

Efeito da Umidade da Madeira na Propagação de Ondas Mecânicas

João Vicente de Figueiredo Latorraca¹, Nayara Dorigon Rodrigues²,
Michel Cardoso Vieira², Cléo Carvalho Ohana², Juliana Grilo Teixeira²

¹Departamento Produtos Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ

²Programa de Pós-Graduação de Ciências Ambientais e Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ

RESUMO

A análise tomográfica de impulso é um método não destrutivo que permite analisar o interior do lenho de árvores pela passagem de ondas produzidas mecanicamente, tornando possível realizar uma avaliação prévia e detectar a presença de defeitos na madeira. Neste estudo, utilizou-se o tomógrafo de impulso ARBOTOM para analisar o lenho de árvores de *Pinus caribaea* e associar o efeito da umidade na formação da imagem tomográfica. Os resultados mostraram que existe uma associação entre a umidade da madeira e a velocidade de propagação da onda mecânica gerada pelo tomógrafo de impulso, confirmando o seu efeito na formação da imagem tomográfica.

Palavras-chave: imagem tomográfica, métodos não destrutivos.

Effect of Wood Moisture on the Propagation of Mechanical Waves

ABSTRACT

Impulse tomography analysis is a non-destructive method that enables the visualization of the interior of the wood of trees through the passage of mechanical waves, making it possible to perform a preliminary examination and notice the presence of defects in the wood. ARBOTOM impulse tomography was used to analyze the wood of *Pinus caribaea* located at 'Instituto de Florestas' of the 'Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro'. It was possible to detect the moisture associated with the propagation speed of the mechanical wave generated by the scanner pulse, confirming its influence on the tomography image.

Keywords: tomography image, non-destructive method.

1. 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.

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, 2003a; Pereira et al., 2007; Asplund & Johansson, 1984; Unger et al., 1988).

Baseada na relação entre a velocidade de propagação de ondas no material e suas propriedades, com a finalidade 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. 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 et al., 2001; Carrasco & Azevedo Júnior, 2003; Oliveira & Sales, 2005; Bucur, 2006; Rinntech, 2005).

O desenvolvimento do conhecimento científico sobre métodos não destrutivos foi possível a partir do século XX, com o desenvolvimento da teoria da elasticidade e dos equipamentos para medição das propriedades da madeira (Bucur, 2003b).

A tomografia permite a reconstrução de seções transversais inteiras da árvore, por meio de informações fornecidas pela passagem de energia 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 et al., 2007).

Diferentes tipos de energia podem ser utilizados em tomografia para fornecer informações sobre a madeira, como ondas de ultrassom, 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 para reconstrução de seções das árvores (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.

Com relação à influência da umidade na propagação de ondas mecânicas, a madeira constitui, por natureza, um material higroscópico, ou seja, é capaz de interagir com o meio ambiente absorvendo ou perdendo umidade para ele. Essa 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, essas 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 do que sobre a densidade aparente. Dessa forma, as maiores velocidades ultrassônicas são geralmente alcançadas em espécies de madeira de maiores densidades e menores teores 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.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para o presente trabalho, foram selecionadas três árvores com idade de 24 anos, da espécie *Pinus caribaea*, de um povoamento situado no município de Seropédica-Rio de Janeiro (latitude 22° 45' S, longitude 43° 42' W e altitude de 33 m).

Das três árvores abatidas, foram retirados seis discos com 15 cm de espessura provenientes da base,

do DAP e a 25, 50, 75 e 100% da altura comercial para realização da análise tomográfica e posterior determinação da umidade. Para manutenção da umidade inicial, os discos foram acondicionados em embalagens plásticas hermeticamente vedadas.

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, considerando a localização de cada sensor.

Cada sensor recebeu pancadas de martelo até que o erro padrão fosse inferior 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.

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 a seguir, os mesmo 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 de umidade e velocidade de propagação da onda (Figura 1). Esses croquis foram utilizados na comparação das imagens tomográficas com a área de abrangência de cada sensor. Posteriormente, os corpos de prova foram levados para estufa a $103 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 eram os sensores que estavam mais próximos. Para facilitar a avaliação, foram obtidas médias de umidade para cada quadrante da imagem tomográfica e essas médias foram então utilizadas na correlação com as velocidades de onda obtidas a partir de uma análise visual.

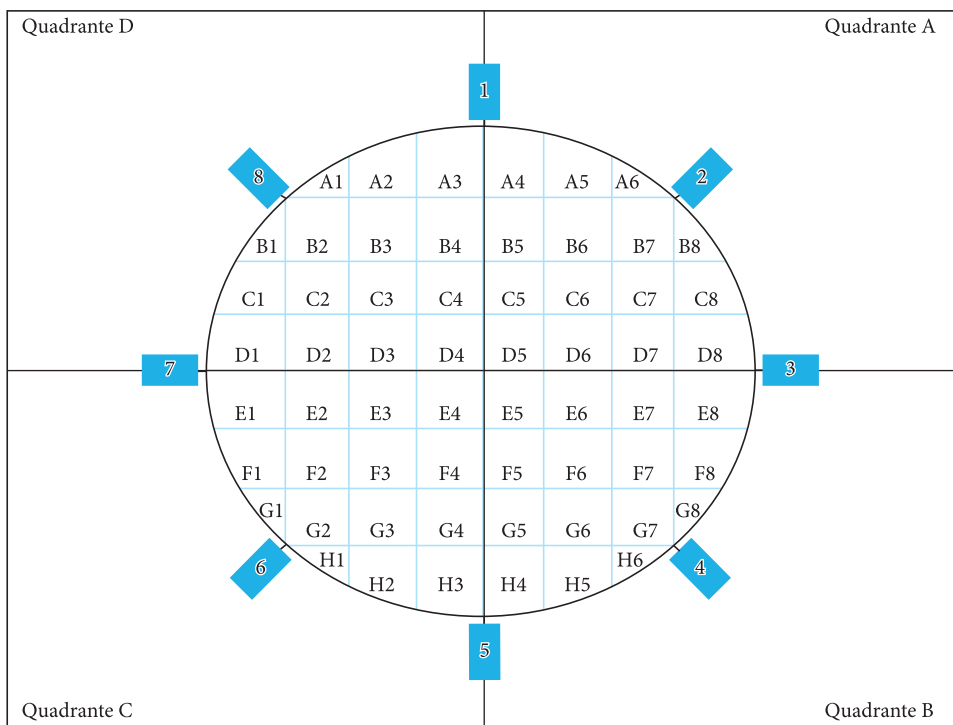


Figura 1. Disco com indicação da localização dos sensores e mapeamento dos corpos de prova.
Figure 1. Disk indicating the location of the sensors and mapping of sample.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As imagens tomográficas aliadas às informações de umidade das seções dos discos de prova, neste estudo, mostraram que é possível associar os teores de umidade com a velocidade de propagação da onda mecânica gerada pelo tomógrafo de impulso.

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. (2010) atribuíram as diferenças de cores encontradas nas imagens tomográficas obtidas a partir do tomógrafo de impulso à possível diferença de umidade e densidade existente no tronco de árvores vivas da espécie de *Tectona grandis*.

Corroborando com esta afirmação, pode-se observar a Figura 2, na qual foi encontrado o mesmo padrão.

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

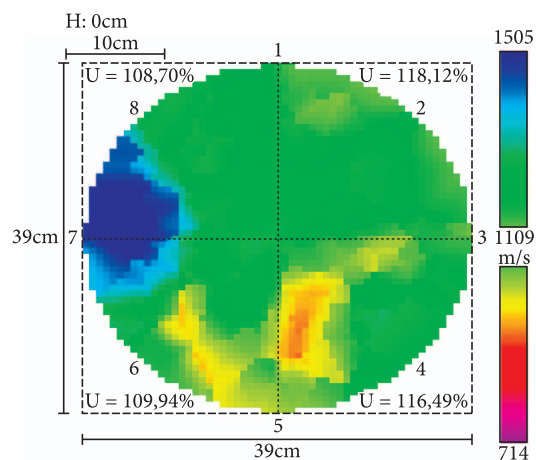


Figura 2. Imagem tomográfica do disco da altura da base da árvore.

Figure 2. Tomographic image of the disk at the base of the tree.

Fibras, justamente por causa do aumento causado sobre o módulo de elasticidade com maior intensidade do que sobre a densidade aparente.

A escala de cor ao lado das imagens tomográficas indica a velocidade da onda mecânica (metros/segundo) quando passa pelo material *madeira*. Somente 13,33% dos quadrantes das seções analisadas não apresentaram o padrão da velocidade da onda menor em zonas de maior umidade, conforme pode ser observado na Tabela 1.

As Figuras 3a,b,c apresentam as imagens geradas pela utilização do tomógrafo de impulso nas 3 árvores de *P. caribaea* analisadas.

A árvore 1 apresentou uma coloração predominantemente laranja, que caracteriza altos teores de umidade, com exceção dos discos correspondentes a regiões da base e do DAP. As árvores 2 e 3, assim como a base e o DAP da árvore 1, apresentaram predominantemente as cores azul e verde, que caracterizam baixos teores de umidade.

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

Table 1. Quadrants of the sections of the trees of *Pinus caribaea* Morelet tomography analysis showed no impulse that the pattern of wave velocity, lower in areas with higher humidity.

Árvore 1						
Quadrantes/ Seção	Base	25%	Dap	50%	75%	100%
A						X
B			X			
C						
D				X	X	X
Árvore 2						
Quadrantes/ Seção	Base	25%	Dap	50%	75%	100%
A						
B						
C						
D						
Árvore 3						
Quadrantes/ Seção	Base	25%	Dap	50%	75%	100%
A						X
B						
C				X		
D	X					

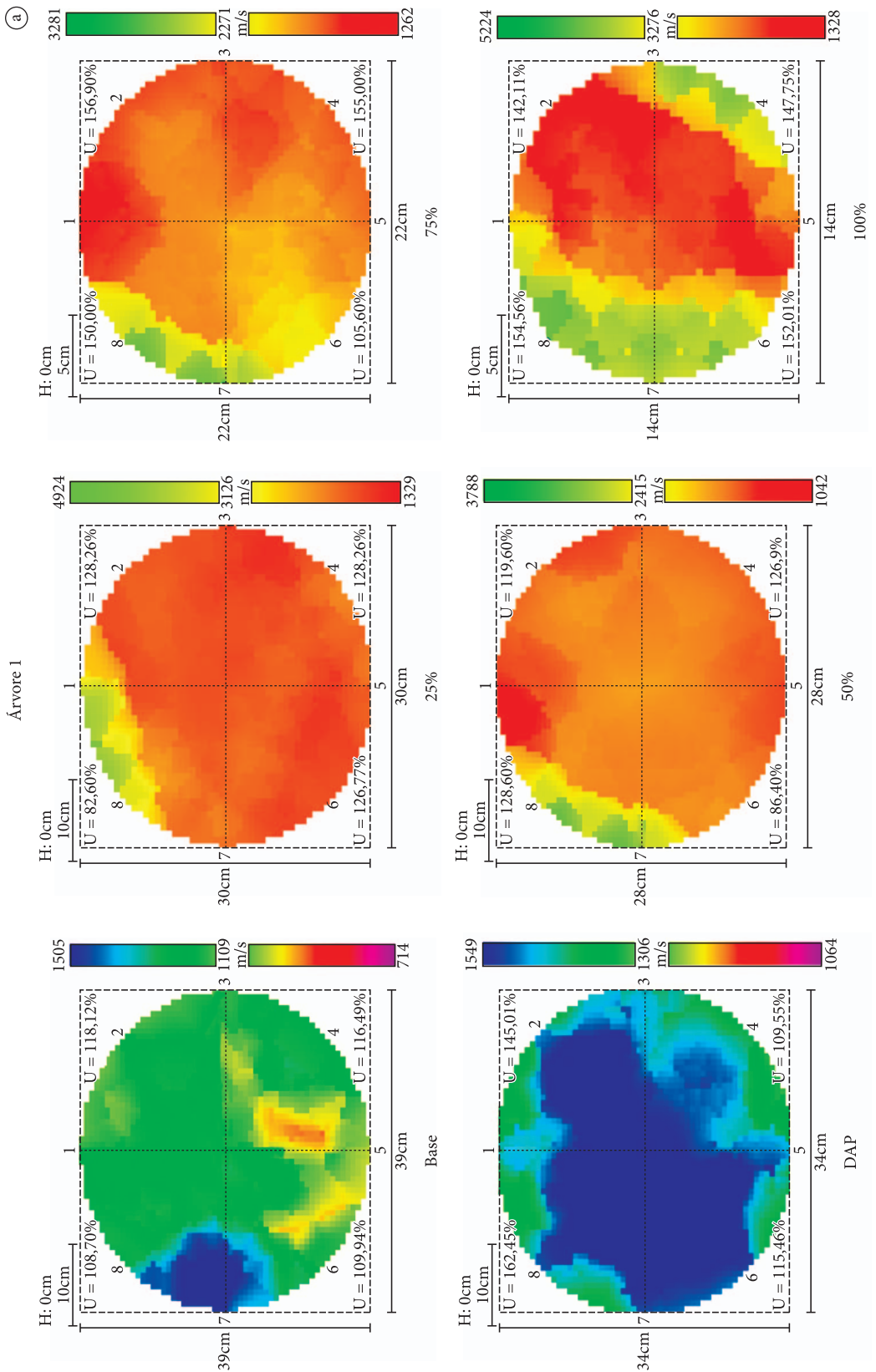


Figura 3. a) Imagens tomográficas dos discos da árvore 1.
 Figure 3. a) Tomographic images of disks from tree 1.

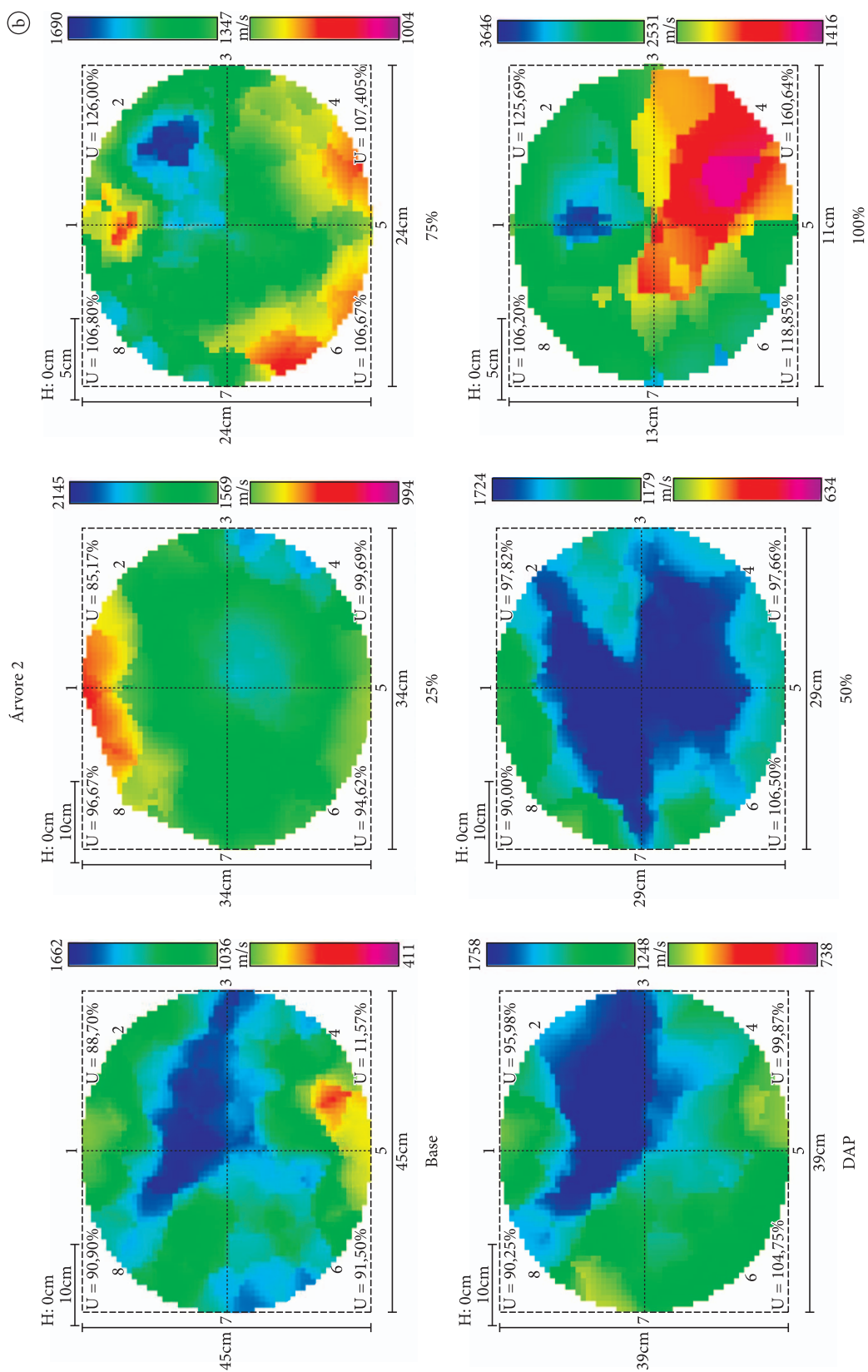


Figura 3. b) Imagens tomográficas dos discos da árvore 2.
Figure 3. b) Tomographic images of disks from tree 2.

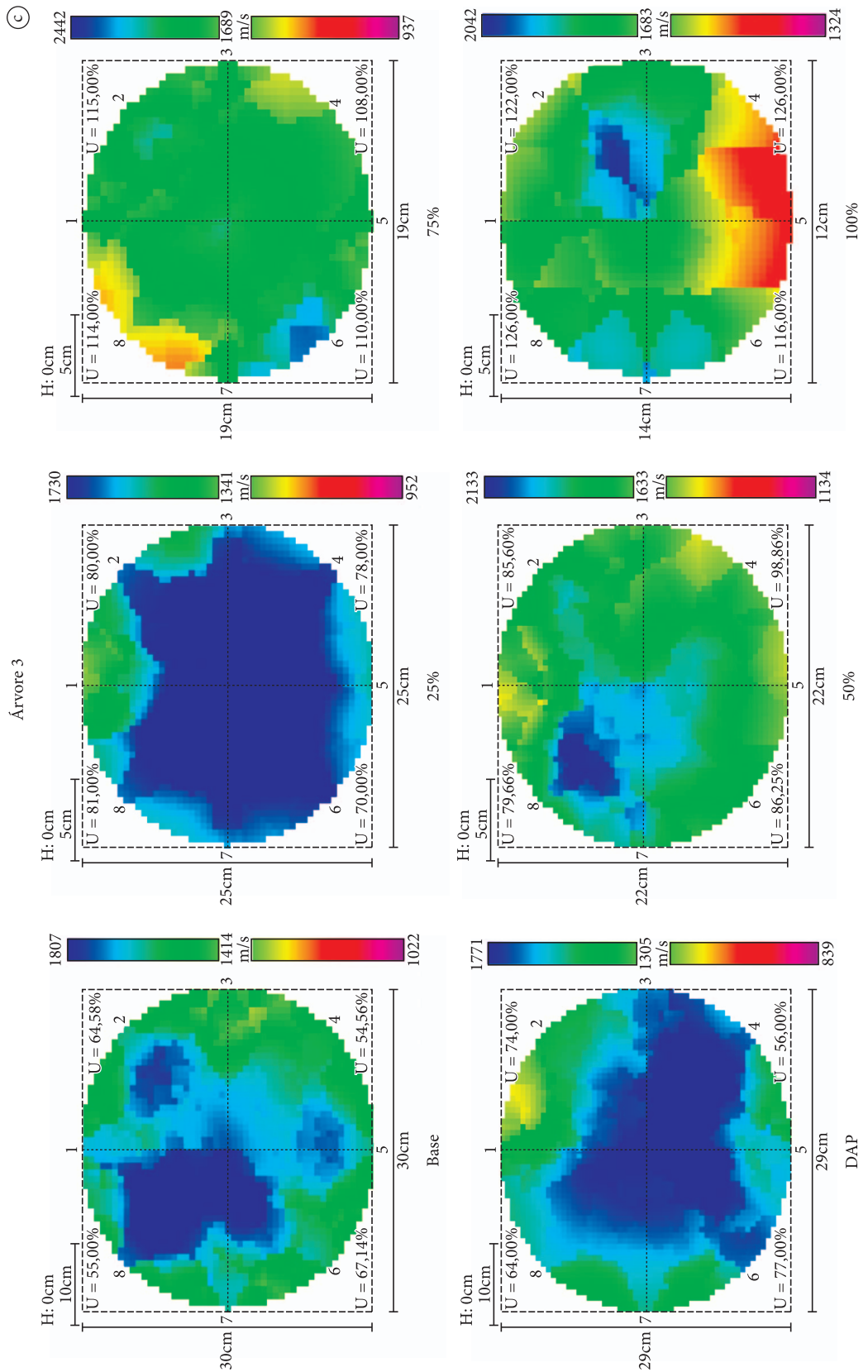


Figura 3. c) Imagens tomográficas dos discos da árvore 3.
 Figure 3. c) Tomographic images of disks from tree 3.

Utilizando-se o aparelho de ultrassom, Oliveira & Sales (2003) encontraram um padrão de resposta semelhante para propagação de ondas, em estudo realizado com a espécie *Pinus caribaea* var. *caribaea*. Os resultados por eles encontrados demonstraram 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, concluindo que a perda de água propicia o aumento do módulo de elasticidade, da densidade e da velocidade da onda mecânica.

Quanto à distribuição da umidade ao longo da altura do fuste, observou-se que os valores de umidade das zonas mais altas se mostraram maiores em comparação aos discos das zonas mais próximas à base, conforme pode ser observado na Figura 4.

Os valores de umidade para as árvores deste 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.

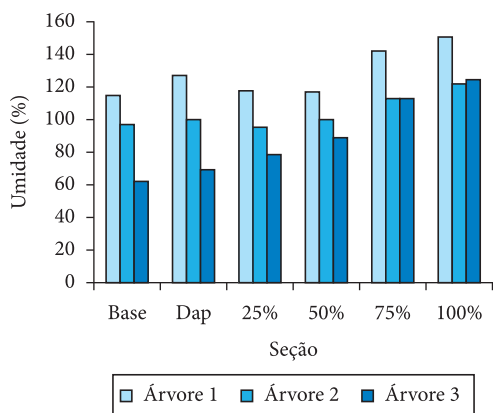


Figura 4. Valores do conteúdo de umidade dos discos das árvores utilizadas em diferentes alturas do fuste.

Figure 4. Values of the moisture content of the discs of the trees used in different heights of the stem.

4. 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.

STATUS DA SUBMISSÃO

Recebido: 05/09/2011

Aceito: 21/11/2011

Resumo publicado online: 24/11/2011

Artigo completo publicado: 22/12/2011

AUTOR(ES) PARA CORRESPONDÊNCIA

João Vicente de Figueiredo Latorraca

Departamento de Produtos Florestais – DPF,
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro –
UFRRJ, BR 465, Km 07, Campus Universitário,
CEP 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil
e-mail: latorraca@hotmail.com

Nayara Dorigon Rodrigues

Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais e Florestais,
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro –
UFRRJ, BR 465, Km 07, Campus Universitário,
CEP 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil
e-mail: nayaradorirodrigues@yahoo.com.br

REFERÊNCIAS

- Amodei JB, Oliveira BRU, Gurgel MM, Carvalho AM, Medeiros RA et al. Avaliação Preliminar da Qualidade da Madeira de *Tectona grandis* L. f. através da Tomografia de Impulso. *Floresta e Ambiente* 2010; 17(2):124-128. <http://dx.doi.org/10.4322/loram.2011.016>
- Asplund T, Johansson LG. *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)*. Stockholm: Svenska Traforskningsinstitutet; 1984. *Trateknik Rapport*, Sweden no 53, ano 904, 35 p.
- Bucur V. Theory of and experimental methods for acoustic characterization of wood. In: *Acoustics of*

- wood. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag; 2006. chap. 4, p. 39-104.
- Bucur V. Techniques for high resolution imaging of wood structure: a review. *Measurement Science and Technology* 2003a; (14):R91-R98 . <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/14/12/R01>
- Bucur V. *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. Heidelberg: Springer; 2003b.
- Gonçalves JC, Valle AT, Costa AF. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). *Cerne* 2001; 7(2):81-92.
- Carrasco EVM, Azevedo Júnior AP. Avaliação não-destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som - fundamentos físicos e resultados experimentais. *Cerne* 2003; 9(2):178-191.
- 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; 1997. 260 p
- Nicolotti G, Socco LV, 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 FGR, Sales A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira. *Minerva* 2005; 2(1):25-31.
- Pereira LC, Silva Filho DF, Tomazello Filho MT, 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).
- Rinntech. *User Manual - Arbotom 3-D Tree Impulse Tomograph*. version 1.59 for Microsoft Windows 98, 2000, XP. Rinntech; 2005. 42 p.
- Rollo, LCP. *Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira* Dissertação. Piracicaba: Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2009.
- Unger A, Planitzer J, Morgos AX-ray computer tomography and magnetic resonance tomography for characterizing wet archaeological wood. *Holztechnologie* 1988; 249-250.
- Zimmermann MH. Xylem structure and ascent of sap. Berlin: Springer-Verlag; 1983. 143 p.