

Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes posições do tronco das árvores de *Tectona grandis* utilizando método de ondas acústicasEstimative of dynamic modulus of elasticity in the different positions of the tree of *Tectona grandis* using stress wave methodsSetsuo Iwakiri¹, Jorge Luis Monteiro de Matos¹, Rosilani Trianoski¹, José Guilherme Prata¹, Vinicus Yurk da Rocha² e Viviane Teixeira Iwakiri³**Resumo**

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a variação do módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) no sentido longitudinal e radial de árvores de *Tectona grandis*, bem como analisar as suas correlações com a massa específica aparente da madeira. Foram coletadas cinco árvores com 18 anos de idade, e de cada árvore foram obtidas toras nas posições da base, meio e topo. Da posição central de cada tora foram retirados pranchões e, destes, foram obtidas lamelas com dimensões de 75 x 25 x 3000 mm a partir da medula para casca. Os valores de módulo de elasticidade dinâmico das lamelas foram determinados por meio da aplicação de ondas de tensão utilizando o aparelho *Stress Wave timer*. A massa específica aparente a 12% de umidade foi determinada para cada lamela com objetivo de avaliar as correlações com o MOEd nas diferentes posições das árvores. O valor de MOEd da madeira de *Tectona grandis* foi superior em relação às peças de madeiras das espécies de *Pinus* referenciadas na literatura. Constatou-se um aumento no MOEd nos sentidos longitudinal (base, meio e topo) e no sentido radial (medula a casca) das árvores. Os coeficientes de correlações indicaram boas interações entre a massa específica aparente e MOEd para as lamelas retiradas da base e meio das árvores e das regiões próximas à medula.

Palavras-chave: *Tectona grandis*, módulo de elasticidade dinâmico, madeira de teca.

Abstract

This study aimed to evaluate the variation of the dynamic modulus of elasticity (MOEd) in the longitudinal and radial direction of the trees of *Tectona grandis* and analyze their correlations with the apparent density of the wood. Were collected five trees with 18 years old, and from each tree were obtained logs of the base, middle and top positions. From the central position of each log were obtained the planks. Lamellae with dimensions of 75 x 25 x 3000 mm were obtained in the pit to bark direction of the planks. The dynamic modulus of elasticity of the lamellae was determined by application of stress waves using the Stress Wave Timer. The wood density at 12% of moisture content was determined for each lamellae to evaluate their correlations with MOEd in different positions of the trees. The value of MOEd of Teak wood was higher than woods of *Pinus* species referenced in the literature. It was observed an increase in MOEd in longitudinal (base, middle and top) and in the radial (pit to bark) direction of the trees. The high correlation coefficient between wood density and MOEd for lamellae was obtained from base and middle positions and nearby regions of the pit.

Keywords: *Tectona grandis*, dynamic modulus of elasticity, Wood of teca.

INTRODUÇÃO

A estimativa da qualidade da madeira por meio de técnicas não destrutivas é de grande relevância, tanto para a silvicultura, quanto para a indústria madeireira, pois não há necessidade de extração de corpos-de-prova para realização de ensaios destrutivos. Outras vantagens como

maior facilidade e rapidez na execução dos ensaios, custo relativamente baixo e possibilidade de utilização posterior da madeira por não haver comprometimento do material avaliado, são aspectos importantes do uso de ensaios não destrutivos (TRIANOSKI, 2012).

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos neste âmbito, utilizando-se diferentes méto-

¹Professor Doutor Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. UFPR – Universidade Federal do Paraná. Av. Lothário Meissner, 632, Curitiba, PR – 80210-170. E-mail: setsuo@ufpr.br, jmatos@ufpr.br, rosilani@ufpr.br, jgprata@ufpr.br

²Aluno do Curso de Engenharia Industrial Madeireira. UFPR – Universidade Federal do Paraná. Av. Lothário Meissner, 632, Curitiba, PR – 80210-170. E-mail: vinyrocha@hotmail.com

³Mestranda em Arquitetura e Urbanismo. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina - Trindade, Florianópolis, SC - 88040-900. E-mail: viviane_iwakiri@gmail.com

dos, como por exemplo: laser, raio-X, micro-ondas, ultrassom, espectrometria de infravermelho próximo (CARTER et al., 2005).

Entre as diversas tecnologias não destrutivas, merecem destaque as baseadas no fenômeno acústico. Segundo Bertoldo (2011) as tecnologias acústicas estão bem estabelecidas como ferramentas para a avaliação de materiais, principalmente metálicos, e seu uso está se tornando amplamente aceito na indústria madeireira para inspeções, controle de qualidade e classificação de produtos, como laminados, madeira serrada e toras. A utilização deste método permite, a partir das ondas aplicadas, classificar a madeira em classes de qualidade por meio da estimativa do módulo de elasticidade dinâmico.

De acordo com Sandoz (1996) a velocidade de propagação das ondas é baseada na vibração da microestrutura da madeira e fundamentalmente sobre as propriedades elásticas do eixo de propagação. Wang et al. (2007) complementam que a velocidade de propagação é controlada pela orientação dos elementos constituintes e microestrutura de fibra, bem como pela forma geométrica do material avaliado e Dunlop (1981) corrobora a complexidade deste processo, afirmando que a propagação das ondas na madeira depende em grande parte das propriedades mecânicas da parede celular, principalmente da camada S_2 , a qual se apresenta em maior quantidade na célula. Divós et al. (2000) relatam ainda, que quando os elementos constituintes apresentam um ângulo de grã entre zero e 30° , a velocidade de propagação é pouco influenciada, no entanto, acima deste ângulo (30°) a velocidade torna-se mais sensível, chegando a dobrar seu valor quando o ângulo de grã for de 60° .

A madeira possui diversas características que a tornam muito atraente frente a outros materiais, entre elas, o baixo consumo de energia para seu processamento, a alta resistência específica, as boas características de isolamento térmico e acústico, fácil trabalhabilidade, além da possibilidade de produção sustentada das florestas nativas e plantadas (ZENID, 1997; ANDRIGHETO et al., 2006).

Quando utilizada na fabricação de bens duráveis como móveis, objetos de decoração e na construção civil, a madeira se constitui numa ferramenta de fixação de carbono, contribuindo para a redução do aquecimento global. No entanto, a pouca utilização da madeira de florestas

plantadas para a construção civil segundo Larooca (2002), se deve à falta de informações das possibilidades de uso da madeira de qualidade para fins a que se destina.

A incorporação de espécies alternativas ao processo de escolha e especificação da madeira empregada nas atividades de construção civil, em contraposição aos aspectos ambientais resultantes do uso excessivo e constante de determinadas espécies, se traduz em importante passo para o setor produtivo que mais consome este insumo no país para a preservação e sustentabilidade das florestas brasileiras (IPT, 2009).

Apesar da madeira de muitas espécies de florestas plantadas apresentar resistência mecânica inferior em relação a madeiras nobres, quando utilizada como produtos sólidos, características como homogeneidade e massa específica qualificam o material, facilitando a trabalhabilidade e o tratamento com produtos preservantes (SILVA; AZUCS, 1998). De acordo com Gonzaga (2006) diferentes tecnologias têm sabido tirar proveito desta madeira, considerada "fraca", como por exemplo, vigas estruturais de alta resistência e baixo peso, produzidas a partir de lamelas coladas.

Muitos são os fatores que afetam as propriedades da madeira para uso estrutural. Entre os principais fatores pode-se destacar a massa específica, teor de umidade, percentagem de lenho tardio, inclinação da grã, presença de nós, posição radial e orientação dos anéis de crescimento (TRIANOSKI, 2012).

A massa específica apresenta relação direta com as propriedades mecânicas, sendo bastante importante para caracterização de madeiras para fins estruturais (KLOCK, 1989). Por outro lado, não deve ser utilizada como único parâmetro em virtude da influência de outras características, sendo bastante recomendada a aplicação da técnica de classificação visual. Carreira e Dias (2005) aplicaram esta técnica em 600 peças de *Pinus sp.*, e constataram que a classificação visual apresentou bons resultados. Neste mesmo âmbito, Fiorelli et al. (2009) também aplicando a classificação visual em *Pinus*, obtiveram uma forte correlação entre o número de anéis de crescimento, o percentual da área transversal ocupada pelo nó e a resistência à tração nas peças de madeira com dimensões estruturais ensaiadas, confirmando a eficiência do método de classificação visual proposto.

Em relação ao teor de umidade, seu efeito está relacionado à evaporação da água presente

na parede celular, a qual promove a aproximação das fibrilas e com isso alterações significativas nas propriedades físicas e mecânicas da madeira (TSOUMIS, 1991).

Já o lenho tardio, da mesma forma que a massa específica, apresenta grande influência sobre as propriedades de resistência (GURFINKEL, 1973).

A grã está relacionada à orientação dos elementos constituintes do lenho em relação ao eixo da árvore e decorre do processo de crescimento sob as mais diversas influências (TSOUMIS, 1991; BURGER; RICHTER, 1991). Uma pequena modificação na inclinação da grã resulta em acentuada perda de resistência (KNIGGE; SCHULTZ, 1966), fato este que é justificado em função dos componentes da força de tração e compressão acompanharem a direção dos elementos celulares (KOLLMANN; COTÊ, 1968). Knigge e Schultz (1966) complementam ainda, em virtude disso, que a propriedade mais afetada é a tração perpendicular às fibras, seguida das propriedades de flexão estática e compressão paralela às fibras.

A presença de nós induz a uma variabilidade nas propriedades da madeira e conseqüentemente reduz a sua qualidade. A resistência mecânica da madeira é reduzida devido à interrupção da continuidade e mudança na direção das fibras em torno do mesmo (IWAKIRI, 1982). Em elementos estruturais o efeito dos nós na resistência das peças é dependente do tamanho do nó em relação a seção transversal da peça (CHIES, 2005). Nas peças sujeitas a flexão estática, os efeitos são maiores na proporção

média do comprimento e nas partes extremas da altura (KOLLMANN; COTÊ, 1968).

A influência da posição radial sobre as propriedades da madeira, assim como a longitudinal, está relacionada à idade das árvores e conseqüentemente a massa específica. Nas coníferas, a posição longitudinal proporciona uma redução da massa específica no sentido base-topo, e um aumento no sentido medula-casca (KLOCK, 2000).

Tendo em vista a importância dos estudos sobre espécies alternativas provenientes de florestas plantadas para uso estrutural e da sua otimização em termos de qualidade da madeira, o presente trabalho teve como objetivo estimar o módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes posições das árvores de *Tectona grandis* por meio da aplicação de ondas de tensão, e avaliar as correlações com a sua massa específica aparente.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi utilizada nesta pesquisa madeira de *Tectona grandis* com 18 anos de idade, proveniente de plantios florestais localizados no Município de Brasnorte, Estado de Mato Grosso. Foram coletadas aleatoriamente cinco árvores, e de cada uma foram seccionadas três toras com 3,0 m de comprimento, identificadas como base, meio e topo.

Da posição central de cada tora foi retirado um pranchão com espessura de 75 mm para preparação de lamelas com espessura de 25 mm para manufatura de vigas laminadas coladas. As etapas de preparação do material estão ilustradas na Figura 1.

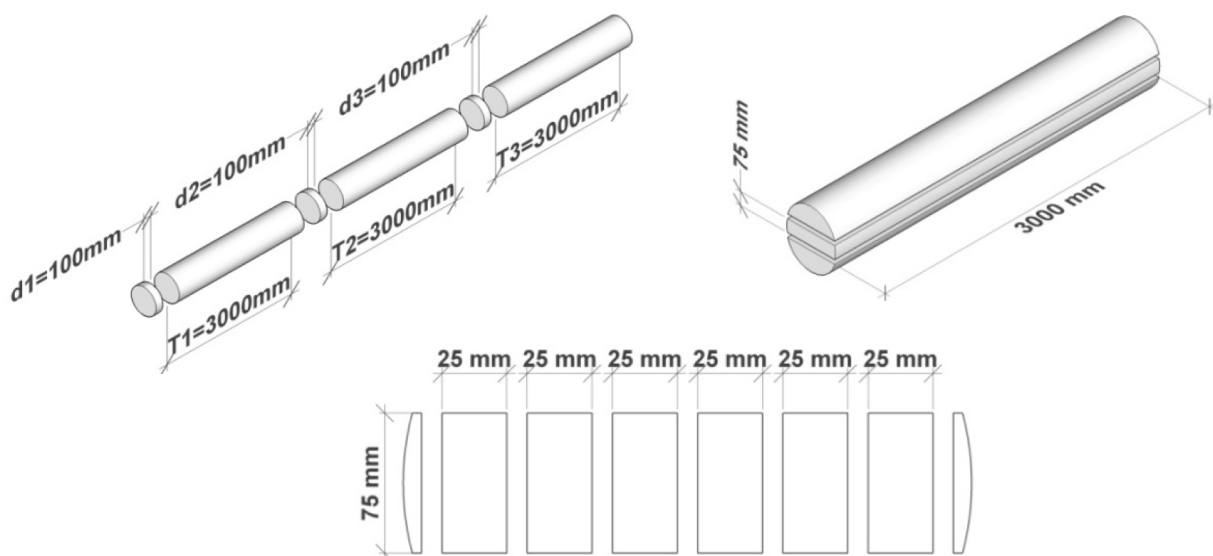


Figura 1. Esquema de obtenção das lamelas.
Figure 1. Scheme to making of lamellaes.

As 87 lamelas obtidas com dimensões nominais de 25 x 75 x 3000 mm (largura, espessura, comprimento) foram secas naturalmente e climatizadas até obtenção de teor de umidade médio de 12%. A seguir, foram aplainadas nas quatro faces com as dimensões finais de 20 x 60 x 2200 mm (largura, espessura, comprimento) para ensaios não destrutivos e determinação da massa específica aparente das lamelas.

O módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) foi obtido por meio do equipamento Stress Wave Timer, modelo 239-A da Metriguard, utilizado para determinar a velocidade de propagação das ondas de tensão no sentido de comprimento das lamelas. O MOEd foi calculado com base nas equações 1, 2 e 3, conforme descrito por Cunha (2007), a seguir:

$$v = L / T \quad (1)$$

$$MEa = M / V \quad (2)$$

$$MOEd = v \times MEa / g \quad (3)$$

Onde:

v = velocidade de propagação da onda (cm/s);
L = vão, distância entre os sensores (cm);
T = tempo de propagação da onda na lamela entre os dois sensores (microsegundos x 10⁻⁶)
MEa = massa específica aparente;
M = massa da lamela (kg);
V = volume da lamela (cm³);
MOEd = módulo de elasticidade dinâmico (kgf/cm²);
g = aceleração da gravidade (9,8 m/s²).

Os resultados da massa específica aparente e do módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes posições da árvore foram analisados através do teste de Grubb's para avaliação dos outliers, teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, homogeneidade de variância de Bartlett e Análise de Variância. Quando rejeitada a hipótese de nulidade (H₀), foi efetuada a comparação de médias de Tukey. Todos os testes foram efetuados no programa *Statgraphics Centurion XVI* (2010), à 95% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado médio da massa específica aparente das lamelas de *Tectona grandis* foi de 0,618 g.cm⁻³, com variação de 5,97%. Este valor é compatível com resultados obtidos por outros pesquisadores, como por exemplo, por Moreno

e Roque (2006) que avaliando árvores com 8 anos de idade na Bolívia, obtiveram valor médio de 0,580 g.cm⁻³; por Pinto (2007) que encontrou valores de 0,530 g.cm⁻³, 0,550 g.cm⁻³ e 0,670 g.cm⁻³, respectivamente para plantios com idades de 5, 10 e 30 anos, localizados em Jangada e Cáceres, MT, Silva (2010) que obteve massa específica aparente de 0,562 g.cm⁻³ a partir de diferentes densidades de plantios de 12 anos em Cáceres- MT, e por Carreira et al. (2012) que obtiveram valor médio de 556 g.cm⁻³ a partir de vigas estruturais. As pequenas variações das massas específicas encontradas a partir dos diferentes estudos podem ser justificadas segundo as afirmações de Kollmann e Cotê (1968), que relatam que diferenças na estrutura anatômica e composição química, sobretudo em função da idade da árvore, genótipo, sítio, clima, localização geográfica e tratos silviculturais, exercem influência sobre esta propriedade.

Os resultados de módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) obtidos para as 87 lamelas de Teca testadas variaram de 9.523 MPa a 17.457 MPa, sendo a média de 14.291 MPa. Os resultados estão acima dos valores de MOEd obtidos por Trianoski (2012) para sete espécies de madeiras de *Pinus* tropicais, na faixa de 4.346 a 6.458 MPa, e para *Pinus taeda* de 9.671 MPa. Já, Cunha (2007) encontrou para lamelas de *Pinus taeda*, MOEd na faixa de 5.000 a 11.000 MPa. Maiores valores de MOEd encontrados para madeira de Teca podem ser atribuídos à sua maior massa específica aparente, cujo valor médio foi de 0,618 g.cm⁻³. A presença de nós nas peças de madeira de *Pinus* estudadas pelos referidos autores, pode ter sido outro fator que tenha contribuído para obtenção de menores valores de MOEd.

Considerando o trabalho conduzido por Carreira et al. (2012), verifica-se que estes autores obtiveram para um conjunto de 12 vigas de Teca, módulo de elasticidade médio no sentido longitudinal de 10.520 MPa (10,52 GPa), sendo este valor, inferior ao do presente trabalho (14.291 MPa). Esta diferença pode estar associada à massa específica da madeira, já que os primeiros autores obtiveram para este conjunto de vigas, massa específica média de 0,556 g.cm⁻³. De acordo com Bucur (2006), maiores velocidades de propagação das ondas (e consequentemente maior módulo de elasticidade dinâmico), são geralmente obtidos em madeiras que apresentam maior massa específica.

Silva (2010), avaliando as propriedades da madeira de Teca em diferentes densidades de

plantios aos 12 anos da região de Cáceres - MT, obteve módulo de elasticidade dinâmico médio de 7.882 MPa em peças a 12% de umidade. Verifica-se a partir dos resultados encontrados por esta autora, que os valores decresceram de acordo com a densidade do plantio, sendo, módulo de elasticidade dinâmico de 8.915 Mpa para a densidade de 834 árvores/ha, 7.738 MPa para a densidade de 1.000 árvores/ha e 6.993 MPa para a densidade de 1.250 árvores/ha. Ainda segundo esta autora, a massa específica nas três densidades de plantio foi de 0,576 g.cm⁻³, 0,562 g.cm⁻³ e 0,553 g.cm⁻³, respectivamente.

Illic (2003) em estudo do módulo de elasticidade dinâmico de 55 espécies a partir de pequenas vigas, obteve para a *Tectona grandis* valor médio de 15.100 MPa, sendo este valor similar ao determinado neste trabalho (14.291 MPa). Além disso, nota-se também que o intervalo de variação do módulo de elasticidade dinâmico entre espécies foi de 1.700 MPa a 23.500 MPa, sendo estes extremos apresentados pelas espécies *Ochroma lagopus* (balsa) e *Corymbia maculata*, no entanto, a maioria das espécies avaliadas por este autor apresentaram módulo de elasticidade dinâmico semelhante ou próximos aos apresentados na Tabela 1.

Segundinho et al. (2013) avaliando o módulo de elasticidade de vigas de madeira laminada colada de Teca encontraram valores médios de 10.181 MPa a 10.693 MPa, os quais se apresentam ligeiramente inferiores ao obtido neste trabalho. Da mesma forma, esta diferença pode estar associada à massa específica da madeira, já que tais autores utilizaram peças com valores médios de 557 g.cm⁻³ a 581 g.cm⁻³. Outra possível

explicação pode estar relacionada ao tipo e forma de aplicação do método não destrutivo, onde tais autores utilizaram a vibração transversal.

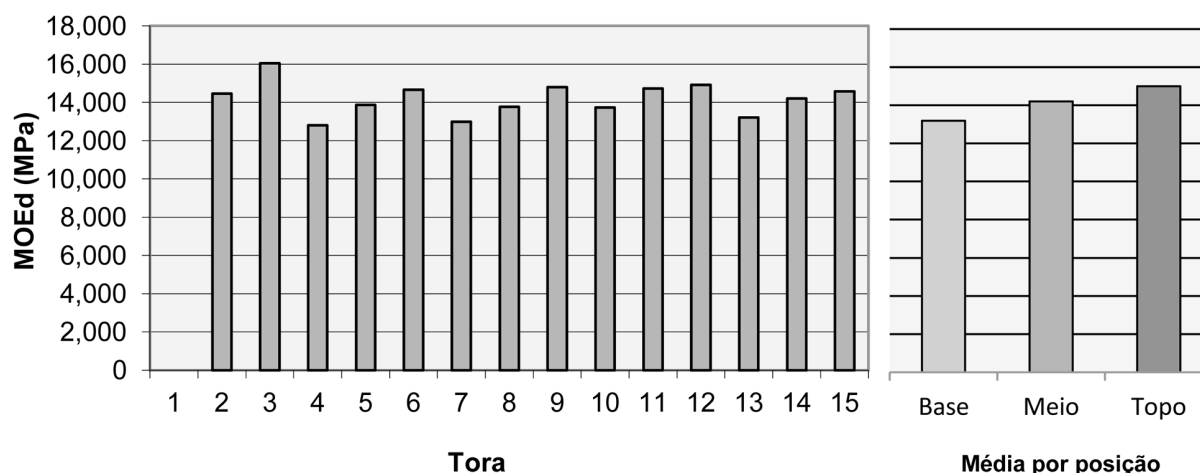
Na Tabela 1 e Figura 2, estão apresentados os resultados de MOEd obtidos para lamelas retiradas da base, meio e topo das árvores estudadas.

Tabela 1. Valores médios de módulo de elasticidade dinâmico da base, meio e topo das árvores.
Table 1. Average values of dynamic modulus of elasticity of base, middle and top positions of the trees.

Árvore	Posição	MOEd (MPa)
01	Base	*
	Meio	14.457
	Topo	16.046
02	Base	12.809
	Meio	13.872
	Topo	14.667
03	Base	12.996
	Meio	13.769
	Topo	14.799
04	Base	13.730
	Meio	14.728
	Topo	14.914
05	Base	13.211
	Meio	14.206
	Topo	14.572
Valores médios	Base	13.187
	Meio	14.206
	Topo	15.000

* Parcela perdida.

Os resultados obtidos indicam que há um incremento nos valores médios de MOEd no sentido longitudinal da árvore, nas posições base, meio e topo. Analisando os valores médios de massa específica aparente, obtidos para a base, meio e topo das árvores, conforme apresenta-



Obs: Três números em sequência referem-se a toras da base, meio e topo de uma árvore. Ex: 1=base, 2=meio, 3=topo da árvore 1; 4=base, 5=meio, 6=topo da árvore 2...

Figura 2. Variação do MOEd na direção longitudinal das árvores.
Figure 2. Variation of MOEd in the longitudinal direction of the trees.

dos na Tabela 3, pode-se afirmar que não houve influência significativa da massa específica aparente das lamelas sobre o MOEd, indicando a existência de outro fator, possivelmente a velocidade de propagação das ondas, originada pela razão entre distância percorrida pela onda e o tempo necessário para esta onda completar o seu percurso.

Desta forma, pode-se dizer que a orientação dos elementos celulares da madeira, bem como a possível ocorrência de pequenos nós nas peças avaliadas, os quais desviam o percurso da onda e conseqüentemente aumentam a distância e o tempo, afetaram em maior magnitude a velocidade de propagação, onde esta, quando elevada ao quadrado nos cálculos (v^2), tem sua influência aumentada, exercendo neste caso, maior influência sobre o MOEd do que a massa específica.

Bertoldo et al. (2009), em estudo da sensibilidade do ultrassom na detecção de variações das propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* em função da posição, obtiveram coeficientes de rigidez de 21.078 MPa para peças obtidas da tora da base, 24.059 MPa para peças da segunda tora e 23.977 para peças da tora 3. Verifica-se em relação à este estudo, que os resultados obtidos neste trabalho seguiram a mesma tendência em relação às amostras coletadas na primeira e segunda tora, diferenciando-se na terceira, os quais seguiram a tendência de aumento do módulo de elasticidade dinâmico.

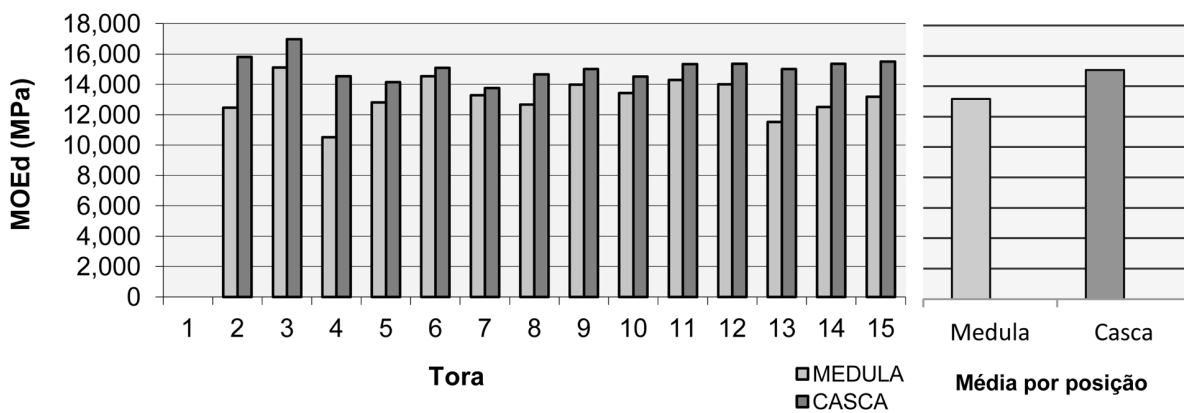
Na Tabela 2 e Figura 3, estão apresentados os resultados de MOEd obtidos para as lamelas retiradas da regiões próximas à medula e casca das árvores estudadas.

Tabela 2. Valores médios de módulo de elasticidade dinâmico nas posições próximas a medula e casca das árvores.

Table 2. Average values of dynamic modulus of elasticity in the position near of the pit and bark.

Árvore	Axial	Radial	MOEd (MPa)
01	Base	Medula	*
		Casca	*
	Meio	Medula	12.475
		Casca	15.817
	Topo	Medula	15.107
		Casca	16.985
02	Base	Medula	10.527
		Casca	14.544
	Meio	Medula	12.808
		Casca	14.141
	Topo	Medula	14.530
		Casca	15.082
03	Base	Medula	13.288
		Casca	13.750
	Meio	Medula	12.669
		Casca	14.663
	Topo	Medula	13.975
		Casca	15.019
04	Base	Medula	13.435
		Casca	14.519
	Meio	Medula	14.291
		Casca	15.348
	Topo	Medula	14.002
		Casca	15.353
05	Base	Medula	11.520
		Casca	15.009
	Meio	Medula	12.500
		Casca	15.356
	Topo	Medula	13.175
		Casca	15.504
Valores médios		Medula	13.163
		Casca	15.078

* Parcela perdida.



Obs: Três números em sequência referem-se a toras da base, meio e topo de uma árvore. Ex: 1=base, 2=meio, 3=topo da árvore 1; 4=base, 5=meio, 6=topo da árvore 2...

Figura 3. Variação do MOEd na direção radial das árvores.
Figure 3. Variation of MOEd in the radial position of the trees.

Os resultados obtidos indicam que há um incremento nos valores médios de MOEd no sentido radial da árvore, da medula para a casca. Analisando os valores médios de massa específica aparente, obtidos para as posições próximas a medula e casca das árvores, conforme apresentados na Tabela 4, pode-se constatar que houve influência significativa da massa específica aparente das lamelas sobre o MOEd. Esta maior influência, muito provavelmente, está associada a maior diferença entre os valores de massa específica obtidos para as regiões da medula e da casca, afetando mais os cálculos do MOEd do que os valores obtidos nas diferentes posições longitudinais, que se apresentam muito próximos entre si. Vale mencionar ainda, que assim como para o MOEd no sentido longitudinal, a velocidade de propagação das ondas de tensão também exerceu influência sobre o valor final.

Bertoldo et al. (2011) avaliando também a variação radial das propriedades de *Eucalyptus grandis* por meio do ultrassom, obtiveram resultados similares ao desse estudo, onde os valores aumentaram no sentido da medula para a casca. Como já mencionado, estes resultados possivelmente estão associado à maior massa específica da madeira próximo a casca, permitindo uma maior velocidade de propagação das ondas nesta região.

Os resultados das análises estatísticas da massa específica aparente e MOEd das lamelas obtidas de diferentes posições das árvores, bem como as correlações entre as duas variáveis estão apresentadas na Tabela 3.

No sentido longitudinal da árvore a análise estatística demonstrou não haver diferenças significativas entre a massa específica para as la-

melas retiradas da base, meio e topo das árvores. De acordo com Tomazello Filho (1985), as variações da massa específica no sentido longitudinal do tronco estão relacionadas principalmente com a idade da árvore, porém sem obedecer a um padrão bem definido.

Já para o sentido radial, foi constatada diferença estatística significativa entre as duas posições analisadas, onde as lamelas obtidas da região mais externa do tronco apresentaram valor médio superior em relação às peças da medula. Este resultado é justificado principalmente pelas características da madeira em cada região, onde próximo a medula, a madeira é caracterizada como madeira juvenil, apresentando fibras ou traqueóides mais curtos, maior ângulo microfibrilar na camada S2 da parede celular, parede celular mais fina e menor percentual de lenho tardio, o que confere menor massa específica. Em oposição, a madeira adulta apresenta fibras ou traqueóides mais longos, parede celular mais espessa, e devido a estas características a madeira apresenta massa específica mais elevada (BENDSTEN, 1978; PANSHIN; DE ZEEUW, 1980; ZOBEL; BUIJTENEN, 1989). Estes resultados são ainda corroborados por Lima (1995) e Bendsten e Senft (1986), que afirmam que há um aumento na massa específica aparente da madeira no sentido medula – casca, e que este incremento é menor na madeira de folhosas e maior em coníferas.

Para a velocidade de propagação das ondas de tensão foi constatada diferença estatística significativa para ambas as posições estudadas, podendo-se verificar que no sentido longitudinal a diferença de valores foi maior, indicando

Tabela 3. Valores médios e correlações entre a massa específica aparente, velocidade de propagação das ondas de tensão e módulos de elasticidade dinâmico nas posições longitudinal e radial.

Table 3. Average values and correlation between wood density, velocity of propagation of stress waves and dynamic modulus of elasticity in the longitudinal and radial positions

Posição/tora	ME (g/cm ³)	Velocidade (m/s)	MOEd (MPa)	r ME x MOEd	r Vel x MOEd
Sentido longitudinal					
Base	0,621 a (6,84)	4.665 c (4,56)	13.187 b (13,59)	0,8245	0,9081
Meio	0,621 a (6,28)	4.772 b (2,61)	14.206 ab (8,77)	0,8157	0,8389
Topo	0,626 a (4,49)	4.882 a (3,09)	15.000 a (7,79)	0,6041	0,8234
Sentido radial					
Medula	0,596 b (5,98)	4.719 b (4,73)	13.341 b (13,29)	0,7803	0,9125
Casca	0,641 a (3,76)	4.835 a (3,06)	14.993 a (6,36)	0,3619	0,8189

r: Coeficiente de correlação; Todas as correlações são significativas a 95% de probabilidade.

que a massa específica não é o principal fator de influência, e que existem outras características da madeira que afetam a velocidade. A menor influência da massa específica sobre a velocidade é ainda corroborada pelos resultados obtidos no sentido radial, onde uma maior diferença de massa específica entre as regiões, não implicou necessariamente em maior diferença de velocidade. Os resultados obtidos no presente trabalho estão em acordo com Carrasco e Azevedo Junior (2003), que relatam que a massa específica não é o único fator que aumenta a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Fato similar pode ainda ser observado a partir do estudo de Illic (2003), onde este autor obteve para espécies de baixa massa específica velocidades de propagação superiores às velocidades obtidas em espécies de alta massa específica (4.860 m/s x 4.799 m/s).

Silva (2010) obteve velocidade média de propagação das ondas de 3.915 m/s amostras coletadas em árvores de 12 anos e com massa específica média de 0,562 g.cm⁻³ e Illic (2003) obteve velocidade média de 4.730 m/s para amostras de *Tectona grandis* com massa específica de 0,675 g.cm⁻³. Observa-se, em relação à velocidade de propagação obtida neste trabalho (4.665-4.882 m/s) valores superiores ao de Silva (2010), e bastante similares ao de Illic (2003). Ainda em relação aos resultados apresentados por Illic (2003), nota-se, que os valores obtidos para a *Tectona* nestas condições de estudo são compatíveis com as 55 espécies de alta e baixa massa específica estudadas por este autor.

Já, para o MOEd longitudinal, as lamelas retiradas do topo das árvores apresentaram MOEd estatisticamente igual em relação às lamelas do meio e superior às lamelas da base. No sentido radial, observa-se também diferenças significativas entre as posições estudadas, sendo que as lamelas obtidas da região externa do tronco apresentaram valor médio superior. Os resultados obtidos para esta propriedade resultam e representam a massa específica aparente e a velocidade de propagação das ondas nas peças, cada uma delas com sua influência e particularidade, como mencionado anteriormente.

Os coeficientes de correlação (r) obtidos a partir da massa específica aparente e MOEd indicaram boas correlações para as lamelas retiradas da base e meio das árvores, sendo os valores respectivamente de 0,8260 e 0,8074. Para as lamelas retiradas do topo das árvores o coeficien-

te de correlação foi de 0,6041 e foi inferior em relação aos valores obtidos para base e meio das árvores. Já os coeficientes encontrados a partir da relação entre velocidade de propagação das ondas de tensão e o MOEd variaram de 0,8234 a 0,9081, demonstrando-se superiores aos anteriormente descritos (MExMOEd) e indicando que a velocidade de propagação das ondas afeta muito mais o MOEd do que a massa específica.

No sentido radial, o coeficiente de correlação entre massa específica aparente e MOEd indicou a existência de boa correlação somente para as lamelas retiradas da região próxima a medula, sendo o valor obtido de 0,7803. Já os coeficientes encontrados entre velocidade de propagação das ondas e MOEd foram satisfatórios para as duas regiões (0,8189 e 0,9125), indicando também, que a velocidade é mais bem relacionada com o MOEd do que a massa específica.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- A massa específica média das lamelas de *Tectona grandis*, foram compatíveis com os valores encontrados na literatura.
- Os valores de MOEd obtidos para a madeira de *Tectona grandis* foram superiores em relação às madeiras de espécies de *Pinus* referenciados na literatura, possivelmente devido a maior massa específica e menor ocorrência de nós.
- Os valores do MOEd obtidos para a madeira de *Tectona grandis* a partir do Stress Wave Time, foram compatíveis e em alguns casos e superiores aos valores obtidos na literatura para esta mesma espécie.
- Foram constatados aumento nos valores médios de MOEd nos sentidos longitudinal (base, meio e topo) e no sentido radial (medula a casca) das árvores;
- Os coeficientes de correlações entre a massa específica aparente e MOEd indicaram boas correlações para as lamelas retiradas da base e meio das árvores e das regiões próximas a medula.
- Os coeficientes de correlações entre velocidade de propagação das ondas de tensão e MOEd indicaram correlações bastante satisfatórias tanto para o sentido longitudinal quanto para o radial.
- Os coeficientes de correlação indicaram que a velocidade de propagação das ondas de tensão afeta muito mais o MOEd do que a massa específica.

AGRADECIMENTOS

Os autores registram seus agradecimentos à empresa Berneck Painéis e Serrados S.A., nas pessoas do Sr. Gilson Berneck, Eng^o Afonso Mehl e Fernando Gnoato, pela doação da madeira de Teca utilizada nesta pesquisa; ao Eng^o Mário de Andrade da Momentive Química S.A., pela doação dos adesivos para colagem das vigas; ao CNPq pelo auxílio financeiro para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANDRIGUETTO, R.; ANDRADE, D. M.; SZÜCS, C. A. Estudo comparativo entre madeira laminada colada e madeira laminada colada multicolada. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10, 2006, São Pedro. **Anais...** São Carlos: IBRAMEN, 2006. CD-ROM.
- BENDSTEN, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, Madison, v. 28, p. 61-72, 1978.
- BENDSTEN, B. A.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth ring of plantation grown eastern cottonwood and loblolly pine. **Wood and Fiber**, Madison, v. 18, n. 1, p. 23-38. 1986.
- BERTOLDO, C. **Estimativa de propriedades de rigidez da madeira a partir de avaliação acústica na árvore e em toras recém abatidas**. 2011, 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Universidade de Campinas, Campinas, 2011.
- BUCUR, V. Environment modifiers of Wood structural parameters detected with ultrasonic waves. In: BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. 2.ed. Berlin: Springer-Verlag; 2006. p. 242-270.
- BUCUR - CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JÚNIOR, A. P. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som - fundamentos físicos e resultados experimentais. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178-191, 2003.
- BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.
- CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de *Pinus sp* plantadas no Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 67, p. 78-87, 2005.
- CARREIRA, M. R.; SEGUNDINHO, P. G. A.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A.; CALIL JUNIOR, C. Bending stiffness evaluation of Teca and Guajará lumber through tests of transverse and longitudinal vibration. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 34, n. 1, p. 27-32, 2012.
- CARTER, P.; BRIGGS, D.; ROSS, R.; XIPING, W. Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs. **USDA Forest Service PNW General Technical Report**, n. 642, Portland, p. 121-129, 2005.
- CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 2005. 123 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- CUNHA, A. B. **Produção de vigas estruturais de Madeira avaliadas por meio de ensaios estáticos e dinâmicos**. 2007. 146 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- DIVÓS, F.; DÁNIEL, I.; BEJÓ, L. Defect detection in timber by stress wave time and amplitude. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 12, 2000, Sopron. **Proceedings**, Sopron: University of Western Hungary, 2000.
- DUNLOP, J. L. Testing of poles by using acoustic pulse method. **Wood science and technology**, v. 15, n. 4, p. 301-310, 1981.
- GONZAGA, A. L. **Madeira: usos e conservação**. Brasília: IPHAN/MONUMENTA, 2006, 246 p.
- 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. **Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 741-750, 2009.
- GURFINKEL, G. **Wood Engineering**. New Orleans: Southern Forest Products Association, 1973. 573 p.
- ILLIC, J. Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. **Holz als Roh und Werkstoff**, Berlin, v. 61, n. 3, p. 167-172, 2003.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2.ed., São Paulo: Sinduscon, 2009. 99 p.

- IWAKIRI, S. **Classificação de madeiras tropicais através do método mecânico não destrutivo**. 1982, 91 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1982.
- KLOCK, U. **Qualidade da madeira de *Pinus maximinoi*** H. E. Moore. 2000, 291 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.
- KLOCK, U. **Qualidade da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr e Golf**. 1989, 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.
- KNIGGE, W.; SCHULTZ, H. **Growndise der Forestbenutzung**. Berlin: Verlag Paul Parey, 1966. 584 p
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTE, W. A. **Principles of Wood science and technology: Solid Wood**. New York: springer, 1968. 592 p.
- LAROCA, C. **Habitação social e madeira: uma alternativa viável**. 2002, 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- LIMA, T. G. **Variações no sentido radial e longitudinal de algumas propriedades das madeiras de *Eucalyptus microcorys* F. Muell e *Eucalyptus pilularis* Sm.** 1995, 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.
- MORENO, J. R.; ROQUE, R. M. **Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia**. **Kuru: Revista Forestal**, Costa Rica, v. 3, n. 9, 2006.
- PANSHIN, A. J.; DE ZEEW, C. **Textbook of wood technology**. 4.ed., New York: MC Graw Hill, 1980, v.2, 722 p.
- PINTO, M. L. **Propriedades e características da madeira de Teca (*Tectona grandis*) em função da idade**. 2007, 124 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- SANDOZ, J. L. **Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 10, 1996, Lausanne, **Proceedings...** Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology Chair of Timber Construction 1996. p. 147.
- SEGUNDINHO, P. G. A.; CARREIRA, M. R.; CALIL NETO, C.; REGAZZI, A. J.; DIAS, A. A.; CALIL JUNIOR, C. **Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal**. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 7-14, 2013.
- SILVA, D. M. R. **Avaliação das propriedades físicas e da elasticidade da madeira de *Tectona grandis* L. f. proveniente de povoamento com três densidades de plantio em Cáceres-MT**. 2010, 24 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.
- SILVA, E. L.; SZÜCS, C. P. **Construção habitacional em madeira para a região Sul Brasileira**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6, 1998, São Pedro, **Caderno de Resumos...** São Pedro: IBRAMEM, 1998, p. 49-58.
- TOMAZELLO FILHO, M. **Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis***. **IPEF**, Piracicaba, n. 29, p. 37-45, 1985.
- TRIANOSKI, R. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de pinus tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos**. 2012, 552 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- TSOUMIS, G. T. **Science and technology of Wood: structure, properties, utilization**. New York: Chapman & Hall, 1991, 479 p.
- WANG, X.; ROSS, R.J.; CARTER, P. **Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I: acoustic wave behavior**. **Wood and Fiber Science**, v. 39, n. 1, p. 28-38, 2007.
- ZENID, G. S. **A madeira na construção civil**. São Paulo: IPT, 1997. 8 p.
- ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. **Wood variation: its causes and control**. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 361 p.

Recebido em 15/02/2013

Aceito para publicação em 02/10/2013