

A INFLUÊNCIA DA UMIDADE NAS ANÁLISES DA QUALIDADE DA MADEIRA DE *PINUS CARIBAEA* MORELET POR TOMOGRAFIA DE IMPULSO

Juliana Grilo Teixeira¹, Cléo Carvalho Ohana², Michel Cardoso Vieira³, Nayara Dorigon Rodrigues⁴, João Vicente de Figueiredo Latorraca⁵

¹ Engenheira Florestal, Mestranda do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
julianagteixeira@hotmail.com

Introdução

Os métodos de avaliação não destrutiva têm permitido analisar e obter um grande número de informações sobre o material madeira com o objetivo de estabelecer critérios práticos de caracterização e classificação do mesmo. Esses métodos apresentam algumas vantagens em relação aos métodos convencionais, sendo uma delas a possibilidade de avaliar a integridade de uma peça sem que seja necessária a sua destruição, bem como estabelecer critérios práticos de caracterização e classificação do mesmo.

A tomografia de impulso é uma técnica não destrutiva utilizada para avaliação das propriedades físicas da madeira de maneira prática sem que ocorra a destruição da integridade da madeira sob inspeção, podendo ser aplicada para avaliação de toras destinadas ao desdobro, verificação da sanidade e segurança de árvores utilizadas na arborização urbana, bem como auxiliar na manutenção de monumentos e objetos de belas artes (Bucur, 2003; Pereira et al, 2007; Asplund e Johansson, 1984; Unger et al, 1988).

Baseada na relação entre a velocidade de propagação de ondas no material e suas propriedades, e com a possibilidade de reconstrução de seções transversais da árvore, a avaliação não destrutiva de madeiras por meio da técnica de tomografia de impulso surge como uma opção promissora devido à relevância das informações que podem ser obtidas e também pela facilidade de operação.

A tomografia permite a reconstrução de seções transversais inteiras da árvore, por meio de informações fornecidas pela passagem de ondas mecânicas através da madeira. Até então não havia instrumentos que possibilitassem conhecer seções inteiras de árvores com tamanha rapidez e praticidade, revelando a revolução que representa a tomografia para a avaliação da qualidade do interior das árvores. Além disso, sua utilização deixa pouquíssimos sinais (Pereira, 2007).

Diversas literaturas relacionam a velocidade de propagação da onda na amostra com suas propriedades físicas e mecânicas como módulo de elasticidade, densidade e umidade (Gonçalves; Valle; Costa, 2001; Carrasco; Azevedo Júnior, 2003; Oliveira; Sales, 2005; Bucur, 2006; Rinntech (2005).

Diferentes tipos de energia podem ser utilizados na tomografia, como ondas de ultra-som, campo elétrico e ondas eletromagnéticas, raios γ e raios X (Nicolotti et al, 2003). A tomografia de impulso, por sua vez, baseia-se no princípio da cronometragem de ondas mecânicas (Rinntech, 2005).

O tomógrafo de impulso é composto por sensores que são fixados em seções transversais da árvore. Tais sensores recebem pancadas de martelo que produzem ondas mecânicas, cujos tempos de percurso entre os sensores são medidos, e suas velocidades calculadas pelo software do ARBOTOM. É gerado, então, um gráfico de velocidade das ondas mecânicas, também chamado de imagem tomográfica.

A madeira constitui, por natureza, um material higroscópico, ou seja, é capaz de interagir com o meio ambiente absorvendo ou perdendo umidade para ele. Esta característica peculiar da madeira e de alguns outros materiais afeta sensivelmente suas propriedades físicas e mecânicas.

As constantes de propagação de ondas mecânicas estão intrinsecamente relacionadas às propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Em madeiras, particularmente, estas propriedades são sensivelmente afetadas pelo conteúdo de umidade. Portanto, o estudo da influência da umidade naquelas propriedades constitui o primeiro passo para se compreender, de maneira mais inteligível, a relação entre as constantes de propagação e o conteúdo de umidade da madeira.

Segundo Bucur (2006) a velocidade de propagação das ondas mecânicas tende a aumentar com a diminuição da umidade, ocorrendo mais intensamente abaixo do Ponto de Saturação das Fibras, justamente por causa do aumento causado sobre o módulo de elasticidade com maior intensidade que sobre a densidade aparente. Dessa forma, as maiores velocidades de propagação de onda são geralmente alcançadas em espécies de madeira de maior densidade e menor teor de água.

Diante disso, o objetivo do trabalho visou avaliar o efeito da umidade na formação de imagens tomográficas geradas a partir da propagação de ondas mecânicas.

Material e métodos

Para o presente trabalho foi selecionada uma árvore com idade de 24 anos, da espécie *Pinus caribaea* Morelet de um povoamento localizado no Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, que fica situada no município de Seropédica (latitude 22°45'S, longitude 43°42'W e altitude de 33m).

Da árvore abatida foram retirados seis discos com 15 centímetros de espessura provenientes da base, do DAP e a 25, 50, 75 e 100% de sua altura comercial para realização da análise tomográfica e posterior determinação da umidade. Para manutenção da umidade inicial, os discos foram acondicionados em sacos plásticos hermeticamente vedados.

À altura média dos discos foram colocados oito sensores equidistantes. A localização dos sensores foi mapeada no disco para que posteriormente fosse possível comparar os valores de umidade obtidos com as imagens geradas pelo tomógrafo de impulso ARBOTOM.

Cada sensor recebeu pancadas de martetele até que os erros apresentados na tabela Delta % do software do aparelho fossem inferiores a 10%, como recomendado pelo manual do equipamento. As velocidades de percurso das ondas entre os sensores foram calculadas pelo software do programa que as utiliza para produzir gráficos de velocidade das ondas no interior da árvore. A figura 1 mostra o uso do tomógrafo de impulso.

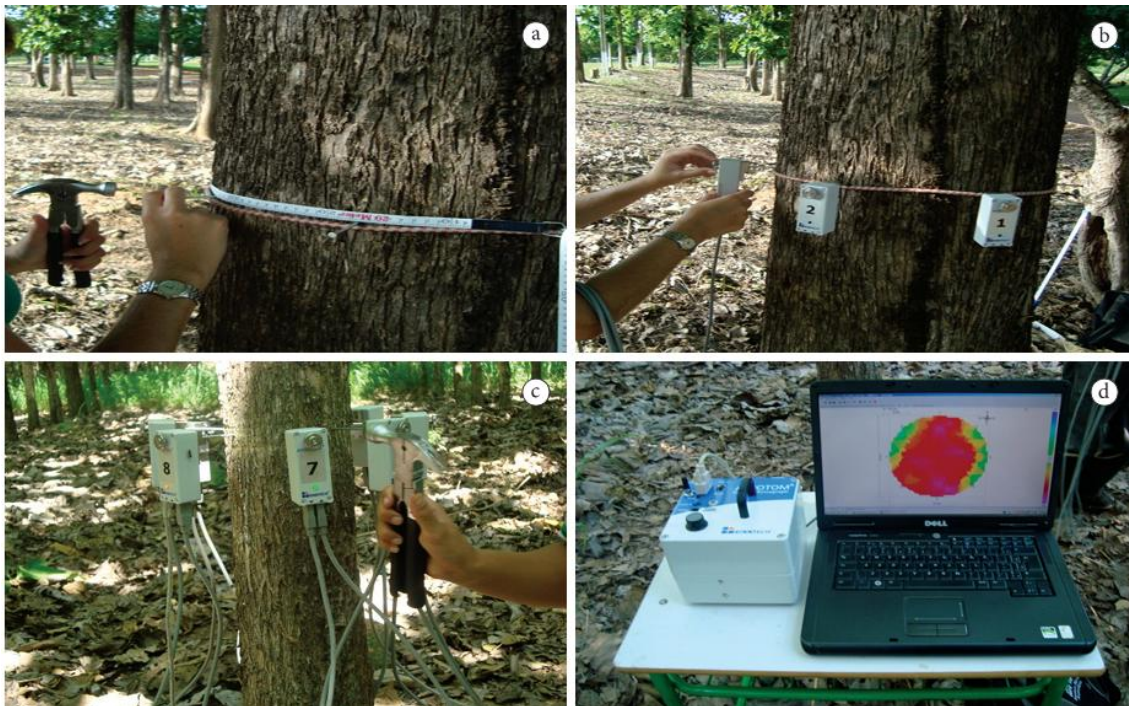


Figura 1. Uso do tomógrafo de impulso para obtenção das imagens tomográficas. a) Fixação dos condutores metálicos; b) Distribuição dos sensores; c) Pancadas de martetele para produção de ondas mecânicas; d) Imagem tomográfica. (Fonte: Amodei et al, 2010).

Após obtenção das imagens tomográficas os discos foram seccionados para confecção dos corpos de prova de 1,5 cm de largura, 1,5 cm de altura e com comprimento variável. Logo após, os mesmos foram pesados em balança analítica obtendo-se a massa úmida (MU). Cada corpo de prova recebeu uma marcação que possibilitou a reconstrução dos discos para confecção dos croquis.

Esses croquis foram utilizados na comparação das imagens tomográficas com a distribuição da umidade no interior do disco. Posteriormente os corpos de prova foram levados para estufa a 103 ± 5 °C por 48 horas para obtenção da massa seca, que foi então utilizada para o cálculo da umidade de cada corpo de prova.

A partir do mapeamento realizado foi então possível identificar a localização de cada corpo de prova dentro das imagens e assim observar quais sensores estavam mais próximos. Para facilitar a avaliação foram obtidas médias de umidade para cada quadrante das imagens geradas pelo tomógrafo de impulso, e essas médias foram então correlacionadas com as velocidades de propagação das ondas mecânicas apresentadas na escala que acompanha o gráfico de velocidade, a partir de uma análise visual.

A figura 2 apresenta o esquema do croqui de um disco onde as letras seguidas de número representam os corpos de prova, e a numeração na parte exterior do disco corresponde a localização dos oito sensores.

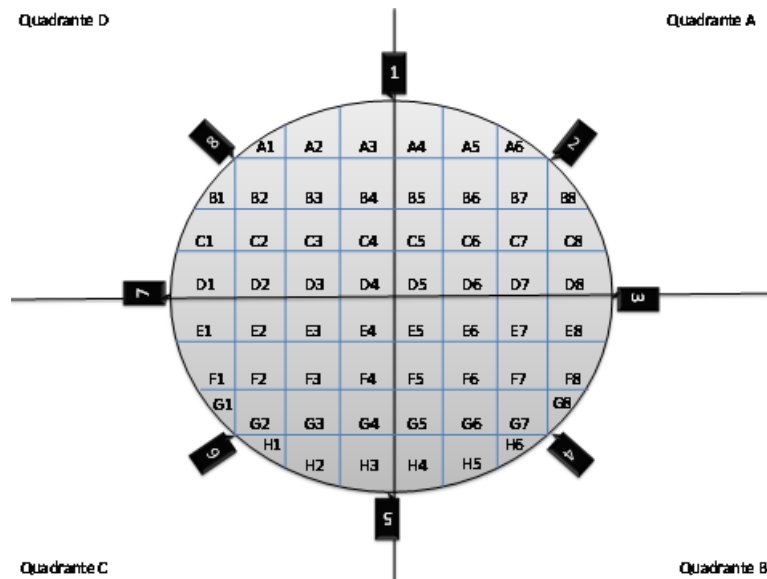


Figura 2: Esquema de um disco com o mapeamento dos corpos de prova e localização dos sensores.

Resultados e discussões

As imagens tomográficas aliadas às informações de umidade das seções dos discos de prova neste estudo mostram que a velocidade de propagação da onda mecânica gerada pelo tomógrafo de impulso está sendo influenciada pelos teores de umidade da madeira.

Para simplificar a análise visual das imagens tomográficas convencionou-se utilizar as médias do teor de umidade de cada quadrante dos discos de prova.

Segundo Rinntech (2005), os tons de vermelho, laranja e amarelo indicam uma menor velocidade de propagação da onda mecânica, correspondendo às zonas de maior umidade, enquanto os tons azuis e verdes indicam as zonas de maior velocidade e menor umidade.

Amodei et al (2011) atribuiu as diferenças de cores encontradas nas imagens tomográficas obtidas a partir do tomógrafo de impulso a possíveis diferenças de umidade e densidade existente no tronco de árvores vivas da espécie de *Tectona grandis*.

Corroborando com esta afirmação podemos observar a figura 3 onde o mesmo padrão foi encontrado.

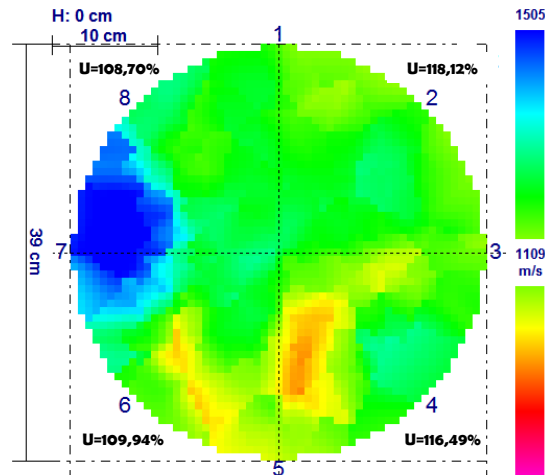


Figura 2: Imagem tomográfica do disco da altura da base da árvore.

Segundo Bucur (2006) a velocidade de propagação da onda mecânica tende a aumentar com a diminuição da umidade, ocorrendo mais intensamente abaixo do Ponto de Saturação das Fibras, justamente por causa do aumento causado sobre o módulo de elasticidade com maior intensidade que sobre a densidade aparente.

A escala de cor ao lado das imagens tomográficas indica a velocidade de propagação da onda mecânica (metros/segundo) quando passa pelo material madeira.

A tabela 1 apresenta os quatro quadrantes dos seis discos analisados sinalizando aqueles em que o padrão da velocidade da onda menor em zonas de maior umidade foi encontrado.

Na árvore analisada todos os quadrantes apresentaram o padrão da velocidade da onda menor em zonas de maior umidade, conforme pode ser observado na tabela 1.

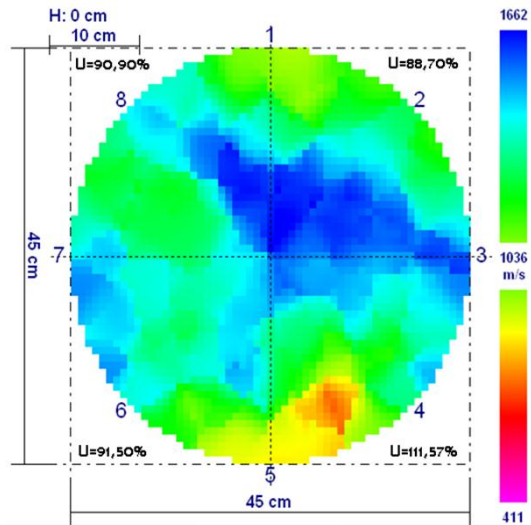
Tabela 1. Quadrantes das seções da árvore de *Pinus Caribaea* Morelet analisadas por tomografia de impulso que apresentaram o padrão da velocidade da onda menor em zonas de maior umidade.

Quadrantes/ Seção	Base	Dap	25%	50%	75%	100%
A	X	X	X	X	X	X
B	X	X	X	X	X	X
C	X	X	X	X	X	X
D	X	X	X	X	X	X

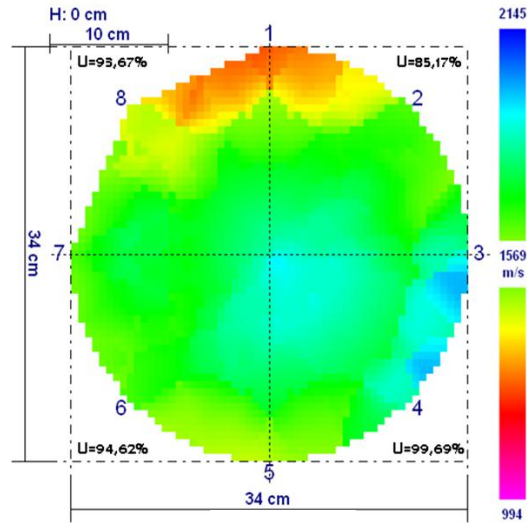
Como pode ser observado, nos quatro quadrantes de todos os discos estudados foi encontrada uma correlação entre os valores de umidade e a imagem tomográfica.

Naqueles quadrantes onde os menores teores de umidade foram encontrados, observou-se na imagem tomográfica uma predominância das cores azuis e verde que correspondem às áreas de maior velocidade de propagação da onda e nos quadrantes onde a predominância foi dos tons de vermelho, laranja e amarelo os maiores teores de umidade foram encontrados.

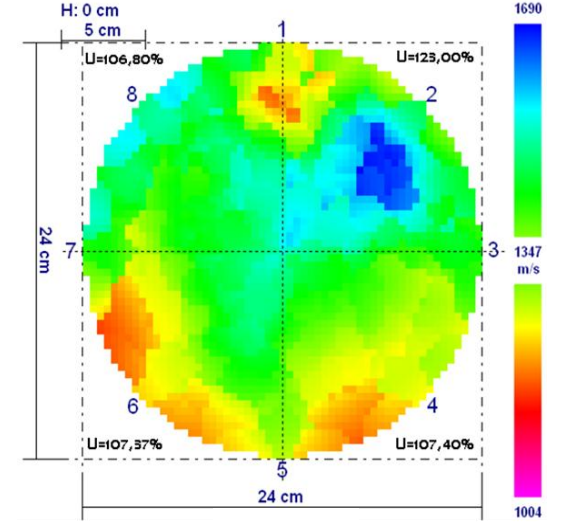
A figura 3 apresenta as imagens geradas pela utilização do tomógrafo de impulso nos seis discos da árvore de *Pinus caribaea* estudada.



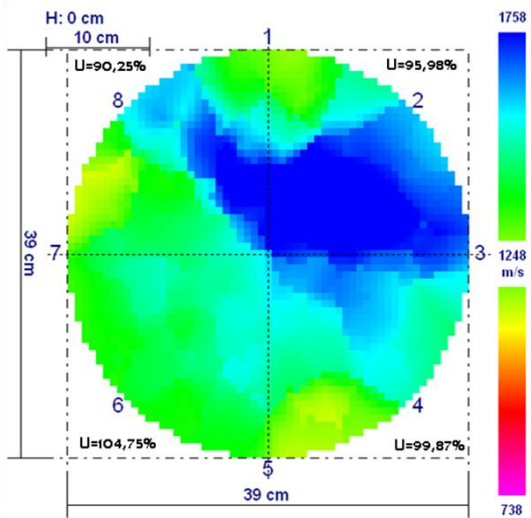
Base



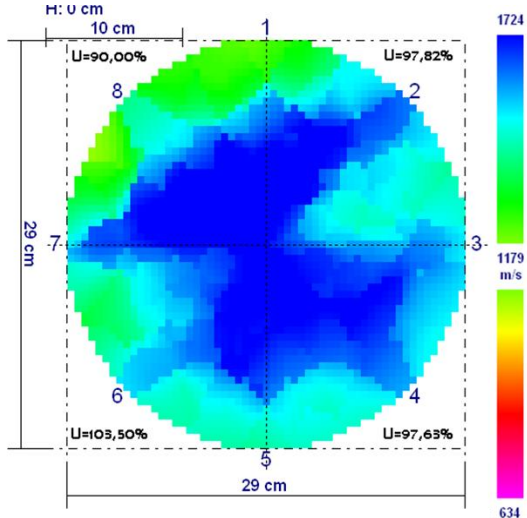
25%



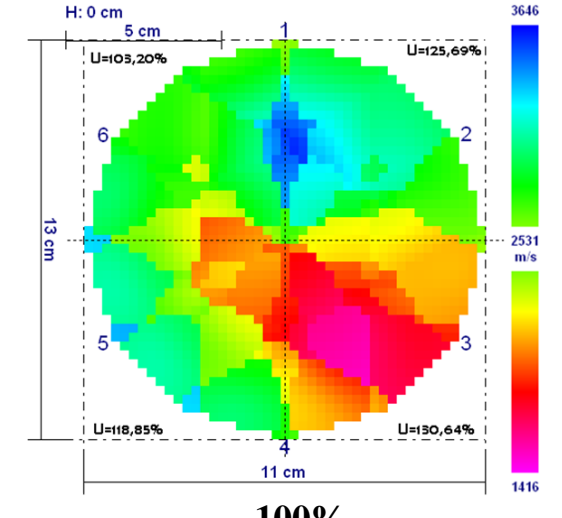
75%



DAP



50%



100%

Figura 3: Imagens tomográficas dos seis discos de *P. caribaea* Morelet

Utilizando o aparelho de ultra-som, Oliveira e Sales (2003) encontraram um padrão de resposta semelhante para propagação de ondas em um estudo realizado com a espécie *Pinus caribaea* var. *caribaea*. O resultado por eles encontrado demonstrou que a velocidade de propagação da onda tende a aumentar com a diminuição do teor de umidade e o efeito do teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras é mais significativo do que acima do ponto de saturação.

Rollo (2009), em estudo de identificação de padrões de resposta à tomografia de impulso na espécie *Tipuana tipu* (Benth.) constatou que a velocidade da onda mecânica em condições secas (U=12%) é sempre maior que a velocidade em condições de saturação da madeira, e conclui que a perda de água propicia o aumento do módulo de elasticidade, da densidade e da velocidade da onda mecânica.

Os valores de umidade para as árvores em estudo estão coerentes com os resultados encontrados na literatura. Segundo Zimmermann (1983), as árvores vivas possuem grandes quantidades de água sob as formas livre e higroscópica, podendo chegar a valores superiores a 200% de conteúdo de umidade, dependendo de sua densidade.

Conclusões

Com os resultados encontrados pode-se concluir que é possível associar os teores de umidade da madeira com a velocidade de propagação da onda mecânica gerada pelo tomógrafo de impulso, confirmando sua influência na formação da imagem tomográfica.

Referências Bibliográficas

Amodei, J. B., Oliveira, B. R. U. de, Gurgel, M. de M., Carvalho A. M. de, Medeiros, R. A., Latorraca, J. V. de F. Avaliação Preliminar da Qualidade da Madeira de *Tectona grandis* L. f. Através da Tomografia de Impulso, *Floresta e Ambiente* 2010; 17 (2):p.124-128.

Asplund T and Johansson L G . Feasibility study of x-ray computerized tomography in research and development for wood-mechanical industry and forestry (Forstudie-datortomograf for trateknisk och skoglig forskning och utveckling). *Trateknik Rapport, Sweden no 53, Svenska Traforskningsinstitutet*, 1984.A.no 904. p 35.

Bucur, V. Theory of and experimental methods for acoustic characterization of wood. In: *Acoustics of wood*. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, chap. 4, p. 39-104. 2006.

Bucur V. Techniques for high resolution imaging of wood structure: a review. *Measurement Science and Technology*. 2003.(14) R91–R98 .

Bucur V. *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood* (Heidelberg: Springer) 2003.

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*, 2003. Lavras, v.9, n.2, p. 178-191.

Galvão, A. P. M.; Jankowsky, I. P. *Secagem racional da madeira*. Nobel, 1985.

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

Mattheck, C.; Breloer, H. Field guide for visual tree assessment (**VTA**). *Journal of Arboriculture*.1994.18:1-23.

Mattheck, C.; Breloer, H. *The body language of trees: a handbook for failure analysis*. London: Her Majesty's Stationery Office, 260p, 1997.

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* 2003. 29(2): 66-78.

Oliveira, F.G.R. de; Sales, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira. *Minerva*, 2005. São Carlos, v.2, n. 1, p. 25-31.

Pereira, L. C; Demóstenes F. F; Filho, M. T; Couto, H. T. Z; Moreira, J. M. M. Á. P; Polizel, J. L. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. *Revista da sociedade brasileira de arborização urbana*. 2007. Volume 2, Número 2.

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

Unger A, Planitzer J and Morgos AX-ray computer tomography and magnetic resonance tomography for characterizing wet archaeological wood. *Holztechnologie*. 1988. 249–250.

Zimmermann, M. H. Xylem structure and ascent of sap. Berlin: **Spring Verlag**, 1983. 143 p.