

EMPREGO DE ONDAS DE TENSÃO PARA OBTENÇÃO DE IMAGEM TOMOGRÁFICA DE PEÇAS ROLIÇAS DE MADEIRA

Marcela Candian (1); Almir Sales (2); Viviane de Salles Cardin (3)

(1) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de São Carlos, Brasil – e-mail: marcela_candian@yahoo.com.br

(2) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de São Carlos, Brasil – e-mail: almir@ufscar.br

(3) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de São Carlos, Brasil – e-mail: vicardin@yahoo.com.br

RESUMO

Proposta: O avanço no uso das técnicas não-destrutivas possibilitou o desenvolvimento de tecnologias para a obtenção de imagem tomográfica da madeira. A imagem pode ser reconstruída através do mapeamento de diversos parâmetros e com o uso de procedimentos computacionais para o processamento dos resultados, reconstrução e exibição da imagem. Este trabalho teve como finalidade a obtenção de imagem tomográfica a partir do emprego de ondas de tensão. **Método de pesquisa/Abordagens:** Na metodologia experimental foi empregada madeira da espécie *Eucalyptus citriodora*, a qual foi avaliada em duas situações: na condição sem existência de defeito interno e na condição de existência de defeito interno. Foram realizados ensaios empregando a técnica de ondas de tensão nas duas condições, sendo gerado em seguida a imagem tomográfica para a situação em que a peça apresentava defeito interno. **Resultados:** Os resultados obtidos permitem verificar que a imagem tomográfica obtida com o emprego da técnica de ondas de tensão permite estimar a porcentagem da área com defeitos de peças roliças de madeira com adequada confiabilidade. **Contribuições/Originalidade:** Com a obtenção da imagem tomográfica torna-se possível a detecção de forma não-destrutiva de defeitos internos da madeira. A imagem tomográfica possibilita também que a madeira possa ser utilizada de forma mais racional.

Palavras-chave: madeira, imagem tomográfica, ondas de tensão.

ABSTRACT

Proposal: The advance in the use of the nondestructive techniques made possible the development of technologies for the attainment of tomographic image of timber. The image can be reconstructed through the mapping of diverse parameters and with the use of computational procedures for the processing of the results, reconstruction and exhibition of the image. This work had as purpose the attainment of tomographic image from the use of tension waves. **Methods:** This work had as purpose the attainment of tomographic image from the use of tension waves. In the experimental methodology a piece of *Eucalyptus citriodora* was used, which was evaluated in two situations: condition without existence of internal defects and condition with internal defect. Assays had been carried through using the technique of tension waves in the two conditions, being generated after that the tomographic image for the situation where the part presented internal defect. **Findings:** The results allow to verify that the gotten tomographic image with the use of the technique of tension waves allow esteem the percentage of the spoiled area of timber with adjusted reliability. **Originality/value:** With the attainment of the tomographic image the detention of nondestructive form of internal defects of the wood is possible. The tomographic image also makes possible that wood can be used of more rational form.

Keywords: wood, tomographic image, tension waves.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é considerada um dos recursos renováveis estratégicos. Devido a sua versatilidade e propriedades mecânicas é utilizada em diversos setores importantes visando o conforto e facilidades ao homem. A madeira pode sofrer ação de diversos agentes degradadores que causam danos severos ao material e aos seus produtos (FURTADO, 2000).

A avaliação da deterioração, principalmente a degradação que não apresenta indicadores externos, é uma importante ferramenta para a inspeção de peças de madeira. A avaliação pode ser realizada por métodos não-destrutivos, os quais possibilitam a verificação de peças com melhores propriedades para um determinado uso final.

De acordo com a Abende (2007), os ensaios não-destrutivos são aqueles realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior.

Resultados indicam que os ensaios não-destrutivos fornecem resultados confiáveis que permitem a avaliação das propriedades mecânicas de peças de madeira (ROSS e PELLERIN, 1994), (ROSS et al., 2000), (ERICKSON et al., 2000), (BEALL, 2002), (WANG et al., 2002), (KABIR et al, 2002) e (SASAKI e HASEGAWA, 2003).

Pesquisas internacionais com várias técnicas, baseadas em diferentes conceitos, como por exemplo, raios-X e ressonância magnética, têm sido realizadas para a avaliação de peças de madeira. Estas técnicas fornecem imagens que possibilitam a localização de defeitos e a avaliação das características internas do material, mas apresentam uma limitação ao seu uso devido ao alto custo de utilização. A técnica de ondas de tensão tem como vantagem o custo menor para sua implantação, trata-se de um processo dinâmico que está internamente relacionado com as propriedades físicas e mecânicas da madeira.

A propagação de ondas de tensão apresenta como principal vantagem a possibilidade do estudo do interior da madeira, preservando as características físicas e mecânicas e seu uso final. O equipamento de ondas de tensão é capaz de detectar de forma não-destrutiva a presença de furos, deterioração e rachaduras.

No método de ondas de tensão é analisada a velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material. Para explicar o método é possível fazer uso da teoria de propagação de ondas unidirecionais em uma barra homogênea e elástica.

Ao aplicar um impacto em uma de suas extremidades, gera-se uma onda que se movimenta ao longo da barra, excitando as partículas da extremidade que recebeu o impacto, enquanto as partículas da extremidade livre se encontravam em repouso. A onda caminha a uma velocidade constante ao longo da barra, e logo após caminhar por todo o comprimento, esta é refletida pela extremidade livre da barra, retornando-se ao seu ponto de origem.

Apesar de a velocidade continuar sempre constante, o movimento das partículas da barra vai diminuindo a cada passagem da onda pela barra, sendo que após um período de tempo as partículas da barra retornam ao repouso. Verifica-se próxima da extremidade excitada uma série de pulsos igualmente espaçados, com amplitude diminuindo ao longo do tempo.

A propagação de ondas na madeira é um processo dinâmico que está internamente relacionado com as propriedades físicas e mecânicas do material. As ondas longitudinais são as mais velozes e mais comumente usadas para avaliar as propriedades da madeira.

A onda se propaga mais rapidamente na madeira sadia e de maior rigidez em relação à madeira deteriorada e de módulo de elasticidade inferior. A presença de degradação na linha entre os dois transdutores resulta numa diminuição da velocidade de propagação ultra-sônica, se comparada com uma velocidade de referência.

Pesquisas demonstram que um aumento de 30% no tempo de propagação implica numa perda de 50% da resistência da madeira. Um aumento de 50% no tempo indica que a madeira está severamente degradada (ROSS et al., 2000).

O avanço no uso das técnicas não-destrutivas possibilitou o desenvolvimento de tecnologias para a obtenção de imagem tomográfica da madeira. A imagem não-destrutiva é baseada em diferentes métodos que utilizam ondas elásticas, radiação, luz, campos magnéticos, elétricos e raios-X (EVANS e KIBBLEWHITE, 2000), (TSUCHIKAWA et al., 2000), (HAUFFE e MAHLER, 2000), (RUST, 2000), (EVANS e ILIC, 2001), (BUCUR, 2003), (NICOLOTTI et al., 2003) e (QUOIRIN, 2004). A imagem pode ser reconstruída através do mapeamento de diversos parâmetros e com o uso de procedimentos computacionais para o processamento dos resultados, reconstrução e exibição da imagem.

Este trabalho teve como finalidade a obtenção da imagem tomográfica de uma peça roliça de madeira com um furo, simulando a presença de um defeito interno do material, para verificar a confiabilidade da imagem gerada a partir do emprego da técnica não-destrutiva de ondas de tensão.

2 METODOLOGIA

Para a realização da parte experimental deste trabalho foi empregado o equipamento de ondas de tensão FAKOPP 2D, o qual pode ser visualizado na Figura 01.



Figura 1 – Equipamento de onda de tensão FAKOPP.

O equipamento apresenta a opção de até oito canais de emissão e recebimento da onda (figura 2). Ao aplicar um impacto em um dos sensores, o equipamento fornece tempos de propagação da onda no interior do material.



Figura 2 – Sensores de emissão e recebimento da onda sonora.

Foram realizados ensaios empregando uma peça de madeira da espécie *Eucalyptus citriodora* com 22 anos de idade, com diâmetro médio de 35 cm e altura de 10 cm. Foram utilizados oito sensores, conforme ilustrado na Figura 3 e na Figura 4.

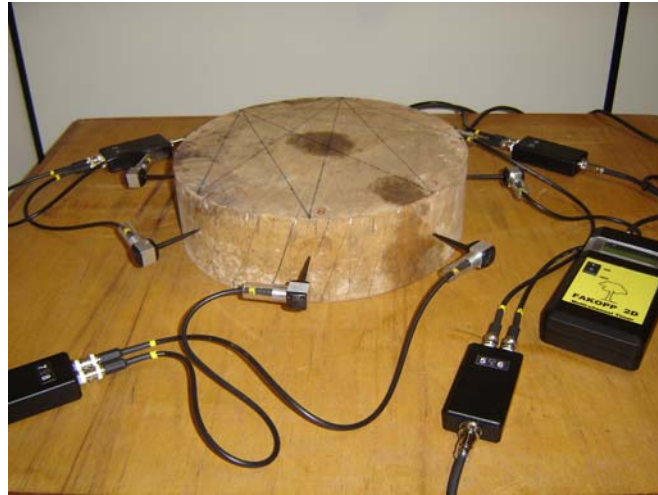


Figura 3 – Ensaio de propagação sonora em peça de madeira.



Figura 4 – Posicionamento do sensor na peça de madeira.

A onda foi emitida no material através da aplicação de suaves pancadas com um martelo, conforme ilustrado na Figura 5. O impacto foi dado em cada um dos oito sensores posicionados na peça. O equipamento forneceu os tempos de propagação da onda no material, o qual possibilitou, a partir dos valores de distância, a obtenção dos valores de velocidade da onda.



Figura 5 – Aplicação da onda sonora.

A seguir, foi realizado um furo com aproximadamente 6,0 cm de diâmetro na peça de madeira, a fim de se verificar a sensibilidade do equipamento em relação à presença de defeitos na madeira.

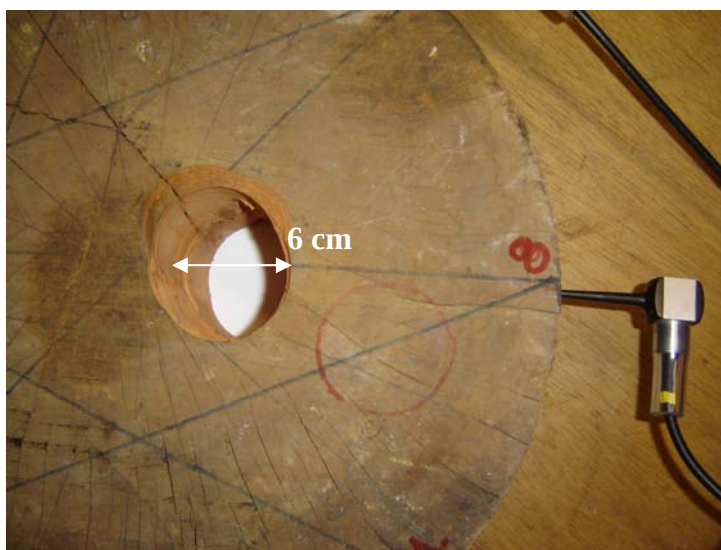


Figura 6 – Peça de madeira com um furo de 6,0 cm.

Para esta nova situação foi realizado o mesmo procedimento empregado para a peça sem o furo para a obtenção dos tempos de propagação da onda no material e posteriores valores de velocidade (Figura 7). Os sensores foram mantidos na posição inicial (1 a 8).

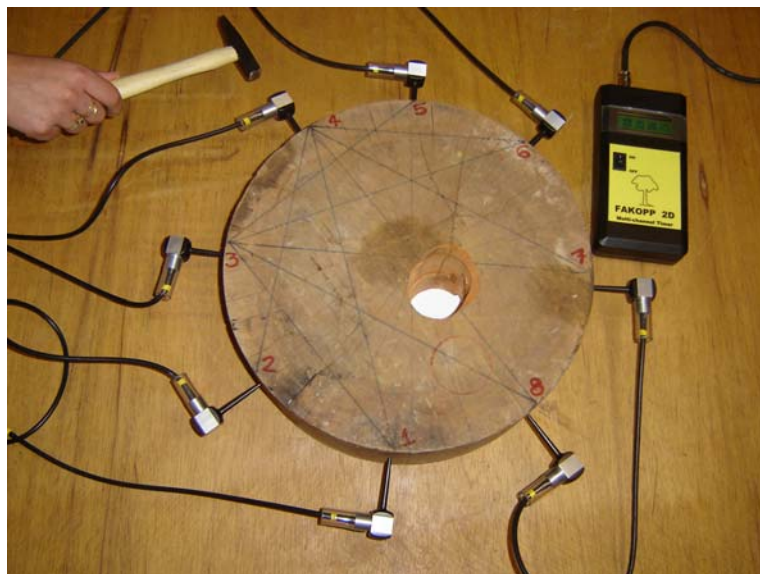


Figura 7 – Propagação da onda sonora na peça perfurada.

Com o ensaio foi possível além da obtenção dos tempos de propagação da onda, que permitiram a determinação das velocidades da onda no material, a geração da imagem tomográfica para a situação em que a peça apresentava o furo.

3 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste item estão analisados os resultados obtidos para a peça de madeira de diâmetro médio de 35 cm e altura de 10 cm, com e sem a presença do furo.

Nas tabelas 1 e 2 estão apresentados os valores obtidos para o tempo de propagação da onda e as distâncias medidas entre os sensores para a peça de madeira não perfurada.

Ressalta-se que ao receber o impacto, cada sensor emite onda para os 7 demais sensores, assim nas tabelas a seguir são apresentados os tempos de propagação, distância e velocidade entre cada sensor e os demais.

Tabela 1 – Valores de tempo de propagação sonora na peça sem perfuração (μs).

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	138	171	195	207	213	189	142
2	145	-	127	172	194	229	227	202
3	172	125	-	124	160	216	230	216
4	203	174	127	-	110	189	226	228
5	212	195	162	113	-	114	171	199
6	211	218	212	167	108	-	121	166
7	189	218	223	212	165	122	-	126
8	140	195	214	218	193	170	127	-

Tabela 2 – Valores de distâncias entre os sensores na peça.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8
1		14	25	33,5	35	33	25,5	13,5
2			13	25,5	32,5	35	33	25,5
3				14,5	24	31,5	35	32,5
4					11	22	31,5	35
5						12	25	32,5
6							15	26
7								13,5
8								

Vale salientar que os valores de tempo de propagação obtidos entre os pares de sensores são praticamente iguais quando se compara, por exemplo, a direção 3 – 5 (160 μ s) com 5 – 3 (162 μ s). As diferenças não ultrapassaram 5% de variação.

A partir dos valores de tempo de propagação e distância percorrida pela onda, calculou-se a velocidade de propagação da onda sonora para a peça de madeira sem perfuração, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores da velocidade de propagação sonora na peça sem perfuração (m/s).

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	1014	1462	1718	1690	1549	1349	951
2	966	-	1024	1483	1675	1528	1454	1262
3	1453	1040	-	1169	1500	1458	1522	1505
4	1650	1465	1142	-	1000	1164	1394	1535
5	1651	1666	1481	973	-	1053	1462	1633
6	1564	1606	1486	1317	1111	-	1239	1566
7	1349	1514	1570	1486	1515	1230	-	1071
8	964	1308	1519	1605	1684	1529	1063	-

Quando a onda sonora cruza a peça de madeira, por exemplo, entre os sensores 1 e 4, têm-se a propagação de onda radial. Já quando a onda percorre a distância entre sensores adjacentes, por exemplo, sensores 1 e 2, têm-se ondas tangenciais, as quais possuem menor velocidade de propagação, devido à falta de predominância de elementos anatômicos, como os raios na propagação radial. Essa diferença na velocidade entre ondas radiais e tangenciais pode ser claramente visualizada nos valores apresentados acima.

Nas tabelas 4 e 5 a seguir estão apresentados os valores obtidos para o tempo e velocidade de propagação da onda sonora entre os sensores para a peça de madeira com o furo de 6,0 cm.

Tabela 4 – Valores de tempo de propagação sonora na peça perfurada (μ s).

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	158	193	218	238	258	213	188
2	147	-	141	188	215	270	292	233
3	181	141	-	138	174	247	286	259
4	210	189	140	-	123	208	254	280
5	229	218	178	123	-	120	184	235
6	252	280	257	211	124	-	132	190
7	213	301	328	268	193	136	-	146
8	187	241	268	286	240	187	143	-

Tabela 5 – Valores da velocidade de propagação sonora na peça perfurada (m/s).

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	1518	1871	1926	1761	1561	1641	1130
2	1518	-	1644	1950	1865	1495	1359	1453
3	1871	1644	-	1823	1936	1520	1322	1496
4	1926	1950	1823	-	1630	1472	1498	1445
5	1761	1865	1936	1630	-	1774	1851	1671
6	1561	1495	1520	1472	1774	-	1890	1905
7	1641	1359	1322	1498	1851	1890	-	1634
8	1130	1453	1496	1445	1671	1905	1634	-

Comparando-se os valores de velocidade de propagação do disco antes e após o furo, é possível verificar-se que houve uma diminuição da velocidade nas direções entre os sensores que cruzaram o furo. A direção mais afetada foi entre os sensores 4 e 8, em função da posição do furo. Neste caso a diminuição da velocidade foi de 6,20% (posição 4 – 8) e de 9,96% (posição 8 – 4). A redução da velocidade entre os sensores 2 e 7 também foi sensível, com os valores de 6,53% (posição 2 – 7) e 10,23% (posição 7 – 2). A onda sonora se propaga mais rapidamente na madeira sadia em relação à madeira deteriorada. A presença de defeitos na linha entre os transdutores resulta numa diminuição da velocidade de propagação sonora, se comparada com uma velocidade de referência.

Com os valores obtidos de velocidade de propagação da onda no material para a peça perfurada, foi possível a obtenção da imagem tomográfica através do software fornecido junto com o equipamento FAKOPP 2D (FAKOPP 2D Software) e da porcentagem de área com defeito presente no disco.

Na Figura 08 é possível visualizar a imagem tomográfica gerada a partir do ensaio com o disco com furo.

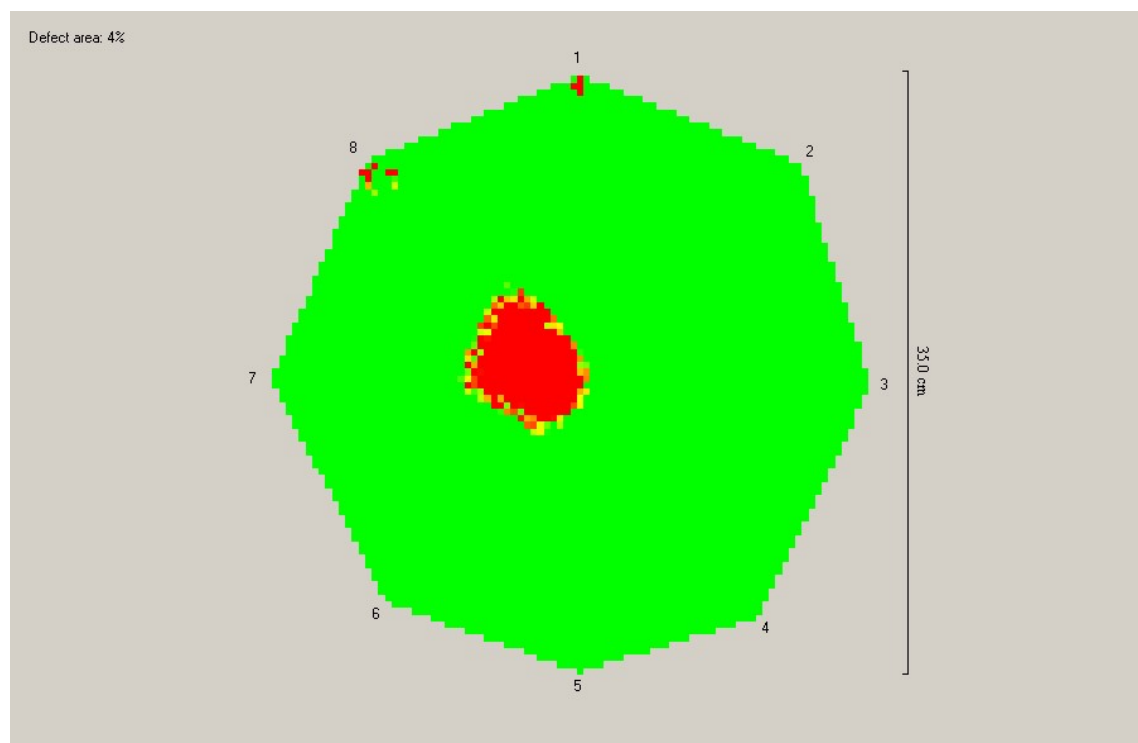


Figura 8 – Imagem tomográfica – peça perfurada.

Pela Figura 08 é possível verificar que o furo presente na tora de madeira foi detectado pela imagem tomográfica, representando uma área de defeito correspondente a 4%, valor calculado automaticamente pelo programa que gerou a imagem tomográfica. Ao comparar com a porcentagem real de defeito, oriunda do furo realizado na peça, verifica-se que o furo corresponde a 2,95%, estando

próximo ao valor apresentado pelo programa. Ressalta-se que o programa considerou como defeito também outras regiões da peça, como pode ser verificado próximo aos pontos 1 e 8 da seção apresentada na figura 8, sendo que nesta região havia pequenos defeitos internos, não visíveis externamente, os quais foram investigados após a obtenção da imagem. A investigação foi realizada com apenas um furo, uma vez que esta situação já foi suficiente para verificar a validade da técnica de ondas de tensão para a avaliação de defeitos internos na madeira.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e discussões realizadas foi possível obter as seguintes conclusões:

- Quando a onda sonora cruza o disco de madeira, têm-se a propagação de onda radial. Já quando a onda percorre a distância entre sensores adjacentes, têm-se ondas tangenciais, as quais possuem menor velocidade de propagação, devido à falta de predominância de elementos anatômicos, sendo esta diferença de velocidades de acordo com a direção de propagação verificada nos valores obtidos durante a realização dos ensaios;
- Ao realizar a aplicação de ondas de tensão no disco, com este apresentando o furo, verificou-se que houve uma diminuição da velocidade nas direções entre os sensores que cruzaram o furo. Isto ocorreu porque a onda possui uma maior velocidade de propagação na madeira sadia em relação à madeira com presença de defeitos, havendo uma dispersão da onda quando esta passa por uma região com defeito;
- A imagem tomográfica gerada retratou de forma adequada a real situação da peça, com indicação de porcentagem de defeito muito próximo ao valor real, comprovando ser uma importante ferramenta para avaliação de defeitos internos em peças de madeira.

5 REFERÊNCIAS

ABENDE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS. Disponível em: <http://www.abende.org.br/ensaios_ao_destrutivos.html> Acesso em: 16 de outubro, 2007.

BEALL, F. C. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. **Wood Science and Technology**. v. 36, p. 197-212, 2002.

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

ERIKSON, R. G.; GORMAN, T. M.; GREEN, D. W.; GRAHAM, D. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine and grand fir trees from northern Idaho. **Forest Products Journal**. v. 50, n. 7/8, p. 59-65, 2000.

EVANS, R.; KIBBLEWHITE, R. P. Controlling wood stiffness in plantation softwoods. **12th Symposium NDT of Wood**, University of Western Hungary, Sopron. Proceedings. p. 67- 74, 2000.

EVANS, R.; ILIC, J. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. **Forest Products Journal**. v. 51, n. 3, p. 53-57, 2001.

FURTADO, E. L. Microrganismos manchadores da madeira. **Série Técnica IPEF**, v. 13, n. 33, p. 91-96, 2000.

HAUFFE, P., MAHLER, G. Evaluation of internal log quality using x-ray and ultrasound. **12th Symposium NDT of Wood**, University of Western Hungary, Sopron. Proceedings. p. 259-263, 2000.

KABIR, M. F.; SCHMOLDT, D. L.; Schafer, M. E. Time domain ultrasonic signal characterization for defects in thin unsurfaced hardwood lumber. **Wood and Fiber Science**. v. 34, n. 1, p. 165-182, 2002.

NICOLOTTI, G., SOCCO, L. V., MARTINIS, R., GODIO, A., SAMBUELLI, L. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. **Journal of Arboriculture**. v. 29, n. 2, p. 66-78, 2003.

QUOIRIN, N. S. R. Diagnóstico de amostras de Madeira por tomografia de raios-x. Curitiba. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal do Paraná, 2004.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. **Gen. Tech. Report. FPL– GTR – 70**. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994.

ROSS, R. J.; WANG, X.; MATTSO, J. A.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; GESKE, E. A.; WEHR, M. A. Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small diameter logs. **12th Symposium NDT of Wood**, University of Western Hungary, Sopron. Proceedings. p. 155-163, 2000.

RUST, S. A new tomographic device for the nondestructive testing of trees. **12th Symposium NDT of Wood**, University of Western Hungary, Sopron. Proceedings. p. 233-237, 2000.

SASAKI, Y.; HASEGAWA, M. Effects of cyclic loading on velocities of ultrasonic waves propagating through wood. **Wood and Fiber Science**. v. 35, n. 1, p. 110-119, 2003.

TSUCHIKAWA, S., TAKAHASHI, T., TSUTSUMI, S. Nondestructive measurement of wood properties by using near-infrared laser radiation. **Forest Products Journal**. v. 50, n. 1, p. 81-86, 2000.

WANG, X., ROSS, R. J., BRASHAW, B. K., ERICKSON, J. R., FORSMAN, J. W., PELLERIN, R. Diameter effect on stress wave evaluation of modulus of elasticity of logs. **13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**. University of California. USA. Proceedings. p. 149-156, 2002.

6 AGRADECIMENTOS

À UFSCar (Universidade Federal de São Carlos), ao MCT/CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao PIBIC/CNPq/UFSCar.