

Estimativa do módulo de elasticidade em painéis aglomerados por meio de emissão de ondas ultra-sonoras

D. M. Stangerlin^{1*}; R. R. Melo²; D. A. Gatto³; P. H. G. Cademartori³; P. A. R. Castelo¹; L. Calegari⁴

¹Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais – Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop – MT

²Campus Professora Cinobelina Elvas – Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus – PI

³Departamento de Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Pelotas, Capão do Leão – RS

⁴Unidade Acadêmica de Engenharia Florestal – Universidade Federal de Campina Grande, Patos – PB

(Recebido em 12/06/2010; revisado em 14/09/2010; aceito em 01/10/2010)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Objetivou-se avaliar o emprego de técnicas ultra-sonoras para estimar o módulo de elasticidade a flexão estática de painéis aglomerados madeira-bambu. Para tanto, foram confeccionados painéis com cinco diferentes proporções das partículas, dimensões de 50 x 50 x 0,95 cm, massa específica nominal de 0,65 g cm⁻³ e colados com ureia-formaldeído. Os ensaios não-destrutivos com aparelho emissor de ondas ultra-sonoras foram realizados ao considerar dois métodos de propagação de ondas (direto e semi-direto), enquanto os ensaios destrutivos de flexão estática procedidos em máquina universal de ensaios. Quando empregado o método direto de propagação, o uso do aparelho de ultrassom mostrou ser uma ferramenta eficiente para inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade. Entretanto, a avaliação por meio da propagação de ondas pelo método semi-direto não permitiu a obtenção de estimativas confiáveis do módulo de elasticidade a flexão estática.

Palavras-chave: Ensaios não-destrutivos; propriedades mecânicas; método direto; método semi-direto.

Abstract:

Ultra-sound techniques were utilized to estimate the modulus of elasticity in static bending of wood-bamboo particleboards. For this purpose, particleboards were produced with five different proportion of the particles, size 50 x 50 x 0.95 cm, nominal density of 0.65 g cm⁻³ and bonded with urea-formaldehyde. Non-destructive tests were performed by use of equipment emitting ultrasonic waves, by considering two methods of wave propagation (direct and semi-direct), while destructive tests of the static bending were performed on machine universal testing. When used the direct method of propagation, the use of ultrasound equipment was proved to be an efficient tool for inference non-destructive of the modulus of elasticity. However, non-destructive evaluation by semi-direct wave propagation not allowed obtaining reliable estimates of the modulus of elasticity in static bending.

Keywords: Not-destructive methods; mechanical properties; direct method; semi-direct method.

1. Introdução

Uma das tendências mais evidentes da indústria madeireira na atualidade é a expansão da produção dos chamados painéis a base de madeira. Estes tem se mostrado uma alternativa interessante em relação a madeira serrada por viabilizarem a utilização de quase 100% de uma tora, como também a não restrição ao emprego de espécies de reflorestamento, de rápido crescimento e de baixa massa específica [1]. Esses painéis podem ser divididos em dois grupos, os particulados e os laminados. Os particulados, objeto de estudo deste trabalho, são constituídos de material ligno-celulósico na forma de partículas e fibras geralmente ligados com adesivos. Dentro desse grupo se tem basicamente

três tipos de painéis: aglomerados, *oriented strand board* (OSB), e as chapas de fibras que podem ser de baixa (chapa isolante), média (MDF) e alta densidade (chapa dura – HDF) [2].

As chapas aglomeradas podem ser produzidas a partir de qualquer material ligno-celulósico que lhes confirmem resistência mecânica e massa específica pré-estabelecida. Além da madeira, podem ser utilizadas na confecção de compósitos aglomerados outras fontes de fibras, como bagaço de cana-de-açúcar, bambu, casca de arroz, aparas de papel reciclado, dentre outros. Entretanto, a qualidade final do produto, pode ser limitada pela escolha do material [3].

A utilização de métodos não-destrutivos para a avaliação das propriedades da madeira e de seus subprodutos é bastante

*Email: stangerlin@ufmt.br (D. M. Stangerlin)

difundida, e remonta desde a década de 1960, no Brasil essa técnica começou a ser estudada apenas no final da década de 1980. Os métodos não-destrutivos são aqueles que permitem a estimativa de propriedades da madeira e subprodutos, tais como biológicas, físicas e mecânicas, sem alterar a característica estrutural e consequente emprego final [4-5]. O grande diferencial dos ensaios não-destrutivos em relação a caracterização destrutiva é a rapidez na obtenção da informação com um menor volume de trabalho. Além disso, os resultados obtidos nos ensaios destrutivos são apenas uma estimativa, já que os mesmos são realizados por meio de amostragem e não da peça real em uso.

Existem distintos métodos empregados na avaliação não-destrutiva, cada qual adequado a determinadas propriedades e características da madeira e de seus subprodutos. Métodos empregando a frequência de ressonância, velocidade de ultrassom e ondas de tensão avaliam a integridade da estrutura e da funcionalidade dos diversos produtos a base de madeira. Os métodos que utilizam as ondas ultra-sonoras são empregados, principalmente, para estimar as constantes elásticas, observar as modificações biológicas da estrutura da madeira e avaliar a qualidade de desdobro [4].

A propagação de ondas ultra-sônicas se dá por meio de um circuito eletrônico que emite pulsos elétricos. Esses pulsos são conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoeletrico, 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 piezoeletrico, sendo então amplificado e transformado em pulsos elétricos novamente permitindo a medição do tempo de propagação. A partir da distância e do tempo de percurso da onda sonora, calcula-se a velocidade da mesma [6].

Diversos pesquisadores tem demonstrado a viabilidade do uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira [6-7]. Entretanto, quando considerada a aplicação das ondas ultra-sonoras na estimativa das propriedades mecânicas de compósitos de madeira são poucos os estudos realizados [8] e por vezes, apresentam resultados não satisfatórios [9]. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o emprego de técnicas ultra-sonoras para estimar as propriedades mecânicas em aglomerados, estabelecendo correlações entre o módulo de elasticidade obtido por ensaios destrutivos de flexão estática e não-destrutivo com ultrassom (método direto e semi-direto).

2. Materiais e Métodos

2.1. Coleta e preparo da matéria-prima

A manufatura dos painéis foi realizada ao utilizar partículas de madeira de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) e bambu (*Bambusa vulgaris* Schr.). Para tanto, seis árvores adultas e 120 colmos foram obtidos em povoamentos homogêneos localizados no campus da Universidade Federal de Santa Maria.

Das árvores, foram retiradas tábuas as quais foram serradas com cortes perpendiculares a grã, obtendo-se

blocos de 5 cm de espessura (sentido tangencial), 7 cm de comprimento (sentido longitudinal) e largura variável (sentido radial) conforme o diâmetro e a posição de obtenção das tábuas na tora. Os blocos foram transformados em flocos ao utilizar moinho de facas, e estes, em partículas, por meio do processamento em moinho de martelos ao empregar peneira com malha de 8 mm em diâmetro.

Os colmos foram cortados a altura média de 2 m da base, posteriormente, seccionados no sentido longitudinal e imersos em água a fim de aumentar a exposição da sua face interna, para facilitar seu processo de trituração. A trituração dos colmos foi realizada em moinho de martelos com a acoplagem de peneira com orifício de 3 mm de diâmetro. Esse material foi peneirado em malhas de 4x4 e 1x1 mm, com objetivo de seleção do material e retirada dos finos.

Após confecção das partículas todo o material foi submetido a secagem em estufa de circulação forçada de ar com temperatura de 60°C até atingirem a umidade de equilíbrio de 3%. Tal procedimento tem por objetivo aumentar a absorção do adesivo que ocupa o local da molécula da água. Todavia a secagem permite que o teor de umidade seja adequado para evitar defeitos na confecção do painel.

2.2. Manufatura dos painéis aglomerados

Ao serem retiradas da estufa, as partículas foram imediatamente levadas a um tambor rotativo, onde ocorreu a mistura dessas nas diferentes proporções quando necessário. O adesivo, a parafina e uma quantidade água necessária para elevar o teor de umidade a 12% foram aplicados por meio de pistola acionada por compressor de ar, enquanto as partículas eram misturadas no referido tambor.

Na confecção dos painéis foi utilizada resina comercial a base de ureia-formaldeído. A composição dos painéis foi pré-estabelecida de modo que apresentassem 91% de partículas, 8% de adesivo e 1% de parafina, com massa específica de 0,65 g cm⁻³. A pré-determinação da massa específica foi baseada na massa seca das partículas, no teor de sólidos do adesivo e da parafina empregada. Os parâmetros utilizados para a produção foram: força de prensagem de 3 MPa, teor de umidade do colchão de 12%, tempo de prensagem de 8 minutos e, tempo de fechamento da prensa de 40 segundos.

As chapas foram produzidas ao empregar cinco diferentes proporções de madeira e bambu, num total de 20 painéis aglomerados, quatro para cada tratamento (T1= 100% madeira; T2= 75% madeira + 25% bambu; T3= 50% madeira + 50% bambu; T4= 25% madeira + 75% bambu; T5= 100% bambu), com as dimensões de 50 x 50 x 0,95 cm.

2.3. Ensaios não-destrutivos

Os ensaios não-destrutivos foram realizados com equipamento portátil de ultrassom TICO, modelo PROCEQ, dotado de transdutores de pontos secos com frequência de aproximadamente 45 kHz, que medem diretamente o tempo de propagação das ondas, em microssegundos (μ s). A

determinação do tempo de propagação das ondas foi realizada por dois métodos de transmissão: direto e semi-direto.

Em cada painel foram demarcados, de acordo com o método de transmissão, seis pontos de avaliação do tempo de propagação das ondas ultra-sonoras, conforme se pode visualizar nas Figuras 1 e 2.

Realizaram-se, em cada ponto de avaliação, duas leituras do tempo de propagação da onda e, a partir da razão entre a média das leituras e o comprimento do trecho percorrido pela onda (50 cm para o método direto e 41 cm para o método semi-direto), calculou-se a velocidade de propagação da onda ultra-sônica, em metros por segundo.

O módulo de elasticidade dinâmico, de cada painel, foi obtido pelo produto dos valores médios da velocidade de propagação das ondas com a massa específica de cada painel.

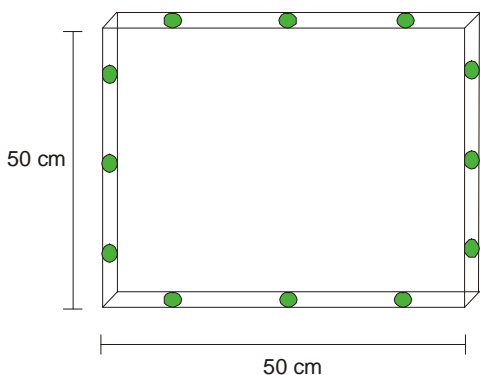


Figura 1: Esquema ilustrativo da avaliação do tempo de propagação de ondas em cada painel aglomerado pelo método direto

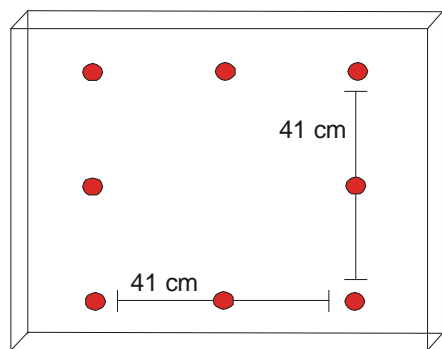


Figura 2: Esquema ilustrativo da avaliação do tempo de propagação de ondas em cada painel aglomerado pelo método semi-direto

2.4. Ensaios destrutivos

Para avaliação da acurácia do emprego do ultrassom e seus distintos métodos de propagação das ondas (direto e semi-direto) foram retiradas, de cada painel, seis amostras, com dimensões nominais de 0,95 x 7,5 x 29 cm (espessura, largura e comprimento), sendo estas submetidas a ensaios destrutivos de flexão estática em máquina universal de ensaio, de acordo com recomendações da norma ASTM D1037 [10].

2.5. Análise dos resultados

Os resultados foram interpretados, com auxílio de testes de médias (LSD Fisher, $p > 0,05$) e análise de regressão linear, em que a variável independente foi o módulo de elasticidade dinâmico obtido em ensaio de ultrassom (propagação direto e semi-direto) e a variável dependente foi o módulo de elasticidade a flexão estática.

3. Resultados e Discussão

O módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) obtido no ensaio com ultrassom pelo método direto de propagação das ondas foi superior ao módulo de elasticidade estático (E_{est}) verificado pelo ensaio destrutivo, resultado semelhante ao verificado por Morales [1] ao estudar painéis OSB. Por sua vez, o E_{din} obtido pelo método semi-direto de propagação das ondas apresentou-se inferior ao E_{est} (Tabela 1). Tal comportamento se deve ao posicionamento dos transdutores, o qual pode influenciar na velocidade de propagação da onda ultra-sonora e, conseqüentemente no valor inferido para o E_{din} [11].

Tabela 1: Valores médios dos módulos de elasticidade estático e dinâmicos (método direto e semi-direto) obtidos para cada painel aglomerado

| Painel – Proporção madeira/bambu | E_{est} (MPa) | E_{din} (MPa) Método Direto | E_{din}/E_{est} |
|--|------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 100/0 | 2472,46 ^{B a} | 3634,77 ^{A a} | 1,47 |
| 75/25 | 1862,18 ^{B b} | 3173,07 ^{A b} | 1,70 |
| 50/50 | 1662,30 ^{B c} | 2926,90 ^{A c} | 1,76 |
| 25/75 | 1528,81 ^{B c} | 2906,39 ^{A c} | 1,90 |
| 0/100 | 1285,14 ^{B d} | 2749,70 ^{A c} | 2,14 |

| Painel – Proporção madeira/bambu | E_{est} (MPa) | E_{din} (MPa) Método Semi- Direto | E_{din}/E_{est} |
|--|------------------------|---|-------------------|
| 100/0 | 2472,46 ^{A a} | 1112,92 ^{B a} | 0,45 |
| 75/25 | 1862,18 ^{A b} | 991,25 ^{B ab} | 0,53 |
| 50/50 | 1662,30 ^{A c} | 783,51 ^{B c} | 0,47 |
| 25/75 | 1528,81 ^{A c} | 889,05 ^{B bc} | 0,58 |
| 0/100 | 1285,14 ^{A d} | 832,47 ^{B bc} | 0,65 |

E_{est} = módulo de elasticidade estático; E_{din} = módulo de elasticidade dinâmico. Médias seguidas na horizontal, por uma mesma letra maiúscula ou na vertical, por uma mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente entre si (LSD Fisher, $p > 0,05$).

Na caracterização do comportamento mecânico da madeira sólida, comumente, são verificados valores de E_{din} superiores ao E_{est} , devido a sua natureza visco-elástica [7], para painéis a base de madeira fenômeno semelhante é verificado [8]. Castellanos [12] reporta um quociente de 1,25 a 1,28 entre E_{din} e E_{est} para painéis aglomerados de diferentes espécies madeireiras. No entanto, para os painéis aglomerados

madeira-bambu ensaiados pelo método direto de propagação das ondas esse quociente oscilou entre 1,47 e 2,14, enquanto que para o método semi-direto a relação foi de 0,45 a 0,65. De modo geral, esse quociente aumentou com o acréscimo da porcentagem de bambu. Além disso, pode-se observar que as médias de E , obtidas pelas duas metodologias (destrutiva e não-destrutiva), diferem estatisticamente entre si, ao nível de 95% de confiança.

Grundström [11], ao estudar a propagação de ondas ultrasonoras em painéis aglomerados com partículas de coníferas coladas com resina ureia-formaldeído e massa específica de $0,68 \text{ g cm}^{-3}$ encontrou valores de E_{din} de 3200 a 4000 MPa. Esse resultado descrito pelo autor é semelhante ao verificado na propagação das ondas pelo método direto, entretanto superior ao registrado no método semi-direto.

Apesar da boa adesão interfacial dos painéis com mistura de partículas, a adição das partículas de bambu ocasionou decréscimo no E_{est} e E_{din} (método direto e semi-direto) dos painéis, sendo o tratamento 1 (100% madeira) estatisticamente diferente dos demais, ao nível de 95% de confiança. Tal resultado é semelhante ao verificado por Calegari et al. [13] e Vital & Haselein [14] em ensaios estáticos. A possível explicação para os resultados obtidos está relacionado aos valores individuais de elasticidade. Segundo Ahmad [15] o valor de E_{est} de taliscas de *Bambusa vulgaris* é de cerca de

7000 MPa, valor inferior ao da madeira de *Eucalyptus grandis* que Gonzalez et al [16] citam de 16000 MPa. Lee et al. [17] recomendam que para otimização das propriedades mecânicas dos painéis aglomerados confeccionados com bambu deve-se proceder a orientação das partículas. Baseando-se na norma ANSI A208.1 [18], somente os painéis dos tratamentos 1 e 2 obtiveram valores de E_{est} acima do mínimo requerido de, aproximadamente, 1760 MPa.

Na Figura 3, verifica-se com a regressão linear que 57,85% da variação do E_{est} pode ser explicado pela variação do E_{din} obtido com a propagação das ondas pelo método direto. Tal resultado é semelhante ao obtido por Grundström [11] que registrou um coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{\text{aj.}}$) de 60,99%. Por sua vez, Pellerin & Ross [5] e Castellanos [12] ao aplicar ondas de tensão em painéis aglomerados verificaram correlações superiores a 90%. Apesar do $R^2_{\text{aj.}}$ ter sido inferior ao verificado em outros estudos, a avaliação de parâmetros estatísticos, como o valor de F (significativo ao nível de 99% de confiança), erro padrão de estimativa ($S_{y,x}$) e análise de resíduos da regressão permitem afirmar que o E_{din} obtido mediante propagação das ondas pelo método direto é um bom estimador para o E_{est} .

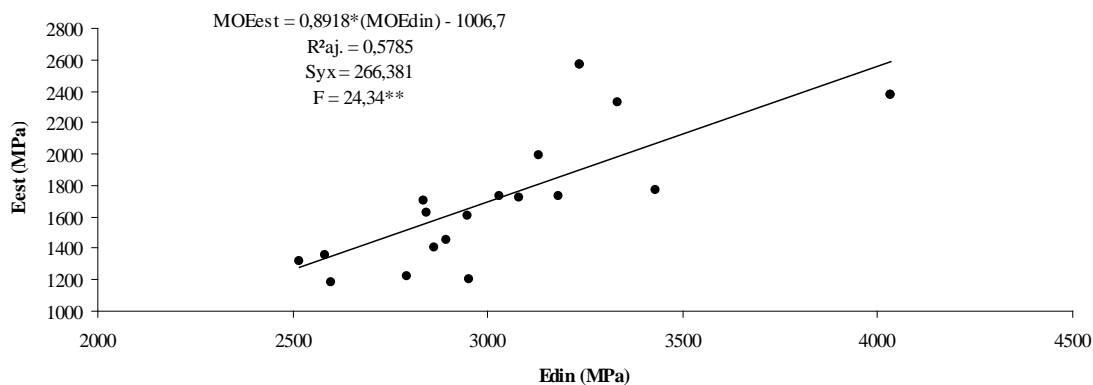


Figura 3: Estimativa do módulo de elasticidade estático em função do módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método direto

O E_{din} determinado pelo método de transmissão semi-direto da ondas ultra-sonoras, não apresentou-se como bom estimador do E_{est} (Figura 4). O modelo estatístico gerado não apresentou um bom ajuste, sendo não significativo, além disso, apresentou baixo valor de $R^2_{\text{aj.}}$ e alto valor de $S_{y,x}$. Portanto, da mesma forma que observado por Nzokou et al. [19] e Niemz & Poblete [20] o método de propagação de ondas ultra-sonoras pode não ser adequado para avaliações não-destrutivas de materiais compostos, visto que não

observaram correlação entre o E_{din} e E_{est} . Han et al. [21] justifica que a propagação da onda em materiais compostos pode ser afetada pela inexistência de “continuidade”, de modo a proporcionar a dissipação e redução da velocidade ultrasonora, e conseqüentemente afetar a precisão nas estimativas das constantes elásticas. No entanto, a explicação mais plausível para a baixa correlação entre o E_{din} e o E_{est} está relacionada ao método de propagação, no caso semi-direto, conforme citado por Gundström [11].

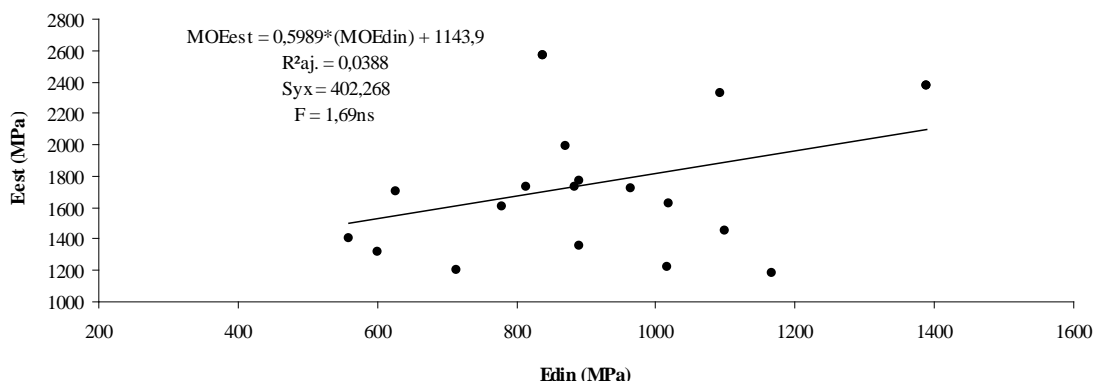


Figura 4: Estimativa do módulo de elasticidade estático em função do módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método semi-direto

4. Conclusões

O método ultra-sonoro, por meio da transmissão semi-direta, não obteve resultados satisfatórios para inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade dos painéis aglomerados madeira-bambu. Entretanto, não se deve descartar o uso do ultrassom, visto que o método de transmissão direta pode proporcionar melhores resultados, apesar dos valores absolutos dos módulos de elasticidade obtidos pelas duas metodologias (destrutiva e não-destrutiva) serem diferentes.

Referências

- [1] MORALES, E.A.M. *Técnicas de propagação de ondas na estimativa de propriedades mecânicas de painéis OSB*. São Carlos: USP, 2006. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, 2006.
- [2] MELO, R.R. *Propriedades físico-mecânicas e resistência a biodeterioradores de chapas aglomeradas constituídas por diferentes proporções de madeira e casca de arroz*. Santa Maria: UFSM, 2009. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2009.
- [3] MELO, R.R.; SANTINI, E.J.; HASELEIN, C.R.; STANGERLIN, D.M. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz. *Ciência Florestal*, v.19, n.4, p.449-460, 2009.
- [4] BUCUR, V. *Acoustics of wood*. 2ª ed. Basileia: Birkhäuser. 2006. 393p.
- [5] PELLERIN, R.F.; ROSS, R.J. *Nondestructive evaluation of wood*. Madison: Forest Products Laboratory, 2002. 210p.
- [6] CALEGARI, L. *Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira*. Santa Maria: UFSM, 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2006.
- [7] 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. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.3, n.2, p.145-150, 2008.
- [8] HU, Y. Nondestructive testing of mechanical parameters for wood-based materials. In: WORLD CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE, 17, 2008, Shanghai. *Anais...* Shanghai: Shanghai Forestry University, 2008. 8p.
- [9] MENDES, L.M.; MATOS, J.L.M.; IWAKIRI, S.; MORI, F.A.; TRUGUILHO, P.F. Uso de métodos de emissão acústica para determinação não destrutiva de propriedades de painéis OSB. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2, 2002, Curitiba. *Anais...* Curitiba: FUPEF, 2002. 10p.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D-1037. *Standard test methods for evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials*. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1998.
- [11] GRUNDSTRÖM, F. *Non-destructive testing of particleboard with ultra sound and eigen frequency methods*. Skellefteå: LTU, 1998. 58f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Luleå Tekniska Universitet, 1998.

- [12] CASTELLANOS, J.R.S. Caracterización mecánica de madera reconstituída: módulo de elasticidad de tableros de partículas de madera evaluado con métodos no destructivos. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, v.5, n.1, p.20-43, 2003.
- [13] CALEGARI, L.; HASELEIN, C.R.; SCARAVELLI, T.L.; SANTINI, E.J.; STANGERLIN, D.M.; GATTO, D.A.; TREVISAN, R. Desempenho físico-mecânico de painéis fabricados com bambu (*Bambusa vulgaris* Schr.) em combinação com madeira. *Cerne*, v.13, n.1, p.57-63, 2007.
- [14] VITAL, B.R.; HASELEIN, C.R. Qualidade de chapas de aglomerado produzidas com embaúba (*Cecropia* sp.) e bambu (*Bambusa vulgaris*). *Revista Árvore*, v.12, n.2, p.134-145, 1988.
- [15] AHMAD, M. Analysis of calcutta bamboo for structural composite materials. Virginia: VT, 2000. 210f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Madeira e Produtos Florestais) - Virginia Polytechnic Institute and State, 2000.
- [16] GONCALEZ, J.C.; BREDÁ, L.C.S.; BARROS, J.F.M.; MACEDO, D.G.; JANIN, G.; COSTA, A.F.; VALLE, A.T. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. *Ciência Florestal*, v.16, n.3, p.329-341, 2006.
- [17] LEE, A.W.C.; BAI, X.; PERALTA, P.N. Physical and mechanical properties of strandboard made from Moso bamboo. *Forest Products Journal*, v.46, n.11/12, p.84-88, 1996.
- [18] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – ANSI-A-208.1-87. *Mat-formed wood particleboard*. New York, 1987.
- [19] NZOKOU, P. et al. Relationship between non-destructive and static modulus of elasticity of commercial wood plastic composites. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v.64, n.1, p.90-93, 2006.
- [20] NIEMZ, P.; POBLETE, H. Untersuchungen zur anwendung der schallgeschwindigkeitsmessung für die ermittlung der elastomechanischen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v.54, n.3, p.201-204, 1996.
- [21] HAN, G.; WU, Q.; WANG, X. Stress-wave velocity of wood-based panels: effect of moisture, product type and material direction. *Forest Products Journal*, v.56, n.1, p.28-33, 2006.