

Diego M. Stangerlin¹Leandro Calegari²Elio J. Santini³João M. X. Domingues⁴Darci A. Gatto⁵Rafael R. Melo¹

Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não-destrutivo

RESUMO

Realizou-se o presente estudo em função de se correlacionar os módulos de elasticidade obtidos por métodos destrutivo e não-destrutivo, das madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Pinus elliottii* Engelm., provenientes de regiões próximas à medula e à casca, razão pela qual se utilizou equipamento emissor de ondas ultra-sônicas, com transdutores de faces planas de 50 kHz. A velocidade ultra-sônica foi determinada ao se considerar a transmissão da onda ao longo do comprimento de corpos-de-prova com dimensões nominais de 5 x 5 x 20 cm (espessura x largura x comprimento). Para avaliar a sensibilidade do método ultra-sonoro, corpos-de-prova foram ensaiados destrutivamente a compressão paralela às fibras, com determinação do módulo de elasticidade (métodos destrutivo e não-destrutivo). Os resultados indicaram que os valores da constante elástica obtida pelo método ultra-sonoro, para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, foram mais elevados que os dos módulos de elasticidade a compressão paralela às fibras. Apesar da diferença de valores absolutos entre os dois métodos em função da natureza viscoelástica da madeira, o método ultra-sonoro foi eficiente em virtude de avaliar, de forma rápida e eficaz, as diferenças relativas à qualidade da madeira.

Palavras-chave: ondas ultra-sônicas, qualidade da madeira, *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii*

Determination of modulus of elasticity in woods by destructive and non-destructive methods

ABSTRACT

The purpose of this study was to correlate modulus of elasticity of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden and *Pinus elliottii* Engelm. woods obtained by destructive and non-destructive methods. For such ultrasonic equipment with planes faces transducers of 50 kHz were used. The ultrasonic speed was determined considering the transmission of the wave along the length of the samples with nominal dimensions of 5 x 5 x 20 cm (thickness x width x length). To evaluate the sensitivity of the ultrasonic method, the specimens were submitted to destructive conventional compression to grain tests, with determination of modulus of elasticity (destructive and non-destructive methods). The modulus of elasticity obtained by ultrasonic method, for *Eucalyptus grandis* and *Pinus elliottii* woods, were higher than the modulus of elasticity obtained from conventional tests. Although the difference of absolute values between the methods, due to wood viscoelastic nature, ultrasonic method was efficient and fast for evaluating differences in the wood quality.

Key words: ultrasonic waves, wood quality, *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii*

¹ Engenheiro Florestal, Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais - CCR, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, CEP 97105-900 Santa Maria, RS. diego_stangerlin@yahoo.com.br

² Engenheiro Florestal, M.Sc., Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa - UFV, CEP 36570-000 Viçosa, MG. leandrocalegari@yahoo.com.br

³ Engenheiro Florestal, Dr., Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais, Laboratório de Produtos Florestais, Centro de Ciências Rurais - CCR, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, santinie@ccr.ufsm.br

⁴ Engenheiro Florestal, Centro de Ciências Rurais - CCR, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. manecosmrs20@yahoo.com.br

⁵ Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Federal de Pelotas - UFPel, Caixa Postal 354, CEP 96.010-900 Pelotas, RS. darcigatto@yahoo.com

INTRODUÇÃO

Em razão de suas boas propriedades físicas e mecânicas, a madeira vem, atualmente, sendo empregada para os mais variados fins e, com a possibilidade de escassez dos recursos minerais não-renováveis, é provável que, futuramente, seja a principal fonte de matéria-prima para a construção civil, fabricação de móveis e casas; no entanto, o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira é uma importante base tecnológica para a utilização racional desse material, a fim de atender às normas de segurança e durabilidade.

As avaliações destrutivas são, em geral, os principais métodos utilizados para o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira. A obtenção dos resultados a partir dessa metodologia é, por vezes onerosa, em razão do tempo consumido com a confecção dos corpos-de-prova e custo de material. Por sua vez, as avaliações não-destrutivas permitem a obtenção de informações mais precisas e mais amplas, medindo-se um número maior de amostras, em função da rapidez dos testes.

Segundo Ross (1999) diversas tecnologias, como raios-X, análise química, propriedades vibracionais e transmissão de ondas sonoras, vêm sendo empregadas na avaliação não-destrutiva da madeira.

Com base nos princípios da propagação de ondas mecânicas, a avaliação não-destrutiva de madeiras por meio da técnica de emissão de ondas de ultra-som surge, atualmente, como um dos métodos mais aplicados e promissores em função da facilidade de operação e custo relativamente baixo na aquisição e operacionalização do equipamento.

De acordo com Gonçalves et al. (2001), as ondas acústicas de frequência superior a 20 kHz, são classificadas como ondas de ultra-som. O método ultra-sonoro se baseia na análise da propagação e sua relação entre a resposta ao ultra-som e às constantes elásticas da madeira.

As constantes de propagação de ondas ultra-sônicas estão intrinsecamente relacionadas com as propriedades físicas e mecânicas dos materiais. De modo simplificado, a velocidade de propagação das ondas sonoras em um sólido é função da raiz quadrada da razão entre o módulo de elasticidade (MOE) e da massa específica desse material (Tsoumis, 1991).

Conforme Calegari (2006) os processos envolvidos na propagação de ondas de ultra-som são relativamente simples. De maneira resumida, um circuito eletrônico emite pulsos elétricos conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoelétrico, localizado nos transdutores. As vibrações mecânicas se deslocam pelo material, que atenua o sinal emitido pelo gerador. O sinal retardado é recuperado por outro cristal piezoelétrico, sendo então amplificadas e transformadas em pulsos elétricos novamente, permitindo a medição do tempo de propagação. A partir da distância e do tempo de percurso da onda sonora se calcula a velocidade da mesma.

Segundo Mantilla Carrasco & Azevedo Júnior (2003) alguns fatores podem influenciar a propagação de ondas ultra-sônicas, tais como as propriedades anatômicas, físicas (massa específica), morfológicas (tipos de lenhos e ângulo de grã), presença de defeitos (nós e rachaduras), geometria das amos-

tras, condições do meio (temperatura e umidade relativa) e procedimento utilizado para tomada das medidas (frequência e tipo de transdutor).

A propagação das ondas ultra-sonoras, segundo o eixo longitudinal, varia na direção medula-casca. A madeira adulta, próxima à casca, apresenta maior percentual de lenho tardio, fibras mais espessas, menor diâmetro de lume e é mais densa, proporcionando maior velocidade das ondas ultra-sonoras. O contrário ocorre com a madeira juvenil, próxima à medula (Shimoyama, 2005). Bucur (1995) salientou que a velocidade das ondas é maior na madeira próxima à casca porém a maior ascensão é verificada na madeira próxima à medula. Jang (2000) ao estudar as propriedades de tora por meio de métodos não-destrutivos, observou um aumento na velocidade das ondas ultra-sônicas no sentido medula-casca. Segundo o autor esta variação se deve à maior massa específica da madeira próxima à casca.

Este trabalho tem, como objetivo, correlacionar os módulos de elasticidade obtidos por métodos destrutivo e não-destrutivo, das madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Pinus elliottii* Engelm., provenientes de regiões próximas à medula e à casca.

MATERIAL E MÉTODOS

Coleta e preparo de material

Para realização dos ensaios se utilizaram madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, obtidas de plantios localizados em Santa Maria, RS, as quais possuíam aproximadamente 40 e 15 anos de idade, respectivamente.

Selecionaram-se, de modo aleatório, árvores adultas de bom fuste, com grã reta e diâmetro a altura do peito (DAP) acima de 45 cm; de cada espécie foram utilizadas três árvores, das quais se retiraram as duas primeiras toras, com 200 cm de comprimento cada uma.

Logo após o corte das árvores de cada tora, retiraram-se duas pranchas de 5 cm de espessura paralelas à medula, sendo uma localizada acima e a outra abaixo da medula e de cada prancha se retiraram quatro tábuas de 5 cm de largura, ou seja, duas para cada região, próxima à medula e à casca (Figura 1).

As tábuas foram seccionadas dando origem a corpos-de-prova de dimensões nominais de 5 cm de espessura x 5 cm de largura x 20 cm de comprimento. Os corpos-de-prova que apresentavam defeitos, como grande inclinação da grã, presença de nós e medula, foram descartados.

Condicionamento do material

Antecedendo aos ensaios destrutivos e não-destrutivos, os corpos-de-prova foram condicionados em uma câmara climatizada (23 ± 2 °C de temperatura e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa) até atingirem teor de umidade de equilíbrio de 12%.

Delineamento experimental

Os corpos-de-prova da madeira próxima à medula e à casca das duas espécies florestais, foram submetidos a dois métodos de ensaio para determinação do módulo de elasti-

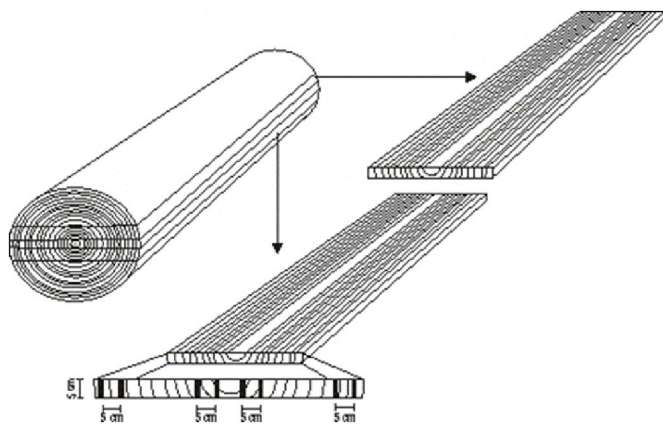


Figura 1. Esquema de corte das toras e retirada das tábuas

Figure 1. Scheme for log cutting and removal of the boards

cidade: método destrutivo (ensaio de compressão paralela) e não-destrutivo (ensaio com ultra-som); assim, o delineamento foi um fatorial formado pelos fatores espécies, regiões da madeira e métodos de avaliação, todos com dois níveis, totalizando oito tratamentos (Tabela 1).

Tabela 1. Delineamento dos tratamentos do experimento

Table 1. Details of treatments

Tratamento	Espécie	Região	Métodos de avaliação	Número de amostras
1	<i>Eucalyptus grandis</i>	Próximo à medula	Destrutivo	26
2	<i>Eucalyptus grandis</i>	Próxima à medula	Não-destrutivo	26
3	<i>Eucalyptus grandis</i>	Próxima à casca	Destrutivo	30
4	<i>Eucalyptus grandis</i>	Próxima à casca	Não-destrutivo	30
5	<i>Pinus elliotii</i>	Próxima à medula	Destrutivo	30
6	<i>Pinus elliotii</i>	Próxima à medula	Não-destrutivo	30
7	<i>Pinus elliotii</i>	Próxima à casca	Destrutivo	30
8	<i>Pinus elliotii</i>	Próxima à casca	Não-destrutivo	30

Ensaio não-destrutivos

Para a realização dos ensaios não-destrutivos se utilizou o equipamento de ultra-som PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Testing*), fabricado pela C.N.C. Eletronic, Inglaterra; este aparelho mede, diretamente, o tempo de propagação da onda em microssegundos (ms). Os transdutores apresentam diâmetro útil de 2,5 cm e frequência de 50 kHz.

Para anteceder os ensaios propostos, realizou-se a calibração do aparelho emissor de ultra-som por meio de um cilindro metálico, fornecido juntamente com o equipamento.

Realizaram-se leituras do tempo de propagação da onda no centro da peça a ser ensaiada e, a partir da razão entre a média das leituras e o comprimento do trecho percorrido pela onda

(comprimento real da amostra) calculou-se a velocidade de propagação. A constante elástica dinâmica foi determinada por meio do produto entre a velocidade de propagação da onda com a massa específica (Eq. 1).

$$C_{LL} = ME * V^2 \quad (1)$$

em que:

C_{LL} = Constante elástica dinâmica (MPa);

V = Velocidade de propagação da onda ($m s^{-1}$);

ME = Massa específica da madeira ($kg m^{-3}$).

Para garantir o contato entre a madeira e os transdutores, aplicou-se vaselina em pasta nos topos das peças ensaiadas. A vaselina permitiu melhor transmissão da onda ultra-sônica na interface, a fim de evitar que ocorresse interferência no sinal. A velocidade de propagação da onda ultra-sonora foi determinada somente na direção longitudinal, uma vez que diversos pesquisadores, tais como Bartholomeu (2001), Puccini (2002) e Costa (2004) descreveram que esta direção apresenta comportamento bem definido e melhor ajuste.

Ensaio destrutivos

Para avaliar a acurácia e a sensibilidade do método ultrasonoro após tal ensaio, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios destrutivos de compressão paralela às fibras, em uma máquina universal de ensaio da marca Wolpert-Amsler, com o propósito de se atender, no geral, às prescrições da American Society for Testing and Materials - ASTM D143-94 (1994).

Análise estatística

Os resultados foram interpretados com auxílio de análise de regressão em que a variável independente foi a constante elástica dinâmica obtida em ensaio de ultra-som e a variável dependente foi o módulo de elasticidade obtido em ensaio convencional de compressão paralela às fibras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 se apresentam os resumos dos resultados obtidos por meio do método não-destrutivo ao se utilizar o ultra-som nos corpos-de-prova de madeira próxima à medula e à casca de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliotii*, respectivamente.

Os valores médios da velocidade de propagação longitudinal das ondas ultra-sônicas obtidas neste trabalho, foram bastante próximos daqueles relatados por outros pesquisadores (Puccini, 2002; Mantilla Carrasco & Azevedo Júnior, 2003; Costa, 2004; Ballarin & Nogueira, 2005), situando-se entre 4000 e 6000 $m s^{-1}$.

Verificou-se, ao se comparar os valores médios de velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras em corpos-de-prova da madeira próxima à medula e à casca de *Pinus elliotii*, que nas amostras próximas à casca os valores foram superiores aos das próximas à medula em 18,04%; já para a

Tabela 2. Valores de massa específica (ME), velocidade de propagação das ondas ultra-sonoras (Vsom) e constante elástica dinâmica (C_{LL}) para as amostras de madeira próxima da medula e da casca de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*

Table 2. Values of density (ME), speed of propagation of the waves ultrasound (Vsom) and dynamic elastic constant (C_{LL}) for the samples of wood near the pith and the bark of *Eucalyptus grandis* and *Pinus elliottii*

	Próxima da medula			Próxima da casca		
	ME 12% (g cm ⁻³)	Vsom (m s ⁻¹)	C_{LL} (MPa)	ME 12% (g cm ⁻³)	Vsom (m s ⁻¹)	C_{LL} (MPa)
<i>Eucalyptus grandis</i>						
Mínimo	0,499	4.890	13.255	0,594	4.762	16.899
Máximo	0,654	5.464	18.404	0,835	5.797	22.837
Média	0,586	5.180	15.698	0,721	5.269	19.884
CV (%)	6,76	2,79	6,44	10,74	5,25	6,84
<i>Pinus elliottii</i>						
Mínimo	0,405	3.534	5.901	0,610	5.063	16.206
Máximo	0,596	5.571	17.652	0,728	6.024	24.470
Média	0,489	4.600	10.501	0,671	5.613	21.204
CV (%)	9,41	12,80	27,12	4,89	5,21	11,27

Tabela 3. Módulo de elasticidade obtido por meio de ensaio de compressão paralela às fibras das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*

Table 3. Modulus of elasticity obtained by means of test of parallel compression of *Eucalyptus grandis* and *Pinus elliottii* wood fibres

	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Pinus elliottii</i>	
	Próxima da medula	Próxima da casca	Próxima da medula	Próxima da casca
	E_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
Mínimo	10.965	14.557	3.803	12.617
Máximo	14.880	19.859	16.840	23.712
Médio	13.119	16.944	8.739	17.866
CV (%)	7,90	8,13	32,36	14,92

E_{c0} = Módulo de elasticidade estático

madeira de *Eucalyptus grandis*, a superioridade foi de apenas 1,69%.

A Tabela 3 apresenta os valores médios e os coeficientes de variação dos módulos de elasticidade, avaliados por meio de ensaios destrutivos de compressão paralela às fibras.

Conclui-se, pela análise das Tabelas 2 e 3, que os valores da constante elástica dinâmica (C_{LL}), para a madeira próxima à medula e à casca de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, são sempre mais elevados que os valores dos módulos de elasticidade à compressão paralela (E_{c0}), confirmando os resultados apresentados por Bodig & Jayne (1993), ao utilizarem o método da vibração transversal ou ressonância, obtendo valores de módulos de elasticidade dinâmico 5 a 15% superiores aos módulos de elasticidade estático. Os resultados deste trabalho mostram que, para a madeira de *Eucalyptus grandis*, a C_{LL} foi 19 e 29% superior ao E_{c0} ; por sua vez,

para a madeira de *Pinus elliottii* a C_{LL} foi 18 e 20% superior. De fato, de acordo com Ouis (2002) e se considerando a natureza viscoelástica da madeira, quanto maior a frequência de excitação da fonte maior também é o valor inferido para o módulo de elasticidade dinâmico. Os resultados obtidos são compatíveis com os de Bartholomeu (2001), Nogueira & Ballarin (2002) e Puccini (2002) que encontraram relações C_{LL}/E_{c0} na direção longitudinal entre 1,06 e 1,38.

Na Tabela 4 se apresentam as equações ajustadas para a estimativa do módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de compressão paralela, em função da constante elástica dinâmica, obtida pelo ensaio de ultra-som.

Ao se observar a Tabela 4, nota-se que as quatro regressões apresentaram valores significativos a 1%, em termos de parâmetros da regressão.

Verifica-se, com as regressões lineares para a madeira de *Eucalyptus grandis* próxima à medula e à casca, que 67,65 e 86,19%, respectivamente, da variação do módulo de elasticidade

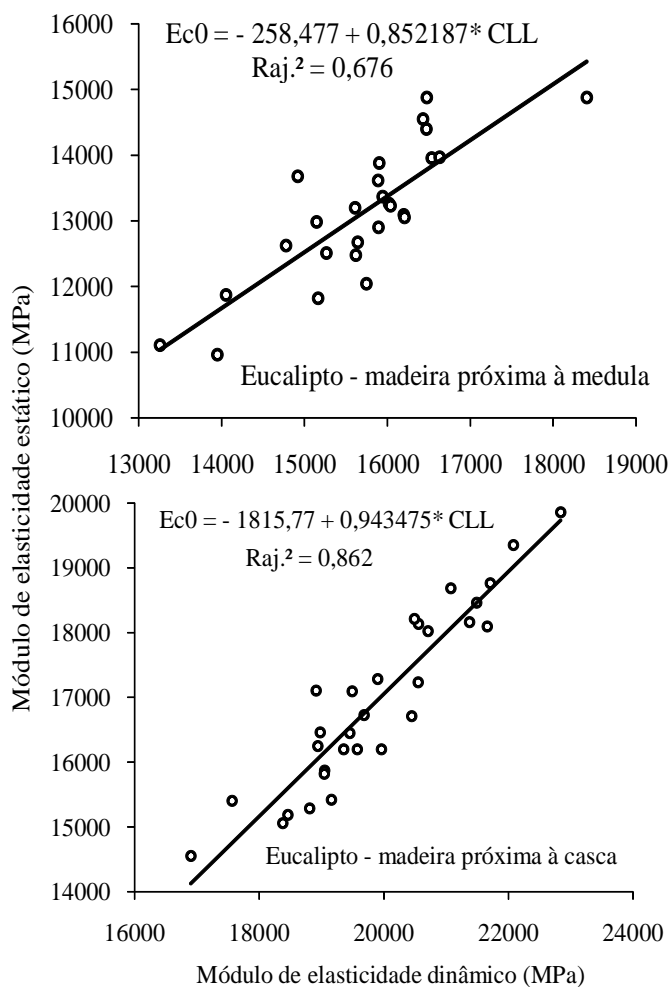


Figura 2. Correlação entre a constante elástica dinâmica (C_{LL}) e o módulo de elasticidade estático (E_{c0}) para a madeira juvenil e adulta de *Eucalyptus grandis*

Figure 2. Correlation between dynamics elastic constant (C_{LL}) and static modulus of elasticity (E_{c0}) for wood near the pith and the bark of *Eucalyptus grandis*

Tabela 4. Equações ajustadas para a estimativa do módulo de elasticidade à compressão paralela em razão da constante elástica dinâmica para os diferentes tratamentos (espécie e região da madeira)*

Table 4. Equations adjusted to estimate of the static modulus of elasticity of parallel compression using the dynamics elastic constant relation for different treatments (species and area of wood)*

Espécie e Tipo de Lenho*	Função	Equação de regressão	R _{aj} ² (%)	S _{yx}	F
EG - PM	$E_{c0} = f(C_{LL})$	$E_{c0} = -258,477 + 0,852187 \cdot C_{LL}$	67,65	589,81	53,28**
EG - PC	$E_{c0} = f(C_{LL})$	$E_{c0} = -1815,77 + 0,943475 \cdot C_{LL}$	86,19	511,96	182,01**
PE - PM	$E_{c0} = f(C_{LL})$	$E_{c0} = -1321,31 + 0,957967 \cdot C_{LL}$	92,82	758,01	375,69**
PE - PC	$E_{c0} = f(C_{LL})$	$E_{c0} = -2676,24 + 0,968767 \cdot C_{LL}$	74,50	1346,27	85,72**

* EG - *Eucalyptus grandis*; PE - *Pinus elliottii*; PM - próxima à medula; PC - próxima à casca; R_{aj}² - coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} - erro padrão da estimativa; F - valor de F calculado; f - função; ** - significativo a 1% de probabilidade

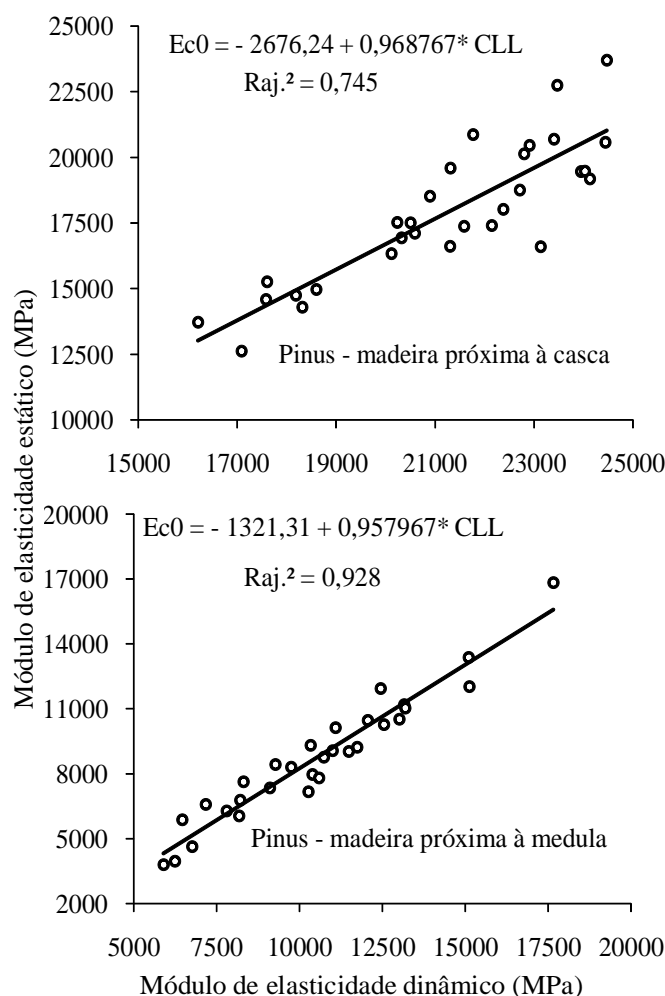


Figura 3. Correlação entre a constante elástica dinâmica (C_{LL}) e o módulo de elasticidade estático (E_{c0}) para a madeira juvenil e adulta de *Pinus elliottii*

Figure 3. Correlation between dynamics elastic constant (C_{LL}) and static modulus of elasticity (E_{c0}) for wood near the pith and the bark of *Pinus elliottii*

idade avaliado por meio do ensaio de compressão paralela às fibras, podem ser explicadas pela variação da constante elás-

tica dinâmica. A mesma análise, realizada para a madeira próxima à medula e à casca de *Pinus elliottii*, aponta valores de 74,50 e 92,82%, respectivamente (Figuras 2 e 3).

A análise dos resíduos das quatro regressões e os valores dos coeficientes de determinação permitem afirmar que a constante elástica dinâmica avaliada por meio do método ultra-sonoro, é boa estimadora para o módulo de elasticidade obtido por meio de ensaio de compressão paralela às fibras.

CONCLUSÕES

O método ultra-sonoro foi uma importante ferramenta para inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade da madeira.

Apesar dos valores absolutos dos módulos de elasticidade obtidos pelos métodos destrutivo e não-destrutivo serem diferentes em razão da natureza viscoelástica da madeira, o método ultra-sonoro foi eficiente por avaliar, de forma rápida e eficaz, as diferenças relativas à qualidade da madeira nas regiões próximas à medula e à casca.

A utilização de transdutores de faces planas mostrou-se satisfatória no emprego do método ultra-sonoro, porém esses transdutores apresentam o inconveniente da aplicação do acoplante (vaselina) e, sendo assim, recomenda-se a realização de estudos para viabilizar o uso de transdutores de ponto seco, os quais não requerem o uso de acoplante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na pessoa do Professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, por ceder o equipamento de ultra-som para realização deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM D 143. Standard methods of testing small clear specimens of timber. Annual Book of ASTM Standards, v.4.10, p.24-65, 1994.
- Ballarin, A.W.; Nogueira, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. Engenharia Agrícola, v.25, n.1, p.19-28, 2005.
- Bartholomeu, A. Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2001. 105p. Tese de Doutorado.
- Bodig, J.; Jayne, B.A. Mechanics of wood and wood composites. Malabar: Krieger, 1993. 712 p.
- Bucur, V. Acoustics of wood. New York: CRC Press, 1995. 284 p.
- Calegari, L. Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2006. 91p. Dissertação de Mestrado.

- Costa, O.A.L. Velocidade de propagação de ultra-som na madeira para diferentes condições de umidade. Campinas: UNICAMP, 2004. 47 p. (Relatório de Pesquisa).
- Gonzalez, J.C.; Valle, A.T.; Costa, A.F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). *Cerne*, Lavras, v.7, n.2, p.81-92, 2001.
- Jang, S.S. Evaluation of lumber properties by applying stress waves to larch logs grown in Korea. *Forest Products Journal*, v.50, n.3, p.44-48, 2000.
- Mantilla Carrasco, E.V.; 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.
- Nogueira, M.; Ballarin, A.W. Correlação entre módulos de elasticidade estático (flexão) e dinâmico (ultra-som) para algumas espécies de eucalipto. In: Congresso Ibero-Americano de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos Florestais, 2, 2002, Curitiba. Anais... Curitiba: UFPR/FUPEF, 2002. 1 CD ROM.
- Ouis, D. Dispersion of wood as a consequence of its viscoelasticity. In: International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 13., 2002, Berkeley. Proceedings... Berkeley: University of California, 2002. p.8.
- Puccini, C.T. Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002. 139p. Tese de Doutorado.
- Ross, R.J. Using sound to evaluate standing timber. *International Forestry Review*. v.1, n.1, p.43-44, 1999.
- Shimoyama, V.R. de S. Estimativas de propriedades da madeira de *Pinus taeda* através do método não-destrutivo emissão de ondas de tensão, visando à geração de produtos de alto valor agregado. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. 151p. Tese de Doutorado.
- Tsoumis, G. Science and technology of wood: structure, properties and utilization. New York: van Nostrand Reinold. 1991. 494p.