

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**USO DA ONDA ULTRA-SÔNICA COMO MEIO
DE CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM
DA MADEIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Leandro Calegari

**Santa Maria, RS, Brasil
2006**

**USO DA ONDA ULTRA-SÔNICA COMO MEIO
DE CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM
DA MADEIRA**

por

Leandro Calegari

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal.**

Orientador: Prof. Dr. Elio José Santini

**Santa Maria, RS, Brasil
2006**

Calegari, Leandro, 1979-

C148u

Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira / por Leandro Calegari ; orientador Elio José Santini. – Santa Maria, 2006.

91 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2006.

1. Engenharia florestal 2. Secagem da madeira 3. Ondas ultra-sônicas 4. Monitoramento do teor de umidade 5. Transdutores 6. Temperatura de secagem I. Santini, Elio José , orient. II. Título

CDU: 674.047.3

Ficha catalográfica elaborada por
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

© 2006

Todos os direitos autorais reservados a Leandro Calegari. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser com autorização por escrito do autor.

Endereço: Linha da Lagoa s/n, São João do Polêsine, RS, Brasil. CEP: 97230-000
Fone: (0xx) 55 9909 8036; E-mail: leandrocalegari@yahoo.com.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**USO DA ONDA ULTRA-SÔNICA COMO MEIO DE CONTROLE
DO PROCESSO DE SECAGEM DA MADEIRA**

elaborada por
Leandro Calegari

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

Elio José Santini, Dr.
(Presidente/Orientador)

Eduardo Rizzatti, Dr. (UFSM)

Miguel Antão Durlo, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 21 de fevereiro de 2006.

A toda minha família, principalmente aos meus pais, Fiorentina e Fiorentino,
por tudo o que me possibilitaram, dedico esta obra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Ciências Rurais e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao professor Elio José Santini, pela oportunidade, estímulo, confiança e disponibilidade para me orientar no decorrer deste trabalho. Aos meus co-orientadores, Clóvis Haselein e Solon Longhi, pelo apoio e disponibilidade para me atender sempre que precisei.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos Engenheiros Civis, Ms. Paulo Obregon do Carmo (UFSM) e Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS), pelo empréstimo do aparelho de ultra-som e contribuição dada através de seus conhecimentos, sem os quais este trabalho não teria sido realizado.

Ao amigo e colega Diego Stangerlin, pelo imenso apoio em todas as etapas do trabalho. Aos funcionários Jorge e Nelson, pelo auxílio durante a preparação das amostras.

Aos amigos do Laboratório de Produtos Florestais, pelo auxílio e convivência: Tobias, Darci, Fabiana, Silviana, Ediane, Dalva, Rômulo, Luciana, Daniela, Luciano, Karina, Douglas, Elisete, Lourdes Patrícia e Cristiane.

Às pessoas que, através de suas amizades, contribuíram para a realização deste trabalho: Paula Rolim, Márcio Mendel, Joel Kleinpaul, Damar Ruoso, Márcio Coutinho, Douglas Folks, Aline Carvalho, Elói Paulus, Marcelo Rosato, Cosme Pegoraro, André Bisognin; e aos demais, que tiveram seus nomes aqui omitidos.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

USO DA ONDA ULTRA-SÔNICA COMO MEIO DE CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM DA MADEIRA

AUTOR: LEANDRO CALEGARI

ORIENTADOR: ELIO JOSÉ SANTINI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 21 de fevereiro de 2006.

O objetivo deste estudo foi explorar o uso da técnica ultra-sônica para estimar o teor de umidade da madeira durante sua secagem, desde a condição verde até o final do processo. Os tratamentos basearam-se na combinação de duas espécies (*Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden), temperaturas de secagem (20, 40 e 70°C) e tipos de transdutores (faces planas e pontos secos). O experimento foi estabelecido segundo modelo fatorial, com aproximadamente 50 repetições por tratamento. Utilizou-se um equipamento ultra-sônico PUNDIT, com transdutores de 50 kHz. As amostras testadas apresentaram dimensões nominais de 3,5 x 10 x 25 cm de espessura, largura e comprimento, respectivamente e a velocidade ultra-sônica foi determinada considerando-se o plano longitudinal. Os resultados indicaram aumento da velocidade ultra-sônica estimada em função da redução do teor de umidade, para ambos os transdutores. Esta relação apresentou-se válida para a madeira desde verde até o final da secagem. No entanto, foi observada baixa correlação, sendo que os melhores coeficientes de determinação ajustados ocorreram à madeira de eucalipto ($R_{aj.}^2 = 88\%$). O uso dos transdutores de pontos secos apresentou-se mais prático do que o uso do de faces planas, devendo ser utilizados em madeiras duras e pouco heterogêneas. A velocidade ultra-sônica também foi influenciada pela densidade da madeira e pela temperatura de secagem. As espécies proporcionaram efeitos distintos da densidade sobre a velocidade. Na madeira de pinus, a velocidade aumentou com o aumento da densidade, ao passo que na de eucalipto ocorreu efeito inverso. A velocidade ultra-sônica apresentou tendência de redução em virtude do aumento da temperatura de secagem. No entanto, a influência desta variável foi reduzida. Não foi observada influência definida das espécies sobre a velocidade ultra-sônica quando utilizados os transdutores de faces planas. Porém, a madeira de eucalipto proporcionou maior velocidade quando utilizados os transdutores de pontos secos. Os resultados sugerem que este método apresenta bom potencial para ser usado no controle do processo de secagem. Entretanto, são necessários estudos sobre a influência das diversas características das madeiras sobre a velocidade das ondas ultra-sônicas, bem como o desenvolvimento de transdutores específicos para o uso desta alternativa em escala comercial.

Palavras-chave: secagem da madeira; ondas ultra-sônicas; monitoramento do teor de umidade; transdutores; temperatura de secagem.

ABSTRACT

Master's Thesis
Master's Degree Program in Forest Engineering
Federal University of Santa Maria

THE USE OF ULTRASONIC WAVE TO CONTROL THE DRYING WOOD PROCESS

AUTHOR: LEANDRO CALEGARI

ADVISOR: ELIO JOSÉ SANTINI

Date and place of defence: Santa Maria, February 21nd, 2006.

The purpose of this study is to explore the use of ultrasonic technique in order to estimate the moisture content during wood drying, from green condition to the end of the drying process. The treatments were based on the combination of two different species (*Pinus elliottii* Engelm. and *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden), drying temperatures (20, 40 and 70°C) and transducers types (plane faces and dry points). The experiment was set up according to a factorial model, with approximately 50 replications. A 50 kHz - transducer (PUNDIT ultrasonic equipment) was used. Samples tested had nominal 3.5 cm thick by 10 cm wide by 25 cm long and the ultrasonic wave speed propagation was measured according to its longitudinal direction. The results indicated increase of ultrasonic speed with reduction of moisture content for both transducers used. This relationship is valid for the wood from green to the end of the drying process. However, low correlation was observed, and the best model adjusted determination coefficients were observed with eucalypt wood ($R_{aj}^2 = 88\%$). The use of the transducers of dry points was more practical than the plane faces one. Moreover, they should be used in hard and not much heterogeneous woods. The ultrasonic velocity was also influenced by wood density and drying temperature. The species showed different effects of wood density on the velocity. In the pine wood, velocity increased with increasing density. Opposing effect was observed in eucalypt wood. The ultrasonic speed tended to decrease as drying temperature increased. Nevertheless, this variable's influence was reduced. It was not noticed any defined influence of the species in the ultrasonic speed when the plane face transducers were used. However, the eucalyptus wood provided larger velocity when the dry point transducers were used. The results suggest that this method presents good potential for the control of the drying process. Studies on the influence of the several wood characteristics on the ultrasonic wave's velocity and the development of specific transducers for the use of this alternative in commercial scale are required.

Key-words: wood drying; ultrasonic waves; drying control; transducers; drying temperature

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 A madeira e sua secagem	12
2.2 Controle do processo de secagem	13
2.2.1 Métodos de controle convencionais	14
a) Método de pesagem.....	14
b) Medidores elétricos	17
2.2.2 Métodos de controle não-convencionais	17
a) Variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL)	17
b) Temperatura da madeira	18
c) Coeficiente T_m/T_{bu}	18
d) Sistema ultra-sônico	19
2.3 Ultra-som	19
2.3.1 Fundamentos básicos sobre ondas sonoras.....	19
a) Principais características físicas das ondas sonoras.....	19
b) Tipos de ondas sonoras	21
2.3.2 O aparelho de ultra-som.....	23
a) Método de utilização.....	23
b) Transdutores ultra-sônicos	24
2.3.3 Fatores que influenciam a propagação das ondas ultra-sônicas na madeira	28
a) Propriedades anatômicas.....	29
b) Densidade ou massa específica da madeira.....	30
c) Propriedades morfológicas	32
d) Teor de umidade da madeira	34
e) Dimensões da amostra.....	35
f) Freqüência do transdutor	37
g) Defeitos da madeira	37
h) Temperatura.....	38
i) Espécies de madeira	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 Coleta e preparo do material	42

3.2	Tratamentos avaliados.....	44
3.3	Determinação do teor de umidade da madeira.....	45
3.4	Secagem da madeira.....	46
3.5	Medição do tempo de deslocamento da onda ultra-sônica.....	47
3.5.1	Características do aparelho de ultra-som utilizado.....	47
3.5.2	Calibração do aparelho de ultra-som.....	48
3.5.3	Determinação do tempo com transdutores de face plana.....	49
3.5.4	Determinação do tempo com transdutores de pontos secos.....	50
3.6	Cálculo da velocidade da onda ultra-sônica.....	51
3.7	Determinação da densidade da madeira.....	51
3.8	Análise estatística.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1	Observações preliminares.....	53
4.2	Caracterização das amostras de secagem.....	54
4.3	Correlação entre as variáveis influentes na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas.....	55
4.3.1	Efeito do teor de umidade.....	59
4.3.2	Efeito da densidade da madeira.....	60
4.3.3	Efeito do tipo de transdutor.....	65
4.3.4	Efeito da temperatura de secagem.....	69
4.3.5	Efeito da espécie.....	74
4.4	Ajustes de modelos de regressão para estimativa do teor de umidade.....	76
4.5	Avaliação da velocidade ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem.....	82
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	84
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	86

1 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.

Muitos estudos têm sido conduzidos na tentativa de desenvolver técnicas de acompanhamento do teor de umidade da madeira, durante a secagem em estufas comerciais, que sejam mais modernas, práticas e versáteis que os métodos convencionalmente empregados, tais como pesagem de amostras e medidores elétricos (SANTINI, 1996).

Algumas alternativas tecnológicas estudadas com vista à aplicação no controle do processo de secagem são os métodos que se baseiam na variação da temperatura através da pilha de madeira, na temperatura da madeira, na contração da carga dentro da estufa, no estímulo infravermelho, no coeficiente temperatura da madeira/temperatura do bulbo úmido, e os métodos baseados em emissões acústicas, com destaque para o emprego das ondas ultra-sônicas.

O ultra-som é utilizado para a detecção de defeitos, desde a década de 70, em diferentes materiais homogêneos. Na madeira, em particular, como as fissuras e descontinuidades são características que não significam, necessariamente, falhas na sua constituição, os ensaios por ultra-som são usados para determinar parâmetros físico-mecânicos. Uma vez que o teor de umidade da madeira é um dos fatores de influência sobre a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas, pesquisadores como Dyk & Rice (2005), Brashaw *et al.* (2004), Gonçalves & Costa (2002), Simpson (1998) e Simpson & Wang (2001) correlacionaram a velocidade ultra-sônica ao teor de umidade, explorando este ponto para o monitoramento da umidade da madeira durante o processo de secagem.

A observação da velocidade de propagação do ultra-som como método de determinação indireta do teor de umidade em madeiras é relativamente novo, estando em fase de pesquisa e mostrando-se bastante promissor. Uma das suas principais características é a determinação do teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras, o que não é observado para a grande maioria das alternativas testadas até o presente momento.

Como as técnicas de ultra-som para o monitoramento da qualidade da madeira são relativamente novos no país, tendo sido iniciado em 1997, poucas são as pesquisas, até o presente momento, envolvendo o uso desta técnica para o controle de processos (ALVES FILHO, 2003, p.11).

Nos ensaios ultra-sônicos, os transdutores (sensores responsáveis pela emissão-recepção das ondas) utilizados atualmente apresentam faces planas, requerendo o uso de acoplantes, substâncias utilizadas para melhorar sua eficiência acústica. Algumas desvantagens do uso desse tipo de transdutor são a instabilidade das repetições e a impossibilidade de medições em superfícies ásperas ou curvas. O desenvolvimento de um novo design de transdutor com pontos secos apresentam-se livre dessas desvantagens. Portanto, a importância do estudo do uso dos transdutores de pontos secos refere-se ao fato de esta técnica ser inovadora.

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a correlação entre o teor de umidade da madeira e a velocidade de propagação de ondas ultra-sonoras durante o processo de secagem utilizando dois diferentes tipos de transdutores.

Os objetivos específicos são: a) medir por meio do método de pesagem o teor de umidade das amostras de madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden submetidas às temperaturas de secagem de 20, 40 e 70°C; b) determinar através de equipamento de ultra-som adaptado com diferentes transdutores, o tempo de propagação da onda ultra-sonora para as espécies e temperaturas estudadas; c) comparar, por meio do teor de umidade da madeira, a eficiência dos transdutores planos e de pontos secos; d) estabelecer, a partir de modelos matemáticos, as relações entre as variáveis analisadas, visando à estimativa do teor de umidade da madeira.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A madeira e sua secagem

A madeira é um material lenhoso, formado por células dispostas nos sentidos radial e axial, ligadas entre si pela lignina, que age como um cimento.

As madeiras de gimnospermas, também conhecidas como coníferas, possuem uma estrutura bem mais simples do que as das angiospermas, também conhecidas como folhosas, por apresentarem menos tipos de células em sua composição. Dentre as espécies de rápido crescimento comuns em nosso meio, pode-se citar as do gênero *Pinus* como exemplo de coníferas, e as do gênero *Eucalyptus* como folhosas.

As madeiras de coníferas apresentam uma estrutura relativamente simples, sendo que os traqueídeos longitudinais ocupam até 95% do volume da madeira (BURGER & RICHTER, 1991, p.60). Já nas folhosas, a estrutura anatômica mais notável é o elemento vascular. Denomina-se vaso ao conjunto de elementos vasculares sobrepostos, que formam uma estrutura tubiforme contínua, de modo a conduzir líquidos. Seu elemento peculiar são as fibras, que constituem geralmente a maior percentagem de seu lenho (20-80%) e desempenham a função de sustentação (BURGER & RICHTER, 1991, p.80). São células esbeltas, de extremidades afiladas. Variam em comprimento, largura e espessura da parede, entre as espécies e na mesma árvore.

Conforme Nogueira & Ballarin (2003, p.2), de forma simplista e generalizada, os principais elementos anatômicos das coníferas (traqueídeos: 85-95% do volume) e das folhosas (fibras: 37-70% do volume) estão dispostos na direção longitudinal.

Deste modo, o termo fibras é tecnicamente utilizado para folhosas, sendo denominado de traqueídeos ou traqueóides para coníferas. Entretanto, em diversos trabalhos, adota-se o termo fibras em ambas as situações, por ser mais fácil.

A madeira constitui, por natureza, um material higroscópico, ou melhor, é capaz de interagir com o meio ambiente absorvendo ou perdendo umidade para ele. Esta característica afeta sensivelmente suas propriedades físicas e mecânicas (CARRASCO & AZEVEDO JÚNIOR, 2003, p.183).

A água na madeira pode existir em duas diferentes formas básicas: água livre ou capilar e água higroscópica ou impregnação. Denomina-se água livre a água encontrada nas cavidades intra e intercelulares. Está ligada à madeira por forças de capilaridade, e sua alteração modifica apenas o peso da madeira. Já a água higroscópica corresponde à água localizada nas paredes das células. Liga-se à madeira por meio de pontes de hidrogênio, e seu movimento pode ser considerado como um fenômeno de difusão. Sua alteração, modifica não somente o peso, mas também as dimensões e as propriedades mecânicas da madeira.

Durante a secagem da madeira, é a água livre que sai primeiro das células, uma vez que o fluxo capilar ocorre mais facilmente que a difusão. O teor de umidade no qual a parede está completamente saturada, mas a cavidade da célula está livre de água líquida, é denominado Ponto de Saturação das Fibras (PSF). O PSF coincide com um teor de umidade de aproximadamente 30%, variando ligeiramente entre espécies.

Quando para uma dada combinação de umidade relativa do ar e de temperatura nenhuma difusão de água ocorrer interna ou externamente, a madeira apresentará um teor de umidade constante, denominado teor de umidade de equilíbrio.

A propriedade que a madeira possui de sofrer alterações de dimensões quando seu teor de umidade varia entre o PSF e a condição seca em estufa denomina-se retratibilidade. Para teores de umidade superiores ao PSF, suas dimensões são praticamente constantes. Devido aos diferentes aspectos da estrutura macroscópica, microscópica e submicroscópica, a retratibilidade é diferenciada conforme o plano anatômico considerado. A maior alteração dimensional se manifesta no plano tangencial, depois no radial e, posteriormente, no plano longitudinal. Durlo & Marchiori (1992, p.23) relataram que “a retratibilidade no sentido longitudinal é bastante reduzida (0,05 a 1%), não constituindo problema para fins práticos.”

2.2 Controle do processo de secagem

O processo de secagem de madeiras através de estufas é considerado de extrema importância pois, quando bem conduzido, além da redução do tempo, ainda

elimina ou reduz defeitos que podem ocorrer na madeira.

O controle do processo é o aspecto que mais precisa ser aprimorado, pois é durante a secagem que deverão ser tomados os cuidados para se evitar grande ocorrência de defeitos (JANKOWSKY, 1993 *apud* GALINA, 1997, p.1). Controlar o processo implica em ajustar as condições internas do secador (temperatura e umidade relativa do ar), de acordo com o teor de umidade da madeira. A compatibilização das condições do meio de secagem com as características da madeira é expressa pelo programa de secagem (GALINA, 1997, p.4).

Vários sistemas de determinação do teor de umidade da madeira dentro da estufa são citados na literatura. Entretanto, os sistemas convencionalmente utilizados para monitorar o processo de secagem em secadores industriais são a pesagem de amostras (ou cargas) e os medidores elétricos.

Dentre as alternativas tecnológicas mais recentemente estudadas com vista à aplicação no controle do processo de secagem, podem-se citar a variação da temperatura na pilha de madeira, a temperatura da madeira, as emissões acústicas, a contração da carga, o estímulo infravermelho, a ressonância magnética nuclear, o medidor de gradiente de umidade longitudinal e o densitômetro de raio gama de varredura indireta. Algumas delas, entretanto, apresentam estudos isolados, não demonstrando expectativa de utilização em escala comercial. Os mais promissores são os métodos baseados na variação da temperatura na pilha de madeira, temperatura da madeira, a relação Temperatura da madeira/Temperatura do bulbo úmido e, ultimamente, o sistema ultra-sônico.

2.2.1 Métodos de controle convencionais

a) Método de pesagem

O método de pesagem ou gravimétrico baseia-se no acompanhamento da perda de peso de amostras de controle distribuídas na pilha de madeira durante a secagem. Este método requer o conhecimento do teor de umidade inicial e do peso inicial dessas amostras. A determinação do teor de umidade inicial da carga é obtida pela média aritmética de amostras de controle retiradas das peças de madeira.

Para cada amostra de controle, a determinação do teor de umidade, segundo o método de pesagem, é realizada da seguinte maneira: amostra livre da presença de imperfeições (nós, podridão, bolsas de resina etc.), após ter seu peso úmido precisamente determinado, deve ser colocada em estufa sob temperatura de aproximadamente 103°C, até ter sua umidade totalmente evaporada, o que é observado quando pesagens sucessivas não indicam mais alteração do peso, sendo este então o peso seco da amostra. O teor de umidade base seca é determinado de acordo com a Equação 1.

$$TU_{bs}(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde: TU_{bs} = Teor de umidade base seca da amostra de controle (%);
 P_u = Peso úmido da amostra de controle;
 P_s = Peso seco da amostra de controle.

Distribui-se um determinado número de amostras de controle, de modo que possam ser facilmente retiradas e pesadas freqüentemente, possibilitando assim o monitoramento do teor de umidade da carga. Estas amostras devem ter suas extremidades impermeabilizadas com alguma substância para prevenir que sua secagem ocorra mais rapidamente que a carga. Cada vez que uma das amostras é removida, durante o processo de secagem, seu teor de umidade é calculado de acordo com a Equação 2.

$$TU_a(\%) = \left(\frac{P_a \cdot (TU_i + 100)}{P_u} \right) - 100 \quad (2)$$

Onde: TU_a (%) = Teor de umidade atual da amostra de controle (TU obtido no decorrer do processo de secagem), em %;
 P_a = Peso atual da amostra de controle (peso da amostra obtido no decorrer do processo de secagem);
 TU_i = Teor de umidade inicial da amostra de controle;
 P_u = Peso úmido inicial da amostra de controle.

As amostras de controle não devem ser retiradas das extremidades das peças de madeira, uma vez que tendem a apresentar menor teor de umidade em relação às amostras localizadas no centro, em virtude do gradiente de umidade

estabelecido durante o processo de secagem. As amostras devem ficar estrategicamente posicionadas na pilha, para poderem ser removidas e repostas com facilidades durante o processo de secagem, para a obtenção do seu peso atual. Para tanto, elas são geralmente colocadas nas laterais e nas extremidades das cargas (GALVÃO & JANKOWKY, 1985).

A determinação do teor de umidade baseado no método gravimétrico é considerada padrão. Esse método apresenta grande precisão para todos os teores de umidade, sendo utilizado para a calibração e comparação com os métodos indiretos (HILDBRAND, 1970, p.26 e MACKAY & OLIVEIRA, 1989, p.10). Trata-se, entretanto, de um método destrutivo, apresentando outras desvantagens, tais como necessidade de uso de peças de madeira livres de defeitos, longo tempo requerido para a total evaporação da água presente na madeira e necessidades de conhecimento do teor de umidade inicial da carga. Além disso, esse método não deve ser utilizado para madeiras que contenham compostos voláteis.

A pesagem periódica das amostras de controle é geralmente feita manualmente, tornando o método ineficaz, uma vez que a pesagem normalmente não é tomada a tempo de fazer as mudanças das condições da estufa em tempo ótimo. Além disso, elas são posicionadas na estufa mais para que possam ser constantemente retiradas do que para que sejam representativas da carga.

Sistemas que utilizam células de carga podem pesar individualmente amostras de controle localizadas dentro da estufa, tornando o processo automatizado. Embora não seja de uso comum, este sistema é capaz de captar o teor de umidade desde verde até completamente secas. Uma das limitações, entretanto, é a corrosão do equipamento a partir de substâncias voláteis oriundas do processo de secagem. A outra limitação continua sendo o posicionamento das amostras na estufa, uma vez que elas são geralmente posicionadas nas bordas da pilha, não expressando precisamente o teor de umidade das peças posicionadas em seu centro (SIMPSON, 1998, p.405-406).

Mackay & Oliveira (1989, p.32) citaram o sistema de pesagem de toda a carga de madeira, dentro da própria estufa, de modo que a perda de peso pudesse ser monitorada durante o processo. Como citado anteriormente, o método requer o conhecimento do teor de umidade e peso iniciais da carga. A partir destes dados, o teor de umidade é calculado constantemente pela Equação 2. Apesar de suas boas características, nenhum uso comercial deste processo foi encontrado pelos autores.

b) Medidores elétricos

Os medidores elétricos estão relacionados às propriedades elétricas da madeira, que variam com o teor de umidade. Entre os tipos de medidores elétricos de umidade, merecem destaque os medidores elétricos tipo resistência e os medidores elétricos tipo dielétrico.

Conforme Galina (1997, p.9), o princípio utilizado no medidor de umidade do tipo resistência é exatamente a resistência da madeira à passagem de corrente elétrica entre dois sensores. Já os medidores elétricos do tipo dielétricos são divididos em capacitância e perda de carga. O primeiro mede a constante dielétrica, e o segundo, um efeito combinado da constante dielétrica e a perda de carga.

Este método apresenta resultado menos acurado que o método de pesagem. De acordo com Galvão & Jankowsky (1985, p.18) e Holmes & Forrer (1989, p.67), ambos os tipos de medidores elétricos fornecem leituras com precisão correspondente a $\pm 1\%$, dentro da faixa aproximada de 7 até a umidade correspondente ao PSF, desde que sejam mantidos em boas condições de conservação. No entanto, não detectam teores de umidade superiores as PSF. Galina (1997) reportou que esta técnica depende do ponto de medição, não podendo efetivamente indicar a condição de toda peça ou carga.

2.2.2 Métodos de controle não-convencionais

a) Variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL)

Taylor & Landoch (1990, p.47) descreveram o TDAL (*temperature drop across the load*) ou Delta T (ΔT) como o declínio da temperatura do ar que ocorre entre o lado de entrada e o de saída da pilha de madeira. A razão pelo qual a temperatura decresce ao passar pela pilha de madeira é que a umidade presente na madeira absorve energia, necessária à evaporação da água. Deste modo, pode ser utilizado como meio de controle do processo de secagem em estufa. No entanto, só apresenta-se útil em secagem sob altas temperaturas e para madeiras permeáveis.

b) Temperatura da madeira

Keylwerth (1952 *apud* SANTINI,2000,p.113) descreveu que “as temperaturas interna e superficial da madeira fornecem valiosas informações para a dedução do teor da umidade médio da madeira”, uma vez que a temperatura interna da madeira é influenciada principalmente pelo seu teor de umidade.

Holmes & Forrer (1989) e Santini (2000) observaram que este método é viável para espécies que demonstram alta taxa de secagem. Na maioria das espécies, entretanto, a diferença entre as temperaturas seria muito pequena para ser significativamente benéfica.

c) Coeficiente T_m/T_{bu}

A relação entre o teor de umidade com o coeficiente T_m/T_{bu} (temperatura da madeira/temperatura do bulbo úmido) ou W_t/W_{bt} (*wood temperature/wet-bulb temperature*) foi utilizada por Santini & Tomaselli (2001) para estimar o teor de umidade da madeira.

Keylwerth (1952 *apud* SANTINI & TOMASELLI,2001,p.128) mencionou que, no processo de secagem à alta temperatura, a temperatura interna da madeira aproxima-se da temperatura do bulbo úmido quando o teor de umidade é superior ao PSF. Quando a umidade superficial decresce abaixo deste ponto, o aumento da temperatura superficial é seguido por um aumento da temperatura interna, devido ao gradiente formado entre a superfície e o centro da madeira. Apenas quando o teor de umidade do centro decresce abaixo do PSF, ocorrerá grande aumento da temperatura interna. Tais observações levaram o autor a duas conclusões: a) quando o teor de umidade está acima do PSF, a razão entre a temperatura da madeira e o bulbo úmido permanece aproximadamente unitária; b) quando o teor de umidade do centro da madeira decresce abaixo do PSF, a razão tende a aumentar para valores superiores à unidade, uma vez que a temperatura interna tende a aumentar substancialmente, enquanto a temperatura do bulbo úmido decresce, favorecendo a secagem da madeira.

d) Sistema ultra-sônico

Morris (1960,p.4) descreveu que energia ultra-sônica é uma mudança mecânica de pressão com o tempo, que produz um deslocamento de amplitude finita nas partículas do material através do qual se propaga. Enquanto essa pressão se propaga através do sólido, cada partícula é deslocada e deformada, movendo as partículas vizinhas. Se essa onda alcançar um meio de propagação distinto, a velocidade da onda ou amplitude altera-se, dependendo da capacidade deste novo material em transmitir o movimento das partículas. Tal efeito da onda ultra-sônica pode indicar as propriedades físicas do material, ou então pode mudar esta estrutura ou propriedade do meio de propagação. Reflexão ou absorção dessa energia pode indicar continuidade do material, mudança de densidade, teor de umidade ou espessura do material. Quando em alta concentração, essa energia pode causar aquecimento, secagem e cristalização.

A utilização do ultra-som na avaliação de madeiras, utilizando equipamentos portáteis, pode ter grande aplicação prática do ponto de vista industrial. Pesquisadores como Dyk & Rice (2005), Brashaw *et al.* (2004), Gonçalves & Costa (2002), Simpson (1998) e Simpson & Wang (2001) observaram significativo aumento da velocidade das ondas ultra-sônicas com a redução do teor de umidade da madeira. Portanto, este ponto pode ser explorado para o monitoramento do processo de secagem.

2.3 Ultra-som

2.3.1 Fundamentos básicos sobre ondas sonoras

a) Principais características físicas das ondas sonoras

Quando se promove a deformação de certa região de um meio elástico, provoca-se uma perturbação que só se propaga em presença de um meio material, dando origem a ondas mecânicas. Como exemplo, têm-se as ondas sonoras, que

necessitam de um meio material para se propagarem. As ondas sonoras propagam-se nos sólidos, líquidos e gases, sendo fundamentais para o estudo do ultra-som.

As principais características físicas das ondas sonoras são comprimento de onda, frequência, período, amplitude e velocidade (Figura 1).

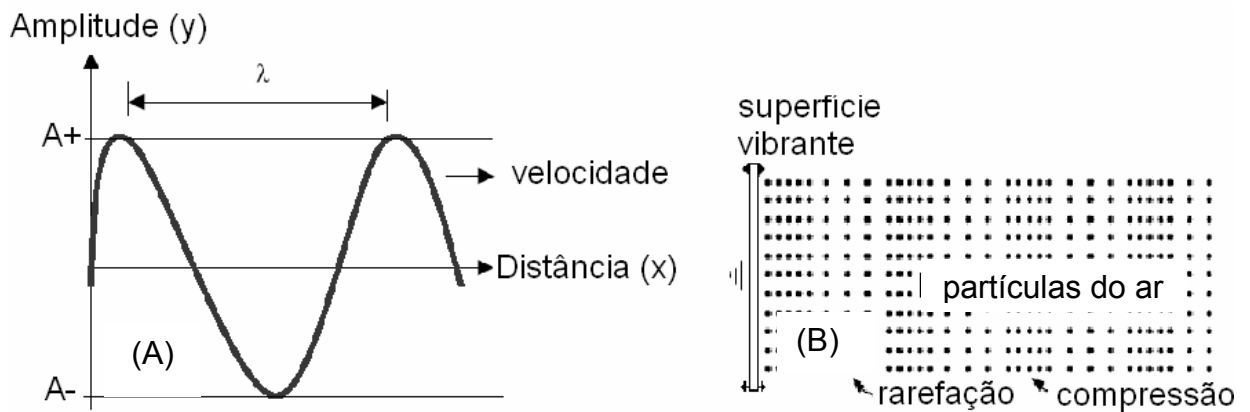


Figura 1 - Principais características físicas das ondas sonoras transversais (A) e longitudinais (B).

- Comprimento da onda (λ):

Para as ondas transversais, corresponde à distância entre duas cristas ou dois vales sucessivos, e para as longitudinais, corresponde à distância entre duas zonas de compressão e rarefação sucessivas;

- Período (T):

Corresponde ao tempo necessário para uma onda percorrer a distância λ ;

- Frequência (f):

É o número de vibrações completas produzidas num segundo. É medido em Hertz (Hz), que significa "um ciclo por segundo" e corresponde ao inverso do período ($f = 1/T$). De acordo com a frequência, o som é dividido em três categorias: infra-som ($f < 20$ Hz), som audível ($20 < f < 20.000$ Hz) e ultra-som ($f > 20.000$ Hz).

- Amplitude (A):

Corresponde à intensidade da onda sonora proporcional à deflexão máxima das partículas do meio de transmissão. Esta característica determina a intensidade da onda sonora, ou seja, a energia.

-Velocidade (V):

Corresponde à distância percorrida pela onda por unidade de tempo, sendo constante para cada material. Depende das propriedades do meio no qual elas estão se propagando (elasticidade e densidade). A elasticidade fornece as forças restauradoras às regiões deslocadas e a densidade, a inércia do sistema. Quanto mais próximas estiverem as moléculas, maior a velocidade do som no material (CALIXTO, 2004). De modo generalizado, a velocidade de propagação do som é de 340 m/s no ar, de 1 400 m/s nos líquidos e 5 000 m/s nos sólidos.

O comprimento de onda depende da velocidade do som no meio e da frequência utilizada (Equação 3). Assim, considerando um mesmo material, quanto maior a frequência, menor o comprimento da onda sonora.

$$V = f \cdot \lambda \quad (3)$$

Onde: V= Velocidade de propagação da onda (m/s);
f = Frequência da onda (Hz);
 λ = Comprimento da onda (m).

b) Tipos de ondas sonoras

Os principais tipos de ondas para determinação das propriedades da madeira são os de volume e os de superfície (OLIVEIRA *et al.*, 2005a, p.11). As ondas de volume (transversais e longitudinais) constituem os tipos fundamentais, sendo que as ondas de Rayleigh, Lamb e Love são ondas superficiais derivadas das primeiras, que se destacam na análise sônica.

b.1) Ondas de volume

- Ondas transversais ou de cisalhamento:

Tipo de onda no qual a vibração das partículas ocorre na direção perpendicular ao de propagação (Figura 1A). “São praticamente incapazes de se propagarem nos líquidos e gases, pelas características das ligações entre partículas” (ANDREUCCI, 2002, p.9). Conforme Rocha (2003, p.33), “sua velocidade de propagação é aproximadamente a metade da velocidade da onda longitudinal.”

- Ondas longitudinais ou de compressão:

São ondas cujas partículas do meio em que se propagam vibram na mesma direção de propagação da onda nesse meio (Figura 1B). Propagam-se nos sólidos, líquidos e gases. Devido ao seu modo de propagação, são as ondas de maior velocidade. Segundo Andreucci (2002, p.8), deslocam-se a 330 e 1480 m/s no ar e na água, respectivamente.

b.2) Ondas de superfície

Podem ser geradas por diferentes técnicas. Apresentam movimento elíptico e ocorrem exclusivamente na superfície de sólidos.

- Ondas tipo Rayleigh:

São ondas que se propagam na superfície de sólidos nos quais a dimensão normal ao sentido de propagação seja bem maior que o comprimento da onda (Figura 2A). Devido ao complexo movimento das partículas que ocorre nas duas fases diferentes, sua velocidade é aproximadamente 10% inferior a uma onda transversal (ANDREUCCI, 2002, p.9). Correspondem às ondas mais utilizadas nos ensaios não-destrutivos.

- Ondas tipo Love:

Tipo de ondas que apresentam movimentos das partículas paralelos à superfície, embora executem movimento transversal em relação à propagação (Figura 2B).

- Ondas tipo Lamb:

São ondas superficiais que ocorrem quando a espessura do material é da mesma ordem que o comprimento de onda. As partículas no plano central da chapa são transversais, e, na superfície, o movimento é elíptico (Figura 2C). Segundo Minicucci (2003, p.24), “são geradas em chapas finas, por meio de ondas longitudinais de velocidade e frequência pré-determinada”. São classificadas em simétricas e assimétricas.

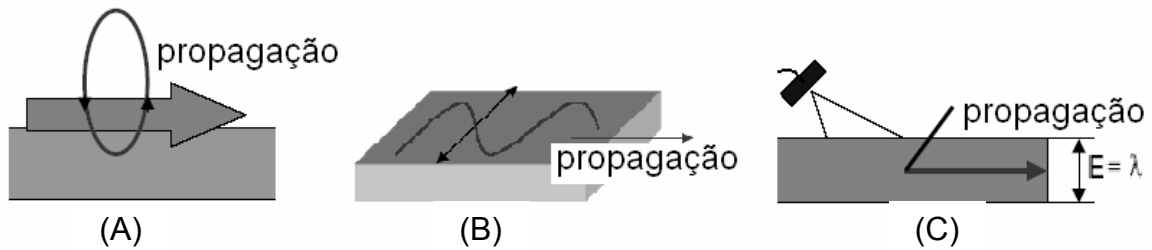


Figura 2 - Desenho esquemático do modo de propagação das ondas superficiais tipo Rayleigh (A), de Love (B) e de Lamb (C). Fonte: Adaptado de Minicucci (2003, p.23-25).

Nepomuceno (1980, p.20) afirmou que o tipo de onda pode ser alterado conforme seu ângulo de incidência, passando de uma onda puramente longitudinal a uma onda puramente transversal, ou à mistura de ambos.

A energia fornecida pelas ondas ao atravessar o meio é medida pela intensidade acústica ou intensidade sonora. É definida como a razão média do fluxo de energia que atravessa uma unidade de área pela unidade de tempo, sendo dada em Watts/cm².

Quando uma onda ultra-sônica se propaga em um meio, sua intensidade é reduzida em função da distância provocada pelo mecanismo da atenuação. Na prática, mede-se a atenuação total proveniente de diferentes mecanismos envolvidos. Esses mecanismos podem ser: absorção, espalhamento, reflexão, refração e difração. O processo de absorção envolve a conversão da energia ultra-sônica em outra forma de energia (térmica). Os processos de reflexão, refração, difração e espalhamento compreendem os mecanismos que fazem com que partes da onda passem a viajar em direções diferentes da original, enfraquecendo progressivamente a parte da onda que continua se propagando.

2.3.2 O aparelho de ultra-som

a) Método de utilização

A utilização do ultra-som é relativamente simples. Resumidamente, um circuito eletrônico emite pulsos elétricos que são conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoeletrico, localizado nos transdutores. As vibrações mecânicas deslocam-se pelo material atenuando (retardando) o sinal

emitido pelo gerador. O sinal retardado é recuperado por outro cristal piezelétrico, sendo as vibrações então amplificadas e transformadas novamente em pulsos elétricos para medir o tempo de propagação. A partir da distância e do tempo de percurso da onda sonora, calcula-se a velocidade da mesma (Figura 3).

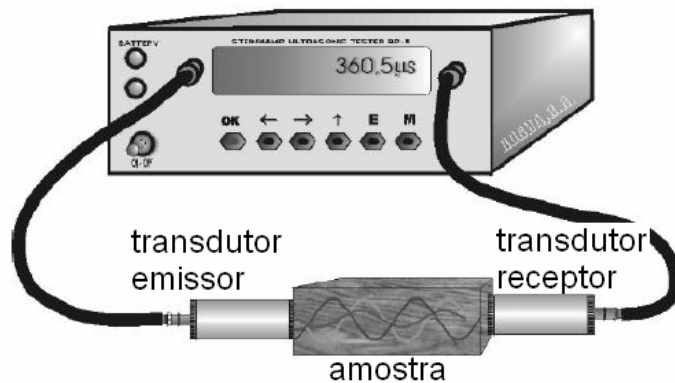


Figura 3 - Demonstração do uso de ultra-som na madeira. Fonte: Adaptado de Rocha (2003, p.32)

Carrasco & Azevedo Júnior (2003, p.179-180) descreveram que existem vantagens do uso de frequências ultra-sônicas em relação aos infra-sons. Dentre elas, citam: a) a alta frequência gera ondas de menor comprimento, o que é essencialmente importante para pequenas amostras; b) os coeficientes de absorção são usualmente mais altos e, conseqüentemente, mais fáceis de serem mensurados e c) as ondas associadas às altas frequências são mais facilmente direcionadas.

b) Transdutores ultra-sônicos

Os cristais piezelétricos são responsáveis pela conversão da energia elétrica em sonora e vice-versa. Esses cristais são montados sobre uma base de suporte e, junto com a carcaça externa, constituem os transdutores, transmissores ou cabeçotes propriamente ditos.

Existem transdutores de várias formas, tamanhos, ângulos e frequências. Os três tipos usuais de transdutores são: reto ou normal, angular e duplo-cristal ou SE, os quais apresentam faces planas. Já os transdutores com pontos secos apresentam uma estrutura diferente destes.

- Transdutores normais ou retos:

Denominação dada aos transdutores monocristais geradores de ondas longitudinais normais à superfície de acoplamento. São geralmente circulares, com o diâmetro do cristal variando de 5 a 24 mm e frequências de 0,5 a 6 MHz. Apresentam maior utilização na inspeção de peças com superfícies paralelas ou quando se deseja detectar descontinuidade na direção perpendicular às superfícies das peças (ANDREUCCI, 2002, p.20-21).

- Transdutores angulares:

Basicamente, diferem dos transdutores normais pelo fato de os cristais piezelétricos formarem um determinado ângulo com a superfície do material. É utilizado quando a descontinuidade está orientada perpendicularmente à superfície da peça e em áreas de difícil acesso (ANDREUCCI, 2002, p.21-22).

- Transdutores duplo-cristal:

Possuem um cristal emissor e outro receptor, dentro de uma mesma carcaça (MINICUCCI, 2003, p.29). São utilizados em situações específicas.

Dependendo do posicionamento dos transdutores durante a realização dos ensaios, existem três tipos de transmissão: direta, indireta e semi-direta, como pode ser visto na Figura 4 (NESVIJSKI, 2000 e EVANGELISTA, 2002, p.19).

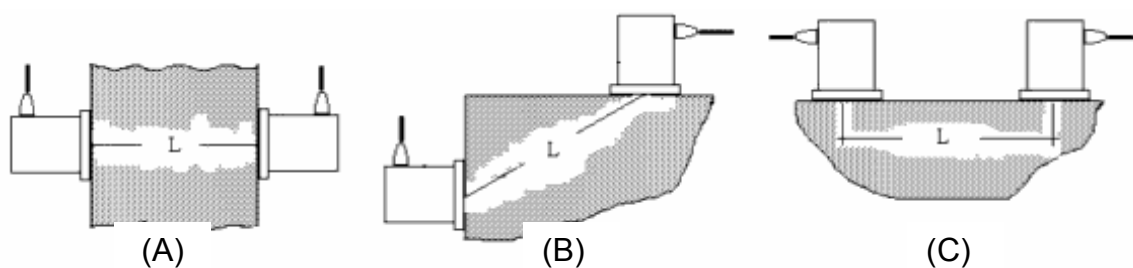


Figura 4 - Modos de disposição dos transdutores normais de faces planas: direto (A), indireto (B) e semi-direto (C), sendo L= distância entre os planos dos transdutores. Fonte: Adaptado de Nesvijski (2000).

Os tipos de transmissão indireta e semi-direta são importantes, pois nem sempre é possível o acesso a superfícies opostas do material em teste.

Para transmissão ou recepção do pulso, os transdutores devem estar completamente em contato com a superfície da peça em ensaio, caso contrário, a camada de ar existente introduzirá um erro na leitura do tempo (FERRARI & PADARATZ, 2003, p.186). Para evitar este problema, deve-se utilizar um acoplante.

A escolha do acoplante depende das condições superficiais da peça e do tipo de material que está sendo ensaiado. Os acoplantes típicos são água, óleo, gel, graxa, vaselina e gel medicinal. Em superfícies de rugosidade excessiva, é necessário um acoplante de alta viscosidade (ROCHA, 2003, p.36 e ANDREUCCI, 2002, p.23).

O cristal piezelétrico gerador de ondas ultra-sônicas é formado por infinitos pontos oscilantes, de forma que cada ponto produza onda. Assim, nas proximidades do cristal, existirá uma interferência ondulatória muito grande entre as ondas provenientes dos inúmeros pontos, sendo por isso uma região não confiável para fins de medições, a qual denomina-se Campo Próximo ou Zona de Fresnel. À medida que aumenta a distância com relação ao cristal, as interferências vão diminuindo e desaparecendo, tornando uma única frente de onda. Esta região que vem logo a seguir do Campo Próximo denomina-se Campo Distante, Longínquo ou Zona de Fraunhofer. É a região na qual o ensaio é considerado confiável. Entretanto, nesta região, a onda sônica se diverge igual ao fecho de luz de uma lanterna em relação ao eixo central e ainda diminui de intensidade quase que com o inverso do quadrado da distância.

- Transdutores de pontos secos ou ponto de contato seco:

Nesvijski (2003) descreveu que existem muitos problemas relacionados com a aplicação do método ultra-sônico para materiais não-metálicos. Um desses problemas relaciona-se ao design dos transdutores utilizados atualmente, os quais apresentam faces planas e requerem o uso de acoplantes para melhorar sua eficiência. Assim, esses transdutores apresentam desvantagens, tais como: acoplantes são responsáveis pela instabilidade das repetições durante os testes; transdutores planos não podem ser usados em superfícies ásperas ou curvas; há possibilidade de erro, devido a alterações da distância entre os transdutores emissor-receptores (influência do comprimento da peça ensaiada). Estes problemas poderiam ser evitados pela estabilização do contato durante os testes utilizando-se

transdutores com pontos secos, os quais podem ser possíveis pelo uso de extensores de ondas (Figura 5).

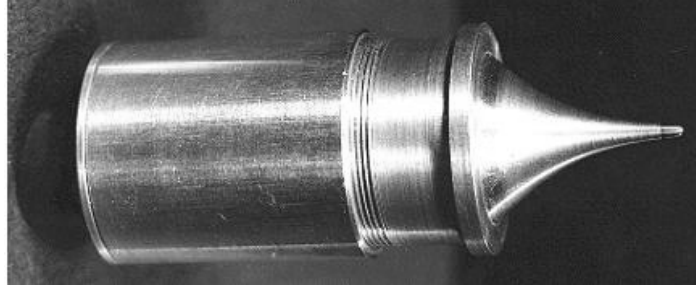


Figura 5 - Transdutor adaptado com extensor de ondas tipo exponencial, constituindo um transdutor de ponto seco.

Análises teóricas e práticas dos extensores mostraram que o tipo, a forma, bem como o material de que são feitos determinam sua característica acústica e, conseqüentemente, seus campos de aplicação.

Lorenzi (2000, p.91) descreveu que os transdutores de pontos secos são ferramentas novas para aplicação do ultra-som. Seu uso permite aumentar a precisão dos dados, pois se pode analisar a estrutura ponto a ponto (número elevado de repetições) por ser mais rápido e barato. Lorenzi (2000, p.78) ainda escreveu: “esta metodologia é mais sensível e tem um menor número de erros que a metodologia normalizada utilizada no país.”

Nesvijski (2003) reportou que transdutores de pontos secos geram ondas esféricas nos materiais em teste, sem direção definida de propagação. Sua aplicação, para determinadas finalidades, requer a otimização do ângulo de inclinação, podendo alterar o resultado consideravelmente. As características das ondas geradas também podem se alterar dependendo do contato com a superfície do material. Assim, durante as medições, estes transdutores devem ser pressionados com a mesma força sobre a superfície em teste. Shevaldykin *et al.* (2003) descreveram que tanto ondas longitudinais quanto transversais podem ser geradas a partir deles.

Segundo Chung & Law (1983 *apud* EVANGELISTA, 2002, p.22), os transdutores de pontos secos apresentam menores níveis de energia, restringindo a distância entre os transdutores, além da qual os pulsos não são mais recebidos.

Essa redução de energia foi explicada por Carmo (2005)¹ da seguinte maneira: ondas sônicas nada mais são do que energia que se transfere de uma molécula a outra. Considerando um transdutor de ponto seco constituído por um extensor de ondas cônico, a secção transversal desse extensor de maior área (porção próxima ao cristal piezelétrico gerador das ondas) apresenta muitas moléculas para a transferência de energia. Já na porção oposta, na qual ocorre o contato do ponto seco com o material em teste, devido à redução da secção transversal, o número de moléculas responsáveis pela transferência da energia é muito menor. Portanto, não ocorre a concentração da energia devido à redução do diâmetro do cone, mas sua diminuição, uma vez que também ocorre redução do número de moléculas responsáveis pela transferência de energia.

Lorenzi (2000) analisou o uso desse tipo de transdutor em amostras cilíndricas de concreto (15 e 30 cm de diâmetro e altura, respectivamente) no seu sentido vertical (longitudinal) e horizontal. Observou que o ultra-som se propagou com velocidades médias de 3014 e 2873 m/s, para o sentido longitudinal e horizontal, respectivamente. O autor descreveu que essa diferença existente entre os sentidos deve-se à anisotropia do cilindro e ao fato de terem ocorrido diferentes ondas. Deste modo, citou que a estimativa de módulos dinâmicos de elasticidade, através do uso do ultra-som, requer identificação da onda para escolha correta da fórmula a ser usada no cálculo, que depende da velocidade da onda.

2.3.3 Fatores que influenciam a propagação das ondas ultra-sônicas na madeira

A velocidade de ondas ultra-sônicas transitando em um material sólido depende da densidade e das propriedades elásticas desse material. A equação simplificada da propagação de uma onda no material madeira pode ser representada pela Equação 4.

$$V_i = \sqrt{\frac{MOE_i}{d}} \quad (4)$$

Onde: V= Velocidade de propagação da onda (m/s);
 MOE = Módulo de elasticidade dinâmico da madeira (Pa);
 d = Densidade da madeira (kg/m³);
 i= Plano anatômico (longitudinal, tangencial ou radial).

¹ Informação pessoal

O emprego do ultra-som na avaliação de madeiras, utilizando equipamentos portáteis, pode ter grande aplicação prática do ponto de vista industrial.

Pesquisadores como Miná *et al.* (2004), González *et al.* (2001), Carrasco & Azevedo Júnior (2003), Shimoyama (2005), Bartholomeu (2001), Nogueira (2003), Puccini (2002) e Picó *et al.* (2004) comprovaram a eficiência do método ultra-sônico para determinar parâmetros físico-mecânicos de madeiras, sendo possível estabelecer classes de qualidade. Dyk & Rice (2005), Brashaw *et al.* (2004), Gonçalves & Costa (2002), Simpson (1998) e Simpson & Wang (2001) correlacionaram a velocidade ultra-sônica ao teor de umidade da madeira, podendo este ponto ser explorado para o monitoramento da secagem.

Na madeira, alguns fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas são: propriedades anatômicas, físicas (densidades 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).

a) Propriedades anatômicas

A madeira é um material tridimensional, e sua anatomia pode ser descrita através da observação em três secções: transversal, longitudinal-tangencial e longitudinal-radial. A secção transversal corresponde ao plano de corte perpendicular aos elementos axiais (longitudinais) ou ao eixo da árvore. A secção longitudinal-tangencial corresponde ao plano de corte perpendicular aos raios ou tangencial às camadas (anéis) de crescimento. Já a secção longitudinal-radial corresponde ao plano de corte paralelo aos raios ou perpendicular aos anéis de crescimento.

A velocidade de propagação do ultra-som é mais elevada na direção longitudinal, seguida pela direção radial e, posteriormente, pela tangencial. Essa diferença de velocidade segundo os eixos da madeira pode ser explicada pela estrutura anatômica do material (GONÇALVES & COSTA, 2002; GONÇALEZ *et al.*, 2001 e PUCCINI, 2002).

Gonçalez *et al.* (2001, p. 88-89) descreveram que, na direção longitudinal, as células da madeira (principalmente as fibras e os vasos) são as principais responsáveis pela condução dos sinais ultra-sonoros. Esses sinais encontram, ao longo das fibras e dos vasos, condições favoráveis de propagação, pois as microfibrilas de celulose são mais alinhadas, traduzindo-se em um amortecimento de ondas mais suave. Na direção radial, a continuidade do sinal é assegurada principalmente pelos raios lenhosos presentes em quantidades bem menores em relação às fibras. Logo, os valores da velocidade radial são mais baixos que os da velocidade longitudinal. A direção tangencial é a mais desfavorável para a propagação das ondas ultra-sonoras, pois o sinal não encontra nenhum substrato contínuo de propagação. A cada passagem de uma célula a outra, o sinal perde energia devido ao intercalamento de paredes celulares e lume.

Shimoyama (2005, p.30-31) fez referência às dimensões de fibras. Quanto maior a espessura celular, maior a área ou o caminho contínuo para propagação das ondas que se dissipam rapidamente. Em madeiras porosas, compostas por fibras com acentuados diâmetros de lume, os espaços vazios tornam-se barreiras para a propagação das ondas, reduzindo significativamente a velocidade. Quanto às relações entre a largura das fibras e a propagação das ondas, em geral, as fibras com maior diâmetro de lume são as mais largas e, conseqüentemente, relacionam-se de forma negativa com a velocidade.

No que diz respeito ao comprimento de fibras, Bucur (1988 *apud* SHIMOYAMA, 2005, p.31) descreveu que, se a propagação for no sentido longitudinal, as ondas percorrem a parede da fibra, ao longo de seu comprimento e, ao final, apresentam leve queda entre uma fibra e outra, quando então tomam a direção de percurso. Dessa forma, quanto maior o comprimento da fibra, maior o caminho contínuo da parede a ser percorrido, propiciando maior velocidade.

b) Densidade ou massa específica da madeira

Define-se densidade básica da madeira como sendo a massa específica convencional obtida pela razão entre a massa seca (determinada a 0% de umidade) e respectivo volume após saturação da amostra em água. Já a densidade aparente é expressa pela relação entre a massa e o volume da madeira a uma determinada

umidade. No caso mais usual, a densidade aparente é determinada à umidade de referência de 12%.

A densidade da madeira é variável dentro do tronco da árvore, tanto no sentido longitudinal como no sentido transversal. Para as coníferas, verifica-se aumento da densidade a partir da medula em direção à casca. Para as folhosas, normalmente, o valor máximo encontra-se próximo à medula. No sentido da base para a copa, de maneira geral, encontram-se valores máximos próximos à base do tronco e valores menores à medida que se retiram amostras próximas à copa (DURLO, 1991, p.26).

Conforme Oliveira & Sales (2005), a densidade é um dos parâmetros mais utilizados para avaliar as propriedades mecânicas da madeira, afetando a velocidade das ondas consideravelmente. Estes autores descrevem estudos os quais relacionam a velocidade ultra-sônica com esse parâmetro apresentam diferentes relações: a velocidade aumenta, diminui ou se mantém inalterada com o aumento da densidade.

As madeiras mais densas são as que apresentam maior teor de substância madeira, portanto, menores espaços vazios, propiciando maior velocidade de propagação das ondas. As madeiras mais porosas, portanto, menos densas, apresentam menor velocidade de propagação das ondas (SHIMOYAMA, 2005, p.32).

Para Carrasco & Azevedo Júnior (2003, p.186), não é propriamente o aumento da densidade que aumenta a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas em madeiras. Ao contrário, o aumento da densidade deveria provocar a redução da velocidade de propagação, visto que ele é, conforme demonstrado pela Equação 4, inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade. O aumento da densidade pode decorrer através da maior deposição de celulose na face interna da parede celular, a qual acarreta aumento mais significativo nos valores de rigidez do que nos valores de densidade da madeira. Dessa forma, mesmo que haja aumento da densidade, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo apreciável aumento da rigidez. A densidade da madeira, assim como a rigidez, é sensivelmente afetada pelo teor de umidade. Todavia, o efeito da umidade na rigidez é também bem mais expressivo do que na densidade.

Bartholomeu (2001, p.19), analisando duas espécies de dicotiledôneas - cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.) e *Eucalyptus citriodora* Hook. - e uma de conífera

(*Pinus elliottii* Engelm.), observou pequeno aumento da velocidade com o aumento da densidade aparente. A explicação dada pelo autor é que a transferência de energia ultra-sônica está mais associada à estrutura celular da madeira do que à sua densidade aparente.

Wang *et al.* (2003), analisando madeira de taiwania (*Taiwania cryptomerioides* Hay.), observaram que, no sentido longitudinal, a velocidade tendeu a diminuir linearmente com o aumento da densidade, e, no sentido radial, tendeu a aumentar.

c) Propriedades morfológicas

-Percentual de lenhos:

Em regiões com estações do ano bem definidas, as árvores apresentam, na primavera e verão, um rápido crescimento, que pode diminuir ou cessar no outono e inverno. Estes fatores dão origem aos anéis ou camadas de crescimento. Num anel, a madeira inicialmente formada recebe o nome de lenho inicial ou primaveril. Já a madeira que se formou no fim do período de crescimento é denominada de lenho tardio ou de verão (Figura 6B).

No lenho tardio, a velocidade das ondas é superior, quando comparado ao lenho inicial, pois é composto por fibras mais espessas, de menores diâmetros de lume, apresentando maior densidade básica. O lenho inicial, mais poroso devido às fibras com acentuados diâmetros de lume, apresenta relação negativa com a velocidade de propagação das ondas (SHIMOYAMA, 2005, p.32).

Feeney *et al.* (1998) analisaram a variação da densidade e da velocidade de propagação das ondas, no sentido longitudinal, de amostras retiradas no sentido medula-casca. Observaram que a variação da velocidade correspondeu à variação da densidade: alta velocidade no lenho tardio e baixa no lenho inicial.

- Madeira juvenil e adulta:

Conforme Ballarin & Palma (2003, p.372), as características da madeira formada próxima à medula diferem das características daquela próxima à casca. A porção de madeira próxima à medula, correspondente aos primeiros anéis formados, é denominada lenho juvenil. Os anéis posteriores vão assumindo, gradualmente, as características de lenho adulto, denominação referente à porção da madeira próxima

à casca, que apresenta células estabilizadas em crescimento. A demarcação entre lenho juvenil e adulto não é clara, devido às mudanças graduais nas células (Figura 6A).

A madeira adulta apresenta maior percentual de lenho tardio, fibras mais espessas, menor diâmetro de lume e é mais densa, proporcionando maior velocidade das ondas de tensão. O contrário ocorre com a madeira juvenil, da região interna do tronco (SHIMOYAMA, 2005, p.33).

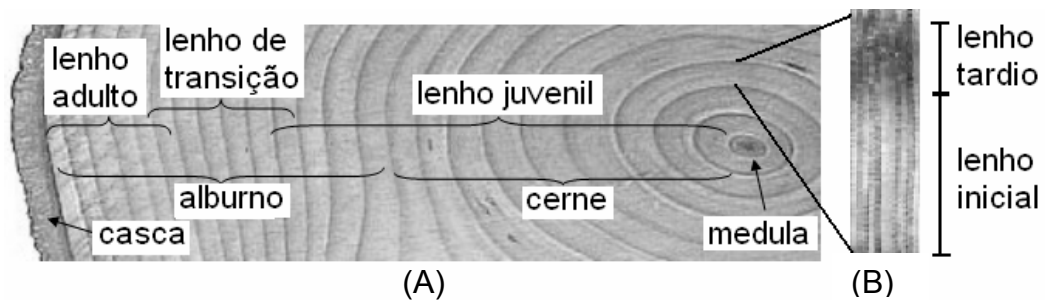


Figura 6 - Desenho esquemático da constituição da madeira (A) com detalhe do anel de crescimento (B).

Ballarin & Nogueira (2005), usando transdutores planos de 45 kHz e madeira de *Pinus taeda* L., observaram que, na madeira adulta, a velocidade de propagação apresentou-se superior à madeira juvenil em 12,3%. As velocidades médias registradas foram de 5421 e 4827 m/s para a madeira adulta e juvenil, respectivamente.

- Ângulo de grã:

O ângulo de inclinação da grã é a medida do desvio dos tecidos componentes da madeira, especialmente das fibras, em relação ao eixo longitudinal do tronco ou de peças de madeira. Essa propriedade tem importante efeito sobre o valor e utilidade da madeira, exercendo influências sobre as resistências mecânicas. Um ângulo de grã de 0° ocorre quando as fibras apresentam-se posicionadas paralelas ao eixo longitudinal do tronco.

Conforme Shimoyama (2005, p.33), quanto maior o ângulo entre a direção da onda e a direção da grã, menor é a velocidade da onda, devido ao maior tempo do percurso. Puccini (2002) constatou que, para pequenos valores de inclinação da grã (menores que 6°), a velocidade não é significativamente afetada.

d) Teor de umidade da madeira

As constantes de propagação de ondas ultra-sônicas estão intrinsecamente relacionadas às propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Em madeiras, particularmente, essas propriedades são sensivelmente afetadas pelo conteúdo de umidade. Deste modo, alterações no conteúdo de umidade influenciam significativamente a propagação de ondas (CARRASCO & AZEVEDO JÚNIOR, 2003, p.184).

A relação existente entre a velocidade de propagação, a correspondente atenuação e o conteúdo de umidade pode ser vista na Figura 7.

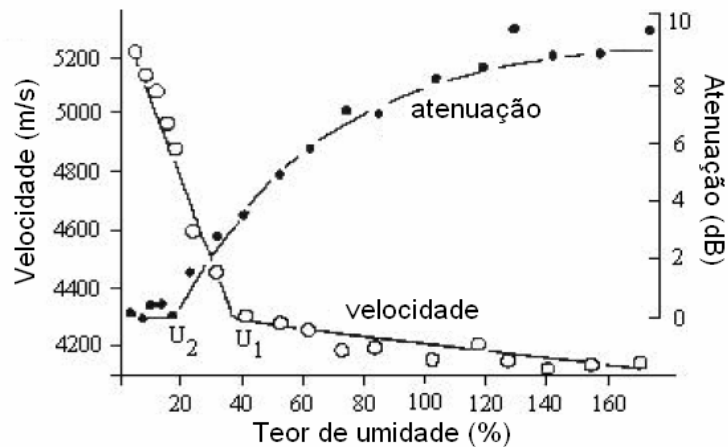


Figura 7 - Velocidade ultra-sônica ao longo da direção longitudinal e a correspondente atenuação em função do conteúdo de umidade para Metasequóias. Fonte: Bucur (1995, p.200 *apud* CARRASCO & AZEVEDO JÚNIOR, 2003, p.185).

Conforme descrito por Carrasco & Azevedo Júnior (2003), a velocidade diminui à medida que o conteúdo de umidade aumenta; já a atenuação aumenta conforme aumenta o conteúdo de umidade. O máximo valor de velocidade e o mínimo valor de atenuação são obtidos quando a madeira encontra-se seca. Uma análise cuidadosa permite observar que a velocidade de propagação decresce rapidamente conforme o conteúdo de umidade aumenta, até o ponto de saturação U_1 , a partir do qual, a variação é muito pequena. Concluíram que a velocidade de propagação é consideravelmente influenciada pela existência de água de constituição, enquanto a atenuação é sensivelmente influenciada pela presença de água livre. O ponto crítico U_1 corresponde ao ponto de saturação das fibras, e o

ponto crítico U_2 , ao valor de umidade a partir do qual os elementos anatômicos começam a reter água livre.

Estes autores analisaram ainda a variação da rigidez em função do conteúdo de umidade. Assim como na variação da velocidade em função da umidade, a variação da rigidez com a umidade possui um ponto crítico, correspondente também ao PSF. Para valores de umidade abaixo desse ponto, a rigidez diminui conforme o conteúdo de umidade aumenta. Entretanto, para valores de umidade superiores ao PSF, a rigidez aumenta à medida que o conteúdo de umidade aumenta, devido, principalmente, ao fato de a densidade da madeira aumentar com o aumento da umidade e à presença de água livre, que está relacionada à porosidade da madeira.

Oliveira *et al.* (2005a) e Simpson (1998) observaram a influência do gradiente de umidade sobre a velocidade de propagação das ondas. Durante a secagem, constataram maior velocidade nas bordas do que no centro da peça, parte esta que mantém o maior teor de umidade. Portanto, durante a secagem, a tendência do som é procurar o caminho mais seco para se difundir.

Uma vez que a velocidade do som na madeira varia em função do seu teor de umidade, pode-se explorar o uso da velocidade do som para monitorar o teor de umidade da madeira durante sua secagem.

e) Dimensões da amostra

A geometria adequada da amostra é essencial para a determinação correta da velocidade ultra-sônica em madeiras.

Puccini (2002, p.21-25) e Oliveira *et al.* (2005b) descreveram a tendência de diminuição da velocidade longitudinal com o aumento da relação entre base e altura (relação b/h) das amostras (Figura 8A). Outro aspecto refere-se à relação entre a distância a ser percorrida pela onda e o seu comprimento de onda, isto é, relação L/λ (Figura 8B).

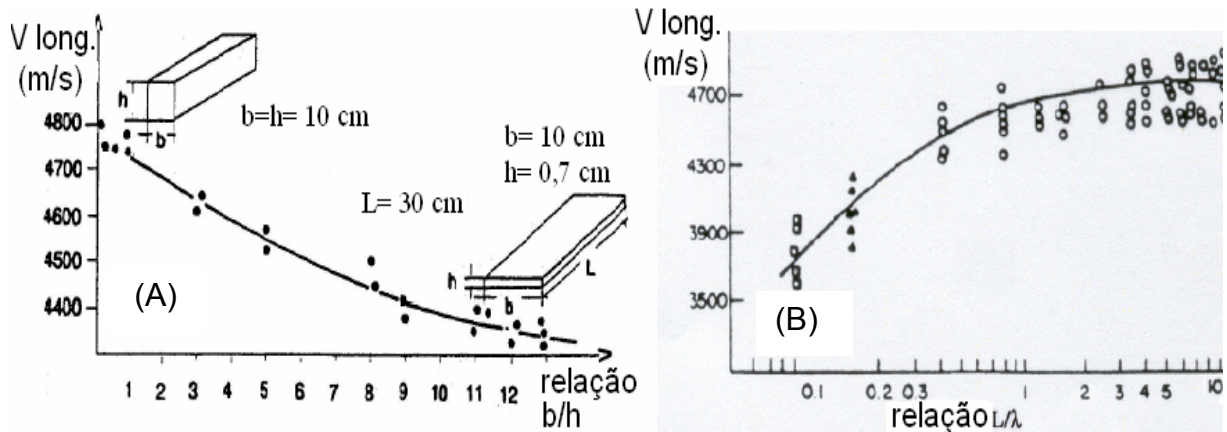


Figura 8 - Influência da seção transversal (A) e da relação L/λ (B) sobre a velocidade ultra-sônica, no plano longitudinal, em amostras de *Abies Alba* Mill. e *Fagus sylvatica* L., respectivamente. Fonte: Adaptado de Bucur (1984 *apud* BARTHOLOMEU, 2001, p.16-17).

Pela Figura 8A, observa-se claramente a redução da velocidade de propagação das ondas com o aumento da relação b/h . Na Figura 8B, conforme dado por Bucur (1984 *apud* PUCCINI, 2002, p.25), a velocidade longitudinal apresentou uma maior variação até a relação $L/\lambda = 1$, mantendo-se constante posteriormente. Bartholomeu *et al.* (2003), no entanto, observaram velocidade constante para $L/\lambda > 5$.

Conforme Frederick (1965 *apud* PUCCINI, 2002, p.22), para que a propagação da onda se dê sem interferências, é necessário que a amostra ensaiada tenha comprimento infinito, ou muitas vezes superior ao comprimento da onda. Portanto, deve-se evitar a propagação de reduzidos números de ondas no material em ensaio.

Segundo Bartholomeu *et al.* (2003), a velocidade de propagação é bastante influenciada pelo comprimento das peças devido à conversão da onda de volume pura em onda de superfície.

Nogueira (2003), em madeira de *Pinus taeda* L., apresentando 12% de umidade e seção transversal 4 x 4 cm, observou que a velocidade média, no plano longitudinal, para as amostras de 12 cm de comprimento (5500 m/s) foi superior àquele observado nas amostras de 45 cm de comprimento (5130 m/s), tanto na madeira juvenil quanto na adulta.

Bartholomeu (2001) analisou amostras de dimensões 0,05 x 0,05 x 0,15 m e vigas estruturais de dimensões 0,06 x 0,12 x 2,00 m. Observou que a velocidade de propagação do ultra-som foi maior nas amostras do que nas vigas. Uma das

hipóteses utilizadas pelo autor para explicar esse fenômeno foi a influência da geometria da seção transversal.

f) Freqüência do transdutor

Bartholomeu (2001, p.18-19) e Puccini (2002, p.26-27) descreveram alguns trabalhos que avaliam os efeitos das variações de freqüência na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas. No entanto, demonstram não haver consenso.

Oliveira *et al.* (2005b, p.201), trabalhando com ondas de diferentes freqüências (54 e 150 kHz) e com amostras de diferentes dimensões, descreveram a alteração do comprimento de onda com relação à freqüência, devido à relação dada pela Equação 3. Assim, os comprimentos de onda utilizados foram 8,3 e 3,0 cm, respectivamente, para as freqüências de 54 e 150 kHz. Afirmam que, quando utilizadas peças de dimensões superiores ao comprimento de onda, há apenas a propagação da onda longitudinal de volume; já quando utilizadas peças de dimensões próximas ao comprimento de onda, a espessura de cada peça passa 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.

Da mesma forma, Bartholomeu (2001) relaciona a freqüência com o comprimento da onda. O equipamento de ultra-som utilizado em seu trabalho mostrou-se eficiente para uso em peças com comprimento mínimo de 2 m. Para amostras de dimensões reduzidas, este equipamento de baixa freqüência (45 kHz) não é o mais indicado, já que o número reduzido de ondas que se propagam no interior da peça interfere na medição exata da velocidade. Conforme o autor, para amostras de 0,15 m de comprimento, seria ideal a utilização de equipamento com freqüência igual ou superior a 150 kHz.

g) Defeitos da madeira

Puccini (2002) analisou a influência da presença de nó e medula e observou que ambos os defeitos influenciaram significativamente a velocidade de propagação

das ondas, reduzindo-a. Sendo a presença dos nós o fator de maior influência, constatou que quanto maior o somatório dos diâmetros dos mesmos, menor a velocidade. Com relação à medula, observou que a velocidade média para madeiras com presença de medula foi 13% inferior à obtida na madeira sã.

Bartholomeu (2001, p.53.) relacionou os defeitos ao tamanho das amostras. Peças de tamanho maior sempre tenderão a apresentar maior probabilidade de ocorrência de defeitos quando comparadas a peças menores.

Fuller *et al.* (1995) observaram grande redução da velocidade de propagação das ondas em tábuas de carvalho vermelho que, após a secagem, apresentaram rachaduras superficiais e internas. Consideram promissora esta técnica para o monitoramento da qualidade durante a secagem.

Gonçalves & Puccini (2000) compararam a inspeção visual e a velocidade de percolação das ondas em amostras defeituosas. Concluíram que o ultra-som é capaz de detectar defeitos não-visíveis. Isso permite uma maior eficiência do método quando comparado à avaliação visual. Segundo Sandoz (1989 e 1991 *apud* GONÇALVES & PUCCINI, 2001, p.320), a análise visual apresenta 45% de erro, enquanto a sônica, apenas 6%. Continuando seu estudo, Puccini *et al.* (2002) concluíram que, quando a velocidade longitudinal apresentava-se inferior a 6000 m/s, havia 74% de probabilidade de que as peças possuíam algum defeito.

h) Temperatura

Green *et al.* (1999a) descreveram que a velocidade do som diminui com o aumento da temperatura e teor de umidade devido à influência destas duas variáveis sobre o módulo de elasticidade e densidade. De modo geral, as propriedades mecânicas da madeira decrescem quando aquecidas e aumentam quando esfriadas. Submetidas à umidade constante e temperatura inferior a 150°C, as propriedades mecânicas comportam-se linearmente com a variação de temperatura (Figura 9).

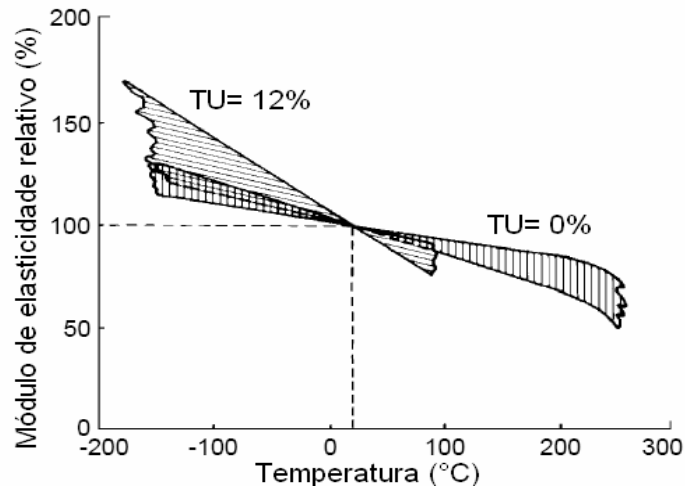


Figura 9 - Efeito imediato da temperatura, sob dois teores de umidade (TU), em relação ao módulo de elasticidade paralelo à grã. Largura das faixas representa a variabilidade entre diversos estudos. Fonte: Adaptado de Green *et al.* (1999a, p.36)

Dyk & Rice (2005) analisaram madeira de *Picea* sp., sob distintos níveis de umidade, submetidas a diferentes temperaturas (24; 10; 0 e -6,8°C). Observaram que a velocidade das ondas ultra-sônicas 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-sonora 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.* (1999b) e Bekhta *et al.* (2000), quando do aumento da umidade relativa do ar e da temperatura de diversos compósitos de madeira.

Segundo Dakota Ultrasonics Corporation (2005, p.22), devido ao efeito da temperatura sobre a velocidade, é importante calibrar o aparelho emissor de ultrassom para a mesma temperatura do material a ser testado. Altas temperaturas podem ainda danificar os transdutores e trazer problemas para vários tipos de acoplantes. A maior parte dos transdutores podem operar em temperaturas que varia de -17 a 82°C. Transdutores e acoplantes especiais são necessários para uso em temperaturas superiores.

i) Espécies de madeira

Uma vez que o aumento do comprimento das fibras favorece a propagação das ondas, na direção longitudinal, a contínua e uniforme estrutura das coníferas apresenta baixa dissipação de energia, favorecendo, portanto, o aumento da velocidade das ondas quando comparada às folhosas (BUCUR *et al.*, 2002, p.539 e OLIVEIRA *et al.*, 2005a, p.11).

Costa (2004) adotou tanto coníferas quanto folhosas em seu estudo. Utilizando transdutores exponenciais de frequência 45 kHz, obteve o gráfico mostrado na Figura 10.

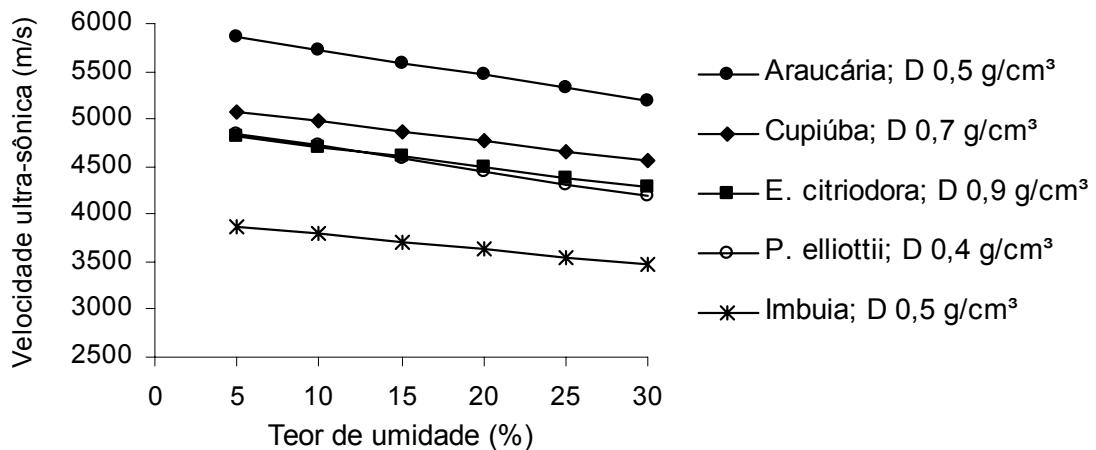


Figura 10 - Velocidades de propagação das ondas ultra-sônicas em função do teor de umidade para diferentes espécies, considerando o plano longitudinal (D= densidade). Fonte: Adaptado de Costa (2004, p.41)

Ocorreu uma variação da velocidade de propagação das ondas de modo semelhante para todas as espécies (aumento da velocidade com a redução do teor de umidade, sendo esta relação mais significativa abaixo do PSF). Concluiu ainda que a velocidade de propagação das ondas está relacionada muito mais com a estrutura anatômica da espécie do que com a densidade, principalmente na faixa de umidade correspondente à madeira verde até o PSF. Nesta faixa de umidade, a propagação da onda ocorre tanto na parede celular quanto na água, reduzindo assim a velocidade. A densidade básica seguiu a relação: *Eucalyptus citriodora* Hook. > *Goupia glabra* Aubl. (cupiúba) > *Ocotea porosa* Nees (imbuia) > *Araucaria angustifolia* Bertol. (araucária) > *Pinus elliotii* Engelm., com 0,94; 0,70; 0,52; 0,46 e

0,40 g/cm³, respectivamente. No entanto, as maiores velocidades de propagação foram obtidas para a araucária, seguida da cupiúba, eucalipto, pinus e, por último, para a embuia. A velocidade do ultra-som foi semelhante para o pinus e eucalipto, apesar da grande diferença de densidade. No trabalho, o autor não esclareceu a posição de retirada das amostras na árvore, o que pode ter influenciado consideravelmente estes resultados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta e preparo do material

Neste estudo, foram utilizadas madeiras de duas espécies florestais: *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. As árvores foram obtidas de povoamentos localizados no Campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e possuíam aproximadamente 30 e 12 anos de idade, respectivamente.

As árvores foram selecionadas ao acaso, dentre as que apresentavam diâmetro à altura do peito (DAP) mínimo de 40 cm, retidão de fuste e melhores condições fitossanitárias. Para o pinus, utilizaram-se três árvores, nas quais foram retiradas as duas primeiras toras de cada árvore, com 2,50 m de comprimento cada. Para o eucalipto, utilizaram-se duas árvores, das quais foram retiradas as três primeiras toras, de 2,50 m. Deste modo, utilizaram-se seis toras de cada uma das espécies.

Na serraria, as toras foram seccionadas em pranchas de 3,5 cm de espessura. Os cortes, com serra-de-fita, foram feitos paralelamente à medula das toras. As pranchas foram posteriormente transformadas em tábuas, os quais foram seccionados transversalmente para a obtenção das amostras de secagem e secções de umidade. Após o corte das árvores, estes procedimentos foram executados o mais rápido possível, de modo a evitar a perda excessiva de umidade da madeira.

Conforme mostrado na Figura 11, de cada tora retiraram-se duas pranchas centrais, uma localizada imediatamente acima e outra abaixo da medula, ambas com 3,5 cm de espessura.

No Laboratório de Produtos Florestais (LPF/UFSM), 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, que foi a primeira espécie processada, mediu-se inicialmente a partir da medula, 5 cm em direção à casca, para ambos os lados. Posteriormente, mediram-se os 10 cm, correspondentes à largura das tábuas, e então, foi descartado o restante. Já nas pranchas de eucalipto, devido às rachaduras que ocorreram na região da medula, mediram-se os 5 cm a partir da casca, marcando-se posteriormente os 10 cm correspondentes à largura das tábuas, e a região mais próxima da medula foi descartada.

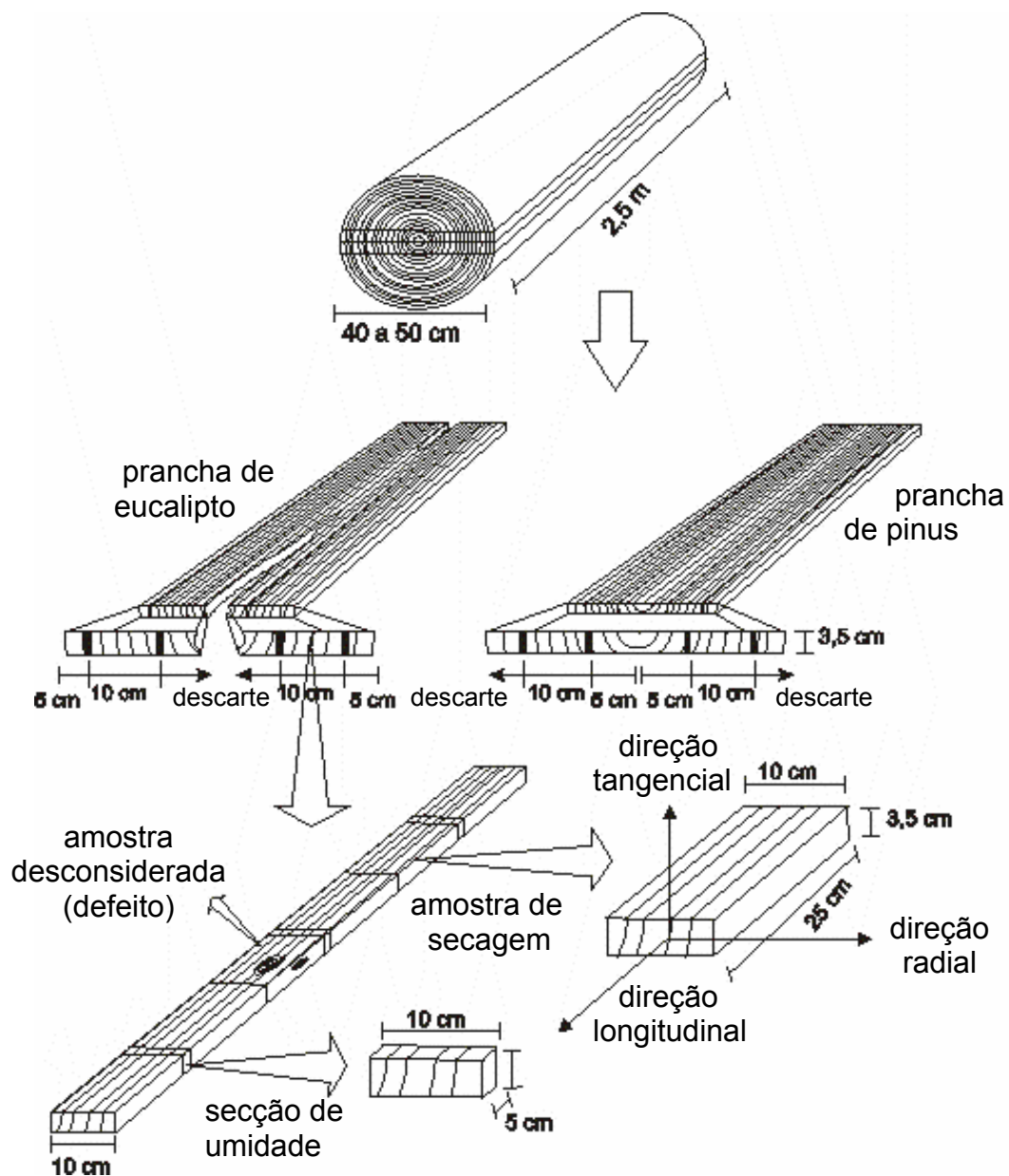


Figura 11 - Esquema de corte das toras até a confecção das amostras de secagem e secção de umidade.

As tábuas com espessura excedente foram aplainadas até atingirem a espessura nominal de 3,5 cm. Após isso, foram seccionadas, em seu sentido transversal, obtendo-se amostras de secagem de 25 cm de comprimento. Dos extremos das amostras foram retiradas secções de 3,5 x 5,0 cm para a obtenção do teor de umidade inicial. As partes das tábuas que apresentavam defeitos (principalmente nós, rachaduras e desvio excessivo da grã) foram descartadas.

Portanto, as amostras de secagem apresentaram dimensões nominais de 25 cm de comprimento, 10 cm de largura e 3,5 cm de espessura, numa relação $b/h=2,9$.

Todos os cortes foram feitos no esquadro, objetivando que as superfícies pudessem ficar o mais paralelo possível.

A escolha das dimensões das amostras de secagem foi definida em função da capacidade do aparelho emissor de ultra-som. Uma distância muito grande entre os transdutores tende a reduzir a precisão dos dados, devido ao enfraquecimento demasiado da onda sonora. Testes preliminares indicaram ser viável a utilização desta distância. Já a adoção da espessura deu-se em virtude da secção do transdutor de face plana, que apresentava 2,5 cm de diâmetro. Conforme Puccini (2002, p.43), se parte do transdutor plano ficar fora da secção transversal da peça, ocorre formação de ondas, interferindo na leitura da velocidade de propagação.

A determinação do número de amostras utilizadas baseou-se em experimentos realizados por outros pesquisadores para trabalhos semelhantes, os quais levaram em consideração os valores médios e variância dos dados obtidos, assim como determinado nível de confiança.

3.2 Tratamentos avaliados

Foram obtidos, para as espécies pinus e eucalipto, um total de 169 e 167 amostras de secagem, respectivamente. Esta quantidade total, para cada espécie, foi dividida aleatoriamente e submetida a 3 temperaturas de secagem: 20, 40 e 70°C. Apesar de a secagem do pinus ocorrer em temperaturas superiores a estas, evitou-se elevar a temperatura devido a possíveis danos que ela poderia ocasionar aos transdutores, uma vez que eram impróprios para serem utilizados nessas condições.

Assim, as amostras de secagem obtidas das duas espécies, foram submetidas à secagem sob três temperaturas constantes e analisadas com dois tipos de transdutores. Foram avaliados transdutores de faces planas e transdutores de pontos secos, utilizando-se as mesmas amostras para tal operação. Portanto, os tratamentos basearam-se na combinação das duas espécies, três temperaturas de secagem e dois tipos de transdutores, constituindo um delineamento fatorial (Tabela 1).

Tabela 1 - Tratamentos avaliados durante o experimento.

Tratamento	Espécie	Temperatura de secagem (°C)	Tipo de transdutores	Número de repetições ¹
1	<i>Pinus elliottii</i>	20	faces planas	50
2	<i>Pinus elliottii</i>	20	pontos secos	50
3	<i>Pinus elliottii</i>	40	faces planas	50
4	<i>Pinus elliottii</i>	40	pontos secos	50
5	<i>Pinus elliottii</i>	70	faces planas	51
6	<i>Pinus elliottii</i>	70	pontos secos	51
7	<i>Eucalyptus grandis</i>	20	faces planas	55
8	<i>Eucalyptus grandis</i>	20	pontos secos	55
9	<i>Eucalyptus grandis</i>	40	faces planas	55
10	<i>Eucalyptus grandis</i>	40	pontos secos	55
11	<i>Eucalyptus grandis</i>	70	faces planas	54
12	<i>Eucalyptus grandis</i>	70	pontos secos	54

Onde: 1- Para cada combinação entre espécie e temperatura de secagem, analisaram-se as mesmas amostras com ambos os tipos de transdutores.

3.3 Determinação do teor de umidade da madeira

As amostras de secagem e as secções de umidade, depois de confeccionadas, foram imediatamente pesadas com balança eletrônica de precisão, com sensibilidade de 0,01 g, para a obtenção do peso úmido inicial (Figura 12).

Logo após a pesagem, as secções de umidade foram secas em estufa, a 102°C, para a obtenção do peso seco e posterior determinação do teor de umidade (TU). Para todas as situações utilizadas neste trabalho, o TU refere-se à base seca, calculada conforme a Equação 1.

Obteve-se o TU médio de cada tábua pela média aritmética de suas secções de umidade correspondentes. Este valor médio foi considerado como o TU inicial das amostras de secagem oriundas desta tábua.

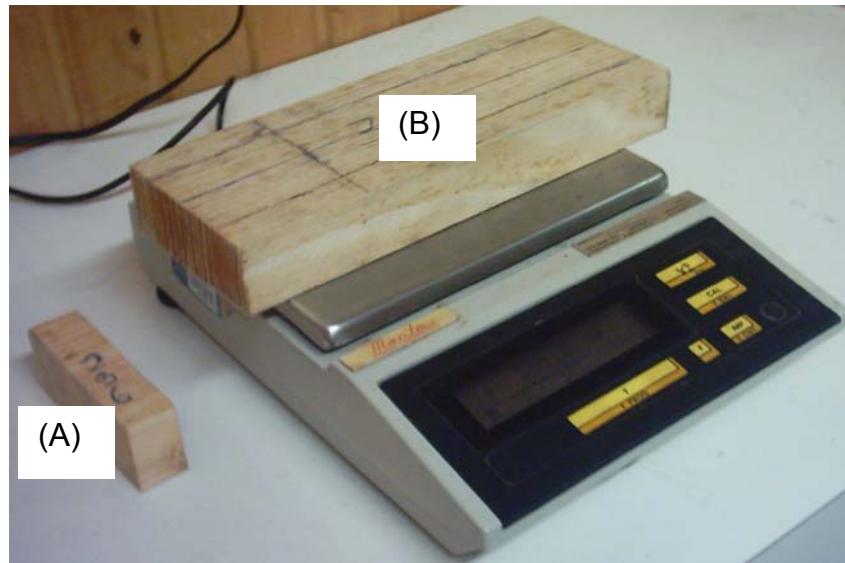


Figura 12 - Pesagem das secções de umidade (A) e amostras de secagem (B) para a obtenção do peso úmido inicial.

3.4 Secagem da madeira

Durante o processo, as amostras de secagem eram 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 TU atual.

A secagem correspondente à temperatura de 20°C foi efetuada em uma câmara climatizada, com umidade relativa constante de 65%. Já para a secagem a 40 e 70°C, utilizou-se uma estufa com circulação forçada de ar (Figura 13).

Com o TU inicial, obtido a partir das secções de umidade, e o peso úmido inicial de cada amostra de secagem, foi estimado o peso correspondente ao TU base seca de 12 %, utilizando-se a Equação 2. Para efetuar o cálculo, isolou-se o $P_{a(12\%)}$ e considerou-se o $TU_{a(12\%)}$ como sendo de 12%. Portanto, a secagem de cada amostra foi interrompida quando as pesagens sucessivas atingiram o peso correspondente ao TU aproximado de 12%.

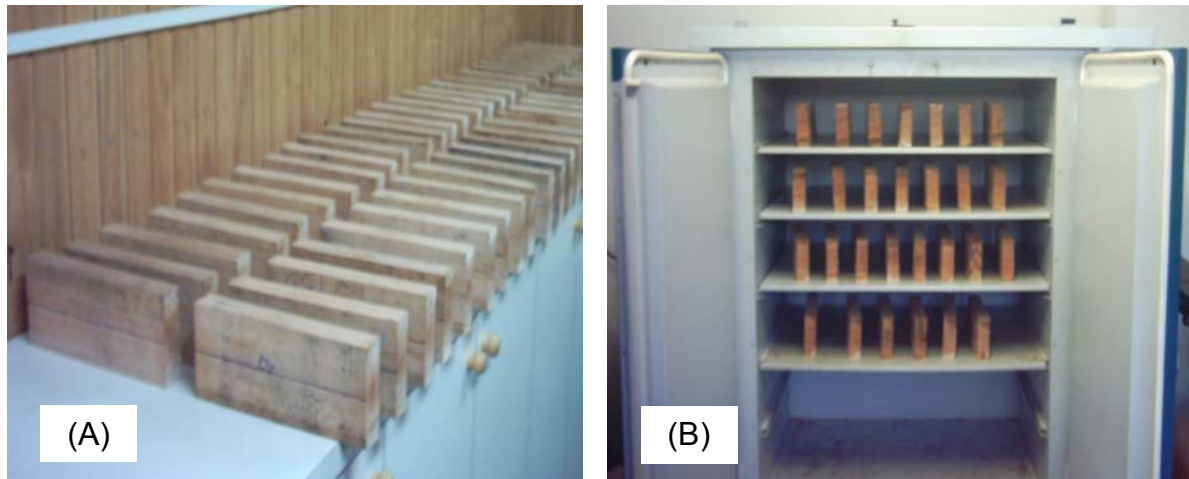


Figura 13 - Secagem das amostras na câmara climatizada (A) e na estufa com circulação de ar (B).

3.5 Medição do tempo de deslocamento da onda ultra-sônica

3.5.1 Características do aparelho de ultra-som utilizado

Utilizou-se um equipamento PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Testing*), fabricado pela C.N.C. Electronic, Inglaterra. Este aparelho mede diretamente o tempo de propagação da onda, em microssegundos (μs). Os diferentes tipos de transdutores foram acoplados, individualmente, no mesmo aparelho emissor. O conjunto era ainda composto por um cilindro calibrador metálico, que possui 5 e 16 cm de diâmetro e comprimento, respectivamente. A Figura 14 mostra o aparelho emissor de onda ultra-sonora e seus componentes.

É importante observar que os transdutores propriamente ditos (carcaças dentro das quais se situam os cristais piezelétricos) são iguais, com diâmetro útil de 2,5 cm e de frequência fixa de aproximadamente 50 kHz. A denominação ponto seco refere-se àqueles com presença de extensores e arranjados num ângulo aproximado de 30° com relação à normal (Figura 15).

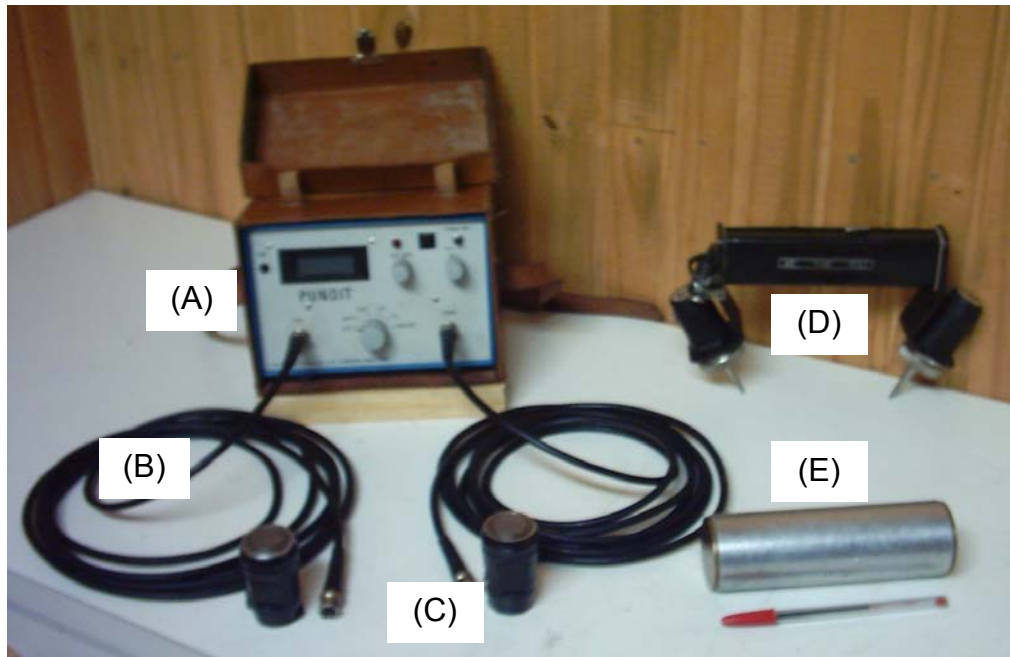


Figura 14 - Aparelho emissor de onda ultra-sônica (A) e seus componentes: cabos coaxiais (B), transdutores de faces planas (C), transdutores com pontos secos (D) e cilindro calibrador metálico (E).

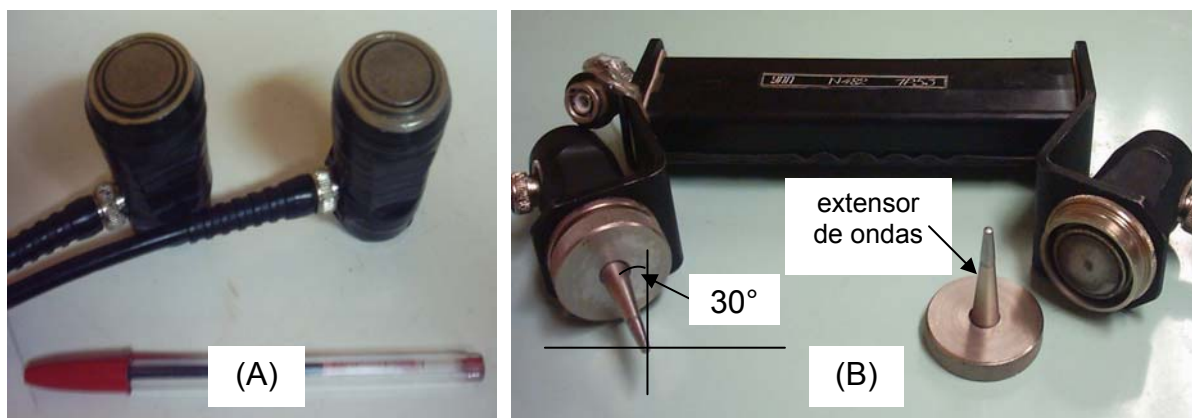


Figura 15 - Detalhes dos transdutores utilizados: faces planas (A) e de pontos secos (B).

3.5.2 Calibração do aparelho de ultra-som

Antes de cada série de ensaio, usando-se os transdutores de faces planas, fez-se a calibração do aparelho emissor de ultra-som por meio do cilindro calibrador metálico, fornecido juntamente com o equipamento. Este cilindro possui um tempo de propagação fixo ($26 \mu\text{s}$). Imediatamente antes de cada uma destas calibrações, aplicou-se uma fina camada de vaselina (acoplante) às faces dos transdutores, para

evitar a presença de ar na interface. Uma leve pressão foi exercida, e o tempo detectado pelo aparelho então foi ajustado para o valor fixo.

3.5.3 Determinação do tempo com transdutores de face plana

Primeiramente, analisaram-se as amostras de secagem utilizando os transdutores de faces planas (TFP). O tempo de propagação das ondas de ultra-som foi determinado no sentido longitudinal e exatamente no centro das amostras, considerando sua espessura e largura, empregando-se a transmissão direta entre os transdutores. Em cada amostra de secagem, demarcou-se por meio de uma linha reta, a posição dos mesmos, de forma que ambos os transdutores ficassem perfeitamente alinhados. Após aplicar uma fina camada de vaselina e exercer uma leve pressão, procedeu-se a leitura do tempo necessário para que as ondas atravessassem a amostra (Figura 16).

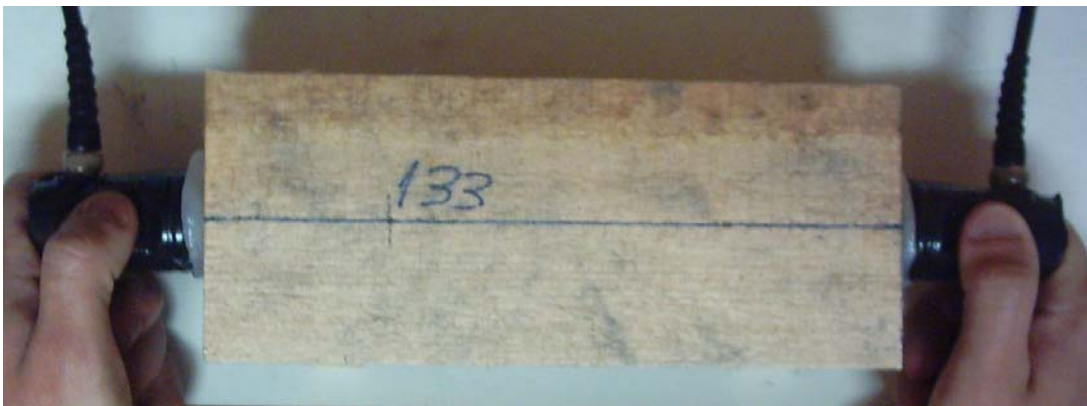


Figura 16 - Determinação do tempo de propagação da onda ultra-sônica na madeira durante sua secagem utilizando os transdutores de faces planas.

A velocidade de deslocamento da onda ultra-sonora foi determinada somente na direção longitudinal, uma vez que diversos pesquisadores, tais como Feeney *et al.* (1998), Bartholomeu (2001), Puccini (2002), Oliveira *et al.* (2005a) e Costa (2004) mencionaram que o comportamento bem definido nessa direção resulta em melhor ajuste.

3.5.4 Determinação do tempo com transdutores de pontos secos

Imediatamente após a determinação do tempo de propagação da onda de ultra-som com os transdutores de faces planas, nas mesmas amostras de secagem, fez-se a leitura do tempo de propagação utilizando-se os transdutores com pontos secos (TPS). Estes transdutores foram posicionados sobre a mesma reta utilizada para os transdutores planos, não sendo introduzidos na madeira, apenas ficando em contato com sua superfície. Não se levou em consideração se os pontos secos ficaram sobre o lenho inicial ou tardio. Para cada amostra, sobre esta reta, tomou-se o cuidado para que os pontos secos fossem acoplados sempre sobre os mesmos locais que foram acoplados na medição anterior. A pressão aplicada sobre estes transdutores correspondeu à máxima pressão aplicável por uma pessoa. Uma vez que esta pressão manual pode ser variável de acordo com a pessoa que manuseia o transdutor, uma única pessoa ficou responsável por esta tarefa (Figura 17).

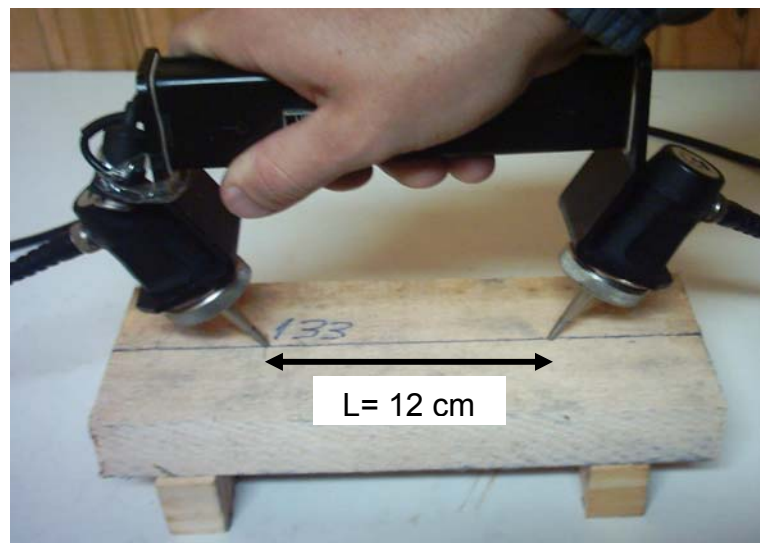


Figura 17 - Determinação do tempo de propagação da onda ultra-sônica na madeira durante sua secagem utilizando os transdutores com pontos secos, sendo L= distância entre os pontos secos.

Esses procedimentos de medições simultâneos do tempo de propagação da onda ultra-sônica (ambos os tipos de transdutores) e pesagens foram realizados sucessivamente, desde as amostras completamente úmidas até atingirem o TU

médio de 12%. Tomou-se o cuidado de realizar essas medições imediatamente após as amostras serem retiradas da estufa, evitando ao máximo sua perda de calor.

3.6 Cálculo da velocidade da onda ultra-sônica

Quando do uso dos TFP, a partir do tempo de propagação da onda e do comprimento do trecho percorrido (comprimento real da amostra), calculou-se a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas (V_{us}), em m/s, utilizando-se a Equação 5.

$$V_{us} = \frac{L}{t} \quad (5)$$

Onde: V_{us} = Velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas (m/s);
 L = Distância percorrida pela onda, igual ao comprimento da amostra (m);
 t = Tempo de propagação da onda (s).

Quando do uso dos TPS, a V_{us} também foi calculada pela Equação 5. No entanto, para a distância percorrida pela onda, não se utilizou o comprimento da amostra, mas sim à distância fixa entre os pontos secos (12 cm).

3.7 Determinação da densidade da madeira

Após o término do processo de secagem, as amostras foram colocadas em câmara climatizada ($T= 20^{\circ}\text{C}$ e $UR= 65\%$) para que atingissem o teor de umidade de equilíbrio ($TU_{eq.}$), o que foi detectado quando pesagens sucessivas mostraram estabilização do peso. Mediram-se então suas dimensões com o auxílio de paquímetros com precisão de 0,01 mm e, a partir do peso estabilizado, calculou-se a densidade aparente ao teor de umidade de equilíbrio ($Da_{TU_{eq.}}$).

As amostras de secagem foram posteriormente colocadas em estufa com circulação de ar, sob temperatura de 102°C , para a obtenção do seu peso seco (0% de umidade). Calculou-se então o TU real correspondente a cada momento exato da determinação da V_{us} , sendo possível a confecção do gráfico TU x V_{us} .

Uma vez que a temperatura de secagem proporcionou diferentes T_{Ueq} . para os tratamentos, a densidade aparente foi corrigida. Com este objetivo, calculou-se a densidade básica ao teor de umidade ($Db_{T_{Ueq}}$), que corresponde à razão entre o peso seco da amostra (0% de umidade) e seu volume ao teor de umidade de equilíbrio.

3.8 Análise estatística

Para a análise dos dados, por meio de *software* específico (pacote estatístico), primeiramente realizou-se análise de variância para caracterizar as amostras de secagem utilizadas. Analisaram-se estas com relação às suas dimensões, T_{Ueq} . e $Db_{T_{Ueq}}$.

Posteriormente, os resultados experimentais da V_{us} e TU foram estaticamente analisados por meio de análise de regressão simples e múltipla. Vários modelos matemáticos foram testados e, após algumas tentativas, selecionaram-se aqueles que melhor representavam as relações entre a variável dependente (V_{us}) e as variáveis independentes (TU e $Db_{T_{Ueq}}$). As medidas de adequação e seleção dos modelos de regressão foram feitas através da análise do coeficiente de determinação ajustado ($R_{aj.}^2$), erro padrão da estimativa (S_{yx}), valor de F e análise visual dos resíduos. Foram considerados mais adequados os modelos de maiores $R_{aj.}^2$ e F e de menor S_{yx} . Também foram realizadas análises de regressões considerando-se o TU como variável dependente para sua estimativa em função da V_{us} e $Db_{T_{Ueq}}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Observações preliminares

Durante a determinação do tempo de propagação do som na madeira, observou-se dificuldade para a análise das amostras submetidas à secagem de 70°C, quando utilizado os TFP. Devido à maior temperatura, a vaselina derretia rapidamente, durante o curto tempo de contato entre o transdutor e a amostra. Desse modo, as medições foram feitas rapidamente e com a aplicação de uma maior quantidade desse acoplante. Foram necessárias as repetições do procedimento diversas vezes, para uma maior confiabilidade. Tal ponto comprova a ineficiência do uso de transdutores planos para determinadas condições, conforme descrito por Nesvijski (2003) e Lorenzi (2000).

Durante a análise dos dados por meio de regressões, algumas amostras apresentaram comportamento muito diferentes dos demais. Por meio de uma análise visual observou-se que estas amostras apresentavam algum tipo de defeito, e por este motivo, foram descartadas. Entre os principais defeitos observados, destacou-se a excessiva inclinação da grã e eventuais rachaduras que ocorreram durante o processo de secagem.

Para a madeira de pinus, do total de 169 amostras de secagem analisadas, 18 delas foram descartadas devido aos defeitos, não sendo, portanto, consideradas na análise estatística. No eucalipto, do total de 167 amostras analisadas, apenas 3 foram descartadas em virtude desses defeitos.

Os valores médios de V_{us} no plano longitudinal das ondas ultra-sônicas aqui obtidas foram próximos daqueles obtidos por outros pesquisadores. Quando utilizados os TFP, a velocidade situou-se entre 4000 e 6000 m/s. Já quando utilizado os TPS, a velocidade foi significativamente inferior, se situado entre 1900 e 2700 m/s, o que também foi observado por Lorenzi (2000).

Deste modo, a V_{us} obtida com o uso dos TFP corresponde, aproximadamente, ao dobro da obtida quando utilizados os TPS. Este resultado confirma as citações de outros autores. Os TPS geram ondas sem direção definida de propagação (Nesvijski, 2003), o que faz que sua velocidade seja inferior às ondas geradas por meios dos TFP, que são direcionadas. Outro fator se refere aos

menores níveis de energia gerados pelos TPS (Chung & Law, 1983 *apud* EVANGELISTA, 2002), devido à redução do diâmetro do extensor de ondas. Outra questão se refere à forma, material de fabricação e/ou ângulo de inclinação do extensor de ondas (Nesvijski, 2003), que pode ter alterado o tipo de onda gerada pelo TPS.

4.2 Caracterização das amostras de secagem

A Tabela 2 mostra as dimensões reais das amostras de secagem. Essas dimensões correspondem às amostras após climatizadas na câmara (T=20°C e UR=65%). Devido à pequena variação entre as dimensões, não ocorreu influência da dimensão das amostras.

Tabela 2 - Dimensões reais das amostras de secagem analisadas ao seu teor de umidade de equilíbrio.

Espécie	Temperatura de secagem (°C)	N	Largura		Espessura		Comprimento	
			M (cm)	CV (%)	M (cm)	CV (%)	M (cm)	CV (%)
<i>Pinus elliottii</i>	20	50	9,86	0,89	3,32	4,25	25,03	0,63
	40	50	9,84	0,78	3,34	3,77	25,05	0,47
	70	51	9,81	1,05	3,34	3,88	25,05	0,68
<i>Eucalyptus grandis</i>	20	55	9,99	0,36	3,37	2,52	24,92	5,42
	40	55	9,92	0,41	3,29	2,48	24,78	0,84
	70	54	9,91	0,37	3,25	3,56	24,77	0,57

Onde: N= número de amostras; M= valor médio e CV= coeficiente de variação.

A análise de variância (Tabela 3) mostrou influência significativa da temperatura de secagem sobre o T_{Ueq} , considerando o teste *Least Significant Difference* (LSD) de Fisher, a 5% de probabilidade. Essa influência também se mostrou significativa para a $Db_{T_{Ueq}}$. No entanto, não tão pronunciada quanto ao T_{Ueq} .

Tabela 3 - Densidade básica ao respectivo teor de umidade de equilíbrio das amostras de secagem em relação às espécies e temperaturas de secagem.

Espécie	Temperatura de secagem (°C)	TUeq. ¹		Db _{TUeq} ²	
		Média (%)	CV (%)	Média (g/cm ³)	CV (%)
<i>Pinus elliotii</i>	20	14,68 a ³	3,53	0,48 a	9,85
	40	13,41 b	5,52	0,51 b	8,54
	70	11,88 c	10,19	0,52 b	8,02
<i>Eucalyptus grandis</i>	20	15,31 a	3,77	0,47 a	7,52
	40	13,92 b	3,00	0,50 b	6,39
	70	12,86 c	3,86	0,51 b	6,47

Onde: 1= Teor de umidade de equilíbrio (base seca); 2= Densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio correspondente; 3= 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.

Como era esperado, o aumento da temperatura de secagem reduziu a higroscopicidade da madeira, reduzindo-se significativamente seu TUeq. Conforme Oliveira & Tomaselli (1981, p.21), a exposição da madeira a altas temperaturas (superiores a 100°C) 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.

Os resultados foram inicialmente analisados para cada tratamento e, posteriormente, analisados de modo que englobassem todas as variáveis envolvidas.

4.3 Correlação entre as variáveis influentes na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas

A Tabela 4 mostra a relação entre a V_{us} , TU e Db_{TUeq} , para cada tratamento. Foram ajustados modelos matemáticos incluindo o TU da madeira desde verde até o final da secagem. Da mesma forma, foram ajustados modelos incluindo a faixa de umidade superior e inferior ao ponto de saturação das fibras teórico (PSFt), considerado de 30%.

A linearização dos modelos pela transformação logarítmica do TU proporcionou melhora significativa. A Db_{TUeq} também se mostrou uma importante variável, com influência significativa em todos os modelos. No entanto, não foi detectada boa correlação entre as variáveis. Isso é evidenciado pelos baixos valores de $R_{aj.}^2$ e de F, aliados aos elevados valores de S_{yx} . Já os resíduos apresentaram boa distribuição para todos os casos.

Tabela 4 - Relação entre velocidade ultra-sônica, teor de umidade e densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio, em diferentes faixas de umidade, para cada tratamento.

Tratamento	Faixa de TU (%)	Equação de regressão	R _{aj.}	R _{aj.} ²	Syx (m/s)	F
1	108 - 15,5	$V = 4180,89 - 2132,07 \cdot \ln TU + 257,411 \cdot (\ln TU)^2 + 17146,7 \cdot D - 14119,7 \cdot D^2$	0,668	0,446	234,3	84,83**
	TU ≤ PSft	$V = 2062,3 - 628,685 \cdot \ln TU + 16554,8 \cdot D - 13212,6 \cdot D^2$	0,689	0,475	220,36	61,82**
	TU > PSft	$V = 3317,83 + 3013,88 \cdot D$	0,450	0,203	251,94	55,23**
2	108 - 15,5	$V = 2219,98 - 131,053 \cdot \ln TU + 1444,59 \cdot D$	0,699	0,489	86,4	195,35**
	TU ≤ PSft	$V = 2210,53 - 160,597 \cdot \ln TU + 1650,63 \cdot D$	0,688	0,473	83,48	90,36**
	TU > PSft	$V = 2252,8 - 104,915 \cdot \ln TU + 1168,59 \cdot D$	0,508	0,259	88,23	37,08**
3	104 - 7	$V = 6374,54 - 1450,53 \cdot \ln TU + 180,476 \cdot (\ln TU)^2 + 2572,2 \cdot D$	0,663	0,439	180,89	111,08**
	TU ≤ PSft	$V = 4943,35 - 452,872 \cdot \ln TU + 2705,6 \cdot D$	0,679	0,461	169,97	89,04**
	TU > PSft	$V = 3654,58 + 2245,22 \cdot D$	0,390	0,152	194,74	39,50**
4	104 - 7	$V = 2374,13 - 120,024 \cdot \ln TU + 1046,62 \cdot D$	0,738	0,545	75,99	259,09**
	TU ≤ PSft	$V = 2329,11 - 92,537 \cdot \ln TU + 976,615 \cdot D$	0,552	0,305	72,30	47,65**
	TU > PSft	$V = 2486,67 - 154,126 \cdot \ln TU + 1099,18 \cdot D$	0,617	0,381	78,70	67,85**
5	103 - 5	$V = 4141,16 - 723,344 \cdot \ln TU + 72,6683 \cdot (\ln TU)^2 + 4282,29 \cdot D$	0,690	0,476	256,53	104,67**
	TU ≤ PSft	$V = 4141,16 - 723,344 \cdot \ln TU + 72,6683 \cdot (\ln TU)^2 + 4282,29 \cdot D$	0,680	0,462	245,33	72,36**
	TU > PSft	$V = 3025,97 - 189,307 \cdot \ln TU + 4582,22 \cdot D$	0,549	0,301	266,57	38,97**
6	103 - 5	$V = 2113,86 - 110,473 \cdot \ln TU + 1382,08 \cdot D$	0,673	0,453	101,25	140,71**
	TU ≤ PSft	$V = 2000,3 - 77,8108 \cdot \ln TU + 1428,62 \cdot D$	0,549	0,301	98,64	37,03**
	TU > PSft	$V = 2357,38 - 168,484 \cdot \ln TU + 1359,95 \cdot D$	0,558	0,311	102,14	39,35**
7	112 - 13	$V = 8900,96 - 1160,77 \cdot \ln TU + 75,0071 \cdot (\ln TU)^2 - 1744,6 \cdot D$	0,932	0,869	140,02	1275,1**
	TU ≤ PSft	$V = 8552,04 - 802,78 \cdot \ln TU - 1864,63 \cdot D$	0,792	0,628	146,97	189,98**
	TU > PSft	$V = 7771,47 - 582,017 \cdot \ln TU - 1685,3 \cdot D$	0,824	0,679	134,37	373,22**

Tabela 4 - Relação entre velocidade ultra-sônica, teor de umidade e densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio, em diferentes faixas de umidade, para cada tratamento (continuação)

Tratamento	Faixa de TU (%)	Equação de regressão	R _{aj.}	R _{aj} ²	Syx (m/s)	F
8	112 - 13	$V = -80186,8 - 2563,78 \cdot \ln TU + 771,528 \cdot (\ln TU)^2 - 79,6692 \cdot (\ln TU)^3 + 711646,0 \cdot D - 2,18113 \cdot 10^6 \cdot D^2 + 2,92842 \cdot 10^6 \cdot D^3 - 1,45398 \cdot 10^6 \cdot D^4$	0,874	0,764	52,62	241,84**
	TU ≤ PSFt	$V = -20830,6 - 106,851 \cdot \ln TU + 161928,0 \cdot D - 362264,0 \cdot D^2 + 267147,0 \cdot D^3$	0,662	0,438	50,70	34,09**
	TU > PSFt	$V = -30056,3 + 1381,7 \cdot \ln TU - 202,722 \cdot (\ln TU)^2 + 204895,0 \cdot D - 455231 \cdot D^2 + 333200 \cdot D^3$	0,857	0,734	53,24	194,84**
9	110 - 10	$V = 10082,1 - 464,585 \cdot \ln TU - 12314,5 \cdot D + 10079,2 \cdot D^2$	0,903	0,815	135,95	767,37**
	TU ≤ PSFt	$V = 7654,96 - 442,479 \cdot \ln TU - 2552,96 \cdot D$	0,745	0,555	132,71	120,86**
	TU > PSFt	$V = 54980,0 - 528,26 \cdot \ln TU - 287554,0 \cdot D + 572820,0 \cdot D^2 - 381604,0 \cdot D^3$	0,820	0,672	133,71	169,80**
10	110 - 10	$V = 3962,43 - 1975,07 \cdot \ln TU + 640,745 \cdot (\ln TU)^2 - 71,0627 \cdot (\ln TU)^3 + 4791,38 \cdot D - 6448,64 \cdot D^2$	0,864	0,746	63,22	308,45**
	TU ≤ PSFt	$V = 3557,34 - 77,5617 \cdot \ln TU - 1330,3 \cdot D$	0,633	0,400	58,66	65,42**
	TU > PSFt	$V = 1170,07 + 1386,81 \cdot \ln TU - 208,714 \cdot (\ln TU)^2 - 1670,09 \cdot D$	0,842	0,709	66,52	268,49**
11	108 - 8	$V = 6569,75 + 450,425 \cdot \ln TU - 137,105 \cdot (\ln TU)^2 - 3150,24 \cdot D$	0,897	0,805	155,38	663,74**
	TU ≤ PSFt	$V = 7531,64 - 300,648 \cdot \ln TU - 3044,2 \cdot D$	0,670	0,450	155,43	84,68**
	TU > PSFt	$V = 8711,76 - 637,885 \cdot \ln TU - 3149,34 \cdot D$	0,823	0,678	154,40	291,77**
12	108 - 8	$V = 4360,36 - 1277,92 \cdot \ln TU + 444,79 \cdot (\ln TU)^2 - 52,8058 \cdot (\ln TU)^3 - 1768,39 \cdot D^2$	0,872	0,760	57,13	382,67**
	TU ≤ PSFt	$V = 3175,75 - 52,2 \cdot \ln TU - 1454,36 \cdot D^2$	0,676	0,457	54,98	87,12**
	TU > PSFt	$V = 1688,67 + 1185,65 \cdot \ln TU - 182,493 \cdot (\ln TU)^2 - 1938,99 \cdot D$	0,871	0,759	57,96	290,56**

Onde: V= velocidade ultra-sônica (m/s); lnTU= logaritmo neperiano do teor de umidade (%); D= densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio (g/cm³); PSFt = ponto de saturação das fibras teórico (30%); R_{aj.}= coeficiente de correlação ajustado; R_{aj}²= coeficiente de determinação ajustado; Syx= erro padrão da estimativa; F= valor de F calculado e ** = significativo ao nível de 1 % de probabilidade.

De modo geral, observa-se que o eucalipto apresentou melhores ajustes dos modelos quando comparado ao pinus, o que significa uma menor variabilidade dos dados obtidos a partir da madeira de eucalipto.

Os maiores valores de $R_{aj.}^2$ e F foram observados no Tratamento 7, o qual corresponde à madeira de eucalipto submetida à secagem na câmara climatizada (20°C e UR= 65%) e analisada pelos TFP, considerando a faixa de umidade da madeira desde verde até o final da secagem ($TU_{eq.}$). Neste caso, aproximadamente 87% dos dados foram explicados pelo modelo.

A maior variação ocorrida entre as amostras de pinus pode estar relacionada a diversos fatores. Conforme mostrada pela Figura 11, as amostras de pinus foram obtidas na região próxima à medula, correspondendo, portanto, à madeira juvenil, a qual é mais heterogênea. Outra questão diz respeito ao fato de a própria madeira de pinus apresentar grande heterogeneidade devido à maior distinção entre o lenho inicial e o tardio, o que gerou problemas, principalmente, quando da utilização do TPS. Assim, nas amostras em que os pontos secos coincidiram exatamente sobre o lenho inicial, a V_{us} provavelmente foi diferente daquela medida exatamente sobre o lenho tardio, ou na transição de ambos. Adicionalmente, a baixa dureza desta madeira favoreceu para o aprofundamento da superfície em contato com os pontos secos, durante as repetitivas medições (Figura 18). Este problema ocorreu em algumas amostras desta espécie e provavelmente tenha contribuído para a alta variação observada.



Figura 18 - Aprofundamento da superfície em contato com os transdutores de pontos secos em amostras de secagem de *Pinus elliottii* Engelm.

4.3.1 Efeito do teor de umidade

Conforme a Tabela 4, o pinus, quando analisado com TFP (tratamentos 1, 3 e 5), os modelos que consideram a faixa total de variação do TU (madeira desde verde até o final da secagem) e os modelos que consideram somente o TU inferior ao PSFt apresentam ajustes semelhantes, considerando os valores de $R_{aj.}^2$, S_{yx} e F . Já para TU superiores ao PSFt, piores ajustes foram observados, para as 3 temperaturas. A secagem a 20 e 40°C (tratamentos 1 e 3) não apresentaram influência significativa do TU para esta faixa. Essa observação confirma os resultados obtidos por outros autores, bem como são equivalentes aos obtidos nos ensaios mecânicos.

Em seus trabalhos, Simpson (1998), Gonçalves & Costa (2002), Oliveira *et al.* (2005a) e Costa (2004) também observaram velocidade de propagação das ondas variando nos trechos que correspondem ao TU da madeira verde até o PSF e, deste ponto, até a madeira completamente seca. Essa variação da V_{us} foi mais significativa para TU inferior ao PSF, sendo que, acima deste ponto, tal variação foi significativamente inferior. A explicação dada por Gonçalves & Costa (2002) para este comportamento é que até o PSF, tem-se a presença de água livre nos vazios celulares e água de impregnação nas paredes. Isso faz com que a propagação da onda ocorra, tanto na parede celular quanto na água, reduzindo assim sua velocidade.

Para a mesma espécie, quando analisada com TPS (tratamentos 2, 4 e 6), de modo geral, melhores ajustes dos modelos foram observados considerando a faixa total de variação do TU. Comparando os ajustes dos modelos para TU superior e inferior ao PSFt, observa-se que não há significativa melhora do ajuste para TU inferior ao PSFt, conforme foi observado quando do uso dos TFP.

Já para o eucalipto, quando analisado com TFP (tratamentos 7, 9 e 11), significativa melhora dos ajustes dos modelos foram observados quando considerada a faixa total de TU, o que é comprovado pelos valores de $R_{aj.}^2$ superiores a 80%.

No entanto, quando comparados às faixas de TU superiores e inferiores ao PSFt, ajustes melhores foram evidenciados para TU superiores para as 3 temperaturas. Este comportamento não corresponde ao observado para o pinus, o qual apresentou melhor ajuste para TU inferior ao PSFt.

Considerando ainda a mesma espécie, porém analisada com TPS (tratamentos 8, 10 e 12), melhores ajustes foram observados considerando a faixa de TU total, assim como ocorreu com o pinus, quando do uso deste método. No entanto, os ajustes não são tão altos quanto à análise realizada com TFP. Comparando-se as faixas de TU superior e inferior ao PSFt, observa-se o mesmo comportamento quando do uso dos TFP (melhores ajustes para TU inferiores ao PSFt).

Portanto, de acordo com os valores de $R_{aj.}^2$, S_{yx} e F mostrados na Tabela 4, de modo geral, observa-se que os melhores ajustes das equações ocorreram quando considerado a variação total do TU da madeira. No entanto, S_{yx} relativamente altos foram encontrados em alguns tratamentos, chegando a 266 m/s (tratamento 5).

4.3.2 Efeito da densidade da madeira

Para uma melhor comparação entre cada tratamento, realizou-se a análise gráfica dos dados mostrados na Tabela 4, na qual foi possível constatar a dispersão dos valores observados, o ajuste dos modelos e a influência da densidade da madeira.

A Figura 19 mostra o comportamento da V_{us} em função do TU para a madeira de pinus submetida à secagem de 40°C, analisados com os TFP. Verifica-se que, acima do PSFt, não ocorre influência do TU. Mesmo comportamento ocorreu quando da secagem a 20°C. Já para a secagem a 70°C, esta influência mostrou-se significativa (Figura 20).

O comportamento geral da V_{us} em função do TU, para a mesma espécie, quando analisada com TPS, é representada pela Figura 21, que corresponde à secagem a 40°C. Comportamento semelhante foi observado para a secagem a 20 e 70°C.

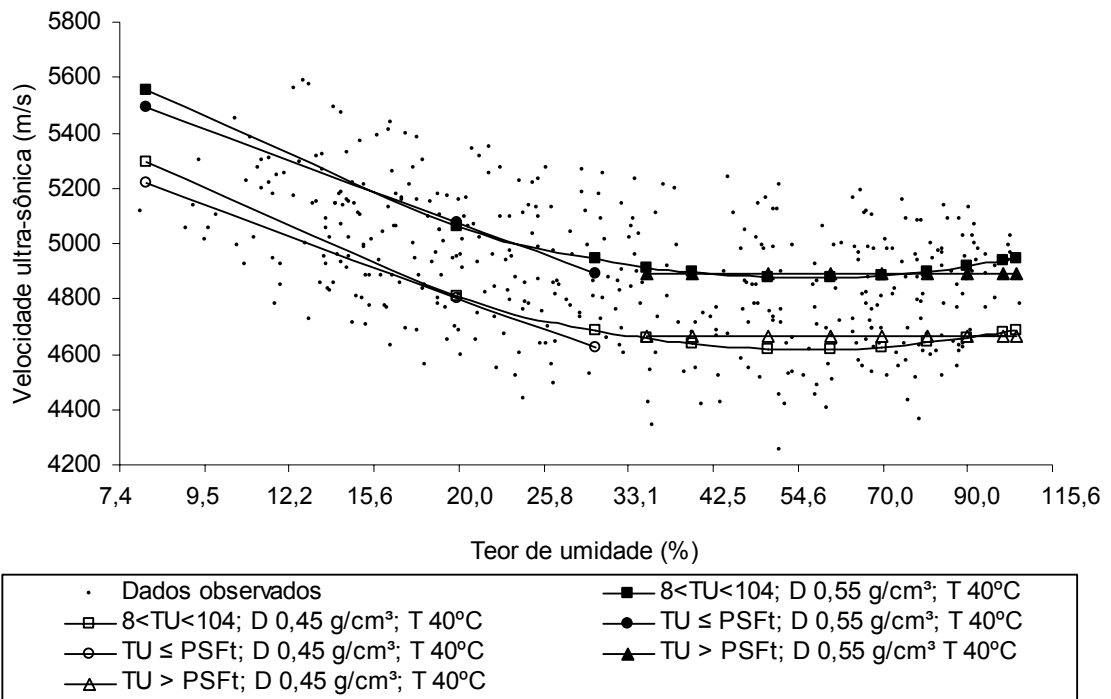


Figura 19 - Comportamento da velocidade ultra-sônica e teor de umidade para o *Pinus elliottii* Engelm. submetido à secagem a 40°C e determinado com transdutores de faces planas, para diferentes densidades (D) e faixas de teor de umidade (TU), sendo PSFt=30% (Tratamento 3).

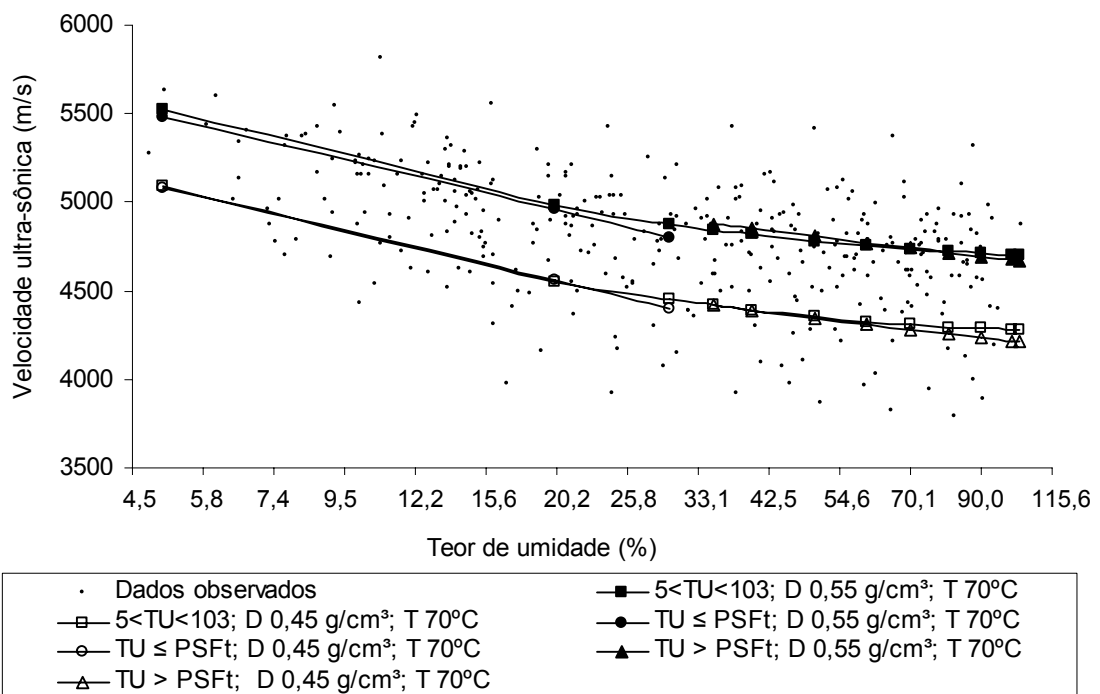


Figura 20 - Relação entre velocidade ultra-sônica e teor de umidade para *Pinus elliottii* Engelm. submetido à secagem de 70°C e determinado com transdutores de faces planas, para diferentes densidades (D) e faixas de teor de umidade (TU), sendo PSFt= 30% (Tratamento 5).

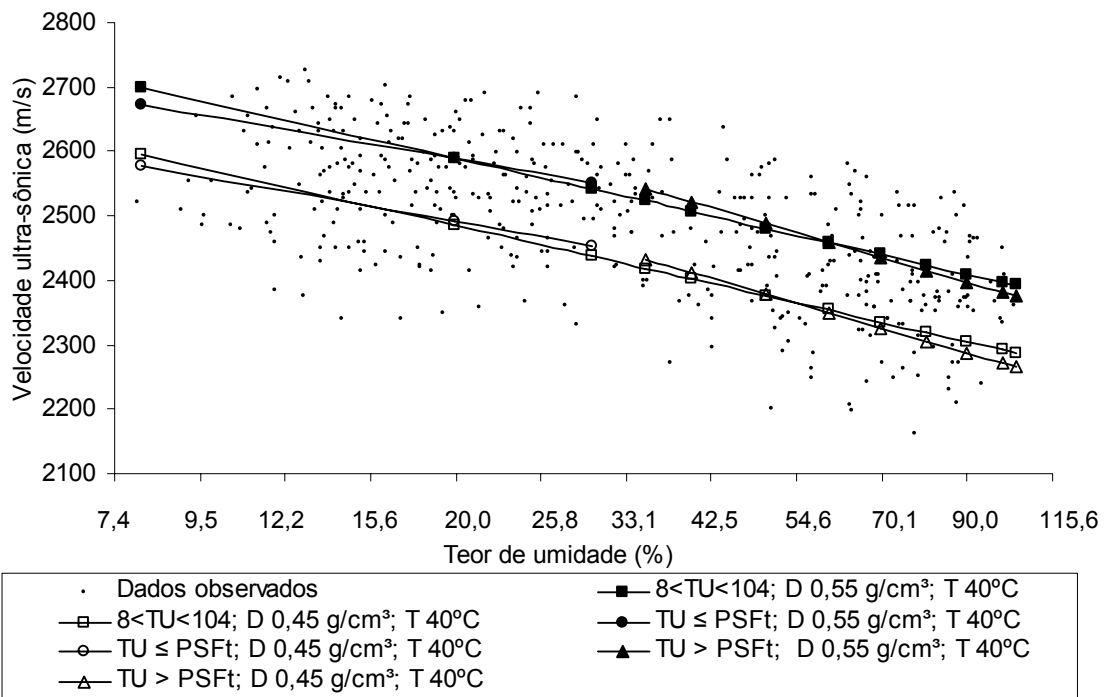


Figura 21 - Comportamento da velocidade ultra-sônica e teor de umidade para o *Pinus elliottii* Engelm. submetido à secagem a 40°C e determinado com transdutores de pontos secos, para diferentes densidades (D) e faixas de teor de umidade (TU), sendo PSFt=30% (Tratamento 4).

Observa-se que ocorre aumento da V_{us} com o aumento da $Db_{TU_{eq}}$. Ocorreu, portanto, uma relação diretamente proporcional. Este resultado concorda com os estudos feitos por Oliveira & Sales (2005), para *Pinus caribea* Morelet considerando o plano longitudinal, assim como Wang *et al.* (2003), para taiwania (*Taiwania cryptomerioides* Hay.), porém, para o plano radial.

Segundo Shimoyama (2005, p.32), madeiras de maiores densidades 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. A importância da porosidade dos materiais sobre a atenuação (perda de potência) de onda também foi descrito por Kawamoto & Willians (2002, p.2).

No entanto, de acordo com a Equação 4, a V_{us} é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade. Segundo Carrasco & Azevedo Júnior (2003, p.186), o aumento da densidade 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 densidade da madeira. Dessa forma, mesmo que haja aumento da densidade, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo apreciável aumento da rigidez.

As Figuras 22 e 23 representam a relação entre a V_{us} e o TU para a madeira de eucalipto. A Figura 22 corresponde ao uso dos TFP durante a secagem em câmara climatizada (20°C). Comportamento semelhante foi observado quando a secagem ocorreu a 40 e 70°C. Já a Figura 23 corresponde ao comportamento observado quando a madeira foi analisada com os TPS, submetida à secagem a 70°C. Comportamento semelhante foi observado quando a secagem ocorreu a 20 e 40°C.

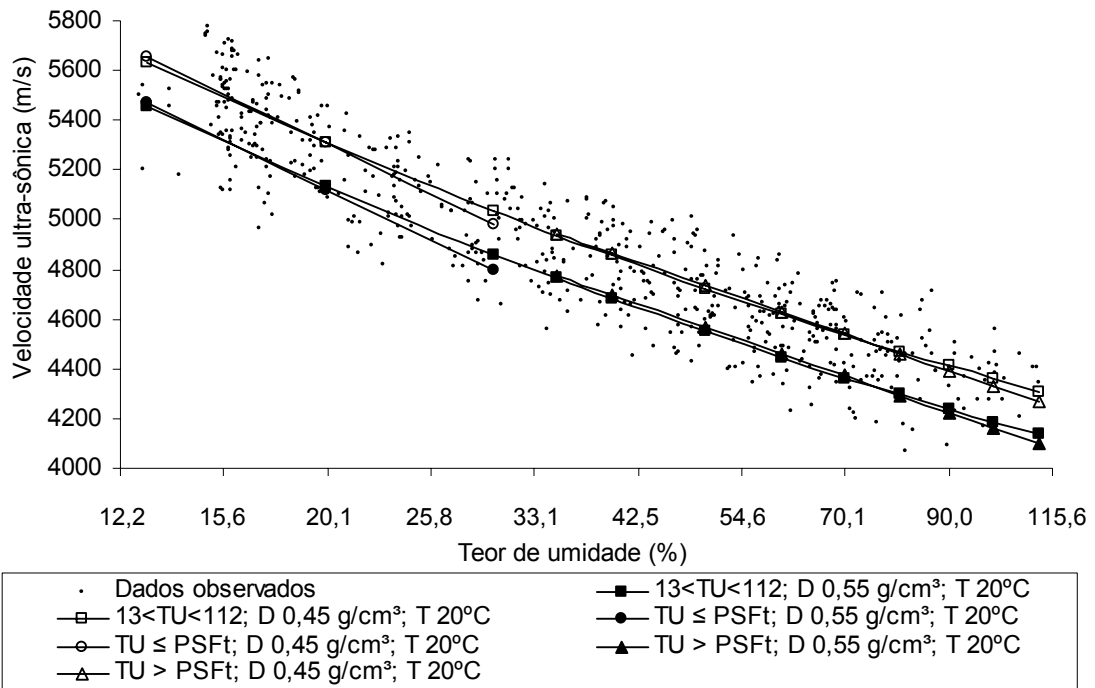


Figura 22 - Comportamento da velocidade ultra-sônica e teor de umidade para madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden submetida à secagem a 20°C e determinado com transdutores de faces planas, para diferentes densidades (D) e faixas de teor de umidade (TU), sendo PSFt= 30% (Tratamento 7).

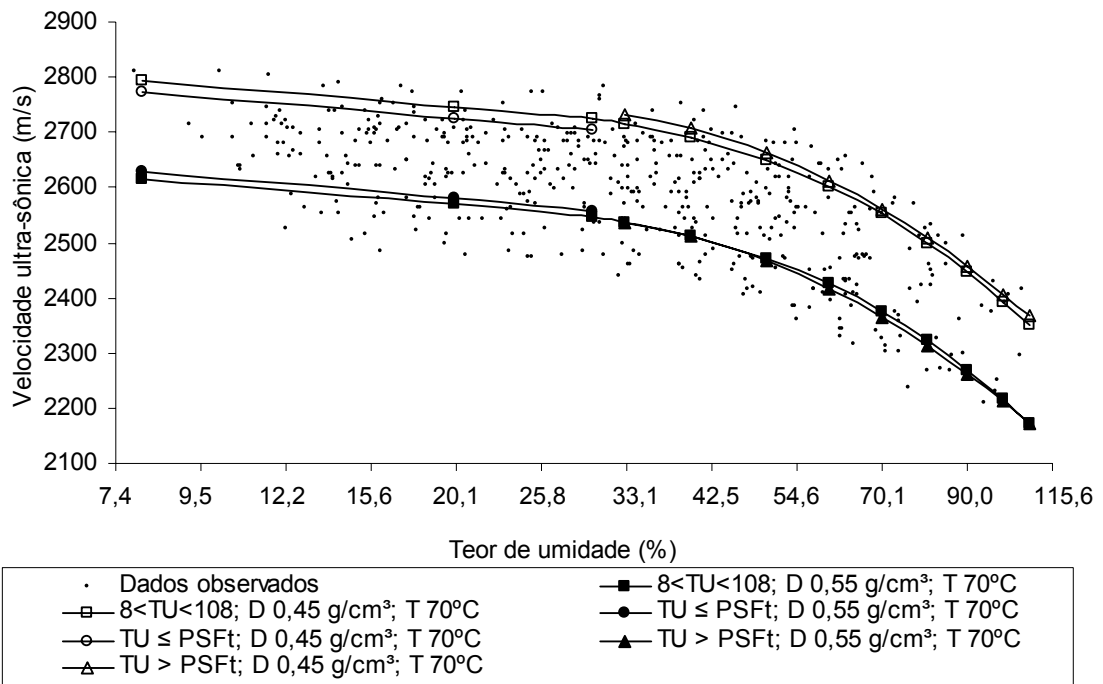


Figura 23 - Comportamento da velocidade ultra-sônica e teor de umidade para madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden submetida à secagem a 70°C e determinado pelo uso dos transdutores de pontos secos, para diferentes densidades (D) e faixas de teor de umidade (TU), sendo PSFt= 30% (Tratamento 12).

Pelas Figuras 22 e 23, observa-se graficamente que a madeira de eucalipto apresentou menor variabilidade entre os dados observados, quando comparada ao pinus, principalmente quando utilizados os TFP.

A influência da $Db_{TU_{eq}}$ apresentou-se de modo diferente do que ocorreu com o pinus. O aumento da densidade do eucalipto proporcionou redução da V_{us} , conforme estabelecido pela Equação 4, porém não observado pela maioria dos pesquisadores.

Wang *et al.* (2003) observaram este mesmo comportamento para madeira de taiwania (*Taiwania cryptomerioides* Hay.). Mishiro (1996 *apud* OLIVEIRA & SALES, 2005) também constataram redução da velocidade com o aumento da densidade para algumas das 19 espécies estudadas. Em ambos os casos, considerando o sentido longitudinal.

4.3.3 Efeito do tipo de transdutor

Comparando-se as Figuras 19 e 21, referentes à madeira de pinus, que são os tratamentos que se diferem somente pelo tipo de transdutor utilizado, observa-se que a V_{us} obtida pelos TFP corresponde aproximadamente ao dobro da obtida pelos TPS, como já mencionado anteriormente. A mesma situação é observada quando se comparam as Figuras 22 e 23, referentes ao eucalipto.

De acordo com a Tabela 4, para o tratamento 3, os ajustes para a faixa total de TU e abaixo do PSFt são bastante próximos. De acordo com a equação de regressão que considera a faixa total de TU (graficamente representada na Figura 19), para uma densidade fixa, um determinado valor da V_{us} pode corresponder a dois valores de TU, quando este for superior ao PSF. Portanto, apesar de os valores de $R_{aj.}^2$, S_{yx} e F serem semelhantes quando considerada as diferentes faixas de TU, o modelo que envolve o TU inferior ao PSFt deve ser priorizado, uma vez que, graficamente, ocorre melhor ajuste. Portanto, nem sempre um bom ajuste dos modelos representados pelos valores de $R_{aj.}^2$, S_{yx} e F são eficientes para uso prático. Comportamento semelhante a este pode ter ocorrido no caso em que os ajustes de modelos considerando a faixa de TU superior ao PSFt apresentou-se melhor, quando comparado à faixa inferior.

Durante a secagem da madeira, primeiramente ocorre perda de umidade na sua superfície, progredindo então para ser centro. Assim, o TU médio determinado pelo método gravimétrico não corresponde exatamente ao TU estimado quando utilizados os TPS. O TU determinado por este método depende da profundidade de inserção dos pontos secos, que neste caso, ficou restrito à superfície das amostras, exceto no caso de algumas amostras de pinus, que apresentaram aprofundamento da superfície devido ao uso desse tipo de transdutor.

Nas Tabelas 5 e 6 temos a análise de regressão para as madeiras de pinus e eucalipto, respectivamente, para ambos os transdutores utilizados e considerando-se as diferentes faixas de TU.

A análise evidencia uma influência significativa de todas as variáveis quantitativas incluídas, como o TU, $Db_{TUeq.}$ e a temperatura de secagem. Exceção ocorreu quando da análise do eucalipto (Tabela 6) utilizando-se TFP, para a faixa de

TU superior ao PSFt, no qual não se verificou influência significativa da temperatura de secagem.

Da mesma forma que foi observada quando analisados os tratamentos individualmente, observa-se que melhores ajustes dos modelos foram encontrados para a madeira de eucalipto, quando comparada à madeira de pinus.

Para a madeira de pinus, quando utilizado os TFP, ajustes semelhantes foram observados considerando a faixa total de TU e a faixa inferior ao PSFt. Para a mesma espécie, quando analisados com TPS, melhores ajustes foram observados para a faixa total de TU, apesar da correlação não ser alta. Para ambos os tipos de transdutores, ocorrem menor correlação quando considerado o TU superior ao PFt. Este é o comportamento típico descrito por diversos autores.

Já para a madeira de eucalipto, observam-se melhores ajustes dos modelos quando considerada a faixa total de TU, tanto com os TFP quanto com os TPS. Comparando-se as faixas de TU superior e inferior ao PSFt, os modelos que consideram o TU inferior ao PSFt apresentaram melhores ajustes.

Tabela 5 - Relação entre velocidade ultra-sônica, teor de umidade, densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio e temperatura de secagem para a madeira de *Pinus elliottii* Engelm. para ambos tipos de transdutores.

Tipo de transdutor	Faixa de TU (%)	Equação de regressão	R _{aj}	R _{aj} ²	Syx (m/s)	F
	100 - 12	$V = 5574,54 - 1027,67 \cdot \ln TU + 115,413 \cdot \ln TU^2 - 5,88497 \cdot T + 3317,46 \cdot D$	0,665	0,442	230,10	235,08**
TFP	TU ≤ PSFt	$V = 4858,55 - 440,264 \cdot \ln TU - 7,36608 \cdot T + 3430,3 \cdot D$	0,675	0,456	215,82	162,10**
	TU > PSFt	$V = 7707,05 - 2132,98 \cdot \ln TU + 255,797 \cdot (\ln TU)^2 - 4,55511 \cdot T + 3256,37 \cdot D$	0,514	0,264	239,04	55,31**
	100 - 12	$V = 2048,15 - 17,3929 \cdot (\ln TU)^2 + 1,69557 \cdot T - 0,0318601 \cdot T^2 + 1262,84 \cdot D$	0,705	0,497	87,39	291,56**
TPS	TU ≤ PSFt	$V = 2065,53 - 18,0953 \cdot (\ln TU)^2 - 0,0159798 \cdot T^2 + 1313,35 \cdot D$	0,603	0,363	85,38	111,41**
	TU > PSFt	$V = 2368,26 - 138,725 \cdot \ln TU - 0,0117525 \cdot T^2 + 1228,54 \cdot D$	0,562	0,316	89,59	92,65**

Onde: TFP= transdutores de face plana; TPS= transdutores de pontos secos; V= velocidade ultra-sônica (m/s); TU= teor de umidade base seca (%); lnTU= logaritmo neperiano do teor de umidade (%); D= densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio (g/cm³); T= temperatura de secagem (°C); PSFt= ponto de saturação das fibras teórico (30%); R_{aj}= coeficiente de correlação ajustado; R_{aj}²= coeficiente de determinação ajustado; Syx= erro padrão da estimativa; F= valor de F calculado e ** = significativo ao nível de 1 % de probabilidade.

Tabela 6 - Relação entre velocidade ultra-sônica, teor de umidade, densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio e temperatura de secagem para a madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden para ambos tipos de transdutores.

Tipo de transdutor	Faixa de TU (%)	Equação de regressão	R _{aj.}	R _{aj} ²	Syx (m/s)	F
TFP	100 - 12	$V = 3953,81 + 2331,3 \cdot \ln TU - 762,18 \cdot (\ln TU)^2 + 66,1496 \cdot (\ln TU)^3 - 5,49936 \cdot T + 0,0523332 \cdot T^2 - 2463,04 \cdot D^2$	0,905	0,820	151,35	1199,38**
	TU ≤ PSFt	$V = 5989,77 + 1041,52 \cdot \ln TU - 258,547 \cdot (\ln TU)^2 - 18,6803 \cdot T + 0,18461 \cdot T^2 - 2541,39 \cdot D$	0,753	0,567	153,53	164,02**
	TU > PSFt	$V = -158594,0 - 583,988 \cdot \ln TU + 1,42188 \cdot 10^6 \cdot D - 4,53501 \cdot 10^6 \cdot D^2 + 6,37948 \cdot 10^6 \cdot D^3 - 3,34576 \cdot 10^6 \cdot D^4$	0,825	0,681	139,54	410,44**
TPS	100 - 12	$V = -48056,9 - 1523,41 \cdot \ln TU + 504,582 \cdot (\ln TU)^2 - 57,4349 \cdot (\ln TU)^3 + 2,30677 \cdot T - 0,0217912 \cdot T^2 + 436201,0 \cdot D - 1,35272E6 \cdot D^2 + 1,85422E6 \cdot D^3 - 951325,0 \cdot D^4$	0,862	0,742	59,37	490,13**
	TU ≤ PSFt	$V = 2168,81 - 71,4176 \cdot \ln TU + 2,46394 \cdot T - 0,0246401 \cdot T^2 + 4022,35 \cdot D - 5438,1 \cdot D^2$	0,641	0,411	56,14	80,60**
	TU > PSFt	$V = -51821,5 + 1287,43 \cdot \ln TU - 193,723 \cdot (\ln TU)^2 + 2,16907 \cdot T - 0,0194673 \cdot T^2 + 432861,0 \cdot D - 1,33021 \cdot 10^6 \cdot D^2 + 1,80565 \cdot 10^6 \cdot D^3 - 917190 \cdot D^4$	0,848	0,720	60,79	308,24**

Onde: TFP= transdutores de face plana; TPS= transdutores de pontos secos; V= velocidade ultra-sônica (m/s); TU= teor de umidade base seca (%); lnTU= logaritmo neperiano do teor de umidade (%); D= densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio (g/cm³); T= temperatura de secagem (°C); PSFt= ponto de saturação das fibras teórico (30%); R_{aj.}= coeficiente de correlação ajustado; R_{aj}²= coeficiente de determinação ajustado; Syx= erro padrão da estimativa; F= valor de F calculado e ** = significativo ao nível de 1 % de probabilidade.

4.3.4 Efeito da temperatura de secagem

A influência da temperatura de secagem sobre a V_{us} , para as diferentes faixas de TU, pode ser observada nas Figuras 24 a 27, considerando as madeiras com $Db_{TU_{eq}}$ de $0,50 \text{ g/cm}^3$, para os modelos apresentados nas Tabelas 5 e 6.

De maneira geral, observa-se, pelas Figuras 24 a 27 que o aumento da temperatura de secagem proporcionou redução da V_{us} . Este comportamento pode ser melhor visualizado para Figura 24, para qualquer faixa de TU. Nota-se ainda a grande variação dos dados observados, dada pelas Tabelas 5 e 6, o que foi confirmado pelo baixo ajuste dos modelos. Neste mesmo gráfico, observa-se, visualmente, o reduzido ajuste do modelo para a faixa de TU superior ao PSFt.

Esta redução da velocidade das ondas proporcional ao aumento da temperatura concorda com o comportamento observado por Grundström (1998), Green *et al.* (1999b), Bekhta *at al.* (2000) e Dyk & Rice (2005).

De acordo com a Equação 4, a V_{us} está diretamente relacionada com o MOE da madeira. No entanto, este apresenta comportamento inversamente proporcional ao aumento da temperatura, conforme já mostrado pela Figura 9. Portanto, a velocidade das ondas na madeira decresce quando é aquecida e aumenta quando esfriada.

Pelas Figuras 25 e 26, também se observa uma tendência da redução da V_{us} com o emprego da temperatura de 70°C , apesar dessa influência não ser muito clara.

Na Figura 25, que corresponde ao modelo que proporcionou melhor ajuste para a faixa total de TU ($R_{aj.}^2 = 81,95\%$), observa-se comportamento semelhante para as temperaturas de secagem de 40 e 70°C , apesar destas terem proporcionado redução da V_{us} quando comparadas à secagem a 20°C . Quando considerada somente a faixa de TU inferior ao PSFt, o comportamento mostrou-se aleatório. Já quando considerada a faixa de TU superior ao PSFt, não ocorreu influência da temperatura de secagem.

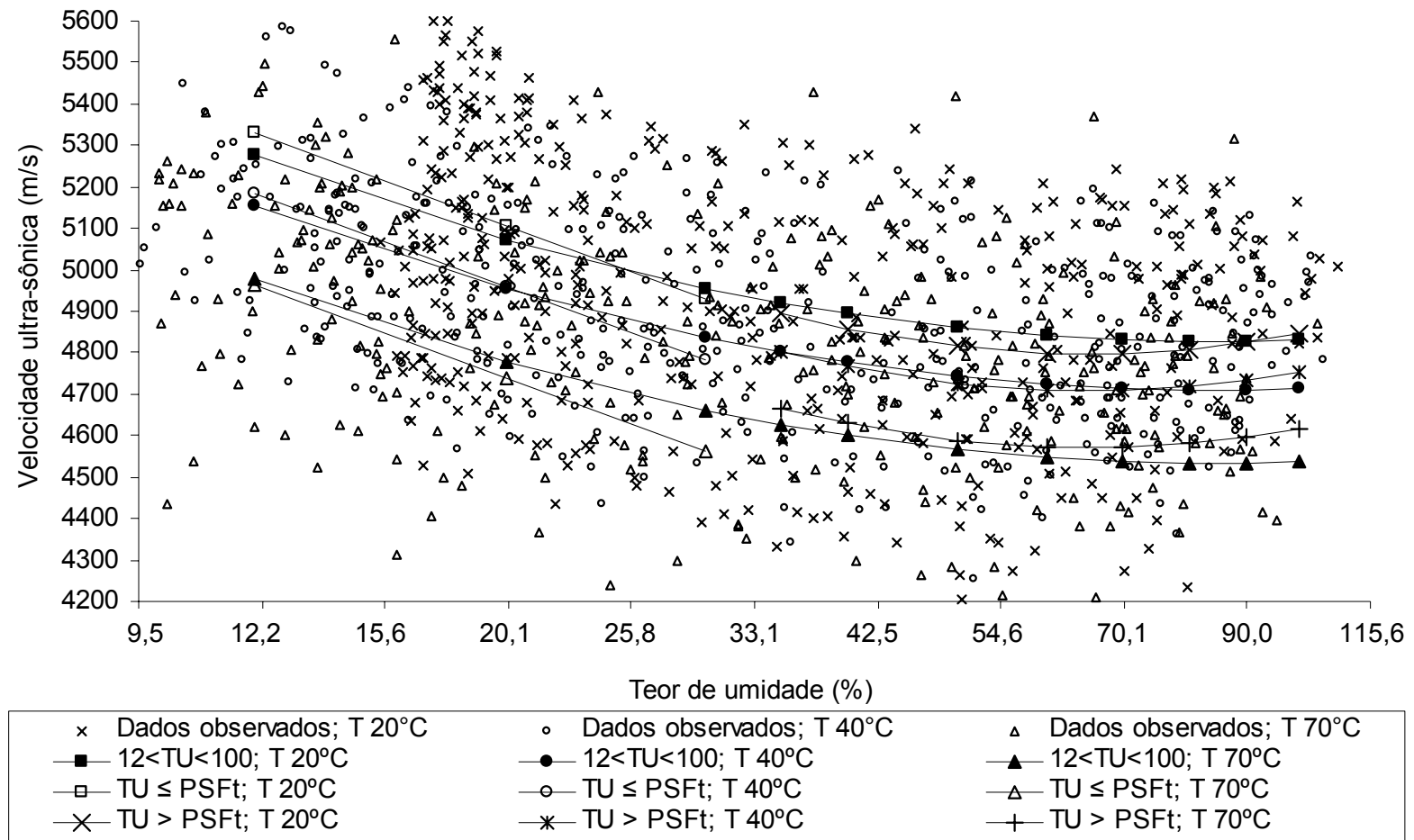


Figura 24 - Influência do teor de umidade na velocidade ultra-sônica para a madeira de *Pinus Elliottii* Engelm. determinada com transdutores de faces planas, considerando diferentes temperaturas de secagem (T) e faixas de teores de umidade (TU), sendo PSFt= 30%.

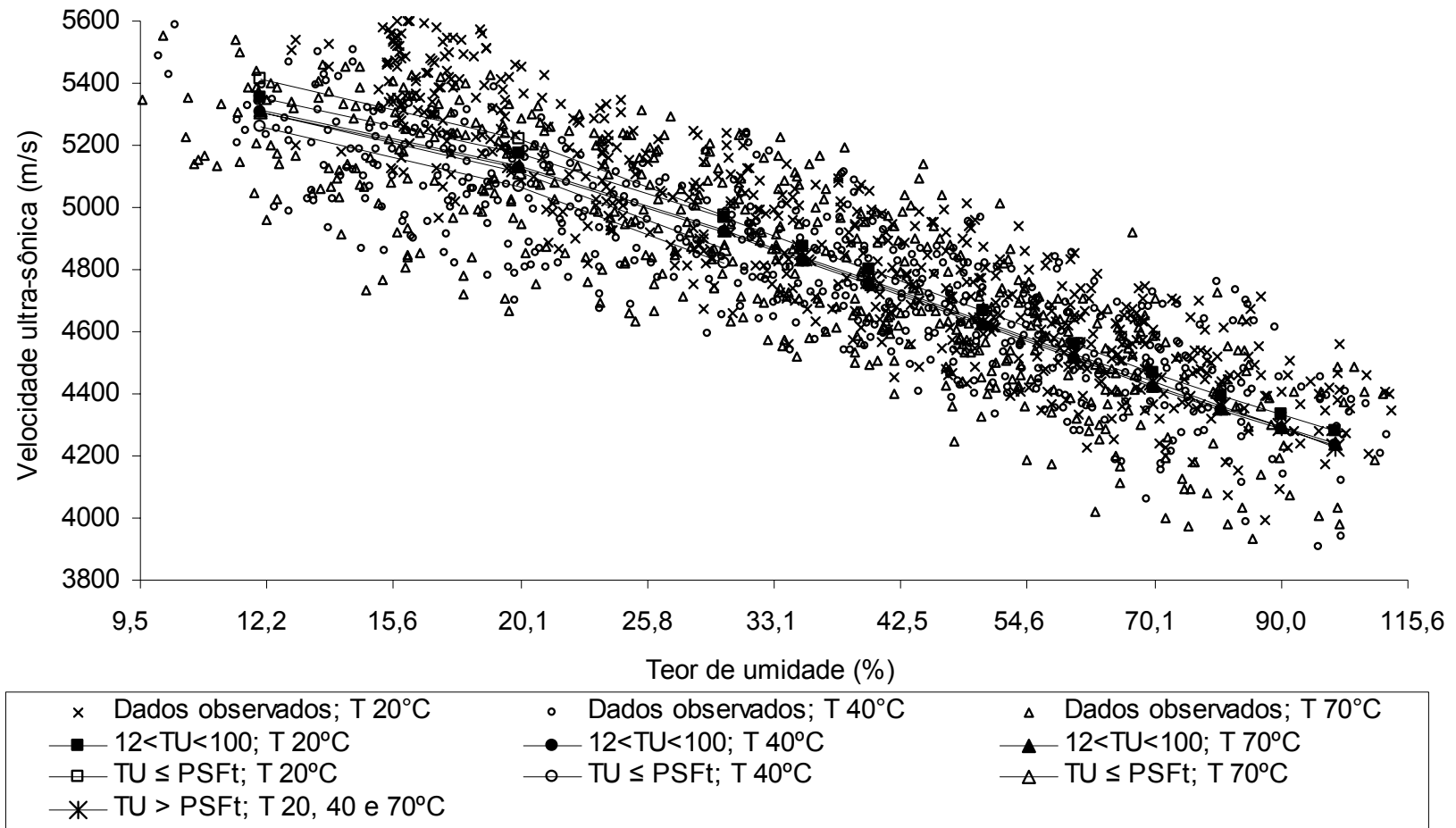


Figura 25 - Influência do teor de umidade na velocidade ultra-sônica para a madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden determinada com transdutores de faces planas, considerando diferentes temperaturas de secagem (T) e faixas de teor de umidade (TU), sendo PSFt= 30%.

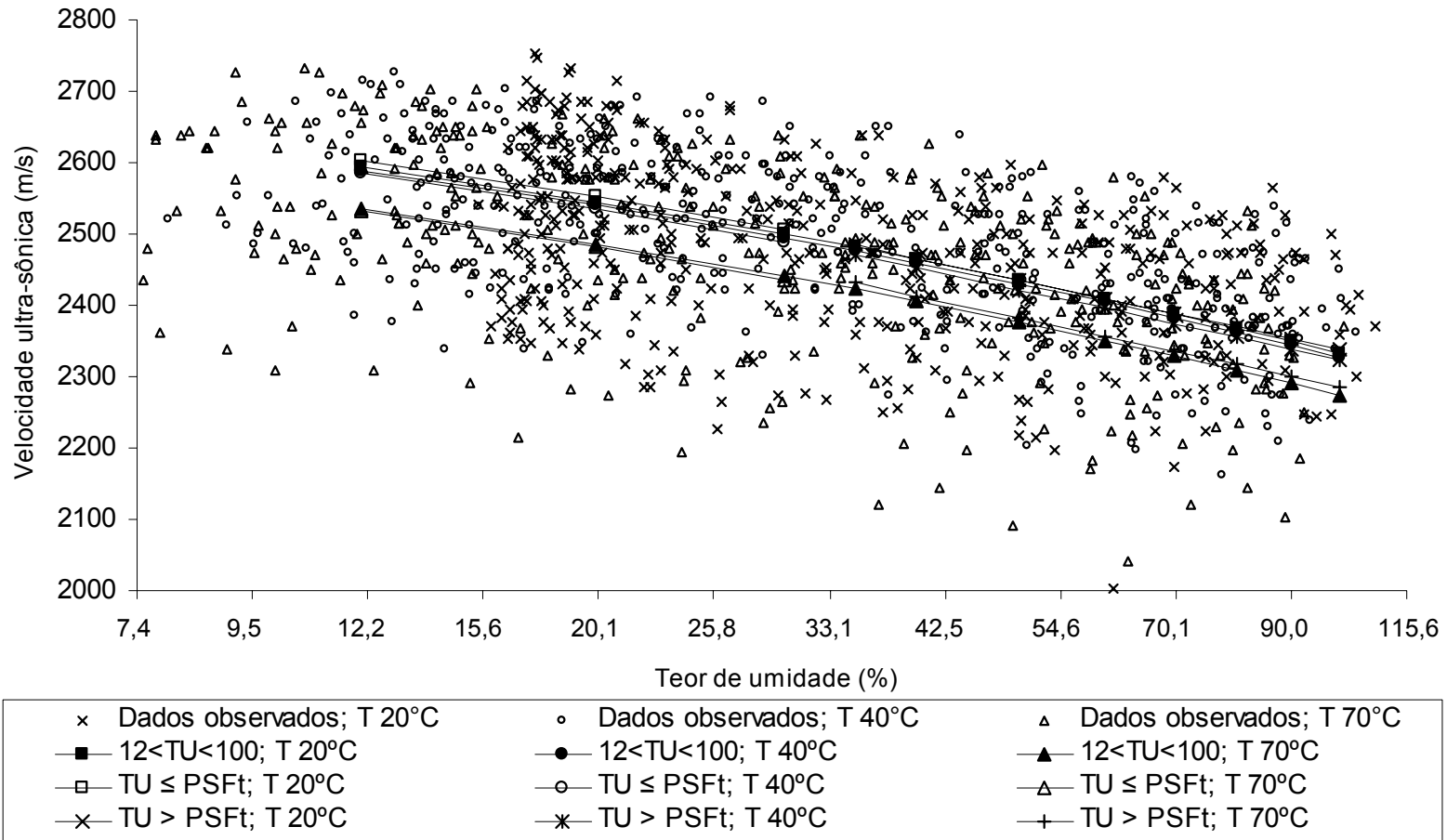


Figura 26 - Influência do teor de umidade sobre a velocidade ultra-sônica para a madeira de *Pinus elliottii* Engelm. determinada com transdutores de pontos secos, considerando diferentes temperaturas de secagem (T) e faixas de teores de umidade (TU), sendo PSFt= 30%.

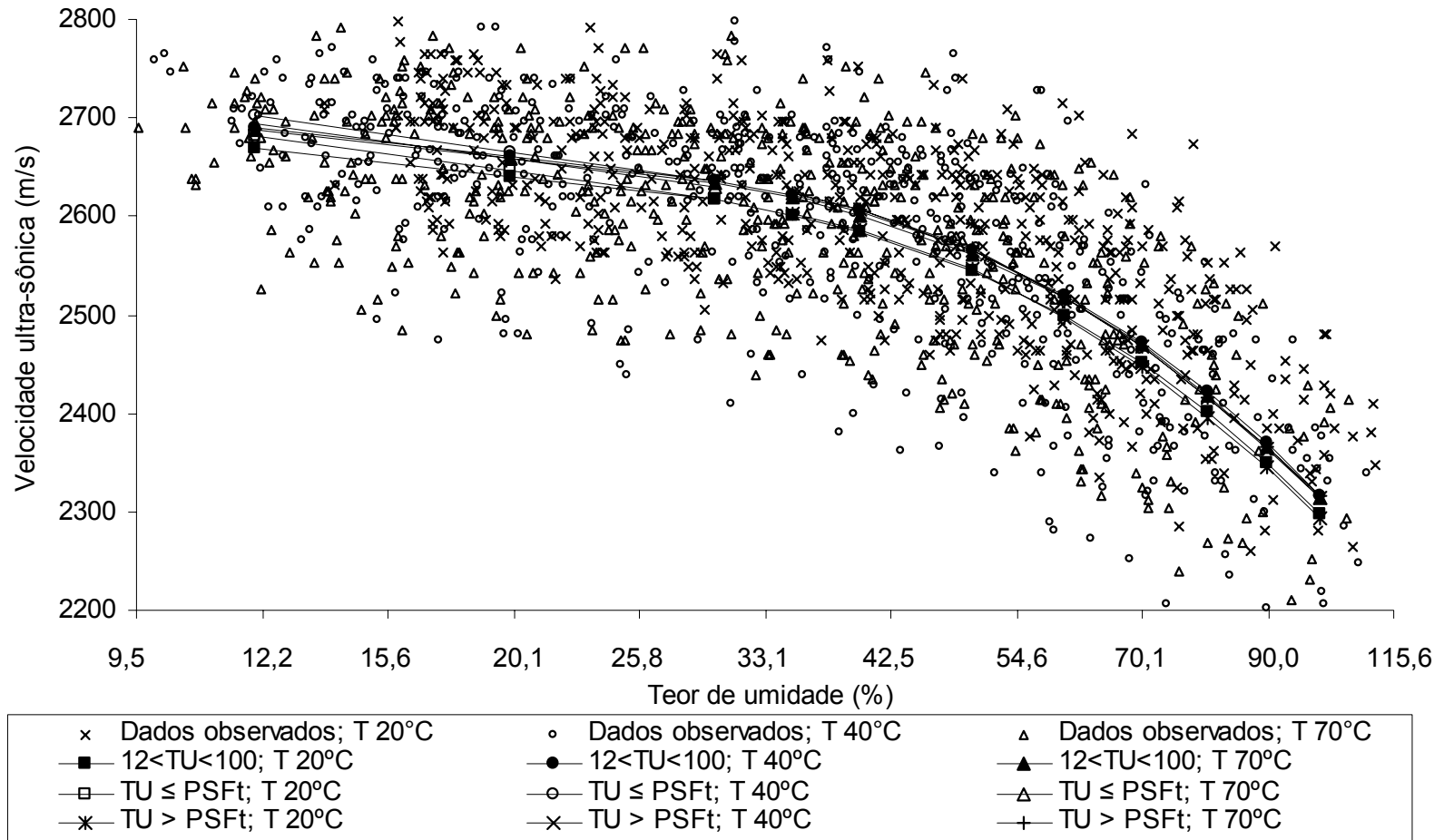


Figura 27 - Influência do teor de umidade sobre a velocidade ultra-sônica para a madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden determinada com transdutores de pontos secos, considerando diferentes temperaturas de secagem (T) e faixas de teores de umidade (TU), sendo PSFt= 30%.

Na Figura 26, as curvas relativas às temperaturas de secagem de 20 e 40°C foram muito semelhantes, proporcionando V_{us} superiores àquela obtida na secagem a 70°C, para todas as faixas de TU. Já na Figura 27, as curvas mostraram um comportamento aleatório com relação à influência da temperatura na V_{us} , o que não corresponde a uma tendência típica.

Estes comportamentos anômalos da influência da temperatura de secagem sobre a velocidade das ondas refletem sua reduzida influência sobre as propriedades da madeira. Dyk & Rice (2005), analisando amostras de madeira congeladas, observaram aumento de velocidade em aproximadamente 5%, para todos níveis de umidade, quando comparada às amostras não-congeladas. Da mesma forma, Fridley *et al.* (1992 *apud* GREEN *et al.*, 1999b, p.85) também observaram pequena mudança no MOE quando amostras de madeira foram aquecidas de 23 para 55°C. Bucur (1995 *apud* OLIVEIRA & SALES, 2000) descreveu que a influência da temperatura na velocidade de propagação das ondas é aproximada em três classes de temperatura: baixa, média e alta (em torno de 0; 180 e 1 000 °C, respectivamente).

4.3.5 Efeito da espécie

Com o objetivo de fazer uma comparação entre as duas espécies estudadas, geraram-se gráficos utilizando as equações de regressão mostradas nas Tabelas 5 e 6. Para ambas as espécies, consideraram-se a $Db_{TU_{eq}}$ e temperatura de secagem fixa (0,50 g/cm³ e 40°C, respectivamente), para os diferentes tipos de transdutores (Figuras 28 e 29).

Comparando-se as espécies, quando do uso dos TFP (Figura 28), observa-se que o eucalipto proporcionou maior V_{us} para a faixa de TU inferior ao PSFt. Já para TU superiores, o pinus passou a proporcionar maiores velocidades, apresentando uma diferença crescente proporcional ao aumento do TU. Quando do uso dos TPS, a Figura 29 mostra que o eucalipto apresentou maior V_{us} , para todas as faixas de TU correspondentes.

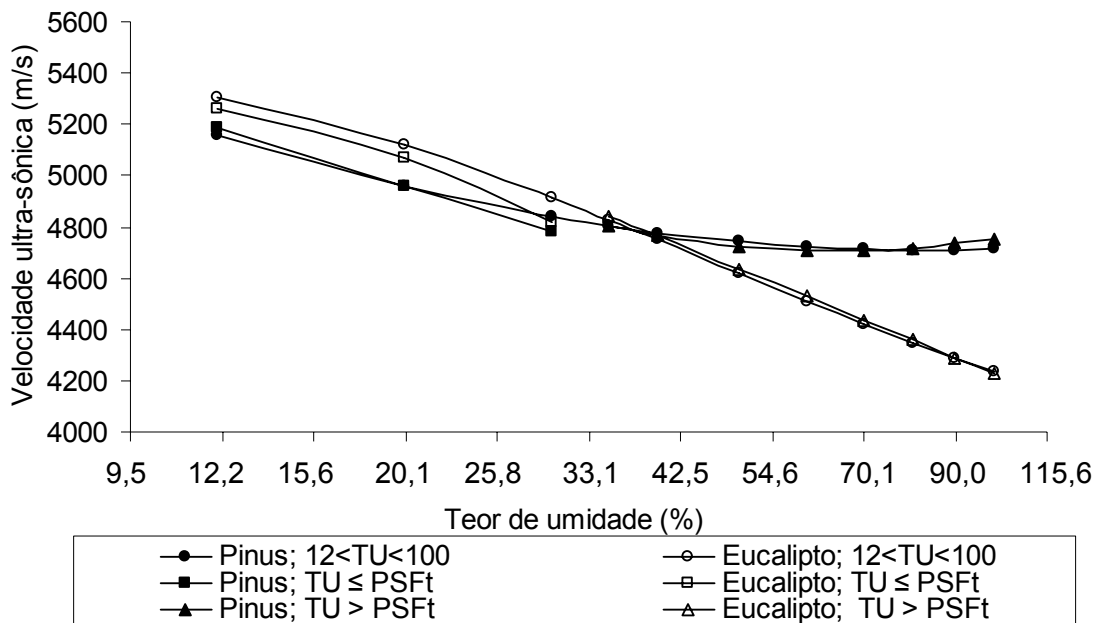


Figura 28 - Velocidade ultra-sônica em função do teor de umidade para a madeira de *Pinus elliotii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, determinada com transdutores de faces planas, para diferentes faixas de teores de umidade (TU), sendo PSFt= 30%.

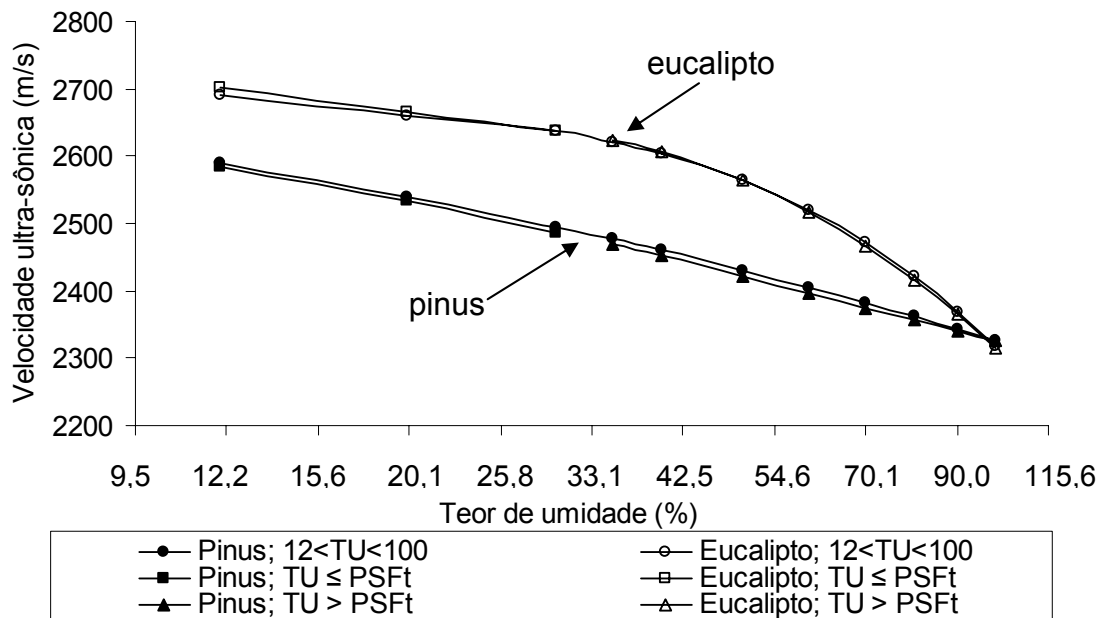


Figura 29 - Comportamento da velocidade ultra-sônica em função do teor de umidade para a madeira de *Pinus elliotii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, determinada com transdutores de pontos secos, para diferentes faixas de teores de umidade (TU), sendo PSFt= 30%.

Deste modo, não foi observada maior velocidade para a madeira de pinus (conífera), a qual apresenta estruturas anatômicas contínua e uniforme, que deveria favorecer o aumento da velocidade das ondas quando comparada ao eucalipto (folhosas), conforme foi descrito por Bucur *et al.* (2002, p.539) e Oliveira *et al.* (2005a, p.11).

A pequena diferença entre as velocidades proporcionadas pelas duas espécies, aliada aos baixos ajustes dos modelos de regressão relativos principalmente ao pinus, sugerem que estes resultados não devam ser considerados conclusivos.

4.4 Ajustes de modelos de regressão para estimativa do teor de umidade

Com o objetivo de analisar o uso da *Vus* como alternativa para o monitoramento do TU da madeira durante sua secagem, realizou-se nova análise de regressão considerando-se o TU como variável dependente, uma vez que esta deverá ser estimada a partir da *Vus*. A $Db_{TUeq.}$, que apresentou influência, também foi incluída nos modelos.

A Tabela 7 mostra os modelos de regressões para a estimativa do TU da madeira em função da *Vus* e da $Db_{TUeq.}$, assim como os valores de $R_{aj.}^2$, Syx e F , para as diferentes faixas de TU, considerando-se os tratamentos individualmente.

Comparando-se os valores de $R_{aj.}^2$ e F , observa-se que os modelos apresentados na Tabela 7 apresentam, de modo geral, menores valores quando comparados aos modelos apresentados na Tabela 4. Portanto, ocorreu redução dos ajustes dos modelos quando o TU foi considerado como variável dependente.

Tabela 7 - Estimativa do teor de umidade da madeira em função da velocidade ultra-sônica e densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio, para diferentes faixas de umidade e tratamentos.

Tratamento	Faixa de TU (%)	Equação de regressão	R _{aj} ² (%)	Syx (%)	F
1	108 - 15,5	$TU = e^{155,042 - 0,0949136*V + 0,0000195754*V^2 - 1,35427*E-9*V^3 + 5,96134*D}$	34,28	0,46	55,27**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{140,166 - 0,081332*V + 0,0000160064*V^2 - 1,05092*E-9*V^3 + 1,44091*D}$	21,4	0,14	14,74**
	TU > PSFt	$TU = e^{2,80621 + 2,34817*D}$	7,8	0,33	19,09**
2	108 - 15,5	$TU = e^{-13,7854 + 0,014574*V - 0,00000358396*V^2 + 6,52501*D}$	45,9	0,41	115,92**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{3,76121 - 0,000542524*V + 1,25699*D}$	9,0	0,15	10,89**
	TU > PSFt	$TU = e^{-16,1731 + 0,0166456*V - 0,00000374383*V^2 + 3,66609*D}$	22,2	0,31	20,69**
3	104 - 7	$TU = e^{(2,0536 - 4,41027*E-8*V^2 + 1,70091*D)^2}$	35,3	0,15	116,16**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{14,3251 - 0,0026704*V - 14,4275*D + 0,00363348*(V*D)}$	46,4	0,23	60,53**
	TU > PSFt	$TU = e^{3,8067 - 0,000091996*V + 1,35982*D}$	0,90	0,34	2,00***
4	104 - 7	$TU = e^{5,6704 - 8,75911*E-7*V^2 + 6,36466*D}$	55,0	0,45	264,05**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{4,59739 - 0,00128388*V + 3,07653*D}$	21,9	0,27	30,94**
	TU > PSFt	$TU = e^{-19,1768 + 0,0199073*V - 0,00000452038*V^2 + 3,08235*D}$	33,8	0,28	37,92**
5	103 - 5	$TU = e^{-7,82531 + 0,00464247*V - 6,34301*E-7*V^2 + 6,92179*D}$	37,3	0,61	68,97**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{(1,71606 - 2,66292*E-8*V^2 + 1,10311*D)^2}$	31,2	0,11	38,56**
	TU > PSFt	$TU = e^{4,18628 - 0,000270725*V + 2,07921*D}$	5,0	0,32	5,66*
6	103 - 5	$TU = e^{-15,3192 + 0,0164836*V - 0,00000411137*V^2 + 5,94265*D}$	40,8	0,56	78,75**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{4,69019 - 0,0011833*V + 1,97633*D}$	8,2	0,38	8,46**
	TU > PSFt	$TU = e^{5,75627 - 0,00125166*V + 2,35251*D}$	20,9	0,28	23,48**

Tabela 7 - Estimativa do teor de umidade da madeira em função da velocidade ultra-sônica e densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio, para diferentes faixas de teor de umidade e tratamentos (continuação).

Tratamento	Faixa de TU (%)	Equação de regressão	Raj ² (%)	Syx (%)	F
7	112 - 13	$TU = e^{-86,7007 + 0,0595206*V - 0,0000125265*V^2 + 8,54855*E-10*V^3 - 2,51151*D}$	87,8	0,20	1038,26**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{-27,9182 - 0,000776513*V + 246,365*D - 569,465*D^2 + 433,033*D^3}$	61,6	0,13	90,92**
	TU > PSFt	$TU = e^{22,2395 - 0,00366301*V - 27,3299*D + 0,0053287*(V*D)}$	69,6	0,18	269,44**
8	112 - 13	$TU = e^{-4,07016 + 0,0110084*V - 0,00000292028*V^2 - 5,1141*D^2}$	61,7	0,33	281,50**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{5,95887 - 0,00109361*V}$	13,6	0,18	27,66**
	TU > PSFt	$TU = e^{-78,0632 - 0,00944819*V + 681,259*D - 1597,41*D^2 + 1172,5*D^3 + 0,0142417*(V*D)}$	67,9	0,19	149,34**
9	110 - 10	$TU = e^{15,4378 - 1,80746*E-7*V^2 - 27,0373*D + 23,2118*D^2}$	80,7	0,26	731,68**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{58,9277 - 0,00765256*V - 132,841*D + 63,8103*D^2 + 0,0131148*(V*D)}$	49,4	0,19	47,80**
	TU > PSFt	$TU = e^{33,5184 - 0,00418757*V - 65,8317*D + 35,3377*D^2 + 0,005994*(V*D)}$	64,7	0,19	152,54**
10	110 - 10	$TU = e^{-8,93565 + 0,0162448*V - 0,00000396655*V^2 - 5,86359*D}$	59,7	0,37	258,96**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{6,04613 - 0,00117745*V}$	10,9	0,25	24,54**
	TU > PSFt	$TU = e^{10,636 - 0,00224823*V - 3,93456*D^2}$	61,9	0,20	268,69**
11	108 - 8	$TU = e^{9,58388 - 1,60733*E-7*V^2 - 4,58906*D}$	76,9	0,28	803,39**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{37,4183 - 0,00645449*V - 58,1577*D + 0,0108105*(V*D)}$	32,7	0,25	34,13**
	TU > PSFt	$TU = e^{48,2136 - 0,0113117*V + 6,92312*E-7*V^2 - 59,5197*D + 20,3436*D^2 + 0,00772095*(V*D)}$	67,1	0,18	113,63**
12	108 - 8	$TU = e^{12,6355 - 8,35928*E-7*V^2 - 7,02643*D}$	55,6	0,39	302,23**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{5,86984 - 0,00111457*V}$	7,0	0,29	16,52**
	TU > PSFt	$TU = e^{12,6455 - 0,00245747*V - 4,94429*D}$	64,2	0,19	248,04**

Onde: V= velocidade ultra-sônica (m/s); D= densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio (g/cm³); PSFt = ponto de saturação das fibras teórico (30%); R_{aj}²= coeficiente de determinação ajustado; Syx= erro padrão da estimativa; F= valor de F calculado, E= potência de base 10; *= significativo ao nível de 5% de probabilidade, ** = significativo ao nível de 1% de probabilidade, ***= não significativo.

No entanto, na Tabela 7, comparando-se os tratamentos entre si, observa-se que ocorreu comportamento semelhante aos mostrados na Tabela 4. A madeira de eucalipto proporcionou melhores ajustes dos modelos. O pinus, quando analisado com TFP, apresentou melhor ajuste quando considerada a faixa total de variação do TU, sendo a correlação baixa ou inexistente quando considerada a faixa de TU superior ao PSFt. Quando analisada com TPS, melhor correlação também ocorreu quando considerado a faixa total de variação do TU. Já para a madeira de eucalipto, ajustes consideráveis foram encontrados quando analisados com TFP, para a faixa total de variação do TU.

Do mesmo modo que anteriormente, ocorreu uma diminuição do TU quando a velocidade aumenta e o aumento da V_{us} com o aumento da $Db_{TU_{eq}}$, para a madeira de pinus. Portanto, para mesma V_{us} , madeira com maior densidade proporciona maior valor de TU estimado. Comportamento inverso foi observado para a madeira de eucalipto.

Para o caso do pinus, quando analisado com TFP, ocorreu efeito diferenciado da influência da V_{us} e $Db_{TU_{eq}}$ para TU superiores ao PSFt e para as 3 temperaturas analisadas. Conforme dado pela Tabela 7, quando a secagem ocorreu a 20°C, somente a $Db_{TU_{eq}}$ apresentou efeito significativo. Na secagem a 40°C, o modelo não se mostrou significativo. Na secagem a 70°C, tanto a V_{us} quanto a $Db_{TU_{eq}}$ apresentaram-se significativos. No entanto, em todos esses casos, a correlação apresentou-se muito baixa.

Já para a madeira de eucalipto, quando analisada com TPS, a $Db_{TU_{eq}}$ não apresentou influencia significativa, para TU inferiores ao PSFt e para as 3 temperaturas de secagem.

Os modelos que avaliam a temperatura de secagem, além da V_{us} e $Db_{TU_{eq}}$, sobre a estimativa do TU, são mostrados nas Tabelas 8 e 9, para o pinus e eucalipto, respectivamente.

Da mesma forma que foi observada quando analisado os tratamentos individualmente, observam-se melhores ajustes dos modelos para a madeira de eucalipto. Para esta espécie, a utilização dos TFP proporcionou melhores ajustes, explicando, aproximadamente, 81% dos dados, quando considerada a faixa total de variação do TU.

Tabela 8 - Estimativa do teor de umidade da madeira de *Pinus elliotti* Engelm. em função da velocidade ultra-sônica e temperatura de secagem, para diferentes faixas de teor de umidade e transdutores.

Tipo de transdutor	Faixa de TU (%)	Equação de regressão	R _{aj} ² (%)	Syx (%)	F
TFP	100 - 12	$TU = e^{(-1,27099 + 0,000899668 \cdot V - 1,28846 \cdot E \cdot 7 \cdot V^2 - 0,00273265 \cdot T + 6,06503 \cdot D - 4,42511 \cdot D^2)}$	35,7	0,15	132,13**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{3,37366 - 0,00031128 \cdot V + 0,0270729 \cdot T + 2,88685 \cdot D - 0,00000734787 \cdot (V \cdot T)}$	41,6	0,26	103,56**
	TU > PSFt	$TU = e^{0,164387 - 0,000148354 \cdot V + 16,4506 \cdot D - 14,6283 \cdot D^2}$	5,3	0,33	12,30**
TPS	100 - 12	$TU = e^{-16,6661 + 0,0151608 \cdot V - 0,0000038248 \cdot V^2 - 0,0000761415 \cdot T^2 + 18,7833 \cdot D - 12,6451 \cdot D^2}$	47,69	0,48	215,86**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{(2,22047 - 0,000312864 \cdot V - 0,00220081 \cdot T + 0,711987 \cdot D)^2}$	23,1	0,08	59,34**
	TU > PSFt	$TU = e^{-12,0304 + 0,0135614 \cdot V - 0,00000315288 \cdot V^2 + 0,00933006 \cdot T - 0,000123209 \cdot T^2 + 3,1013 \cdot D}$	26,6	0,29	44,13**

Onde: V= velocidade ultra-sônica (m/s); TU= teor de umidade base seca (%); e= exponencial; D= densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio (g/cm³); T= temperatura de secagem (°C); TFP= transdutores de faces planas; TPS= transdutores de pontos secos; PSFt= ponto de saturação das fibras teórico (30%); R_{aj}²= coeficiente de determinação ajustado; Syx= erro padrão da estimativa; F= valor de F calculado; E= potência de base 10, ** = significativo ao nível de 1 % de probabilidade.

Tabela 9 - Estimativa do teor de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em função da velocidade ultra-sônica e temperatura de secagem, para diferentes faixas de teor de umidade e transdutores.

Tipo de transdutor	Faixa de TU (%)	Equação de regressão	R _{aj} ² (%)	Syx (%)	F
TFP	100 - 12	$TU = e^{12,0379 - 0,00142674*V + 0,000103214*T^2 - 2,70322*D - 0,00000462869*(V*D*T)}$	80,8	0,26	1668,2**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{17,3558 - 0,00252592*V - 0,021676*T + 0,000209962*T^2 - 19,5017*D + 0,00341914*(V*D)}$	40,7	0,20	86,54**
	TU > PSFt	$TU = e^{18,3465 - 0,00279505*V - 18,8086*D + 0,00343223*V*D}$	65,6	0,19	612,02**
TPS	100 - 12	$TU = e^{-232,559 - 0,00000187893*V^2 + 2022,29*D - 6262,86*D^2 + 8418,09*D^3 - 4215,4*D^4 + 0,0111712*(V*D)}$	60,9	0,36	397,14**
	TU ≤ PSFt	$TU = e^{584,962 - 0,665467*V + 0,00025432*V^2 - 3,2437*E-8*V^3 - 0,0122353*T + 0,000108745*T^2 - 1,08138*D}$	16,2	0,25	19,31**
	TU > PSFt	$TU = e^{-7,29485 - 0,014261*V + 0,00000122845*V^2 + 227,586*D - 543,571*D^2 + 375,368*D^3 + 0,0115583*(V*D)}$	64,0	0,19	285,48**

Onde: V= velocidade ultra-sônica (m/s); TU= teor de umidade base seca (%); e= exponencial; D= densidade básica ao teor de umidade de equilíbrio (g/cm³); T= temperatura de secagem (°C); TFP= transdutores de faces planas; TPS= transdutores de pontos secos; PSFt= ponto de saturação das fibras teórico (30%); R_{aj}²= coeficiente de determinação ajustado; Syx= erro padrão da estimativa; F= valor de F calculado; E= potência de base 10, e ** = significativo ao nível de 1 % de probabilidade.

Apesar do reduzido ajuste dos modelos (Tabelas 7 e 8) observam-se, de maneira geral, que o aumento da temperatura de secagem proporcionou tendência de redução do TU estimado.

Observa-se que, para determinadas faixas de TU, não ocorreu influência da temperatura de secagem sobre a estimativa do TU. No entanto, os valores de $R_{aj.}^2$ apresentaram-se muito baixos. Portanto, novamente observou-se uma baixa influência da temperatura de secagem sobre a estimativa do TU.

Compararam-se as espécies estudadas baseando-se nas Tabelas 8 e 9. Mais uma vez, não se observou influência definida da espécie sobre a estimativa do TU quando do uso dos TFP. Já quando do uso dos TPS, o eucalipto proporcionou valores superiores de TU estimado, para um mesmo valor de V_{us} .

4.5 Avaliação da velocidade ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem

Os resultados deste estudo mostram que a velocidade das ondas ultra-sônicas é sensível a alterações do TU da madeira de modo suficiente para ser utilizada no controle do processo de secagem. Esta sensibilidade é válida para TU superiores ao PSF, o que não ocorre com os demais métodos alternativos estudados até o presente momento.

Entretanto, outras características específicas da madeira também proporcionam alterações na velocidade de propagação das ondas, sendo a influência de algumas delas ainda não esclarecidas. Isso é observado pelas divergências descritas entre os pesquisadores.

Outro ponto muito importante para que esta alternativa venha a ser utilizada refere-se ao desenvolvimento de transdutores específicos para esta finalidade. Ambos os transdutores avaliados neste trabalho apresentaram vantagens e desvantagens, sendo que nenhum deles apresentou-se útil para esta função.

Os transdutores são sensores muito complexos, constituindo segredos de produção por parte de muitos fabricantes de aparelhos ultra-sônicos. Portanto, o desenvolvimento de transdutores específicos para esta finalidade é bastante acessível. Esta característica, aliada à compreensão das características das

madeiras, torna esta alternativa muito promissora para ser utilizada no controle do processo de secagem.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise dos resultados obtidos no presente estudo permite concluir:

- Existe correlação entre a velocidade ultra-sônica e o teor de umidade da madeira;
- Para ambos os tipos de transdutores utilizados (faces planas e pontos secos), o teor de umidade da madeira apresentou influência significativa sobre a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas, sendo esta relação inversamente proporcional e válida à madeira desde verde até o final da secagem;
- O uso dos transdutores de faces planas mostrou-se problemático durante a análise das madeiras submetidas à maior temperatura (70°C), devido ao derretimento do acoplante utilizado (vaselina). A utilização de um acoplante especial poderia resolver este problema;
- O uso dos transdutores de pontos secos mostrou-se mais prático quando comparado ao uso de transdutores de faces planas. No entanto, devem ser preferencialmente utilizados em madeiras duras e menos heterogêneas, como às do gênero *Eucalyptus*;
- A densidade 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 proporcionou, para o *Pinus elliottii* Engelm., aumento da velocidade ultra-sônica, e, para o *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, redução desta. Este comportamento distinto pode ser devido à pequena variação entre os valores de densidade, os quais variaram entre 0,40 e 0,58 g/cm³ para o pinus e, para o eucalipto, entre 0,37 e 0,57 g/cm³;
- A influência da espécie na velocidade ultra-sônica, quando utilizados os transdutores de faces planas, não apresentou comportamento definido. Quando utilizado os transdutores de pontos secos, a madeira de eucalipto proporcionou maior velocidade;

- Devido à influência da espécie e densidade sobre a velocidade ultra-sônica, pode-se depreender que o aparelho de ultra-som deve ser calibrado para cada espécie ou grupo de espécie com comportamentos semelhantes;

- O aumento da temperatura de secagem proporcionou, de modo geral, tendência de redução da velocidade ultra-sônica. A influência desta variável, no entanto, foi reduzida;

- O uso da técnica ultra-sônica para o monitoramento do teor de umidade de madeiras durante a secagem mostrou-se promissor. No entanto, há carência de estudos que relacionem o comportamento do ultra-som em função das diversas características relacionadas à madeira. Também são necessários a pesquisa e o desenvolvimento de transdutores específicos para esta finalidade;

- Estudos para a avaliação desta alternativa devem ser também conduzidas em estufas comerciais, podendo ser analisados outros fatores envolvidos, tal como a umidade relativa.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVEZ FILHO, M. Ultra-som é usado na avaliação de materiais. **Jornal da Universidade Estadual de Campinas**. Campinas, São Paulo, 8 a 14 set. 2003. Disponível em: <http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/jornalPDF/228-pag11.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2004.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultra-som: aspectos básicos**. 3.ed. São Paulo: ABENDE, 2002. 77p. Disponível em: <http://www.abende.org.br/apostilas_download.html#ultra>. Acesso em: 02 abr. 2005.

BALLARIN, A.W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.19-28, 2005.

BALLARIN, A.W.; PALMA, H.A.L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v.27, n.3, p.371-380, 2003.

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som**. 2001. 105f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade 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**, n.63, p. 235-240, 2003.

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: Wood NDT-2000. **Abstracts...** Disponível em: <<http://www.ndt.net/abstract/wood00/data/3.htm>>. Acesso em: 10 set. 2005.

BRASHAW, B.K. *et al.* Relationship between stress wave velocities of green and dry veneer. **Forest Products Journal**, 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**, n. 40 , v. 1 a 8, p.537-541, 2002.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154p.

CALIXTO, W.P. **Poluição Sonora**. 2004. 105f. Monografia (Especialização em Educação Ambiental) - Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2004.

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**, 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)

DAKOTA ULTRASONICS CORPORATION. **Operation manual: PR-8V Sonic Tester**. USA, 2005. 86p. Disponível em:<<http://dakotaultrasonics.com//PR8Vman.pdf>> .Acesso em: 04 out. 2005.

DYK, H.V.; RICE, R.W. Ultrasonic wave velocity as a moisture indicator in frozen and unfrozen lumber. **Forest Products Journal**, v.55, n.6, p. 68-72, 2005.

DURLO, M.A. **Tecnologia da madeira: peso específico**. Santa Maria: UFSM, CEPEF, FATEC, 1991. 29p. (Série Técnica, 8)

DURLO, M.A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira: Retratibilidade**. Santa Maria: UFSM, CEPEF, FATEC, 1992. 33p. (Série Técnica, 10)

EVANGELISTA, A.C.J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não-destrutivos**. 2002. 219f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FEENEY, F.E. *et al.* The influence of inhomogeneity on the propagation of ultrasound in wood. **Ultrasonics**, v. 36, n. 1/5, p. 449-453 ,1998.

FERRARI, V.J.; PADARATZ, I.J. Aplicação de ondas ultra-sônicas na detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado e na avaliação da resistência à compressão. **Acta Scientiarum**, v. 25, n. 2, p. 185-191, 2003.

FULLER, J.J.; ROSS, R.J.; DRAMM, J.R. Nondestructive evaluation of honeycomb and surface checks in red oak lumber. **Forest Products Journal**, v.45, n.5, p. 42-44, 1995.

GALINA, I.C.M. **Variação da resistência elétrica em madeiras visando o grupamento de espécies**. 1997. 93f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1997.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

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.

GONÇALVES, R.; PUCCINI, C. T. Utilização do ultra-som na avaliação de aspectos de qualidade da madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: IBRAMEM, 2000. 1 CD-ROM.

GONÇALVES, R.; PUCCINI, C.T. Influence of knots on velocity of ultrasonic waves in wood. In: AGRIBUILDING 2001, 2001, Campinas. **Anais...** Campinas: FEAGRI-UNICAMP, 2001. p.319-322. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/cigr/cd/proceedings/ab2001_2014.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2005.

GONÇALEZ, J.C.; VALLE, A.T. DO; COSTA, A.F. da. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, v.7, n.2, p.81-92, 2001.

GREEN, D.W.; WINANDY, J.E.; KRETSCHMANN, D.E. Mechanical properties of wood. In: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. **Wood Handbook - Wood as an engineering material**. Madison, Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, 1999a. cap. 4, p. 1-44.

GREEN *at al.* Adjusting modulus of elasticity for changes in temperature. **Forest Products Journal**, v.49, n.10, p.82-94, 1999b.

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.

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber**. Berlin: Maschinenbau GmbH, 1970. 204p.

HOLMES, S.; FORRER, J. Lumber moisture content and temperature changes with kiln condition. **Forest Products Journal**, v.39, n.4, p.67-70, 1989.

KAWAMOTO, S.; WILLIAMS, R.S. **Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites**: a review. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2002. 16p. (General Technical Report FPL-GTR-134)

LORENZI, A. **Aplicação de testes ultra-sônicos para avaliação de estruturas de concreto utilizando elementos de inteligência artificial**. 2000. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

MACKAY, J. F.G.; OLIVEIRA, L.C. **Kiln operator's handbook for Western Canada**. Vancouver: Forintek Canada Corp., 1989. 61p. (Special Publication n° SP-31)

MINÁ, A.J.S. *et al.* Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultrassom. **Scientia Forestalis**, n.63, p. 188-196, 2004.

MINICUCCI, D.J. **Avaliação de tensões por ultra-som no aro de rodas ferroviárias forjadas novas – classe C**. 2003. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MORRIS, C.O. **Ultrasonics for wood industries**. Corvallis: Oregon Forest Research Center, 1960. 42 p. (Report n° E-2)

NEPOMUCENO, L.X. **Tecnologia ultra-sônica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 317p.

NESVIJSKI, E.G. On design of ultrasonic transducers and accuracy of velocity measurements. In: **The e-Journal of Nondestructive Testing**, v.5, n.2, Berlin: NDT.net, 2000. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/v05n02/nesvi/nesvi.htm>. Acesso em: 19 set. 2005.

NESVIJSKI, E.G. Dry point contact transducers: design for new applications. In: **The e-Journal of Nondestructive Testing**, v.9, n.9, Berlin: NDT.net, 2003. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/v08n09/nesvi/nesvi.htm>. Acesso em: 19 set. 2005.

NOGUEIRA, M. **Determinação de módulos de elasticidade à compressão da madeira de *Pinus taeda* L. com o uso de ultra-som.**2003, 149f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2003.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A.W. Sensibilidade dos ensaios de ultra-som a ortotropia elástica da madeira. In: CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, 3.,2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Buenos Aires: AAENDE, 2003. Disponível em: <<http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/T-125.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2005.

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

OLIVEIRA, F.G.R. de *et al.* Influência da seção transversal na velocidade ultrassônica na madeira de *Eucalyptus citriodora*. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 197-203, 2005b.

OLIVEIRA, F.G.R. de; SALES, A. Propagação de ondas acústicas na madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: USP, 2000. 1 CD-ROM.

OLIVEIRA, F.G.R. de; SALES, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. **Bioresource Technology**, 2005. (Enviado para publicação)

OLIVEIRA, V.S. de; TOMASELLI, I. Efeito da secagem a altas temperaturas em algumas propriedades físicas e mecânicas de madeira jovem de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. **Revista Floresta**, v.2, n.1, p.17-25, 1981.

PICÓ, R. *et al.* Medida de las constantes elásticas de maderas densas por métodos ultrasónicos. **Revista de Acústica**, v. 35, n. 1 e 2, p.41-45, 2004.

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.

PUCCINI, C.T.; GONÇALVES, R.; MONTEIRO, M.E.A. Avaliação estatística da variação da velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira em presença de defeitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.499-503, 2002.

ROCHA, R.R. da. **Avaliação não-destrutiva de madeiras para dormentes ferroviários**. 2003. 112f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2003.

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.

SANTINI, E.J. Temperatura da madeira como alternativa de controle do processo de secagem. **Cerne**, v.6, n.2, p.112-121, 2000.

SANTINI, E.J.; TOMASELLI, I. Control of the drying process through the relationship of wood and wet-bulb temperatures. **Drying Technology**, v.19, n.1, p.127-135, 2001.

SHEVALDYKIN, V.G.; SAMOKRUTOV, A.A.; KOZLOV, V.N. Ultrasonic low-frequency short-pulse transducers with Dry Point Contact. Development and application. In: NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING, 2003. Berlin: NDT.net, **Anais...** v.8, n.10, 2003. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v066/v066.htm>>. Acesso em: 16 jun. 2005.

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**, v.30, n.4, p.405-413, 1998.

SIMPSON, T.S.; WANG, X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying. **Forest Products Journal**. v.51, n.10, p.51-54, 2001.

TAYLOR, F.W.; LANDOCH, D. TDAL profiles of southern pine lumber during drying. **Forest Products Journal**, v.40, n.10, p.47-50, 1990.

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**, v. 57, n. 5, p.547–552, 2003.