

Árvores Urbanas: Técnicas não-Destrutivas para o Manejo e Planejamento

Dr. Almir Sales
Dra. Marcela Candian

Instituição: Universidade Federal de São Carlos

Resumo

As árvores são importantes equipamentos da infra-estrutura urbana, tanto pela necessidade da presença da natureza nas cidades, como pelo conforto proporcionado pelo sombreamento e melhoria da qualidade de vida. O presente trabalho objetivou obter parâmetros para a aplicação da técnica não-destrutiva por meio de ondas de tensão para o manejo de árvores urbanas sem a necessidade de provocar destruição do lenho ou corte prematuro. Foram selecionadas doze árvores da espécie *Caesalpinia peltophoroides* localizadas em vias públicas, nas quais foram realizados ensaios com a técnica de ondas de tensão, os quais permitiram a produção de imagens tomográficas. Os resultados permitiram verificar que a técnica de ondas de tensão apresenta viabilidade de aplicação na avaliação interna de árvores urbanas e, que esta técnica pode ser utilizada para balizar os serviços de manejo e evitar cortes indevidos das árvores urbanas.

1. Introdução

Mais do que atender a harmonia paisagística e ambiental, as árvores estabelecem o equilíbrio da temperatura ambiente, mantendo a umidade do ar e promovendo sombra nos dias ensolarados, proporcionando um ambiente físico saudável. A arborização urbana está intimamente relacionada com a presença de espécies em espaços públicos como nos parques, ruas, avenidas, jardins e praças.

Apesar de sua importância, a arborização não vem recebendo na maior parte dos municípios a devida atenção, não sendo vista como equipamento que deve ser adequadamente planejado. É comum verificar a presença de plantios irregulares de espécies inadequadas e a existência de árvores com problemas graves de deterioração, o que pode acabar gerando sérios inconvenientes, como acidentes decorrentes do mal estado das árvores. A avaliação das condições físicas em árvores urbanas contribui para a inspeção e manejo da arborização em vias públicas. Assim para garantir a manutenção das árvores urbanas é fundamental o emprego de métodos de diagnóstico preventivos, que permitam avaliar as condições externas e internas das árvores.

A análise da deterioração de árvores urbanas é realizada atualmente, em grande parte dos municípios brasileiros, apenas através de análise visual, a qual permite apenas a avaliação externa da árvore, não possibilitando a detecção dos defeitos internos, que podem ser causadores de sérios problemas, inclusive queda da árvore. Acrescenta-se ainda o problema relacionado ao alto grau de subjetividade da análise visual, uma vez que as condições são avaliadas a olho nu e dependem do conhecimento dos peritos que

realizam a avaliação para serem corretamente reconhecidas.

Assim para uma correta avaliação da deterioração em árvores urbanas, além da avaliação externa do material, é necessário que esta esteja combinada com a avaliação interna da árvore. A análise interna da deterioração pode ser realizada por meio do emprego de técnicas não-destrutivas, a partir das quais podem ser obtidas imagens tomográficas, que possibilitam a visualização interna, permitindo assim a identificação de partes danificadas, sem causar nenhum dano à árvore. É importante ressaltar, que além dos aspectos de sanidade da árvore também é necessário levar em consideração outros fatores na tomada de decisão como, por exemplo, os esforços solicitantes a que estão normalmente sujeitas as árvores em ambiente urbano, tais como, o vento e peso próprio.

Dentre as técnicas não-destrutivas existentes, com aplicabilidade na avaliação de árvores urbanas, pode-se destacar a técnica de ondas de tensão, a qual apresenta como principal vantagem a possibilidade do estudo do interior de árvores vivas, preservando suas características físicas, mecânicas e seu uso final. O equipamento é capaz de detectar de forma não-destrutiva a presença de furos, deterioração e rachaduras, através da imagem tomográfica gerada. O custo do equipamento é baixo se comparado a outros equipamentos de avaliação não-destrutiva, e é facilmente manuseado, podendo ser operado por uma única pessoa.

Diante dos benefícios que a técnica de ondas pode proporcionar na avaliação de árvores urbanas, este trabalho busca analisar a partir dos resultados gerados pela aplicação da técnica, a confiabilidade desta na detecção de defeitos internos, além de estabelecer alguns parâmetros para aplicação da técnica.

1.1 Diagnóstico de Árvores Urbanas

O planejamento da arborização urbana engloba diversas etapas, dentre as quais é importante destacar a necessidade de análise sobre o estado de sanidade biológica e o risco de queda das árvores. A avaliação das árvores urbanas consiste em questão importante tanto para a qualidade de vida da população como para a segurança das pessoas nas ruas e nos parques. Muitas vezes, as árvores, especialmente as mais antigas, apesar de não apresentarem sinais externos, podem apresentar sérios problemas fitossanitários, colocando em risco a integridade de pessoas, veículos e edificações se não forem diagnosticadas corretamente. Verifica-se ainda a falta de critérios para diagnosticar corretamente o problema, dificultando-se assim a tomada de

decisão sobre o procedimento mais adequado a ser aplicado.

Para diagnosticar corretamente uma árvore urbana é necessário reconhecer os vários tipos de defeitos e degradação que podem ocorrer nas árvores, além de seu comportamento diante dos esforços solicitantes que possam estar submetidas.

As rachaduras têm origem principalmente devido à separação das fibras, que são decorrência da perda de umidade e da liberação de tensões internas. As rachaduras têm assim como origem principal a retração da madeira, a qual ocorre quando o teor de umidade cai abaixo do ponto de saturação das fibras. A retração na madeira consiste em um fenômeno anisotrópico, ou seja, se manifesta diferentemente conforme a direção, sendo de maior intensidade na direção tangencial e de menor intensidade na direção radial (Quoirin, 2004).

As árvores estão sujeitas também às injúrias, as quais podem dar início ao processo de biodeterioração. A biodeterioração em árvores pode ser definida como um processo de sucessão ecológica de microorganismos (bactérias e fungos). É importante o conhecimento da resistência da árvore ao ataque de microorganismos e a identificação de sua presença nas árvores urbanas, para a tomada de decisão quanto à necessidade de manejo (Shigo, 1979).

1.2 Conceitos Pertinentes à Técnica não-Destrutiva por Ondas de Tensão

A propagação de ondas de tensão apresenta como principal vantagem a possibilidade do estudo do interior de árvores vivas, preservando suas características físicas e mecânicas e seu uso final. Apresenta ainda como vantagem o custo menor para sua implantação se comparado a outros métodos, tratando-se de um processo dinâmico que está internamente relacionado com as propriedades físicas e mecânicas da madeira. O equipamento de ondas de tensão para avaliar árvores é capaz de detectar de forma não-destrutiva a presença de furos, deterioração e rachaduras (Candian e Sales, 2009).

No método de ondas de tensão é analisada a velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no lenho. O elemento indutor poderá ser um impacto ou um gerador de vibrações forçadas e o sentido de propagação da onda poderá ser paralelo ou transversal às fibras.

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 das extremidades de um elemento de material homogêneo e isotrópico, gera-se uma onda que se movimenta ao longo desta, excitando as partículas da extremidade que recebeu o impacto, enquanto as partículas da extremidade livre se encontram em repouso. A onda caminha ao longo da peça a uma velocidade constante, e após caminhar por todo o comprimento, esta é refletida pela extremidade livre da peça, retornando-se ao seu ponto original. Apesar de a velocidade continuar sempre constante, o movimento das partículas na peça de madeira diminui a cada passagem da onda pela peça, sendo que após um período de tempo as partículas da madeira retornam ao repouso. Verifica-se próxima da extremidade excitada uma série de pulsos igualmente espaçados, com amplitude diminuindo ao longo do tempo (Candian e Sales, 2009).

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 sensores resulta numa diminuição da velocidade de propagação, se comparada com uma velocidade de referência (Candian, 2011).

Como a madeira é um material higroscópico, ou seja, tem a capacidade de absorver ou liberar umidade até alcançar o equilíbrio com o ambiente em que se encontra, suas propriedades físicas são afetadas pela umidade. Quando saturada, torna-se um material de duas fases, uma sólida, o esqueleto da estrutura, correspondente aos elementos anatômicos e uma fluida, representada pelo volume de água nos poros. Uma árvore recém cortada pode apresentar teor de umidade entre 35% e 200%, dependendo da espécie. A secagem da madeira está diretamente relacionada com a estrutura celular. O mecanismo de secagem pode ser explicado de maneira distinta, acima e abaixo do PSF. Acima do PSF, o movimento da água livre segue as leis capilares, quanto menor o diâmetro dos capilares, maior será a força de tração da coluna de água nestes capilares.

Abaixo do PSF, a secagem pode ser considerada um processo de difusão: a água das camadas mais internas se difunde na forma de vapor preenchendo os espaços vazios deixados pela água livre, até atingir a superfície da madeira por capilaridade (Kabir et al.,1997).

Existe uma forte relação entre velocidade de propagação da onda e o teor de umidade. O teor de umidade afeta a velocidade de propagação de dois modos: no efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira. A água livre aumenta a atenuação, resultando numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangen-

cial (Kabir et al.,1997).

A presença de nós poderá afetar a propagação das ondas pela descontinuidade dos componentes anatômicos da madeira, pela diferença de densidade do substrato e pelo desvio da grã (orientação das fibras da madeira) (Cruz, 2001). Deste modo, a técnica de ondas de tensão se apresenta como ferramenta potencial para a detecção de defeitos internos em árvores vivas.

2. Procedimento Experimental

As árvores escolhidas foram da espécie *Caesalpinia peltophoroides*, conhecida popularmente como Sibipiruna que consiste em espécie de grande porte nativa do Brasil.

Para a realização dos ensaios de campo com a técnica de ondas de tensão foi empregado o equipamento FAKOPP 2D, o qual apresenta a opção de até oito canais de emissão e recebimento da onda. Ao aplicar um impacto em um dos sensores, o equipamento fornece tempos de propagação da onda no interior do lenho, a



Figura 1(a): Sensores posicionados no perímetro da seção

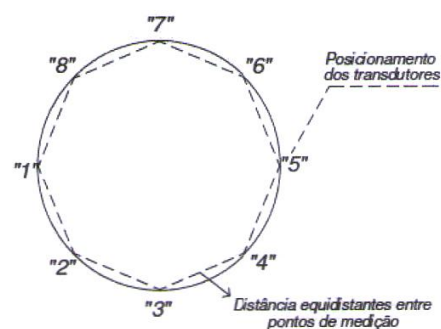


Figura 1(b): Esquema de posicionamento dos sensores na seção

partir da qual é possível a estimativa do módulo de elasticidade do material.

Para cada árvore em estudo (12 árvores), foram



Figura 2: Aplicação de impulsos nos sensores para emissão das ondas

posicionados oito sensores do equipamento ao redor do tronco da árvore (Figura 1), buscando abranger todo seu perímetro, e em seguida foram aplicados impulsos (batimentos) com auxílio de um martelo, para a emissão da onda nas seções localizadas 50 cm (Seção A), 90 cm (Seção B) e 130 cm (Seção C) da base da árvore (Figura 2).

Para a determinação da imagem tomográfica foi utilizado o software que acompanha o equipamento, denominado de FAKOPP 2D Software, no qual ficam registrados os tempos de percurso das ondas geradas no material e os dados de entrada manual, que consistem nas distâncias entre pontos de medição. As distâncias entre pontos de medição são coletadas pelo operador durante a aplicação da técnica. O software, com base nas informações de velocidade de propagação da onda e distância, gera uma matriz de velocidade de propagação da onda na árvore.

O software utiliza um espectro de cores para os valores de velocidade de propagação da onda, apresentando colorações distintas de acordo com a ordem de grandeza da velocidade, permitindo analisar regiões com velocidades que se distanciam da esperada para a espécie, as quais podem significar a presença de defeitos ou injúrias internas.

Com a obtenção da imagem tomográfica para cada seção de cada árvore, a próxima etapa consistiu no corte destas nas seções ensaiadas para posterior comparação dos elementos resultantes do corte com a imagem tomográfica obtida e, para a confecção dos corpos-de-prova para análise das propriedades físicas (teor de umidade e densidade aparente).

Após o corte de cada árvore, as seções foram fotografadas para posterior comparação com a imagem tomográfica obtida. Na Figura 3 está apresentada uma imagem fotográfica obtida da seção de uma árvore submetida à técnica de ondas de tensão.



Figura 3: Imagem fotográfica obtida de uma seção de realização de ensaio

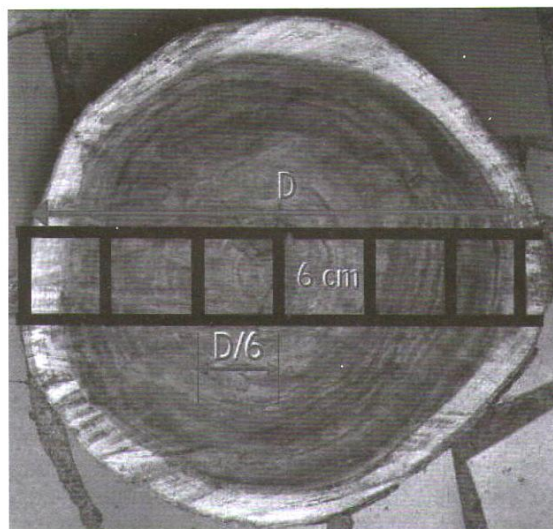


Figura 4: Esquema de retirada dos corpos-de-prova diametrais

Para a realização dos ensaios de teor de umidade e densidade aparente foram retirados corpos-de-prova de cada uma das três seções ensaiadas de cada árvore. Em cada seção foram retiradas amostras diametraais conforme esquema apresentado na Figura 4.

De cada seção foram retirados seis corpos-de-prova ao longo do diâmetro no eixo de posicionamento dos sensores "1-5". Ao longo do diâmetro a espessura da faixa demarcada correspondeu a 6 cm em todas as seções. Buscou-se dividir a faixa em seis corpos-de-prova de mesma dimensão, cuja dimensão foi determinada em função do diâmetro da seção. Com os valores da densidade aparente foi possível determinar o valor da velocidade de propagação da onda de tensão em cada uma das direções de aplicação, conforme a Equação (1).

$$E_d = \rho \times v^2 \tag{1}$$

Onde:

E_d : módulo de elasticidade dinâmico (10^6 MPa)
 ρ : densidade da madeira (kg/m^3)

v : velocidade da onda longitudinal (m/s)

O software do equipamento forneceu imagens tomográficas baseadas nas velocidades de propagação das ondas estimadas entre os sensores

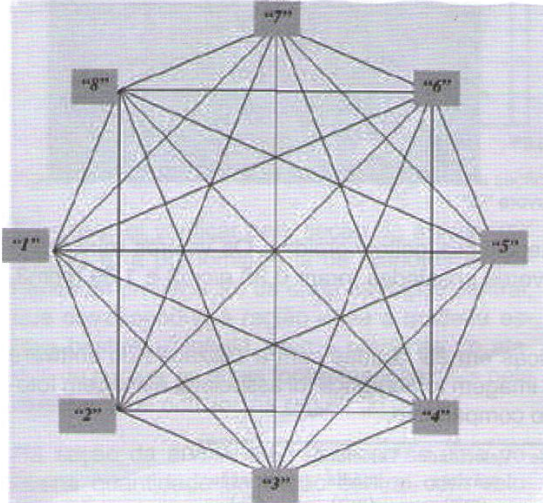


Figura 5: Linhas de medição de velocidade de propagação da onda pelo equipamento Fakopp

posicionados ao longo de cada seção estudada. Na Figura 5, cada linha entre dois sensores corresponde a um valor de velocidade de propagação da onda fornecido pelo equipamento. Ressalta-se que a velocidade de propagação da onda entre dois sensores, independente da direção, como por exemplo, direção "1-5" ou "5-1" apresenta mesmo valor.

Com base na Figura 4, verificou-se que havia para cada corpo-de-prova retirado ao longo do diâmetro no eixo de posicionamento dos sensores "1-5", ondas que cruzavam estes corpos-de-prova. Desta forma, para cada corpo-de-prova determinaram-se as ondas que o cruzavam e com os valores de velocidade de propagação destas ondas realizou-se a média, determinando assim a velocidade para cada corpo-de-prova de cada seção.

A partir das imagens tomográficas geradas pelo software, e a partir da determinação das velocidades pela determinação da densidade aparente de cada corpo de prova retirado do local da trajetória da frente de onda, foi possível comparar a imagem tomográfica com a imagem fotográfica (real) de cada seção estudada, e deste modo, obter a acuracidade da imagem tomográfica em relação a imagem real das seções de cada uma das 12 árvores estudadas.

3. Resultados e Discussões

Os valores de velocidade de propagação da onda variam de acordo com a espécie, ou mesmo, de uma árvore para outra. Não há em literatura valores de referência para a velocidade de propagação da onda para a espécie *Caesalpinia peltophoroides*. É importante destacar que as velocidades de propagação da onda obtidas correspondem a velocidades nas direções radial e tangencial, que apresentam valores inferiores a velocidade na direção longitudinal (direção das fibras). Apenas para efeito ilustrativo, uma vez, que não é possível a comparação entre diferentes espécies e entre diferentes técnicas, encontra-se em literatura valores de velocidades de propagação da onda na direção radial, obtidas pela técnica de ultra-som, para coníferas com velocidade entre 2.000 e 2.400 m/s (Nogueira e Ballarin, 2003).

Houve uma variação bastante significativa dos valores de velocidade de propagação da onda obtidos para as árvores em estudo, mesmo estas pertencendo a uma mesma espécie.

Esta diferença ocorre, além dos fatores como presença de defeitos internos, direção de propagação da onda, densidade, entre outros, devido à grande heterogeneidade da madeira, que mesmo para uma mesma espécie, pode apresentar grande variabilidade de suas propriedades, por consistir em um material de origem natural.

Considerando todas as árvores ensaiadas, a mínima e a máxima velocidade de propagação da onda obtida, foram respectivamente 887 m/s e 2.712 m/s. A menor velocidade de propagação da onda encontrada foi na árvore 01, a qual apresentou regiões da seção com densidade aparente de menor magnitude (inferior a 0,50 g/cm²) e a máxima foi na árvore 07, que apresentou valores de densidade aparente na seção acima de 0,90 g/cm². Os valores da velocidade de propagação da onda para as amostras estão apresentados na Tabela 1.

Como não há estudos em literatura desta espécie para a determinação de sua velocidade na direção radial, foi arbitrado, como valor de referência de velocidade de propagação da onda para a espécie *Caesalpinia peltophoroides*, a média determinada a partir das velocidades obtidas para as 12 árvores em estudo, o que equivale a 2.133 m/s. A velocidade de referência da propagação da onda é necessária para a análise e interpretação das imagens tomográficas.

Os valores de densidade aparente obtidos para as 12 árvores estudadas permitem afirmar que houve predominância de valores superiores a 0,71 g/cm³. Este valor é compatível com os

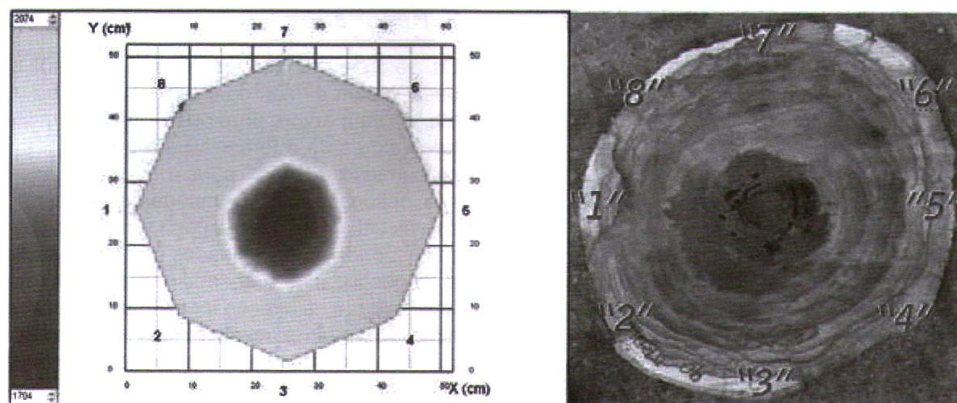


Figura 6: Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção da árvore "02"

valores da literatura encontrados para a espécie *Caesalpinia peltophoroides*. Os valores mínimos e máximos encontrados de densidade aparente das árvores ensaiadas foram 0,33 g/cm³ e 1,69 g/cm³, respectivamente.

Na Figura 6 são apresentadas as imagens tomográficas em 2D obtidas com a utilização do software FAKKOP, para algumas das árvores estudadas. Cada imagem tomográfica foi associada à imagem fotográfica da seção a partir da qual foi gerada, para efeito comparativo.

Árvore	Seção da árvore	Velocidade mínima (m/s)	Velocidade máxima (m/s)	Velocidade média (m/s)	Coefficiente variação (%)
01	A	1260	2061	1536	19,9
	B	1177	1942	1488	24,6
	C	887	1643	1134	25,2
02	A	2007	2345	2171	8,2
	B	2199	2406	2306	4,8
	C	2282	2417	2341	2,6
03	A	2018	2601	2239	10,2
	B	2109	2509	2341	7,6
	C	2186	2654	2469	7,2
04	A	1418	2180	1792	17,1
	B	2120	2322	2232	3,9
	C	2158	2443	2272	5,6
05	A	1700	2275	1903	11,2
	B	2196	2535	2336	5,7
	C	2064	2434	2230	6,3
06	A	1489	2213	1748	18,4
	B	1552	2429	1969	18,5
	C	1757	2456	2077	13,9
07	A	1949	2514	2196	10,8
	B	2177	2553	2310	6,6
	C	2179	2712	2429	8,0
08	A	1441	2514	2196	4,9
	B	1856	2154	1962	5,6
	C	1800	2114	1888	6,2
09	A	1749	2170	1890	8,6
	B	1977	2393	2117	8,2
	C	1759	2156	1899	8,1
10	A	2297	2592	2394	4,8
	B	2235	2565	2334	5,2
	C	2228	2466	2324	3,7
11	A	2284	2538	2378	3,7
	B	2287	2550	2388	3,9
	C	2388	2584	2472	2,6
12	A	2196	2471	2386	4,4
	B	2305	2380	2338	1,3
	C	2254	2397	2315	2,3
Considerando as 12 árvores		887	2712	2133	4,2

Tabela 1: Valores da velocidade de propagação da onda (mínimo, máximo e médio)

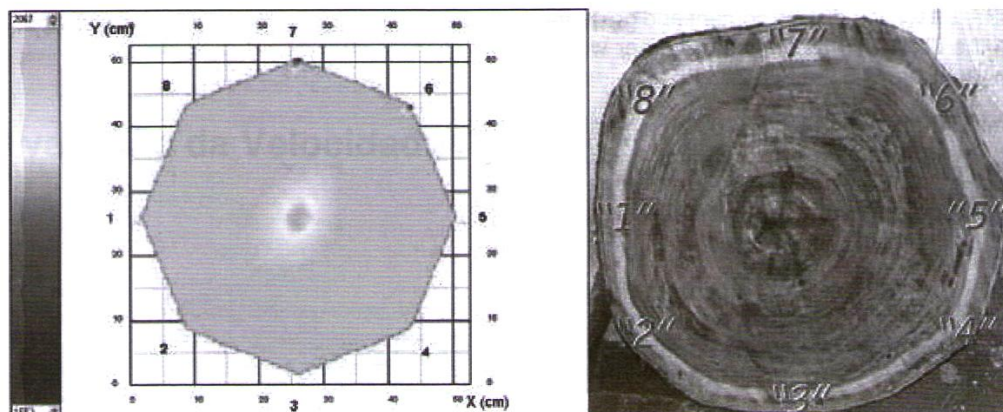


Figura 7: Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção da árvore "05"

Foi possível verificar pela seção da árvore "02" (Figura 6) a predominância de menores velocidades de propagação da onda na região central, que correspondeu à região onde a madeira estava bastante afetada, com a presença de ataque de cupins, os quais foram responsáveis pela existência de orifícios na região do cerne.

Na seção da árvore "05", verificou-se uma pequena quantidade da seção central com velocidade de propagação da onda de menor magnitude, mas bem próxima do limite máximo da escala de velocidade de propagação da onda, a qual correspondeu a 97% da velocidade referencial, com indicativos de não existência de defeitos ou injúrias internas.

Ao comparar com a imagem fotográfica correspondente a esta seção verificou-se que esta se encontrava íntegra, sem evidências de defeitos ou injúrias internas.

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que a técnica de ondas de tensão possui acuracidade adequada para ser utilizada na avaliação interna de árvores vivas de modo não-destrutivo.

As imagens tomográficas obtidas e a correspondente comparação fotográfica do lenho da seção analisada pela técnica de ondas de tensão permitiram visualizar algumas semelhanças em vazios das seções das árvores analisadas.

Para a análise e interpretação dos valores de velocidade de propagação da onda e imagem tomográfica fornecidos pelo equipamento de ondas de tensão, foi necessária a determinação da velocidade de referência de propagação da onda para a espécie *Caesalpinia peltophoroides*, a qual não existia na literatura. Com base nos resultados obtidos da velocidade de propagação da onda nas 12 árvores estudadas, foi possível estabelecer um valor médio de velocidade de

propagação da onda, cujo valor correspondeu a 2.133 m/s, adotado assim, como a velocidade de referência para esta espécie de árvore urbana.

As melhores correlações entre a densidade aparente e a velocidade de propagação da onda ocorreram para as medições realizadas na seção C, ou seja, no diâmetro à altura do peito (DAP, 130 cm da base da árvore). Nesta seção se encontra a representatividade da densidade média da árvore, indicando ser esta seção a melhor para a realização das medições de propagação de ondas em árvores urbanas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e ao MCT/CNPq pelo apoio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa e, à Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Limeira, pela colaboração e incentivo na realização desta pesquisa.

6. Referências

- Candian, M.; Sales, A. (2009) Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído** (São Paulo), v. 9, p. 83-98.
- Candian, M. (2011) Estudo da técnica de ondas de tensão como instrumento de avaliação interna de árvores urbanas. São Carlos, Tese (Doutorado) 148p. – UFSCar.
- Cruz, H. (2001) Patologia, Avaliação e Conservação de Estruturas de Madeira. **II Curso Livre Internacional de Patrimônio**. Associação Portuguesa dos Municípios com Centro Histórico. **Fórum UNESCO Portugal**. Santarém.
- Jayne, B. A. (1959) Vibrational properties of wood as indices of quality. **Forest Products Journal**. v. 9, n. 11, p. 413-416.
- Kabir, M. F., Sidec, H. A. A., Daud, W. M., Khalid,

K. (1997) Effect of moisture content and grain angle on the ultrasonic properties of rubber wood. **Holzforschung**. v. 51, n.3, p.263-267.

Nogueira, M., Ballarin, A. W. (2003) Sensibilidade dos ensaios de ultra-som à ortotropia elástica da madeira. **III Pan-American Conference for Nondestructive Testing – PANNDT**. Rio de Janeiro.

Oliveira, F. G. R. (2005) Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para ensaios não-destrutivos em madeira serrada por meio de ondas de ultra-som. São Carlos, Tese (Doutorado) 125p. - EESC, USP.

Quoirin, N. S. (2004) Diagnóstico de defeitos em madeira por tomografia de raios-x. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Shigo, A.L. (1979) Tree decay: an expanded concept. **Unites States Department of Agriculture Forest Service. Information Bulletin** no 419, 72p.