da madeira de acácia-negra foram significativos, exceto para a predição da variável  $fc_0$  aos sete anos (Tabela 3).

Os modelos matemáticos contidos na Tabela 3 indicaram que em comparação com as propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de compressão paralela às fibras, os parâmetros avaliados pelo ensaio de flexão foram estimados com maior exatidão. Esse ocorrido possivelmente se deveu a instabilidade nas leituras, intrínseca às diversas repetições requeridas para os testes utilizando-se o gel acoplante. Sendo que para as amostras confeccionadas para o ensaio de compressão paralela às fibras nesse estudo, não seria possível utilizar os transdutores do tipo ponto seco pela incompatibilidade da frequência dos transdutores com o comprimento dessas amostras. Além desse fator, para Nesvijski (2000), outras possíveis fontes de erro operacionais, as quais alteram a forma e a velocidade das ondas geradas são: o material de fabricação do transdutor, o ângulo de inclinação do extensor de ondas e a pressão imposta ao transdutor contra o corpo de prova.

Analogamente aos resultados observados no presente estudo, outros autores avaliando a madeira de diferentes folhosas, concluíram que a variação do módulo de elasticidade dinâmico foi satisfatória afim de estimar propriedades mecânicas avaliadas por meio de ensaios de flexão (OLIVEIRA et al., 2002; MINÁ et al., 2004; MISSIO et al., 2013b) e compressão paralela às fibras (STANGERLIN et al., 2008).

Os resultados obtidos no presente trabalho denotam qualidade semelhante da madeira de acácia-negra, comparada a outras espécies tradicionalmente utilizadas para fins estruturais, tanto dos gêneros *Pinus*, como *Eucalyptus*. Dessa forma, frisa-se a possibilidade de utilizar essa madeira em finalidades que agreguem maior valor a esse material, diferentemente das tradicionalmente propostas. Nesse sentido, alguns desses ni-

chos em que a madeira acácia-negra possivelmente corresponderia satisfatoriamente em condições de serviço são: a confecção de produtos sólidos para utilização no setor de construção civil rural e urbana – escoras, caibros e caixas para concreto.

## Conclusões

Em comparação aos resultados reportados em estudos antecedentes, é possível afirmar que, afora os fins tradicionais enfocados na produção de energia térmica, a madeira de acácia-negra apresenta potencial para a confecção de produtos sólidos, destinados a utilização em estruturas. A madeira de sete anos apresentou propriedades mecânicas mais adequadas, destacando-se sua menor Fragilidade. A massa específica aparente a 12% e a velocidade ultrassônica se correlacionaram significativamente com as propriedades mecânicas. O módulo de elasticidade dinâmico mostrou-se uma ferramenta potencialmente útil para estimativa da resistência da madeira, principalmente para os parâmetros avaliados pelo ensaio de flexão.

## Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard Test methods for small clear specimens of timber - ASTM D143-94**. West Conshohocken: 2007. 32p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood properties - ASTM D5536-94**. Philadelphia: 2010. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Projetos de estruturas de madeira – NBR 7190**. Rio de Janeiro: 1997. 107p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da ABRAF 2013, ano base 2012**. Brasília: ABRAF, 2013. 148p.
- BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. 2º ed. Nova York, Springer-Verlag: 2006.



- BRANCHERIAU, L. An alternative solution for the determination of elastic parameters in free-free flexural vibration of a Timoshenko beam. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 6, p. 1269-1279, 2014.
- CADEMARTORI, P.H.G.; MISSIO, A.L.; GATTO, D.A.; BELTRAME, R. Prediction of the Modulus of Elasticity of *Eucalyptus grandis* Through Two Nondestructive Techniques. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 369-375, 2014.
- CALLISTER Jr., W.D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**, 5ª ed. São Paulo, LTC: 2002.
- DELUCIS, R.A.; BELTRAME, R.; GATTO, D.A.; CADEMARTORI, P.H.G.; SCHNEID, E. Análise da deformação residual longitudinal e sua relação com propriedades tecnológicas da madeira de acácia-negra. **Árvore**, v. 39, n. 3, p. 585-594, 2015.
- DELUCIS, R.A.; GATTO, D.A.; STANGERLIN, D.M.; BELTRAME, R.; TREVISAN, R. Qualificação da madeira de três espécies de coníferas oriundas de reflorestamentos jovens. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 100, p. 477-484, 2013.
- EVERT, R. F. **Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development**. 3ª ed. New Jersey, John Wiley & Sons: 2006.
- GATTO, D. A.; GONÇALVES, M. R. F; MATTOS, B. D.; CALEGARI, L.; STANGERLIN, D.M. Estimativa da deterioração da madeira de assoalho de prédio histórico por meio de ondas ultrassônicas. **Cerne**, v.18, p.651-656, 2012.
- KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ JUNIOR, W.A. **Principles of wood science and technology**. 1ª ed, Berlin, Springer-Verlag: 1968.
- LORENZI, R.F.L.; ZORZI, J.E.; PEROTTONI, C.A. Instrumentação para espectroscopia de ressonância de ultrassom. **Cerâmica**, v. 60, n. 355, p. 332-339, 2014.
- MINÁ, A.J.S.; OLIVEIRA, F.G.R.; CALIL Jr., C.; DIAS, A.A.; SALES, A. Avaliação não destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. **Scientia Forestalis**, v. 1, n. 65, p. 188-189, 2004.
- MISSIO, A.L.; GATTO, D.A.; MODES, K.S.; SANTINI, E.J.; STANGERLIN, D.M.; CALEGARI, L. Método ultrassônico para estimativa do módulo de elasticidade de madeiras de *Pinus taeda* tratadas termicamente. **Ciência Rural**, v. 43, n. 4, p. 616-622, 2013a.
- MISSIO, A.L.; GATTO, D.A.; MODES, K.S.; SANTINI, E.J.; STANGERLIN, D.M.; CALEGARI, L. Ultrasonic method for estimation of modulus of elasticity of *Eucalyptus grandis* wood. **Agrária**, v. 8, n. 1, p. 102-107, 2013b.
- NESVIJSKI, E.G. On design of ultrasonic transducers and accuracy of velocity measurements. **e-Journal of Nondestructive Testing**, v. 5, n. 2, n. p., 2000.
- OLIVEIRA, F.G., CAMPOS, J.A.O., SALES, A. Ultrasonic Measurements In Brazilian Hardwood. **Materials Research**, v. 5, n. 1, p. 51-55, 2002.
- OUPORNPRASERT, W.; BOONYACHUT, S.; BOONYACHUT, S. *Acacia mangium* Willd as Structural Components and shear walls. **Internacional Journal of Materials & Structural Reliability**, v. 3, n. 2, p. 67-86, 2005.
- PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4ª ed, New York: 1980.
- PHUONG, L.; SHIDA, S.; SAITO, Y. Effects of heat treatment on brittleness of *Styrax tonkinensis* wood. **Journal of Wood Science**, v. 53, n. 3, p. 181-186, 2007.
- SANTINI, E.J.; HASELEIN, C.R.; GATTO, D.A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 1, p. 85-93, 2000.
- SERPA, P.N.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R.M.; PIMENTA, A.S. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Árvore**, v. 27, n. 5, p. 723-733, 2003.
- 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. **Agrária**, v. 3, n. 2, p. 145-150, 2008.
- WEILER, M.; MISSIO, A.L.; GATTO, D.A.; GUTHS, W.G. Nondestructive evaluation of wood decayed by xylophagous organisms. **Materials Research**, v. 16, n. 5, p. 1203-1213, 2013.
- WESSELS, C.B.; MALAN, F.S.; SEIFERT, S.; LOUW, J.H.; RYPSTRA, T. The prediction of the flexural lumber properties from standing South African-grown *Pinus patula* trees. **European Journal of Forest Research**, v. 134, n. 1, p. 1-18, 2015.