

Avaliação do Perfil Radial do Lenho de Árvores de Teca (*Tectona grandis* L.f.) Através da Tomografia de Impulso

Vinicius Resende de Castro¹, Mário Tomazello Filho¹, Marco Aurelio Arizapana¹, José de Castro Silva², Demóstenes Ferreira da Silva Filho¹, Jefferson Lordello Polizel¹, Ugo Leandro Belini¹

¹Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Universidade de São Paulo – USP

²Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa – UFV

RESUMO

A tomografia de impulso constitui-se em uma das mais importantes metodologias de análise não destrutiva, avaliando a velocidade das ondas mecânicas através do lenho e gerando imagens da seção transversal do tronco das árvores. No presente trabalho, foi aplicado o tomógrafo de impulso no lenho de 20 árvores de *Tectona grandis* e foram analisadas as imagens tomográficas. Os resultados evidenciaram: i) a geração de ondas mecânicas com velocidade média no lenho de 1.087 m/s; ii) um coeficiente de variação de 19,81%, de baixa variabilidade, demonstrando a eficácia do método; e iii) os defeitos internos no lenho, detectados nas imagens tomográficas através da diferença de cor.

Palavras-chave: velocidade de onda, qualidade da madeira, método não destrutivo.

Evaluation of the Radial Profile of Teak Tree Wood (*Tectona grandis* L.f.) Through Impulse Tomography

ABSTRACT

Tomography constitutes one of the most important non-destructive methods of non-destructive analysis, evaluating the velocity of mechanical waves through the wood and producing images of the radial profile of teak wood by means of impulse. In this paper, the impulse tomography was applied in the wood of 20 *Tectona grandis* trees and the images were analyzed. The results showed: i) the generation of mechanical waves in wood with mean speed of 1,087 m/s; ii) the variation coefficient of 19.81%, with low variability, demonstrating the effectiveness of the method; and iii) the internal defects in wood detected in tomography images through color difference.

Keywords: velocity wave, quality wood, non-destructive method.

1. INTRODUÇÃO

As técnicas não destrutivas de análise do tronco das árvores em pé nas florestas urbanas possibilitam detectar os defeitos internos do lenho, prevenindo o risco de queda e propiciando o manejo correto pela poda de galhos afetados por organismos xilófagos, aumentando sua longevidade e a sanidade biológica (Ferreira, 2009). Nas plantações florestais, tais técnicas permitem a avaliação da qualidade do lenho e a sua caracterização para aplicação como madeira sólida e seus produtos, bem como no manejo florestal sustentado e na seleção nos programas de melhoramento florestal (Pereira, 2009). Atualmente, dentre os métodos não destrutivos, destaca-se o tomógrafo de impulso (Pereira et al., 2007), que permite a reconstrução de seções transversais do tronco e dos galhos das árvores, tornando possível delimitar e quantificar o lenho biodegradado e inferir sobre algumas de suas propriedades. A imagem da estrutura interna do lenho gerada pelo tomógrafo de impulso, em resposta à diferença da velocidade de transmissão das ondas sonoras, pode ser correlacionada com as propriedades físico-químicas (densidade, módulo de elasticidade, umidade, etc) e possibilita determinar a percentagem de cerne/alburno, madeira de reação, nós, podridão do lenho, excentricidade da medula, etc. (Rinntech, 2005; Picus, 2009).

O tomógrafo de impulso baseia-se na medição do tempo de transmissão das ondas entre os sensores e sua discriminação em faixas através de *software*. A velocidade da onda depende do estado de sanidade do lenho, sendo que fraturas, cavidades e podridão reduzem o tempo de transmissão das ondas, formando uma imagem bidimensional da seção transversal do tronco codificada em tonalidades de diferentes cores (Rinntech, 2005; Picus, 2009).

O tomógrafo de impulso foi utilizado na avaliação do tronco de árvores de *Quercus alba* e de *Carya* spp., mostrando correlação com a avaliação visual, com erro de 3 a 8% na imagem produzida (Gilbert & Smiley, 2004). Da mesma forma, constitui-se em ferramenta eficiente para estimar a densidade do lenho de árvores de *Caesalpinia echinata*, *Schizolobium parayba* e *Eucalyptus saligna*, com similaridade com os dados de densidade

por densitometria de raios X (Pereira, 2009). A comparação dos resultados da análise do lenho das árvores por tomografia de impulso indicou que dados de melhor qualidade da sanidade foram gerados, em relação ao resistógrafo (Rollo, 2009). Na análise do lenho de árvores de *Tectona grandis*, a tomografia de impulso permitiu diagnosticar regiões com degradação do lenho (Amodei et al., 2010).

Pelo exposto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o perfil radial do lenho do tronco de árvores adultas de *Tectona grandis*, utilizando a metodologia de tomografia de impulso.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Seleção das árvores e obtenção das imagens tomográficas

Foram selecionadas 20 árvores de teca, com 41 anos, de uma plantação localizada no Campus da ESALQ-USP, nas coordenadas de 22° 42' S de latitude, 47° 38' O de longitude e 540 m de altitude. Na altura do DAP do tronco das árvores, foram fixados 11 pregos metálicos equidistantes, a 2 cm de profundidade, atingindo a região do alburno. Nos pregos metálicos, foram inseridos os sensores do tomógrafo de impulso marca Arbotom, modelo 1.73a e, em seguida, foi instalado um cabo, conectando todos os pregos com o primeiro sensor ligado à bateria (Figura 1). Em cada sensor, foram



Figura 1. Tomógrafo de impulso instalado no tronco de árvore de teca observando-se o momento das batidas para aquisição dos dados.

Figure 1. Impulse tomography installed in the trunk of teak tree observing the moment of beats for data acquisition.

executadas cinco batidas com um martelo, podendo aumentar em número, até que a percentagem de erro atingisse a faixa de valor aceitável (entre 0 e 10%), de acordo com a Tabela Delta %, do *software* Arbotom 1.73a. A velocidade das ondas que atinge os diferentes sensores é calculada por um *software*, gerando um gráfico de velocidade de onda da seção transversal e produzindo uma imagem tomográfica da seção transversal do tronco das árvores de teca.

2.2. Confeção dos gráficos do perfil radial do tronco das árvores

Para a análise do perfil radial, foram utilizadas imagens no modelo de cor *rainbow*, com resolução de superfície 2D igual a 1 mm (opção gráfica fornecida pelo *software* do equipamento). A partir da imagem, foi selecionada uma faixa da imagem tomográfica, contendo a maior variedade de cores entre os sensores (foram selecionadas, em geral, as dos sensores 5 a 11). A faixa foi analisada por uma linha de *pixels* com o *software* Adobe Photoshop, reconhecendo-se os valores RGB de cada *pixel* e, em seguida, associando-os ao valor de velocidade de onda a cada valor de RGB. O comportamento da velocidade em relação às cores da imagem composta foi analisado segundo Rollo (2009). Os dados foram analisados através da estatística descritiva, observando a variação de velocidade de onda entre as árvores pelo pacote estatístico SPSS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens tomográficas geradas pelo *software* Arbotom 1.73c, referentes à estrutura interna do lenho de pinus e teca, indicaram sintomas de lesões internas (Figura 2). Tal conclusão foi obtida em decorrência da queda na velocidade de propagação das ondas mecânicas entre os sensores. Em algumas árvores, verificou-se que tais conclusões não correspondiam à realidade, uma vez que a grande proximidade entre os sensores mascaravam os resultados, principalmente nas regiões mais periféricas. Em tais situações, a análise se concentrou na área central da amostra.

Verificou-se uma grande variabilidade de cores, como resposta à heterogeneidade do material analisado, envolvendo vários fatores, como idade

(41 anos), ausência de práticas de manejo florestal, usos anteriores para fins acadêmicos e de pesquisa. Nas porções mais centrais das imagens, constatou-se uma coloração esverdeada e, em algumas regiões da periferia, uma coloração azulada. Concluiu-se que havia uma menor velocidade de onda no centro, tendendo a um aumento em direção à casca. Algumas árvores apresentaram manchas na porção mais central, que variaram do vermelho ao violeta, evidenciando as menores velocidades de onda, possivelmente devido à natureza do material ali existente e a problemas de sanidade.

Das árvores analisadas, apenas a de nº. 32 apresentou lenho com tecido considerado anormal, com lesão evidenciada pela coloração rosada, confirmada pela análise visual do seu tronco, no qual se evidenciava a formação de um cancro.

As imagens geradas pelo tomógrafo de impulso na análise do lenho das árvores (Figura 2) indicam o modelo de cor *rainbow* e resolução de superfície 2D igual a 1 mm, com as linhas pretas em diagonal evidenciando a faixa de *pixels* selecionada para a construção do perfil radial. As tonalidades em vermelho, laranja e amarelo indicam menor velocidade de propagação da onda mecânica no lenho das árvores; por outro lado, azul e verde representam a região do lenho com maior velocidade de propagação da onda mecânica.

A construção do perfil radial permite a localização dos defeitos do lenho das árvores, bem como a posição da medula, constituída por tecido parenquimático com maior resistência à passagem das ondas. A variação radial indica, também, diferenças anatômico-físicas nas regiões interna e externa do lenho das árvores de teca, importante na avaliação da sua qualidade e aplicação como madeira sólida (Figura 3).

A análise do perfil radial da densidade aparente do lenho das 20 árvores de teca (Figura 3) proporciona inferir sobre o aumento da velocidade de onda no sentido medula-casca e a delimitação de duas regiões do tronco: a central (com menor velocidade, com madeira juvenil) e a periférica (com maior velocidade, com madeira adulta).

Os valores de velocidade de onda no lenho das árvores de teca (Tabela 1) indicam diferenças, com os maiores valores de velocidade máxima, mínima e

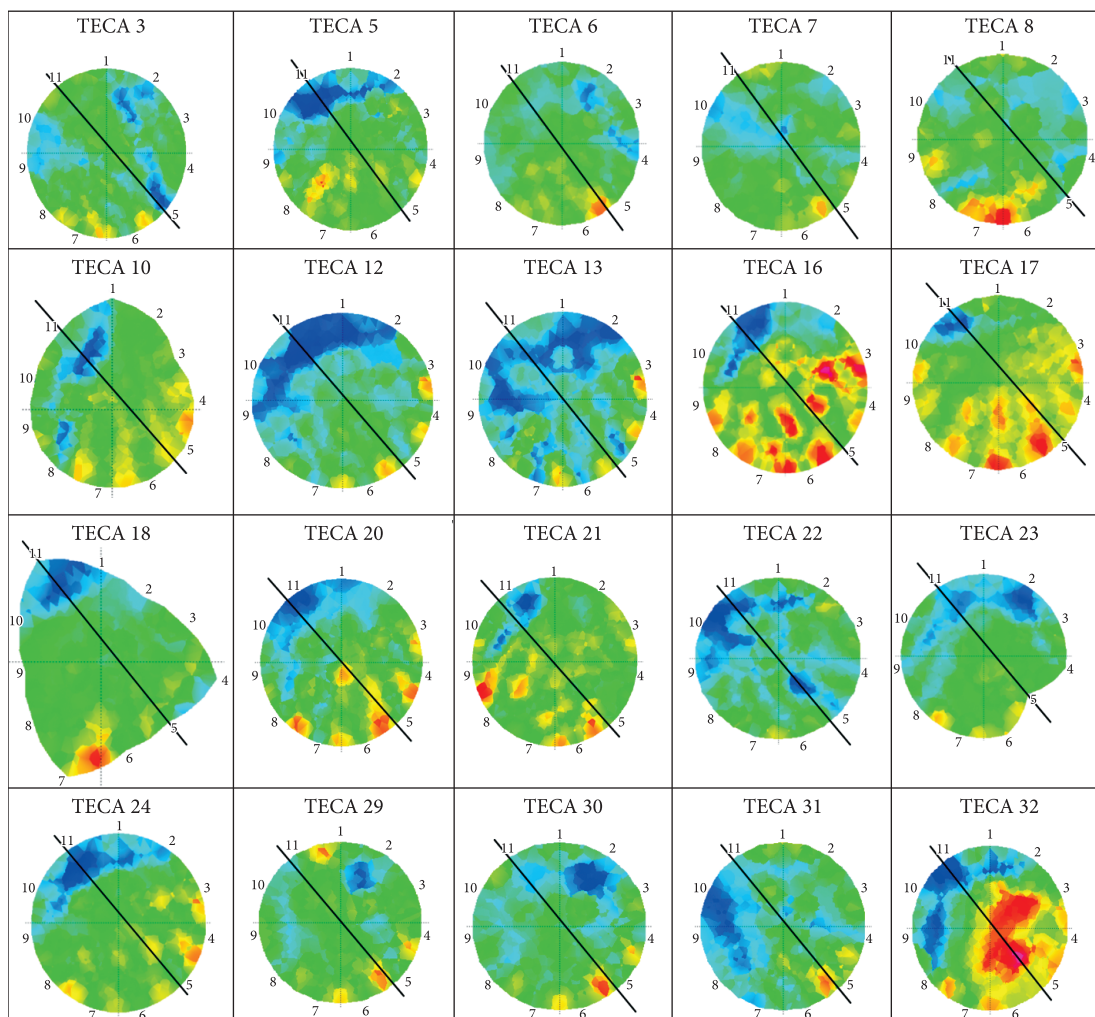


Figura 2. Imagens tomográficas de seções transversais do tronco das árvores de teca.
Figure 2. Tomographic images of the trunk cross sections of teak trees.

média de 1899, 1200 e 1509,09 m/s, respectivamente, obtidos na árvore nº. 18. Por outro lado, a árvore de teca nº. 32 mostrou lenho com velocidade média de 772,12 m/s, desvio padrão 247 m/s e elevado coeficiente de variação de 31,99%, com amplitude de faixa de 758 m/s, ampla em relação às faixas das demais árvores. A árvore de teca nº. 8 apresentou o menor coeficiente de variação (3,12%), com variação da velocidade de 1007 a 1131 m/s, média 1070,05 m/s e desvio padrão de 33,42. Verifica-se que, de modo geral, o menor valor do coeficiente de variação no perfil analisado corresponde ao lenho da árvore de teca com melhor estado de sanidade. Os resultados obtidos para as árvores de teca indicam

que a média da velocidade das ondas no lenho foi de 1087,13 m/s, com o desvio padrão de 211,04 m/s e o coeficiente de variação de 19,41%, evidenciando baixa variabilidade e demonstrando a eficácia e a potencialidade da utilização do equipamento e do método de tomografia de impulso na avaliação do lenho do tronco das árvores.

A velocidade de onda no interior do tronco das árvores de teca apresenta uma distribuição assimétrica positiva (Tabela 2, Figura 4), podendo-se concluir que a moda é maior que a mediana e a média; em cerca de 50% das árvores, a velocidade de onda através do lenho encontra-se nos intervalos de 907-1007 e de 1007-1107 m/s.

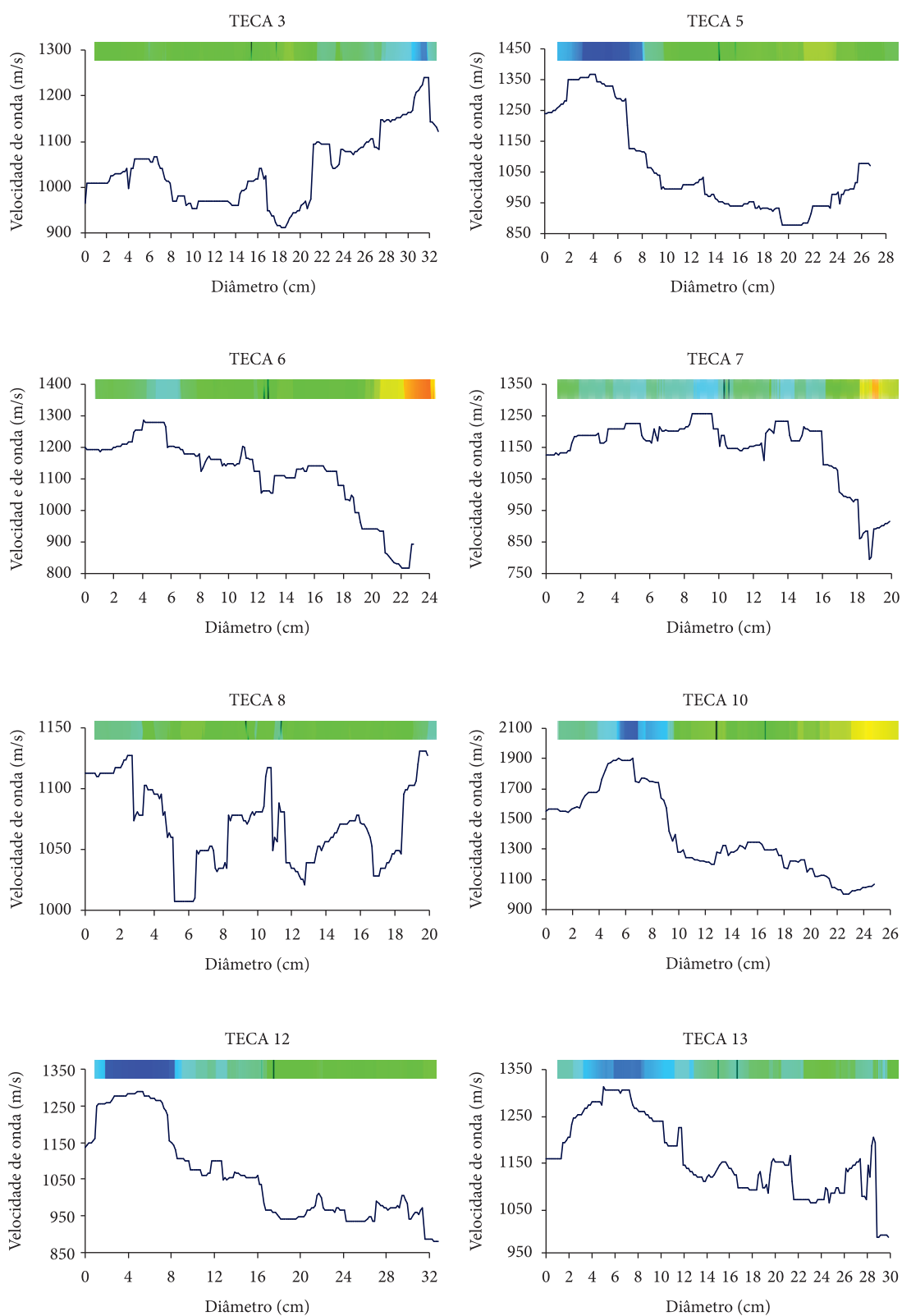


Figura 3. Perfil radial do lenho das 20 árvores de teca.

Figure 3. Wood radial profile of the 20 teak trees.

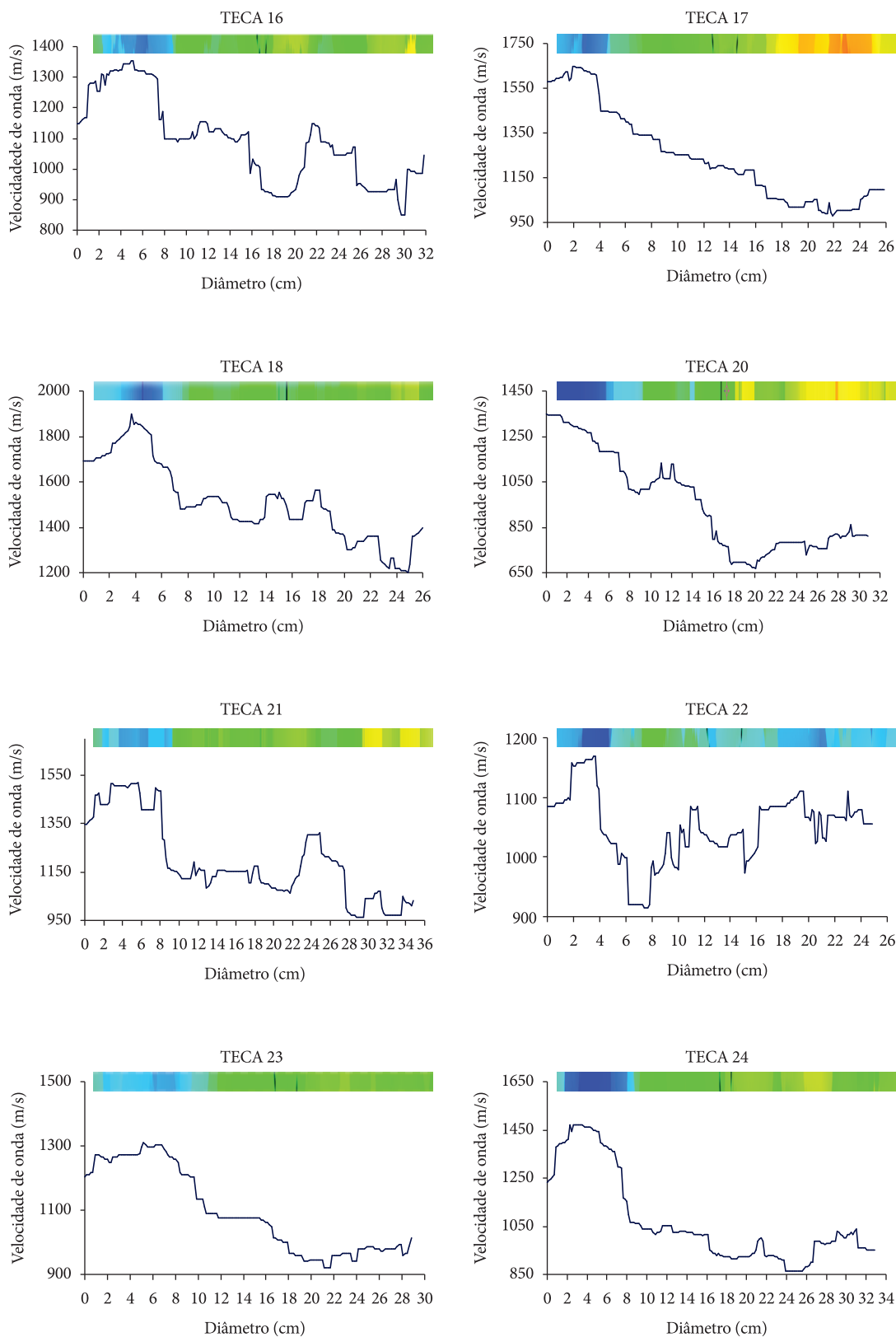


Figura 3. Continuação...
Figure 3. Continued...

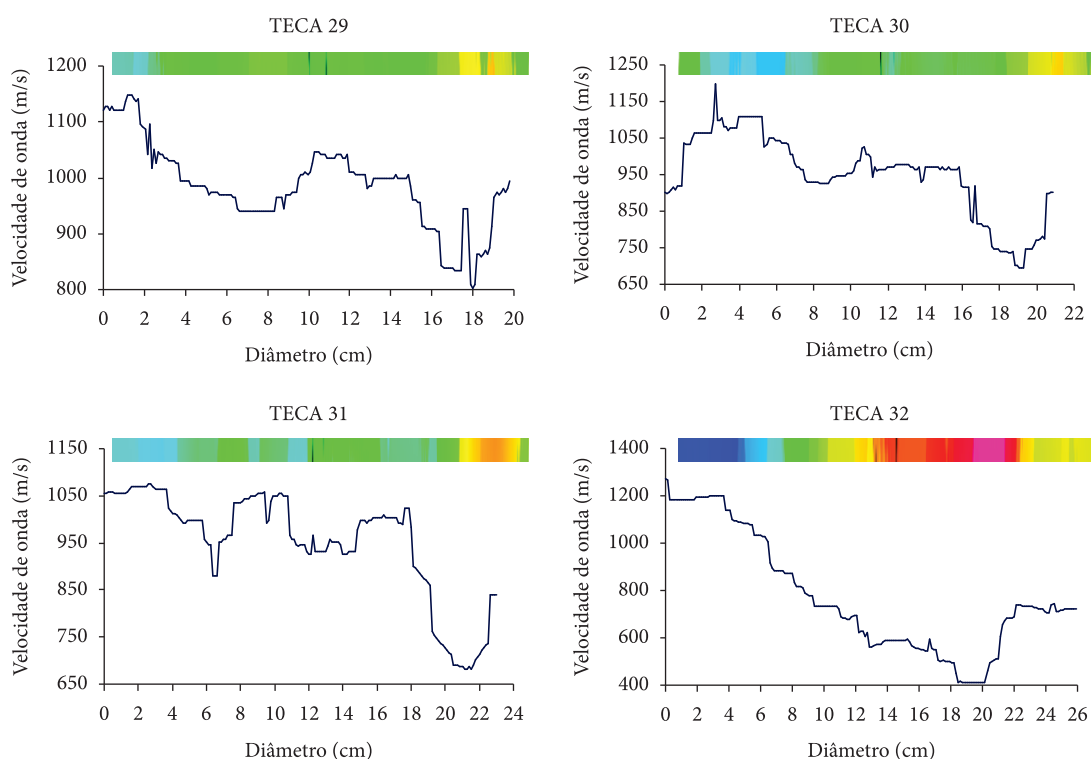


Figura 3. Continuação...

Figure 3. Continued...

Tabela 1. Valores de velocidade de onda no lenho das árvores de teca.

Table 1. Values of wave velocity in the wood of teak trees.

Árvore	Diâmetro (cm)	Média	CV* (%)	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
3	33	1038,61	7,43	77,21	911	1239
5	27	1064,20	14,84	157,96	878	1368
6	23	1114,97	10,73	119,60	817	1286
7	20	1145,40	9,10	104,27	796	1258
8	20	1070,05	3,12	33,42	1007	1131
10	25	1392,23	19,33	269,10	1003	1906
12	33	1057,59	11,86	125,38	882	1289
13	30	1161,85	6,98	81,10	991	1314
16	32	1090,71	12,66	138,10	849	1352
17	26	1241,64	16,50	204,82	980	1650
18	26	1509,69	11,43	172,58	1200	1899
20	31	954,79	22,01	210,18	669	1350
21	36	1195,54	13,88	165,89	964	1521
22	25	1049,00	5,51	57,75	915	1168
23	29	1094,44	11,86	129,85	919	1311
24	33	1073,38	17,41	186,83	866	1470
29	20	985,40	7,58	74,73	803	1147
30	21	949,38	11,62	110,34	696	1200
31	24	950,86	11,96	113,72	681	1075
32	26	772,12	31,99	247,00	413	1271
Total		1087,13	19,41	211,04	413	1906

*Coeficiente de variação.

Tabela 2. Frequências para as velocidades de onda (m/s) no lenho das árvores de teca.

Table 2. Frequencies for wave velocities (m/s) in the wood of teak trees.

Velocidade de onda (m/s)	Frequência absoluta	Frequência relativa %	Frequência acumulada	Frequência Rel. Acum.
407-507	26	0,73	26	0,0073
507-607	35	0,98	61	0,0171
607-707	55	1,54	116	0,0325
707-807	132	3,70	248	0,0695
807-907	167	4,68	415	0,1163
907-1007	832	23,32	1247	0,3496
1007-1107	940	26,35	2187	0,6131
1107-1207	598	16,76	2785	0,7808
1207-1307	372	10,43	3157	0,8851
1307-1407	156	4,37	3313	0,9288
1407-1507	99	2,78	3412	0,9565
1507-1607	66	1,85	3478	0,9750
1607-1707	43	1,21	3521	0,9871
1707-1807	23	0,64	3544	0,9936
1807-1907	23	0,64	3567	1,0000

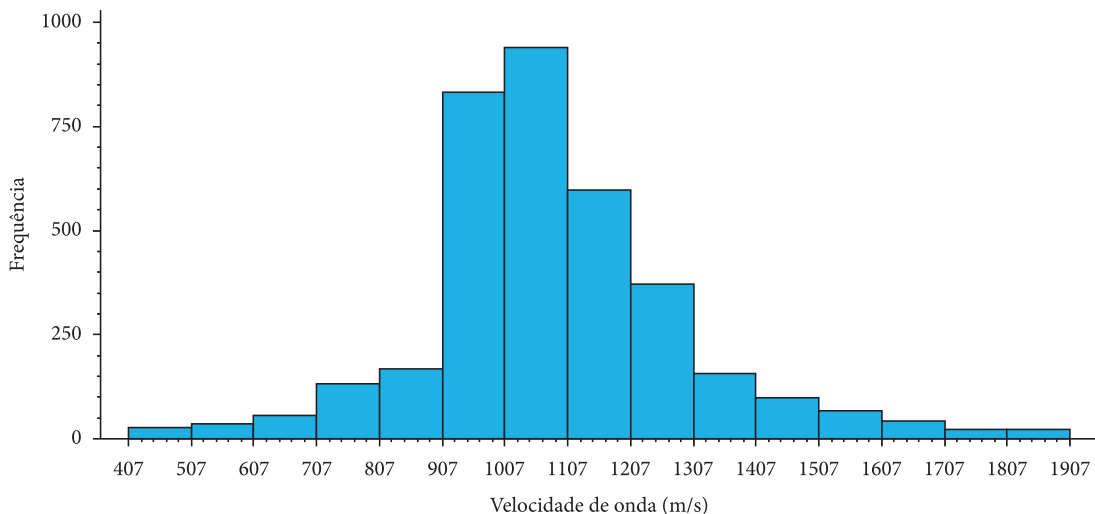


Figura 4. Histograma de frequência da velocidade de onda no lenho das árvores de teca.

Figure 4. Histogram of frequency of the wave velocity in the trunk of teak trees.

Apenas 3,25, 0,73 e 0,64% das árvores apresentam valores de velocidade de onda no lenho de 407-707, 407-507 e de 1807-1907 m/s, respectivamente. Por outro lado, em 76,86% das árvores, observa-se a maior frequência de leituras de velocidade de 907-1307 m/s, dado verificado claramente no histograma de frequência da velocidade de onda através do lenho das árvores (Figura 4).

4. CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que a aplicação da técnica de tomografia de impulso permitiu: i) analisar o estado de sanidade e das propriedades do lenho, pelo exame das imagens da seção transversal do tronco; e ii) que o perfil radial foi eficaz na avaliação da integridade do lenho

das árvores de teca. O equipamento e a metodologia mostraram-se potenciais na avaliação não destrutiva do lenho de árvores em florestas urbanas e em plantações florestais para aplicação em programas de manejo, seleção genética e qualidade do lenho.

STATUS DA SUBMISSÃO

Recebido: 15/12/2010

Aceito: 15/04/2011

Resumo publicado online: 20/04/2011

Artigo completo publicado: 30/06/2011

AUTOR(ES) PARA CORRESPONDÊNCIA

Vinicius Resende de Castro

Departamento de Ciências Florestais,
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” –
ESALQ, Universidade de São Paulo – USP,
Av. Pádua Dias, 11, CP 9, CEP 13418-900,
Piracicaba, SP, Brasil
e-mail: vresende@gmail.com

REFERÊNCIAS

Amodei JB, Oliveira BRU, Gurgel M M, Medeiros RA, Latorraca JVF. Avaliação tomográfica de árvores de *Tectona grandis* L. f. para avaliação preliminar da qualidade da madeira. In: *Anais do II Simpósio de Ciência e Tecnologia da Madeira do Rio de Janeiro*; 2010;

Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; 2010. CD-ROM.

Ferreira ATB. *Caracterização da estrutura anatômica do lenho, dos anéis de crescimento e dos canais de resina de árvores de Pinus caribaea var. hondurensis Barr. et Golf*. [dissertação]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo; 2009.

Gilbert EA, Smiley T. Picus Sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus alba*) and hickory (*Carya* spp.). *Journal of Arboriculture* 2004; 30(5):277-281.

Pereira LC, Silva Filho DF, Tomozelo Filho M, Couto HTZ, Moreira JMMÁP, Polizel JL. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana* 2007; 2(2):65-75.

Pereira LCR. *Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira* [dissertação]. Piracicaba: Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo; 2009.

Picus. *Picus home page*. [cited 2009 set. 30]. Available from: <http://www.argus-electronic.de/index.php/en/picus-sonic-tomograph/faq-sonic>.

Rinntech. *User Manual – Arbotom 3-D Tree Impulse Tomograph, version 1.59 for Microsoft Windows 98, 2000, XP. Heidelberg: Microsoft Window*; 2005. 42 p.

Rollo FMA. *Identificação de padrões de resposta à tomografia de impulso em tipuanas (Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze* [dissertação]. Piracicaba: Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo; 2009.