



## COMPARAÇÃO DE IMAGENS DE TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA OBTIDAS EM CAMPO (ÁRVORES VIVAS) E EM LABORATÓRIO (DISCOS).

Ruan O. B. Silva\*, Raquel Gonçalves, Stella S. A. Palma.

Link deste trabalho: [https://youtu.be/X0C25Euv\\_H0](https://youtu.be/X0C25Euv_H0)

### Resumo

Quedas de árvores são eventos que podem causar grandes danos, de forma que avaliar a eficácia de ferramentas de inspeção de árvores se tornou indispensável. No entanto, ensaios realizados diretamente em árvores são escassos porque é necessário comprovar os resultados a partir da sua supressão. Dessa forma, as pesquisas em geral são realizadas em laboratório, utilizando-se discos, que mesmo em condição saturada, não apresenta mais características presentes na árvore viva e livre de tensões. A inspeção por tomografia ultrassônica é baseada em faixas de velocidade de propagação que são associadas à cores, permitindo obter imagem representativa da condição do tronco. Assim, torna necessário verificar se há variação nas velocidades de propagação de ondas de ultrassom obtidas na árvore viva e em discos no laboratório, sendo o objetivo dessa pesquisa. Utilizou-se velocidades em 28 rotas de medição obtidas diretamente em árvores vivas e em discos ensaiados imediatamente após o corte. As velocidades foram comparadas estatisticamente e as imagens geradas foram comparadas por meio de matriz de confusão. Os resultados permitiram concluir que velocidades obtidas em árvores vivas e em discos saturados são estatisticamente diferentes. Essas diferenças numéricas se refletem nas imagens tomográficas, que apresentam diferenças na acurácia para representarem a condição real do tronco.

**Palavras-chave:** ensaios não destrutivos; inspeção de árvores; tomografia ultrassônica.

### Introdução

O uso da tomografia acústica como método de ensaio não destrutivo para inspecionar árvores tem sido muito explorado devido aos bons resultados. As pesquisas se iniciaram com a utilização de ondas de tensão (Mattheck, 1993; Divos, 1994), e pouco tempo depois se deu o início a estudos utilizando tomografia ultrassônica. Esses estudos consideram que a obtenção de imagens da estrutura interna das árvores é possível através de técnicas que utilizam parâmetros da propagação de ondas, gerando a tomografia ultrassônica, a qual pode ser baseada no tempo de propagação, na amplitude ou na resposta em frequência (Bucur, 2005). Dessa forma, as condições internas da árvore podem ser avaliadas com bastante precisão (Wang et al. 2004).

As imagens da tomografia ultrassônica são geradas a partir da interpolação espacial das velocidades obtidas pelo tempo de propagação da onda na seção do fuste avaliada, estas velocidades são divididas em faixas e associadas a cores gerando um mapa de velocidades que pode ser interpretado de acordo com os conhecimentos obtidos a partir de estudos (Palma, 2017).

A velocidade de propagação da onda na madeira não é constante, pois o tempo de propagação pode variar tanto de espécie para espécie, como de árvore para árvore. Essa variação entre as velocidades não permite utilizar uma velocidade comparativa (referência), sendo o ideal comparar a árvore sempre com ela mesma, através da interpretação das faixas de velocidade obtidas pela tomografia ultrassônica (Wang et al. 2004). Dessa forma, é importante conhecer fatores que podem influenciar na imagem gerada prejudicando a interpretação.

## Objetivo

O objetivo desta pesquisa é averiguar e analisar as diferenças de velocidade de propagação de onda na árvore viva e em discos através de comparações estatísticas e nas imagens geradas.

## Materiais e Métodos

Os ensaios em campo foram realizados em 3 exemplares de *Spathodea campanulata* (P. Beauv) situadas na Praça da Paz do campus Universitário da UNICAMP, cedidas para o estudo pela Equipe de Meio Ambiente do campus. Ensaios foram realizados nas árvores vivas a 120 cm do solo (DAP) e em laboratório nos discos obtidos logo após o corte, utilizando o equipamento de ultrassom USLab e transdutores exponenciais de 45kHz. Para tanto, foi utilizada a metodologia da malha de difração, que consiste em marcar 8 pontos equidistantes no entorno do fuste, e no primeiro é colocado o transdutor emissor e no segundo o transdutor receptor, lendo o tempo de propagação nesta rota; em seguida o receptor é passado para o terceiro ponto, mantendo o emissor no primeiro para a leitura dessa rota. Depois de completos os 7 pontos pelo receptor, o transdutor emissor é colocado no ponto seguinte e o receptor percorre os demais. Este processo é repetido até que todas as rotas da malha passem por medição.

Estas leituras de propagação foram tabuladas para em seguida elaborar as planilhas de tempo e de contorno a serem utilizadas no *ImageWood 3.1* para a geração das imagens. As coordenadas de contorno foram obtidas a partir da imagem da superfície dos discos no *ImageJ*. As combinações dessas coordenadas permitem obter as rotas de propagação das ondas, que são associadas aos tempos de propagação gerando a planilha dos tempos. Adicionalmente, a partir das rotas, foram calculados o comprimento de cada uma, que relacionada ao tempo nos permitiu obter a velocidade de propagação nas 28 rotas de cada ensaio. A avaliação estatística foi feita por meio de Análise de Variância (ANOVA) com nível de significância de 95%.

Em seguida, foram geradas as imagens utilizando *ImageWood 3.1*, utilizando dois interpoladores, o IQD (inverso do quadrado da distância) e o método das elipses, (Du, et al. 2015). O segundo método apresenta duas condições de interpolação, uma com compensação de velocidades e outra sem. Para esta pesquisa foram geradas 18 imagens, considerando-se os dois interpoladores e o Du et al. (2015) tanto “com” quanto “sem” compensação de velocidades.

Para a avaliação das imagens, foi utilizada a da Matriz de Confusão, na qual utilizamos como modelo as imagens reais referentes às fotografias de cada um dos discos, que foram comparadas as imagens geradas pela tomografia. Essas imagens foram classificadas de acordo com pesquisa anterior e considerando a sanidade dos discos, não era esperado grandes variações de velocidade. Desta forma, classificou-se como: TP – True Positive (verdadeiro positivo) para as células nas quais se esperava obter uma condição e se obteve o que se esperava; FN – False Negative (falso negativo) para as células nas quais se esperava obter uma condição e não se obteve; TN – True Negative (verdadeiro negativo) para as células nas quais não se esperava obter uma condição e efetivamente não se obteve; FP – False Positive (falso positivo) para as células onde não se esperava obter uma condição e se obteve.

A métrica utilizada para validação do modelo, ou seja, o quanto a imagem gerada se parece com a real foi a acurácia, que leva em consideração a quantidade de acertos (Equação 1). Os valores de acurácia obtidos nos permitiram verificar se há diferença entre a imagem gerada a partir de ensaios nas árvores vivas e imagens geradas a partir de ensaios em disco.

$$Acurácia = \frac{TP + TN}{Total\ de\ pixel} \quad (1)$$

## Resultados

### Avaliação estatística das velocidades

Considerando todas as rotas e as 3 árvores, a velocidade foi estatisticamente afetada pela condição de medição (1 = árvore; 2 = laboratório) com 95% de nível de significância, com P-valor =

0,0015 ( $< 0,05$ ). Em média, a velocidade na árvore (1280 m/s) foi 17% superior à velocidade obtida em laboratório, nos discos saturados (1098 m/s). Avaliando o comportamento por árvores independente das rotas, verificamos que, para a árvore 1, embora haja uma diferença numérica de 18,5%, não há diferença estatística (P-valor = 0,0838) entre os resultados das velocidades médias na árvore viva (1063 m/s) e na árvore em laboratório (897 m/s). Para a árvore 2, as diferenças são de 13,6% e há diferença estatisticamente significativa (P-valor = 0,0074) entre a árvore viva (1251 m/s) e o disco em laboratório (1101 m/s). Para a árvore 3, com diferença de 17,7%, também houve diferença estatisticamente significativa (P-valor = 0,0298) entre árvore viva (1525 m/s) e disco em laboratório (1296 m/s). A diferenciação estatística de resultados das velocidades na árvore viva e nos discos em laboratório variou nas rotas, mostrando igualdade estatística entre algumas rotas e diferenças estatísticas em outras. Esse resultado pode indicar que as diferenças estatísticas podem não ser somente numéricas, gerando interferência na imagem tomográfica.

#### Avaliação das imagens geradas por tomografia

Partindo dos 6 ensaios de propagação de ondas, sendo 3 realizados nas árvores em pé e 3 pós corte, foram geradas 18 imagens no software *ImageWood 3.1*, considerando o uso do interpolador proposto por Du et al. (2015), com e sem a compensação de velocidades, e o interpolador IQD (baseado no Inverso do Quadrado da Distância). Na Figura 1 temos um conjunto de exemplos de imagens geradas para o disco da árvore A1 (Figura 1a). As imagens localizadas à esquerda foram geradas a partir do ensaio da árvore em pé (Figura 1c, Figura 1e e Figura 1g), já as imagens localizadas à direita foram geradas a partir da medição após o corte, nos discos (Figura 1d, Figura 1f e Figura 1h).

Neste exemplo verificamos pelo corte do disco (Figura 1a) que se trata de uma peça em grande parte íntegra, com uma pequena área mais escura enrijecida por efeito da compartimentalização devido a um início de deterioração.

De modo geral não eram esperadas grandes alterações de velocidade, como ocorrido na imagem gerada com o Du et al. com compensação de velocidades obtida pré corte (Figura 1c), onde obtivemos inclusive áreas em verde claro, que indicam uma perda de até 70% da velocidade máxima. Algo semelhante ocorreu na imagem gerada com Du et al. sem compensação de velocidades também com o ensaio pré corte (Figura 1e), na qual obtivemos até mesmo uma pequena área em amarelo, que indica uma perda de até 80% da velocidade máxima, o que não era esperado para tal região, pois regiões representativas de perda de velocidade superiores a 70% da velocidade máxima pode indicar a presença de oco (Palma, 2017).

Para as imagens geradas com o interpolador Du et al. com e sem compensação de velocidades a partir do ensaio pós corte (Figura 1d e Figura 1f), verificamos uma menor perda de velocidades, mantendo em grande parte velocidades que variam entre 50% e 90 % da velocidade máxima, a qual pode ter causado uma interferência devido a presença de zonas de velocidades muito alta nas áreas mais centrais, refletindo em zonas de velocidade mais reduzida nas demais.

No entanto, as imagens geradas com ambos tipos do interpolador Du et al. nos ensaios pós corte são as que se aproximam mais da imagem real do disco. No caso das imagens geradas com o interpolador IQD, tanto na gerada a partir de dados do último ensaio antes do corte (Figura 1g), quanto na gerada a partir do ensaio pós corte (Figura 1h), observa-se que há uma grande variação das faixas de velocidade, que vão desde a cor marrom, que representa a velocidade máxima, até a cor amarela em uma delas (Figura 1g) e verde claro em outra (Figura 1h), representado perdas de velocidade de até 70% e 80% da velocidade máxima, respectivamente. Contudo, nessas duas imagens, devido à grande variação de velocidades, o algoritmo do interpolador gera a imagem com muitas cores, criando vários cordões de interferência e dificultando a observação de regiões de velocidades mais altas e mais baixas, pois as fronteiras que as delimitam não estão muito marcantes. Isso faz com que tais imagens sejam inconclusivas em relação às áreas de madeira íntegra ou de madeira deteriorada.

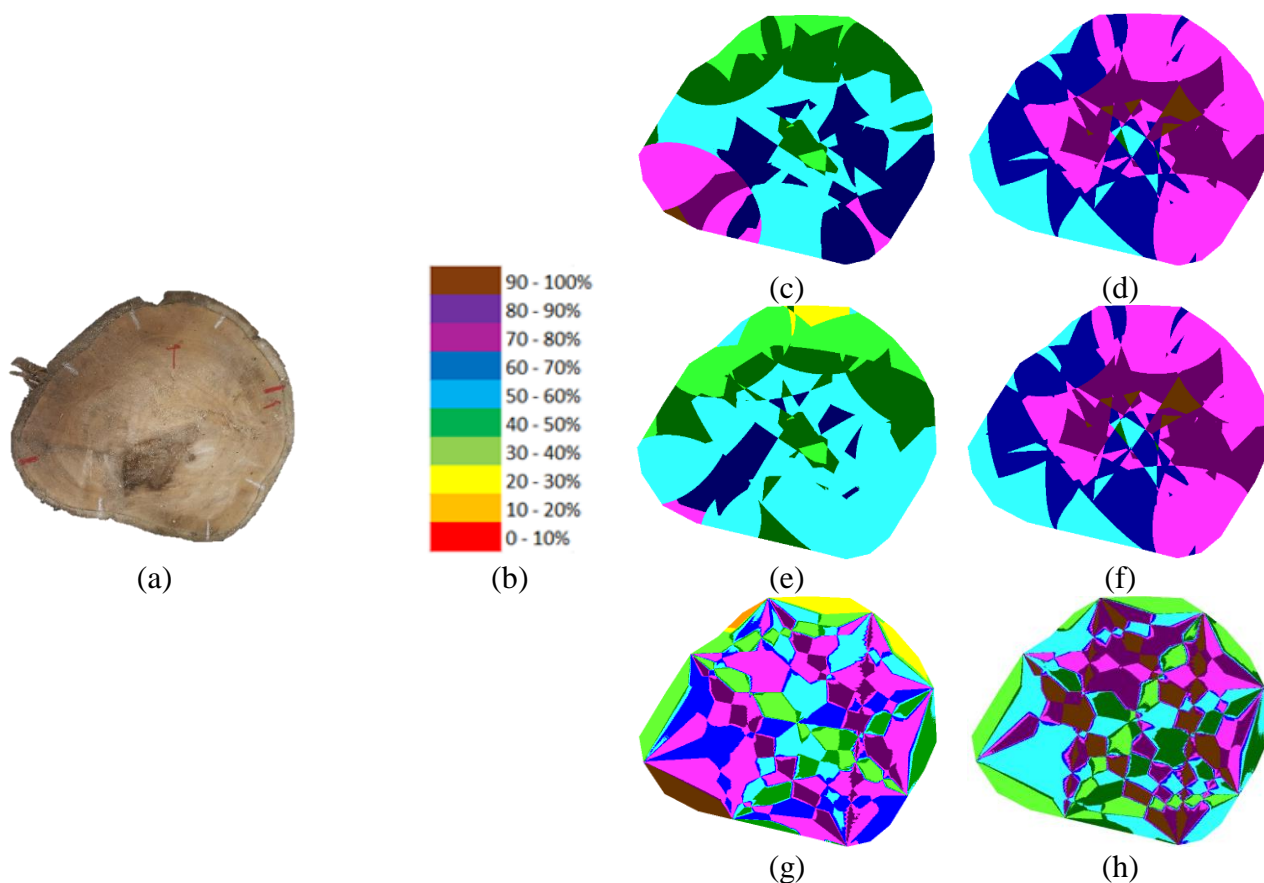


Figura 1. Conjunto de imagens geradas por tomografia ultrassônica a partir de ensaios no disco A1: disco real da árvore A1 (a) e legenda de cores das imagens tomográficas (b); Imagens tomográficas: Du et al. com compensação de velocidade na última medida da árvore em pé (c); Du et al. com compensação de velocidade na primeira medida após corte (d); Du et al. sem compensação de velocidade na última medida da árvore em pé (e); Du et al. sem compensação de velocidade na primeira medida após corte (f); IQD na última medida da árvore em pé (g); IQD na primeira medida após corte (h).

Seguindo essa lógica comparativa, para cada imagem foi gerada uma tabela de matriz de confusão e o desempenho de cada interpolador (Tabela 1) foi obtido pela métrica da acurácia (Equação 1).

**Tabela 1.** Acurácia das imagens geradas por tomografia ultrassônica.

Interpolador	Árvore 1		Árvore 2		Árvore 3		
	pré corte	pós corte	pré corte	pós corte	pré corte	pós corte	
IQD	70%	66%	70%	60%	62%	35%	
Du et al., 2015	com compensação	70%	93%	85%	87%	57%	47%
	sem compensação	67%	93%	85%	87%	62%	35%

Avaliando por interpolador e por árvore, verifica-se que as acurácias obtidas pelo IQD foram superiores nas imagens geradas a partir do ensaio em árvores vivas quando comparadas às imagens geradas a partir do ensaio pós corte, havendo uma diferença muito grande para a árvore 3. Para o interpolador Du et al., tanto como compensação de velocidade como sem compensação, a acurácia foi maior nas imagens geradas a partir de dados de discos saturados em laboratório para as árvores 1 e 2. A árvore 3 também teve comportamento diferenciado das demais para esse interpolador, além de

acurácia inferior. A árvore 3 apresentava características dendrométricas muito inferiores às demais e provavelmente era mais jovem do que as outras duas. Outras pesquisas do grupo (Bertoldo et al. 2015, Gonçalves et al. 2011) já mostraram que as velocidades de propagação de ondas de ultrassom são maiores na árvore viva quando comparado com as obtidas em toras recém abatidas (saturadas), resultado também verificado nesta pesquisa de iniciação científica. Segundo os autores citados, a hipótese é a de que as diferenças estejam relacionadas com a condição de carregamento ou com o fluxo de seiva. Como a condição de carregamento indiretamente tem relação com o coeficiente de Poisson, atualmente pesquisas do grupo vêm sendo feitas para avaliar a viabilidade de correção dos valores de velocidade obtidas na árvore pelo coeficiente de Poisson RL, uma vez que foi observado que a inclusão desse parâmetro aproxima os valores de velocidade obtida na árvore e na tora.

## Conclusões

Velocidades obtidas em árvores vivas e em discos saturados são estatisticamente diferentes. Essas diferenças numéricas se refletem nas imagens tomográficas geradas, que apresentam diferenças na acurácia para representarem a condição real do tronco. Tendo em vista que muitas pesquisas são realizadas utilizando-se discos e seus resultados são extrapolados para árvores vivas, é importante conhecer e quantificar essas diferenças.

## Bibliografia

Bertoldo Pedroso, C.; Gonçalves, R. Influence of Measurement Position, Tree Diameter, and Bulk Wood Density on Models that Predict Wave Propagation Velocity in Logs According to the Velocity in Trees. *Forest Products Journal*, v. 65, p. 166-172, 2015.

Bucur, V. Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees. *Ultrasonics*, v.43, pp.237-239, 2005.

Du, X.; Li, S.; Li G.; Feng, H.; Chen, S. Stress Wave tomography of wood internal defects using ellipse-based spatial interpolation and velocity compensation. *BioResources*, v.10, n.3, p. 3948-3962, 2015.

Gonçalves, R.; Secco, C. B.; Cerri, D. G. P.; Batista, F. Behavior of Ultrasonic Wave Propagation in Presence of Holes on Pequia (*Aspidosperma desmanthum*) *Wood. In: Proc. 17th Symp. Nondestructive Testing of Wood*, Vol. 1. Sept. Sopron, Hungary. 159-165, 2011.

Mattheck, C.; Bethge, K.; Erb, D. Failure criteria for trees. *Arboricultural Journal*, v.17, n.12, p. 201–209, 1993.

Palma S. S. A. *Reconhecimento de padrões em imagens geradas por ultrassom*. 2017. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambientação) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP

Wang, X.; Divos, F.; Pilon, C.; Brashaw, B. K.; Ross, R. J.; Pellerin, R. F. Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools: A guide for use and interpretation. *Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-147. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*, v. 12, p. 147, 2004.