

**INFLUÊNCIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL NA VELOCIDADE  
ULTRA-SÔNICA NA MADEIRA DE *Eucalyptus citriodora***

Fabiana Goia R de Oliveira<sup>1</sup>, Karla Peitl Miller<sup>2</sup>, Marcela Candian<sup>2</sup>, Almir Sales<sup>2</sup>

(recebido: 22 de dezembro de 2003; aceito: 10 de maio de 2005)

**RESUMO:** O presente artigo apresenta um estudo sobre a variação da velocidade ultra-sônica longitudinal em função da variação da seção transversal de peças de *Eucalyptus citriodora*. Utilizou-se o equipamento de ultra-som V-Meter com frequências de 54 kHz e 150 kHz. Foram feitas medições do tempo de propagação das ondas ultra-sônicas com a seção transversal variando de 12 cm x 12 cm a 12 cm x 1 cm e mantendo-se o comprimento constante de 50 cm. Os resultados demonstram a tendência de diminuição da velocidade longitudinal com o aumento da relação entre base e altura da peça. A análise dos resultados evidencia que a geometria adequada do corpo-de-prova é essencial para a determinação correta da velocidade ultra-sônica em madeiras.

Palavras-chave: Madeira, ultra-som, geometria, seção transversal.

**INFLUENCE OF THE CROSS-SECTION ON  
ULTRASONIC VELOCITY IN *Eucalyptus citriodora***

**ABSTRACT:** This paper reports the variation of ultrasonic velocity in the cross-section of *Eucalyptus citriodora*. Ultrasonic measurements were taken with an experimental V-Meter 54 kHz and 150 kHz apparatus. Tests were carried out with initial cross-section of 12 cm x 12 cm, varying until 12 cm x 1 cm and constant length (50 cm). The results showed that longitudinal ultrasonic velocity decreased as the ratio between base and height (b/h) decreased. The geometrical shape of the specimen influences the ultrasonic measurements.

Key words: wood, ultrasonic velocity, geometry, cross-section.

**1 INTRODUÇÃO**

Os avanços tecnológicos têm permitido melhorar o aproveitamento das propriedades da madeira e de seus derivados, criando novos produtos e ampliando sua aplicação, o que possibilitará que a madeira seja um material ainda mais versátil e empregado, já que seu aproveitamento não danifica o meio ambiente.

Dentre esses avanços, pode-se destacar a técnica de ultra-som, como uma importante ferramenta com potencial para melhorar a classificação de peças estruturais de madeira e desta forma permitir um incremento na qualidade e na competitividade deste material. Mas, para isso se faz necessária a compreensão do fenômeno de propagação da onda ultra-sônica no material, mediante estabelecimento de relações entre as diversas

variáveis envolvidas (OLIVEIRA, 2001).

O ultra-som é caracterizado por frequências acima de 20000 Hz. Entre as vantagens de sua utilização, vale destacar o baixo custo de aquisição do equipamento se comparado ao das máquinas de classificação automática, e o treinamento relativamente simples da mão-de-obra para utilização do equipamento, possibilitando que o método seja facilmente difundido em revendedores e indústrias de madeiras e derivados (OLIVEIRA et al., 2002).

O desenvolvimento e crescimento da indústria de LVL (laminated veneer lumber) nos Estados Unidos têm sido resultado direto da aplicação do método não-destrutivo por meio de ultra-som, através da determinação das propriedades das lâminas de madeira. Utilizando-se relações empíricas, cada lâmina é classificada em uma categoria de resistência baseada na velocidade da onda sonora.

<sup>1</sup> LaMEM, Escola de Engenharia de São Carlos, USP – Av. Trabalhador São-carlense, 400 – 13566-590 – São Carlos, SP – fabiana@sc.usp.br

<sup>2</sup> DECiv, Universidade Federal de São Carlos – Rodovia Washington Luis Km 235 – 13565-905 – São Carlos, SP – almir@power.ufscar.br

A técnica de emissão ultra-sônica pode ser empregada de diversas maneiras, desde florestas, (WANG et al., 2001, 2004), até a avaliação de estruturas de madeira em serviço, (ROSS & PELLERIN 1994; SANDOZ & BENOIT, 2002), inclusive na classificação e caracterização de peças de madeiras e materiais derivados durante o processo para obtenção dos mesmos.

Os ensaios não-destrutivos são importantes ferramentas na inferência e na caracterização físico-mecânica da madeira. Dentre as diversas técnicas empregadas, a técnica do ultra-som se destaca, pelo maior controle das fontes emissoras de pulsos, sobretudo no que diz respeito às frequências das emissões. Além disso, pode ser considerada a mais promissora, na medida em que sua extensão à indústria se daria de uma forma mais imediata e direta, conforme mostram os exemplos internacionais (BALLARIN & GONÇALVES, 2001).

A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ultra-som é baseada na relação entre a velocidade ultra-sônica, o módulo de elasticidade e a densidade.

Os aparelhos de ultra-som baseiam-se no geral, na relação entre a velocidade de propagação de uma onda ultra-sônica na madeira e as propriedades mecânicas da peça. O equipamento pode ser usado para classificar lotes de madeira em diferentes categorias de rigidez e para estimar a resistência mecânica de uma peça individual.

A propagação das ondas ultra-sônicas na madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular. A densidade da parede celular é razoavelmente constante, mas há variação do módulo de elasticidade devido à variações na estrutura da parede celular, e desse modo, pode-se esperar que os valores para a velocidade de propagação resultem em intervalos de acordo com as características anatômicas e presença de defeitos nas peças investigadas.

A aplicação e medição de ondas ultra-sônicas consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A onda ultra-sônica é introduzida no material por um dos transdutores e captada pelo outro transdutor, sendo a contagem de tempo realizada pelo próprio instrumento de ultra-som.

O transdutor incorpora um elemento piezo-

elétrico que converte sinais elétricos em vibração mecânica e segundo Bucur (1995), seu desempenho está relacionado com parâmetros estruturais como área de superfície de radiação, amortecimento mecânico, características dos materiais piezo-elétricos e a conexão dos componentes elétricos e acústicos do sistema. O transdutor deve apresentar boa sensibilidade e desempenho constante sob diferentes condições de uso.

Pesquisas nacionais e internacionais demonstram a viabilidade do método de ultra-som, por meio de correlações entre os módulos de elasticidade obtidos em ensaios destrutivos (compressão paralela às fibras e flexão estática) e em ensaios dinâmicos (ultra-som). Os resultados apresentam correlações significativas, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre 0,57 e 0,89 (BARADIT et al., 1998; BARTHOLOMEU, 2001; HALABE et al., 1996; MACHADO, 2000; MCDONALD et al., 1990; NOGUEIRA, 2003; OLIVEIRA, 2001; ROMERO, 1996; ROSS & PELLERIN, 1991, 1994; ROSS et al., 2000).

Segundo Bucur & Böhnke (1994), os fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas na madeira são: propriedades físicas do substrato, características geométricas da peça em uso, condições do meio (temperatura e umidade) e o procedimento utilizado para a tomada das medidas.

A geometria do corpo-de-prova pode ter um efeito decisivo na determinação da velocidade ultra-sônica e também no modo de propagação da onda sonora. Conforme a onda sonora interage com os contornos do corpo-de-prova, forças de tração, compressão ou cisalhamento distorcem e interferem na onda, dificultando a precisão das medições do tempo de propagação (BROWN, 1997).

Segundo Bucur (2003), as condições para a preparação satisfatória das amostras dependem da magnitude da atenuação da onda ultra-sônica na madeira. Um limite mínimo para o tamanho do corpo-de-prova é necessário, pois a onda ultra-sônica deve possuir a característica de onda plana em um meio infinito.

Bucur (1995) realizou ensaios para verificar a variação da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial em função da variação da seção transversal em amostras prismáticas que apresentavam dimensões iniciais de 12 cm x 10 cm x 30 cm e a relação entre base e altura (b/h) variou de

1 a 14. Os resultados demonstraram que a velocidade na direção longitudinal foi a mais afetada pela variação na seção transversal se comparada com as direções radial e tangencial. O valor máximo da velocidade longitudinal foi verificado com a relação  $b/h$  entre 1 e 2 e o valor mínimo da velocidade ocorreu com  $b/h$  entre 13 e 14.

É neste contexto que, compreendendo-se as relações entre os fatores que afetam as condições e os parâmetros físicos da técnica de ultra-som, pode-se melhorar seu potencial de aplicação principalmente para classificação de peças estruturais e para a estimativa do módulo de elasticidade longitudinal.

Objetivou-se com o presente trabalho avaliar a influência das dimensões do corpo-de-prova de *Eucalyptus citriodora* na velocidade ultra-sônica longitudinal, por meio da variação da seção transversal.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas doze peças de *Eucalyptus citriodora* com teor de umidade em torno de 12%. As peças apresentavam comprimento de 50 cm e seção transversal inicial 12 cm x 12 cm, ou seja, relação  $b/h = 1$ . A seção foi continuamente diminuída até chegar-se à

seção transversal 12 cm x 1 cm ( $b/h = 12$ ), conforme ilustrado na Figura 1.

Para cada variação da seção transversal foram feitas medições do tempo de propagação da onda ultra-sônica longitudinal. O equipamento utilizado foi o V-Meter com frequências de 54 kHz (Figura 2) e 150 kHz. Essas frequências foram definidas em função dos transdutores que acompanham o equipamento. Esses transdutores possuem frequências fixas, as quais são compatíveis com as utilizadas na literatura para ensaios em peças de madeira (BUCUR, 2003).

Com os valores dos tempos de propagação e tendo-se a distância percorrida, calculou-se as velocidades de propagação para cada frequência nos corpos-de-prova.

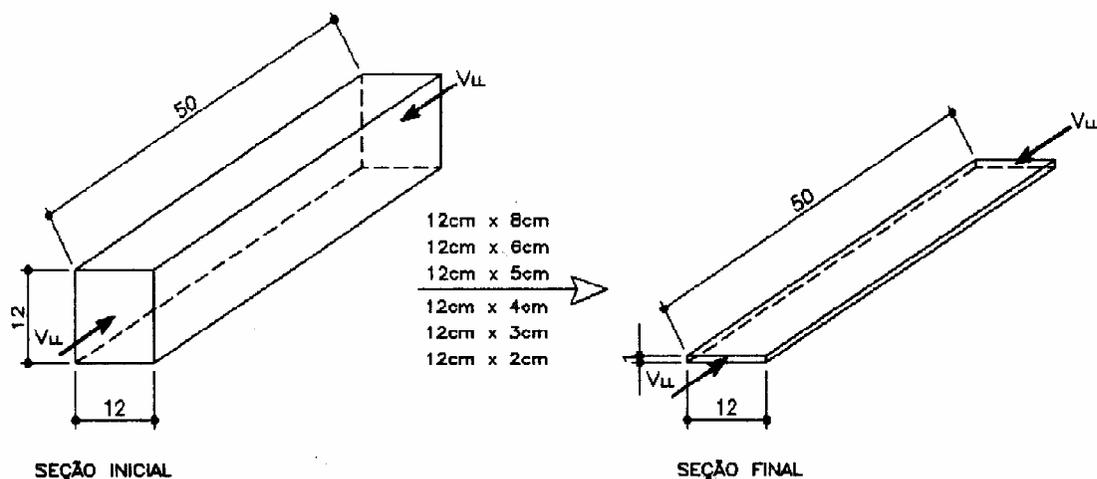
O comprimento de onda ( $\lambda$ ) foi calculado em função da frequência do transdutor e da velocidade média dos corpos-de-prova com a seção transversal inicial (12 cm x 12 cm):

$$\lambda = V / f$$

Em que:

V = velocidade longitudinal;

f = frequência do transdutor.



**Figura 1** – Seqüência do procedimento experimental.

*Figure 1* – Sequence of the experimental procedure.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 estão apresentadas as médias das velocidades longitudinais para os doze corpos-de-prova nas frequências de 54 kHz e 150 kHz.

A média das velocidades obtidas para ambas as frequências (Tabela 2) estão bastante próximas entre si e os valores dos coeficientes de variação também se encontram na faixa de valores usualmente obtidos na literatura (BARTHOLOMEU, 2001; BUCUR, 1995, 2003; MACHADO, 2000;



**Figura 2** – Equipamento de ultra-som V-Meter.

*Figure 2* – V-Meter equipment.

OLIVEIRA, 2001; ROSS et al., 2000).

Os resultados estão de acordo com a literaturapesquisada: Bartholomeu et al. (2001), Bucur (1995) e Puccini et al. (2001), demonstram que a velocidade de propagação longitudinal diminui com o aumento da relação b/h em ambas as frequências utilizadas, conforme ilustrado na Figura 3.

A análise de regressão foi realizada para se obter um modelo estatístico que representasse o comportamento da variável independente em relação à variável resposta, ou seja, a diminuição da velocidade longitudinal em função da variação da seção transversal das amostras. O modelo logarítmico foi o que propiciou maiores valores para o coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,98$ ) para ambas as frequências.

Verificou-se que os resíduos da regressão apresentaram uma distribuição aleatória em torno de zero, indicando que o modelo logarítmico foi adequado para a análise dos dados. Da mesma forma, a distribuição normal de frequência para os resíduos foi constatada para os dados analisados. A retirada de pontos com resíduos elevados conduziu a resultados semelhantes para a constatação da normalidade dos resíduos, e sem a ocorrência de aumento significativo nos valores de  $R^2$  e F (Snedecor), indicando a adequação dos modelos às variáveis estudadas.

Para a espécie estudada, a variação da velocidade longitudinal mostrou-se bastante sensível

**Tabela 1** – Médias das velocidades para os doze corpos-de-prova.

*Table 1* – Average velocity for twelve samples.

Seção transversal (cm)	b/h	Velocidade longitudinal (m/s)	
		54 kHz	150 kHz
12 x 12	1,0	4507	4546
12 x 8	1,5	4481	4527
12 x 6	2,0	4477	4513
12 x 5	2,4	4449	4486
12 x 4	3,0	4432	4473
12 x 3	4,0	4416	4455
12 x 2	6,0	4397	4430
12 x 1	12,0	4328	4356

à variação da seção transversal, a redução foi de 4,1% e 4,4%, respectivamente para as frequências de 54 kHz e 150 kHz.

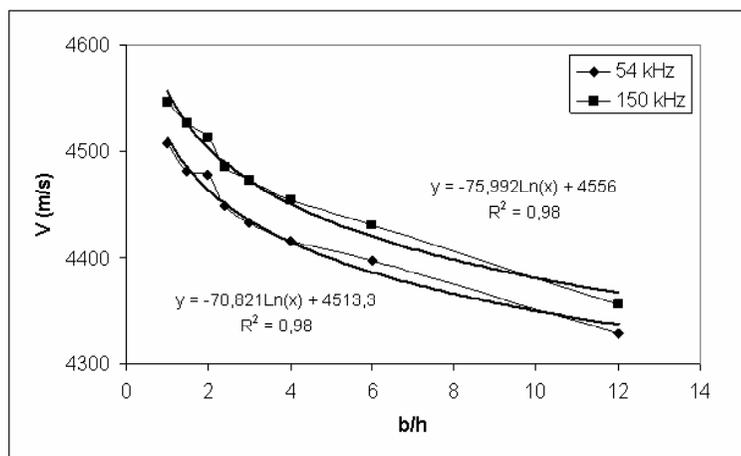
Uma possível explicação para a diminuição observada na velocidade é o “efeito fronteira” que ocorre quando o comprimento de onda ( $\lambda$ ) se aproxima de uma das dimensões da peça. Nesse estudo os comprimentos de onda utilizados foram 8,3 cm e 3,0 cm, respectivamente, para as frequências de 54 kHz e 150 kHz.

No início do ensaio, quando as dimensões da peça eram superiores ao comprimento de onda, havia apenas a propagação da onda longitudinal de volume. Durante o ensaio, quando uma das dimensões da peça se aproximou do comprimento de onda, toda a espessura da peça passou a ser penetrada pelo feixe de ondas formando uma onda Lamb ou onda placa, (mistura de ondas longitudinais e transversais), que apresenta menor velocidade de propagação.

**Tabela 2** – Médias, coeficientes de variação da velocidade e comprimentos de ondas.

*Table 2* – Average, coefficients of variation of wave velocity and wavelength.

	54 kHz	150 kHz
Média (m/s)	4436	4473
CV (%)	4,1	3,1
$\lambda$ - compr. de onda calculado (cm)	8,3	3,0



**Figura 3** – Variação da velocidade em função da relação b/h.

*Figure 3* – Variation of velocity related to ratio b/h.

#### 4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que para *Eucalyptus citriodora*, a velocidade ultra-sônica longitudinal mostrou-se sensível à variação das dimensões da seção transversal do corpo-de-prova.

Os resultados demonstraram a tendência de diminuição da velocidade em função da redução das dimensões da seção transversal entre as razões b/h de um até 12.

É necessário adequar a frequência do equipamento com as dimensões das peças, ou seja, a geometria do corpo-de-prova é essencial para a determinação correta da velocidade ultra-sônica em madeiras.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, ao LaMEM (Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira) e ao LACTEC (Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento).

#### 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLARIN, A. W.; GONÇALVES, R. Ensaio não-destrutivos aplicados aos produtos à base de madeira: a situação brasileira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, 20., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2001. CD-ROM.

BARADIT, E.; ROZAS, C.; VARGAS, G. Aplicación de ultrasonido en la evaluación de madera de pinus radiata. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, [S.l.], v. 1, p. 27-33, 1998.

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som**. 2001. 73 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R.; BUCUR, V. Dispersion of ultrasonic waves in eucalyptus lumber as a function of the geometry of boards. **Scientia Forestalis**, [S.l.], v. 1, n. 63, p. 235-240, 2001.

BROWN, A. E. **Rationale and summary of methods of determining ultrasonic properties of materials at Lawrence National Laboratory**. [S.l.: s.n.], 1997.

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. New York: CRC, 1995.

BUCUR, V. **Nondestructive characterization and imaging of wood**. New York: Springer-Verlag, 2003.

BUCUR, V.; BÖHNKE, I. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. **Ultrasonics**, [S.l.], v. 32, n. 5, p. 385-390, 1994.

HALABE, U. B.; GANGARAO, H. V. S.; PETRO, S. H.; HOTA, V. R. Assessment of defects and mechanical properties of wood members using ultrasonic frequency analysis. **Materials Evaluation**, [S.l.], p. 314-322, Feb. 2003.

MACHADO, J. M. R. S. **Avaliação da variação das propriedades mecânicas de pinho bravo (*Pinus pinaster Ait.*) por meio de ultra-sons**. 2000. 265 f. Tese (Doutorado) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2000.

MCDONALD, K. A.; FALK, R. H.; PATTON-MALLORY, M. **Nondestructive testing of wood products and structures: state of the art and research needs**. Madison: U.S. Dep. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1990.

NOGUEIRA, M. **Determinação de módulos de elasticidade à compressão de madeira de *Pinus taeda L.* com o uso de ultra-som**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2003.

OLIVEIRA, F. G. R. **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamento de ultra-som**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

OLIVEIRA, F. G. R.; CAMPOS, J. A. O.; SALES, A. Ultrasonic measurements in brazilian hardwood. **Materials Research**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 51-55, 2002.

PUCCINI, C. T.; GONÇALVES, R.; BALLARIN, A. W. Dispersão de ondas de ultra-som em peças de madeira serrada de Pinho do Paraná em função do comprimento. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO-

DESTRUTIVOS, 20., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2001. CD-ROM.

ROMERO, I. J. B. **Evaluación preliminar de la anisotropía y determinación del módulo de elasticidad de la madera de pinus radiata D. Don. por ultrasonido.** 1996. 60 f. Dissertação (Mestrado) – Universidad del Bio Bio, Concepción, 1996.

ROSS, R. J.;PELLERIN, R. F. NDE of green material with stress waves: preliminary results using dimension lumber. **Forest Products Journal**, Amsterdam, v. 41, n. 6, p. 57-59, 1991.

ROSS, R. J.;PELLERIN, R. F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures: a review.** Madison: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994. 40 p.

ROSS, R. J.; WANG, X.; MATTSON, J. A.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; GESKE, E. A.; WEHR, M. A. Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small

diameter logs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 12., 2000, Hungary. **Proceedings...** Hungary: Sopron, 2000. p. 155-163.

SANDOZ, J. L.;BENOIT, Y. AUS timber grading: industrial applications. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 13., 2002, Berkeley. **Proceedings...** Berkeley: University of California, 2002. p. 137-142.

WANG, X.;DIVOS, F.;PILON, C.;BRASHAW, B. K.;ROSS, R. J.;PELLERIN, R. F. **Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools.** Madison: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2004.

WANG, X.;ROSS, R. J.;MCCLELLAN, M.;BARBOUR, R. J.;ERICKSON, J. R.;FORSMAN, J. W.;MCGINNIS, G. D. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. **Wood and Fiber Science**, [S.l.], v. 33, n. 4, p. 522-533, 2001.