



ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS DA MADEIRA POR EMISSÃO ACÚSTICA E ULTRASSOM

¹**Assis, Máira Reis de** (maira1403@yahoo.com.br), ²**Napoli, Alfredo** (alfredo.napoli@cirad.fr),
²**Brancheriau, Loïc** (loic.brancheriau@cirad.fr), ¹**Trugilho, Paulo Fernando** (trugilho@dcf.ufla.br),
²**Boutahar, Nabila** (nabila.boutahar@cirad.fr)

¹**Universidade Federal de Lavras/UFLA**

Departamento de Ciências Florestais – Caixa Postal 3037 – 37200-000 Lavras, Minas Gerais, Brasil

²**CIRAD** - Research Unit Biomass, Wood, Energy, Bioproducts - TA B-114/16 – Rue Jean-François Breton 34398
– Montpellier, França

RESUMO: O objetivo do trabalho foi estimar os módulos de elasticidade dinâmica da madeira de *Eucalyptus* a partir de métodos não destrutivos de emissão acústica e ultrassom. Foram utilizados 71 corpos de prova produzidos a partir de 42 árvores do clone comercial GG100 (híbrido do *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake), aos 6 anos de idade. Para as estimativas dos módulos de elasticidade dinâmica (MOE), os corpos de prova de madeira foram submetidos a testes dinâmicos de vibrações de flexão, pelo sistema acústico BING® e de compressão, por um dispositivo ultrassonoros específico UScan®. No momento que antecedeu os testes mecânicos, a massa e as dimensões de cada corpo de prova foram medidos, obtendo-se a densidade aparente da madeira a 12%. Os valores médios de MOE flexão para as posições radiais internas e externas, respectivamente, foram de 10537 MPa e 17149 MPa; já para os valores médios de MOE compressão, foram encontrados 13043 MPa e 18999 MPa, para as posições radiais internas e externas, respectivamente. As amostras apresentaram menores valores de módulos de elasticidade dinâmica e de densidade aparente na região próxima da medula. O coeficiente de determinação entre o MOE flexão e MOE compressão foi de 0,78.

Palavras Chave: método não destrutivo, elasticidade, mecânica da madeira, *Eucalyptus*.

ESTIMATION OF ELASTIC PROPERTIES OF WOOD BY ACOUSTIC EMISSION AND ULTRASOUND

ABSTRACT: The aim of this study was to estimate the dynamic elasticity modules of *Eucalyptus* from non-destructive methods of acoustic emission and ultrasound. 71 specimens were produced from 42 trees of the commercial clone GG100 (hybrid of *Eucalyptus urophylla* ST Blake) at 6 years of age. The specimens of wood were submitted to dynamic tests of flexural vibrations by acoustic system BING®, and compression tests with a specific ultrasound device by UScan® to estimate the dynamic elasticity modulus (DEM). At the time preceding the mechanical tests, the mass and dimensions of each specimen were measured, and the apparent density of the wood was 12%. The average values of flexural DEM for internal and external radial positions were, respectively, 10537 MPa and 17149 MPa; for compression DEM, the average values found were 13043 MPa and 18999 MPa, for the internal and external radial positions, respectively. The specimens showed lower values of dynamic elasticity modules and apparent density in the region near the marrow. The coefficient of determination between the flexion DEM and compression DEM was 0.78.

Keywords: non-destructive method, elasticity, wood mechanics, *Eucalyptus*.

1. INTRODUÇÃO

Entre os diversos gêneros de espécies arbóreas de interesse econômico plantadas comercialmente no mundo, *Eucalyptus* está entre os mais bem sucedidos em face do rápido crescimento, do ciclo de corte relativamente curto, facilidade de propagação, tanto por sementes como por via vegetativa, características silviculturais e de manejo conhecidas, grande diversidade de espécies e possibilidades de utilização para os mais diversos fins (ANGELI *et al.*, 2005; SHUMACHER e POGGIANI, 1993).

Dentre as espécies de *Eucalyptus* plantadas no Brasil, o *Eucalyptus urophylla* é uma das mais cultivadas devido, além de outros fatores relacionados à boa adaptação da espécie, por sua potencialidade de utilização para os mais diversos fins (celulose e papel, carvão, serraria, entre outros).

Um dos principais problemas na utilização de espécies do gênero *Eucalyptus* como madeira sólida são as elevadas tensões de crescimento e a difícil secagem, que causam grandes perdas. Propriedades como resistência mecânica, massa específica aparente e estabilidade dimensional provocam grande impacto na qualidade do produto final (EUCALIPTO..., 2003), sendo necessário e recomendado maior conhecimento específico das características físicas e mecânicas da matéria prima.

Como, em geral, a avaliação tecnológica destrutiva da madeira é uma prática onerosa e demorada, muitas empresas passaram a adotar como alternativa para predições das características da madeira métodos não destrutivos.

Os métodos ou ensaios não destrutivos de avaliação das propriedades da madeira se tornaram importantes ferramentas, pois estas técnicas visam qualificar o material sem que haja o comprometimento do seu uso futuro, propiciam uma economia de tempo, custo, além de permitir uma avaliação de grande quantidade de árvores/amostras e materiais genéticos. A utilização de métodos não destrutivos favorecem também ganhos expressivos no melhoramento, haja vista que esses métodos permitem avaliação em campo.

Vários são as técnicas e equipamentos utilizados na avaliação não destrutiva, dentre eles destacam-se os Raios-X, NIR, *Pilodyn*, resistógrafo, extensômetro, Ultrassom, BING®, entre outros.

TARGA *et al.* (2005) determinaram o módulo de elasticidade na madeira de *Eucalyptus* por meio de ensaio não-destrutivo de vibração transversal, com uso do equipamento BING, e por meio de ensaio destrutivo de flexão estática e obtiveram boa correlação na comparação entre os métodos dinâmicos e estáticos (R^2 de até 0,87).

VIVIAN *et al.* (2012) submeteram a madeira de *Eucalyptus cloeziana* a ensaios não destrutivos (ultrassom) e a ensaios destrutivos (flexão estática) para obtenção dos módulos de elasticidade. Os autores obtiveram uma correlação de 0,62 entre os módulos de elasticidade dos dois métodos de avaliação utilizados. OLIVEIRA *et al.* (2005) demonstram correlações significativas para a estimativa do MOE dinâmico obtido por equipamento ultrassom em função do módulo de elasticidade estático (R^2 entre 0,57 e 0,89).

O objetivo do trabalho foi estimar os módulos de elasticidade dinâmica da madeira de *Eucalyptus* a partir de métodos não destrutivos de emissão acústica e ultrassom.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas 42 árvores do clone comercial GG100 (híbrido do *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake), aos 6 anos de idade, provenientes de área de reflorestamento de propriedade da GERDAU S.A., localizada no município de Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais - Brasil (20°56'48" S e 44°55'09" O). De cada árvore, foram retiradas toras com cerca de 1 m de comprimento, partindo da base da árvore, que posteriormente foram desdobradas em pranchas centrais de 100 mm de espessura e 40 cm de comprimento. A partir de pranchas centrais foram confeccionados corpos-de-prova considerando as posições radiais como externa e interna, nas dimensões nominais de 30 x 30 x 200 mm. Um total de 71 corpos de prova de madeira foram produzidos a partir de 42 pranchas centrais.

Todo o material foi equilibrado à umidade 12% (65% de umidade relativa, 22°C) antes dos ensaios.

2.1 Módulo de elasticidade dinâmico (MOE) em flexão

As amostras foram colocadas em dois suportes elásticos, um vibrômetro a laser foi colocado numa extremidade da barra, enquanto que na outra extremidade uma bola foi usada para produzir vibrações (Figura 1).

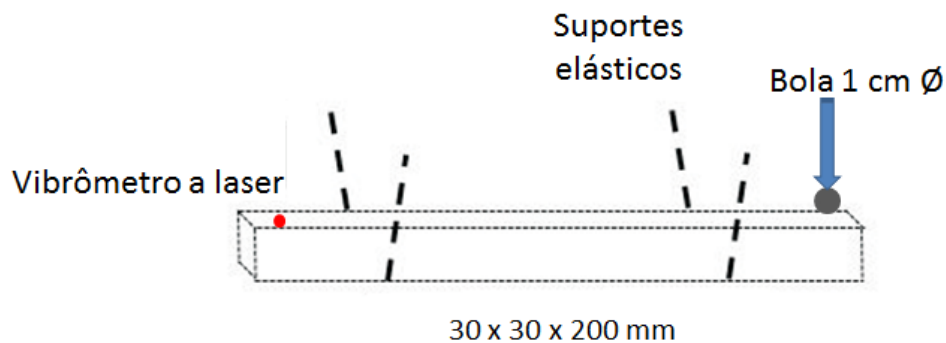


Figura 1 Esquema do ensaio de flexão com o dispositivo BING®

O módulo de elasticidade dinâmico (MOE) em flexão foi estimado por vibrações acústicas com o BING® (*Beam Identification for Nondestructive Grading*) versão 2009, dispositivo desenvolvido pelo CIRAD. A análise do sinal espectral, a seleção dos picos da frequência natural de vibração das amostras de madeira, e a estimativa do MOE dinâmico transversal foi realizada utilizando o software BING® (CIRAD, Montpellier, França, versão 9.1.3). A frequência de amostragem do sinal foi 44100 Hz. A aquisição espectral foi realizada utilizando 32.768 pontos para cada teste.

2.2 Módulo de elasticidade dinâmico (MOE) em compressão

Para as estimativas dos módulos de elasticidade dinâmico (MOE) em compressão, os corpos de prova de madeira foram submetidos a testes dinâmicos num dispositivo ultrassonor específico (UScan®) projetado no CIRAD, cuja vibração é produzida por transdutores piezoelétricos de face plana de frequência 45 kHz. Os ensaios foram realizados na faixa de velocidade de 4.000 a 6.000 m s⁻¹. Na Figura 2 está apresentado o esquema do ensaio de compressão com o dispositivo ultrassonor.

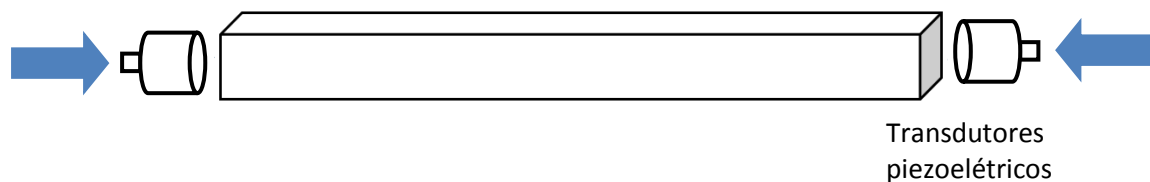


Figura 1 Esquema da análise de compressão com o dispositivo ultrassonor

2.3 Densidade relativa aparente

A massa e volume para o cálculo da densidade relativa aparente foram obtidos à 12% de umidade (umidade teórica de equilíbrio). As dimensões dos corpos de prova foram mensuradas utilizando um paquímetro digital com sensibilidade de 0,01 mm; as massas foram obtidas utilizando-se uma balança digital com sensibilidade de 0,01g (Figura 3).



Figura 3 Densidade aparente - medições de volume e massa dos corpos de prova de madeira

A análise estatística foi realizada utilizando-se o software Sisvar®, versão 5.1 Build 72 (FERREIRA, 2008). Para a comparação múltipla das médias utilizou-se o teste Scott-Knott a 5 % de significância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 está apresentado o resumo da análise de variância para MOE flexão BING, MOE compressão Ultrassom e densidade relativa aparente. Observa-se que o efeito da posição radial foi altamente significativo ($p \leq 0,01$) para todas as variáveis analisadas.

Tabela 1 Análise de variância para o módulo de elasticidade (MOE) flexão BING e compressão Ultrassom e densidade relativa aparente em *Eucalyptus*.

FV	GL	Características físicas da madeira		
		QUADRADO MÉDIO		
		MOE Flexão BING (MPa)	MOE Compressão Ultrassom (MPa)	Densidade aparente (kg m^{-3})
Posição Radial	1	774741827,6523**	628571745,3492**	86034,7401**
Erro	69	3314783,2024	3218367,5853	1921,9949
Total	70			
Média		13983	16147	557,2
CV (%)		13,02	11,11	7,87

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CV = Coeficiente de variação experimental; ** e ns = significativo em nível de 1% e não significativo, respectivamente.

Na Tabela 2 encontra-se o teste de comparação múltipla para o efeito da posição radial sobre as características MOE flexão BING, MOE compressão Ultrassom e densidade relativa aparente.

Tabela 2 Teste de médias para as variáveis módulo de elasticidade (MOE) flexão BING e compressão Ultrassom e densidade relativa aparente em *Eucalyptus*.

Posição radial	MOE flexão BING (MPa)	MOE compressão Ultrassom (MPa)	Densidade aparente (kg m^{-3})
Interior	10537 b	13043 b	521 b
Exterior	17149 a	18999 a	591 a

*Valores seguidos de mesma letra na vertical não diferem entre si significativamente pelo teste de comparação múltipla Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Observa-se no teste de comparação múltipla que ocorreu diferenças significativas entre as médias para todas as variáveis analisadas. Os valores estatisticamente superiores foram encontrados nos corpos de prova retirados na posição radial exterior para todas as características.

TARGA *et al.* (2005) avaliaram o uso do método de vibração transversal (sistema BING) na determinação do módulo de elasticidade em flexão em três espécies de *Eucalyptus*. Os

autores obtiveram os seguintes valores de MOE: 24704 MPa, 16990 MPa e 19566 MPa, para *E. grandis*, *E. saligna* e *E. citriodora*, respectivamente.

As Figuras 4 e 5 apresentam o comportamento do módulo de elasticidade (MOE) flexão BING e compressão Ultrassom das amostras quanto à posição radial do fuste.

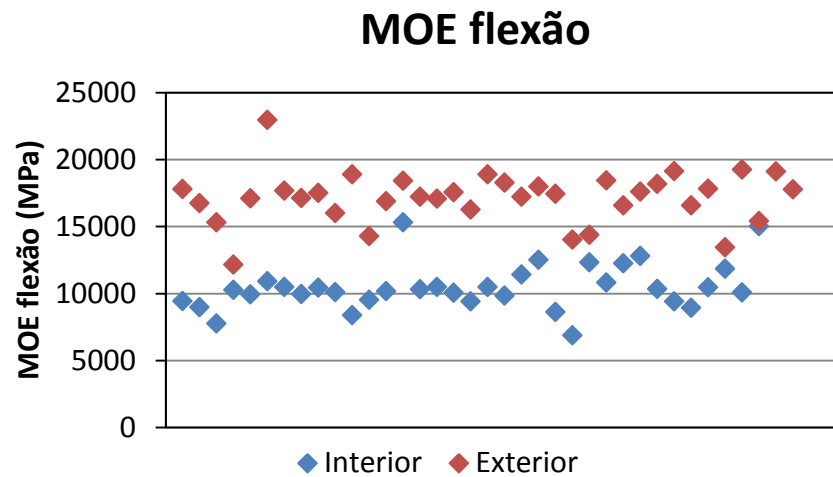


Figura 4 Comportamento do MOE flexão BING das amostras quanto à posição radial.

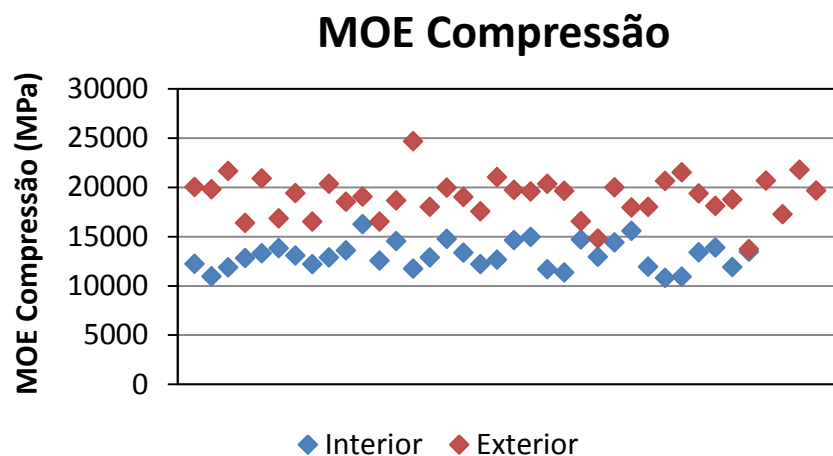


Figura 5 Comportamento do MOE compressão Ultrassom das amostras quanto à posição radial.

Ressalta-se a superioridade dos valores de módulo de elasticidade das amostras do exterior (pontos vermelhos) sobre as amostras do interior (pontos azuis) em flexão e compressão. Como média, em flexão foi de 13983 MPa e em compressão de 16147 MPa. Houve tendência de aumento no sentido medula-casca do MOE flexão de 38,5% e do MOE compressão de 31%.

A Figura 6 apresenta o comportamento da densidade relativa aparente das amostras quanto às diferentes posições radiais.

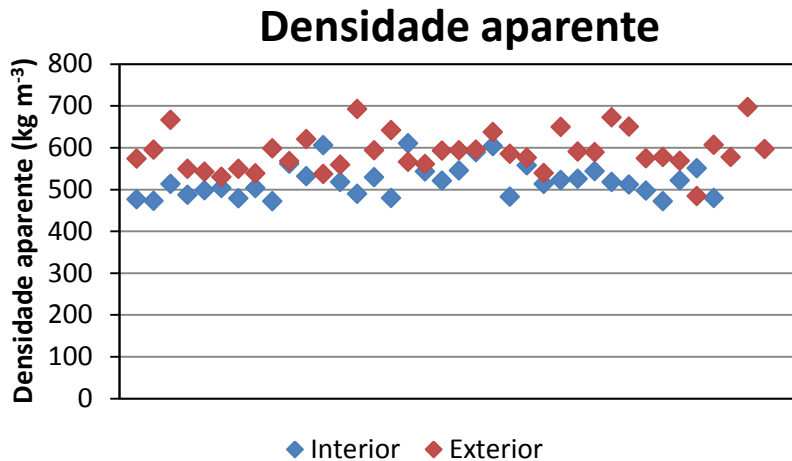


Figura 6 Comportamento da densidade relativa aparente das amostras quanto à posição radial.

Os valores de densidade aparente obtidos foram, para os corpos de prova na posição radial mais externa, 591 kg m^{-3} e 521 kg m^{-3} para a posição radial mais interna. Esta diferença representa um aumento de aproximadamente 12% do valor da densidade aparente da madeira central do tronco para a madeira externa.

Na Figura 7 é mostrada a relação funcional entre o MOE flexão BING e MOE compressão Ultrassom. O coeficiente de determinação entre os módulos de elasticidade foi de 0,78%.

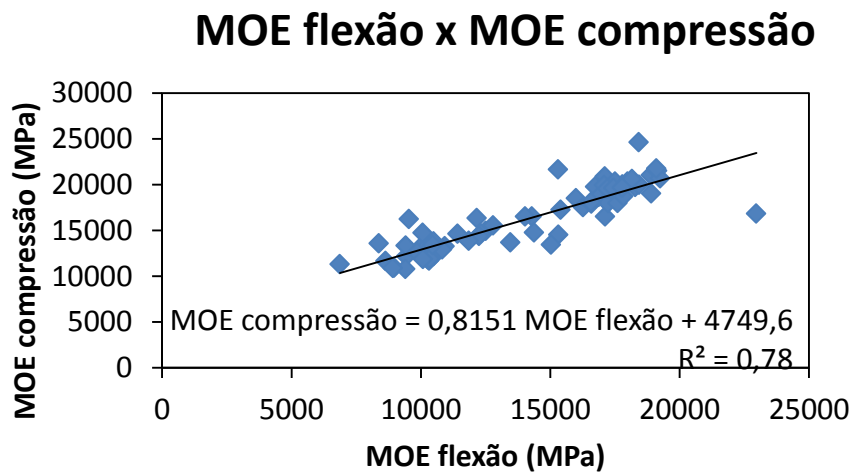


Figura 7 Relação funcional observada entre o MOE flexão e o MOE compressão da madeira de *Eucalyptus*.

As Figuras 8 e 9 apresentam as relações funcionais entre a densidade aparente e os módulos de elasticidade da madeira.

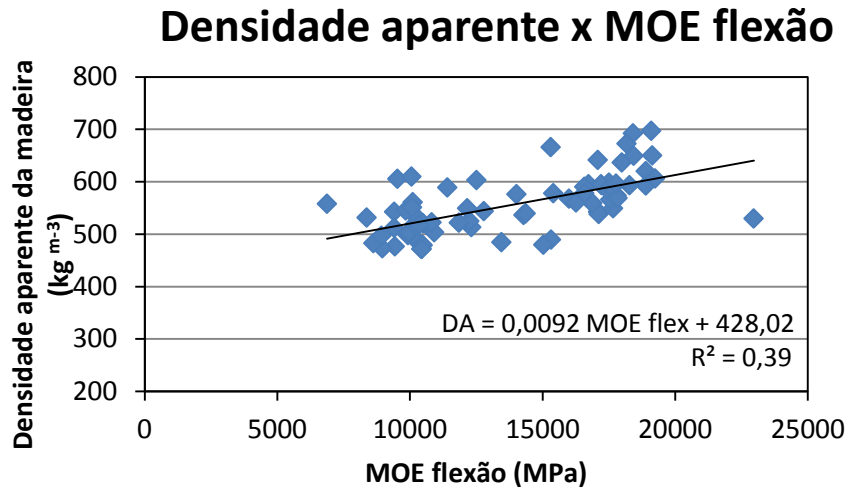


Figura 8 Relação funcional observada entre a densidade relativa aparente e o MOE flexão da madeira de *Eucalyptus*.

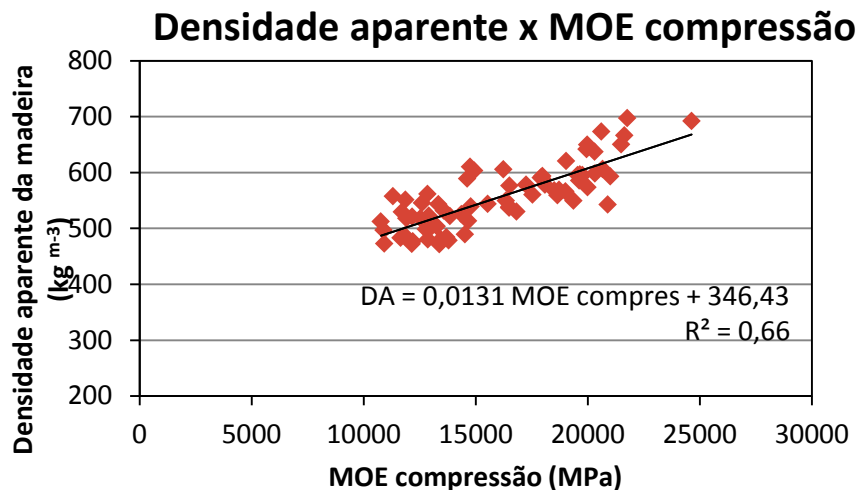


Figura 9 Relação funcional observada entre a densidade relativa aparente e o MOE compressão da madeira de *Eucalyptus*.

Não houve relação direta entre a densidade aparente e os módulos de elasticidade da madeira. Entre a densidade aparente e o MOE flexão o R^2 foi de 0,39 (Figura 8); já entre a densidade aparente e o MOE compressão o R^2 foi de 0,66 (Figura 9). LEITE *et al.* (2012) verificaram correlação moderada (0,69) entre o módulo de elasticidade dinâmico e a densidade aparente das amostras de lenho de *Copaifera langsdorffi* i Desf.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que:

- As amostras apresentaram valores menores de módulos de elasticidade (flexão BING e compressão Ultrassom) e de densidade aparente na região próxima da medula.
- Os dois módulos de elasticidade apresentaram baixa correlação com a densidade aparente, mostrando que esta característica não prediz, com precisão aceitável, os módulos de elasticidade da madeira em estudo.
- Os ensaios mecânicos não destrutivos de emissão acústica e ultrassom permitiram estimar propriedades elásticas da madeira de *Eucalyptus* de forma rápida e confiável nas direções longitudinal e transversal.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CIRAD/AIRD e à UFLA pelo apoio técnico, científico, físico e financeiro e à GERDAU S.A. pela doação do material biológico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELI, A.; BARRICHELO, L. E. G.; MÜLLER, P. H. Indicações para escolha de espécies de *Eucalyptus*. Piracicaba: IPEF, 2005. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/eucalyptus/indicacoes.asp>>. Acesso em: 15 out. 2011.
- EUCALIPTO: pesquisa amplia usos. **Revista da Madeira**, Itajaí, n. 75, ago. 2003. Edição especial. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=395&subject=Carvão%20Vegetal&title=O%20eucalipto%20na%20indústria%20de%20carvão%20vegetal>. Acesso em: 5 jan. 2014.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 36-41, 2008.
- LEITE, E. R. S.; HEIN, P. R. G.; SOUZA, T. M.; RABELO, G. F. Estimation of the dynamic elastic properties of wood from *Copaifera langsdorffii* Desf using resonance analysis. **CERNE**, Lavras, v. 18, n. 1, Mar. 2012.
- OLIVEIRA, F. G. R., MILLER, K. P., CANDIAN, M., SALES, A. Influência da seção transversal na velocidade ultra-sônica na madeira de *Eucalyptus citriodora*. **Cerne**, v.11, n.2, p. 197-203, 2005.
- SCHUMACHER, M. V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell, plantados em Anhembi, SP. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 21-34, 1993.
- TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.291-299, maio/ago. 2005
- VIVIAN, M. A., MODES, K. S., SANTINI, E. J., CARVALHO, D. E., MORAIS, W. W. C., SOUZA, J. T. D., GATTO, D. A. Estimativa dos módulos de elasticidade e ruptura da madeira de *Eucalyptus cloeziana* f. Muell por meio de método não destrutivo. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 3, n. 2, a. 3, 2012.

7. NOTA DE RESPONSABILIDADE

Os autores Máira Reis de Assis, Alfredo Napoli, Loïc Brancheriau, Paulo Fernando Trugilho e Nabila Boutahar são os únicos responsáveis pelo que está contido neste trabalho.