

MONITORAMENTO DO TEOR DE UMIDADE DE MADEIRAS DE *Pinus elliottii* Engelm. E *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, SOB DIFERENTES TEMPERATURAS DE SECAGEM, ATRAVÉS DO ULTRA-SOM¹

MONITORING MOISTURE CONTENT IN *Pinus elliottii* Engelm. AND *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden WOODS, UNDER DIFFERENT DRYING TEMPERATURES, THROUGH THE ULTRASOUND

Leandro Calegari² Diego Martins Stangerlin³ Elio José Santini⁴ Clovis Roberto Haselein⁴
Solon Jonas Longhi⁵ Paulo Inácio Obregon do Carmo⁶ Luiz Carlos Pinto da Silva Filho⁷
Darci Alberto Gatto⁸

RESUMO

Com o objetivo de avaliar a viabilidade de uso da técnica ultra-sônica para estimar o teor de umidade da madeira durante o processo de secagem, amostras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, com dimensões nominais 3,5 x 10 x 25 cm de espessura, largura e comprimento, respectivamente, foram submetidas às temperaturas de 20, 40 e 70°C. Um equipamento ultra-sônico PUNDIT com transdutores de faces planas de 50 kHz foi utilizado para medir a velocidade de propagação do som na direção longitudinal da madeira. Os resultados indicaram aumento da velocidade ultra-sônica estimada em função da redução do teor de umidade. Essa relação mostrou-se válida no intervalo desde verde até o final da secagem, sendo que os melhores coeficientes de determinação ocorreram na madeira de eucalipto ($R^2 = 81\%$). Embora não tenha sido observada uma influência da espécie na velocidade ultra-sônica, esta foi influenciada pela massa específica da madeira e pela temperatura de secagem. O efeito da massa específica foi diretamente proporcional para a madeira de pinus e inversamente proporcional para a madeira de eucalipto. A velocidade ultra-sônica apresentou tendência de redução com o aumento da temperatura de secagem para ambas as espécies, e os resultados obtidos sugerem que o método ultra-sônico apresenta bom potencial para o controle do processo de secagem.

Palavras-chave: secagem da madeira; ondas ultra-sônicas; controle de secagem; temperatura de secagem.

ABSTRACT

With the purpose of evaluating the viability of use of ultrasonic technique to estimate the wood moisture content during the drying process, samples of *Pinus elliottii* Engelm. and *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden with dimensions of 3.5 cm thick, 10 cm width and 25 cm long were submitted to drying temperatures of 20, 40 and 70°C. A PUNDIT ultrasonic equipment with plane face transducers by 50 KHz was used to measure sound velocity in the longitudinal direction of the wood. Results indicated increase of estimated ultrasonic speed with reduction of moisture content. This relationship showed to be valid for the wood from green to the end of the drying process, and the best determination coefficients were found in the eucalypt wood ($R^2 = 81\%$). Although no influence of the species in the ultrasonic speed has been observed, this one was influenced by the wood specific gravity and by the drying temperature. The effect of the

1. Parte da Dissertação do primeiro autor apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria (RS).
2. Engenheiro Florestal, MSc., Doutorando em Ciência Florestal pela Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Agrárias, Avenida P.H. Rolfs s/n, Campus, CEP 36.570-000, Viçosa (MG). leandrocalegari@yahoo.com.br
3. Engenheiro Florestal, Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, CEP 97.105-900, Santa Maria (RS). Diego_stangerlin@yahoo.com.br
4. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, CEP 97.105-900, Santa Maria (RS). santinie@ccr.ufsm.br
5. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, CEP 97.105-900, Santa Maria (RS). longhi.solon@gmail.com
6. Engenheiro Civil, MSc., Laboratório de Materiais e Construção Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, CEP 97.105-900, Santa Maria (RS).
7. Engenheiro Civil, Dr., Professor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar, Bairro Centro, CEP 90.035-190, Porto Alegre (RS).
8. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Federal de Pelotas, Caixa Postal 354, CEP 96.010-900, Pelotas (RS). darcigatto@yahoo.com

Recebido para publicação em 28/03/2006 e aceito em 14/11/2007.

specific mass was directly proportional for the pinus wood. Opposite effect was observed in eucalypt wood. The ultrasonic speed tended to decrease as drying temperature increased for both species. Results suggest that this method presents good potential for the control of the drying process.

Keywords: wood drying; ultrasonic waves; drying control; drying temperature.

INTRODUÇÃO

Durante o processo de secagem, o teor de umidade da madeira deve ser continuamente monitorado, uma vez que é comumente utilizado para a execução de programas de secagens e para a determinação do final do processo, refletindo na qualidade do produto final e no consumo de energia.

Alternativas tecnológicas têm sido estudadas para monitorar o teor de umidade da madeira durante seu processo de secagem, visto que são métodos mais modernos, práticos e versáteis que os convencionalmente empregados (pesagem de amostras e medidores elétricos). Dentre estas alternativas, podem-se citar o uso da variação da temperatura através da pilha de madeira, temperatura da madeira, contração da carga dentro da estufa, estímulo infravermelho, coeficiente temperatura da madeira/temperatura do bulbo úmido (SANTINI, 1996) e os métodos baseados em emissões acústicas, com destaque para o emprego das ondas ultra-sônicas (GONÇALVES e COSTA, 2002).

Segundo Carrasco e Azevedo Júnior (2003), alguns fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas na madeira são: propriedades anatômicas (dimensões das fibras e frequência de raios), físicas (massa específica básica e aparente), morfológicas (tipos de lenhos e ângulo de grã), presença de defeitos (nós e rachaduras), geometria das amostras, condições do meio (temperatura e umidade relativa) e procedimento utilizado para tomada das medidas (frequência e tipo de transdutor).

Uma vez que o teor de umidade da madeira é um dos fatores de influência na velocidade ultra-sônica, pesquisadores como Simpson (1998), Gonçalves e Costa (2002), Brashaw *et al.* (2004) e Dyk e Rice (2005) correlacionaram este fator ao teor de umidade, explorando este ponto para o monitoramento da madeira durante o processo de secagem.

A velocidade das ondas ultra-sônicas transitando pela madeira está relacionada à raiz quadrada do módulo de elasticidade (MOE) sobre a massa específica. Portanto, diretamente relacionada ao MOE e inversamente relacionada à massa específica. Uma vez que essas propriedades são sensivelmente afetadas pela umidade, alterações dessa variável influenciam significativamente a propagação das ondas (CARRASCO e AZEVEDO JÚNIOR, 2003).

A velocidade ultra-sônica diminui à medida que o teor de umidade da madeira aumenta. Simpson (1998), Gonçalves e Costa (2002), Oliveira *et al.* (2005) e Costa (2004) observaram velocidade de propagação das ondas variando nos trechos que correspondem ao teor de umidade da madeira verde até o Ponto de Saturação das Fibras (PSF) e, deste ponto, até a madeira completamente seca. Essa variação de velocidade apresentou-se mais significativa para teores de umidades inferiores ao PSF, tal como ocorre com as propriedades elásticas da madeira.

Dyk e Rice (2005) analisaram madeira de *Picea* sp. sob distintos níveis de umidade e submetidas a diferentes temperaturas (24; 10; 0 e -6,8°C). Observaram que a velocidade ultra-sônica diminuiu linearmente com o aumento da temperatura. Os efeitos de perda de umidade e do congelamento sobre a velocidade foram atribuídos ao aumento da rigidez. Da mesma forma, Grundström (1998) também observou declínio linear da velocidade ultra-sônica com o aumento da temperatura em chapas aglomeradas a temperaturas variando na faixa de 20 a 115°C. Este mesmo comportamento foi observado por Green *et al.* (1999) e Bekhta *et al.* (2000), quando do aumento da umidade relativa do ar e da temperatura de diversos compósitos de madeira.

Bucur *et al.* (2002) e Oliveira *et al.* (2005) descreveram quanto à influência da espécie sobre a propagação das ondas. Segundo esses autores, na direção longitudinal, o aumento do comprimento das fibras favorece a propagação das ondas. A contínua e uniforme estrutura das coníferas apresenta baixa dissipação de energia, favorecendo, portanto, o aumento da velocidade das ondas quando comparada às folhosas. No entanto, Costa (2004) observou velocidades semelhantes para *Pinus elliottii* Engelm. e *Corymbia citriodora* (Hook) K.D. Hill & L.S. Johnson.

No presente trabalho, avaliou-se o monitoramento do teor de umidade da madeira de *Pinus elliottii*

Engelm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, submetidas a diferentes temperaturas de secagem (20; 40 e 70°C), por meio do método ultra-sônico.

MATERIAIS E MÉTODOS

Madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, obtidas de árvores com idades aproximadas de 30 e 12 anos, respectivamente, foram utilizadas neste estudo. Três árvores de cada espécie, selecionadas ao acaso dentre as que apresentavam diâmetro à altura do peito (DAP) mínimo de 40 cm, retidão de fuste e melhores condições fitossanitárias foram abatidas, seccionando-se a primeira tora com o comprimento de 2,5 m.

De cada tora obtida das árvores, retiraram-se duas pranchas centrais, paralelamente à medula, localizadas imediatamente ao lado desta, todas com 3,5 cm de espessura e 2,50 m de comprimento. Posteriormente, de cada prancha, retiraram-se duas tábuas com 10 cm de largura, uma à direita e outra à esquerda da medula. Nas pranchas de pinus, retiraram-se tábuas a 5 cm da medula, para ambos os lados. Já nas pranchas de eucalipto, devido às rachaduras que ocorreram na região da medula, retiraram-se tábuas a 5 cm da casca.

As tábuas foram então seccionadas, em seu sentido transversal, obtendo-se amostras de secagem de 25 cm de comprimento. Dos extremos das amostras de secagem foram retiradas amostras de controle de 5 cm de comprimento, que foram utilizadas apenas para a obtenção do teor de umidade inicial das tábuas. Portanto, as amostras de secagem apresentaram dimensões nominais de 25 cm de comprimento, 10 cm de largura e 3,5 cm de espessura.

O comprimento das amostras de secagem foi definido em função da capacidade do aparelho emissor de ultra-som. Uma distância muito grande entre os transdutores (sensores responsáveis pela emissão/recepção das ondas) tende a reduzir a precisão dos dados, devido ao enfraquecimento demasiado da onda sonora. Testes preliminares indicaram ser viável a utilização dessa distância (25 cm). A espessura foi definida em virtude da secção dos transdutores, que apresentavam 25 mm de diâmetro. Conforme Puccini (2002), se parte do transdutor ficar fora da seção transversal da peça, ocorre formação de ondas, interferindo na leitura da velocidade de propagação dentro do material.

Após confeccionadas, as amostras de secagem e as amostras de controle foram imediatamente pesadas em uma balança eletrônica de precisão, para a obtenção do peso verde inicial. As amostras de controle foram imediatamente secas a 102°C para a obtenção do peso seco e posterior determinação do teor de umidade base seca.

Foram utilizados um total de 151 e 164 amostras de secagem de pinus e eucalipto, respectivamente. Essa quantidade total, para cada espécie, foi dividida aleatoriamente e submetida a três temperaturas de secagem: 20, 40 e 70°C. Portanto, os tratamentos basearam-se na combinação das duas espécies e três temperaturas de secagem, constituindo um delineamento fatorial (Tabela 1).

TABELA 1: Tratamentos avaliados no experimento.

TABLE 1: Appraised treatments in the experiment.

Tratamento	Espécie	Temperatura de secagem (°C)	Número de Repetições
1	<i>Pinus elliottii</i>	20	50
2	<i>Pinus elliottii</i>	40	50
3	<i>Pinus elliottii</i>	70	51
4	<i>Eucalyptus grandis</i>	20	55
5	<i>Eucalyptus grandis</i>	40	55
6	<i>Eucalyptus grandis</i>	70	54

A secagem a 20°C foi efetuada em uma câmara climatizada, com umidade relativa constante de 65%. Para a secagem a 40 e 70°C, utilizou-se uma estufa com circulação forçada de ar. Durante o processo, as amostras de secagem foram individualmente retiradas das estufas para a determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica, sendo imediatamente repostas. Neste mesmo instante, foi também realizada a pesagem para a determinação do seu teor de umidade no momento exato de cada medição.

Utilizou-se um equipamento PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Testing*), o qual mede diretamente o tempo de propagação da onda, em microssegundos (μs), utilizando-se transdutores de faces planas, com frequência aproximada de 50 kHz.

O tempo de propagação das ondas de ultra-som foi determinado exatamente no centro das amostras, considerando seu plano longitudinal, empregando-se a transmissão direta entre os transdutores (transdutores perfeitamente alinhados). Foi utilizada vaselina como acoplante, a fim de evitar a presença de ar entre a amostra e o transdutor.

A velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas, em m/s, foi então calculada pela razão entre o comprimento do trecho percorrido (comprimento real da amostra) e do tempo de propagação.

Esses procedimentos de medições simultâneos do tempo de propagação da onda ultra-sônica e pesagens foram realizados sucessivamente, desde as amostras completamente úmidas até atingirem o teor de umidade médio de 12%.

Após o término do processo de secagem, as amostras de secagem foram colocadas em câmara climatizada (temperatura = 20°C e umidade relativa = 65%) até atingirem o teor de umidade de equilíbrio, determinando-se então suas dimensões e peso. Posteriormente, as amostras de secagem foram colocadas em estufa, sob temperatura de 102°C, para a obtenção do peso seco (0% de umidade). Calculou-se então o teor de umidade real correspondente a cada momento exato da determinação da velocidade ultra-sônica, assim como sua massa específica básica ao teor de umidade de equilíbrio (doravante denominada massa específica – ME), correspondente à razão entre o peso seco da amostra e seu volume ao teor de umidade de equilíbrio.

Para a análise dos dados, foi realizada inicialmente uma análise de variância para caracterizar as amostras de secagem quanto às suas dimensões, teor de umidade de equilíbrio (TU_{eq.}) e massa específica. Posteriormente, os resultados experimentais da velocidade ultra-sônica (V_{us}), teor de umidade (TU), temperatura de secagem (T_s) e massa específica (ME) foram estatisticamente analisados por meio de análise de regressão simples e múltipla, selecionando-se modelos que melhor estimassem o TU em função das demais variáveis. Consideraram-se três faixas de TU: superiores ao Ponto de Saturação das Fibras teórico (PSF_t = 30%), inferiores ao PSF_t, e desde a madeira verde até a seca (100 a 12%). As amostras que visualmente apresentavam defeitos de secagem foram descartadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância mostrou influência significativa da temperatura de secagem sobre o teor de umidade de equilíbrio, considerando o teste *Least Significant Difference* (LSD) de Fisher, a 5% de probabilidade de erro. Da mesma forma, a temperatura de secagem também provocou alterações na massa específica, porém não estatisticamente significativa em alguns casos (Tabela 2).

O aumento da temperatura de secagem reduziu a higroscopicidade da madeira, diminuindo-se significativamente seu teor de umidade de equilíbrio. A exposição da madeira a altas temperaturas por longos períodos provoca decomposição das hemiceluloses, as quais são mais higroscópicas do que os outros constituintes primários da madeira e se degradam mais rapidamente em temperaturas elevadas (SKAAR, 1972).

Os valores médios da velocidade das ondas ultra-sônicas, obtidos neste trabalho, foram próximos daqueles relatados por outros pesquisadores (CARRASCO e AZEVEDO JÚNIOR, 2003; COSTA, 2004 e PUCCINI, 2002), os quais utilizaram madeiras de pinus e eucalipto com diferentes dimensões, situando-se entre 4000 e 6000 m/s.

TABELA 2: Características das amostras de secagem analisadas ao teor de umidade de equilíbrio (temperatura = 20°C e umidade relativa = 65%).

TABLE 2: Characteristics of drying samples analyzed at equilibrium moisture content (temperature = 20°C and relative moisture = 65%).

Tratamento	Espécie	Dimensões (cm)			TUEq.(%)	ME (g/cm³)
		L	E	C		
1	Pinus	9,86	3,32	25,03	14,68 a	0,48 a
2		9,84	3,34	25,05	13,41 b	0,51 b
3		9,81	3,34	25,05	11,88 c	0,52 b
4	Eucalipto	9,99	3,37	24,92	15,31 a	0,47 a
5		9,92	3,29	24,78	13,92 b	0,50 b
6		9,91	3,25	24,77	12,86 c	0,51 b

Em que: L = largura; E = espessura; C = comprimento; TUEq. = teor de umidade de equilíbrio (base seca); ME = massa específica básica ao teor de umidade de equilíbrio. Valores seguidos pela mesma letra, na mesma coluna e para a mesma espécie, não diferem estatisticamente pelo teste *Least Significant Difference* (LSD) de Fisher, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Os modelos obtidos com dados da temperatura de secagem, velocidade ultra-sônica e massa específica para a estimativa do teor de umidade da madeira durante sua secagem são mostrados na Tabela 3 e graficamente representados pelas Figuras 1 a 5.

TABELA 3: Estimativa do teor de umidade em função da velocidade ultra-sônica, massa específica e temperatura de secagem, para as diferentes espécies e faixas de teor de umidade.

TABLE 3: Estimate of moisture content in relation to the ultrasonic speed and drying temperature, for different species and moisture content belts.

SP	Faixa de TU (%)	Equação de regressão	R _{aj} ² (%)	S _{yx} (%)	F
P	12 ≤ TU ≤ 100	TU = e ^(-1,271 + 0,0009*Vus - 1,28846*E - 7*Vus² - 0,00273*Ts + 6,065*ME - 4,425*ME²)	35,7	0,15	132,1**
	12 ≤ TU ≤ 30	TU = e ^{3,37366 - 0,00031128*Vus + 0,0270729*Ts + 2,88685*ME - 0,00000734787*(Vus*Ts)}	41,6	0,26	103,6**
	30 < TU ≤ 100	TU = e ^{0,164387 - 0,000148354*Vus + 16,4506*ME - 14,6283*ME²}	5,3	0,33	12,3**
E	12 ≤ TU ≤ 100	TU = e ^{12,0379 - 0,00142674*Vus + 0,000103214*Ts² - 2,70322*ME - 0,000004629*(Vus*ME*Ts)}	80,8	0,26	1668,2**
	12 ≤ TU ≤ 30	TU = e ^{17,3558 - 0,002526*Vus - 0,021676*Ts + 0,00021*Ts² - 19,5017*ME + 0,003419*(Vus*ME)}	40,7	0,20	86,5**
	30 < TU ≤ 100	TU = e ^{18,3465 - 0,00279505*Vus - 18,8086*ME + 0,00343223*Vus*ME}	65,6	0,19	612,0**

Em que: SP = espécie (P = pinus; E = eucalipto); Vus = velocidade ultra-sônica (m/s); TU = teor de umidade base seca (%); e = exponencial; ME = massa específica básica ao teor de umidade de equilíbrio (g/cm³); Ts = temperatura de secagem (°C); R_{aj}² = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; E = potência de base 10; ** = significativo ao nível de 1 % de probabilidade.

A linearização dos modelos pela transformação logarítmica do teor de umidade proporcionou um melhor ajuste dos mesmos. A madeira de eucalipto proporcionou melhores ajustes dos modelos, explicando até 81% dos dados. A maior variação ocorrida entre as amostras de pinus pode estar relacionada ao fato de esta madeira ter sido obtida da região próxima da medula, correspondendo, portanto, à madeira juvenil. Outro aspecto importante é o fato de essa madeira apresentar maior heterogeneidade devido a diferenças de propriedades entre o lenho inicial e o tardio.

Efeito do teor de umidade

Observou-se o clássico comportamento da redução da velocidade ultra-sônica em função do aumento do teor de umidade da madeira (Figuras 1 a 5). No entanto, para a madeira de pinus, o melhor ajuste foi verificado quando considerado o TU inferior ao PSFt (considerado de 30%). Já a faixa de TU superior ao PSFt apresentou a correlação mais baixa. Por sua vez, para a madeira de eucalipto, melhor correlação foi observada quando considerado a faixa total de variação do TU. Para a faixa de TU inferior ao PSFt, verificou-se pior ajuste (Tabela 3). No entanto, Simpson (1998), Gonçalves e Costa (2002), Oliveira *et al.*

(2005) e Costa (2004), estudando diferentes espécies e dimensões de amostras, observaram maior correlação para TU inferiores ao PSF, sendo que, acima deste ponto, correlação não-significativa.

A grande influência do teor de umidade sobre o MOE, na faixa de umidade que corresponde à madeira completamente seca até seu PSF, seria responsável por esta variação significativa da velocidade ultra-sônica. Portanto, teores de umidade superiores ao PSF proporcionaram menores variações da velocidade ultra-sônica e, conseqüentemente, piores ajustes matemáticos.

Influência da massa específica

Para uma melhor comparação do efeito da massa específica das madeiras, realizou-se uma análise gráfica (Figuras 1 e 2) dos dados mostrados na Tabela 3, considerando as diferentes faixas de TU e mantendo-se fixo o valor médio das temperaturas de secagem analisadas (43 °C).

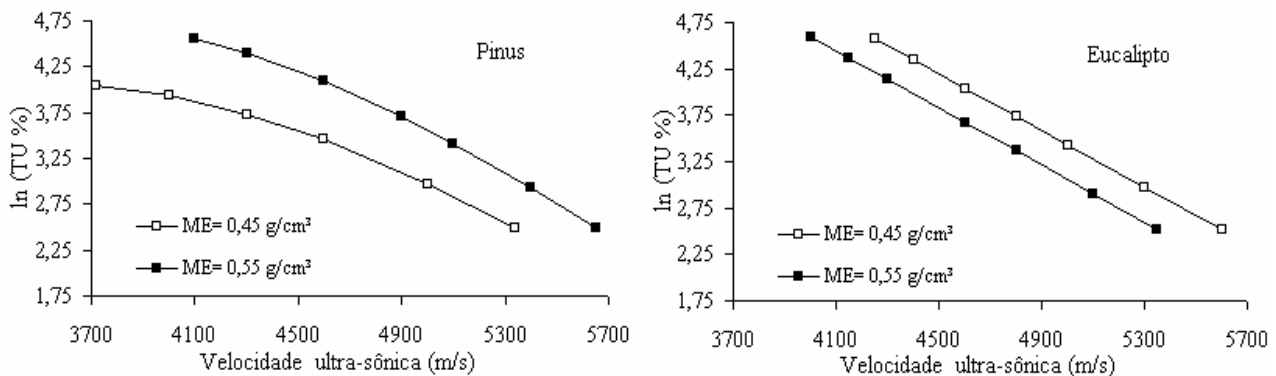


FIGURA 1: Efeito da massa específica (ME) das madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* sobre o logaritmo neperiano do teor de umidade (ln TU%) considerando a variação total de variação do teor de umidade (madeira verde até 12% de umidade). Temperatura de secagem = 43 °C.

FIGURE 1: Effect of the specific mass (ME) of *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* wood over the Neperian logarithm of the moisture content (ln TU%) considering the total variation of variation of the moisture content (green wood up to 12% of moisture). Drying temperature = 43 °C.

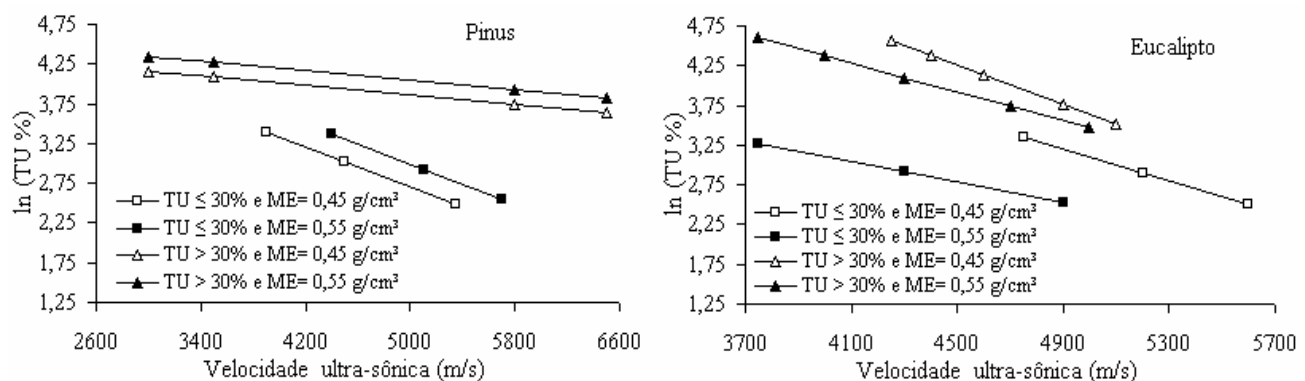


FIGURA 2: Efeito da massa específica (ME) das madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* sobre o logaritmo neperiano do teor de umidade (ln TU%) considerando diferentes faixas de teor de umidade (madeira verde até o PSFt = 30% e deste até 12% de umidade).

FIGURE 2: Effect of the specific mass (ME) of *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* wood over the Neperian logarithm of the moisture content (ln TU%) considering different belts of moisture content (green wood up to PSFt = 30% and from this up to 12% of moisture).

Para a madeira de pinus, observou-se aumento proporcional da velocidade ultra-sônica com o aumento da massa específica, considerando todas as faixas de teor de umidade. Entretanto, comportamento inverso da influência da massa específica foi observado para a madeira de eucalipto (Figuras 1 e 2).

A relação diretamente proporcional da velocidade ultra-sônica com a massa específica também foi observada nos estudos feitos por Oliveira e Sales (2006) para *Pinus caribaea* Morelet, considerando o plano

longitudinal, assim como Wang *et al.* (2003) para *Taiwania cryptomerioides* Hayata. Porém, para o plano radial. Feeney *et al.* (1998), analisando amostras retiradas no sentido medula-casca, constataram maior velocidade ultra-sônica no lenho tardio, o qual apresenta maior massa específica quando comparado ao lenho inicial.

Segundo Shimoyama (2005), madeiras de maiores massa específica apresentam menos espaços vazios, os quais reduzem a velocidade da onda, uma vez que a velocidade do som no ar é muito menor do que nos sólidos. Portanto, as madeiras mais porosas (menos densas) apresentam menor velocidade de propagação das ondas.

No entanto, a velocidade ultra-sônica é inversamente proporcional à raiz quadrada da massa específica. Segundo Carrasco e Azevedo Júnior (2003), o aumento da massa específica pode decorrer da maior deposição de celulose na face interna da parede celular. Esta deposição acarreta aumento mais significativo nos valores de rigidez (redução de elasticidade) do que nos valores de massa específica da madeira. Dessa forma, mesmo que haja aumento da massa específica, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo apreciável aumento da rigidez.

Já no eucalipto, o aumento da massa específica proporcionou redução da velocidade ultra-sônica. Wang *et al.* (2003) observaram este mesmo comportamento para madeira de *Taiwania cryptomerioides*. Mishiro (1996) *apud* Oliveira e Sales (2006) também constataram redução da velocidade com o aumento da massa específica para algumas das 19 espécies estudadas. Em ambos os estudos, consideraram o sentido longitudinal das madeiras.

Quando a razão entre o MOE e a massa específica é grande, a velocidade da onda longitudinal é alta, e vice-versa. É por este motivo que a velocidade da onda no aço é maior que no ar, apesar de a massa específica do aço ser maior (SMITH, 1932). Isso poderia ser uma explicação para os comportamentos distintos do efeito da massa específica das madeiras sobre a velocidade ultra-sônica, observado tanto neste quanto nos demais trabalhos (FEENEY *et al.*, 1998; AZEVEDO JÚNIOR, 2003; WANG *et al.*, 2003; OLIVEIRA e SALES, 2006 e SHIMOYAMA, 2005). Adicionalmente, a pequena variação da massa específica observada neste estudo, combinada ao baixo ajuste dos modelos, não contribuem de maneira eficiente para a análise desta variável.

Influência da temperatura de secagem

As Figuras 3 e 4 apresentam, para cada espécie, a influência da temperatura de secagem. Foi mantida fixa a massa específica média das madeiras ($0,50 \text{ g/cm}^3$).

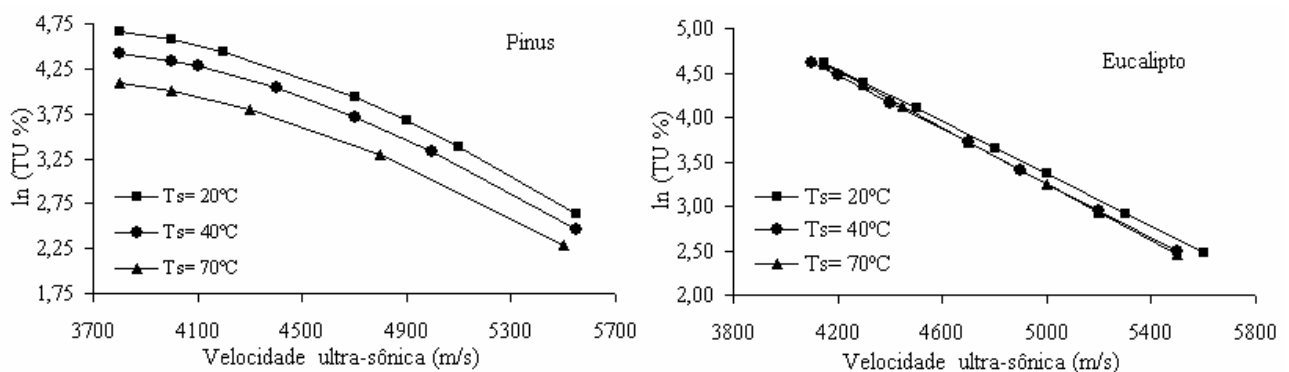


FIGURA 3: Efeito da temperatura de secagem (T_s) nas madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* sobre o logaritmo neperiano do teor de umidade ($\ln \text{ TU} \%$) considerando a variação total de variação do teor de umidade (madeira verde até 12% de umidade). Massa específica = $0,50 \text{ g/cm}^3$.

FIGURE 3: Effect of the drying temperature (T_s) in *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* woods over the Neperian logarithm of the moisture content ($\ln \text{ TU} \%$) considering the total variation of variation of the moisture content (green wood up to 12% of moisture). Specific mass = $0,50 \text{ g/cm}^3$.

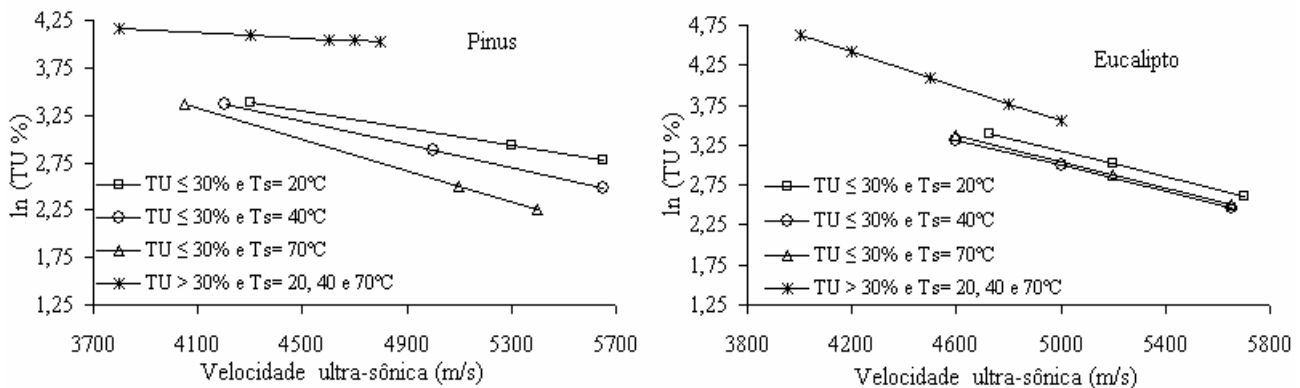


FIGURA 4: Efeito da temperatura de secagem (T_s) nas madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* sobre o logaritmo neperiano do teor de umidade ($\ln TU\%$) considerando diferentes faixas de teor de umidade (madeira verde até o PSFt e deste até 12% de umidade). Massa específica = $0,50 \text{ g/cm}^3$.

FIGURE 4: Effect of the drying temperature (T_s) in *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* woods over the Neperian logarithm of the moisture content ($\ln TU\%$) considering different belts of moisture content (green wood up to PSFt = 30% and from this up to 12% of moisture). Specific mass = 0.50 g/cm^3 .

De maneira geral, o aumento da temperatura de secagem proporcionou tendência de redução do teor de umidade estimado, concordando com o comportamento verificado por Grundström (1998), Green *et al.* (1999), Bekhta *et al.* (2000) e Dyk e Rice (2005). No entanto, para ambas as espécies, não ocorreu influência da temperatura de secagem quando considerado o teor de umidade superior ao PSFt (Figura 4).

De acordo com Green *et al.* (1999), a velocidade das ondas ultra-sônicas na madeira decresce quando é aquecida e aumenta quando esfriada, uma vez que esta velocidade está diretamente relacionada à raiz quadrada do MOE. Este, por sua vez, apresenta comportamento inversamente proporcional ao aumento da temperatura.

A madeira de eucalipto, de um modo geral, sofreu menor influência da temperatura de secagem quando comparada ao pinus. De maneira semelhante, não ocorreu influência da temperatura de secagem quando considerado o teor de umidade superior ao PSFt, para ambas as espécies. Esta reduzida influência da temperatura de secagem sobre a velocidade ultra-sônica também foi observada por outros autores, como Dyk e Rice (2005), os quais, analisando amostras de madeira congeladas, observaram aumento de velocidade em aproximadamente 5%, para todos os níveis de umidade, quando comparadas às amostras não-congeladas. Da mesma forma, Fridley *et al.* (1992) *apud* Green *et al.* (1999) também observaram pequena mudança no MOE quando amostras de madeira foram aquecidas de 23 para 55°C.

Influência da espécie

A partir das equações mostradas na Tabela 3, geraram-se gráficos para comparar as espécies (Figura 5). Para este fim, mantiveram-se fixos os valores médios da massa específica ($0,50 \text{ g/cm}^3$) e da temperatura de secagem (43 °C).

Não se observou influência definida da espécie sobre a estimativa do teor de umidade. Bucur *et al.* (2002) e Oliveira *et al.* (2005) descreveram que as madeiras de conífera, por apresentarem estruturas anatômicas contínuas e uniformes, favorecem ao aumento da velocidade das ondas quando comparada às folhosas. No entanto, neste trabalho, da mesma forma que observado por Costa (2004), não foi observada maior velocidade para a madeira de pinus (conífera) quando comparada à madeira de eucalipto (folhosas).

Segundo Oliveira & Sales (2006) e Shimoyama (2005), a menor velocidade da onda encontrada para a madeira de pinus em relação à madeira de eucalipto pode ser explicada pela menor massa específica do pinus, ou seja, é mais porosa, o que favorece a menor velocidade de propagação da onda. Já as madeiras mais densas, no caso do eucalipto, são as que apresentam maior teor de substância madeira, portanto, menores espaços vazios, propiciando maior velocidade de propagação das ondas.

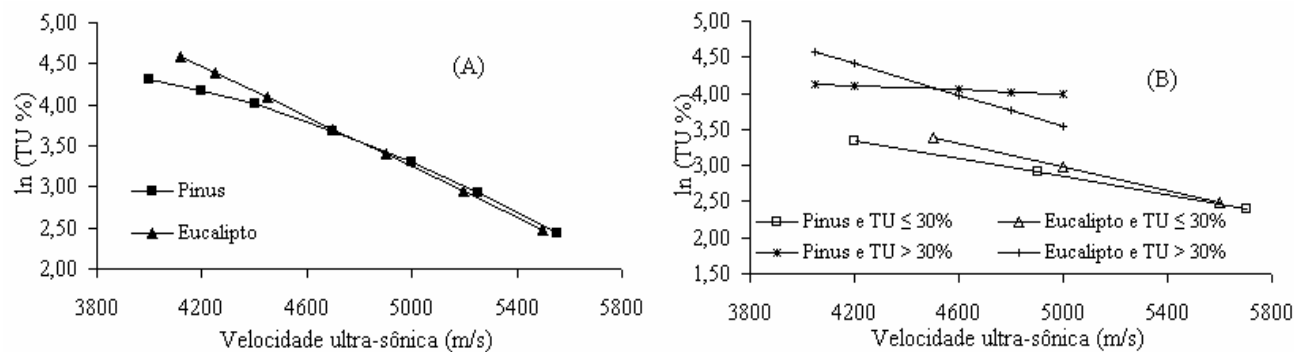


FIGURA 5: Efeito da espécie (*Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*) sobre o logaritmo neperiano do teor de umidade (ln TU%) considerando a variação total de variação do teor de umidade (A) e da madeira verde até o PSF e deste até 12% de umidade (B). Massa específica = 0,50 g/cm³ e temperatura de secagem = 43 °C.

FIGURE 5: Effect of the species (*Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis*) over the neperian logarithm of the moisture content (ln TU%) considering the total variation of variation of the moisture content (A) and of the green wood up to PSF and from this up to 12% of moisture (B). Specific mass = 0.50 g/cm³ and drying temperature = 43 °C.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O teor de umidade da madeira influenciou significativamente na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas, sendo esta relação inversamente proporcional e válida desde verde até o final da secagem.

Os modelos de regressão obtidos para estimar o teor de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* se ajustaram melhor aos dados observados quando comparados aos da madeira de *Pinus elliottii*.

A massa específica básica ao teor de umidade de equilíbrio também apresentou influência significativa na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas, comportando-se de modo diferenciado entre as espécies. O aumento desta variável ocasionou, para o *Pinus elliottii*, aumento da velocidade ultra-sônica, e, para o *Eucalyptus grandis*, redução da velocidade. Este comportamento distinto pode ser devido à pequena variação observada entre os valores de massa específica da madeira de pinus (entre 0,40 e 0,58 g/cm³) e de eucalipto (entre 0,37 e 0,57 g/cm³).

De um modo geral, a velocidade ultra-sônica diminuiu com o aumento da temperatura de secagem, mas não foi afetada pela espécie, sugerindo que ambas as madeiras proporcionaram a mesma velocidade.

O uso da técnica ultra-sônica para o monitoramento do teor de umidade durante a secagem da madeira mostrou-se promissor. No entanto, recomenda-se a condução de estudos que relacionem o ultra-som em função das diversas características relacionadas à madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEKHTA, P.; NIEMZ, P.; KUCERA, L. The study of sound propagation in the wood-based composite materials. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 12., 2000, Suíça. **Abstract...** Suíça: Wood NDT, 2000. Disponível em: <http://www.ndt.net/abstract/wood00/data/3.htm>. Acesso em: 10 set. 2005.
- BRASHAW, B.K.; WANG, X.; ROSS, R.J. *et al.* Relationship between stress wave velocities of green and dry veneer. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 6, p. 85-89, 2004.
- BUCUR, V.; LANCELEUR, P.; ROGE, B. Acoustic properties of wood in tridimensional representation of slowness surfaces. **Ultrasonics**, v. 1 a 8, n. 40. p.537-541, 2002.
- 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.
- COSTA, O.A.L. da. **Velocidade de propagação de ultra-som na madeira para diferentes condições de umidade**. Campinas: UNICAMP, 2004. 47p. (Relatório de pesquisa)
- DYK, H.V.; RICE, R.W. Ultrasonic wave velocity as a moisture indicator in frozen and unfrozen lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v.55, n.6, p. 68-72, 2005.
- FEENEY, F.E.; CHIVERS, R.C.; EVERTSEN, J.A. *et al.* The influence of inhomogeneity on the propagation of

ultrasound in wood. **Ultrasonics**, v. 36, n. 1/5, p. 449-453, 1998.

GONÇALVES, R.; COSTA, O.A.L. Acompanhamento da secagem da madeira de pinus, eucalipto e embuia utilizando ultra-som. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2., 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR. p. 1-10, 2002. 1 CD-ROM.

GREEN, D.W.; EVANS, J.W.; LOGAN, J. D. *et al.* Adjusting modulus of elasticity for changes in temperature. **Forest Products Journal**, Madison, v. 49, n. 10, p. 82-94, 1999.

GRUNDSTRÖM, F. **Non-destructive testing of particleboard with sound and eigen frequency methods**. 1998. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Luleå University of Technology, Skellefteå, 1998.

OLIVEIRA, F.G.R. de; CANDIAN, M; LUCCHETTE, F.F. *et al.* Moisture content effect on ultrasonic velocity in *Goupia glabra*. **Materials Research**, v. 8, n.1, p. 11-14, 2005.

OLIVEIRA, F.G.R. de; SALES, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 2443-2446, 2006.

PUCCINI, C.T. **Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som**. 2002. 139f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SANTINI, E.J. **Alternativas para monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada em estufa**. 1996. 198f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

SMITH, A.W. **The Elements of Physics**. 3. ed. New York and London: McGraw McGraw-Hill, 1932.

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**. 2005. 151f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SIMPSON, W.T. Relationship between speed of sound and moisture content of red oak and hard maple during drying. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.30, n.4, p.405-413, 1998.

SKAAR, C. **Water in wood**. New York: Syracuse University Press, 1972.

WANG, S.Y.; LIN, C.J.; CHIU, C.M. The adjusted dynamic modulus of elasticity above the fiber saturation point in Taiwania plantation wood by ultrasonic-wave measurement. **Holzforschung**, Berlin, v. 57, n. 5, p.547-552, 2003.