

CLAIR ROGÉRIO DA CRUZ

**APLICAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO PARA A ESTIMATIVA DA UMIDADE EM
MADEIRA DE *Eucalyptus***

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências Florestais.

Orientadora – Prof.^a Dr.^a Graciela I. B. de Muniz
Orientador externo – Prof. Dr. José Tarcísio Lima

CURITIBA
2006

DEDICO

À Deus;

À memória de meus pais, José Ademar da Cruz e Maria Aparecida da Cruz, pelos ensinamentos e pelo amor que sempre me dedicaram;

À minha esposa, Roselita e meus filhos Bruno e Thiago, por fazerem parte da minha vida, pelo amor e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Graciela I. B. de Muniz e José Tarcísio Lima pela valiosa orientação durante a realização desse trabalho.

Ao Professor Nelson Venturin que acreditou desde o começo.

À V&M Florestal pela concessão da madeira utilizada nesse experimento.

Aos professores e funcionários da UFPr, pelos valiosos ensinamentos.

Aos amigos de Curitiba: Dionéia, Ricardo, Márcio, Ademir, Vitor, Gilnei, Antônio, Prata, Daniel, Cilene e Anabel que fizeram parte dessa trajetória.

Aos amigos de Lavras: Cubatão, Juninho, Fran, J. Tarcísio, J. Reinaldo, Paulo Trugilho, Lourival, Akira, Zé Fazenda, Vico, Carlos, Hernani, Gilson, Chica, Teresinha, Edy, Carlão, Chicão, Maira, Duda, Guela, Toninho do bar, Adauto, Tuti, Sandrinho, Dona Ione, Sr. Airton, Dezinho, Marluce, Tio Admilson, Tia Joana, Passarinho, Faustinho, J. Roberto, Calegario, Rosado, Grisi e Zanzini pelo companheirismo e amizade.

A todos aqueles que porventura eu tenha esquecido, mas que merecem os agradecimentos.

Obrigado e que Deus ilumine o caminho de todos vocês.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 UMIDADE DA MADEIRA	4
2.2 EFEITO DA TEMPERATURA NAS DETERMINAÇÕES DE VELOCIDADE DO SOM E NA DETERMINAÇÃO DO PONTO DE SATURAÇÃO DAS FIBRAS	6
2.3 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA MADEIRA	7
2.4 PROPAGAÇÃO DE ONDAS SONORAS NA MADEIRA	8
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 AMOSTRAGEM	16
3.2 DESDOBRO E PREPARO DA AMOSTRA	17
3.3 APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i>	18
3.4 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA MADEIRA	22
3.5 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DAS TÁBUAS	22
3.6 MEDIÇÃO DOS DEFEITOS DAS TÁBUAS	22
3.6.1 Ângulo da grã	22
3.6.2 Área de nós	23
3.6.3 Área de quino	24
3.7 AMOSTRAGEM PARA OBSERVAÇÕES ANATÔMICAS	24
3.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	27

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1	UMIDADE INICIAL DAS TÁBUAS	29
4.2	ACONDICIONAMENTO DAS TÁBUAS	30
4.3	CARACTERÍSTICAS DAS TÁBUAS	30
4.4	APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS TÁBUAS	33
4.5	VARIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO ENTRE MATERIAIS GENÉTICOS E TÁBUAS.....	39
4.6	ASSOCIAÇÕES ENTRE A PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO E AS CARACTERÍSTICAS DAS TÁBUAS	41
4.7	UMIDADE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO	42
4.8	RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO E AS DIMENSÕES DOS COMPONENTES DA MADEIRA.....	54
5	CONCLUSÕES	58
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
7	ANEXOS	62

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS GENÉTICOS, COM DADOS RELATIVOS À ESPÉCIE, ALTURA E DIÂMETRO MÉDIO DAS ÁRVORES DE <i>Eucalyptus</i>	16
QUADRO 2	UMIDADE INICIAL DAS TÁBUAS E MÉDIAS DE UMIDADE DOS MATERIAIS GENÉTICOS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	29
QUADRO 3	MÉDIA GERAL E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO EM PORCENTAGEM DE CARACTERÍSTICAS DAS TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i>	32
QUADRO 4	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO APLICADAS NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	34
QUADRO 5	RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VELOCIDADE DA ONDA DE TENSÃO EM FUNÇÃO DE MATERIAL GENÉTICO E TÁBUA PARA A MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> JUNTOS.....	39
QUADRO 6	RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VELOCIDADE DA ONDA DE TENSÃO EM FUNÇÃO DE TÁBUA PARA OS DADOS DOS MATERIAIS GENÉTICOS DE <i>Eucalyptus</i> sp.....	40
QUADRO 7	CORRELAÇÕES DE PEARSON OBTIDAS ENTRE A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO E AS CARACTERÍSTICAS DAS MADEIRAS DE <i>Eucalyptus</i> sp.....	41
QUADRO 8	RESULTADOS DO AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA QUE DESCREVE A RELAÇÃO ENTRE A UMIDADE DA MADEIRA E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO UTILIZANDO-SE A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO, ÁREA DE NÓS E A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	45
QUADRO 9	RESULTADOS DO AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLO QUE DESCREVE A RELAÇÃO ENTRE A UMIDADE DA MADEIRA E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO, DENSIDADE BÁSICA E ÁREA DE NÓS DA MADEIRA DE <i>E. urophylla</i>	46
QUADRO 10	RESULTADOS DO AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA QUE DESCREVE A RELAÇÃO ENTRE A	

	UMIDADE DA MADEIRA E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO, DENSIDADE BÁSICA E ÁREA DE NÓS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus cloeziana</i>	47
QUADRO 11	RESULTADOS DO AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA QUE DESCREVE A RELAÇÃO ENTRE A UMIDADE DA MADEIRA E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO, DENSIDADE BÁSICA E ÁREA DE NÓS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i> ..	49
QUADRO 12	ERRO DA UMIDADE ESTIMADA PELAS EQUAÇÕES LINEARES MÚLTIPLAS EM RELAÇÃO À UMIDADE REAL DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	50
QUADRO 13	ERRO OBSERVADO NA ESTIMATIVA DA UMIDADE DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> POR EQUAÇÕES NÃO-LINEARES EM RELAÇÃO A UMIDADE REAL.....	53
QUADRO 14	MÉDIAS E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO EM PORCENTAGEM, DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO E COMPONENTES ANATÔMICOS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	54
QUADRO 15	CORRELAÇÃO DE PEARSON OBTIDAS DA VELOCIDADE DAS ONDAS DE TENSÃO COM AS CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	56

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	DIAGRAMA DE ATENUAÇÃO REPRESENTADA PELA DIMINUIÇÃO DA AMPLITUDE DA ONDA PERCORRENDO A MADEIRA EM SUA FREQUÊNCIA NATURAL EM UM INTERVALO DE TEMPO EM QUE: A = AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO, T = PERÍODO (1/f) E t = TEMPO (ADAPTADO DE BROWN <i>et al.</i> ,1952).....	9
FIGURA 2	COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE E ATENUAÇÃO EM RELAÇÃO À UMIDADE DA MADEIRA DE <i>Metasequoia</i> (SAKAI <i>et al.</i> , 1990).....	13
FIGURA 3	FLUXOGRAMA DA AMOSTRAGEM PRINCIPAL E DA AMOSTRAGEM SECUNDÁRIA UTILIZADAS PARA APLICAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	17
FIGURA 4	MÉTODO DE DESDOBRIO PARA OBTENÇÃO DE TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i> UTILIZADAS PARA A APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO.....	18
FIGURA 5	DISPOSIÇÃO DAS TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i> NA CÂMARA CLIMATIZADA PARA A APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO.....	19
FIGURA 6	TEMPORIZADOR DE ONDAS DE TENSÃO UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	20
FIGURA 7	ACIONAMENTO MANUAL DO PÊNDULO QUE INDUZ A FORMAÇÃO DA ONDA DE TENSÃO APLICADA NAS TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i>	20
FIGURA 8	PONTOS DE APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO MARCADOS NA LARGURA DAS TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i>	21
FIGURA 9	ILUSTRAÇÃO DO ESQUEMA UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE NÓS E DE QUINO NAS TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i>	24
FIGURA 10	SISTEMA DE MEDIÇÃO DAS DIMENSÕES DAS FIBRAS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> , UTILIZANDO-SE DO SOFTWARE WIN CELL.....	26
FIGURA 11	IMAGEM CAPTURADA PELO PROGRAMA WIN CELL E	

	UTILIZADA NA DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE VASOS/MM ² E DIÂMETRO MÉDIO DOS POROS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	26
FIGURA 12	COMPORTAMENTO DO ACONDICIONAMENTO EM CÂMARA CLIMATIZADA, DAS TÁBUAS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus cloeziana</i>	31
FIGURA 13	COMPORTAMENTO DO ACONDICIONAMENTO EM CÂMARA CLIMATIZADA, DAS TÁBUAS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i> , CLONE 5.....	31
FIGURA 14	VARIAÇÃO DA UMIDADE DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus cloeziana</i> EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO.....	35
FIGURA 15	GRÁFICO DE DISPERSÃO DO CLONE 7 MOSTRANDO A TENDÊNCIA DE DISPERSÕES DIFERENCIADAS OCORRIDA EM UMA TÁBUA DENTRO DO CLONE.....	36
FIGURA 16	DENSIDADE BÁSICA DAS TÁBUAS DE <i>E. urophylla</i> DESTACANDO AQUELAS COM MAIORES DENSIDADES, QUE APRESENTARAM DISPERSÕES DIFERENCIADAS.....	37
FIGURA 17	LOCALIZAÇÃO DA AMOSTRA RETIRADA NA TÁBUA CAUSANDO ORIENTAÇÃO DIFERENCIADA DOS COMPONENTES ANATÔMICOS NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	38
FIGURA 18	REPRESENTAÇÃO DE NÓS EM TÁBUA RADIAL E TANGENCIAL DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	38
FIGURA 19	DISPERSÃO DOS DADOS DE UMIDADE DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	43
FIGURA 20	DISPERSÃO DOS DADOS DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO EM FUNÇÃO DA UMIDADE DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	43
FIGURA 21	DISPERSÃO DOS DADOS DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO EM UMA TÁBUA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i>	44
FIGURA 22	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DO AJUSTE DA EQUAÇÃO GERAL QUE ESTIMA A UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO, DENSIDADE BÁSICA E ÁREA DE NÓS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	46

FIGURA 23	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DO AJUSTE DA EQUAÇÃO QUE ESTIMA A UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO, DENSIDADE BÁSICA E ÁREA DE NÓS DA MADEIRA DE <i>E. urophylla</i>	47
FIGURA 24	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DO AJUSTE DA EQUAÇÃO QUE ESTIMA A UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO, DENSIDADE BÁSICA E ÁREA DE NÓS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus cloeziana</i>	48
FIGURA 25	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DO AJUSTE DA EQUAÇÃO QUE ESTIMA A UMIDADE DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS TENSÃO, DENSIDADE BÁSICA E ÁREA DE NÓS DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i>	49
FIGURA 26	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DO AJUSTE DA EQUAÇÃO GERAL NÃO-LINEAR QUE ESTIMA A UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	51
FIGURA 27	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DO AJUSTE NÃO-LINEAR DA EQUAÇÃO QUE ESTIMA A UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus urophylla</i>	52
FIGURA 28	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DO AJUSTE NÃO-LINEAR DA EQUAÇÃO QUE ESTIMA A UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus cloeziana</i>	52
FIGURA 29	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DO AJUSTE NÃO-LINEAR DA EQUAÇÃO QUE ESTIMA A UMIDADE DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i>	53

RESUMO

O controle do processo de secagem da madeira de *Eucalyptus*, assim como de outras espécies com maior propensão a defeitos, requer um controle eficiente da umidade da madeira, buscando minimizar a ocorrência de defeitos. Dessa maneira, foi utilizado neste trabalho um temporizador de ondas de tensão (Stress Wave Timer) com o objetivo de verificar o comportamento da umidade de tábuas a partir da variação da velocidade de propagação de ondas de tensão na madeira de nove materiais genéticos de *Eucalyptus* e definir o melhor ponto de amostragem na tábua. Foi também analisada a influência de defeitos naturais, da densidade básica e dos componentes anatômicos na velocidade de propagação dessas ondas. As ondas de tensão foram aplicadas longitudinalmente em 180 tábuas medindo 110 x 10 x 1,2 cm e em 5 pontos na largura das tábuas. Foram determinados a área de nós, a área de quino, o ângulo da grã e a densidade básica para cada uma das tábuas. Em cada um dos cinco pontos da tábua foi determinado o comprimento das fibras, a espessura das paredes das fibras, o diâmetro de poros, frequência de vasos e a velocidade de propagação das ondas de tensão. Para atingir esses objetivos foram realizadas análises de variância, médias e as correlações das características da madeira. Além disso, foram feitos ajustes de equações. Com essas análises verificou-se que a umidade das madeiras pode ser estimada pelo método de propagação das ondas de tensão na madeira através de modelos não-lineares ou ainda por um modelo linear múltiplo utilizando a velocidade de propagação das ondas, a densidade básica e a área de nós como variáveis independentes. Os melhores ajustes foram obtidos para tábuas livres de defeitos visíveis. A velocidade de propagação das ondas de tensão na madeira pode variar em função da área de nós nas tábuas, do ângulo da grã, da densidade da madeira e da orientação anatômica das tábuas. Os nós exercem maior influência no deslocamento das ondas quando presentes em tábuas radiais. Os componentes anatômicos não possibilitaram explicar o comportamento das ondas de tensão nas madeiras.

Palavras-chave : Madeira, secagem, *Eucalyptus*, ondas de tensão.

ABSTRACT

The *Eucalyptus* wood drying process as well other prone to defects woods requires an efficient moisture content control, in view of improving the product quality. Thus, a stress wave timer equipment was employed in this work with the objective of 1) verifying the behavior of the moisture content of the lumbers as function of the variation of the stress wave propagation velocity into the wood and 2) define the best position of sampling in the lumber. Also, it was analyzed the influence of wood natural defects, basic density and anatomical components on the wave velocity. The stress wave were applied in 180 110 cm x 10 cm x 1,2 cm lumbers of nine *Eucalyptus* genetic material, in five points across the lumber width. The knots area, the kino area, the grain angle and the basic density, in each lumber, were determined. In each of the five points of the lumbers the fiber length, the fiber wall thickness, the pores diameters, the frequency of vessels and the velocity of the stress wave propagation were determined. Analyses of variance, correlations and regressions were carried out to find the association between variables. Based on these analyses it was verified that the moisture content can be estimated by the velocity of the propagation of the stress wave through out non-linear models or by a multiple linear model using the velocity of the propagation of the waves, the wood density and area of the knots as independent variables. The best fittings were found for clear wood. The velocity of the propagation of the stress wave in wood can vary as function of the area of the knots in the lumber, of the grain angle, of the basic density and of the anatomical orientation of the lumbers. The knots have higher influence on the dislocation of the waves when present in radial lumbers. The anatomical components cannot explain the behavior of the stress wave in wood.

Key-words : Wood, Drying, *Eucalyptus*, Stress-wave.