

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**ESTUDO DA TÉCNICA DE ONDAS DE TENSÃO COMO
INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO INTERNA DE ÁRVORES
URBANAS**

MARCELA CANDIAN PADUELLI

São Carlos
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**ESTUDO DA TÉCNICA DE ONDAS DE TENSÃO COMO
INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO INTERNA DE ÁRVORES
URBANAS**

MARCELA CANDIAN PADUELLI

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Almir Sales

São Carlos

2011

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

P125et

Paduelli, Marcela Candian.

Estudo da técnica de ondas de tensão como instrumento de avaliação interna de árvores urbanas / Marcela Candian Paduelli. -- São Carlos : UFSCar, 2011.

149 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Arquitetura paisagística - árvores. 2. Arborização das cidades. 3. Técnicas não-destrutivas. 4. Ondas - tensão. 5. Imagem tomográfica. I. Título.

CDD: 715.2 (20^a)



FOLHA DE APROVAÇÃO

MARCELA CANDIAN PADUELLI

Tese defendida e aprovada em 18/03/2011
pela Comissão Julgadora

Prof. Dr. Almir Sales - Presidente
Orientador (DECiv/UFSCar)

Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho
(LACTEC/UFPR)

Prof.^a Dr.^a Maria Solange Gurgel de Castro Fontes
(DAUP/FAAC-UNESP-Bauru)

Prof. Dr. Nemésio Neves Batista Salvador
(DECiv/UFSCar)

Prof.^a Dr.^a Léa Cristina Lucas de Souza
(DECiv/UFSCar)

Prof. Dr. Ricardo Siloto da Silva
Presidente da CPGEU

Dedicatória:

Ao meu marido Mateus, amor da minha vida
Aos meus queridos pais Edison e Maria, razão da minha existência

AGRADECIMENTOS

Ao senhor Deus por ter permitido a concretização deste trabalho e por ter sempre iluminado minha vida.

Ao meu querido marido Mateus, por todo amor dedicado a mim, pelo grande apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa, pela compreensão nos momentos ausentes, por todo amor dedicado a mim e pela grande ajuda na realização dos ensaios e na diagramação final do texto.

Aos meus pais Edison e Maria pelos belos ensinamentos que me passaram, pelo exemplo de vida, pelo carinho e amor dedicados a mim, pelo apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida, sempre me dando força e coragem para seguir em frente.

Aos meus queridos irmãos Juliana e Edison, meus grandes amigos, por todo amor e carinho e pela grande ajuda na realização dos ensaios.

Ao professor Dr. Almir Sales, orientador e grande amigo, agradeço pela paciência, pelos importantes ensinamentos, pela compreensão e pela confiança depositada em mim. Sou eternamente grata.

Ao engenheiro agrônomo Carlos da Secretaria Municipal de Meio Ambiente do município de Limeira, pela grande colaboração para a realização da parte experimental deste trabalho.

À Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Limeira, pela colaboração e incentivo na realização desta pesquisa.

À empresa Forty, responsável pelo corte das árvores do município de Limeira, em especial, ao Sr. Roberto e toda sua equipe, por toda colaboração com esta pesquisa e grande ajuda com os cortes das árvores.

Ao Sr. Gilberto Coragem, ao Dr. Alexandre Augusto Ferrari e a Sra. Vânia Regina Ferreira dos Santos, da Prefeitura Municipal de Limeira, pelo grande incentivo ao desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os amigos que estiveram presentes durante esta fase de minha vida, estando sempre por perto nos bons e nos maus momentos.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar.

Aos professores Dr. Vitoldo Swinka Filho, Profa. Dra. Maria Solange Gurgel de Castro Fontes, Prof. Dr. Nemesio Neves Batista Salvador e Profa. Dra. Lea Cristina Lucas de Souza, pelas importantes sugestões para a versão final da tese.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro para a realização desta pesquisa.

*“Uma árvore não fica de costas
para ninguém.
Dê a volta em torno dela.
A árvore estará sempre
de frente para você.
Os verdadeiros amigos, também.
Dizem os chineses:
árvore plantada com AMOR
nenhum vento derruba.
Uma verdadeira amizade, também.
Quem planta árvores, cria raízes.
Quem cultiva bons amigos, também.
As árvores, como os amigos,
produzem beleza para os olhos e os ouvidos,
na mudança sutil de suas cores,
com o passar das estações,
no ondular de suas folhas ao vento e
sombra, sempre.
Sombra protetora como a dos amigos;
sombra que varia com o dia,
que avança e faz variados rendados de luz,
semelhantes aqueles, de estrelas.
As árvores são sinônimo de eternidade.
Uma verdadeira amizade,
é PARA SEMPRE.”*

(Autor desconhecido)

RESUMO

A arborização é fundamental nos espaços urbanos, devido aos importantes benefícios que proporciona. Para garantir que esta exerça adequadamente seu papel, é importante a sua manutenção, na qual é necessário o emprego de métodos de diagnóstico preventivos, que permitam avaliar as condições externas e internas das árvores. Atualmente, a análise de árvores urbanas é realizada basicamente pela análise visual externa, a qual apresenta grande subjetividade. Para uma análise completa e segura é importante que a análise visual externa seja acompanhada de uma análise interna. Esta pode ser realizada por meio de técnicas não-destrutivas, que possibilitam a visualização interna da árvore através da imagem tomográfica, sem causar nenhum dano a esta. Dentre as técnicas não-destrutivas existentes, com aplicabilidade na avaliação interna de árvores urbanas, pode-se destacar a técnica de ondas de tensão. Diante dos grandes benefícios que esta técnica pode proporcionar na avaliação de árvores urbanas, esta pesquisa buscou verificar sua viabilidade técnica e científica, analisando a sua confiabilidade e estabelecendo parâmetros para sua aplicação. Foram realizados estudos com 12 árvores da espécie *Caesalpinea peltophoroides* (conhecida popularmente como Sibipiruna), nas quais foram realizadas medições em seções a 50, 90 e 130 cm da base, empregando o equipamento de ondas de tensão, o qual gerou as imagens tomográficas das seções. Em seguida, as árvores foram cortadas nas seções de ensaio e fotografadas, para posterior comparação com a imagem tomográfica gerada. Os resultados permitiram verificar que a técnica de ondas de tensão apresenta grande viabilidade de aplicação na avaliação interna de árvores urbanas, com resultados bastante significativos. Foi possível também estabelecer alguns parâmetros de aplicação da técnica, como a necessidade da determinação da velocidade de propagação da onda de referência, para a interpretação da imagem tomográfica e a determinação da melhor altura da seção para realização dos ensaios, a qual consistiu na altura do diâmetro à altura do peito (DAP), na qual se encontra a representatividade da densidade média da árvore.

Palavras-chave: *arborização urbana, deterioração, técnicas não-destrutivas, ondas de tensão, imagem tomográfica.*

ABSTRACT

Arborization is fundamental in urban spaces, due to the significant benefits it provides. To important issue to guarantee the adequacy of the role it plays is its maintenance. To this purpose, an application of preventive methods of diagnosis is recommended, allowing the evaluation of external and internal conditions of tress. Currently, the analysis of urban trees is subjectivity. For a complete and secure analysis, it is important to associate this visual external analysis to an internal analysis. This could be done by applying non-destructive techniques, wich allows an internal visualization of the tree through a tomographic image, without causing it any damage. Among the non-destructive techniques, that have applicability in the internal evaluation of urban trees, the technique of stress waves can be highlighted. Considering the great benefits that this technique can provide in the evaluation of urban trees, this research seeks to verify its scientific and technique viability, analyzing its reliability and also establishing some parameters of application. Studies with 12 trees of the *Caesalpinea peltophoroides* species (popularly known as Sibipiruna) have been carried out. The stress waves equipment was applied to sections of 50, 90 and 130 cm from the trees basis, generating tomographic images of these sections. Afterwards, the trees were cut at the level of these sections and, in order to compare these images, some pictures of them were made. The results show that the trees waves technique presents large applicability for internal evaluation of urban trees, achieving significant results. Also some parameters for the application of this technique were established. For instance, it is necessary to determinate the speed reference of waves propagation for the interpretation of tomographic images, as well as it is to determinate the best height of the assays section. The latter consisting on the height of the diameter to the chest height (DAP), where average density of the tree is representative.

Keywords: *urban arborization, deterioration, nondestructive technique, stress waves, tomographic image.*

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1. MODELO PARA COLETA DE INFORMAÇÕES NAS VIAS PÚBLICAS. FONTE: SILVA FILHO ET AL. (2002)	41
QUADRO 4.1. SÍNTESE DAS IMAGENS TOMOGRÁFICAS	120
QUADRO 4.1. SÍNTESE DAS IMAGENS TOMOGRÁFICAS. CONTINUAÇÃO (1)	121
QUADRO 4.1. SÍNTESE DAS IMAGENS TOMOGRÁFICAS. CONTINUAÇÃO (2)	122
QUADRO 4.2. NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA	128
QUADRO 4.3. DIRETRIZES PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ONDAS DE TENSÃO E PRECAUÇÕES	134
QUADRO 4.3. DIRETRIZES PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ONDAS DE TENSÃO E PRECAUÇÕES. CONTINUAÇÃO (1)	135
QUADRO 4.3. DIRETRIZES PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ONDAS DE TENSÃO E PRECAUÇÕES. CONTINUAÇÃO (2)	136

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. ARRANJOS DOS SENSORES. FONTE: DIVOS; SZALAI (2002).....	52
TABELA 3.1. DIREÇÕES CONSIDERADAS PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CADA CORPO-DE-PROVA	73
TABELA 4.1. VELOCIDADES DE PROPAGAÇÃO DE ONDA NOS CORPOS-DE-PROVA – ÁRVORES 01, 02, 03 E 04	75
TABELA 4.2. VELOCIDADES DE PROPAGAÇÃO DE ONDA NOS CORPOS-DE-PROVA – ÁRVORES 05, 06, 07 E 08	76
TABELA 4.3. VELOCIDADES DE PROPAGAÇÃO DE ONDA NOS CORPOS-DE-PROVA – ÁRVORES 09, 10, 11 E 12	77
TABELA 4.4. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA	78
TABELA 4.5. VALORES DO TEOR DE UMIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA – ÁRVORES 01, 02, 03 E 04....	80
TABELA 4.6. VALORES DO TEOR DE UMIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA – ÁRVORES 05, 06, 07 E 08....	81
TABELA 4.7. VALORES DO TEOR DE UMIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA – ÁRVORES 09, 10, 11 E 12....	82
TABELA 4.8. TEOR DE UMIDADE MÍNIMO, MÁXIMO E MÉDIO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	83
TABELA 4.9. VALORES DE DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS-DE-PROVA – ÁRVORES 01, 02, 03 E 04	85
TABELA 4.10. VALORES DE DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS-DE-PROVA – ÁRVORES 05, 06, 07 E 08	86
TABELA 4.11. VALORES DE DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS-DE-PROVA – ÁRVORES 09, 10, 11 E 12	87
TABELA 4.12. DENSIDADE APARENTE MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO.....	88
TABELA 4.13. VALORES DE R ²	128
TABELA 4.14. QUANTIDADE E PORCENTAGEM DE SEÇÃO POR NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA	129
TABELA 4.15. NÚMERO DE SEÇÕES POR NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA SEPARADAS POR PRESENÇA E AUSÊNCIA DE ORIFÍCIO	130
TABELA 4.16. INDICAÇÃO DE SEÇÕES SEM PRESENÇA DE ORIFÍCIOS E COM A PRESENÇA DE ORIFÍCIOS	131
TABELA 4.17. QUANTIDADE DE SEÇÃO SEPARADAS POR ALTURA DE MEDIÇÃO POR NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA.....	132

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. RAIZ SUPERFICIAL E RAIZ PIVOTANTE. FONTE: ELETROPAULO (2004).....	28
FIGURA 2.2. FORMAS DAS COPAS DE ÁRVORES. FONTE: COPEL (2009)	28
FIGURA 2.3. RUA SEM PRESENÇA DE ÁRVORE.....	31
FIGURA 2.4. RACHADURA EM FORMA DE ANEL. FONTE: QUOIRIN (2004)	33
FIGURA 2.5. PRESENÇA DE NÓ EM SEÇÃO DE MADEIRA	34
FIGURA 2.6. PRESENÇA DE ATAQUE DE CUPIM EM SEÇÃO DE MADEIRA.	35
FIGURA 2.7. INCIDENTE COM ÁRVORE.....	37
FIGURA 2.8. (A) ESQUEMA DE UM ENSAIO DE ONDAS DE TENSÃO. FONTE: FOREST PRODUCTS LABORATORY (2000); (B) ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE EQUIPAMENTO DE ONDAS DE TENSÃO. 44	
FIGURA 2.9. VELOCIDADE E ATENUAÇÃO EM FUNÇÃO DA UMIDADE NA MADEIRA. FONTE: BUCUR (1995).	46
FIGURA 2.10. DIREÇÕES DE SIMETRIA NA MADEIRA	48
FIGURA 2.11. EXEMPLO DA MEDIÇÃO EM TRÊS PLANOS DA ÁRVORE VIVA.....	51
FIGURA 2.12. ENSAIO DE PROPAGAÇÃO SONORA NA SEÇÃO DE MADEIRA. FONTE: CANDIAN; SALES (2009)	52
FIGURA 2.13. SEÇÃO DE MADEIRA COM UM FURO DE 6,0 CENTÍMETROS. FONTE: CANDIAN; SALES (2009)	53
FIGURA 2.14. ESQUEMA DA SEÇÃO: ANTES E APÓS A REALIZAÇÃO DO FURO. FONTE: CANDIAN; SALES (2009)	54
FIGURA 2.15. IMAGEM TOMOGRÁFICA – SEÇÃO COM PRESENÇA DE FURO. FONTE: CANDIAN; SALES (2009)	54
FIGURA 3.1. LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE LIMEIRA NO ESTADO DE SÃO PAULO	56
FIGURA 3.2. ÁRVORE DA ESPÉCIE ESCOLHIDA PARA A EXPERIMENTAÇÃO.....	57
FIGURA 3.3. EQUIPAMENTO DE ONDA DE TENSÃO FAKOPP 2D.....	59
FIGURA 3.4. (A) SENSORES POSICIONADOS NO PERÍMETRO DA SEÇÃO; (B) ESQUEMA DE POSICIONAMENTO DOS SENSORES NA SEÇÃO.....	59
FIGURA 3.5. APLICAÇÃO DE IMPULSOS NOS SENSORES PARA EMISSÃO DAS ONDAS	60
FIGURA 3.6. ENSAIO REALIZADO EM TRÊS SEÇÕES DISTINTAS DA ÁRVORE	60
FIGURA 3.7. POSIÇÕES DE MEDIÇÃO NA ÁRVORE	61
FIGURA 3.8. TELA INICIAL DO SOFTWARE FAKOPP 2D.....	62

FIGURA 3.9. TELA INICIAL DO SOFTWARE FAKOPP MULTILAYER 3D	62
FIGURA 3.10. RETIRADA DA ÁRVORE	63
FIGURA 3.11. CORTE DA ÁRVORE NAS SEÇÕES ENSAIADAS	64
FIGURA 3.12. SEÇÕES APÓS O CORTE	64
FIGURA 3.13. IMAGEM FOTOGRÁFICA OBTIDA DE UMA SEÇÃO DE REALIZAÇÃO DE ENSAIO	65
FIGURA 3.14. ESQUEMA DE RETIRADA DOS CORPOS-DE-PROVA DIAMETRAIS	66
FIGURA 3.15. ESQUEMA DE DEMARCAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DIAMETRAIS	67
FIGURA 3.16. DEMARCAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	67
FIGURA 3.17. EXEMPLO DE DEMARCAÇÃO DE SEÇÃO COM PRESENÇA DE ORIFÍCIO	68
FIGURA 3.18. RETIRADA DOS CORPOS-DE-PROVA DEMARCADOS COM UTILIZAÇÃO DE SERRA DE DISCO	68
FIGURA 3.19. CORPO-DE-PROVA ETIQUETADO E SACOS PLÁSTICOS CONTENDO CORPOS-DE-PROVA SEPARADOS POR ÁRVORE E POR SEÇÃO	69
FIGURA 3.20. LABORATÓRIO DE MATERIAIS E COMPONENTES – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS	69
FIGURA 3.21. PESAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA	70
FIGURA 3.22. ESTUFA EMPREGADA PARA A SECAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA	71
FIGURA 3.23. LINHAS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA PELO EQUIPAMENTO FAKOPP	72
FIGURA 4.1. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 01	90
FIGURA 4.2. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 01	90
FIGURA 4.3. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 01	91
FIGURA 4.4. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 01	92
FIGURA 4.5. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 02	93
FIGURA 4.6. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 02	93
FIGURA 4.7. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 02	93
FIGURA 4.8. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 02	94
FIGURA 4.9. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 03	95
FIGURA 4.10. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 03	95
FIGURA 4.11. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 03	96
FIGURA 4.12. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 03	96
FIGURA 4.13. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 04	97
FIGURA 4.14. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 04	98
FIGURA 4.15. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 04	98
FIGURA 4.16. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 04	99
FIGURA 4.17. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 05	100
FIGURA 4.18. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 05	100
FIGURA 4.19. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 05	100
FIGURA 4.20. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 05	101
FIGURA 4.21. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 06	102

FIGURA 4.22. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 06.....	103
FIGURA 4.23. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 06.....	103
FIGURA 4.24. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 06.....	104
FIGURA 4.25. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 07.....	105
FIGURA 4.26. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 07.....	105
FIGURA 4.27. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 07.....	105
FIGURA 4.28. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 07.....	106
FIGURA 4.29. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 08.....	107
FIGURA 4.30. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 08.....	107
FIGURA 4.31. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 08.....	108
FIGURA 4.32. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 08.....	109
FIGURA 4.33. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 09.....	110
FIGURA 4.34. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 09.....	110
FIGURA 4.35. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 09.....	111
FIGURA 4.36. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 09.....	111
FIGURA 4.37. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 10.....	112
FIGURA 4.38. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 10.....	113
FIGURA 4.39. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 10.....	113
FIGURA 4.40. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 10.....	114
FIGURA 4.41. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 11.....	115
FIGURA 4.42. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 11.....	115
FIGURA 4.43. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 11.....	115
FIGURA 4.44. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 11.....	116
FIGURA 4.45. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO A – ÁRVORE 12.....	117
FIGURA 4.46. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO B – ÁRVORE 12.....	117
FIGURA 4.47. IMAGEM TOMOGRÁFICA E IMAGEM FOTOGRÁFICA DA SEÇÃO C – ÁRVORE 12.....	118
FIGURA 4.48. IMAGEM TOMOGRÁFICA EM 3D – ÁRVORE 12.....	119
FIGURA 4.49. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 01 – SEÇÃO C.....	124
FIGURA 4.50. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 02 – SEÇÃO C.....	124
FIGURA 4.51. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 03 – SEÇÃO C.....	124
FIGURA 4.52. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 04 – SEÇÃO C.....	125
FIGURA 4.53. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 05 – SEÇÃO C.....	125

FIGURA 4.54. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 06 – SEÇÃO C	125
FIGURA 4.55. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 07 – SEÇÃO C	126
FIGURA 4.56. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 08 – SEÇÃO C	126
FIGURA 4.57. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 09 – SEÇÃO C	126
FIGURA 4.58. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 10 – SEÇÃO C	127
FIGURA 4.59. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 11 – SEÇÃO C	127
FIGURA 4.60. PERFIL DE DENSIDADE APARENTE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E O DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VERSUS DENSIDADE APARENTE – ÁRVORE 12 – SEÇÃO C	127
FIGURA 4.61. PORCENTAGEM DE SEÇÃO POR NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA	129
FIGURA 4.62. NÚMERO DE SEÇÕES POR NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA – SEÇÃO A	132
FIGURA 4.63. NÚMERO DE SEÇÕES POR NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA – SEÇÃO B	132
FIGURA 4.64. NÚMERO DE SEÇÕES POR NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA – SEÇÃO C	133
FIGURA 4.65. DIRETRIZES PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ONDAS DE TENSÃO	137

SIGLAS

DAP: DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO

LMC: LABORATÓRIO DE MATERIAIS E COMPONENTES

PSF: PONTO DE SATURAÇÃO DAS FIBRAS

UFSCAR: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

LISTA DE SÍMBOLOS

h : ALTURA

h_{crit} : ALTURA CRÍTICA

C : CONSTANTE DE PROPORCIONALIDADE

D : DIÂMETRO

λ : COMPRIMENTO DE ONDA

f : FREQUÊNCIA

E_d : MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

ρ : DENSIDADE

v : VELOCIDADE DA ONDA LONGITUDINAL

E : MÓDULO DE ELASTICIDADE

f_r : FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA

W : PESO DA VIGA

L : VÃO DA PEÇA

I : MOMENTO DE INÉRCIA D A SEÇÃO TRANSVERSAL

g : ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE

$V_{LL, 12\%}$: VELOCIDADE LONGITUDINAL PARA PEÇAS COM TEOR DE UMIDADE DE 12%

$\rho_{ap, 12\%}$: DENSIDADE APARENTE A 12%

m_i : MASSA INICIAL DA MADEIRA

m_s : MASSA DA MADEIRA SECA

U : TEOR DE UMIDADE

$\rho_{U\%}$: DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA A UM DETERMINADO TEOR DE UMIDADE

$m_{U\%}$: MASSA DA MADEIRA A UM DETERMINADO TEOR DE UMIDADE

$V_{U\%}$: VOLUME DA MADEIRA A UM DETERMINADO TEOR DE UMIDADE

OH : HIDROXILA

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 JUSTIFICATIVAS	22
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 OBJETIVO GERAL	22
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2. REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1 ARBORIZAÇÃO URBANA	25
2.1.1 CONCEITOS E IMPORTÂNCIA	26
2.1.2 DIAGNÓSTICO DE ÁRVORES URBANAS	32
2.2 AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE ÁRVORES URBANAS	39
2.2.1 TÉCNICAS NÃO-DESTRUTIVAS: ANÁLISE VISUAL E ONDAS DE TENSÃO	40
2.2.2 TOMOGRAFIA POR ONDAS DE TENSÃO	49
3. MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1. ESCOLHA DA ESPÉCIE	57
3.2. ENSAIO COM A TÉCNICA DE ONDAS DE TENSÃO	58
3.3. DETERMINAÇÃO DA IMAGEM TOMOGRÁFICA	61
3.4. CORTE DAS ÁRVORES	63
3.5. OBTENÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA PARA OS ENSAIOS DE TEOR DE UMIDADE E DENSIDADE APARENTE	65
3.6. ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA	70
3.7. ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS-DE-PROVA	71
3.8. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA NOS CORPOS-DE-PROVA	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA	74
4.2. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	79

4.3. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE	84
4.4. IMAGENS TOMOGRÁFICAS	89
4.4.1 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 01	89
4.4.2 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 02	92
4.4.3 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 03	94
4.4.4 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 04	97
4.4.5 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 05	99
4.4.6 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 06	102
4.4.7 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 07	104
4.4.8 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 08	106
4.4.9 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 09	109
4.4.10 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 10	112
4.4.11 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 11	114
4.4.12 IMAGENS TOMOGRÁFICAS PARA A ÁRVORE 12	116
4.4.13 SÍNTESE DA ANÁLISE DAS IMAGENS TOMOGRÁFICAS	119
4.5. VERIFICAÇÃO DA ACURACIDADE DA TOMOGRAFIA POR ONDAS DE TENSÃO: CORRELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA E A DENSIDADE APARENTE.....	123
4.5.1 COMPARAÇÃO ENTRE AS ÁRVORES SEM E COM A PRESENÇA DE ORIFÍCIOS.....	130
4.5.2 VERIFICAÇÃO DA MELHOR SEÇÃO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS.....	131
4.6. PROPOSTA DE DIRETRIZES PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ONDAS DE TENSÃO	133
5. CONCLUSÕES	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
APÊNDICE A	150

Introdução

A arborização exerce papel de vital importância para a qualidade de vida nos espaços urbanos. As árvores contribuem para o conforto humano por meio de suas características naturais, proporcionando sombra para pedestres e veículos, melhoria da qualidade do ar, abrigo para pássaros e equilíbrio estético, que amenizam a diferença entre a escala humana e outros componentes arquitetônicos como prédios, muros e grandes avenidas.

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 do elemento, 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 do elemento. 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 grandes 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 Justificativas

As árvores são elementos que estão submetidos constantemente à degradação resultante da ação de agentes físicos, químicos, mecânicos ou biológicos, que podem ocasionar defeitos externos e internos. Devido à dificuldade de avaliação interna de árvores urbanas, em especial, devido ao desconhecimento das técnicas atuais existentes, a avaliação acaba se restringindo apenas às partes externas, o que ocasiona uma avaliação incompleta deste elemento.

Nos últimos anos têm surgidas técnicas com grande potencial de aplicação para avaliação interna de árvores, em especial, as técnicas não-destrutivas, dentre as quais se destaca a técnica de ondas de tensão. Apesar de sua aplicabilidade, nota-se uma carência de estudos voltados ao seu emprego para avaliação qualitativa de árvores urbanas.

Os trabalhos encontrados atualmente se restringem à avaliação quantitativa da madeira, através da análise de propriedades físicas e mecânicas, para aplicabilidade deste material em uso estrutural. É possível ainda encontrar trabalhos voltados ao emprego da técnica no setor madeireiro, como ferramenta a ser empregada no manejo florestal. Apesar da potencialidade de emprego da técnica para avaliação de árvores urbanas, uma vez que permite obter de forma não-destrutiva, imagens internas, não há estudos que mostrem a acuracidade desta técnica na detecção da real situação interna da árvore. Diante da falta de trabalhos voltados à aplicação na arborização urbana e da possibilidade desta técnica contribuir significativamente na avaliação de árvores urbanas, este estudo busca verificar a viabilidade e confiabilidade da técnica de ondas de tensão, para que esta possa ser adequadamente empregada pelos municípios como ferramenta auxiliar na tomada de decisão em relação às árvores urbanas. Busca-se ainda contribuir com o estabelecimento de parâmetros para o emprego desta técnica, de forma a obter melhor confiabilidade nos resultados.

1.2 Objetivos

O presente trabalho apresenta os objetivos descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho consiste em:

- Estudar a viabilidade técnica e científica do uso da tomografia por ondas de tensão para detecção de injúrias internas em árvores urbanas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir parâmetros para estabelecer comparações com as imagens tomográficas;
- Avaliar a acuracidade da técnica de tomografia por ondas de tensão para avaliação de injúrias internas em árvores urbanas;
- Estabelecer diretrizes para aplicação da técnica de tomografia por ondas de tensão em árvores vivas.

Com estes objetivos busca-se contribuir para que a técnica de ondas de tensão possa ser empregada na avaliação de árvores urbanas com a confiabilidade adequada e para que esta possa ser empregada nos municípios como uma ferramenta auxiliar no planejamento da arborização urbana. Esta pesquisa busca ainda contribuir para difundir a técnica no meio técnico, através do estabelecimento de parâmetros, como a velocidade de referência de propagação da onda na espécie em estudo, e na proposição de diretrizes para aplicação da técnica, como o estabelecimento da melhor seção para realização das medições, visando facilitar a aplicação da técnica e a melhorar a confiabilidade dos resultados.

1.3 Organização do trabalho

Esta pesquisa está dividida em três partes principais. A primeira parte consiste em apresentar um contexto geral dos temas relacionados à pesquisa, através da revisão da literatura, cujos assuntos abordados são base para o seu desenvolvimento. Para a elaboração desta etapa foram consultadas bibliografias nacionais e internacionais referentes aos temas abordados.

A segunda parte consiste na apresentação dos trabalhos experimentais, onde são descritas de forma detalhada as etapas para o desenvolvimento da pesquisa e para a obtenção dos resultados.

A terceira etapa consiste na apresentação e discussão dos resultados obtidos com o desenvolvimento da pesquisa, além das principais conclusões obtidas, buscando assim, atender aos objetivos propostos.

O texto desta tese está assim organizado:

No Capítulo 01 – Introdução - é realizada uma breve introdução do assunto a ser abordado na pesquisa, as justificativas, os objetivos a serem alcançados e a organização do trabalho.

No Capítulo 02 – Revisão da Literatura – são abordados os seguintes temas principais: arborização urbana e avaliação não-destrutiva de árvores urbanas, dando ênfase à técnica de ondas de tensão, os quais são temas de grande relevância para o desenvolvimento desta pesquisa.

No Capítulo 03 – Materiais e Métodos – é apresentada a metodologia empregada para a realização de todas as etapas experimentais da pesquisa e os materiais empregados para sua realização.

No Capítulo 04 – Resultados e Discussões: são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios realizados e a análise destes, buscando atender aos objetivos propostos.

No Capítulo 05 – Conclusões - são apresentadas as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento da pesquisa e são propostas sugestões para trabalhos futuros.

Referências Bibliográficas - são apresentadas as bibliografias nacionais e internacionais consultadas para o desenvolvimento da pesquisa.

Revisão da Literatura

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos relacionados à arborização urbana, abordando sua importância nos espaços urbanos e a relevância do diagnóstico preventivo. É realizada ainda, uma abordagem sobre as técnicas de avaliação não-destrutiva aplicáveis à arborização, dando ênfase à técnica de ondas de tensão, a qual consiste em objeto de estudo da presente pesquisa.

2.1 Arborização urbana

A arborização apresenta papel vital para a qualidade de vida nos espaços urbanos, proporcionando grandes benefícios. Mas, apesar de sua importância, muitas vezes acaba não recebendo a atenção necessária. Verifica-se ainda o desconhecimento de seus principais benefícios e da importância da realização de seu planejamento.

A maior parte das árvores urbanas é plantada de forma inadequada, sem qualquer estudo prévio, e muitas vezes não recebem os cuidados essenciais durante sua vida útil, podendo ocasionar sérios problemas. A seguir são apresentados alguns conceitos relacionados à arborização e sua importância, além da discussão a respeito do diagnóstico de árvores urbanas, o qual é fundamental para a tomada de decisão quanto ao manejo da arborização.

2.1.1 Conceitos e importância

A arborização urbana pode ser definida como toda cobertura vegetal de porte arbóreo existente nas cidades. Essa vegetação ocupa, fundamentalmente, três espaços distintos: as áreas livres de uso público e potencialmente coletivas, as áreas livres particulares e as áreas acompanhando o sistema viário (GUZZO et al., 1998).

Devido à infinidade de trabalhos e discussões que têm sido desenvolvidas a respeito do “verde nas cidades”, são eminentes os problemas existentes quanto às terminologias utilizadas em relação às áreas verdes urbanas como: espaço livre, área verde, arborização urbana, sistemas de lazer, praças, parques urbanos e similares (LOBODA; ANGELIS, 2005). Para uma maior compreensão dos termos, Lima et al. (1994) apresentam as seguintes definições:

- **Espaço livre:** Trata-se do conceito mais abrangente, integrando os demais e contrapondo-se ao espaço construído em áreas urbanas;
- **Área verde:** Onde há o predomínio de vegetação arbórea, englobando as praças, os jardins públicos, parques urbanos, entre outros. Os canteiros centrais de avenidas e os trevos e rotatórias de vias públicas que exercem apenas funções estéticas e ecológicas, devem, também, conceituar-se como área verde. Entretanto, as árvores que acompanham o leito das vias públicas não devem ser consideradas como tal, pois as calçadas são impermeabilizadas;
- **Parque urbano:** É uma área verde, com função ecológica, estética e de lazer, no entanto com uma extensão maior que as praças e jardins públicos;
- **Praça:** É um espaço livre público cuja principal função é o lazer. Pode não ser uma área verde, quando não tem vegetação e encontra-se impermeabilizada;
- **Arborização urbana:** Diz respeito aos elementos vegetais de porte arbóreo dentro da cidade.

Segundo Pivetta; Silva Filho (2002), a arborização urbana engloba a arborização de parques e jardins, a arborização de áreas privadas, a arborização nativa residual e a arborização de ruas e avenidas, as quais são definidas a seguir.

- **Arborização de parques e jardins:** os parques, normalmente são representados por grandes áreas abundantemente arborizadas e os jardins, ou mesmo as praças, são espaços destinados ao convívio social;
- **Arborização de áreas privadas:** correspondem à arborização dos jardins particulares como quintais, jardins de hospitais, clubes, indústrias, entre outros;
- **Arborização nativa residual:** são espaços da natureza que se protegeram da ocupação e que por suas características florísticas, faunísticas e hídricas, influenciaram no microclima e são essenciais ao complexo urbano;
- **Arborização de ruas e avenidas:** componente muito importante da arborização urbana, porém, pouco reconhecido, do ponto de vista técnico e administrativo, devendo ser encarado como um dos componentes do plano de desenvolvimento e expansão dos municípios.

Antes de destacar a importância da arborização urbana, é importante apresentar também alguns conceitos básicos relacionados à estrutura de uma árvore urbana, para um maior entendimento deste elemento. Segundo a Eletropaulo (2004), os principais conceitos básicos relacionados às árvores urbanas são:

- **Árvore:** vegetal superior composto de raízes, tronco, ramos, folhas, frutos e sementes;
- **Raiz:** órgão de fixação da árvore ao solo, responsável pela absorção de água e sais minerais. A raiz possui órgãos especializados para sustentação, absorção, armazenamento e condução da seiva, e é responsável pela retirada de água e nutrientes do solo. A água e nutrientes absorvidos compõem a seiva bruta. Essa seiva bruta é transportada, da raiz para as folhas pelo xilema (conjunto de vasos encontrados no caule da planta);
- **Sistema radicular:** Termo utilizado para indicar como se comporta o crescimento do conjunto das raízes de uma árvore. Pela Figura 2.1 é possível visualizar dois tipos de sistema radicular frequentemente encontrados nas ruas: superficial e pivotante.

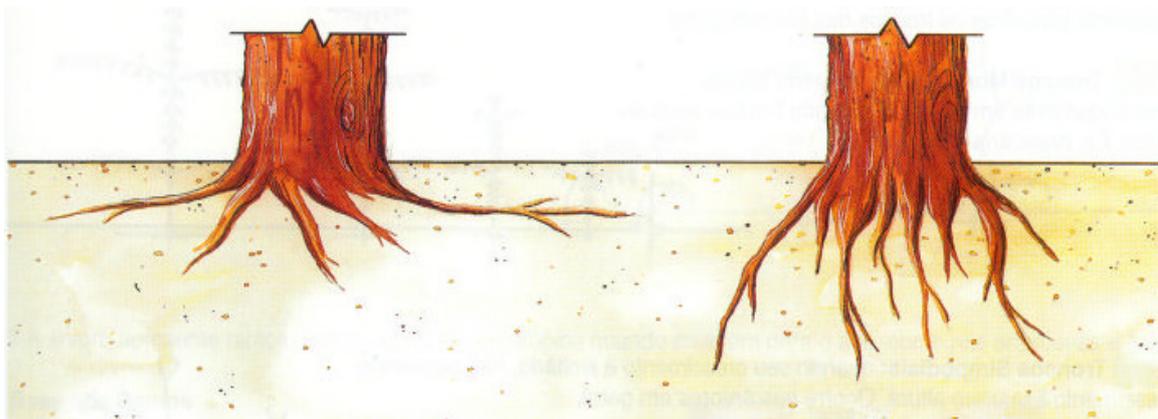


Figura 2.1. Raiz superficial e raiz pivotante. Fonte: Eletropaulo (2004).

- **Tronco:** É o caule robusto, lenhoso, com desenvolvimento maior. Os troncos das árvores variam em tamanho, forma, textura e cor;
- **Copa:** conjunto de ramos superiores de uma árvore. Algumas formas de copas podem ser visualizadas na Figura 2.2;



Figura 2.2. Formas das copas de árvores. Fonte: Copel (2009).

- **Ramo:** subdivisão do tronco;
- **Envassouramento (ramos epicórmicos):** ramos que brotam intensamente após a poda severa ou incorreta de um ramo ou tronco. Este tipo de brotação compromete o desenvolvimento da árvore;

- **Parte aérea da árvore:** combinação das características estruturais da árvore como raízes, troncos, ramos e folhas, que definem a arquitetura da árvore, levando às mais diferentes formas de copa.

A arborização apresenta papel vital para a qualidade de vida nas cidades, proporcionando conforto aos seus habitantes. Por suas múltiplas funções, a árvore urbana atua diretamente sobre o clima, a qualidade do ar, o nível de ruídos e sobre a paisagem, além de constituir refúgio indispensável à fauna remanescente nas cidades (SILVA FILHO et al., 2002).

Segundo Jim (1987), os benefícios estéticos das árvores urbanas são citados como os mais óbvios benefícios trazidos para o meio urbano. Como efeitos estéticos, as árvores proporcionam uma grande variedade de cor, forma, textura e estampa na paisagem urbana; formando vistas e definindo espaços; atenuam a diferença de escala ou proporção entre construções e o homem no meio urbano, promovendo um escalonamento; aliviam a monotonia do pavimento e alvenaria; e tornam lugares mais atraentes (GREY; DENEKE, 1986), (HARRIS, 1992), (PHILLIPS, 1993) e (MILANO; DALCIN, 2000).

Podem-se perceber nas cidades as diferenças entre as regiões arborizadas e aquelas desprovidas de arborização (SILVA, 1998). Os locais arborizados geralmente se apresentam como ambientes mais agradáveis aos sentidos humanos (ROCHA et al., 2004).

A arborização urbana contribui com inúmeros benefícios para o meio urbano. Segundo alguns autores como Grey; Deneke (1978), Llardent (1982), Di Fidio (1990), Lombardo (1985) e Milano; Dalcin (2000), dentre os benefícios, os que se destacam são:

- Redução da poluição por meio de processos de oxigenação - introdução de excesso de oxigênio na atmosfera;
- Purificação do ar por depuração bacteriana e de outros microorganismos;
- Ação purificadora por reciclagem de gases em processos fotossintéticos;
- Ação purificadora por fixação de alguns gases tóxicos;
- Ação purificadora por fixação de poeiras e materiais residuais;
- Luminosidade e temperatura: a vegetação, ao filtrar a radiação solar, suaviza as temperaturas extremas, proporcionando melhoria no conforto térmico;
- Enriquecimento da umidade por meio da transpiração da fitomassa;

- A vegetação contribui para conservar a umidade dos solos, atenuando sua temperatura;
- Redução na velocidade dos ventos;
- Mantém a permeabilidade e a fertilidade do solo;
- Diminui o escoamento superficial de áreas impermeabilizadas;
- Abrigo à fauna existente, propiciando uma variedade maior de espécies, consequentemente influenciando positivamente para um maior equilíbrio das cadeias alimentares e diminuição de pragas e agentes vetores de doenças;
- Influência no balanço hídrico, favorecendo a infiltração da água no solo e provocando evapo-transpiração mais lenta;
- Amortecimento dos ruídos de fundo sonoro contínuo e descontínuo de caráter estridente, ocorrente nas grandes cidades;
- Transmite bem estar psicológico, em calçadas e passeios;
- Quebra da monotonia da paisagem das cidades, causada pelos grandes complexos de edificações;
- Valorização visual e ornamental do espaço urbano;
- Caracterização e sinalização de espaços, constituindo-se em um elemento de interação entre as atividades humanas e o meio ambiente.

Segundo Pinheiro (2009), a importância da arborização urbana está relacionada a três pontos principais: microclima, saúde e aos ecossistemas urbanos. Com o acelerado crescimento demográfico, houve uma mudança significativa dos elementos climáticos, sendo que a arborização urbana auxilia na melhoria da qualidade do ar, contribui com o sombreamento da edificação e adjacências e no controle da ventilação e da umidade.

As árvores possuem considerável potencial de remoção de gases poluentes e partículas da atmosfera, além de contribuir para atenuar o ruído nas cidades e para melhoria da qualidade de vida da população. Pinheiro (2009) destaca também a importância da diversidade de espécies, a qual contribui para o equilíbrio dos ecossistemas urbanos, consistindo em condição básica para a sobrevivência da fauna e do equilíbrio ecológico.

As árvores proporcionam também benefícios econômicos. Segundo Grey; Deneke (1986) dentre os benefícios econômicos indiretos proporcionados pelas árvores pode se citar a redução do consumo de energia em condicionadores de ar, tanto no verão, pela sombra de árvores, como no inverno, no caso de espécies decíduas, pela ausência de sombra.

Segundo Leal (2007) outro benefício indireto é a valorização de áreas e imóveis pela presença de arborização, contribuindo significativamente para o valor de uma propriedade urbana. Segundo Biondi; Althaus (2005) em Curitiba, capital do Estado do Paraná, há uma grande especulação imobiliária, com o aumento dos valores das propriedades próximas a parques, hortos e ruas arborizadas, o que contribui para o incremento também da arrecadação de impostos.

Apesar de sua grande importância, a arborização não tem sido 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 de deterioração, o que pode acabar gerando sérios inconvenientes, como acidentes decorrentes do mal estado das árvores.

É comum verificar também o confronto de árvores inadequadas com equipamentos urbanos, como fiações elétricas, encanamentos, calhas, calçamentos, muros, postes de iluminação, etc. Estes problemas provocam, na grande maioria das vezes, um manejo inadequado e prejudicial às árvores. Frente a esta situação comum nas cidades brasileiras, soma-se o fato da escassez de árvores ao longo das ruas e avenidas, conforme pode ser visualizado na Figura 2.3.



Figura 2.3. Rua sem presença de árvore.

Neste sentido, é fundamental que se considere a necessidade de um manejo constante e adequado voltado especificamente para a arborização de ruas. Este manejo envolve etapas

concomitantes de plantio, condução das mudas, podas e extrações necessárias, sendo assim necessário um planejamento do sistema de arborização urbana.

Segundo Milano; Dalcin (2000) é fundamental que haja planejamento adequado, com definição dos objetivos e das possíveis metas qualitativas e quantitativas, pois se deve ter a clareza de que a inexistência de um plano a seguir e cumprir torna os processos de implantação e manejo da arborização puramente empíricos.

2.1.2 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.

Os vários tipos de defeitos existentes na madeira são de origem natural. Muitos são os defeitos que podem estar presentes, dentre os quais podem se citar as rachaduras e a presença de nós, que associado ou não a outros fatores podem ocasionar riscos de quedas das árvores.

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).

A madeira pode estar submetida também a outros tipos de rachaduras como as em forma de anel (Figura 2.4) ou em forma de arco, por exemplo, as quais são paralelas aos anéis de crescimento e podem ser causadas pela ação de esforços externos, por tensões de crescimento ou pela presença de lenho de compressão (TSOUMIS, 1991).

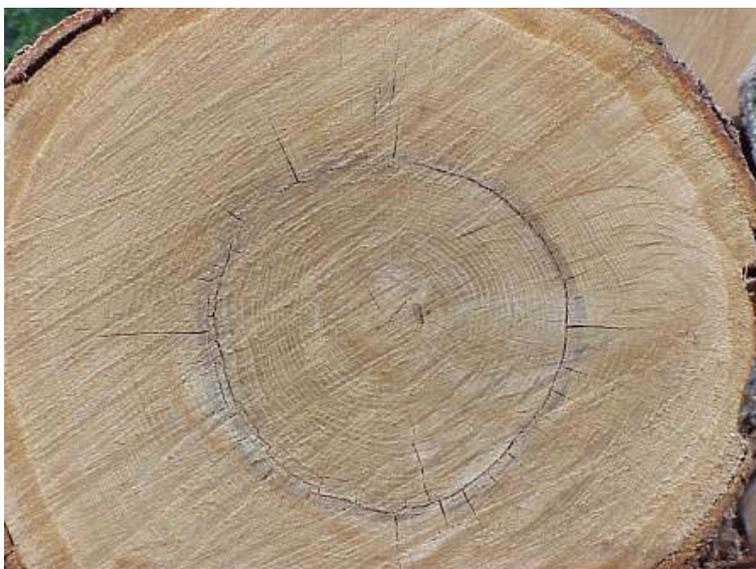


Figura 2.4. Rachadura em forma de anel. Fonte: Quoirin (2004).

O nó corresponde à base de um galho localizada no tronco ou em outro galho, e apresenta efeito desfavorável devido à distorção das fibras em relação à sua direção normal. Os nós podem ser classificados em nó vivo e nó morto. O nó vivo ocorre quando o galho está vivo e os tecidos lenhosos do tronco envolvem o nó e continuam crescendo, estando os tecidos do nó em continuidade com os demais tecidos do tronco. Quando um galho está morto, os tecidos do tronco crescem em volta sem nenhuma conexão com o nó, apresentando assim descontinuidades nos tecidos (QUOIRIN, 2004). Na Figura 2.5 é possível visualizar uma seção de madeira com a presença de nó.



Figura 2.5. Presença de nó em seção de madeira.

As árvores estão sujeitas também às injúrias, as quais podem dar início ao processo de biodeterioração. Segundo Shigo (1979) 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.

Segundo Aprile et al. (1999), a madeira consiste em um dos materiais biológicos de difícil decomposição, em consequência de sua estrutura anatômica e da presença de grandes quantidades de substâncias recalcitantes, como por exemplo, a lignina. Para que ocorra a decomposição dos materiais biológicos, esta depende de alguns fatores bióticos e abióticos, como por exemplo, as condições climáticas, a composição da comunidade decompositora, entre outros (SWIFT et al., 1979).

Os agentes responsáveis pela degradação da madeira podem ser bióticos ou abióticos, sendo que os bióticos são os mais efetivos no processo de degradação. Dentre os bióticos, encontram-se alguns insetos, bactérias, fungos, entre outros e entre os abióticos, pode-se destacar a radiação solar, ação da chuva e dos ventos.

A madeira, por seus constituintes serem de origem orgânica, está sujeita ao ataque de insetos, os quais a utilizam como alimento ou substrato para sua reprodução e morada. As principais

ordens que atacam a madeira são: *Isotera* (cupins), a *Coleóptera* (coleobrocas) e com menor importância, a *Hymenoptera* (vespas e formigas) (TREVISAN et al., 2008).

Uma habitual fonte de problema para a madeira consiste no seu contato com a água ou umidade ambiente elevada, sendo que o fato de reter a umidade, por si só, não degrada a madeira, mas potencializa o risco da degradação deste material por determinados agentes biológicos (CRUZ, 2001). Quando a madeira se encontra em condições de elevada umidade em períodos longos, esta pode ser atacada por fungos ou insetos que dela se alimentam.

Segundo alguns autores, como Richardson (1993), os cupins, são dentre os insetos xilófagos, os mais severos destruidores da madeira, sendo responsáveis por grandes prejuízos à arborização urbana. Como exemplo de cupins xilófagos que causam sérios problemas em árvores urbanas no Brasil, pode-se citar o grupo dos “cupins subterrâneos” e da espécie *Coptotermes gestroi* (antigo *C. havilandi*) (RICHARDSON, 1993). Os cupins vivem em colônias e possuem funções bastante definidas, podendo estas colônias se localizarem em árvores, no solo ou em espaços no interior das edificações. A Figura 2.6 mostra uma seção de madeira retirada de uma árvore infestada por cupim.



Figura 2.6. Presença de ataque de cupim em seção de madeira.

As brocas, de acordo com Oliveira et al. (1986), tem seus hábitos relacionados com o teor de umidade da madeira, sendo que conforme o teor de umidade existe uma determinada família

propensa a atacar a madeira, as quais são responsáveis por sérios problemas em árvores urbanas.

Os fungos têm atuação intensa na degradação da madeira, segundo Sgai (2000). Os fungos podem causar alterações nas propriedades mecânicas, comprometendo todo o exemplar arbóreo (AMARAL et al., 2002), (SHIGO, 1983) e (YUONG, 1984). Os fungos se alimentam diretamente da parede celular da madeira, causando sua destruição, sendo a podridão identificada principalmente pelas alterações típicas de coloração e de aspecto.

Os fungos de podridão desenvolvem-se em madeira com teor de umidade superior a 20%, estando o limite máximo tolerado de teor em água relacionado às necessidades de oxigênio livre de cada um dos fungos em causa (CRUZ, 2001).

Os fungos de podridão branca atacam principalmente as folhosas, sendo que os lenhos atacados por estes microorganismos tornam-se mais macios, esponjosos e mais claros que os sadios. Os fungos de podridão parda são encontrados atacando principalmente as coníferas, fazendo com que o lenho se torne friável, quebradiço e mais escuro que o sadio (CRUZ, 2001).

Muitos são os problemas causados nas árvores urbanas devido aos agentes responsáveis pela degradação da madeira, mas estes não são os únicos responsáveis por agravar os riscos de queda. Além da consideração destes agentes, é importante a consideração dos esforços solicitantes que as árvores possam estar submetidas, pois esta análise contribui juntamente com a análise dos aspectos de deterioração, para a tomada de decisão com maior confiabilidade, em relação à necessidade de manejo de uma árvore. Mesmo sem a existência de defeitos ou injúrias internas, uma árvore de espécie inadequada para ambientes urbanos que possa ser submetida a ventos fortes, por exemplo, pode vir ao colapso em função do sistema radicular ou outros aspectos relacionados com o grau de esbeltez, forma do tronco e formato da copa.

Na Figura 2.7, para exemplificar, é possível visualizar uma árvore com idade superior a quinze anos, que não apresentava rachaduras e sinais internos e externos de deterioração, que rachou, tombando em uma rua no município de São Paulo, causando sérios transtornos, como destruição de carros e rompimento de fios de energia elétrica.



Figura 2.7. Incidente com árvore ¹.

As árvores estão submetidas às forças produzidas pela gravidade e vento (WALLER, 1986). Dessa forma, plantas adultas para atingirem uma determinada altura requerem um diâmetro mínimo para não tombarem devido às suas próprias massas e à ação do vento.

O grau de esbeltez, também conhecido como a relação entre a altura total da árvore e o diâmetro à altura do peito (h/DAP), é considerada também uma variável importante na caracterização da estabilidade das árvores. Quanto mais alto o grau de esbeltez, tanto mais instável é a árvore sob a ação do vento (DURLO e DENARDI, 1998).

Estudos realizados por Silveira et al. (1986), mostram que a forma do tronco é um dos fatores que influencia na determinação da resistência ao vento. As árvores estudadas por Silveira et al. (1986) foram classificadas em classes de forma, considerando o nível de tortuosidade, com os níveis variando de 1 a 6, sendo a árvore pertencente a classe “6” a mais perfeita. Foi analisado o número de árvores danificadas (onde ocorreu quebra do tronco e tombamento da árvore) para cada classe de forma, sendo que houve uma maior frequência de árvores danificadas pelo vento nas classes de piores formas do tronco.

Outro fator que interfere no grau de susceptibilidade das árvores ao vento, é a arquitetura do sistema radicular, (COUTTS, 1983). A forma, a profundidade e a distribuição das raízes dependem do ambiente e do potencial genético de cada espécie.

Segundo Fraser (1962), as condições físicas do solo desempenham um importante papel no desenvolvimento do sistema radicular das árvores. Um pequeno acréscimo na profundidade

¹ Foto obtida em 28/09/2006 no site: <http://noticias.terra.cm.br/brasil/interna/O,,OI1100293-EI306,00.html>.

das raízes pode proporcionar uma maior estabilidade à árvore, aumentando, assim, a sua resistência ao vento.

Uma árvore pode tombar também devido ao seu peso próprio. Niklas (1994) apresenta uma equação que fornece a altura crítica (h_{crit}) a qual um tronco vertical poderia se elevar até atingir o tombamento elástico devido ao seu peso próprio. A equação é apresentada a seguir.

$$h_{crit} = C. (E/\rho)^{1/3} D^{2/3} \quad (2.1)$$

Onde:

C é a constante de proporcionalidade;

E é o módulo de elasticidade de Young;

ρ é a densidade da madeira;

D é o diâmetro.

Milano (1988), a partir de estudos realizados com um grande número de árvores urbanas, na cidade de Maringá-PR, concluiu que uma poda inadequada assumiu o primeiro lugar (28,8%) como causa de danos físicos em árvores urbanas. Uma poda inadequada pode comprometer a estabilidade de uma árvore, o que denota a importância do cuidado na realização de podas em árvores urbanas, uma vez que uma árvore com poda inadequada pode vir a tombar sob ação de seu peso próprio e do vento.

Diante dos diversos fatores que as árvores urbanas podem estar submetidas, para garantir sua manutenção é necessário o desenvolvimento de métodos de diagnóstico preventivos. Muitos estudos vêm sendo realizados no desenvolvimento destes métodos, em especial, naqueles que permitem a avaliação da deterioração em árvores urbanas, principalmente a deterioração não visível que não apresenta indicadores externos, que conforme apresentado, se não considerada, pode levar uma árvore ao colapso, causando sérios inconvenientes.

Dentre os métodos atualmente disponíveis, destacam-se os de avaliação não-destrutiva, que permitem a avaliação da árvore sem danificá-la, os quais buscam contribuir significativamente, como instrumento auxiliar na tomada de decisão em relação ao manejo de árvores urbanas. A avaliação não-destrutiva possibilita a visualização do interior da árvore

sem alterar suas características iniciais, além de permitir a avaliação da sua capacidade e suporte, através da obtenção das propriedades mecânicas da árvore.

2.2 Avaliação não-destrutiva de árvores urbanas

É possível a avaliação de árvores urbanas por meio de métodos não-destrutivos, nos quais não se faz necessária a extração de corpos-de-prova, sendo a avaliação realizada no próprio elemento, sem alterar suas características e sem danificá-lo. A avaliação não-destrutiva é definida como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de um elemento de determinado material sem alterar suas capacidades de uso.

Jayne² (1959 apud OLIVEIRA, 2005) estabeleceu a hipótese fundamental para a avaliação não-destrutiva da madeira, propondo que a armazenagem de energia e as propriedades de dissipação da madeira, que podem ser medidas por meio não-destrutivo, seriam controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento estático deste material. Em nível microscópico, as propriedades de armazenamento de energia seriam controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a rigidez. Tais propriedades são observáveis como frequência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade das ondas. Desse modo, as medidas das taxas de deterioração de vibrações livres ou atenuação de ondas podem ser usadas para observar a propriedade de dissipação de energia na madeira.

Em materiais homogêneos e isotrópicos como aço, plásticos e cerâmicas, a avaliação não-destrutiva detecta falhas surgidas no processo de fabricação. Na madeira, essas irregularidades ocorrem naturalmente e a influência dessas sobre as propriedades mecânicas pode ser avaliada por meio de métodos não-destrutivos.

É importante separar a avaliação não-destrutiva em dois tipos de avaliação: qualitativa e quantitativa. Na avaliação qualitativa é realizada a detecção de defeitos e a identificação de espécies e a avaliação quantitativa visa fornecer valores para propriedades e dimensões dos defeitos da madeira.

² JAYNE, B. A. Vibrational properties of wood as indices of quality. **Forest Products Journal**. v. 9, n. 11, p. 413-416, 1959.

Um dos métodos não-destrutivos que é amplamente empregado para avaliação não-destrutiva de árvores urbanas consiste na análise visual externa, na qual é possível verificar em muitas situações a falta de critérios para a tomada de decisão sobre o risco de ruptura da árvore, uma vez que não permite avaliar a árvore internamente, e conseqüentemente, verificar a presença de injúrias, que são grandes responsáveis por colapsos em árvores urbanas.

Pesquisas internacionais com várias técnicas de avaliação não-destrutiva, baseadas em diferentes conceitos, como por exemplo, raios-X, ressonância magnética e ondas de tensão têm sido realizadas para a avaliação de árvores. Estas técnicas fornecem imagens que possibilitam a localização de defeitos e a avaliação das características internas da árvore, apresentando maior confiabilidade em relação à análise visual externa.

2.2.1 Técnicas não-destrutivas: análise visual e ondas de tensão

Muitas são as técnicas atualmente disponíveis para avaliação não-destrutiva de árvores urbanas, dentre as quais se destacam a avaliação visual e a técnica de ondas de tensão.

A técnica mais antiga e mais utilizada atualmente, apesar de sua baixa confiabilidade, uma vez que não permite a avaliação interna do elemento, impossibilitando, desta forma, a detecção de defeitos internos, consiste na análise visual. Na análise visual as condições são avaliadas a olho nu, apresentando assim um alto grau de subjetividade e esta pode ser considerada válida apenas se realizada por peritos extremamente cautelosos e treinados.

A análise visual pode ser considerada a técnica mais simples para avaliação da madeira, sendo útil para detectar a presença de deterioração na superfície (CARREIRA, 2003). A qualidade da madeira é analisada pela dimensão e distribuição de anomalias que podem ser vistas na superfície do elemento, tendo como desvantagens o fato de considerar apenas os defeitos aparentes. As principais características visuais que podem ser observadas são:

- nós – o efeito desfavorável do nó se deve à distorção das fibras em relação à sua direção normal;
- rachaduras – surgem principalmente da separação das fibras devido à perda de umidade e liberação de tensões internas. Afetam as propriedades de resistência da madeira;

- deterioração – a inspeção visual não possibilita verificar com segurança a extensão desta;
- deformações excessivas;
- ataques de organismos xilófagos.

Segundo Bodig (2000) a avaliação visual muitas vezes é auxiliada pelos chamados métodos *pseudo-não-destrutivos*, os quais podem ser:

- Utilização de instrumento cortante para realizar a remoção das camadas superficiais dos elementos para verificar a extensão dos danos;
- Emprego de resistógrafos para localizar as seções que apresentam danos internos e avaliar sua profundidade;
- Percutir o elemento com algum objeto rígido e pesado para observar o som produzido, onde a existência de um som retumbante pode significar a presença de cavidades internas.

Os inventários arbóreos, que permitem identificar os elementos do sistema de arborização urbana, verificar a situação atual em que este se encontra e avaliar os principais problemas existentes, são compostos normalmente de informações coletadas apenas através de análise visual.

Silva Filho et al. (2002) definiram algumas informações essenciais a serem coletadas através de análise visual nas vias públicas em relação à biologia das árvores, as quais fazem parte do inventário urbano, apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1. Modelo para coleta de informações nas vias públicas. Fonte: Silva Filho et al. (2002).

III - Biologia								
Estado geral	Equilíbrio geral	Fitossanidade		Intensidade	Local/ataque	Injúrias	Ecologia	Fenologia
Otimo <input type="checkbox"/>	Sim <input type="checkbox"/>	Pulgão <input type="checkbox"/>	Broca <input type="checkbox"/>	Inseto <input type="checkbox"/>	Leve <input type="checkbox"/>	Caule <input type="checkbox"/>	Insetos <input type="checkbox"/>	Folha <input type="checkbox"/>
Bom <input type="checkbox"/>	Não <input type="checkbox"/>	Cupim <input type="checkbox"/>	Bactéria <input type="checkbox"/>	Médio <input type="checkbox"/>	Raiz <input type="checkbox"/>	Lesão grave <input type="checkbox"/>	Ninhos <input type="checkbox"/>	Flor <input type="checkbox"/>
Regular <input type="checkbox"/>		Formiga <input type="checkbox"/>	Vírus <input type="checkbox"/>	Pesado <input type="checkbox"/>	Frutos <input type="checkbox"/>	Lesão média <input type="checkbox"/>	Líquens <input type="checkbox"/>	Fruto <input type="checkbox"/>
Péssimo <input type="checkbox"/>	Caule <input type="checkbox"/>	Lagarta <input type="checkbox"/>	Fungo <input type="checkbox"/>	Ausente <input type="checkbox"/>	Flores <input type="checkbox"/>	Lesão leve <input type="checkbox"/>	Epífitas <input type="checkbox"/>	
Morta <input type="checkbox"/>	Copa <input type="checkbox"/>	Cochonilha <input type="checkbox"/>	Ácaro <input type="checkbox"/>		Ramos <input type="checkbox"/>	Lesão ausente <input type="checkbox"/>	Parasitas <input type="checkbox"/>	
		Vaquinha <input type="checkbox"/>			Folhas <input type="checkbox"/>	Vandalismo <input type="checkbox"/>		

Segundo o modelo de Silva Filho et al. (2002), são avaliados alguns itens relativos à avaliação do espécime vegetal e suas condições como: presença de folhas, flores e frutos, o estado geral, equilíbrio geral, presença, localização e intensidade de ataques de insetos e injúrias externas.

Estas informações são importantes, mas não são suficientes para a obtenção de um diagnóstico confiável em relação à sanidade da árvore, a qual mesmo apresentando boa aparência externa pode apresentar problemas internos que podem comprometer seu equilíbrio.

Devido à análise visual sozinha não possibilitar uma avaliação completa da árvore, novos métodos não-destrutivos estão sendo desenvolvidos para a avaliação interna do elemento, os quais juntamente com a avaliação visual e com a determinação de esforços solicitantes que as árvores estão submetidas, possibilitam uma avaliação com a confiabilidade necessária para a tomada de decisão. Desta forma, é importante o emprego de métodos não-destrutivos para avaliação interna de árvores urbanas, contemplando assim seu resultado no inventário arbóreo.

Diversos métodos que utilizam a propagação das ondas de tensão têm sido pesquisados para uso como ferramentas de testes não-destrutivos, sendo estes os mais empregados e estudados na atualidade (ABRAHÃO, 2005). A velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material são os principais parâmetros analisados nesses casos. É importante ressaltar que a velocidade de propagação da onda de tensão no material consiste em uma velocidade de propagação média e não na velocidade de propagação do pulso.

A propagação de ondas de tensão apresenta como principal vantagem a possibilidade do estudo do interior de árvores vivas ou peças de madeira, 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 designado para avaliar árvores e estruturas de madeira é capaz de detectar de forma não-destrutiva a presença de furos, deterioração e rachaduras (CANDIAN; SALES, 2009).

De acordo com Kollman; Côté (1968), todo fenômeno de vibrações e ondas, que são geradas com uma frequência entre 16 e 20.000 Hz é chamado de ondas sonoras e estas são perceptíveis ao ouvido humano. Essas ondas se caracterizam pelo comprimento de onda (λ), que correspondem à distância mínima em que um ciclo se repete, amplitude (medido em decibéis), frequência (f), a qual é dada pelo número de ondas inteiras em uma unidade de

tempo e a velocidade de propagação, dada pelo comprimento de onda multiplicado pela frequência.

As ondas de tensão são geradas a partir de um impacto ou através de uma vibração forçada, sendo que o primeiro caso é o mais empregado, devido à maior complexidade dos equipamentos utilizados para a indução da onda e a análise de vibrações forçadas.

No método de ondas de tensão é analisada a velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material. 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 uma barra, 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 barra a uma velocidade constante, e após caminhar por todo o comprimento, esta é refletida pela extremidade livre da barra, retornando-se ao seu ponto original. Apesar de a velocidade continuar sempre constante, o movimento das partículas da barra diminui a cada passagem da onda pela barra, sendo que após um período de tempo as partículas da barra retornam ao repouso. Verifica-se próxima da extremidade excitada uma série de pulsos igualmente espaçados, com amplitude diminuindo ao longo do tempo (CANDIAN; 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; SALES, 2009).

Na Figura 2.8 é apresentado um esquema de um ensaio com a técnica de ondas de tensão.



Figura 2.8. (a) Esquema de um ensaio de ondas de tensão. Fonte: Forest Products Laboratory (2000); (b) Esquema de funcionamento de equipamento de ondas de tensão³.

Os parâmetros obtidos através de ensaios de propagação de ondas de tensão consistem na frequência de ressonância e velocidade de propagação das ondas. A velocidade de propagação da onda fornece informações importantes referentes às propriedades elásticas do material analisado, através da seguinte expressão (ROSS et al., 2000) e (KOLLMANN, 1959):

$$E = \rho \times v^2 \quad (2.2)$$

Onde:

E_d é o módulo de elasticidade dinâmico (10^{-6} MPa);

ρ é a densidade da madeira (kg/m^3);

v é a velocidade da onda longitudinal (m/s).

A frequência de ressonância pode ser empregada para o cálculo do módulo de elasticidade através da seguinte expressão:

$$E = \frac{f_r^2 \cdot W \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad (2.3)$$

Onde:

f_r é a frequência de ressonância (Hz);

W é o peso da viga (N);

L é o vão da peça (m);

³ Foto obtida em 15/10/2010 no site: <http://www.fakopp.com/site/index.php>.

I é o momento de inércia da seção transversal (m^4);
 g é a aceleração da gravidade ($9,8 m/s^2$).

As ondas de tensão precisam de um meio físico para se propagar, sendo classificadas como ondas mecânicas.

Alguns fatores descritos podem influenciar na velocidade de propagação de ondas de tensão, dentre os quais a umidade, a densidade, a direção de propagação e a presença de defeitos.

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 fluída, 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 ponto de saturação das fibras (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 tangencial (KABIR et al., 1997).

De acordo com BUCUR (1995), em um baixo valor de umidade (menor que 18%), quando a água existente na madeira está ligada às moléculas de celulose da parede celular, o pulso é espalhado pelos elementos anatômicos e pelos contornos destes elementos. Nestes contornos, analogamente ao que ocorre nos contornos de grãos de um sólido policristalino, há uma descontinuidade do módulo de elasticidade e, conseqüentemente, da impedância acústica. A pressão que atua nas partículas das moléculas de celulose, resultante da passagem da onda,

reorienta a posição da hidroxila (OH) ou outro radical pertencente àquelas moléculas. Neste caso, o mecanismo de atenuação relacionado às características das paredes celulares constitui, provavelmente, o fator mais importante.

Em teores de umidade mais elevados, mas ainda abaixo do ponto de saturação, o espalhamento nos limites das células pode ser considerado o mais importante mecanismo de perdas. Após o ponto de saturação das fibras, quando a água está presente nas cavidades celulares, a porosidade do material intervém como fator predominante na dispersão (BUCUR, 1995).

A velocidade de propagação diminui drasticamente com o aumento do teor de umidade até o ponto de saturação das fibras, sendo que a partir deste ponto, a variação da velocidade torna-se pequena, conforme apresentado na Figura 2.9. A atenuação é praticamente constante em baixos valores de teor de umidade, mas aumenta a partir de um ponto crítico no qual as paredes das células começam a reter água livre (BUCUR, 1995).

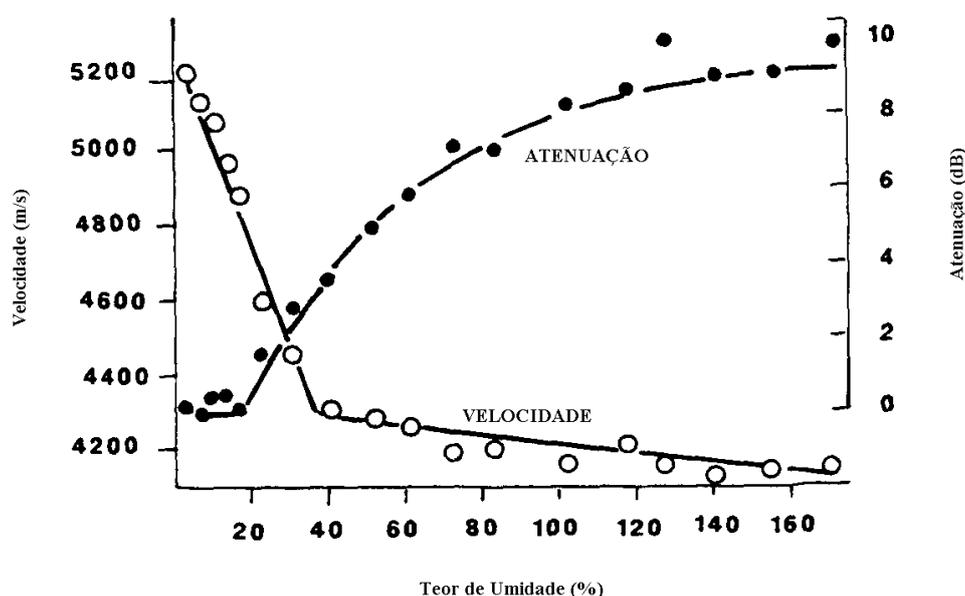


Figura 2.9. Velocidade e atenuação em função da umidade na madeira. Fonte: Bucur (1995).

As pesquisas de laboratório com a técnica de ondas de tensão para estimar as propriedades da madeira saturada têm atingido resultados promissores. Correlações confiáveis têm sido obtidas entre a avaliação não-destrutiva da madeira saturada e seca.

A velocidade de propagação das ondas na madeira nas direções longitudinal e radial tende a aumentar com a diminuição do teor de umidade. A influência da umidade abaixo do ponto de

saturação das fibras é mais significativa do que acima deste ponto, mas as relações numéricas entre essas grandezas variam muito entre as diferentes espécies (JAMES et al., 1982), (SAKAI et al., 1990), (BUCUR; SAREM, 1992), (MISHIRO, 1995), (OLIVITO, 1996), (SIMPSON, 1998), (SIMPSON; WANG, 2001), (KANG; BOOKER, 2002), (WANG et al., 2002) e (OLIVEIRA et al., 2005). As árvores vivas, por se encontrarem normalmente em teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras, não possuem a velocidade da onda afetada significativamente pelo teor de umidade.

A velocidade da onda também é influenciada pela densidade da madeira. A densidade, que para a maioria dos materiais consiste em uma característica relativamente simples e constante definida pelo peso ou massa, por unidade de volume, assume, no caso da madeira, uma característica flutuante, podendo variar não apenas de uma espécie para outra, mas também dentro de uma mesma espécie em função do local da árvore, do nível de altura, da idade da árvore, das características do ano de formação do anel de crescimento e, mesmo dentro deste, da época da sua formação (SILVA; LOUZADA, 2001).

Segundo Zobel; Van Buijtenen (1989), devido a densidade da madeira traduzir a quantidade direta de matéria lenhosa por unidade de volume e pelo fato de estar relacionada com as propriedades do material, esse se constitui em um índice que mais fornece informações sobre as características gerais da madeira. Dentre as propriedades da madeira, a densidade é a mais utilizada, pois esta se correlaciona diretamente com o peso, com as propriedades físico-mecânicas e com a composição celular, podendo ser facilmente determinada (PALERMO et al., 2003).

O efeito da densidade na velocidade de propagação das ondas é dependente da espécie analisada, da estrutura da madeira e da direção da medição. De modo geral, para um teor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade propicia uma maior velocidade de propagação em qualquer das três direções de propagação da madeira. Porém, mais importante que a própria densidade, é a estrutura anatômica, como por exemplo, o comprimento de traqueídes (3 mm) e fibras (1,0 mm a 1,5 mm), o que explica maiores velocidades em algumas coníferas, mesmo com menores valores de densidade (OLIVEIRA, 2005).

De acordo com Carrasco; Azevedo Júnior (2003), não é propriamente o aumento da densidade que acarreta o aumento na velocidade de propagação das ondas em madeiras. Ao contrário, o

aumento da densidade deveria provocar a diminuição da velocidade de propagação, visto que a velocidade é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade (Equação 2.2). Entretanto, considerando-se um valor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade decorre da maior deposição de celulose na face interna da parede celular. Esta deposição acarreta aumento mais significativo nos valores de rigidez do que nos valores da densidade da madeira. Dessa forma, mesmo que haja aumento da densidade, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo aumento da rigidez. Portanto, as maiores velocidades são geralmente alcançadas em espécies de madeira com maior densidade.

Em relação à direção de propagação da onda (Figura 2.10), a velocidade de propagação das ondas é maior na direção longitudinal devido à orientação das células nesse eixo, propiciando um caminho contínuo para as ondas. Uma onda que se propaga na direção radial, cruza camadas de lignina e hemicelulose para chegar à celulose, o que acarreta uma atenuação devido às regiões amorfas e inelásticas destes compostos. As menores velocidades ocorrem na direção tangencial, quando as ondas se propagam através de regiões com maiores quantidades de lignina e hemicelulose, e assim estão sujeitas a grandes atenuações (AZEVEDO JUNIOR, 2003).

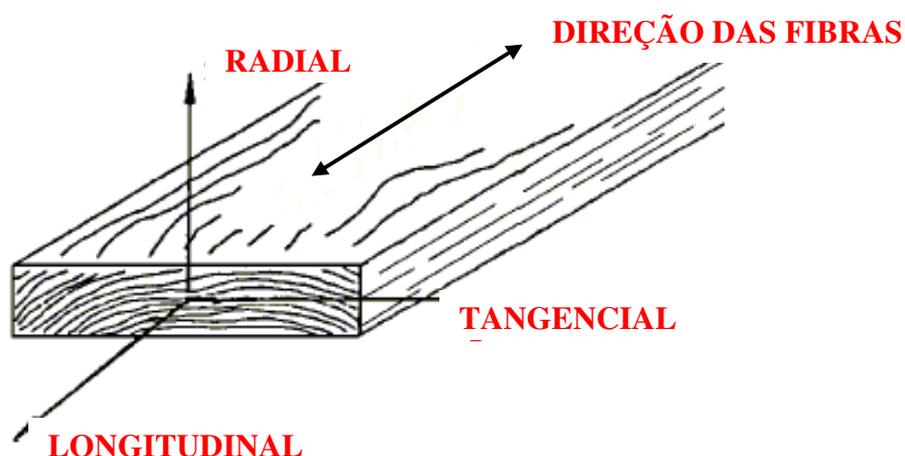


Figura 2.10. Direções de simetria na madeira.

Segundo Cruz (2006), é esperado que a presença de nós afete 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). Assim, a técnica de ondas de tensão se apresenta como importante ferramenta para a detecção de defeitos internos em árvores vivas.

A técnica de ondas de tensão possibilita inferir o módulo de elasticidade através de ensaios feitos nas árvores vivas. Resultados indicam que os ensaios não-destrutivos *in vivo* fornecem resultados confiáveis que permitem a avaliação das propriedades mecânicas das árvores (GABRIEL; BALLARIN, 2000), (ROSS; PELLERIN, 1994), (ROSS et al., 1999), (ROSS et al., 2000), (ERICKSON et al., 2000) e (WANG et al., 2002).

O avanço no uso das técnicas não-destrutivas possibilitou o desenvolvimento de tecnologias para a obtenção de imagem tomográfica da madeira. A tomografia permite a reconstrução de seções transversais inteiras da árvore, por meio de informações fornecidas pela passagem de energia através da madeira.

A imagem não-destrutiva é baseada em diferentes métodos que utilizam ondas elásticas, radiação, luz, campos magnéticos, elétricos e raios-X (EVANS e KIBBLEWHITE, 2000), (TSUCHIKAWA et al., 2000), (HAUFFE e MAHLER, 2000), (RUST, 2000), (EVANS e ILIC, 2001), (BUCUR, 2003), (NICOLOTTI et al., 2003) e (QUOIRIN, 2004). A imagem pode ser reconstruída através do mapeamento de diversos parâmetros e com o uso de procedimentos computacionais para o processamento dos resultados, reconstrução e exibição da imagem. Dentre os tipos de tomografia existentes, destaca-se a tomografia por ondas de tensão, a qual apresenta diversas vantagens como baixo custo de aquisição do equipamento, não apresenta riscos ao operador e o treinamento relativamente simples da mão de obra para utilização do equipamento.

2.2.2 Tomografia por ondas de tensão

A tomografia é um importante método para se obter informações sobre o material de forma não-destrutiva. Os trabalhos pioneiros sobre a reconstrução da imagem da madeira a partir de resultados de velocidade foram reportados por McDonald (1978), Berndt et al. (1999), Comino et al. (2000) e Socco et al. (2002).

As imagens fornecem informações importantes a respeito do material, apresentando através de seu espectro de cores, informações sobre a variação da velocidade da onda no material, permitindo assim a identificação de regiões que podem consistir em injúrias internas do material.

Segundo Kak; Slaney (1988), a tomografia pode ser definida como qualquer técnica que possibilita a visualização da seção transversal de um objeto. Consiste assim em um tipo de ensaio não-destrutivo, que permite a visualização do interior de um elemento sem danificá-lo, ou seja, sem a necessidade de realização de corte.

Podem ser encontrados diversos tipos de tomografia, as quais se diferenciam de acordo com o princípio físico adotado. A tomografia por raio-x, por exemplo, emprega como fundamento a atenuação sofrida por um feixe de raio-x ao atravessar um objeto.

Segundo Quoirin (2004), os tipos mais conhecidos de tomografia consistem em: tomografia de raio-x, tomografia computadorizada de emissão única de fóton, tomografia de emissão de pósitron, tomografia de ultra-som, tomografia de impedância elétrica e tomografia de prótons. Acrescenta-se também a tomografia por ondas de tensão, técnica que vem sendo estudada para avaliação do interior do lenho da madeira (PEREIRA et al., 2007).

O matemático austríaco, Johann Radon (1887-1956) foi quem desenvolveu no começo do século XX a teoria matemática de reconstrução de imagens. Mas os primeiros tomógrafos surgiram apenas na década de 60. O primeiro protótipo de tomógrafo foi desenvolvido pelo neurólogo William H. Oldendorf, utilizando uma fonte radioativa.

Foi apresentado por Rust (2000) um sistema inovador de detecção de defeitos internos de toras de madeira com o emprego de ondas de tensão, o qual permite a obtenção de imagens da seção transversal ao longo da peça em análise, à semelhança das tomografias computadorizadas. Este sistema baseia-se na realização de cruzamento de informações de velocidades de propagação de ondas obtidas em diversos pontos, criando assim imagens bidimensionais da seção. Os sensores são posicionados ao redor da peça e com auxílio de uma fita métrica é possível o conhecimento da distância entre eles.

Rust (2000) apesar de atestar a eficiência do “tomógrafo sônico” na detecção de rachaduras, vazios e podridão pela comparação de seus tomogramas com resultados obtidos com trados e penetrômetros, fez ressalvas sobre a utilização prática de seu invento. Segundo o autor, é importante a realização de um número maior de testes envolvendo diferentes espécies em diferentes estados de sanidade.

Na Figura 2.11 é possível visualizar um exemplo de medição com a técnica de ondas de tensão em três planos de uma árvore e as respectivas imagens tomográficas geradas.

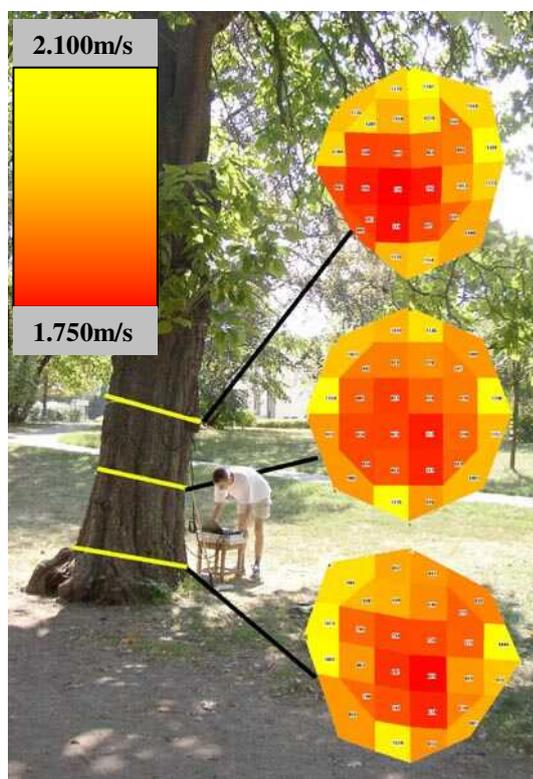


Figura 2.11. Exemplo da medição em três planos da árvore viva⁴.

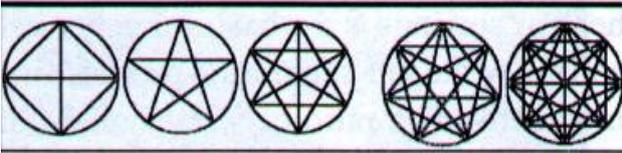
Conforme pode ser visualizado pela Figura 2.11, a imagem tomográfica, a partir de um espectro de cores, permite analisar partes da árvore onde a velocidade de propagação da onda é menor, detectando haver nestas regiões possível problema com a estrutura da árvore, a qual pode ser decorrente de diversos fatores, como problemas decorrentes de ataque de pragas, rachaduras, entre outros.

A velocidade de propagação na direção radial nas árvores varia em função das espécies. Segundo Divos; Szalai (2002) é possível o estabelecimento de velocidades de referência para cada espécie, mas na prática, é mais indicada a determinação desta velocidade no local do teste. No Brasil, a grande diversidade das florestas nativas e o crescimento acelerado das espécies de reflorestamento, vêm corroborar com esta prática. A velocidade de referência corresponde à velocidade de propagação média da onda em árvores sadias de uma determinada espécie.

⁴ Foto obtida no catálogo do equipamento Fakkop Multi-channel Timer, (2006).

Segundo Divos; Szalai (2002), se a velocidade medida for menor que 90% da velocidade de referência, esta árvore pode conter defeitos internos. Se a diferença for maior, pode-se afirmar que a dimensão do defeito também será maior. A sensibilidade da técnica é limitada para um tamanho mínimo do defeito em torno de 20% da área da seção transversal, todavia, pode-se melhorar a acuracidade do método por meio do aumento do número de medições e alterando-se a posição dos sensores, conforme ilustrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Arranjos dos sensores. Fonte: Divos; Szalai (2002).

					
Nº pontos	4	5	6	7	8
% detectável	8%	6%	3%	4%	1%

A seguir é descrito estudo realizado por Candian; Sales (2009), no qual foi realizada análise de uma seção de madeira da espécie *Eucalyptus citriodora*, através da obtenção da imagem tomográfica, pelo emprego do equipamento de ondas de tensão FAKOPP 2D. O equipamento empregado apresenta 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 material. Para a realização do ensaio os 08 sensores foram fixados na seção de madeira com auxílio de um martelo, em 08 pontos demarcados, de forma a englobar todo o contorno da seção conforme apresentado na Figura 2.12.

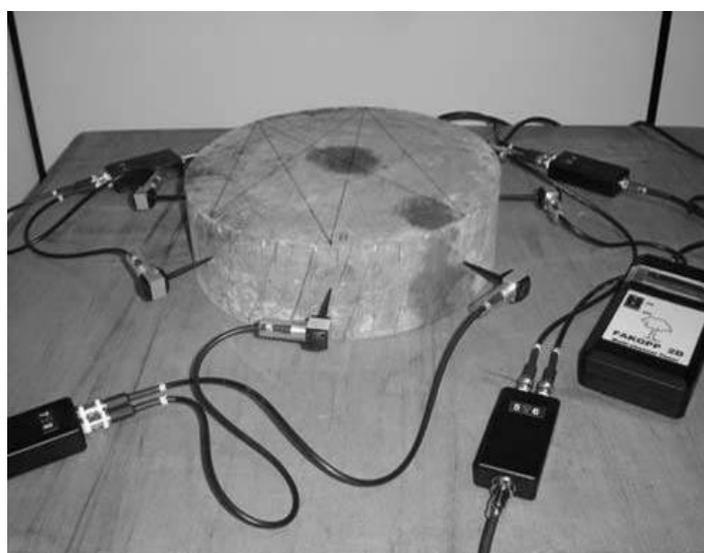


Figura 2.12. Ensaio de propagação sonora na seção de madeira. Fonte: Candian; Sales (2009).

A onda foi emitida no material por meio da aplicação de suaves impulsos (batimento) em cada um dos oito sensores posicionados na seção. O equipamento forneceu os tempos de propagação da onda no material, o qual possibilitou, a partir dos valores de distância entre pontos de medição, a obtenção dos valores de velocidade da onda. Em seguida, foi realizado um furo com seis centímetros de diâmetro (Figura 2.13) na seção de madeira, a fim de se verificar a sensibilidade do equipamento em relação à presença de defeitos na peça. Para esta nova situação foi realizado o mesmo procedimento empregado para a seção sem o furo para a obtenção dos tempos de propagação da onda no material e valores de velocidade de propagação da onda. Os sensores foram mantidos na posição inicial.

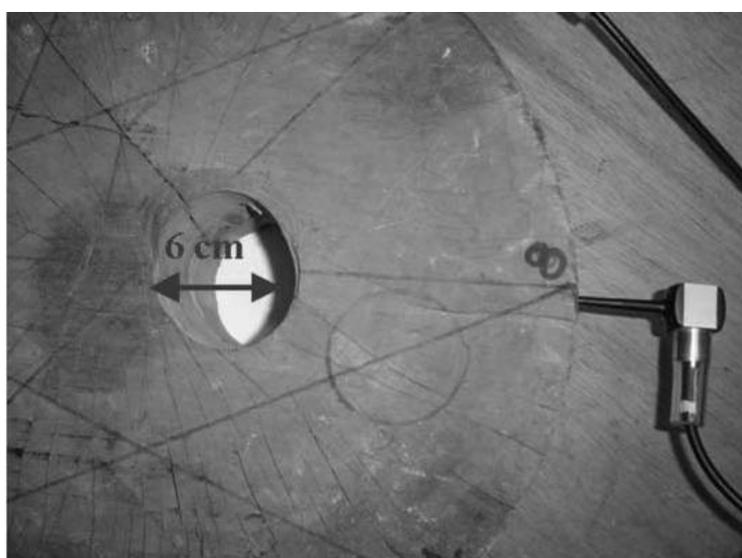


Figura 2.13. Seção de madeira com um furo de 6,0 centímetros. Fonte: Candian; Sales (2009).

Ao comparar os valores de velocidade de propagação antes e após o furo, os autores verificaram que houve uma diminuição da velocidade nas direções entre os sensores que cruzaram o furo. A direção mais afetada foi entre os sensores “4” e “8”, em função da posição do furo. Neste caso a diminuição da velocidade foi de 6,20% (posição “4 – 8”) e de 9,96% (posição “8 – 4”). A redução da velocidade entre os sensores “2” e “7” também foi sensível, com os valores de 6,53% (posição “2 – 7”) e 10,23% (posição “7 – 2”). A onda sonora se propaga mais rapidamente na madeira sadia em relação à madeira deteriorada. A presença de defeitos na linha entre os sensores resultou numa diminuição da velocidade de propagação sonora, se comparada com uma velocidade de referência. Na Figura 2.14 é apresentado o esquema da seção antes e após a realização do furo.

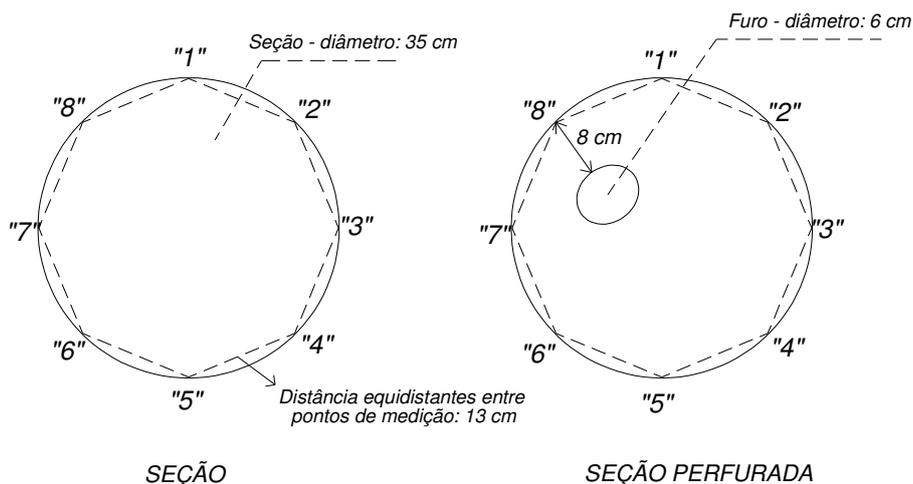


Figura 2.14. Esquema da seção: antes e após a realização do furo. Fonte: Candian; Sales (2009).

A partir dos valores obtidos de velocidades, Candian; Sales (2009) obtiveram a imagem tomográfica para a seção apresentando o furo, a qual foi gerada automaticamente pelo software que acompanha o equipamento de ondas de tensão. A imagem tomográfica (Figura 2.15) foi gerada a partir dos valores gerados entre os oito pontos de transmissão e recepção da onda.

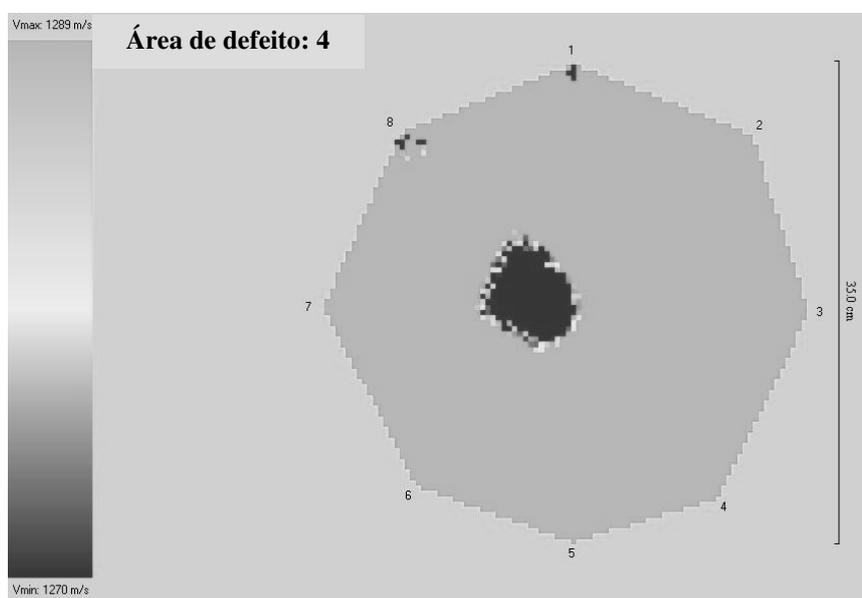


Figura 2.15. Imagem tomográfica – seção com presença de furo. Fonte: Candian; Sales (2009).

Com base nos resultados obtidos, Candian; Sales (2009) chegaram a conclusão que a imagem tomográfica gerada retratou de forma adequada a presença de defeitos na seção de madeira estudada, com indicação de porcentagem de defeitos muito próximo ao valor real,

comprovando ser uma importante ferramenta para avaliação de defeitos internos em peças de madeira.

Conforme apresentado, a técnica de ondas de tensão, a partir da imagem tomográfica, consiste em um instrumento importante de auxílio para a detecção de injúrias internas da madeira, demonstrado principalmente em ensaios em toras retiradas de árvores. Mas nota-se ainda uma carência de trabalhos com aplicação desta técnica em árvores vivas, em especial em árvores urbanas. A maioria das pesquisas atualmente se concentra em análises quantitativas ao invés de qualitativas, através de estudos das propriedades físicas e mecânicas da madeira, com finalidade de estudo deste material para aplicações estruturais. Esta pesquisa busca, desta forma, contribuir para que esta técnica tenha sua aplicabilidade ampliada, através de seu emprego na avaliação interna de árvores urbanas, e que esta possa ser empregada considerando a sua confiabilidade adequada, a qual consiste em objeto de estudo desta pesquisa. Assim, a técnica de ondas de tensão poderá ser considerada como importante ferramenta na tomada de decisão, juntamente com outras análises (visual e estudos dos esforços solicitantes), possibilitando uma avaliação mais completa e confiável das árvores urbanas.

Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os procedimentos empregados para a escolha da espécie, para a realização dos ensaios experimentais com emprego da técnica não-destrutiva de ondas de tensão e realização dos ensaios físicos para determinação do teor de umidade e densidade aparente. A parte experimental foi realizada utilizando árvores pertencentes à área urbana do município de Limeira (Figura 3.1), interior do Estado de São Paulo.



Figura 3.1. Localização do Município de Limeira no Estado de São Paulo⁵.

⁵ Foto obtida em 01/11/2010 no site: <http://omundonaluneta.blogspot.com/2009/01/retratos-de-limeira.html>.

3.1. Escolha da espécie

Nos municípios brasileiros é possível verificar uma grande variedade de espécies empregadas na arborização urbana. A madeira consiste em um material que apresenta variabilidade alta de suas propriedades físicas e mecânicas, diferenciando assim uma espécie de outra. Assim, para uma maior homogeneidade dos dados optou-se pelo emprego de uma única espécie. Para a escolha da espécie a ser analisada foram levados em consideração alguns critérios como:

- Espécie de emprego significativo na arborização urbana do município de Limeira;
- Espécie com maior frequência de cortes e com cortes programados pela Secretaria do Meio Ambiente do município de Limeira;
- Espécie com maior incidência de defeitos ou injúrias internas.

Com base nestes critérios a espécie escolhida foi a *Caesalpineia peltophoroides*, conhecida popularmente como Sibipiruna (Figura 3.2) que consiste em espécie de grande porte nativa do Brasil.



Figura 3.2. Árvore da espécie escolhida para a experimentação.

Após a definição da espécie, foram escolhidas 12 árvores desta espécie para a realização dos ensaios, com idades entre 30 e 40 anos, as quais apresentavam cortes programados pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente do município de Limeira. O número de árvores foi definido considerando uma amostragem com boa representatividade e a disponibilidade de árvores a serem cortadas dentro do período definido pelo cronograma para a realização da parte experimental desta pesquisa. Ressalta-se que os procedimentos administrativos que antecedem o corte de uma árvore urbana no município de Limeira são burocráticos demandando um tempo significativo, o que impossibilitou o estudo com uma quantidade superior de árvores.

As árvores escolhidas estavam distribuídas pelos diversos pontos da área urbana do município de Limeira, sendo que uma parte das árvores apresentava como motivo para a sua retirada a presença de problemas fitossanitários. Foram ensaiadas árvores vivas e árvores mortas. Com as árvores definidas, estas foram submetidas aos ensaios com a técnica de ondas de tensão e posteriormente as amostras retiradas destas submetidas a ensaios de teor de umidade e densidade aparente conforme descritos a seguir.

3.2. Ensaio com a técnica de ondas de tensão

Para a realização dos ensaios de campo com a técnica de ondas de tensão foi empregado o equipamento FAKOPP 2D (Figura 3.3), 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 elemento, a partir da qual é possível a estimativa do módulo de elasticidade do material.



Figura 3.3. Equipamento de onda de tensão FAKOPP 2D.

Para cada árvore em estudo, foram posicionados oito sensores do equipamento ao redor do tronco da árvore (Figura 3.4), buscando abranger todo seu perímetro, e em seguida foram aplicados impulsos (batimentos) com auxílio de um martelo, para a emissão da onda no elemento (Figura 3.5). Ressalta-se a importância de posicionar os sensores perpendicularmente ao eixo vertical da árvore, considerando a tortuosidade da árvore, de forma a não ocorrerem no plano de medição velocidades na direção longitudinal, que apresentam valores superiores as velocidades radiais e tangenciais, podendo assim interferir nos resultados.

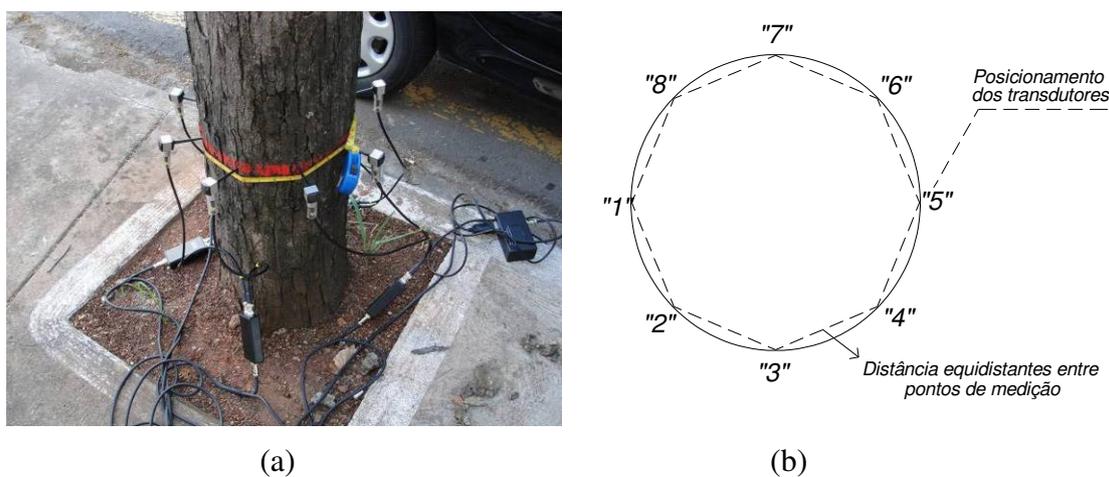


Figura 3.4. (a) Sensores posicionados no perímetro da seção; (b) esquema de posicionamento dos sensores na seção.



Figura 3.5. Aplicação de impulsos nos sensores para emissão das ondas.

O mesmo procedimento foi realizado em outras duas regiões ao longo do tronco do mesmo elemento, totalizando três posições de ensaio na árvore (Figura 3.6), sendo as medições realizadas à 50 cm (Seção A), 90 cm (Seção B) e 130 cm (Seção C) da base do elemento (Figura 3.7), sendo que a última medida corresponde à altura do diâmetro à altura do peito (DAP). As linhas de posicionamento dos sensores foram demarcadas, para posterior corte do elemento nestas regiões.



Figura 3.6. Ensaio realizado em três seções distintas da árvore.

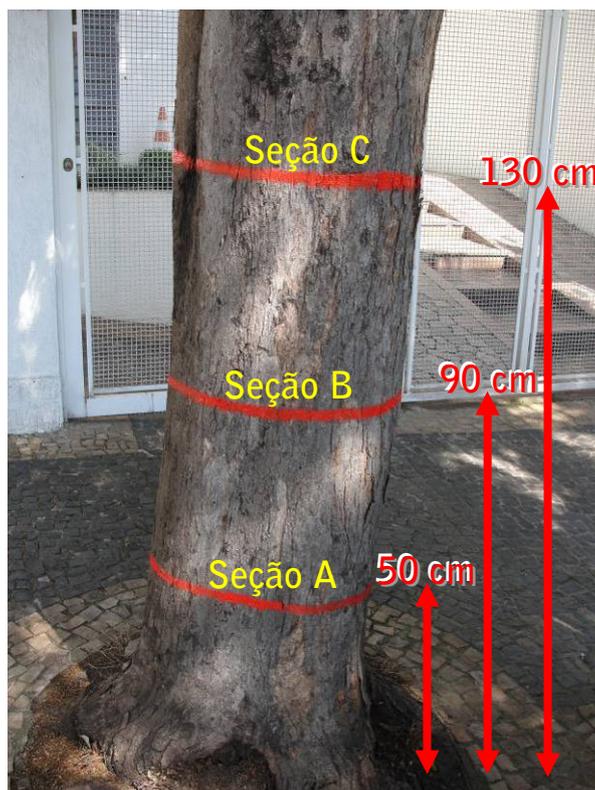


Figura 3.7. Posições de medição na árvore.

Com os tempos de propagação da onda no material, foi possível a determinação das velocidades de propagação da onda ao longo do material, que permitiu a obtenção da imagem tomográfica nas três seções de cada árvore ensaiada.

3.3. Determinação da imagem tomográfica

O equipamento empregado possui um software que o acompanha, denominado de FAKOPP 2D Software (Figura 3.8), 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 no elemento.

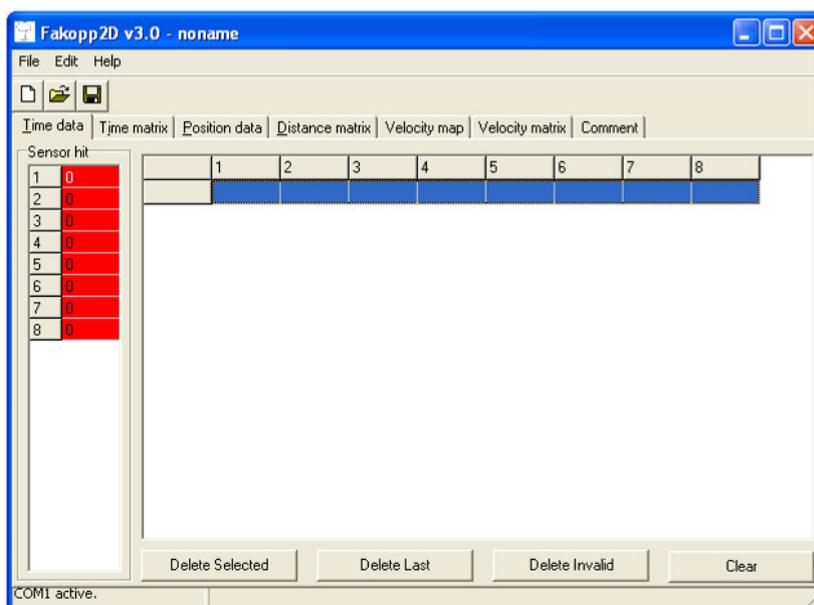


Figura 3.8. Tela inicial do software Fakopp 2D.

Com o arquivo gerado pelo software FAKKOP 2D, foi possível a determinação das imagens tomográficas em 2D e em 3D, empregando o software FAKKOP Multilayer 3D (Figura 3.9), sendo que a imagem 3D, permitiu verificar a projeção dos defeitos ao longo do tronco, nos trechos que englobam as três seções nas quais foram realizadas medições.

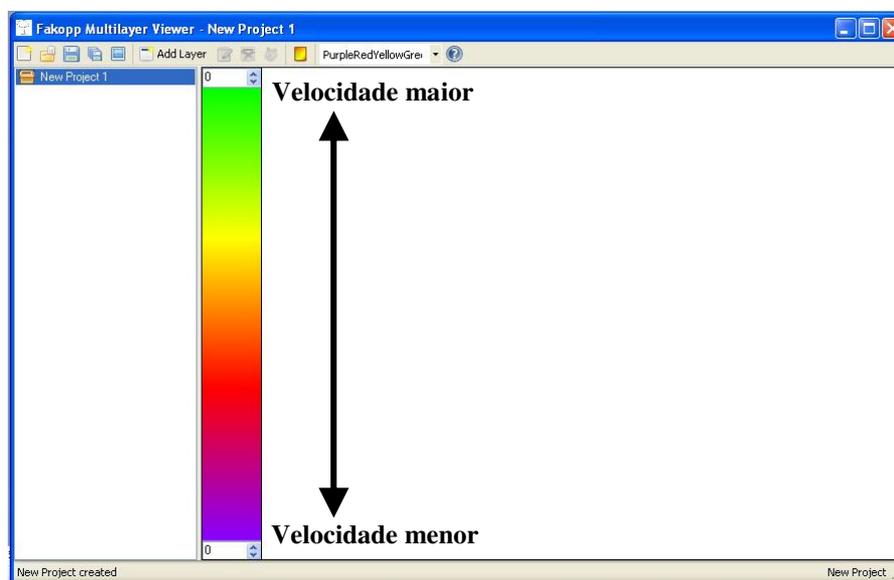


Figura 3.9. Tela inicial do software Fakopp Multilayer 3D.

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 das árvores nas seções ensaiadas para posterior comparação com a imagem tomográfica obtida e para a obtenção dos corpos-de-prova para análise das propriedades físicas (teor de umidade e densidade aparente).

3.4. Corte das árvores

Para a verificação da acuracidade da técnica de ondas de tensão, realizou-se o corte das árvores, os quais foram realizados exatamente nas posições de realização dos ensaios. Para tanto, durante a realização dos ensaios, as seções das árvores foram demarcadas com faixas vermelhas, feitas com emprego de tinta própria para madeira.

As árvores foram retiradas com auxílio de equipamentos adequados para este fim (Figura 3.10) e em seguida cortadas.



Figura 3.10. Retirada da árvore.

O corte foi realizado exatamente na linha de posicionamento dos sensores, sendo utilizada uma serra elétrica para o corte (Figura 3.11). A retirada da árvore e o corte das seções foram realizados pela empresa responsável pela retirada das árvores no município de Limeira, empresa esta terceirizada pela Prefeitura Municipal de Limeira.



Figura 3.11. Corte da árvore nas seções ensaiadas.

Após o corte no plano de realização do ensaio, foram retiradas as seções com cerca de 5 cm de espessura, as quais continham o plano de realização do ensaio (Figura 3.12).



Figura 3.12. Seções após o corte.

Em seguida as seções foram fotografadas no plano de ensaio, para posterior comparação com a imagem tomográfica obtida. A Figura 3.13 mostra uma imagem fotográfica obtida de uma seção de uma árvore submetida à técnica de ondas de tensão.



Figura 3.13. Imagem fotográfica obtida de uma seção de realização de ensaio.

As demais partes da árvore foram recolhidas pela empresa responsável pelo corte das árvores para serem posteriormente descartadas em local apropriado. Todas as seções foram identificadas e armazenadas de forma a garantir suas características iniciais, para posterior obtenção dos corpos-de-prova para determinação do teor de umidade e densidade aparente.

3.5. Obtenção dos corpos-de-prova para os ensaios de teor de umidade e densidade aparente

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 3.14.

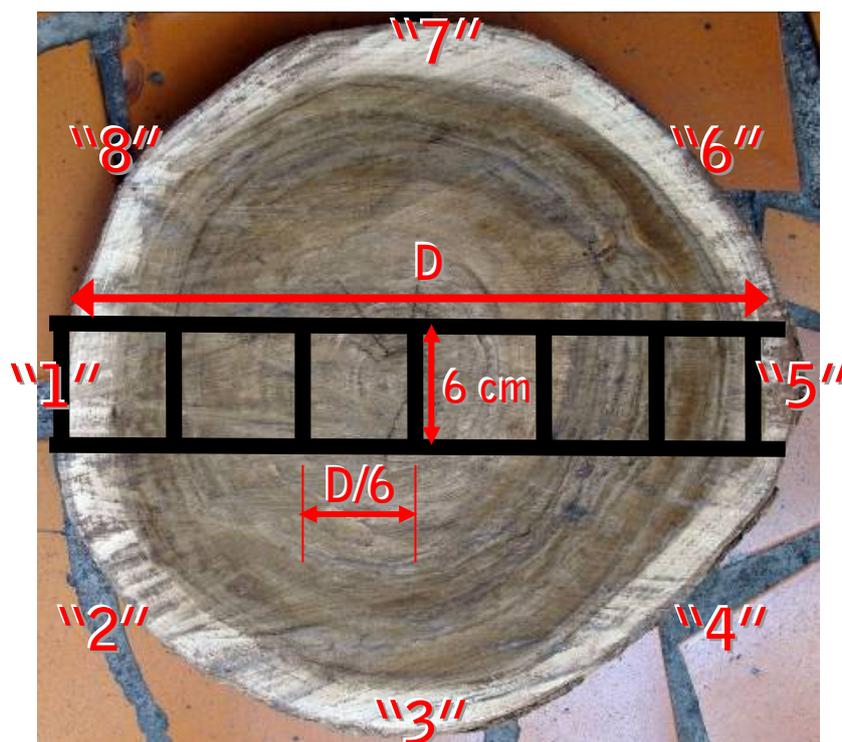


Figura 3.14. Esquema de retirada dos corpos-de-prova diametrais.

De cada seção foram retirados seis corpos-de-prova ao longo do diâmetro no eixo de posicionamento dos sensores "1 – 5", conforme Figura 3.15. Para a demarcação foi utilizado giz de cera, régua e esquadro (Figura 3.16). 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. A denominação de cada corpo-de-prova seguiu o padrão Ax_y_z, onde x corresponde à numeração da árvore (variando de 01 a 12), y refere-se à seção ensaiada (A, B ou C) e z o número do corpo-de-prova ao longo da seção (variando de 01 a 06).

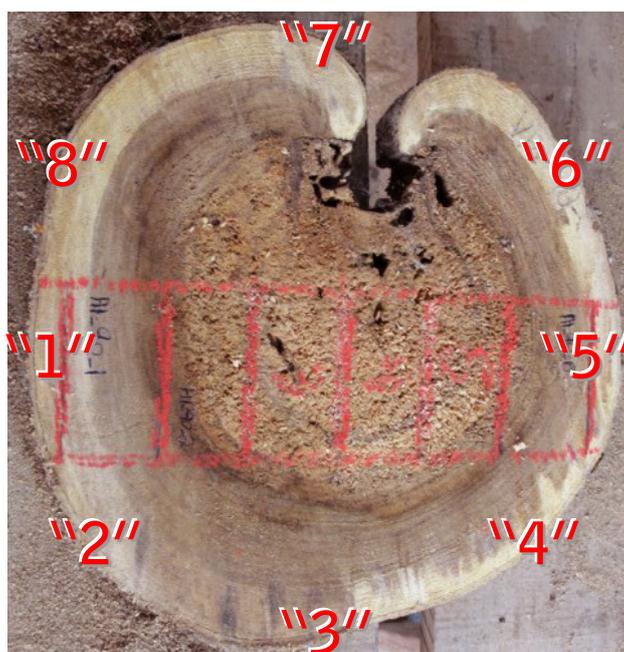


Figura 3.15. Esquema de demarcação dos corpos-de-prova diametrais.



Figura 3.16. Demarcação dos corpos-de-prova.

Algumas seções se encontravam com a presença de orifícios na região central, impedindo assim a retirada de seis corpos-de-prova. Nesta situação, dependendo da dimensão do orifício, este tinha sua área considerada como um ou dois corpos-de-prova, sendo a estes espaços associados os valores zero para as propriedades. Na Figura 3.17, por exemplo, foram demarcados dois corpos-de-prova anteriores ao orifício, o orifício correspondeu ao terceiro corpo-de-prova (com valor zero para as propriedades) e após este foram demarcados mais três corpos-de-prova.

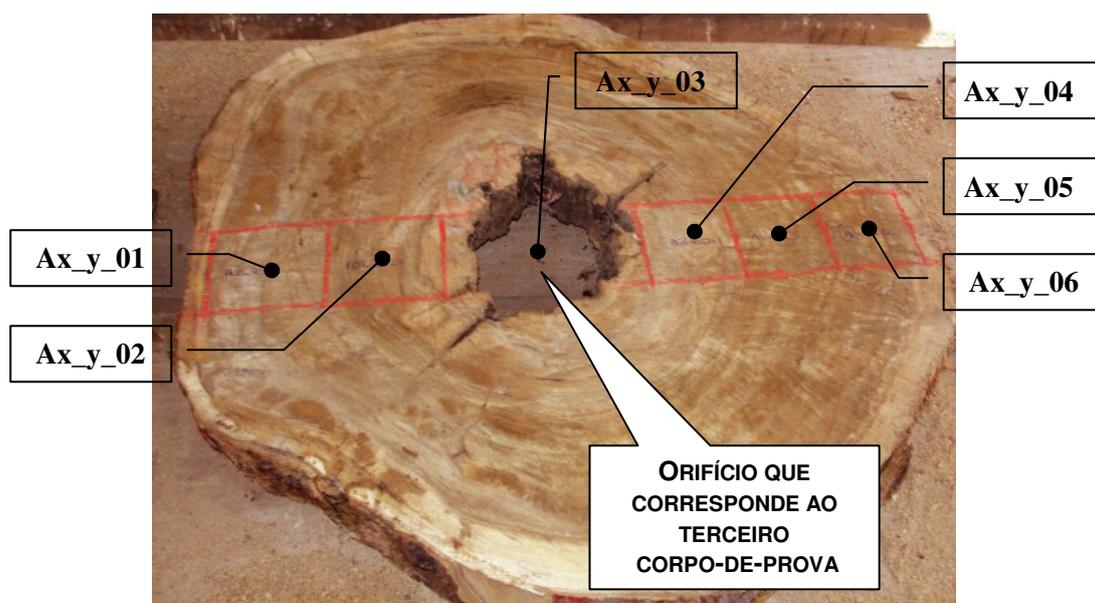


Figura 3.17. Exemplo de demarcação de seção com presença de orifício.

Após a demarcação, os corpos-de-prova foram cortados com auxílio de uma serra de disco conforme apresentado na Figura 3.18.



Figura 3.18. Retirada dos corpos-de-prova demarcados com utilização de serra de disco.

Em seguida os corpos-de-prova foram etiquetados e envolvidos em papel filme, para evitar a perda de água e dispostos em sacos plásticos identificados, sendo que cada saco plástico continha os corpos-de-prova relativos a uma seção de uma determinada árvore (Figura 3.19). Ressalta-se que pode ter ocorrido assim, uma pequena redução dos valores do teor de umidade em relação ao momento de realização do ensaio.



Figura 3.19. Corpo-de-prova etiquetado e sacos plásticos contendo corpos-de-prova separados por árvore e por seção.

Os corpos-de-prova foram levados ao Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) (Figura 3.20) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) para a realização dos ensaios para determinação do teor de umidade e densidade aparente.



Figura 3.20. Laboratório de Materiais e Componentes – Universidade Federal de São Carlos.

3.6. Ensaio para determinação do teor de umidade dos corpos-de-prova

Os procedimentos empregados para a determinação do teor de umidade foram os especificados na NBR 7190/97. O teor de umidade da madeira corresponde à relação entre a massa de água nela contida e a massa de madeira seca, dado por:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

m_i é a massa inicial da madeira (g);

m_s é a massa da madeira seca (g).

As dimensões dos corpos-de-prova foram em função do diâmetro da seção de cada árvore, variando de uma seção para outra e entre as árvores conforme já apresentado na descrição para a retirada dos corpos-de-prova.

Cada corpo-de-prova foi pesado em seu estado inicial com emprego de uma balança digital (Figura 3.21), para a determinação de sua massa inicial.



Figura 3.21. Pesagem dos corpos-de-prova.

Após a pesagem os corpos-de-prova foram submetidos à secagem em uma estufa com temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.22). Os corpos-de-prova permaneceram na estufa por um período total de 24 horas. Após este período determinou-se a massa seca, através de nova pesagem dos corpos-de-prova, a qual que possibilitou a determinação do teor de umidade através da Equação 3.1.



Figura 3.22. Estufa empregada para a secagem dos corpos-de-prova.

3.7. Ensaio para a determinação da densidade aparente dos corpos-de-prova

A densidade aparente corresponde à relação entre a massa e o volume da madeira a um determinado teor de umidade (U), a qual varia de acordo com o valor de U, padronizado internacionalmente em 12%, considerado valor médio de equilíbrio da umidade da madeira com o ar (VITAL, 1984) e (REZENDE; ESCOBEDO; FERRAZ, 1998).

Os corpos-de-prova se encontravam em teor de umidade superior a 12%, teor no qual foram realizadas as medidas de velocidade de propagação da onda. Sendo assim foi determinada a densidade aparente para o teor de umidade inicial dos corpos-de-prova, para posterior comparação com as velocidades de propagação da onda medidas neste teor de umidade. Para tanto, foram determinadas as dimensões dos corpos-de-prova e determinado seu volume. A partir da massa dos corpos-de-prova e volume no teor de umidade inicial, determinou-se a densidade aparente com auxílio da equação a seguir.

$$\rho_{U\%} = \frac{m_{U\%}}{V_{U\%}} \quad (3.2)$$

Onde:

$m_{U\%}$ é a massa da madeira a determinado teor de umidade (g);

$V_{U\%}$ é o volume da madeira a determinado teor de umidade (cm³).

3.8. Determinação da velocidade de propagação da onda nos corpos-de-prova

Após a realização dos ensaios com o equipamento Fakopp, foram fornecidas pelo software as imagens tomográficas e as velocidades de propagação da onda entre os sensores posicionados ao longo da seção. Na Figura 3.23, 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.

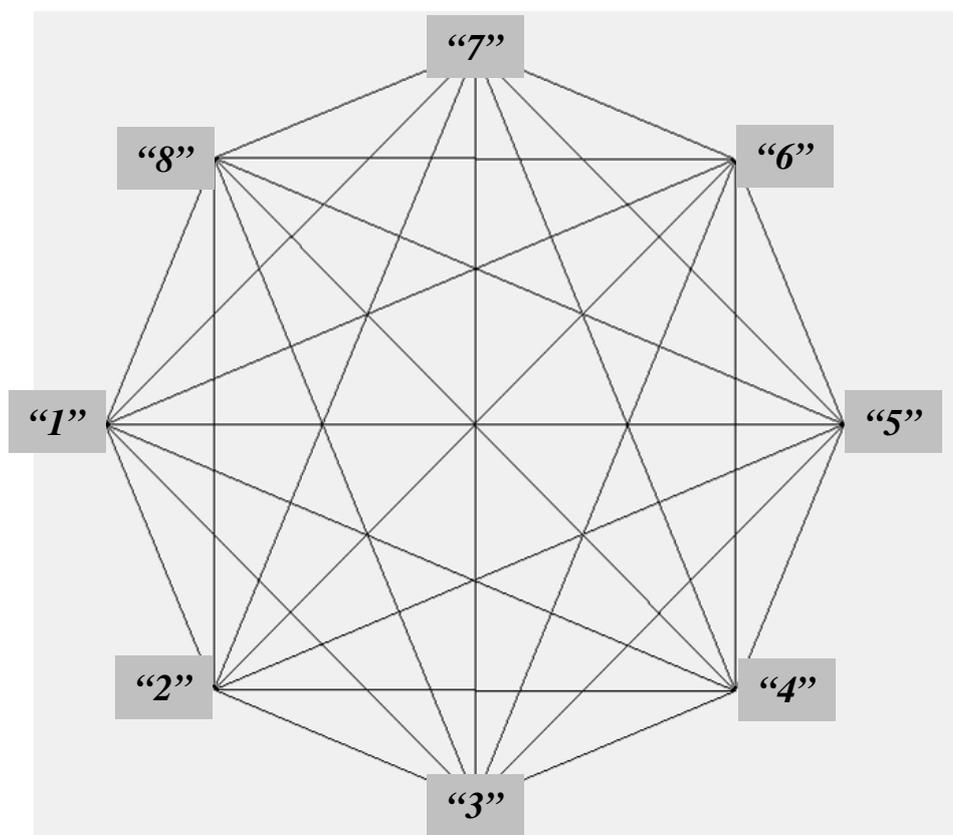


Figura 3.23. Linhas de medição de velocidade de propagação da onda pelo equipamento Fakopp.

Com base na Figura 3.23, 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.

As direções consideradas para cada corpo-de-prova são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Direções consideradas para determinação da velocidade de propagação da onda de cada corpo-de-prova.

Corpo-de-prova	Direção considerada
Ax_y_01	“1-5”
	“2-8”
	“1-3”
	“1-7”
Ax_y_02	“3-8”
	“2-7”
	“1-5”
Ax_y_03	“1-5”
	“2-6”
	“3-7”
	“4-8”
Ax_y_04	“6-2”
	“7-3”
	“1-5”
Ax_y_05	“6-3”
	“7-4”
	“1-5”
Ax_y_06	“6-4”
	“5-4”
	“5-6”
	“7-5”

Com os valores do teor de umidade, densidade aparente e velocidade de propagação da onda para cada corpo-de-prova realizaram-se as análises apresentadas no capítulo a seguir.

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a realização da experimentação com a espécie *Caesalpinea peltophoroides* e as análises realizadas.

4.1. Velocidade de propagação da onda

Nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 são apresentadas as velocidades pontuais de propagação da onda para cada corpo-de-prova ensaiado, obtidas conforme apresentado no item 3.8 do Capítulo 03. Na Tabela 4.4 são apresentadas as velocidades de propagação da onda mínima, máxima e média e o coeficiente de variação para cada uma das seções das árvores ensaiadas. As células em que não constam valores correspondem aos orifícios da seção, onde não foi possível a extração de corpos-de-prova.

Tabela 4.1. Velocidades de propagação de onda nos corpos-de-prova – Árvores 01, 02, 03 e 04.

Árvore	Corpo-de-prova	V (m/s)	Árvore	Corpo-de-prova	V (m/s)
01	A01_A_01	1720	03	A03_A_01	2268
	A01_A_02	1373		A03_A_02	2067
	A01_A_03	1260		A03_A_03	-
	A01_A_04	1299		A03_A_04	2018
	A01_A_05	1503		A03_A_05	2239
	A01_A_06	2061		A03_A_06	2601
	A01_B_01	1942		A03_B_01	2490
	A01_B_02	1468		A03_B_02	2395
	A01_B_03	1195		A03_B_03	-
	A01_B_04	1208		A03_B_04	2109
	A01_B_05	1177		A03_B_05	2203
	A01_B_06	1939		A03_B_06	2509
	A01_C_01	1273		A03_C_01	2570
	A01_C_02	1033		A03_C_02	2497
	A01_C_03	904		A03_C_03	2186
	A01_C_04	887		A03_C_04	-
	A01_C_05	1062		A03_C_05	2439
	A01_C_06	1643		A03_C_06	2654
02	A02_A_01	2301	04	A04_A_01	2121
	A02_A_02	2030		A04_A_02	1802
	A02_A_03	-		A04_A_03	1555
	A02_A_04	-		A04_A_04	1418
	A02_A_05	2007		A04_A_05	1677
	A02_A_06	2345		A04_A_06	2180
	A02_B_01	2399		A04_B_01	2322
	A02_B_02	2221		A04_B_02	2253
	A02_B_03	-		A04_B_03	2120
	A02_B_04	-		A04_B_04	2135
	A02_B_05	2199		A04_B_05	2246
	A02_B_06	2406		A04_B_06	2316
	A02_C_01	2359		A04_C_01	2287
	A02_C_02	2304		A04_C_02	2158
	A02_C_03	-		A04_C_03	-
	A02_C_04	-		A04_C_04	-
	A02_C_05	2282		A04_C_05	2199
	A02_C_06	2417		A04_C_06	2443

Tabela 4.2. Velocidades de propagação de onda nos corpos-de-prova – Árvores 05, 06, 07 e 08.

Árvore	Corpo-de-prova	V (m/s)	Árvore	Corpo-de-prova	V (m/s)
05	A05_A_01	1862	07	A07_A_01	2514
	A05_A_02	2011		A07_A_02	2374
	A05_A_03	1733		A07_A_03	-
	A05_A_04	1700		A07_A_04	2098
	A05_A_05	1837		A07_A_05	1949
	A05_A_06	2275		A07_A_06	2047
	A05_B_01	2441		A07_B_01	2553
	A05_B_02	2309		A07_B_02	2363
	A05_B_03	2198		A07_B_03	2177
	A05_B_04	2196		A07_B_04	-
	A05_B_05	2335		A07_B_05	2239
	A05_B_06	2535		A07_B_06	2219
	A05_C_01	2343		A07_C_01	2712
	A05_C_02	2189		A07_C_02	2469
	A05_C_03	2064		A07_C_03	-
	A05_C_04	2103		A07_C_04	2179
	A05_C_05	2247		A07_C_05	2340
	A05_C_06	2434		A07_C_06	2446
06	A06_A_01	2213	08	A08_A_01	1636
	A06_A_02	1595		A08_A_02	1556
	A06_A_03	-		A08_A_03	1454
	A06_A_04	-		A08_A_04	1456
	A06_A_05	1489		A08_A_05	1441
	A06_A_06	1694		A08_A_06	1697
	A06_B_01	2265		A08_B_01	2154
	A06_B_02	1764		A08_B_02	2000
	A06_B_03	1552		A08_B_03	1868
	A06_B_04	-		A08_B_04	1856
	A06_B_05	1837		A08_B_05	1929
	A06_B_06	2429		A08_B_06	1962
	A06_C_01	2074		A08_C_01	2114
	A06_C_02	1757		A08_C_02	1898
	A06_C_03	-		A08_C_03	1838
	A06_C_04	-		A08_C_04	1800
	A06_C_05	2021		A08_C_05	1815
	A06_C_06	2456		A08_C_06	1861

Tabela 4.3. Velocidades de propagação de onda nos corpos-de-prova – Árvores 09, 10, 11 e 12.

Árvore	Corpo-de-prova	V (m/s)	Árvore	Corpo-de-prova	V (m/s)
09	A09_A_01	2170	11	A11_A_01	2377
	A09_A_02	1997		A11_A_02	2375
	A09_A_03	1832		A11_A_03	2284
	A09_A_04	1768		A11_A_04	2317
	A09_A_05	1824		A11_A_05	2376
	A09_A_06	1749		A11_A_06	2538
	A09_B_01	2256		A11_B_01	2399
	A09_B_02	2101		A11_B_02	2376
	A09_B_03	1992		A11_B_03	2308
	A09_B_04	1983		A11_B_04	2287
	A09_B_05	1977		A11_B_05	2405
	A09_B_06	2393		A11_B_06	2550
	A09_C_01	2156		A11_C_01	2471
	A09_C_02	1974		A11_C_02	2477
	A09_C_03	1760		A11_C_03	2448
	A09_C_04	1759		A11_C_04	2388
	A09_C_05	1815		A11_C_05	2462
	A09_C_06	1929		A11_C_06	2584
10	A10_A_01	2370	12	A12_A_01	2436
	A10_A_02	2347		A12_A_02	2196
	A10_A_03	2297		A12_A_03	2328
	A10_A_04	-		A12_A_04	2442
	A10_A_05	2363		A12_A_05	2440
	A10_A_06	2592		A12_A_06	2471
	A10_B_01	2292		A12_B_01	2341
	A10_B_02	2313		A12_B_02	2306
	A10_B_03	2243		A12_B_03	2305
	A10_B_04	2235		A12_B_04	2369
	A10_B_05	2358		A12_B_05	2329
	A10_B_06	2565		A12_B_06	2380
	A10_C_01	2360		A12_C_01	2397
	A10_C_02	2332		A12_C_02	2311
	A10_C_03	2253		A12_C_03	2254
	A10_C_04	2228		A12_C_04	2278
	A10_C_05	2305		A12_C_05	2293
	A10_C_06	2466		A12_C_06	2356

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 *Caesalpineia 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 entre 2.000 e 2.400 m/s (NOGUEIRA; BALLARIN, 2003).

Tabela 4.4. Velocidade de propagação da onda mínima, máxima e média.

Árvore	Seção	V _{min.} (m/s)	V _{máx.} (m/s)	V _{méd.} (m/s)	CV (%)
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

Nota-se pela Tabela 4.4 que 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.

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, aproximado para 2.130 m/s. Dentre as árvores estudadas, não houve um número significativo de árvores sadias, que permitissem a determinação da velocidade de referência a partir destas, e na impossibilidade de realização de ensaios em apenas árvores sadias, foi considerado um comportamento médio entre as 12 árvores (que inclui árvores sadias e árvores com presença de defeitos ou injúrias internas) para a obtenção da velocidade de referência, o que representa adequadamente as condições encontradas nas árvores, onde mesmo em árvores sadias, devido a sua heterogeneidade e origem natural, podem existir condições (como baixa densidade, presença de pequenos defeitos, descontinuidades dos anéis de crescimento, entre outras), que afetam sua velocidade. A velocidade de referência da propagação da onda é necessária para a análise e interpretação das imagens tomográficas.

4.2. Determinação do teor de umidade

Nas tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 a seguir são apresentadas os teores de umidade obtidos para os corpos-de-prova retirados das 3 seções ensaiadas de cada árvore. Ressalta-se que na impossibilidade de medição do teor de umidade no momento da realização dos ensaios com a técnica de ondas de tensão, após o corte das árvores, todas as seções foram envoltas por papel filme para minimizar a perda de água, até a realização dos ensaios de teor de umidade e densidade aparente. Pode ter ocorrido assim, uma pequena redução dos valores do teor de umidade em relação ao momento de realização do ensaio. A umidade relativa do ar durante a realização dos ensaios encontrava-se próxima de 30 %.

Tabela 4.5. Valores do teor de umidade dos corpos-de-prova – Árvores 01, 02, 03 e 04.

Árvore	Corpo-de-prova	U(%)	Árvore	Corpo-de-prova	U(%)
01	A01_A_01	56	03	A03_A_01	54
	A01_A_02	56		A03_A_02	64
	A01_A_03	60		A03_A_03	-
	A01_A_04	65		A03_A_04	74
	A01_A_05	58		A03_A_05	60
	A01_A_06	55		A03_A_06	47
	A01_B_01	52		A03_B_01	48
	A01_B_02	54		A03_B_02	57
	A01_B_03	61		A03_B_03	-
	A01_B_04	59		A03_B_04	61
	A01_B_05	53		A03_B_05	51
	A01_B_06	53		A03_B_06	42
	A01_C_01	47		A03_C_01	50
	A01_C_02	55		A03_C_02	59
	A01_C_03	56		A03_C_03	66
	A01_C_04	57		A03_C_04	-
	A01_C_05	49		A03_C_05	62
	A01_C_06	47		A03_C_06	51
02	A02_A_01	60	04	A04_A_01	67
	A02_A_02	70		A04_A_02	73
	A02_A_03	-		A04_A_03	72
	A02_A_04	-		A04_A_04	64
	A02_A_05	66		A04_A_05	45
	A02_A_06	56		A04_A_06	54
	A02_B_01	54		A04_B_01	63
	A02_B_02	64		A04_B_02	58
	A02_B_03	-		A04_B_03	65
	A02_B_04	-		A04_B_04	65
	A02_B_05	67		A04_B_05	62
	A02_B_06	59		A04_B_06	63
	A02_C_01	67		A04_C_01	60
	A02_C_02	71		A04_C_02	73
	A02_C_03	-		A04_C_03	-
	A02_C_04	-		A04_C_04	-
	A02_C_05	71		A04_C_05	82
	A02_C_06	68		A04_C_06	62

Tabela 4.6. Valores do teor de umidade dos corpos-de-prova – Árvores 05, 06, 07 e 08.

Árvore	Corpo-de-prova	U(%)	Árvore	Corpo-de-prova	U(%)
05	A05_A_01	61	07	A07_A_01	27
	A05_A_02	62		A07_A_02	51
	A05_A_03	51		A07_A_03	-
	A05_A_04	52		A07_A_04	64
	A05_A_05	62		A07_A_05	55
	A05_A_06	60		A07_A_06	29
	A05_B_01	67		A07_B_01	28
	A05_B_02	68		A07_B_02	51
	A05_B_03	56		A07_B_03	50
	A05_B_04	60		A07_B_04	-
	A05_B_05	65		A07_B_05	51
	A05_B_06	60		A07_B_06	31
	A05_C_01	63		A07_C_01	25
	A05_C_02	67		A07_C_02	47
	A05_C_03	56		A07_C_03	-
	A05_C_04	51		A07_C_04	44
	A05_C_05	65		A07_C_05	41
	A05_C_06	61		A07_C_06	24
06	A06_A_01	55	08	A08_A_01	71
	A06_A_02	56		A08_A_02	70
	A06_A_03	-		A08_A_03	64
	A06_A_04	-		A08_A_04	64
	A06_A_05	57		A08_A_05	71
	A06_A_06	57		A08_A_06	70
	A06_B_01	54		A08_B_01	61
	A06_B_02	56		A08_B_02	63
	A06_B_03	57		A08_B_03	57
	A06_B_04	-		A08_B_04	57
	A06_B_05	56		A08_B_05	63
	A06_B_06	56		A08_B_06	61
	A06_C_01	57		A08_C_01	62
	A06_C_02	55		A08_C_02	62
	A06_C_03	-		A08_C_03	59
	A06_C_04	-		A08_C_04	58
	A06_C_05	61		A08_C_05	63
	A06_C_06	57		A08_C_06	62

Tabela 4.7. Valores do teor de umidade dos corpos-de-prova – Árvores 09, 10, 11 e 12.

Árvore	Corpo-de-prova	U(%)	Árvore	Corpo-de-prova	U(%)
09	A09_A_01	66	11	A11_A_01	28
	A09_A_02	65		A11_A_02	35
	A09_A_03	59		A11_A_03	51
	A09_A_04	61		A11_A_04	51
	A09_A_05	70		A11_A_05	40
	A09_A_06	72		A11_A_06	28
	A09_B_01	66		A11_B_01	30
	A09_B_02	71		A11_B_02	36
	A09_B_03	62		A11_B_03	52
	A09_B_04	63		A11_B_04	52
	A09_B_05	72		A11_B_05	40
	A09_B_06	71		A11_B_06	29
	A09_C_01	67		A11_C_01	29
	A09_C_02	70		A11_C_02	33
	A09_C_03	61		A11_C_03	50
	A09_C_04	62		A11_C_04	51
	A09_C_05	65		A11_C_05	40
	A09_C_06	65		A11_C_06	29
10	A10_A_01	64	12	A12_A_01	56
	A10_A_02	64		A12_A_02	66
	A10_A_03	62		A12_A_03	70
	A10_A_04	-		A12_A_04	78
	A10_A_05	64		A12_A_05	67
	A10_A_06	56		A12_A_06	47
	A10_B_01	64		A12_B_01	50
	A10_B_02	61		A12_B_02	68
	A10_B_03	57		A12_B_03	67
	A10_B_04	64		A12_B_04	70
	A10_B_05	57		A12_B_05	73
	A10_B_06	59		A12_B_06	52
	A10_C_01	67		A12_C_01	46
	A10_C_02	67		A12_C_02	53
	A10_C_03	59		A12_C_03	56
	A10_C_04	64		A12_C_04	55
	A10_C_05	58		A12_C_05	50
	A10_C_06	53		A12_C_06	43

Uma árvore recém cortada, conforme apresentado no Capítulo 02, pode apresentar teor de umidade entre 35% e 200%, dependendo da espécie. Os valores de teor de umidade encontrados ficaram dentro desta faixa, com exceção das árvores 07 e 11, as quais estavam mortas quando da realização dos ensaios, o que explica os menores valores de teores de umidade encontrados em alguns trechos das seções. O teor de umidade entre 35% e 200% ocorre devido à árvore viva absorver água e sais minerais do solo que circulam por toda a planta até atingirem as folhas, constituindo assim a seiva bruta e o processo inverso, das folhas até as raízes é feito pela seiva elaborada, a qual é constituída basicamente de água e

produtos elaborados durante a fotossíntese. O conteúdo de umidade em árvores vivas pode variar também em função da massa específica da espécie e das condições climáticas da região.

Tabela 4.8. Teor de umidade mínimo, máximo e médio e coeficiente de variação.

Árvore	Seção	U _{mín.} (%)	U _{máx.} (%)	U _{méd.} (%)	CV (%)
01	A	55	65	58	6
	B	52	61	55	6,6
	C	47	57	52	8,7
02	A	56	70	63	9,6
	B	54	67	61	10
	C	67	71	69	3
03	A	47	74	60	17,3
	B	42	61	52	14,1
	C	50	66	57	12,3
04	A	45	73	63	17,6
	B	58	65	63	4,2
	C	60	82	69	15
05	A	51	62	58	8,6
	B	56	68	63	7,9
	C	51	67	61	10,1
06	A	55	57	56	2,1
	B	54	57	56	1,7
	C	55	61	57	4,5
07	A	27	55	40	40,7
	B	28	51	42	27,3
	C	24	47	36	29,5
08	A	64	71	68	5,2
	B	57	63	60	4,6
	C	58	63	61	3,6
09	A	59	72	66	7,5
	B	62	72	67	6,3
	C	61	70	65	5,3
10	A	56	65	62	5,6
	B	57	64	60	5,2
	C	53	67	61	9,1
11	A	28	51	39	26,6
	B	29	52	40	25,9
	C	29	51	39	26,5
12	A	47	78	64	17,2
	B	50	73	63	15,8
	C	43	56	50	10,2
Considerando as 12 árvores		24	82	57	9,2

O ponto de saturação das fibras da madeira, normalmente se encontra no intervalo entre 20 e 30% de teor de umidade. Foi possível verificar que todos os corpos-de-prova se encontraram em teor de umidade no intervalo que engloba o ponto de saturação das fibras ou acima deste. Os corpos-de-prova que apresentaram teor de umidade no intervalo do ponto de saturação das

fibras foram retirados das árvores 07 e 11, que se encontravam mortas. Considerando as 12 árvores em estudo, o teor médio de umidade encontrado conforme a Tabela 4.8 foi de 57%.

A velocidade de propagação da onda no material é significativamente afetada pelo teor de umidade até o ponto de saturação das fibras, sendo que a partir deste valor, a variação na velocidade é pequena. Isto ocorre porque em teores de umidade acima do ponto de saturação, a dispersão da onda é muito pequena. Assim, em árvores vivas, cujo teor de umidade normalmente se encontra acima do ponto de saturação das fibras, a velocidade de propagação da onda é pouco afetada pelo teor de umidade, sendo afetada mais significativamente pela densidade do material e pela presença de defeitos ou injúrias internas.

Mas é importante ressaltar, que a velocidade obtida acima do PSF tem valor inferior ao encontrado na mesma madeira seca. Desta forma, para o estudo das árvores vivas, não houve a necessidade de correção das velocidades para o teor de umidade de 12%.

4.3. Determinação da densidade aparente

Os valores obtidos de densidade aparente durante os ensaios corresponderam à densidade aparente no teor de umidade em que se encontrava o corpo-de-prova no instante do ensaio, não havendo a necessidade de correção para o teor de umidade de 12%, conforme já discutido anteriormente. Nos próximos itens, essa propriedade é comparada com a velocidade de propagação de onda medida para o teor de umidade real no momento do ensaio.

Os valores de densidade aparente obtidos para cada corpo-de-prova das seções ensaiadas de todas as árvores são apresentados nas tabelas 4.9, 4.10, 4.11. Na Tabela 4.12 são apresentadas as velocidades de propagação de onda mínima, máxima e média e o coeficiente de variação para cada seção da respectiva árvore ensaiada.

Tabela 4.9. Valores de densidade aparente dos corpos-de-prova – Árvores 01, 02, 03 e 04.

Árvore	Corpo-de-prova	ρ (g/cm ³)	Árvore	Corpo-de-prova	ρ (g/cm ³)
01	A01_A_01	1,22	03	A03_A_01	1,34
	A01_A_02	0,77		A03_A_02	1,15
	A01_A_03	0,41		A03_A_03	-
	A01_A_04	0,47		A03_A_04	1,23
	A01_A_05	0,58		A03_A_05	1,31
	A01_A_06	1,00		A03_A_06	1,39
	A01_B_01	1,17		A03_B_01	1,34
	A01_B_02	0,53		A03_B_02	1,27
	A01_B_03	0,33		A03_B_03	-
	A01_B_04	0,34		A03_B_04	1,23
	A01_B_05	0,37		A03_B_05	1,25
	A01_B_06	0,94		A03_B_06	1,29
	A01_C_01	1,00		A03_C_01	1,24
	A01_C_02	0,58		A03_C_02	1,22
	A01_C_03	0,47		A03_C_03	1,16
	A01_C_04	0,44		A03_C_04	-
	A01_C_05	0,44		A03_C_05	1,18
	A01_C_06	0,96		A03_C_06	1,21
02	A02_A_01	1,20	04	A04_A_01	1,19
	A02_A_02	1,11		A04_A_02	1,18
	A02_A_03	-		A04_A_03	1,18
	A02_A_04	-		A04_A_04	1,13
	A02_A_05	0,99		A04_A_05	1,17
	A02_A_06	1,21		A04_A_06	1,25
	A02_B_01	1,30		A04_B_01	1,12
	A02_B_02	1,03		A04_B_02	1,11
	A02_B_03	-		A04_B_03	0,80
	A02_B_04	-		A04_B_04	0,94
	A02_B_05	1,19		A04_B_05	1,11
	A02_B_06	1,34		A04_B_06	1,16
	A02_C_01	1,37		A04_C_01	1,22
	A02_C_02	1,33		A04_C_02	1,21
	A02_C_03	-		A04_C_03	-
	A02_C_04	-		A04_C_04	-
	A02_C_05	1,14		A04_C_05	1,22
	A02_C_06	1,50		A04_C_06	1,28

Tabela 4.10. Valores de densidade aparente dos corpos-de-prova – Árvores 05, 06, 07 e 08.

Árvore	Corpo-de-prova	ρ (g/cm ³)	Árvore	Corpo-de-prova	ρ (g/cm ³)
05	A05_A_01	1,36	07	A07_A_01	1,14
	A05_A_02	1,24		A07_A_02	1,22
	A05_A_03	1,04		A07_A_03	
	A05_A_04	0,82		A07_A_04	0,98
	A05_A_05	1,07		A07_A_05	1,04
	A05_A_06	1,46		A07_A_06	0,99
	A05_B_01	1,36		A07_B_01	1,24
	A05_B_02	1,19		A07_B_02	1,19
	A05_B_03	0,91		A07_B_03	1,03
	A05_B_04	1,16		A07_B_04	-
	A05_B_05	1,30		A07_B_05	1,20
	A05_B_06	1,54		A07_B_06	1,06
	A05_C_01	1,41		A07_C_01	1,20
	A05_C_02	1,09		A07_C_02	1,16
	A05_C_03	0,69		A07_C_03	-
	A05_C_04	1,07		A07_C_04	0,96
	A05_C_05	1,19		A07_C_05	1,16
	A05_C_06	1,43		A07_C_06	1,14
06	A06_A_01	1,51	08	A08_A_01	1,42
	A06_A_02	1,22		A08_A_02	1,28
	A06_A_03	-		A08_A_03	1,25
	A06_A_04	-		A08_A_04	1,06
	A06_A_05	1,25		A08_A_05	0,96
	A06_A_06	1,30		A08_A_06	1,31
	A06_B_01	1,39		A08_B_01	1,28
	A06_B_02	1,26		A08_B_02	1,22
	A06_B_03	1,09		A08_B_03	0,99
	A06_B_04	-		A08_B_04	0,99
	A06_B_05	1,15		A08_B_05	0,91
	A06_B_06	1,34		A08_B_06	0,95
	A06_C_01	1,47		A08_C_01	1,23
	A06_C_02	1,46		A08_C_02	1,19
	A06_C_03	-		A08_C_03	1,14
	A06_C_04	-		A08_C_04	1,07
	A06_C_05	1,49		A08_C_05	1,14
	A06_C_06	1,53		A08_C_06	1,15

Tabela 4.11. Valores de densidade aparente dos corpos-de-prova – Árvores 09, 10, 11 e 12.

Árvore	Corpo-de-prova	ρ (g/cm ³)	Árvore	Corpo-de-prova	ρ (g/cm ³)
09	A09_A_01	1,51	11	A11_A_01	1,19
	A09_A_02	1,38		A11_A_02	1,13
	A09_A_03	1,31		A11_A_03	1,05
	A09_A_04	1,20		A11_A_04	1,10
	A09_A_05	1,34		A11_A_05	1,12
	A09_A_06	1,34		A11_A_06	1,26
	A09_B_01	1,21		A11_B_01	1,23
	A09_B_02	1,19		A11_B_02	1,18
	A09_B_03	1,07		A11_B_03	1,17
	A09_B_04	1,17		A11_B_04	1,15
	A09_B_05	1,16		A11_B_05	1,21
	A09_B_06	1,26		A11_B_06	1,26
	A09_C_01	1,29		A11_C_01	1,19
	A09_C_02	1,20		A11_C_02	1,23
	A09_C_03	1,10		A11_C_03	1,20
	A09_C_04	1,02		A11_C_04	1,13
	A09_C_05	1,20		A11_C_05	1,20
	A09_C_06	1,22		A11_C_06	1,30
10	A10_A_01	1,43	12	A12_A_01	1,27
	A10_A_02	1,40		A12_A_02	1,23
	A10_A_03	1,38		A12_A_03	1,25
	A10_A_04	-		A12_A_04	1,26
	A10_A_05	1,42		A12_A_05	1,28
	A10_A_06	1,44		A12_A_06	1,27
	A10_B_01	1,37		A12_B_01	1,32
	A10_B_02	1,46		A12_B_02	1,26
	A10_B_03	1,11		A12_B_03	1,28
	A10_B_04	1,16		A12_B_04	1,34
	A10_B_05	1,47		A12_B_05	1,30
	A10_B_06	1,69		A12_B_06	1,39
	A10_C_01	1,34		A12_C_01	1,24
	A10_C_02	1,28		A12_C_02	1,19
	A10_C_03	1,17		A12_C_03	1,14
	A10_C_04	1,16		A12_C_04	1,17
	A10_C_05	1,21		A12_C_05	1,17
	A10_C_06	1,37		A12_C_06	1,20

A espécie em estudo é considerada uma espécie de densidade média, com valor de densidade aparente média encontrada em literatura de 0,71 g/cm³ (GATTI et al., 2009). Pelas tabelas apresentadas foi possível verificar a predominância de valores de densidade aparente acima deste valor, sendo que a média para as 12 árvores em estudo, conforme apresentado na Tabela 4.12, foi de 1,17 g/cm³. Mas é importante ressaltar que o valor encontrado em literatura refere-se à densidade aparente média de galhos da espécie em estudo, o qual pode apresentar valores relativamente menores, além de considerar a grande variabilidade da madeira, que

para uma mesma espécie pode apresentar variabilidade alta de suas propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 4.12. Densidade aparente mínima, máxima e média e coeficiente de variação.

Árvore	Seção	$\rho_{\min.}$ (g/cm ³)	$\rho_{\max.}$ (g/cm ³)	$\rho_{\text{méd.}}$ (g/cm ³)	CV (%)
01	A	0,41	1,22	0,74	43,1
	B	0,33	1,17	0,61	58,8
	C	0,44	1,00	0,65	40,7
02	A	0,99	1,21	1,13	9,1
	B	1,03	1,34	1,22	11,7
	C	1,14	1,50	1,34	11,2
03	A	1,15	1,39	1,28	7,3
	B	1,23	1,34	1,28	3,5
	C	1,16	1,24	1,20	2,6
04	A	1,13	1,25	1,18	3,3
	B	0,80	1,16	1,04	13,5
	C	1,21	1,28	1,23	2,7
05	A	0,82	1,46	1,16	20,3
	B	0,91	1,54	1,24	16,9
	C	0,69	1,43	1,15	23,6
06	A	1,22	1,51	1,32	9,8
	B	1,09	1,39	1,25	10,0
	C	1,46	1,53	1,49	2,3
07	A	0,98	1,22	1,07	9,5
	B	1,03	1,24	1,14	8,2
	C	0,96	1,20	1,12	8,4
08	A	0,96	1,22	1,07	15,6
	B	0,91	1,28	1,06	14,5
	C	1,07	1,23	1,15	4,9
09	A	1,20	1,51	1,34	7,6
	B	1,07	1,26	1,18	5,3
	C	1,02	1,29	1,17	8,1
10	A	1,38	1,44	1,41	1,7
	B	1,11	1,69	1,37	15,8
	C	1,16	1,37	1,26	7,1
11	A	1,05	1,26	1,14	6,4
	B	1,15	1,26	1,20	3,7
	C	1,13	1,30	1,21	4,6
12	A	1,23	1,28	1,26	1,6
	B	1,26	1,39	1,32	3,5
	C	1,14	1,24	1,18	2,9
Considerando as 12 árvores		0,33	1,69	1,17	7,47

Os valores mínimos e máximos encontrados de densidade aparente nas árvores ensaiadas foram 0,33 g/cm³ e 1,69 g/cm³, respectivamente para as árvores 01 e 10. A densidade aparente de menor magnitude encontrada na árvore 01 pode ser explicada pelo aspecto friável encontrado nas suas seções, principalmente na região do cerne, onde foram verificadas as menores velocidades de propagação da onda.

4.4. Imagens tomográficas

A seguir são apresentadas as imagens tomográficas em 2D e em 3D obtidas com a utilização do software FAKKOP Multilayer 3D. Cada imagem tomográfica foi associada a imagem fotográfica da seção a partir da qual foi gerada, para efeito comparativo. Para cada árvore em estudo, houve um relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes da Secretaria do Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Limeira, descrevendo de forma sucinta, a situação encontrada ao vistoriar a árvore, para a tomada de decisão quanto ao seu corte, que também será apresentado a seguir, conforme a apresentação dos resultados de cada árvore.

4.4.1 Imagens tomográficas para a árvore 01

Para a árvore 01, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 953 m/s e máxima de 1.754 m/s. Essa faixa foi gerada automaticamente pelo software, de acordo com a variação das velocidades de propagação da onda na seção.

Verificou-se que esta faixa englobou valores de velocidade abaixo da velocidade adotada de referência de propagação da onda, que corresponde a 2.130 m/s, o que indicou a possibilidade de existência de madeira de baixa qualidade. Essa comparação com o valor de referência é fundamental, pois somente o intervalo, sem um valor de referência, não permite verificar a qualidade do material. Alguns autores, como Divos; Szalai (2002) defendem que se a velocidade de propagação da onda medida for menor que 90% da velocidade de referência, esta árvore pode conter defeitos internos. Se a diferença for maior, pode-se afirmar que a dimensão do defeito também será maior.

Para a árvore 01, houve valores de velocidades de propagação da onda menores que 90% da velocidade de referência, já indicando assim a possibilidade de existência de defeitos ou injúrias internas. A velocidade mínima gerada pelo software correspondeu a 44% da velocidade de referência. É importante ressaltar, que a faixa gerada pelo software não exclui a possibilidade de terem ocorrido velocidades de propagação inferiores a 953 m/s ou superiores a 1.754 m/s.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, essa árvore não havia sido vistoriada, a qual seria retirada a pedido de um dos diretores da Secretaria do Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Limeira.

Nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas das seções A, B e C. Ressalta-se que as imagens fotográficas se encontram na mesma posição da imagem tomográfica. Na Figura 4.4 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 01. Ressalta-se que a imagem em 3D foi gerada apenas com base nas três seções ensaiadas, a partir das quais o software projetou como seriam as demais regiões da árvore compreendida entre estas seções, que para representar adequadamente a realidade seria necessário maior número de seções ensaiadas nestas regiões.

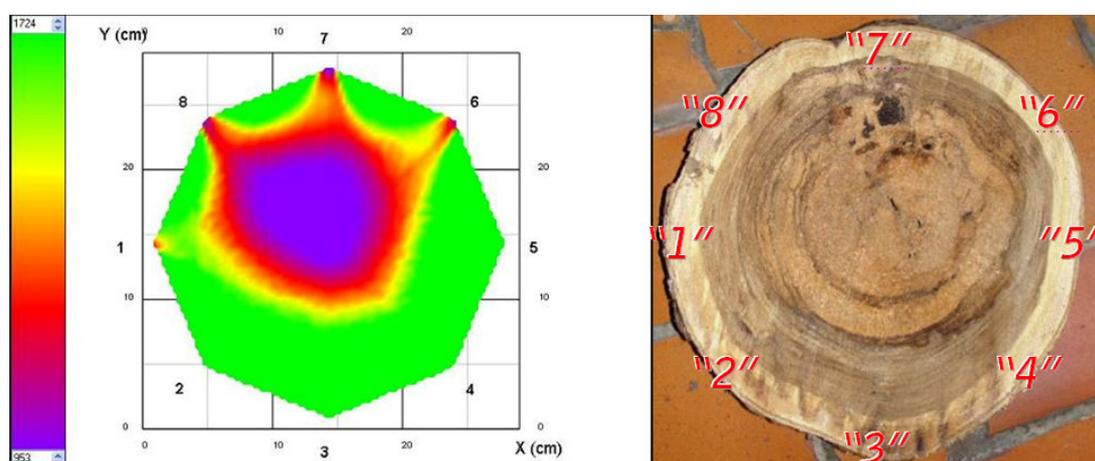


Figura 4.1. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 01.

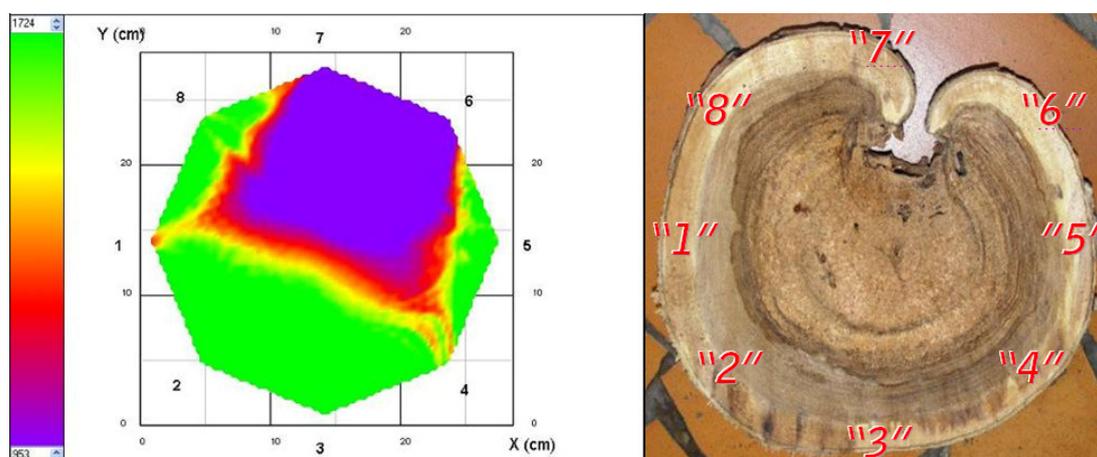


Figura 4.2. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 01.

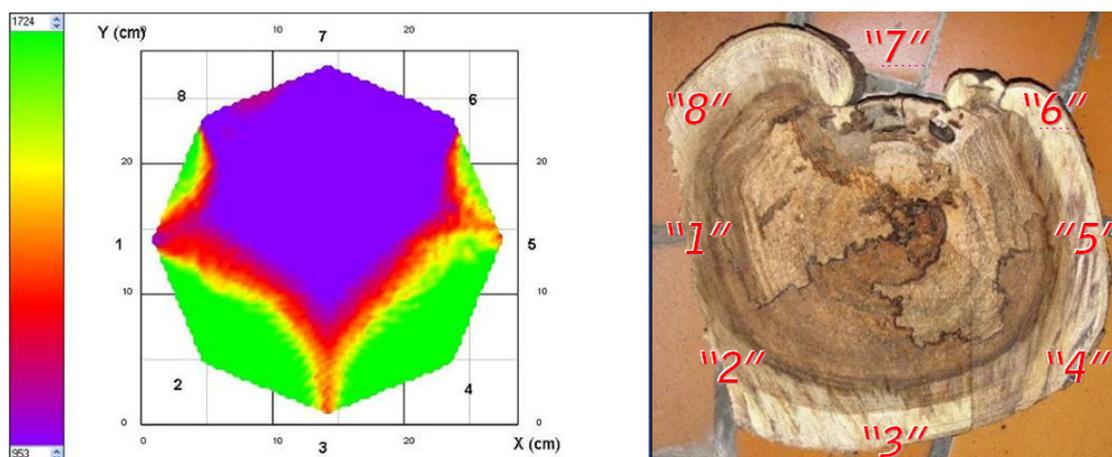


Figura 4.3. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 01.

Foi possível verificar pela seção A, a predominância de menores velocidades de propagação da onda nas regiões centrais e próximas dos pontos “8-7-6”, que correspondem às regiões onde a madeira estava bastante afetada, com aspecto friável e com valores mais baixos de densidade aparente (abaixo de $0,60 \text{ g/cm}^3$). Foi constatada nesta região a presença de cupins. O mesmo ocorreu para as seções B e C, onde houve velocidades de menores magnitudes na região central para ambas as seções. Houve também velocidades de menores magnitudes próximas aos pontos “7 -6” para a seção B e próximas aos pontos “1-8-7-6-5” para a seção C. Para a seção C, verificou-se ainda a presença de deterioração da madeira na região central. Os menores valores de velocidade de propagação da onda junto aos pontos de posicionamento dos sensores podem ser explicados como consequência do próprio sensor, que ao penetrar na madeira, ocasiona desvios no material, reduzindo assim a velocidade de propagação da onda nesta região. Esta interferência dos sensores pode ser verificada também na experimentação das demais árvores estudadas.

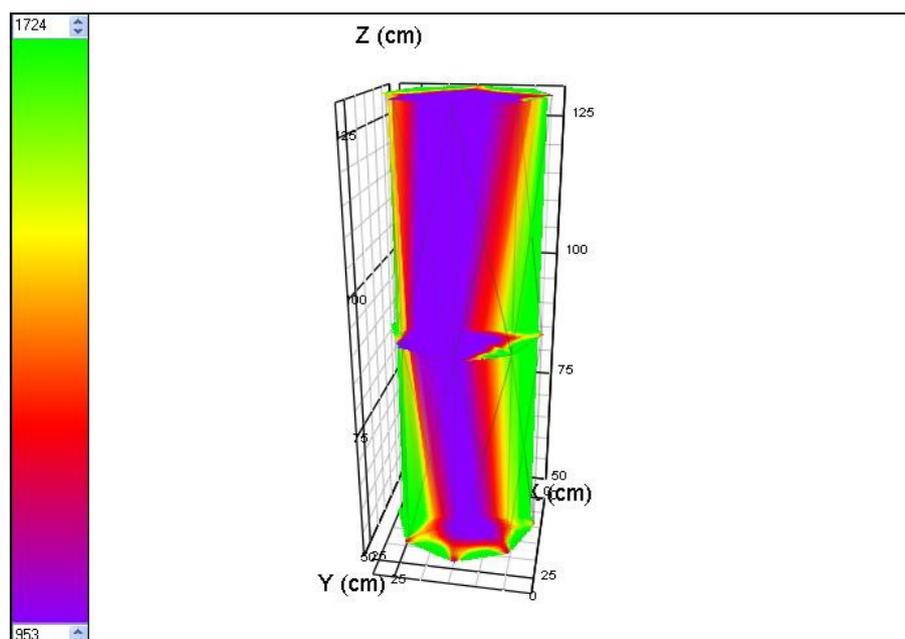


Figura 4.4. Imagem tomográfica em 3D – árvore 01.

Comparando o resultado das imagens tomográficas com a situação real da árvore notou-se uma grande semelhança, verificando que uma parte significativa das seções se encontrava com madeira de baixa qualidade.

4.4.2 Imagens tomográficas para a árvore 02

Para a árvore 02, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.704 m/s e máxima de 2.074 m/s. Verificou-se que esta faixa englobou valores de velocidade abaixo da velocidade de propagação da onda adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s. A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 80% do valor da velocidade de referência, o que significa a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como apresentando baixo vigor e fraco desenvolvimento vegetativo da copa, sendo assim autorizada a sua retirada.

Nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas das seções A, B e C. Na Figura 4.8 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 02.

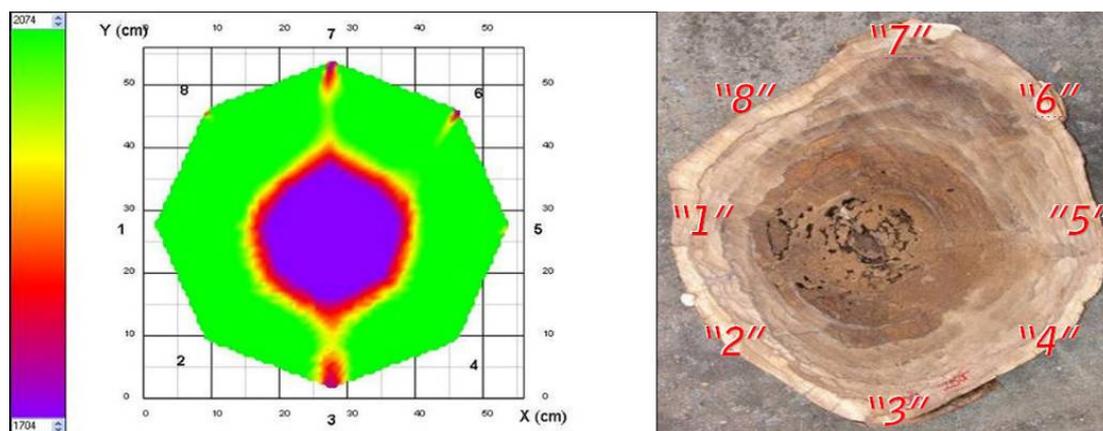


Figura 4.5. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 02.

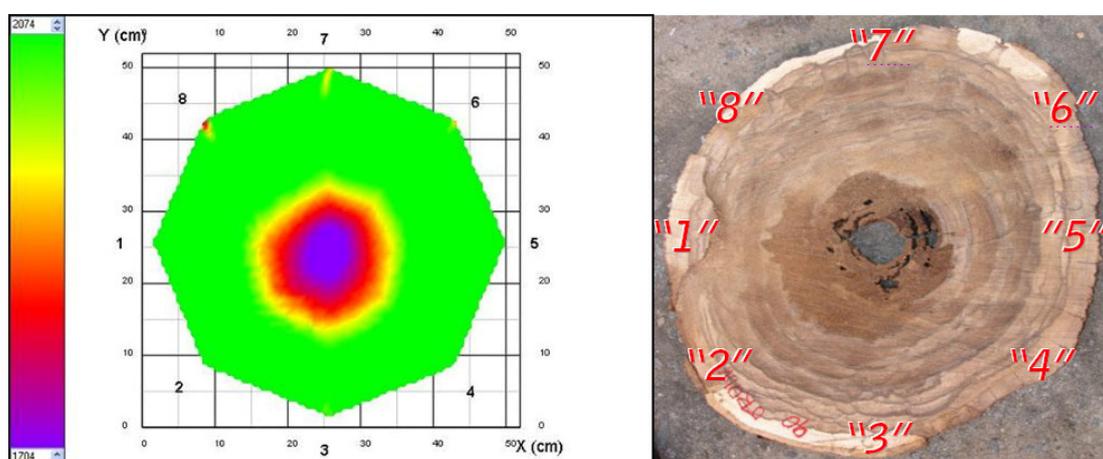


Figura 4.6. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 02.

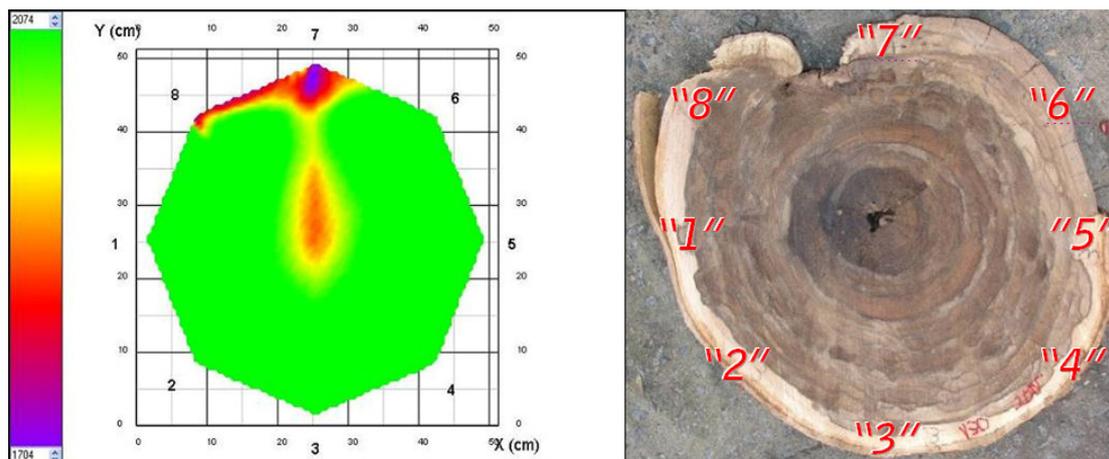


Figura 4.7. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 02.

Foi possível verificar pela seção A, 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. O mesmo ocorreu para a seção B. A seção C também apresentou menores velocidades na região do cerne, só que em proporção de área menor que as das seções A e B. Na seção C foi possível também verificar a predominância de valores de velocidade de propagação da onda mais distantes da velocidade mínima da escala. Ao analisar a imagem fotográfica da seção C, notou-se que esta realmente apresentou melhores condições, com apenas a presença de um pequeno orifício na região central.

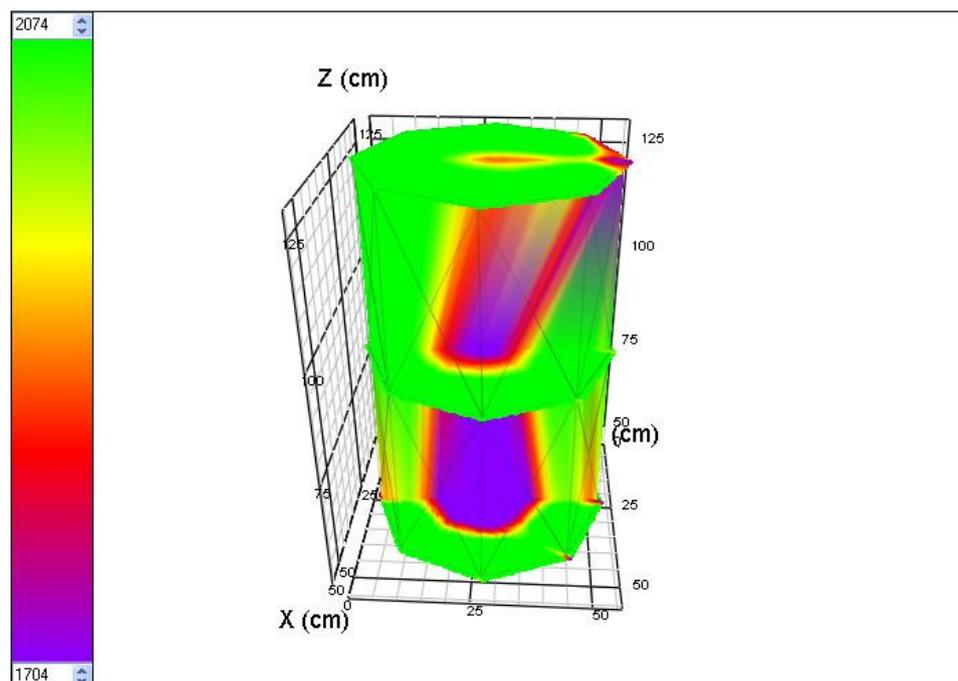


Figura 4.8. Imagem tomográfica em 3D – árvore 02.

Comparando o resultado das imagens tomográficas com a situação real das árvores notou-se uma grande semelhança, verificando que uma parte significativa da região central das seções A e B se encontram com defeitos internos e que a seção C, apesar de também afetada, apresentava melhores condições que as demais seções.

4.4.3 Imagens tomográficas para a árvore 03

Para a árvore 03, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.741 m/s e máxima de 2.135 m/s. Verificou-se que esta faixa englobou valores de velocidade abaixo da velocidade adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s. Mas foi possível verificar também que a velocidade máxima da escala se encontrava acima do valor da velocidade de referência. A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 81% do valor da velocidade de referência, indicando a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como apresentando fraco desenvolvimento vegetativo da copa, sendo assim autorizada a sua retirada.

Nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas das seções A, B e C. Na Figura 4.12 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 03.

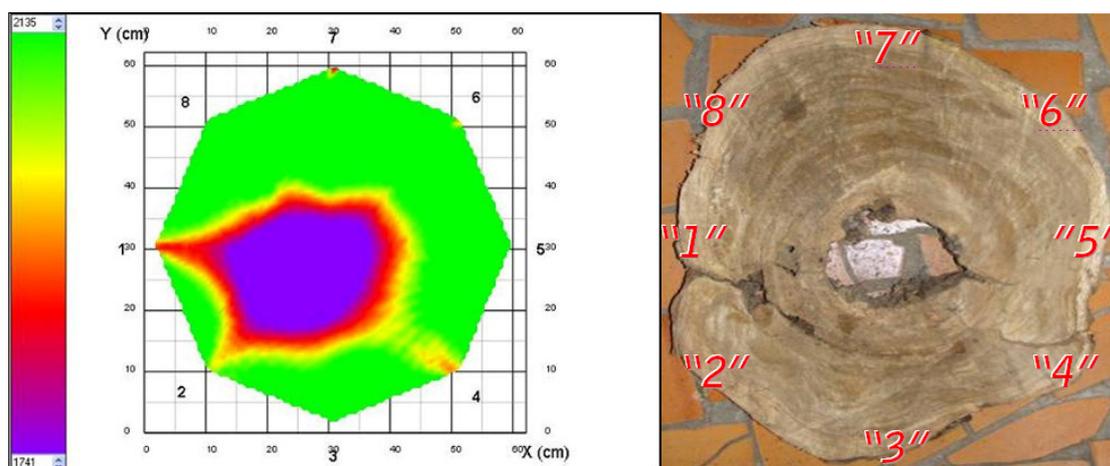


Figura 4.9. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 03.

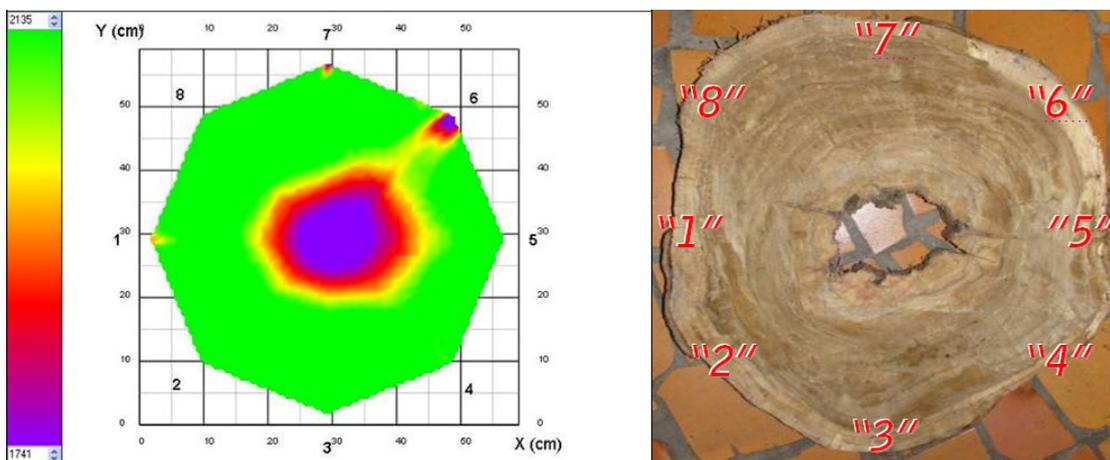


Figura 4.10. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 03.

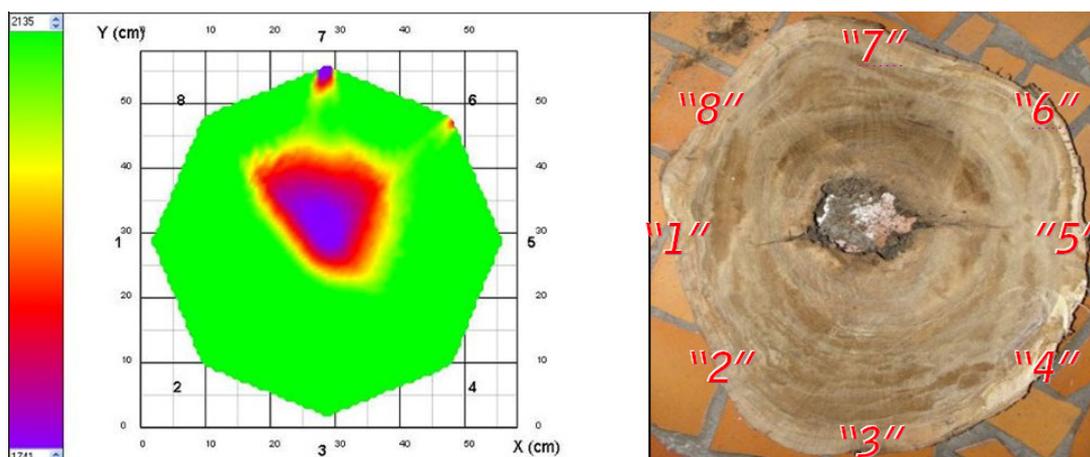


Figura 4.11. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 03.

Foi possível verificar pelas seções A, B e C, a predominância de menores velocidades de propagação da onda na região central, que corresponde à região onde a madeira estava bastante afetada nas três seções, com a presença de orifícios na região do cerne.

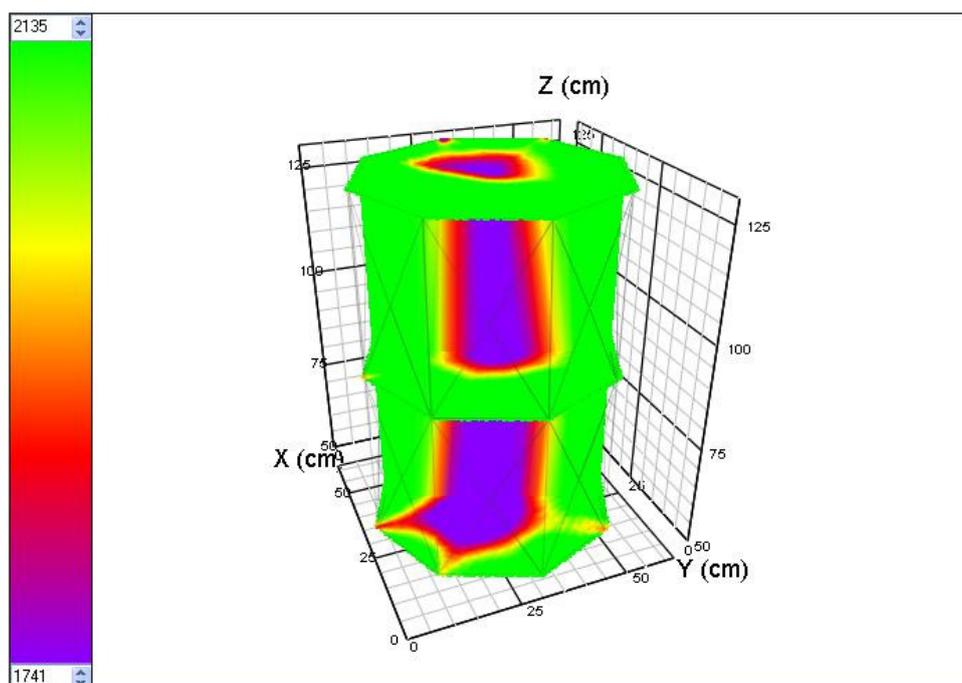


Figura 4.12. Imagem tomográfica em 3D – árvore 03.

Comparando o resultado das imagens tomográficas com a situação real da árvore notou-se uma grande semelhança, verificando que uma parte significativa do cerne se encontrava com defeitos internos (presença dos orifícios).

4.4.4 Imagens tomográficas para a árvore 04

Para a árvore 04, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.614 m/s e máxima de 2.053 m/s. Verificou-se que esta faixa englobou valores de velocidade abaixo da velocidade adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s. A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 75% do valor de referência, o que significa a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas. A velocidade máxima da escala correspondeu a 96% da velocidade de referência de propagação da onda.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como isenta de problemas fitossanitários relevantes, mas com localização inadequada sob rede elétrica, causando sérios problemas de interferência com esta, sendo assim autorizada a sua retirada.

Nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas das seções A, B e C. Na Figura 4.16 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 04.

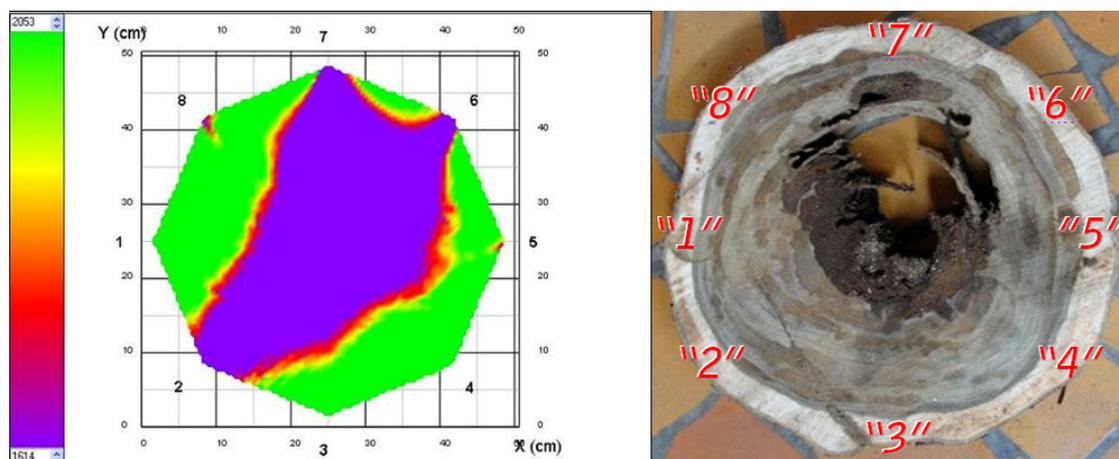


Figura 4.13. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 04.

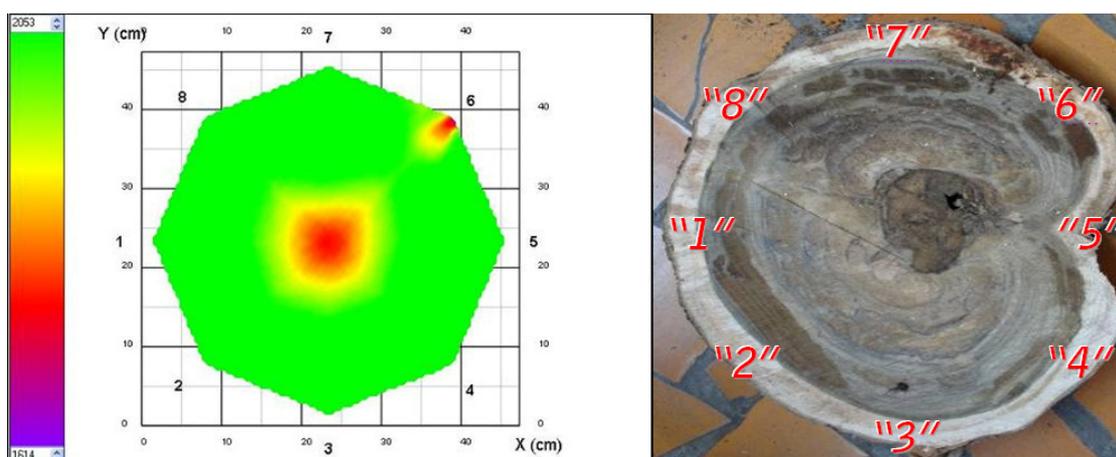


Figura 4.14. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 04.

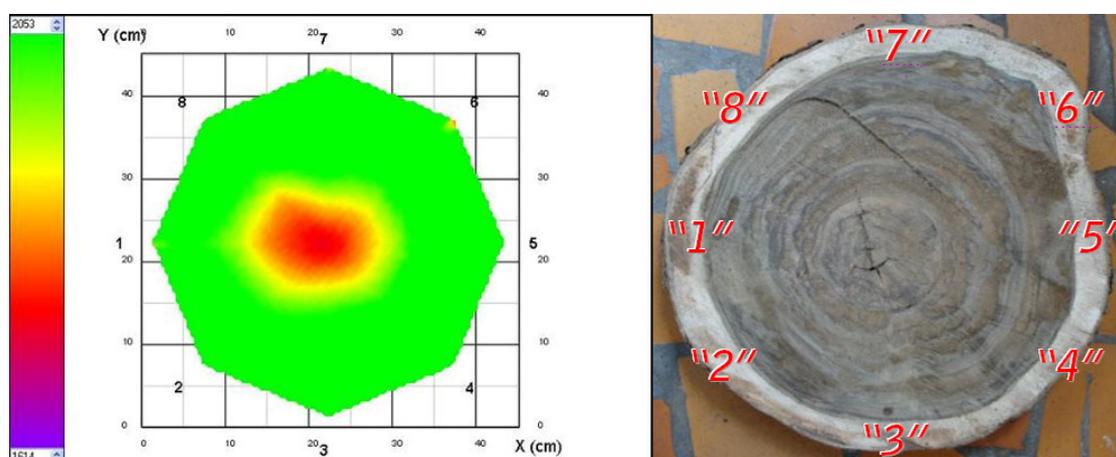


Figura 4.15. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 04.

Foi possível verificar pela seção A uma faixa bastante extensa de velocidades de propagação da onda de menor magnitude na seção, englobando toda a região central e próxima dos pontos “7-6-2”. Ao analisar a imagem fotográfica correspondente a esta seção, verificou-se uma grande área da seção afetada, em especial na região do cerne. Esta seção se encontrava significativamente afetada por cupins. Nas seções B e C, houve a presença de menores velocidades de propagação da onda em uma pequena área na região central, mas com velocidades maiores que as mínimas da escala do software, com valores intermediários entre a mínima (75% da velocidade de referência) e a máxima velocidade da escala (96% da velocidade de referência). Ao comparar com as imagens fotográficas das seções B e C verificou-se a presença de pequenos defeitos na região central, os quais são inferiores ao encontrado na seção A.

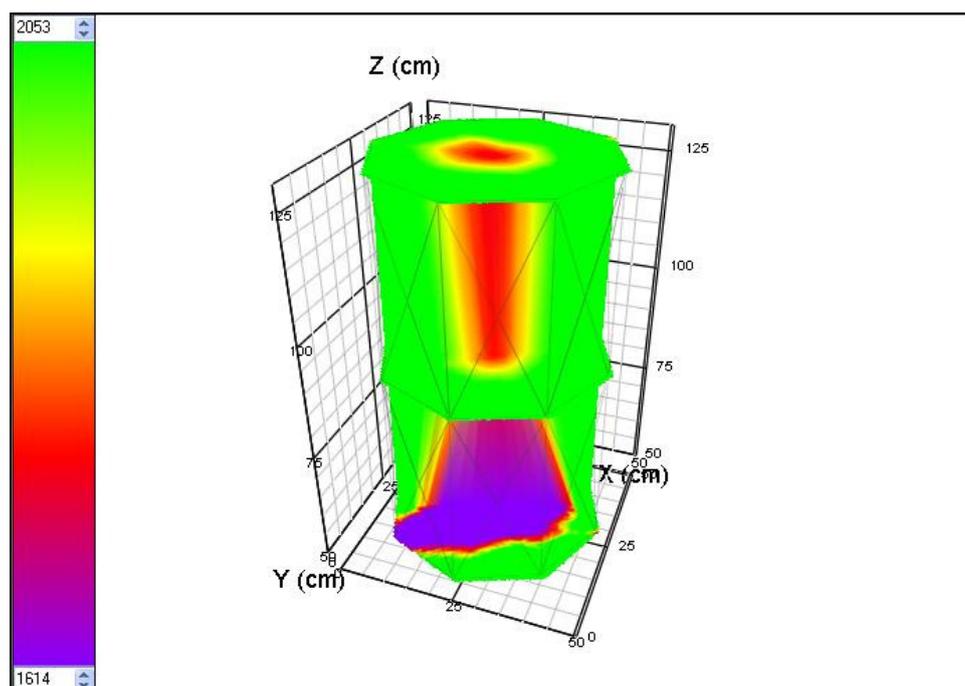


Figura 4.16. Imagem tomográfica em 3D – árvore 04.

Comparando o resultado das imagens tomográficas com a situação real da árvore notou-se uma grande semelhança, verificando que uma parte significativa do cerne da seção A se encontrava afetada, e que as áreas afetadas nas seções B e C eram de menores proporções.

4.4.5 Imagens tomográficas para a árvore 05

Para a árvore 05, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.552 m/s e máxima de 2.067 m/s. Verificou-se que esta faixa englobou valores de velocidade abaixo da velocidade adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s. A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 72% do valor da velocidade de referência, o que significa a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como apresentando bom estado fitossanitário. O pedido para a retirada foi a interferência da árvore com o ponto de ônibus localizado no local.

Nas figuras 4.17, 4.18 e 4.19 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas das seções A, B e C. Na Figura 4.20 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 05.

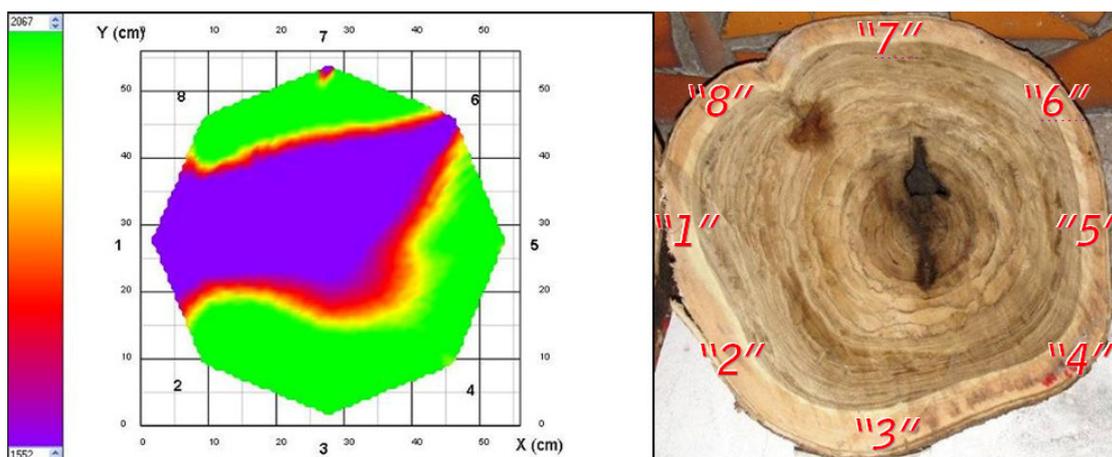


Figura 4.17. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 05.

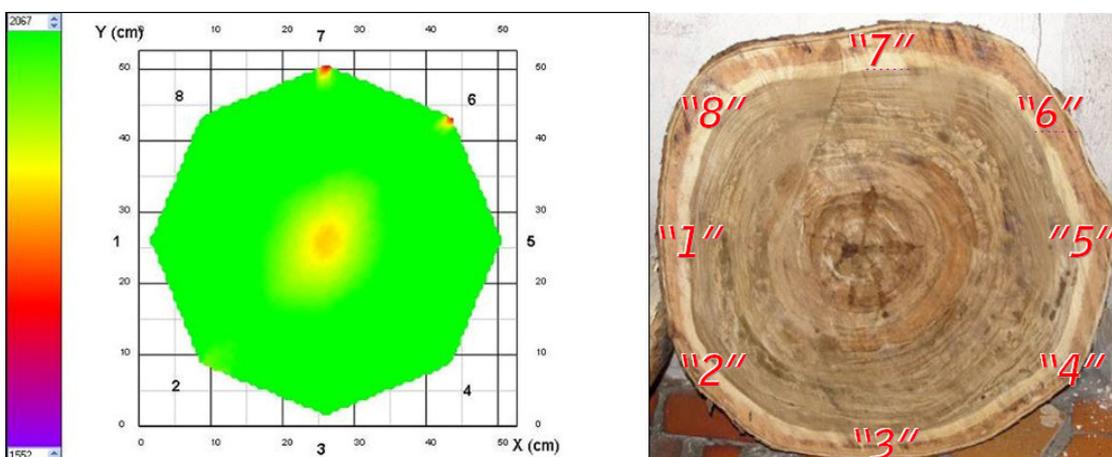


Figura 4.18. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 05.

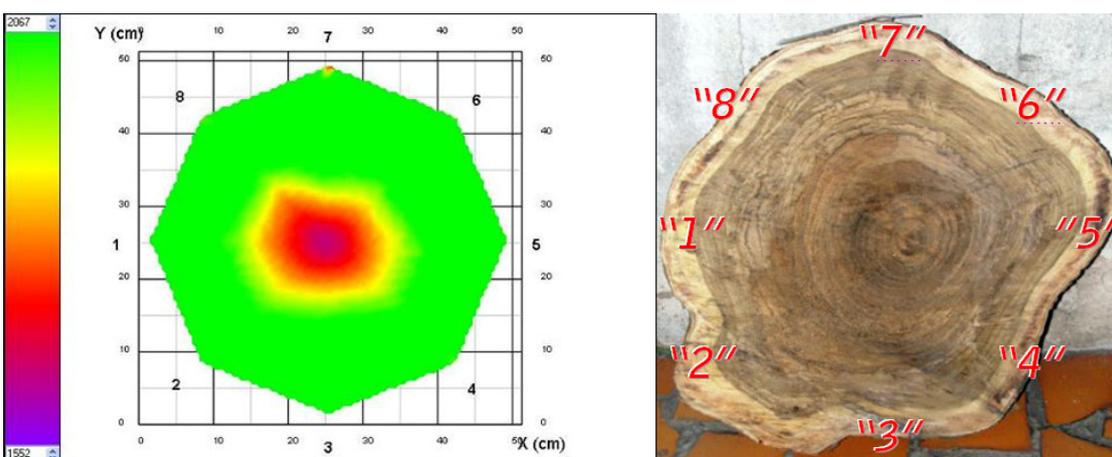


Figura 4.19. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 05.

Foi possível verificar pela seção A uma faixa bastante extensa de velocidades de propagação da onda de menor magnitude na seção, englobando toda a região central e próxima dos pontos

“6-1”. Ao analisar a imagem fotográfica correspondente a esta seção, verificou-se a presença de defeitos internos apenas na região central, onde foi possível verificar a presença de pequenos orifícios.

Na seção B, 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 referência, 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.

Na seção C, foi possível notar pela imagem tomográfica a presença de regiões com menores velocidades de propagação da onda na região central, mas acima da velocidade mínima da escala. Pela imagem fotográfica da seção não foi possível verificar a presença de defeitos ou injúrias internas na seção.

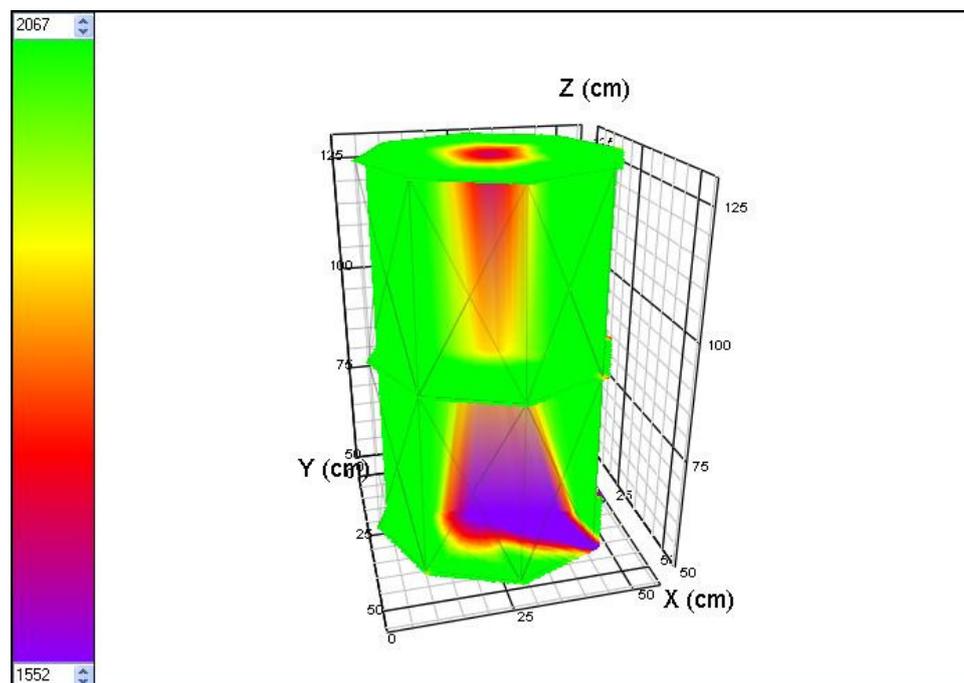


Figura 4.20. Imagem tomográfica em 3D – árvore 05.

Comparando o resultado das imagens tomográficas com a situação real da árvore notou-se que a seção B foi a que apresentou melhor semelhança entre a imagem e a situação real da árvore. Nas demais, os menores valores de velocidade de propagação da onda na região do cerne podem estar associados aos menores valores de densidade aparente nesta região,

principalmente na seção C, que apresentou densidade aparente de $0,69 \text{ g/cm}^3$ para o corpo-de-prova A05_C_03, valor bem inferior aos obtidos nos demais corpos-de-prova da mesma seção.

4.4.6 Imagens tomográficas para a árvore 06

Para a árvore 06, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.364 m/s e máxima de 2.072 m/s . Verificou-se que esta faixa englobou valores de velocidade abaixo da velocidade adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s . A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 64% do valor da velocidade de referência, o que significa a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como apresentando bom estado fitossanitário e com bom desenvolvimento vegetativo. O pedido para a retirada foi a interferência da árvore com a entrada de uma escola de educação infantil que seria brevemente instalada no local.

Nas figuras 4.21, 4.22 e 4.23 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas para as seções A, B e C. Na Figura 4.24 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 06.

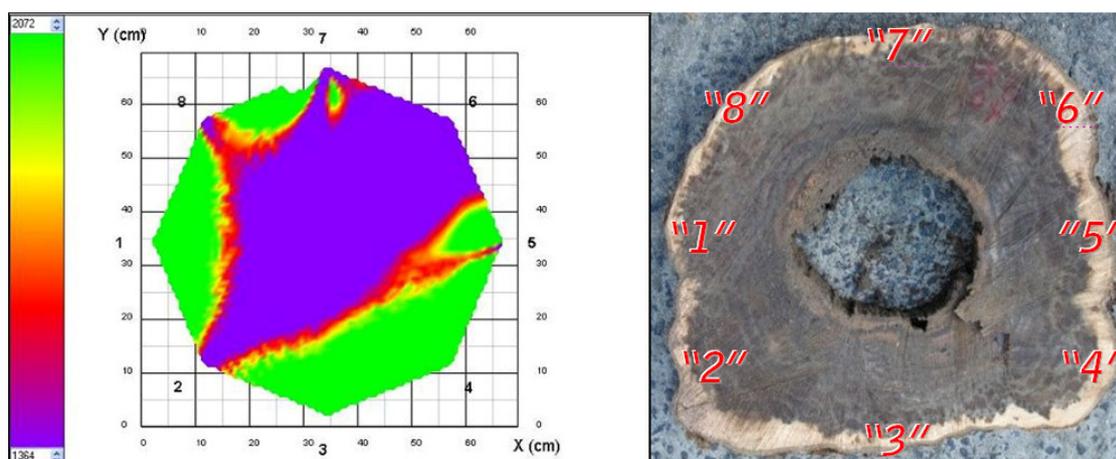


Figura 4.21. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 06.

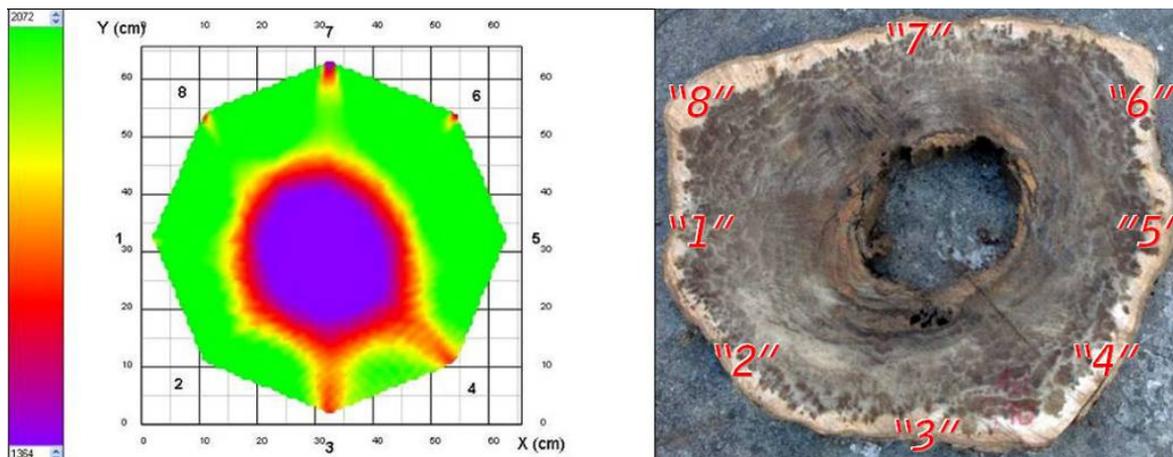


Figura 4.22. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 06.

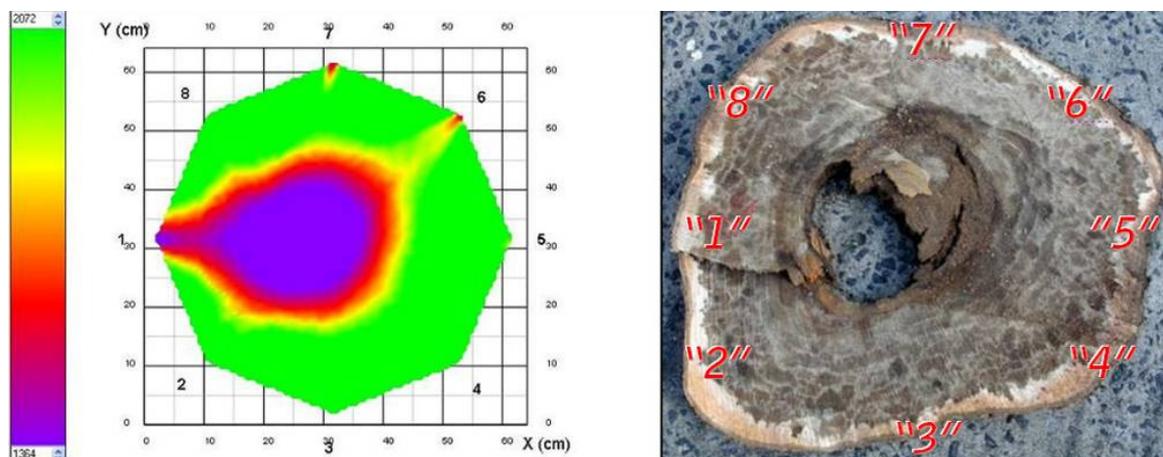


Figura 4.23. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 06.

Foi possível verificar pelas seções A, B e C, a predominância de menores velocidades de propagação da onda na região central, que correspondeu a região onde a madeira estava bastante afetada nas três seções, com a presença de orifícios na região do cerne. Na seção A as menores velocidades de propagação da onda foram encontradas também próximas aos pontos “2-9-7-6”.

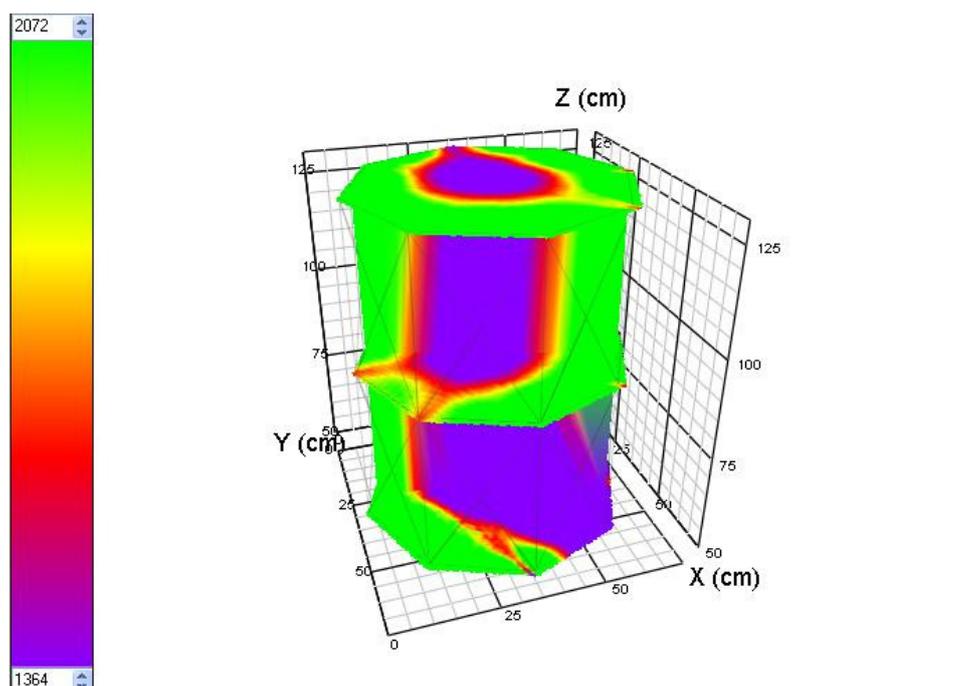


Figura 4.24. Imagem tomográfica em 3D – árvore 06.

Comparando os resultados das imagens tomográficas com a situação real das seções, notou-se uma grande semelhança entre estas. A imagem tomográfica identificou a presença dos orifícios na região do cerne das seções.

4.4.7 Imagens tomográficas para a árvore 07

Para a árvore 07, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.562 m/s e máxima de 1960 m/s. Verificou-se que esta faixa se encontrou abaixo da velocidade adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s. A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 73% do valor da velocidade de referência, o que significa a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas. É importante destacar, que a máxima velocidade da escala, neste caso, correspondeu a 92% da velocidade de referência de propagação da onda, sendo que abaixo de 90%, pode significar a presença de defeitos ou injúrias internas.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como árvore morta, sendo autorizada sua retirada.

Nas figuras 4.25, 4.26 e 4.27 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas para as seções A, B e C. Na Figura 4.28 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 07.

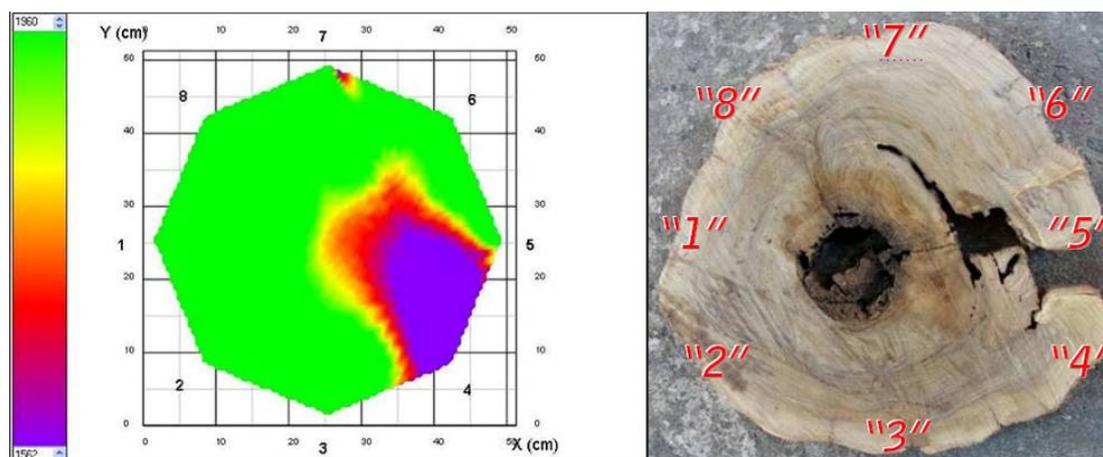


Figura 4.25. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 07.

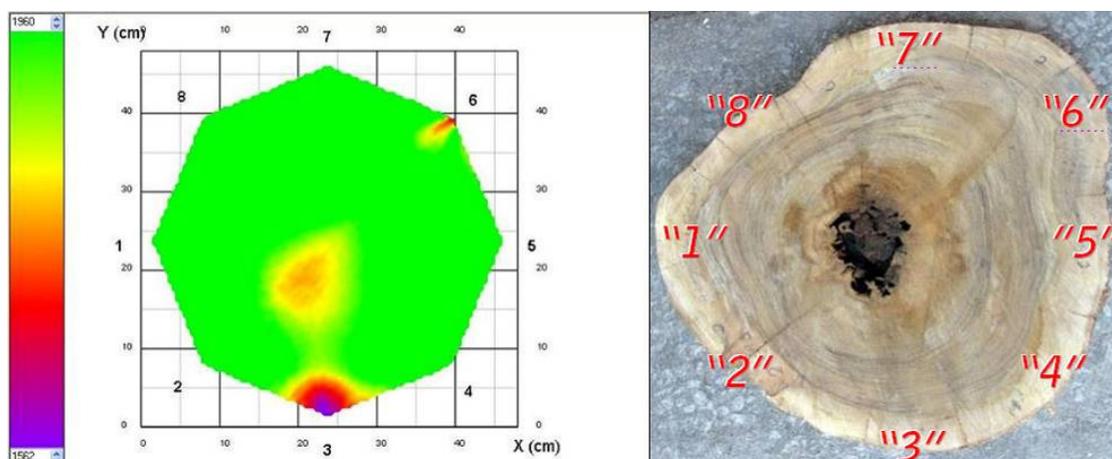


Figura 4.26. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 07.

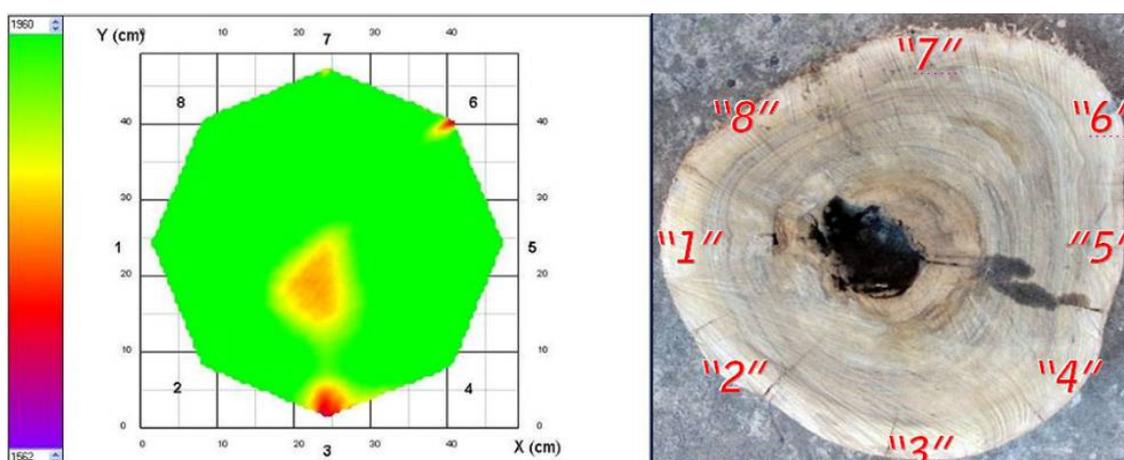


Figura 4.27. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 07.

Foi possível verificar pela seção A, a presença de menores velocidades de propagação da onda em regiões próximas aos pontos “4-5”, cuja extensão se encontra até a região central. Ao

comparar com a imagem fotográfica da seção correspondente, verificou-se a presença de grandes defeitos nesta região. As seções B e C apresentaram regiões próximas da região central com valores menores de velocidades de propagação da onda, com valores intermediários entre o máximo e o mínimo da escala. O valor máximo de velocidade da escala correspondeu a 92%, o que significa que as velocidades menores na região central da seção, correspondem a valores inferiores a 90% da velocidade de referência, significando a presença de defeitos ou injúrias internas, o que realmente correspondeu com as imagens fotográficas da seção, que apresentaram orifícios na região central.

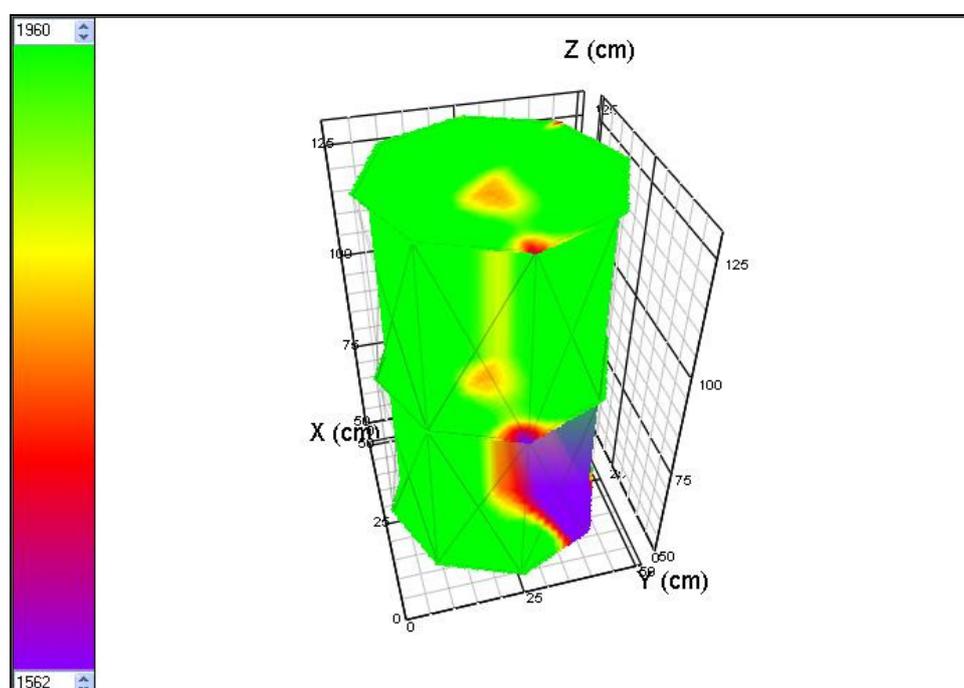


Figura 4.28. Imagem tomográfica em 3D – árvore 07.

Foi possível verificar pelas imagens tomográficas das seções A, B e C, que estas corresponderam com as condições reais das seções.

4.4.8 Imagens tomográficas para a árvore 08

Para a árvore 08, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.194 m/s e máxima de 1831 m/s. Verificou-se que esta faixa englobou valores de velocidade abaixo da velocidade adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s. A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 56% do valor da velocidade de referência, o que significou a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas. É importante destacar, que a máxima velocidade da

escala, neste caso, correspondeu a 85% da velocidade de referência, se situando abaixo de 90%.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como apresentando fraco desenvolvimento vegetativo, sendo autorizada a sua retirada.

Nas figuras 4.29, 4.30 e 4.31 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas das seções A, B e C. Na Figura 4.32 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 08.

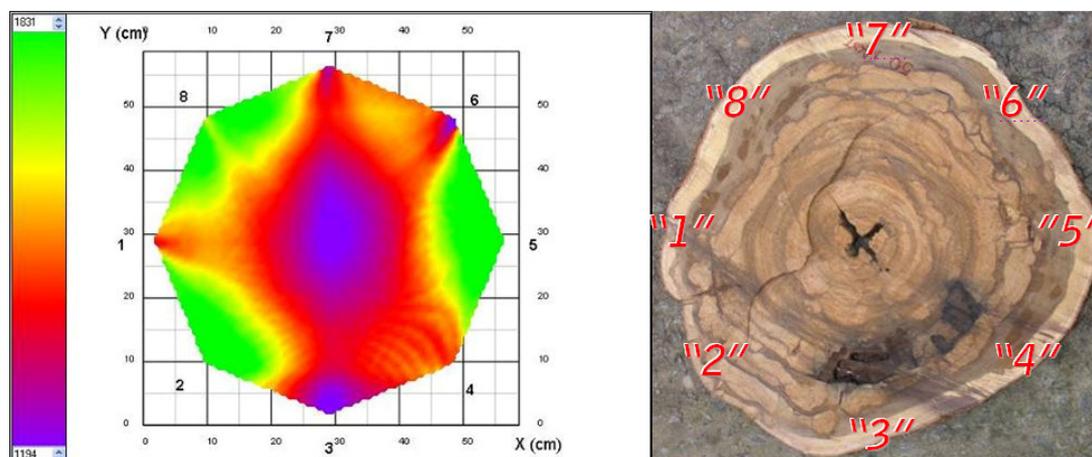


Figura 4.29. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 08.

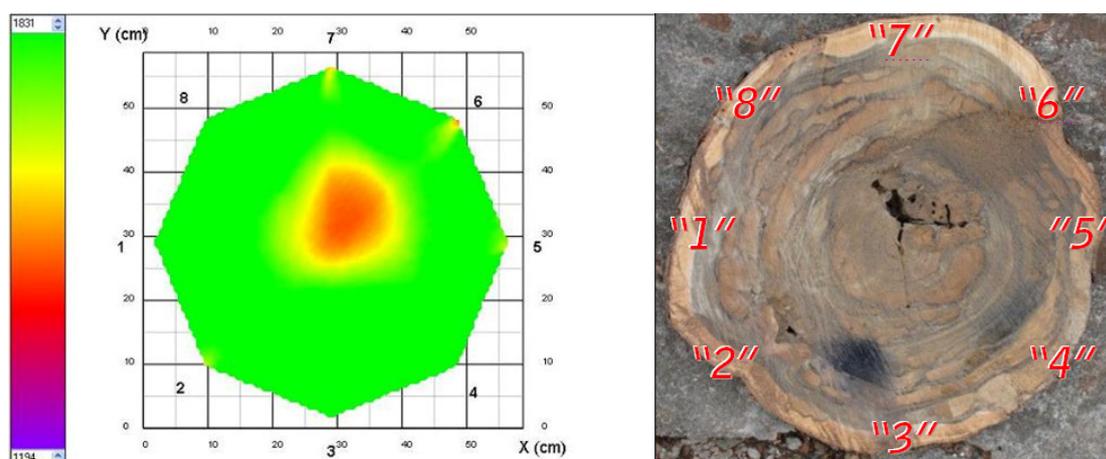


Figura 4.30. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 08.

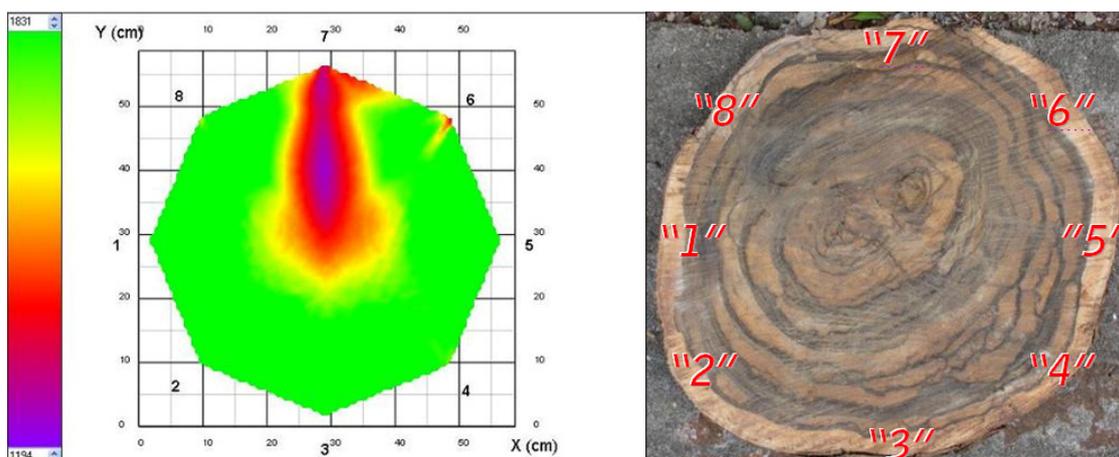


Figura 4.31. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 08.

Foi possível verificar pela seção A, a presença de menores velocidades de propagação da onda na região central e nas regiões próximas dos pontos “1-7-6-4-3”. Nas demais regiões apesar de apresentarem velocidades de propagação da onda próximas ao limite máximo da escala, que correspondeu a um valor inferior a 90% da velocidade de referência, isso não indica que toda essa região tenha como valor máximo esse limite superior, uma vez que há possibilidade de velocidades com valores superiores ao máximo da escala fornecida pelo software. Mas uma menor velocidade de propagação da onda nas seções pode ser explicada pela própria estrutura da seção, com grande descontinuidade de seus anéis de crescimento, interferindo assim na velocidade de propagação da onda. Ao analisar a imagem fotográfica correspondente a esta seção verificou-se a presença de orifícios na região central e de defeitos internos nas regiões próximas aos pontos “3-4”.

Na seção B, houve valores menores de velocidade de propagação da onda na região central, que na imagem fotográfica correspondeu a um orifício central. Nas demais regiões foi possível verificar também a presença de descontinuidades dos anéis de crescimento, o que pode significar menores velocidades de propagação da onda.

Na seção C, as menores velocidades de propagação da onda se concentraram na região central e próxima ao ponto “7”. Pela imagem fotográfica da seção C, foi possível verificar pequenos defeitos na região central e grande descontinuidade dos anéis de crescimento ao longo da seção.

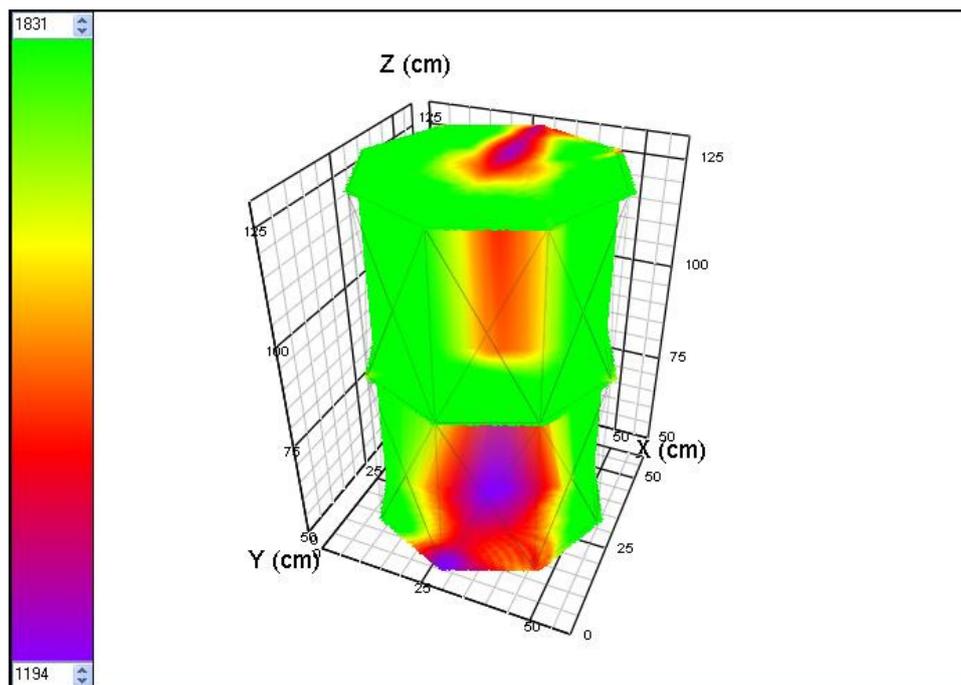


Figura 4.32. Imagem tomográfica em 3D – árvore 08.

Verificou-se pelo intervalo de velocidades de propagação da onda fornecido nas imagens tomográficas, a presença de madeira de menor qualidade, onde velocidades próximas do limite inferior indicaram defeitos mais significativos, como a presença de orifícios nas seções A e B e a presença de descontinuidades dos anéis de crescimento nas demais regiões, conforme demonstraram as imagens fotográficas das seções. Na seção C, os valores de velocidade próximos do limite mínimo da escala pode ser consequência da descontinuidade dos anéis de crescimento, exigindo assim, uma análise mais detalhada da estrutura interna do material.

4.4.9 Imagens tomográficas para a árvore 09

Para a árvore 09, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.365 m/s e máxima de 1824 m/s. Verificou-se que esta faixa englobou valores de velocidade abaixo da velocidade adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s. A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 64% do valor da velocidade de referência, o que significa a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas. É importante destacar, que a máxima velocidade da escala, neste caso, correspondeu a 85% da velocidade de referência, situando-se abaixo de 90%.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como apresentando razoável desenvolvimento vegetativo, sendo autorizada a sua retirada.

Nas figuras 4.33, 4.34 e 4.35 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas das seções A, B e C. Na Figura 4.36 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 09.

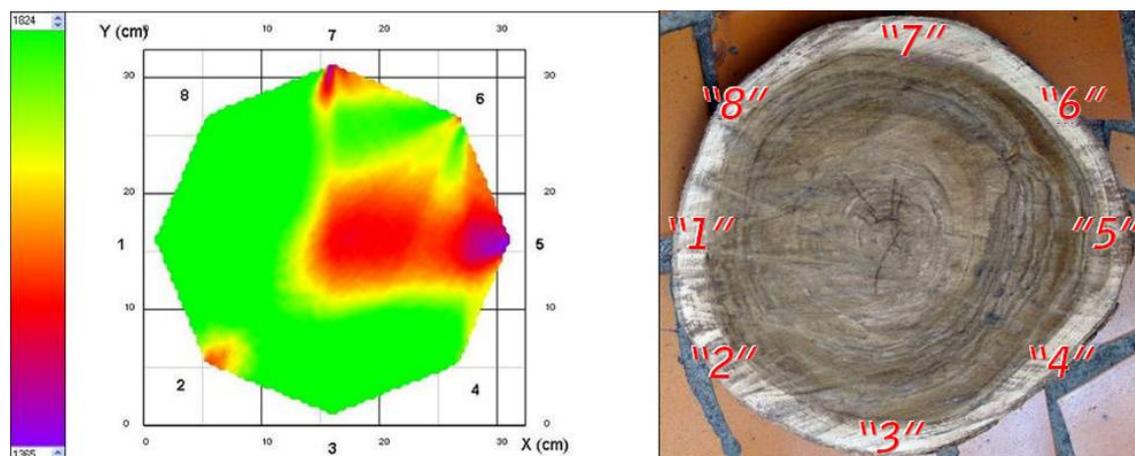


Figura 4.33. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 09.

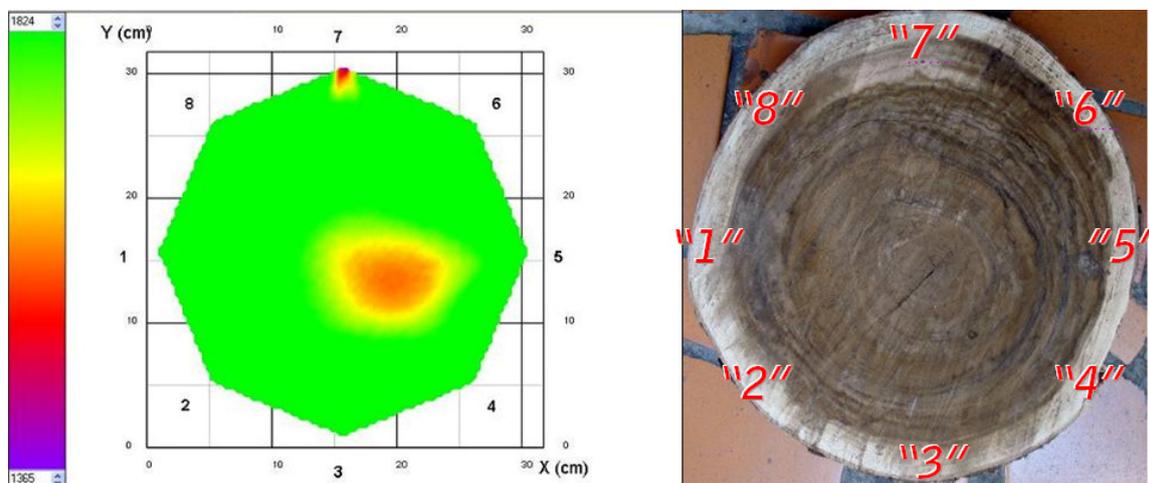


Figura 4.34. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 09.

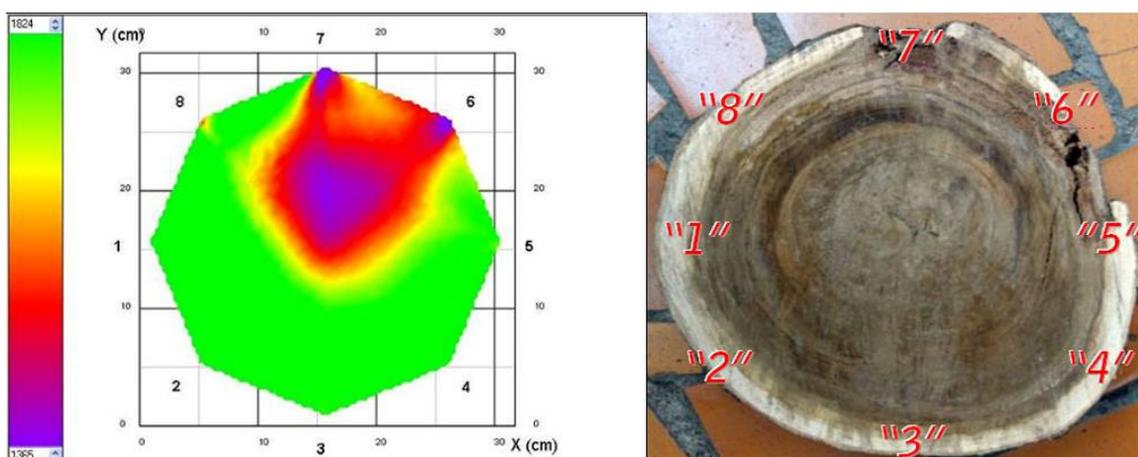


Figura 4.35. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 09.

Notou-se pelas seções A, B e C, a existência de regiões com velocidades de propagação da onda com valores intermediários da escala de velocidades fornecida pelo software e com velocidades de propagação próximas ao limite inferior da escala, indicando a existência de defeitos ou injúrias internas, que ao comparar com as imagens fotográficas, não foram visíveis. As seções A e B apresentaram algumas discontinuidades dos anéis de crescimento, o que pode ter acarretado uma diminuição da velocidade de propagação da onda. A seção C, próximo aos pontos “6-7”, apresentou defeitos, que foram identificados pela imagem tomográfica.

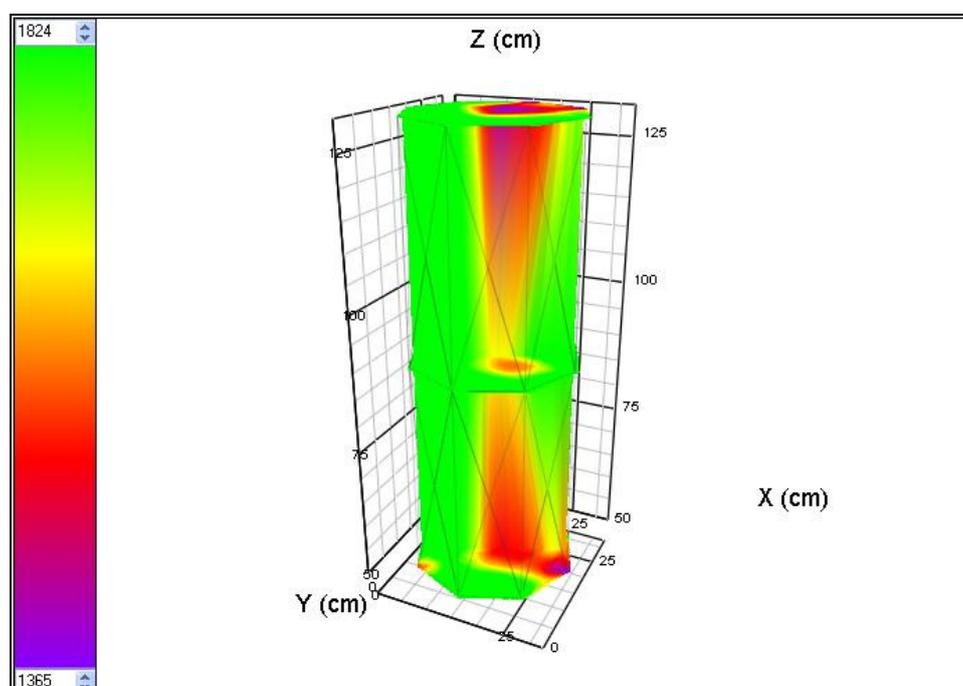


Figura 4.36. Imagem tomográfica em 3D – árvore 09.

As imagens tomográficas para esta árvore não retratou visivelmente a realidade, mas para entender a real situação da árvore, seria necessário um estudo mais detalhado de sua estrutura interna, o que poderia explicar os menores valores de velocidade de propagação da onda. A madeira é um material bastante complexo, onde sua estrutura pode acarretar grandes variações das suas propriedades físicas e mecânicas.

4.4.10 Imagens tomográficas para a árvore 10

Para a árvore 10, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.674 m/s e máxima de 2.056 m/s. Verificou-se que esta faixa se encontrou abaixo da velocidade adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s. A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 78% do valor da velocidade de referência, o que significou a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas. Mas notou-se que não houve nas imagens tomográficas velocidades próximas a este limite mínimo da escala e sim predominância de velocidades próximas ao limite superior que correspondeu a 96% da velocidade de referência, indicando que provavelmente a seção não apresentava defeitos ou injúrias internas.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como apresentando bom estado fitossanitário e desenvolvimento vegetativo. O pedido de retirada foi devido à interferência da árvore com a entrada de uma residência.

Nas figuras 4.37, 4.38 e 4.39 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas das seções A, B e C. Na Figura 4.40 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 10.

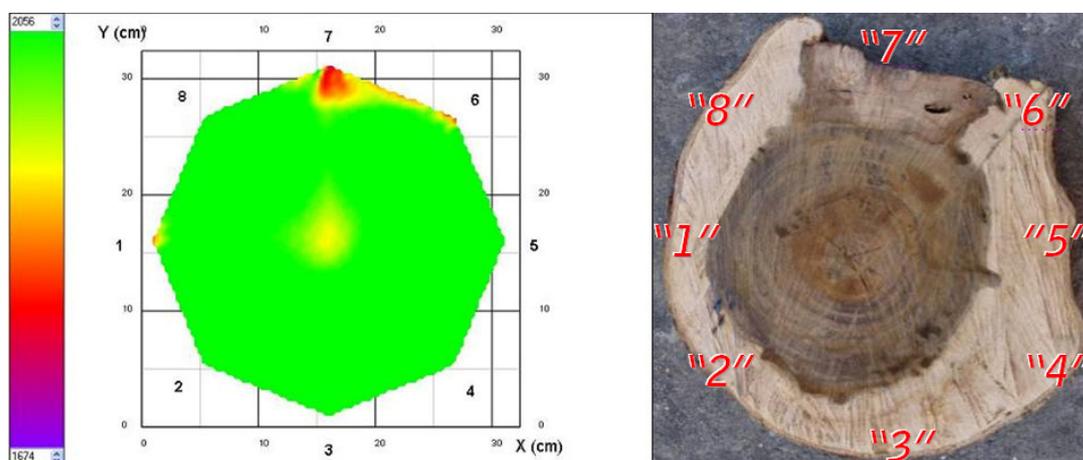


Figura 4.37. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 10.

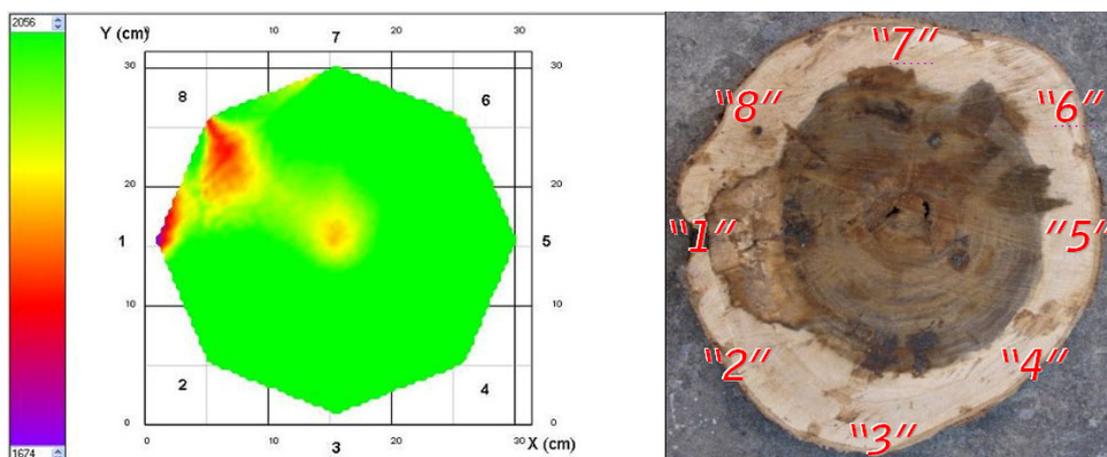


Figura 4.38. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 10.

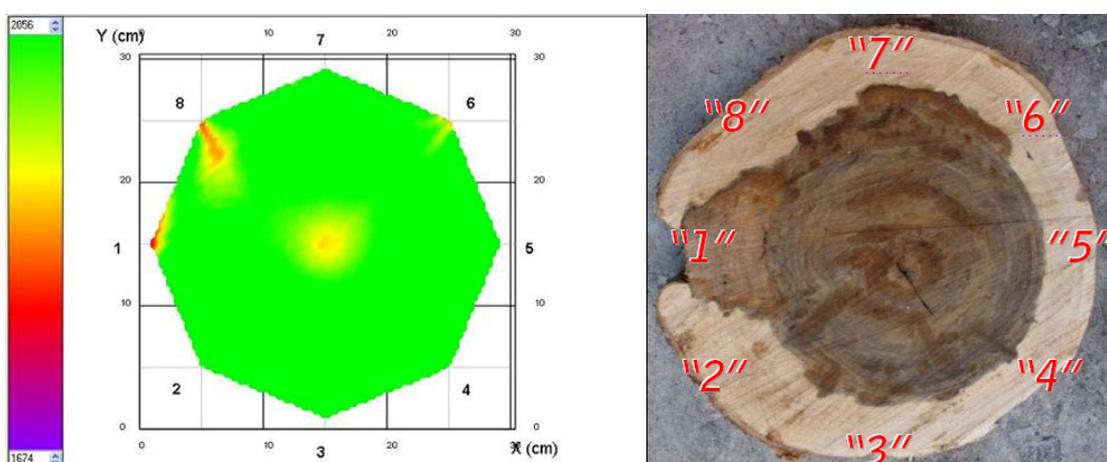


Figura 4.39. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 10.

Foi possível verificar pelas seções A, B e C, a presença de pequenas regiões com velocidades de propagação da onda intermediárias da escala fornecida pelo software, que ao ser comparado com as imagens fotográficas significaram pequenos defeitos nas seções. A estrutura das seções se encontrava em bom estado, com densidades elevadas, correspondendo assim aos valores de velocidade de propagação da onda bem próximos da velocidade de referência, ou mesmo acima desta, uma vez que pode haver nas seções velocidades acima da velocidade máxima da escala.

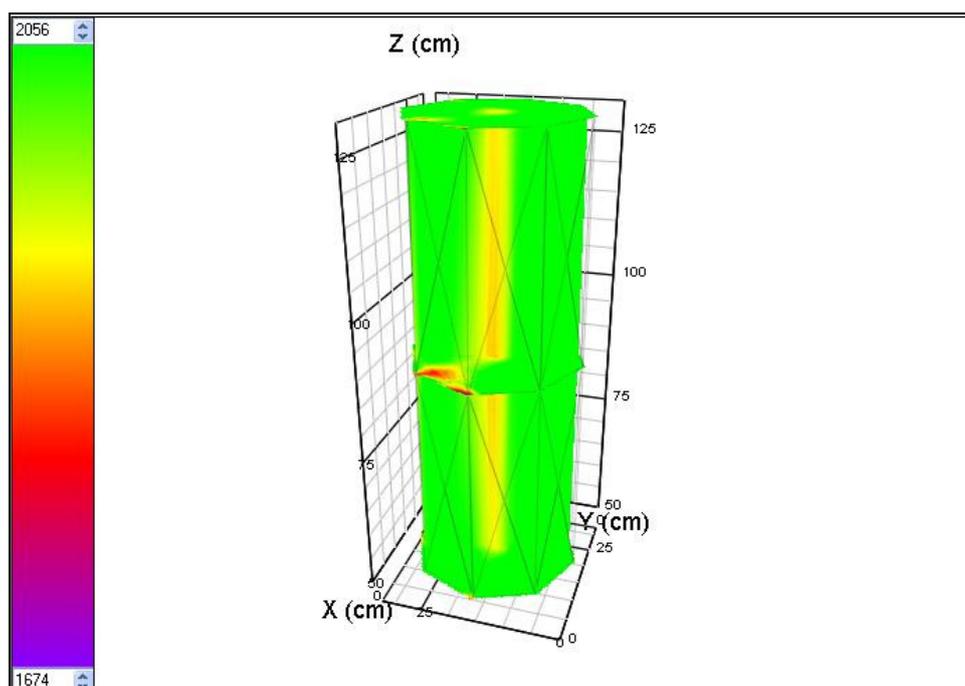


Figura 4.40. Imagem tomográfica em 3D – árvore 10.

Verificou-se uma grande semelhança entre as informações fornecidas pela imagem tomográfica e a situação real da árvore.

4.4.11 Imagens tomográficas para a árvore 11

Para a árvore 11, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.620 m/s e máxima de 2.109 m/s. Verificou-se que esta faixa englobou valores de velocidade abaixo da velocidade adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s. A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 76% do valor da velocidade de referência, o que significou a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas. Mas notou-se que não houve nas imagens tomográficas velocidades próximas a este limite mínimo da escala e sim predominância de velocidades próximas ao limite superior que correspondeu a 99% da velocidade de referência, indicando que provavelmente não havia presença de defeitos ou injúrias internas.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como morta, sendo autorizada a sua retirada.

Nas figuras 4.41, 4.42 e 4.43 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas das seções A, B e C. Na Figura 4.44 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 11.

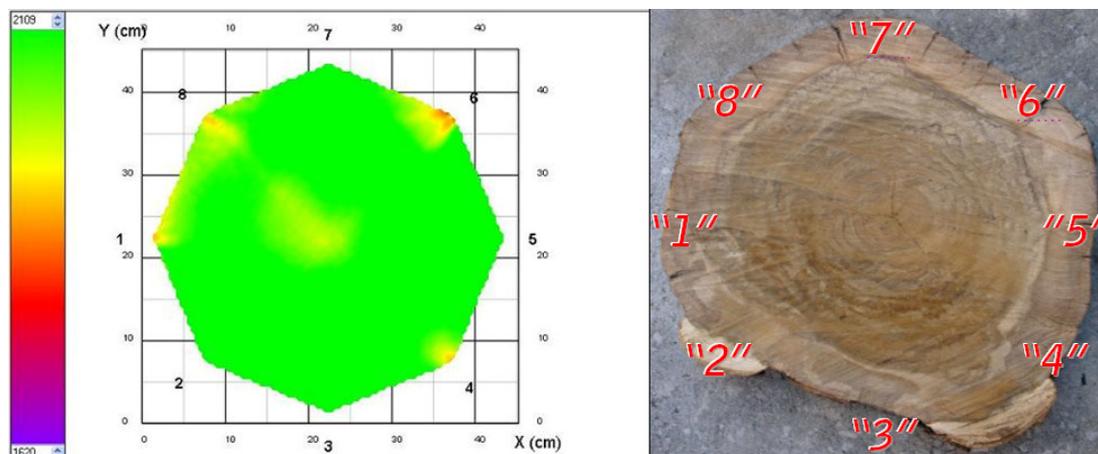


Figura 4.41. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 11.

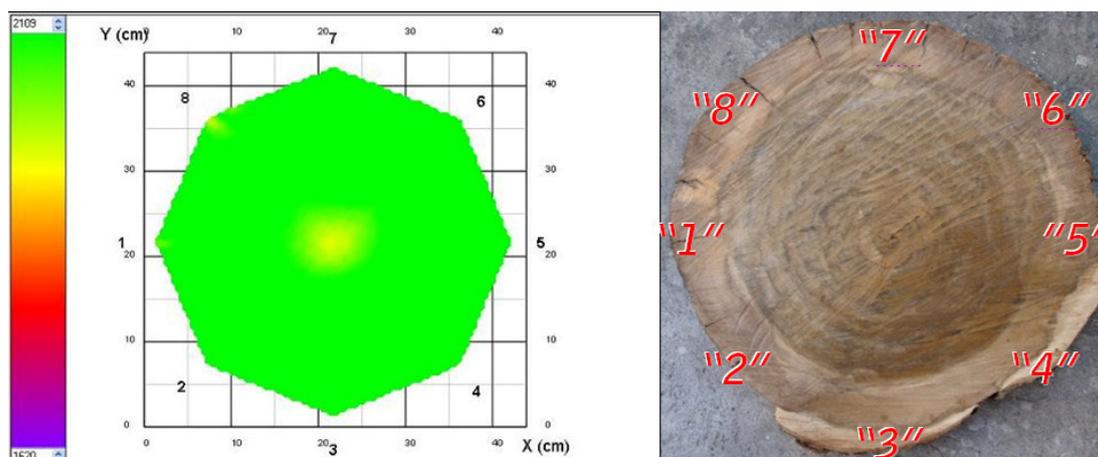


Figura 4.42. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 11.

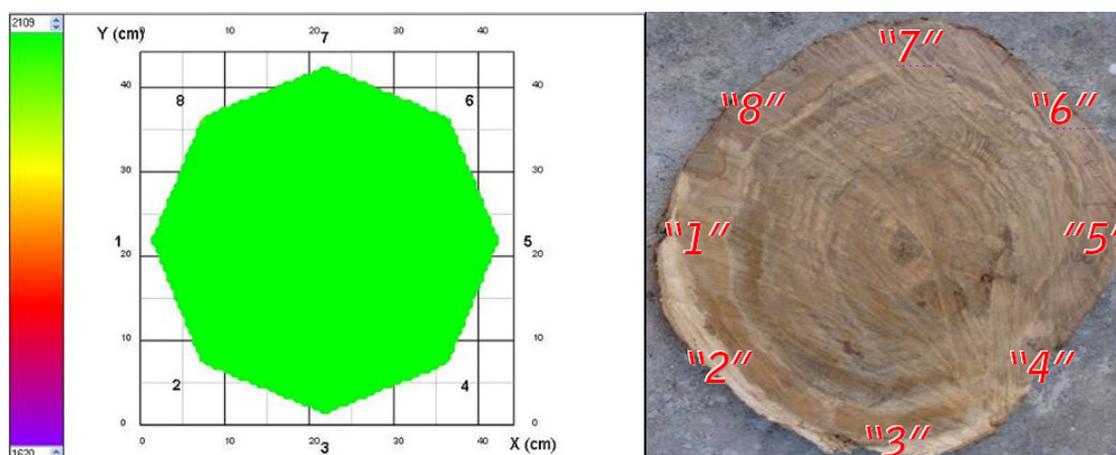


Figura 4.43. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 11.

Notou-se pelas seções A e B, a presença de regiões pouco significativas com velocidades de propagação da onda intermediárias da escala fornecida pelo software, com predominância de velocidades próximas ao limite máximo da escala ou mesmo acima deste. Na seção C, toda a área da seção apresentou velocidades próximas do limite superior da escala de velocidades, ou mesmo acima deste limite. Esses valores corresponderam a valores muito próximos da velocidade de referência ou mesmo acima desta, indicando que não havia presença de defeitos ou injúrias internas. Ao verificar as imagens fotográficas das seções foi possível notar que não houve presença de defeitos ou injúrias internas.

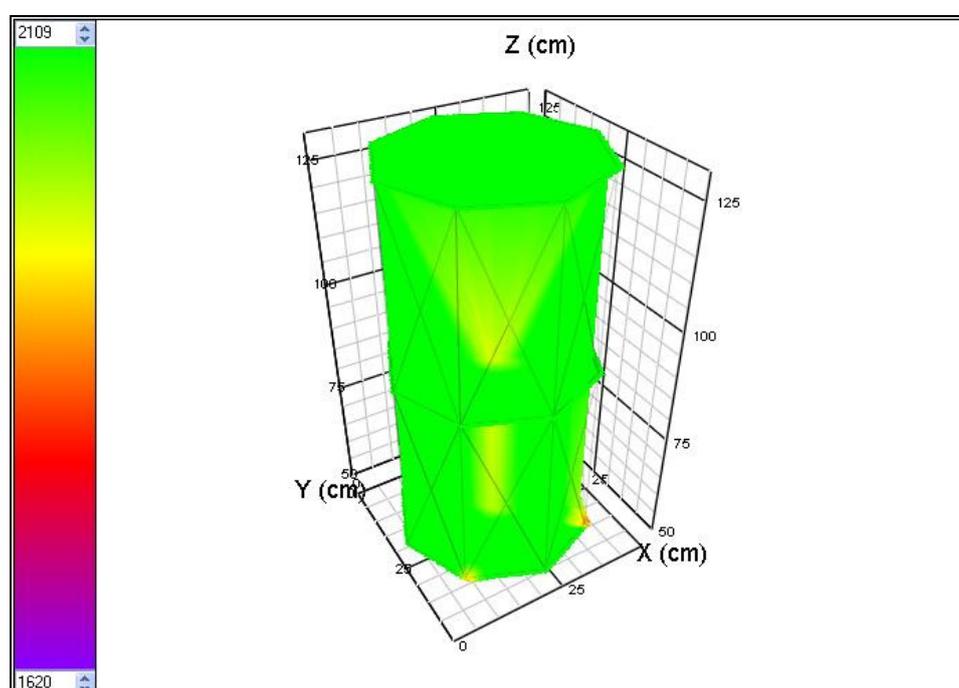


Figura 4.44. Imagem tomográfica em 3D – árvore 11.

Verificou-se uma grande semelhança entre as informações fornecidas pela imagem tomográfica e a situação real da árvore.

4.4.12 Imagens tomográficas para a árvore 12

Para a árvore 12, o software que gerou a imagem utilizou como escala a seguinte faixa de velocidade de propagação da onda: velocidade mínima de 1.674 m/s e máxima de 2.083 m/s. Verificou-se que esta faixa englobou valores de velocidade abaixo da velocidade adotada como referência, que corresponde a 2.130 m/s. A velocidade mínima da escala do software correspondeu a 78% do valor de referência, o que significou a possibilidade de presença de defeitos ou injúrias internas. Mas foi possível verificar que apenas a seção A apresentou uma

pequena região da seção com velocidades próximas a este limite mínimo da escala, havendo nas seções, predominância de velocidades próximas ao limite superior, que correspondeu a 97% do valor de referência, indicando que provavelmente não havia presença de defeitos ou injúrias internas nas seções B e C, e que havia possibilidade de defeito ou injúria apenas na seção A.

Ao verificar o relatório emitido pela equipe do Departamento de Áreas Verdes, esta árvore foi avaliada pela equipe como apresentando bom estado fitossanitário e ótimo crescimento vegetativo. O pedido para a retirada foi a interferência com a entrada de um consultório a ser construído no local.

Nas figuras 4.45, 4.46 e 4.47 são apresentadas as imagens tomográficas e as respectivas imagens fotográficas das seções A, B e C. Na Figura 4.48 é apresentada a imagem tomográfica em 3D da árvore 12.

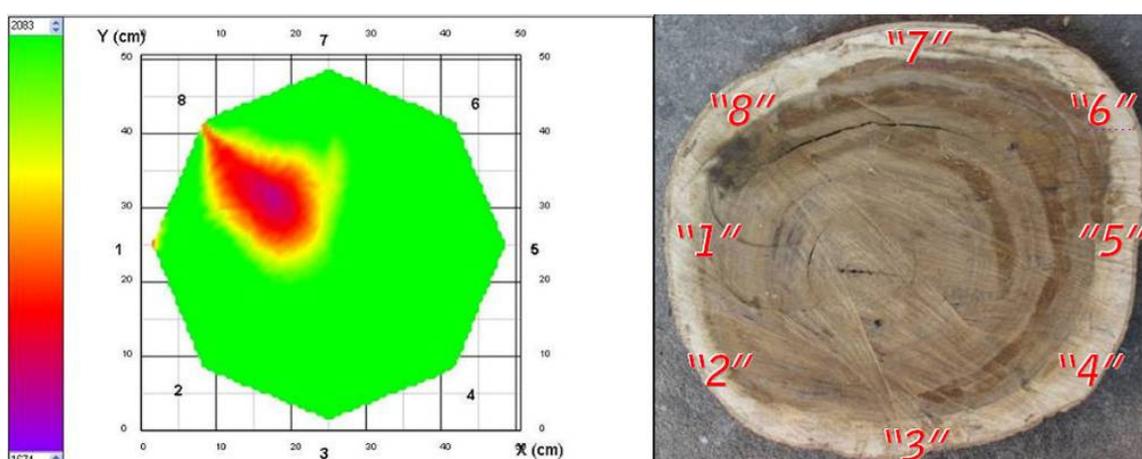


Figura 4.45. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção A – árvore 12.

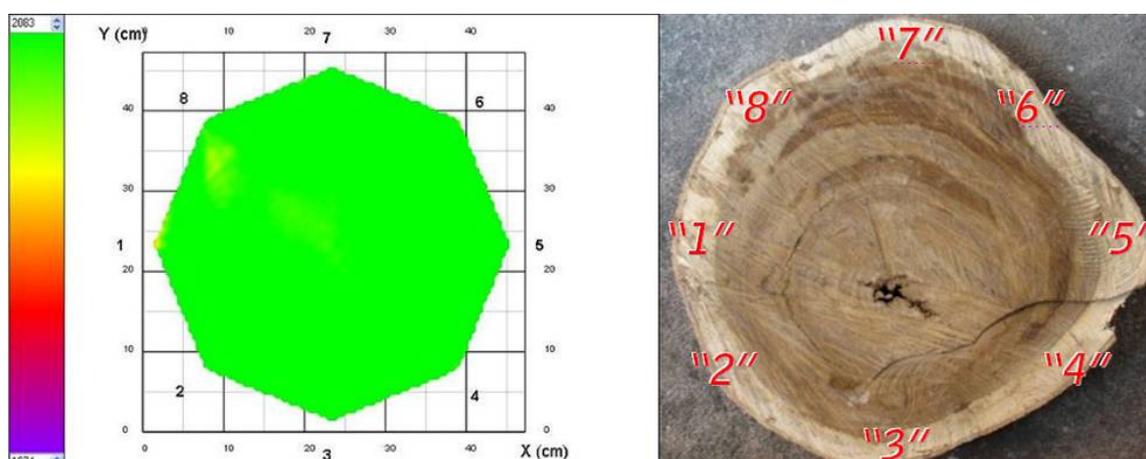


Figura 4.46. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção B – árvore 12.

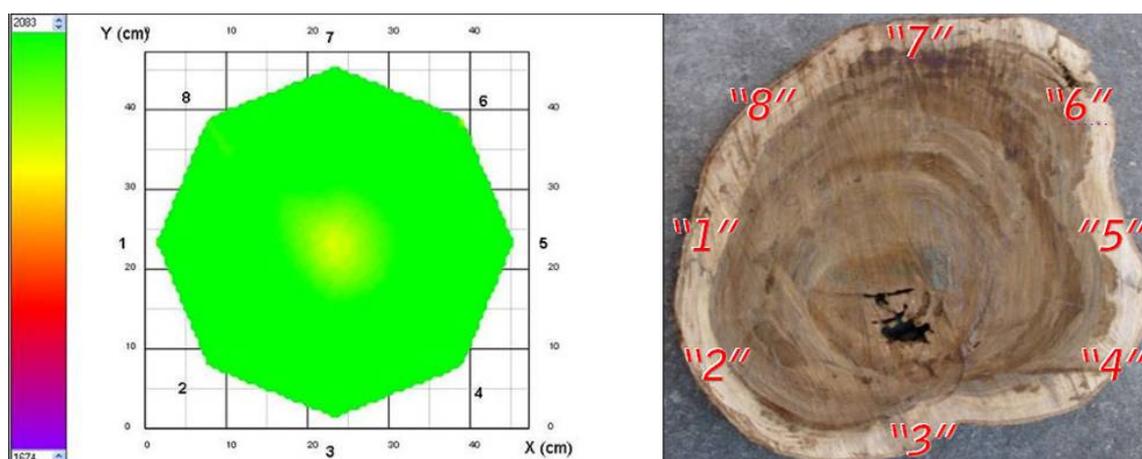


Figura 4.47. Imagem tomográfica e imagem fotográfica da seção C – árvore 12.

Notou-se pela seção A, a presença de uma região com velocidade de propagação da onda intermediária na escala de velocidade, significando a existência de algum defeito ou injúria, mas pouco significativo, pois não está no limite inferior da velocidade. Ao comparar com a imagem fotográfica, não foi possível verificar a presença de defeitos ou injúrias internas, sendo que essa diferença de velocidade de propagação da onda pode ter ocorrido devido à estrutura interna do material, não visível. Na seção B, os valores de velocidade de propagação da onda encontraram-se próximos ao limite superior da escala (que correspondeu a 97% da velocidade de referência), ou mesmo, acima deste, indicando a não existência de defeitos ou injúrias na seção. Ao verificar a imagem fotográfica da seção foi possível notar um pequeno orifício, o qual não foi identificado pela imagem. Na seção C, verificou-se a presença de uma pequena região com velocidade de propagação da onda intermediária na escala de velocidades devido a presença do orifício na seção.

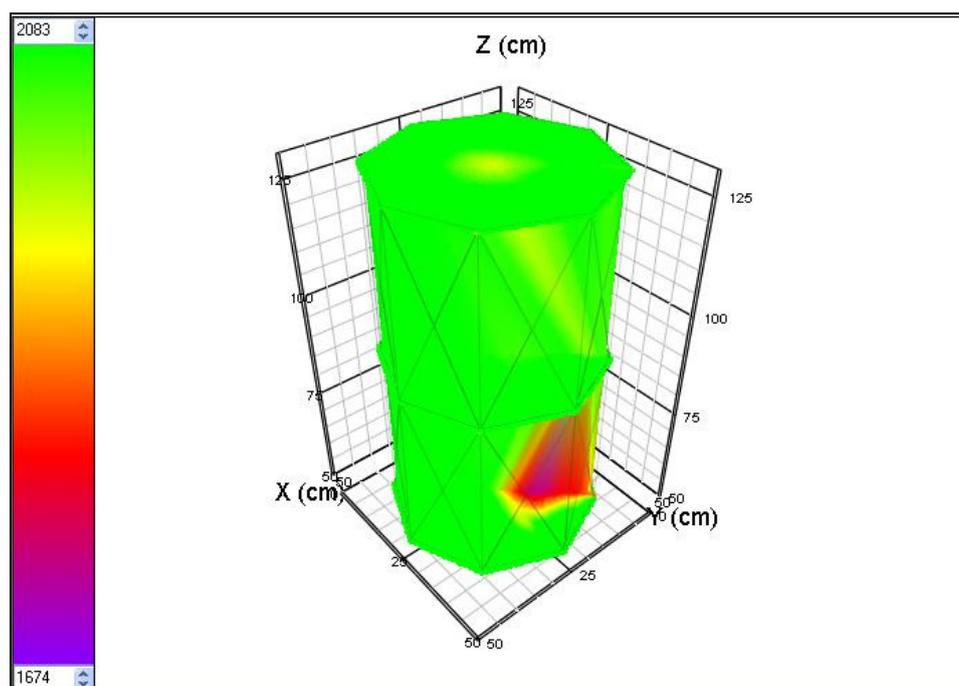


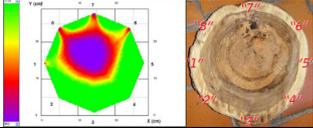
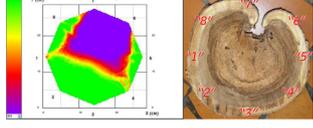
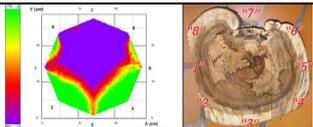
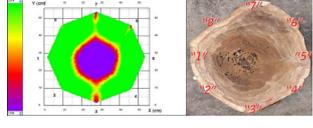
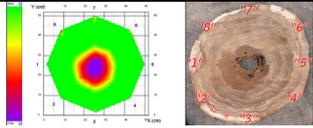
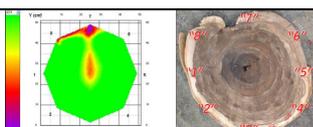
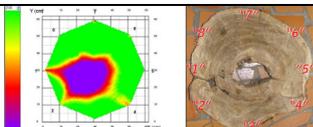
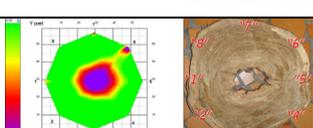
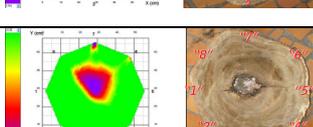
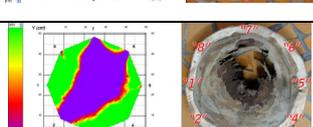
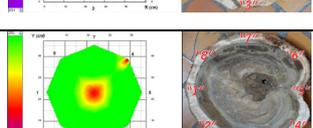
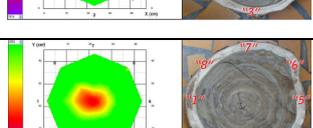
Figura 4.48. Imagem tomográfica em 3D – árvore 12.

Verificou-se que a seção C foi a que apresentou melhor semelhança entre a imagem tomográfica e a situação real da seção.

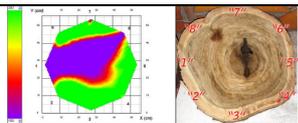
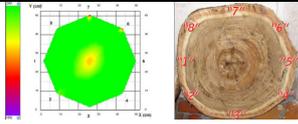
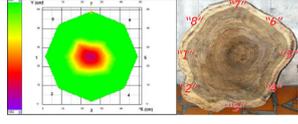
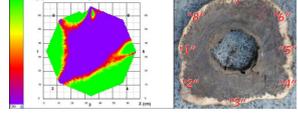
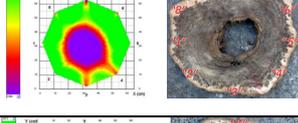
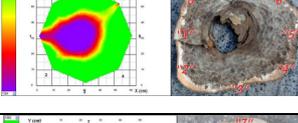
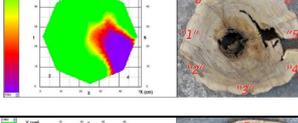
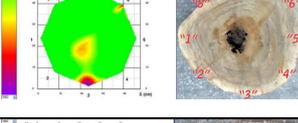
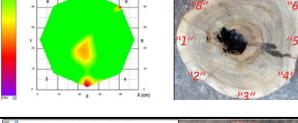
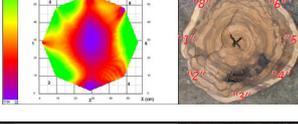
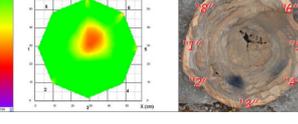
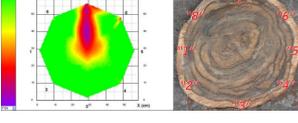
4.4.13 Síntese da análise das imagens tomográficas

Conforme as análises apresentadas, onde foram comparadas as imagens tomográficas com as imagens fotográficas das seções, foi possível verificar que a tomografia por ondas de tensão retratou adequadamente, na maioria das seções, a real situação, identificando principalmente a presença de defeitos ou injúrias mais significativas. Alguns defeitos ou injúrias indicadas pela imagem e não visíveis nas imagens fotográficas das seções podem estar relacionados à estrutura interna da madeira, exigindo análises mais complexas do material. No Quadro 4.1 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos para as 12 árvores estudadas.

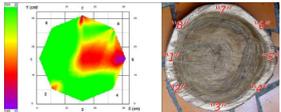
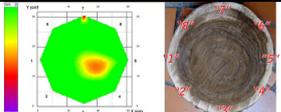
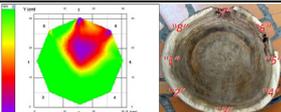
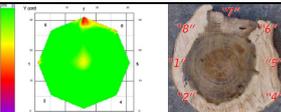
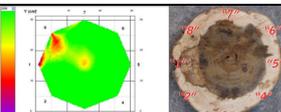
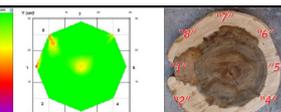
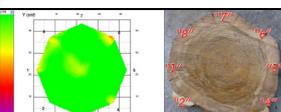
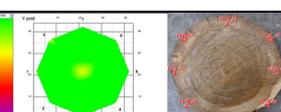
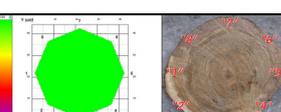
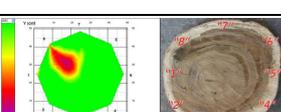
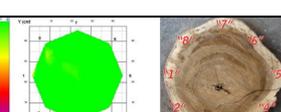
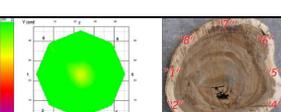
Quadro 4.1. Síntese das imagens tomográficas.

ÁRVORES	SEÇÕES	IMAGENS	RESULTADOS
ÁRVORE 01	SEÇÃO A		Imagem tomográfica identificou a madeira de aspecto friável principalmente na região do cerne.
	SEÇÃO B		Imagem tomográfica identificou a madeira de aspecto friável principalmente na região do cerne.
	SEÇÃO C		Imagem tomográfica identificou a madeira de aspecto friável principalmente na região do cerne.
ÁRVORE 02	SEÇÃO A		Imagem tomográfica identificou a madeira atacada por cupins na região do cerne.
	SEÇÃO B		Imagem tomográfica identificou a madeira atacada por cupins na região do cerne.
	SEÇÃO C		Imagem tomográfica identificou orifício causado por cupins na região do cerne, sendo este de menor magnitude que nas seções A e B.
ÁRVORE 03	SEÇÃO A		Imagem tomográfica identificou a madeira atacada por cupins na região do cerne.
	SEÇÃO B		Imagem tomográfica identificou a madeira atacada por cupins na região do cerne.
	SEÇÃO C		Imagem tomográfica identificou a madeira atacada por cupins na região do cerne.
ÁRVORE 04	SEÇÃO A		Imagem tomográfica identificou a madeira atacada por cupins principalmente na região do cerne e próximas dos pontos “7-6-2”.
	SEÇÃO B		Imagem tomográfica identificou pequenos defeitos na região central, de menor magnitude que na seção A.
	SEÇÃO C		Imagem tomográfica identificou pequenos defeitos na região central, de menor magnitude que na seção A.

Quadro 4.1. Síntese das imagens tomográficas. Continuação (1).

ÁRVORES	SEÇÕES	IMAGENS	RESULTADOS
ÁRVORE 05	SEÇÃO A		Imagem tomográfica identificou a presença principalmente do defeito na região central da seção.
	SEÇÃO B		Imagem tomográfica mostrou que a maior parte da seção se encontrava em boas condições, o que correspondeu com a realidade.
	SEÇÃO C		Imagem tomográfica identificou menores velocidades na região central, mas acima da velocidade mínima da escala.
ÁRVORE 06	SEÇÃO A		Imagem tomográfica identificou o orifício na seção na região do cerne.
	SEÇÃO B		Imagem tomográfica identificou o orifício na seção na região do cerne.
	SEÇÃO C		Imagem tomográfica o orifício na seção na região do cerne.
ÁRVORE 07	SEÇÃO A		Imagem tomográfica identificou menores velocidades próximas aos pontos “4-5” e região central, onde a madeira apresentava defeitos.
	SEÇÃO B		Imagem tomográfica identificou menores velocidades na região central, onde a madeira apresentava orifício.
	SEÇÃO C		Imagem tomográfica identificou menores velocidades na região central, onde a madeira apresentava orifício.
ÁRVORE 08	SEÇÃO A		Imagem tomográfica identificou algumas discontinuidades dos anéis de crescimento.
	SEÇÃO B		Imagem tomográfica identificou pequeno orifício na região central.
	SEÇÃO C		Imagem tomográfica identificou a algumas discontinuidades dos anéis de crescimento.

Quadro 4.1. Síntese das imagens tomográficas. Continuação (2).

ÁRVORES	SEÇÕES	IMAGENS	RESULTADOS
ÁRVORE 09	SEÇÃO A		A imagem tomográfica identificou defeitos não presentes na seção. Seria necessária análise da estrutura interna.
	SEÇÃO B		A imagem tomográfica identificou defeitos não presentes na seção. Seria necessária análise da estrutura interna.
	SEÇÃO C		A imagem tomográfica identificou defeitos não presentes na seção. Seria necessária análise da estrutura interna da madeira.
ÁRVORE 10	SEÇÃO A		A imagem tomográfica identificou apenas pequenos defeitos na região central, correspondendo a situação real da seção.
	SEÇÃO B		A imagem tomográfica identificou apenas pequenos defeitos na região central, correspondendo a situação real da seção.
	SEÇÃO C		A imagem tomográfica identificou apenas pequenos defeitos na região central, correspondendo a situação real da seção.
ÁRVORE 11	SEÇÃO A		Pela imagem tomográfica foi possível verificar que não havia presença de defeitos, que correspondeu a realidade.
	SEÇÃO B		Pela imagem tomográfica foi possível verificar que não havia presença de defeitos, que correspondeu a realidade.
	SEÇÃO C		Pela imagem tomográfica foi possível verificar que não havia presença de defeitos, que correspondeu a realidade.
ÁRVORE 12	SEÇÃO A		Imagem tomográfica identificou pequeno defeito, que não foi identificado na seção, necessitando de análise interna.
	SEÇÃO B		Imagem tomográfica não identificou pequeno defeito na seção.
	SEÇÃO C		Imagem tomográfica identificou pequeno defeito na seção.

É importante ressaltar que para a análise da imagem tomográfica, torna-se essencial a velocidade de referência de propagação da onda da espécie analisada, a qual serve de

parâmetro de comparação com as velocidades obtidas durante a aplicação da técnica de ondas de tensão na árvore, para verificar a existência ou não de defeitos ou injúrias.

Os relatórios realizados pela Secretaria de Meio Ambiente são pouco confiáveis para a tomada de decisão quanto à necessidade de manejo do elemento, pois são subjetivos e carentes de informações, e muitas vezes não retratam a real situação em que a árvore se encontra. Para exemplificar, no relatório referente à árvore 06, constava que esta se encontrava com bom estado fitossanitário e com bom desenvolvimento vegetativo, sendo que ao verificar as imagens tomográficas para esta árvore foi possível verificar a presença de grande área afetada por cupins (presença de orifícios). Assim, é fundamental a associação da avaliação visual externa com a avaliação interna, permitindo assim a tomada de decisão com maior confiabilidade.

4.5. Verificação da acuracidade da tomografia por ondas de tensão: correlação entre a velocidade de propagação da onda e a densidade aparente

A seguir são apresentados os gráficos de perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente para as seções C de todas as árvores ensaiadas. Os gráficos e diagramas das seções A e B se encontram no Apêndice A. Os corpos-de-prova sem valores correspondentes de densidade aparente e velocidade de propagação da onda correspondem aos orifícios na seção, onde não foi possível a extração de corpos-de-prova.

Os gráficos de perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda permitem analisar a tendência de distribuição dos pontos. Os diagramas de dispersão possibilitam verificar o comportamento da velocidade de propagação da onda em função da densidade do material, onde o valor do coeficiente de determinação (R^2) permite verificar a correlação entre a densidade aparente e a velocidade de propagação da onda, no teor de umidade do ensaio. Ressalta-se que objetivo do diagrama de dispersão não foi o estabelecimento de um modelo, e sim a determinação do coeficiente de determinação (R^2).

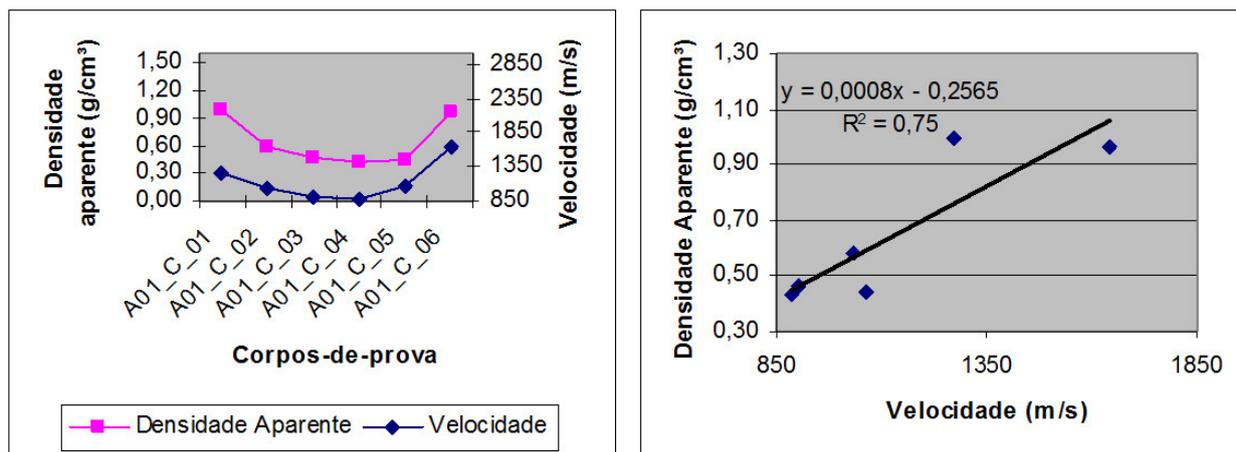


Figura 4.49. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 01 – Seção C.

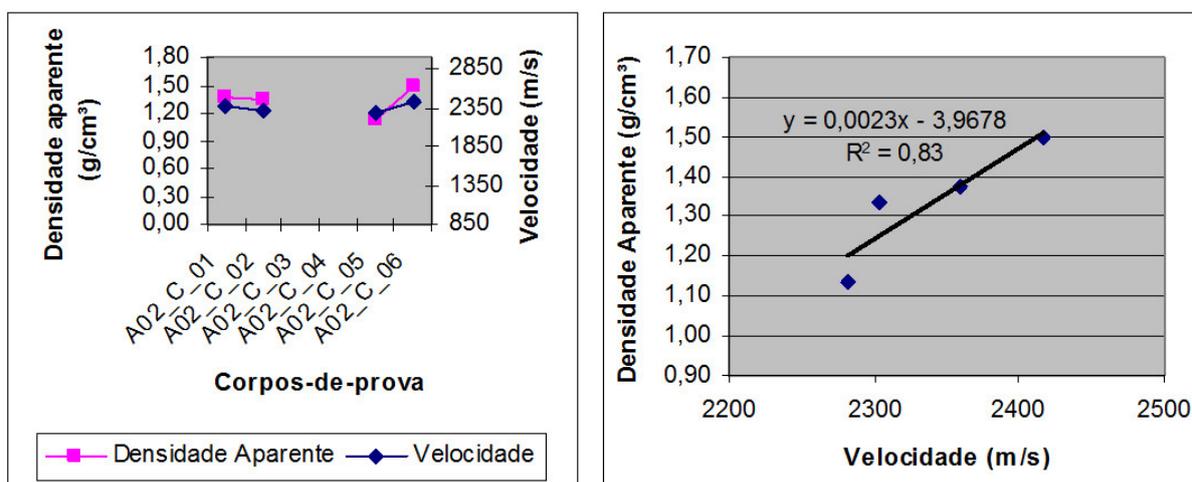


Figura 4.50. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 02 – Seção C.

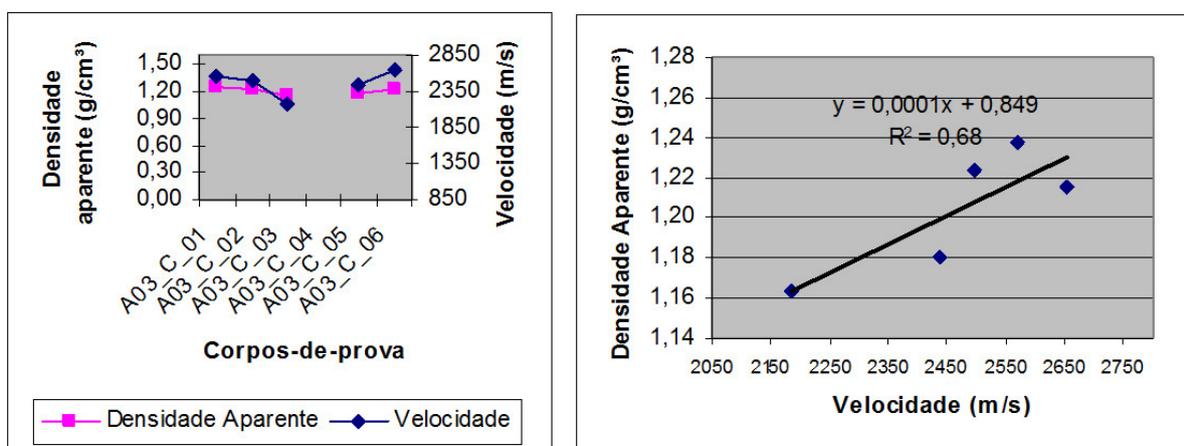


Figura 4.51. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 03 – Seção C.

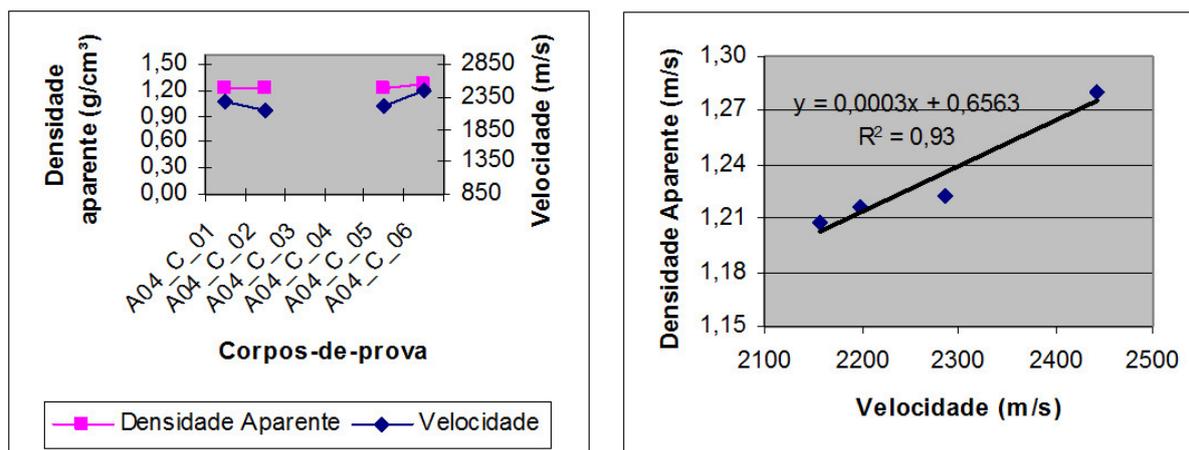


Figura 4.52. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 04 – Seção C.

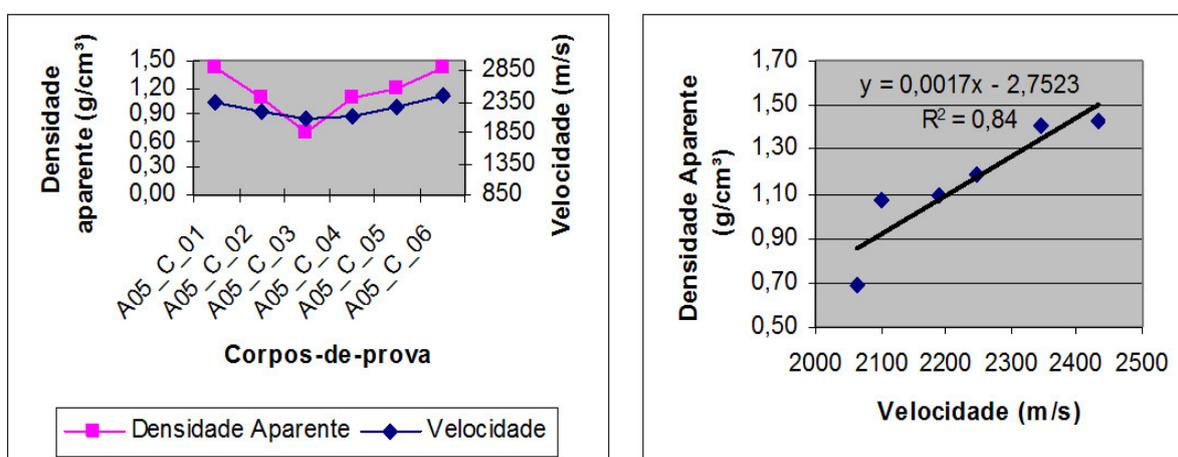


Figura 4.53. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 05 – Seção C.

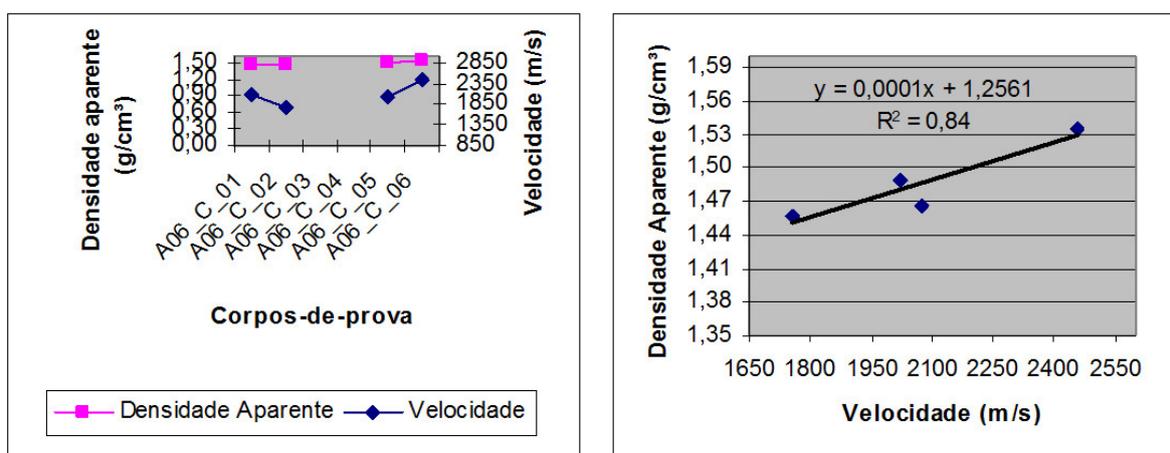


Figura 4.54. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 06 – Seção C.

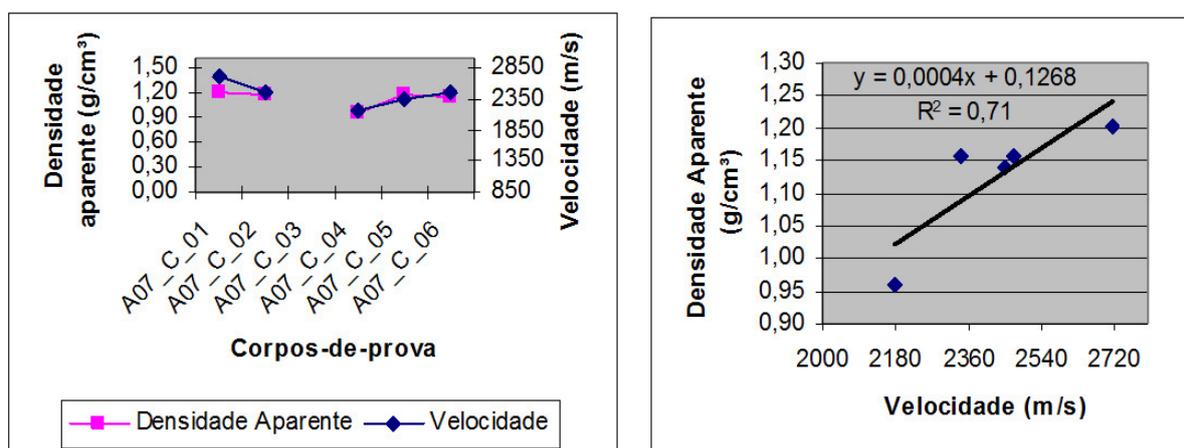


Figura 4.55. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 07 – Seção C.

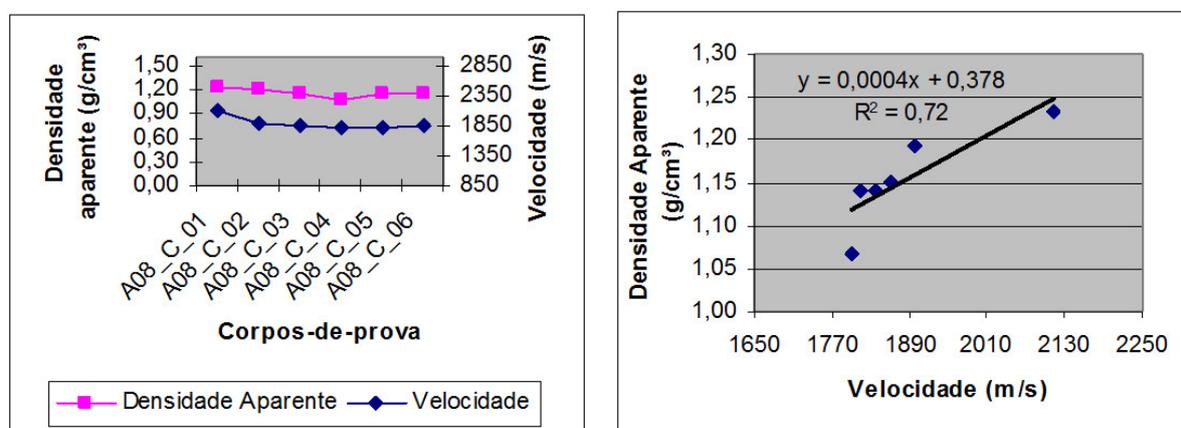


Figura 4.56. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 08 – Seção C.

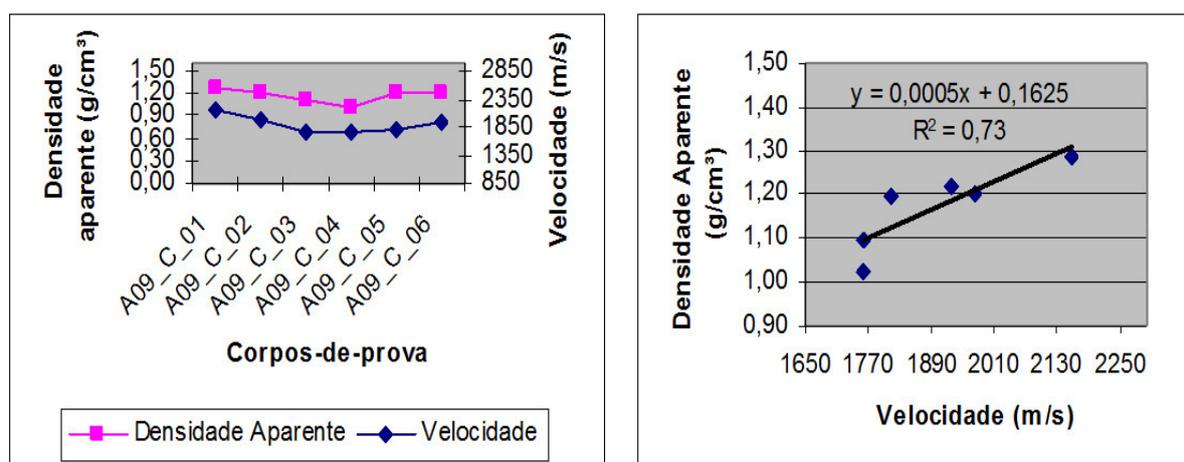


Figura 4.57. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 09 – Seção C.

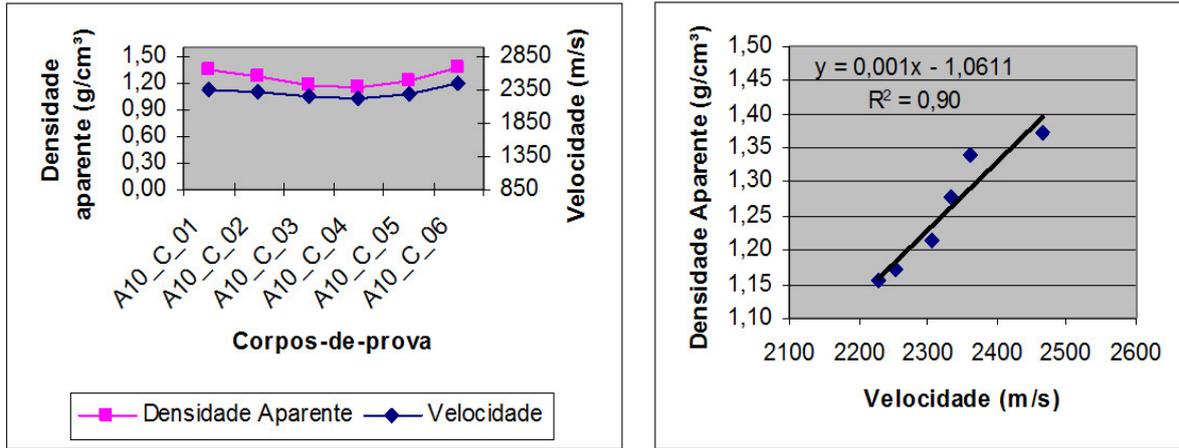


Figura 4.58. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 10 – Seção C.

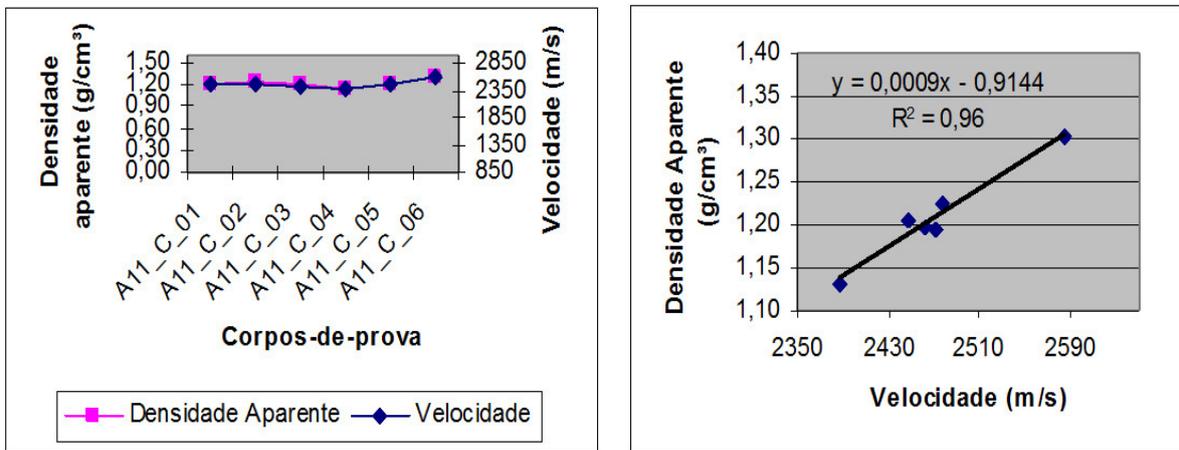


Figura 4.59. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 11 – Seção C.

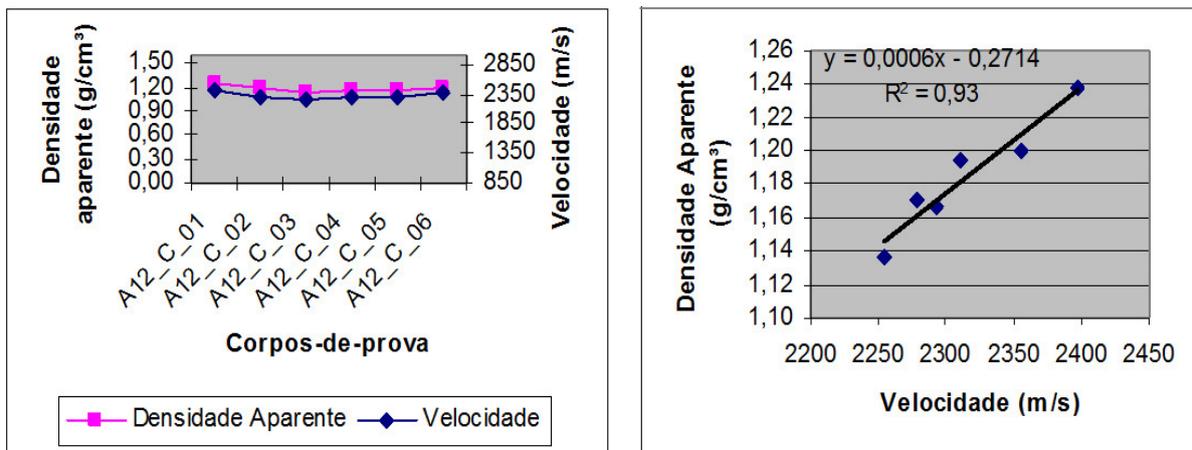


Figura 4.60. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 12 – Seção C.

Foi possível verificar que os gráficos de perfil de densidade aparente (g/cm^3) e de velocidade de propagação da onda (m/s) das amostras da espécie *Caesalpinea peltophoroides* apresentaram tendência de distribuição dos pontos semelhantes.

Pelos diagramas de dispersão verificou-se a tendência de aumento nos valores de velocidade de propagação da onda com o incremento da densidade aparente, o que está de acordo com Carrasco; Azevedo Júnior (2003). Embora a densidade aumente, há um aumento em maior intensidade do módulo de elasticidade, o que faz com o quociente entre os dois seja favorável ao aumento da velocidade de propagação da onda. O teor de umidade, como se encontrava acima do ponto de saturação das fibras, interfere muito pouco no relacionamento entre as variáveis.

Para medir o nível de significância, foram criadas faixas de significância, conforme apresentado no Quadro 4.2. Essas faixas foram estabelecidas considerando as características intrínsecas da madeira e estudos de outros autores, a partir do qual se pode considerar como alta significância para a madeira, valores de R^2 superiores a 0,65. Para cada nível de significância foi estabelecida uma cor correspondente, para auxiliar na visualização da Tabela 4.13, que enquadra todas as seções nos níveis de significância.

Quadro 4.2. Níveis de significância.

Baixa significância	0,40 à 0,55	
Média significância	0,56 à 0,65	
Alta significância	0,66 à 0,80	
Muito alta significância	acima de 0,80	

Tabela 4.13. Valores de R^2 .

Árvore/Seção	A	B	C
01	0,61	0,95	0,75
02	0,8	0,72	0,83
03	0,73	0,77	0,68
04	0,7	0,86	0,93
05	0,69	0,83	0,84
06	0,95	0,76	0,84
07	0,6	0,61	0,71
08	0,6	0,65	0,72
09	0,74	0,69	0,73
10	0,75	0,82	0,9
11	0,85	0,87	0,96
12	0,85	0,92	0,93

Pela Tabela 4.13 foi possível notar a predominância de seções que se enquadraram no nível de muito alta significância (R^2 acima de 0,80), demonstrando a alta precisão do equipamento na avaliação interna de árvores urbanas.

Pela Tabela 4.14 e Figura 4.61, é possível visualizar a quantidade de seções por nível de significância. De todas as seções de todas as árvores estudadas, 44% se enquadraram como muito alta significância, que somada as que se enquadram como alta significância, correspondem a 86% das seções, permitindo verificar a alta correlação entre a densidade aparente e a velocidade de propagação da onda obtida com a técnica de ondas de tensão, comprovando a eficácia da técnica para avaliação de árvores urbanas.

Tabela 4.14. Quantidade e porcentagem de seção por nível de significância.

Nível de Significância	Quantidade Seção	Porcentagem
Baixa significância	0	0%
Média significância	5	14%
Alta significância	15	42%
Muito alta significância	16	44%
Total	36	100%

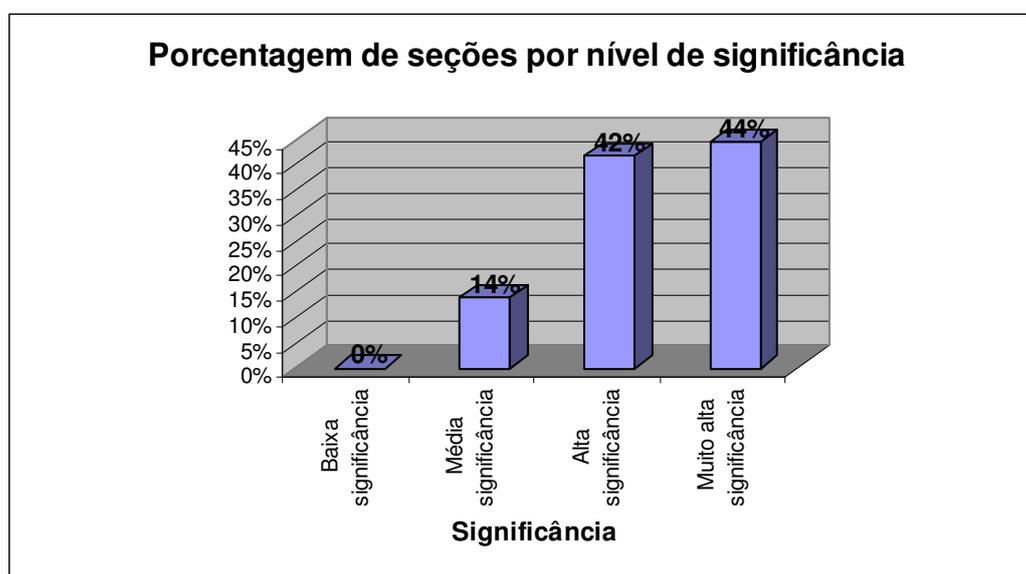


Figura 4.61. Porcentagem de seção por nível de significância.

Embora não tenha sido uma regra, verificou-se uma tendência de maiores valores de R^2 , quando ocorreram menores variações da densidade aparente ao longo da seção, verificando-se assim uma tendência de maior precisão das informações do equipamento, quanto maior for a homogeneidade da densidade do material.

4.5.1 Comparação entre as árvores sem e com a presença de orifícios

Para analisar a eficácia do equipamento na detecção de defeitos extremos, no caso, a presença de orifícios, foi realizado um estudo para verificar o enquadramento das seções sem e com a presença de orifícios nas faixas de significância, conforme pode ser visualizado na Tabela 4.15. Ressalta-se que foram consideradas todas as seções com presença de orifícios, inclusive com orifícios de pequena proporção.

Tabela 4.15. Número de seções por nível de significância separadas por presença e ausência de orifício.

Tipo de seção/ Nível de significância	Baixa significância	Média significância	Alta significância	Muito alta significância
Seção sem presença de orifício	0	1	7	12
Seção com presença de orifício	0	4	8	4

Considerando a faixa de muito alta significância, observou-se a predominância de seções sem presença de orifícios. No nível de alta significância o número de seções sem e com presença de orifícios foram próximos, com maior número de seções com presença de orifício se enquadrando neste nível, o que também ocorreu para a média significância. Na Tabela 4.16 é possível visualizar as seções sem a presença de orifícios (identificada pela cor cinza claro) e com a presença de orifícios (identificada pela cor cinza escuro) e os respectivos valores de coeficiente de determinação R^2 .

Pode-se assim comprovar que há uma tendência de melhor precisão do equipamento, quanto menor for a presença de defeitos internos, ou seja, quanto maior a homogeneidade da densidade do material (discutido no subitem anterior), mas isso não ocasiona grandes impactos, uma vez que as seções com presença de orifícios obtiveram valores de R^2 significativos, se enquadrando no mínimo no nível de média significância (R^2 entre 0,56 e 9,65 g/cm³), que para a madeira é bastante considerável.

Tabela 4.16. Indicação de seções sem presença de orifícios e com a presença de orifícios.

Árvore/Seção	A	B	C
01	0,61	0,95	0,75
02	0,8	0,72	0,83
03	0,73	0,77	0,68
04	0,7	0,86	0,93
05	0,69	0,83	0,84
06	0,95	0,76	0,84
07	0,6	0,61	0,71
08	0,6	0,65	0,72
09	0,74	0,69	0,73
10	0,75	0,82	0,9
11	0,85	0,87	0,96
12	0,85	0,92	0,93

Com os valores obtidos de R^2 , foi possível verificar que a técnica de ondas de tensão consiste em uma ferramenta confiável para a detecção de defeitos internos de árvores urbanas.

4.5.2 Verificação da melhor seção para realização de ensaios

Conforme já apresentado, para a realização dos ensaios experimentais foram empregadas três seções ao longo da árvore, sendo uma próxima da base, realizada a 50 cm desta (seção A), uma na altura do diâmetro à altura do peito (DAP), que correspondeu à seção localizada a 130 cm acima do nível do solo (seção C) e uma altura intermediária entre estas, correspondente a 90 cm da base (seção B). Essas medições em três regiões foram realizadas para obter uma maior quantidade de informações da situação real da árvore. Na aplicação da técnica na avaliação de árvores urbanas, quanto maior o número de medições, melhor será a análise da condição do elemento como um todo, mas muitas vezes, na prática, torna-se inviável a medição em várias regiões da árvore, pois esse procedimento demanda maior tempo e muitas vezes maior custo.

Com base nos resultados obtidos, buscou-se verificar entre as três seções submetidas ao ensaio com a técnica de ondas de tensão, qual apresentou melhores resultados, obtendo melhores correlações entre a velocidade de propagação da onda e a densidade aparente, ou seja, maiores valores de coeficiente de determinação R^2 . Na Tabela 4.17 são apresentadas as quantidades de seções por faixa de significância. Nas figuras 4.62, 4.63 e 4.64 é mostrado respectivamente para as seções A, B e C, o número de seções que se enquadraram em cada nível de significância.

Tabela 4.17. Quantidade de seção separadas por altura de medição por nível de significância.

Nível de Significância/Seção	A	B	C
Baixa significância	0	0	0
Média significância	3	2	0
Alta significância	6	4	5
Muito alta significância	3	6	7

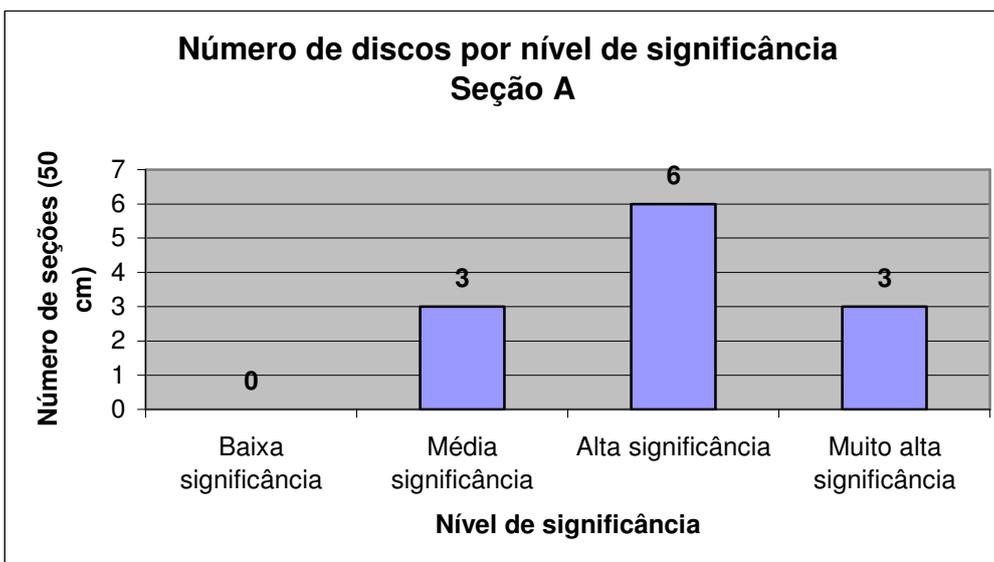


Figura 4.62. Número de seções por nível de significância – seção A.

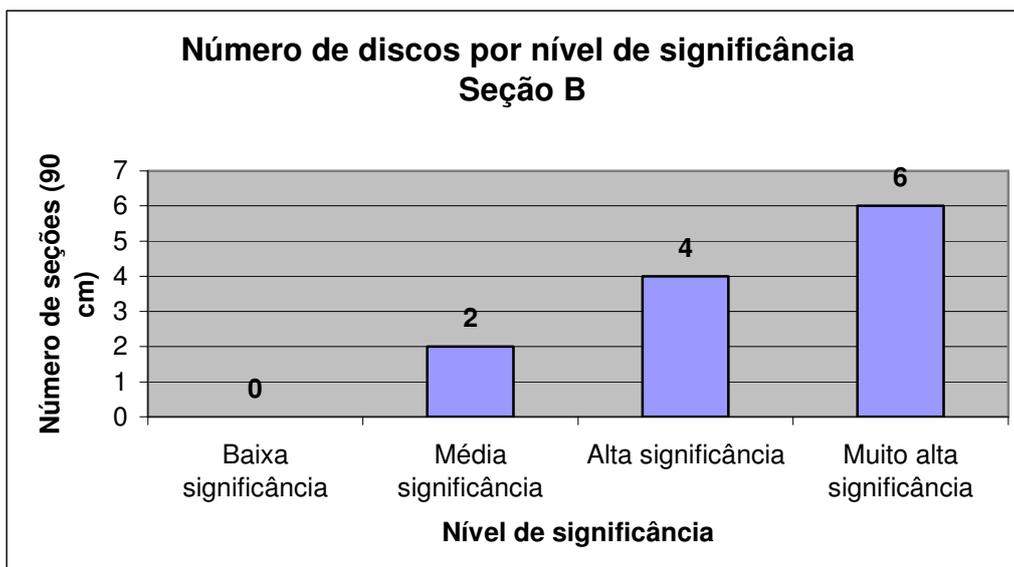


Figura 4.63. Número de seções por nível de significância – seção B.

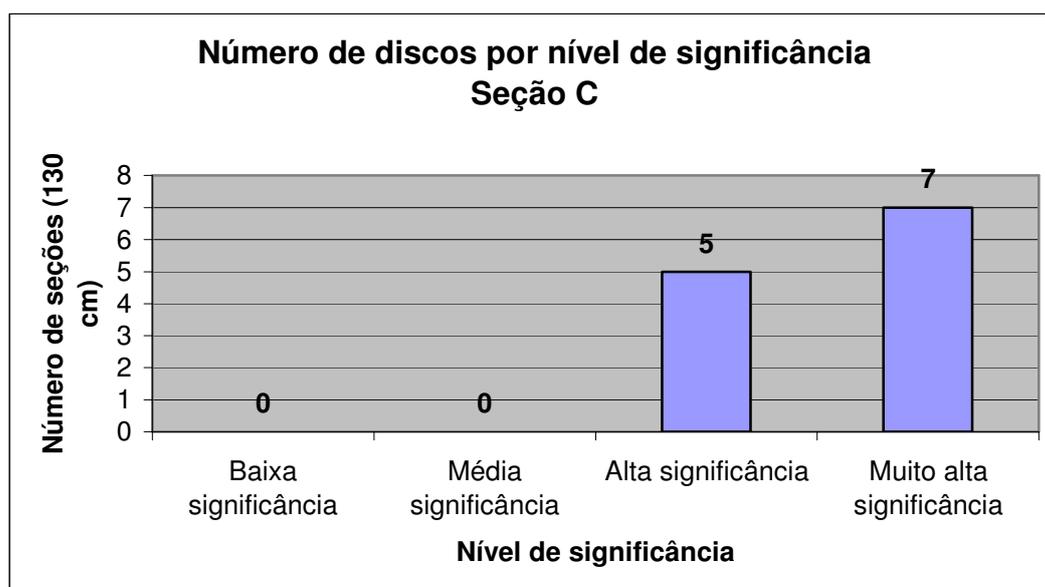


Figura 4.64. Número de seções por nível de significância – seção C.

Pela Tabela 4.17 e pelas figuras 4.62, 4.63 e 4.64, foi possível verificar que as melhores correlações entre a densidade aparente e a velocidade de propagação da onda, ocorreu para as medições realizadas na seção C, ou seja, no diâmetro à altura do peito. Alguns estudos realizados por autores como Zobel (1965) e Nylinder (1965), indicam que a densidade básica da madeira neste nível representa a densidade média da árvore. Estes autores buscaram relacionar através de equações matemáticas, para cada espécie em estudo, em diferentes condições ambientais, a densidade média obtida ao DAP com a densidade básica média das árvores. Assim, esta região da árvore, representa bem a situação da árvore, na qual conforme anteriormente discutido, se encontra a representatividade da densidade média. É importante ressaltar também, que o DAP corresponde a um índice mundialmente utilizado em Ciência Florestal e trata-se de um nível fixo, absoluto e fácil de ser trabalhado.

4.6. Proposta de diretrizes para realização do ensaio de ondas de tensão

Conforme foram realizados os ensaios experimentais e a análise dos resultados obtidos, foram observadas algumas considerações importantes a respeito do emprego da técnica de ondas de tensão e da análise da imagem tomográfica gerada.

Como toda técnica, esta apresenta suas peculiaridades e seu entendimento depende do estabelecimento de alguns parâmetros e do emprego de diretrizes, que permitam analisar adequadamente os resultados e que possibilitem a busca de melhores resultados, ou seja, de melhor acuracidade. O parâmetro essencial para a análise da imagem tomográfica, conforme

discutido anteriormente consiste na velocidade de referência de propagação da onda para a espécie. A aplicação da técnica de ondas de tensão envolve algumas etapas, dentro das quais existem algumas precauções a serem tomadas, que se cumpridas, permitem a obtenção de melhores resultados.

No Quadro 4.3, é apresentada uma proposta de diretrizes para a aplicação da técnica de ondas de tensão e as principais precauções a serem consideradas nas etapas mencionadas.

Quadro 4.3. Diretrizes para aplicação da técnica de ondas de tensão e precauções.

Diretrizes	Precauções
Aferição do equipamento	Assim, como qualquer equipamento, antes da primeira utilização e posteriormente, conforme especificações do fabricante há a necessidade de aferição do equipamento. O equipamento não aferido corretamente irá fornecer resultados não confiáveis.
Escolha da seção para realização do ensaio	Conforme discutido no presente capítulo, quanto maior o número de seções para a realização dos ensaios, maior o volume de informações e maior a confiabilidade dos resultados. Mas na impossibilidade de medição em várias seções, pode-se estabelecer a seção do diâmetro à altura do peito (130 cm da base da árvore) como a melhor seção para realização das medições, pois esta região representa a média da densidade da árvore, e conforme os resultados desta presente pesquisa, esta foi a seção que obteve melhores correlações entre a velocidade de propagação da onda e a densidade aparente. Algumas espécies por apresentarem formas muito irregulares do tronco, podem impedir a realização da medição do DAP, assim, deve se buscar uma região o mais próximo possível desta.

Quadro 4.3. Diretrizes para aplicação da técnica de ondas de tensão e precauções. Continuação (1).

Diretrizes	Precauções
Definição do número de sensores	<p>O número de sensores interfere na detecção dos defeitos. Quanto maior o número de sensores empregados, maior a área da seção analisada e maior a detecção de defeitos de menores dimensões.</p> <p>Segundo Divos; Szalai (2002), com 4 sensores é possível detectar defeitos da ordem de 8% da área da seção e ao aumentar para 8 sensores, essa porcentagem cai para 1%, sendo assim capaz de detectar defeitos da ordem de 1% da área da seção. Algumas espécies possuem diâmetro muito pequeno, mas mesmo assim é importante o emprego do maior número de sensores possíveis, mesmo que estes fiquem muito próximos um dos outros.</p>
Aplicação de impulsos (batimentos) nos sensores	<p>Para melhores resultados, é importante, que a aplicação de impulsos nos sensores seja realizada pela mesma pessoa, evitando assim alterações na intensidade dos impactos, que podem causar pequenas influências na propagação das ondas. Após a aplicação do impulso no sensor é importante verificar no aparelho se as medições foram corretamente realizadas, pois dependendo do impacto as medições podem aparecer como “erro”.</p>
Determinação do teor de umidade da árvore	<p>Como a técnica de ondas de tensão tem a função de avaliar de forma não-destrutiva a árvore, e, portanto, não haverá como extrair corpos-de-prova para a determinação do teor de umidade, é importante o emprego de equipamentos medidores do teor de umidade, os quais normalmente são do tipo penetração.</p> <p>Conforme já discutido, teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras tem maior influência sobre a velocidade de propagação da onda e menor quando está acima do ponto de saturação.</p>

Quadro 4.3. Diretrizes para aplicação da técnica de ondas de tensão e precauções. Continuação (2).

Diretrizes	Precauções
Determinação da velocidade de propagação da onda de referência para a espécie e análise da imagem	Para a análise dos valores de velocidade de propagação da onda fornecidos pelo equipamento ou para a análise da imagem tomográfica, é importante a obtenção da velocidade de propagação da onda de referência da madeira da espécie em estudo. Não é apenas o espectro de cores que indicará a presença de defeitos internos na madeira, mas sim o quanto as velocidades se afastam da velocidade de referência da espécie. Conforme apresentado, velocidades de propagação da onda inferiores a 90% da velocidade de referência podem significar a presença de defeitos. Quanto maior o afastamento, maior a possibilidade de defeitos mais significativos.

Na Figura 4.65 é apresentado um fluxograma que resume as diretrizes propostas.

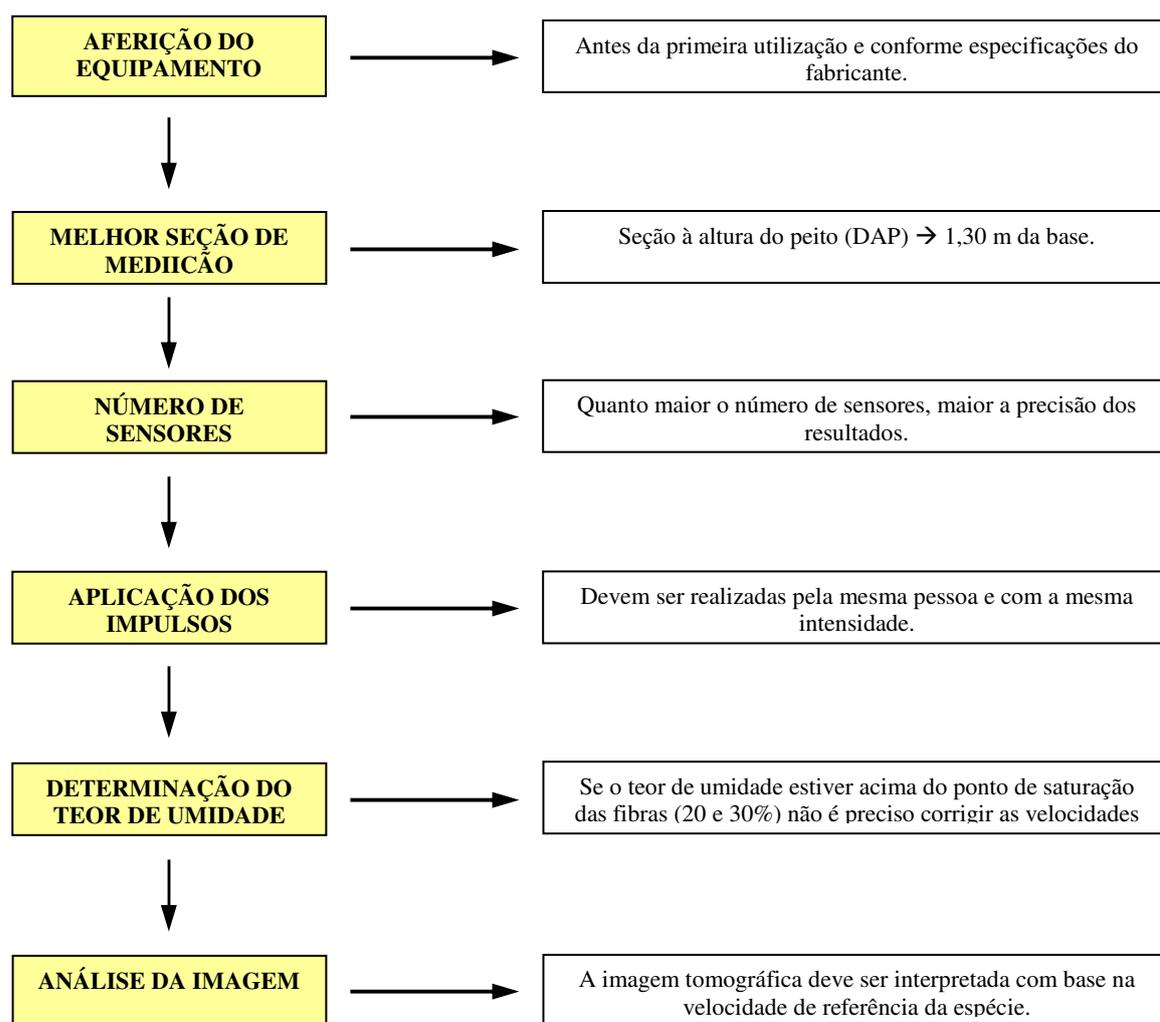


Figura 4.65. Diretrizes para aplicação da técnica de ondas de tensão.

Conforme apresentado nos resultados, a técnica de ondas de tensão, para a espécie em estudo, se mostrou bastante confiável para a avaliação interna de árvores urbanas, com níveis de significância consideráveis para a madeira. Mas, para a obtenção de resultados confiáveis, é preciso sempre seguir as precauções mencionadas no Quadro 4.2, tanto durante a realização dos ensaios, como posteriormente durante a análise e interpretação dos resultados. Ressalta-se ainda a importância do estabelecimento da velocidade de propagação da onda de referência da espécie, sem a qual, torna-se inviável a interpretação e análise da imagem tomográfica.

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 urbanas de modo não-destrutivo. Esta acuracidade significativa da técnica estudada foi constatada a partir dos seguintes resultados analisados:

- Em 86% das seções analisadas foi possível obter coeficientes de determinação que se enquadram em níveis de alta a muito alta significância (R^2 entre 0,66 e 0,80, e R^2 superior a 0,80, respectivamente). Estes coeficientes de determinação balizam as correlações obtidas entre a velocidade de propagação de onda fornecida pela técnica e a densidade aparente da madeira em cada região analisada;
- Apenas 14% das seções analisadas obtiveram coeficientes de determinação considerados de média significância (R^2 entre 0,56 e 0,65);
- 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 de diversas seções das árvores analisadas.

O nível de acuracidade obtido permite indicar esta técnica como uma ferramenta eficiente para a avaliação não-destrutiva da parte interna do lenho de árvores urbanas, e com grande

potencial de aplicação na arborização urbana praticada nos municípios brasileiros que utilizam a espécie *Caesalpineia peltophoroides*.

Para a aplicação da técnica de ondas de tensão em árvores vivas e posterior interpretação dos resultados a serem obtidos, verificou-se a necessidade do estabelecimento de alguns parâmetros e de diretrizes para a aplicação da técnica descritos a seguir:

- 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 *Caesalpineia peltophoroides*, a qual não existia em literatura. Com base nos resultados obtidos da velocidade de propagação da onda nas 12 árvores em estudo, foi possível estabelecer um valor médio de velocidade de propagação da onda, cujo valor correspondeu a 2.130 m/s, adotado assim, como a velocidade de referência para esta espécie. Portanto, para uso em outras espécies é recomendável realizar ensaios preliminares para que seja obtido o valor de propagação de onda correspondente à espécie a ser avaliada;
- O teor de umidade afeta significativamente a velocidade de propagação da onda até o ponto de saturação das fibras, sendo que acima deste ponto a velocidade de propagação da onda é pouco afetada, não havendo assim a necessidade de correções caso a árvore se encontre no ponto de saturação das fibras ou acima deste. Portanto, a determinação do teor de umidade é importante para verificar a necessidade (ou não) de sua correção a valores que correspondam ao teor de umidade de saturação das fibras (geralmente superior a 28%). Verificou-se que todas as seções analisadas se enquadraram neste nível de teor de umidade (árvores 07 e 11, que se encontravam mortas) ou acima do ponto de saturação das fibras (demais árvores em estudo), não havendo assim a necessidade de correção do valor da velocidade de propagação de ondas. Como as árvores vivas se encontram normalmente em teores de umidade entre 35% e 200%, a velocidade de propagação da onda não será afetada pelo teor de umidade do lenho. Todavia, sugere-se que seja realizado ao menos um teste de teor de umidade antes do uso da técnica de propagação de ondas de tensão em árvores vivas;

- A imagem tomográfica, por si própria, não permite a análise da situação interna do material. É recomendável verificar a escala de velocidades fornecidas pelo software do equipamento e compará-la ao valor médio da velocidade de referência (no presente estudo este valor foi de 2.130 m/s);
- Os resultados das imagens permitiram verificar uma grande semelhança das imagens tomográficas com a real situação da árvore, com exceção da árvore 09, na qual seria necessário um estudo mais detalhado de sua estrutura interna, a qual poderia ser responsável pelos valores obtidos de menor magnitude da velocidade da onda nas seções sem presença de sinais visíveis de defeitos ou injúrias internas;
- Ao comparar os valores obtidos de coeficiente de determinação das seções sem e com a presença de orifícios, notou-se que na faixa de muito alta significância, houve a predominância de seções sem presença de orifícios, mas no nível de alta significância os valores foram bem próximos, com maior número de seções com presença de orifício se enquadrando neste nível, o que também ocorreu para a média significância. Esta constatação sugere que há uma tendência de melhor precisão do equipamento, quanto menor for a presença de defeitos extremos, ou seja, quanto maior for a homogeneidade da densidade do material, a precisão será menos afetada pela presença dos defeitos internos. Mesmo com a presença de defeitos extremos, as seções se enquadraram no nível de média significância (R^2 entre 0,56 e 0,65), que para um material, como a madeira, é uma correlação significativa;
- Ao analisar as seções com melhores coeficientes de determinação, verificou-se que as melhores correlações entre a densidade aparente e a velocidade de propagação da onda, ocorreu para as medições realizadas na seção C, ou seja, no diâmetro à altura do peito (DAP). 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 na árvore;
- Com base nos resultados obtidos e na análise destes, para que a técnica de ondas de tensão seja empregada com confiabilidade adequada, foram elaboradas diretrizes, as quais poderão ser adotadas durante a aplicação da técnica na arborização urbana. As diretrizes propostas neste trabalho englobam as seguintes etapas: aferição do

equipamento; escolha da seção para realização do ensaio; definição do número de sensores; aplicação de impulsos (batimentos) nos sensores; determinação do teor de umidade da árvore, determinação da velocidade de propagação da onda de referência para a espécie a ser avaliada, e por fim, análise da imagem tomográfica obtida.

Portanto, foi possível verificar que a técnica de ondas de tensão se apresenta como importante ferramenta de avaliação interna de árvores urbanas. Todavia, para que haja confiabilidade nos resultados é recomendável que a mesma seja aplicada de modo criterioso. A interpretação dos resultados assim obtidos requer o conhecimento de alguns parâmetros, como a velocidade de referência de propagação da onda para a espécie a ser avaliada, evitando imprecisões na análise e na identificação de defeitos internos no lenho das árvores. Salienta-se ainda, que para a tomada de decisão quanto ao corte ou manutenção de uma árvore urbana, além da análise interna do elemento, deverão ser considerados os esforços solicitantes a que esta está submetida, e as condições externas relacionadas à poda, inclinação e localização da copa e galhos.

Como proposta para pesquisas futuras sugere-se o estudo das melhores espécies para emprego na arborização urbana dos municípios brasileiros e para estas, o estabelecimento de velocidades de referência de propagação da onda, as quais auxiliarão na análise da imagem tomográfica para estas espécies, ampliando assim o emprego da técnica de ondas de tensão.

Outro ponto importante ainda a ser estudado consiste no aperfeiçoamento do software existente de geração de imagens tomográficas, ou mesmo a elaboração de um novo software, que represente de forma ainda mais adequada as condições das árvores, através de seu espectro de cores e na fixação das velocidades de referência na faixa de velocidades de propagação, em função da espécie em estudo, permitindo o ajuste do software conforme a espécie. O software poderá estabelecer a proporção de madeira com velocidade de propagação da onda com valor inferior a 90% da velocidade de referência, facilitando a identificação da magnitude dos defeitos.

Ainda como proposta de trabalhos futuros, sugere-se estudos que considerem a ação conjunta de esforços solicitantes, sendo poucas as pesquisas disponíveis no meio técnico-científico, sendo estas primordiais para uma análise completa da árvore e para a tomada de decisão e verificação de risco de queda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHÃO, C. P. **Estimativa de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus arophylla* por espectrometria.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. Brasil, 182 f., 2005.
- AMARAL, R.D.A.M. **Diagnóstico da ocorrência de cupins xilófagos em árvores urbanas do bairro de Higienópolis na cidade de São Paulo.** Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ/USP, Piracicaba, 2002.
- APRILE, F. M.; DELITTI, W. B. C.; BIANCHINI JR., L. Aspectos cinéticos da degradação de laminados de madeira em ambientes aquático e terrestre. **Revista Brasileira de Biologia**, Rio de Janeiro, v. 59, n. 3, p. 485-492, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 – Projeto de estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro, 1997.
- BERNDT, H., SCHNIEWIND, A. P., JOHNSON, G. C. High resolution ultrasonic imaging of wood. **Science and Technology**. v. 33, p. 185-198, 1999.
- BIONDI, D.; ALTHAUS. M. **Árvores de rua de Curitiba:** cultivo e manejo. Curitiba: FUPEF, 182 p., 2005.
- BODIG, J. the process of NDE research for wood and wood composites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 12., **Proceedings...** Sopron: University of Western Hungary, 2000.
- BUCUR, V.; SAREM, M. **An experimental study of ultrasonic waves propagation in dry and water saturated solid wood.** In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4. São Carlos. **Anais.** São Carlos, v. 2, p.127-138, 1992.
- BUCUR, V. **Acoustics of wood.** New York, CRC Press Inc, 1995.

- BUCUR, V. **Nondestructive characterization and imaging of wood**. New York, Springer-Verlag, 2003.
- CANDIAN, M.; SALES, A. 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, 2009.
- 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. **Engenharia Civil**. Guimarães. Portugal. v. 1, n. 16, p. 27-37, 2003.
- CARREIRA, M. R. **Critérios para a classificação visual de peças estruturais de *Pinus sp.*** 164p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- COMINO, E., SOCCO, V., MARTINIS, R., NICOLOTTI, G., SAMBUELLI, L. **Ultrasonic tomography for wood decay diagnosis**. In: Backhauss GF, Bader H, Idezak E (eds) Int Symposium Plant Health in Urban Horticulture. Mitt. Bundesanst Land-Forstwirtschaft, Braunschweig, **Proceedings**. p. 279, 2000.
- COPEL. **Características importantes para uma boa integração das árvores com o meio ambiente urbano**. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fd%2F7AFDF6DFC4160F320325742000473AC4>. Acesso em 24 de julho de 2009, 2009.
- COUTTS, M. P. **Root architecture and tree stability**. Plant and soil, v.71, p. 171-188, 1983.
- CRUZ, H. **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, 2001.
- CRUZ, C. R. **Aplicação de ondas de tensão para a estimativa da umidade em madeira de *Eucalyptus***. Tese de doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.
- DI FIDIO, M. **Architettura del paesaggio**. 3.ed. Milano: Pirola Editores, 1990.
- DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morphometry for *Cabralea canjerana* in native secondary forest in Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.8, n.1, p. 55-66, 1998.
- DIVOS, F.; SZALAI, L. **Tree evaluation by acoustic tomography**. 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. University of California. USA. **Proceedings**. p. 251– 256, 2002.

- ELETROPAULO METROPOLITANA ELETRICIDADE DE SÃO PAULO. **Guia de Arborização Urbana - Manual de Poda**. Prefeitura do Município de São Paulo - 72p, 2004.
- ERIKSON, R. G.; GORMAN, T. M.; GREEN, D. W.; GRAHAM, D. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine and grand fir trees from northern Idaho. **Forest Products Journal**. v. 50, n. 7/8, p. 59-65, 2000.
- EVANS, R.; KIBBLEWHITE, R. P. Controlling wood stiffness in plantation softwoods. 12th Symposium NDT of Wood, University of Western Hungary, Sopron. **Proceedings**. p. 67-74, 2000.
- EVANS, R.; ILIC, J. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. **Forest Products Journal**. v. 51, n. 3, p. 53-57, 2001.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspection historic structures – A guide for use and interpretation**. Gen. Tech. Rep. FLP-GTR-119. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 15 p., 2000.
- FRASER, A. I. The soil and roots as factors in tree stability. **Forestry**, 35: (2): 117-27, 1962.
- GABRIEL, M. S. C.; BALLARIN, A. W. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira de *P. Taeda* com uso do método não-destrutivo das ondas de tensão (Stress Wave Method)**. VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. São Carlos – SP, 2000.
- GATTI, R. C.; ARTHUSO, J. P.; NOLASCO, A. M.; ULIANA, L. R. **Densidade básica e aparente da madeira de galhos de onze espécies utilizadas na arborização urbana**. 17^o Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo – SIICUSP, São Carlos, 2009.
- GREY, G. W.; DENEKE, F. J. **Urban forestry**. New York: Jhon Wiley, 1978.
- GREY, G. W.; DENEKE, F. J. **Urban Forestry**. 2. ed. New York: John Wiley, 299 p., 1986.
- GUZZO, P.; SOSSAE, F. C.; SCHIAVETTI, A.; DEBERDT, A. J. **Arborização urbana: a cidade**. Projeto de educação ambiental CDCC – Centro de Divulgação Científica e Cultural, 1998.
- HARRIS, R. W. **Arboriculture: integrated management of landscape trees, shrubs and vines**. New Jersey: Prentice-Hall, 674 p., 1992.
- HAUFFE, P.; MAHLER, G. **Evaluation of internal log quality using x-ray and ultrasound**. 12th Symposium NDT of Wood, University of Western Hungary, Sopron. **Proceedings**. p. 259-263, 2000.

- JAMES, W. L.; BOONE, R. S.; GALLIGAN, W. L. Using speed of sound in wood to monitor drying in a kiln. **Forest Products Journal**. v.32, n. 9, p.27-34, 1982.
- JIM, C. Y. Urban trees in Hong Kong: benefits and constraints. **Arboricultural Journal**, Great Britain, v. 11, p. 145 - 164, 1987.
- KABIR, M. F.; SIDEC, H. A. A.; DAUD, W. M.; KHALID, K. Effect of moisture content and grain angle on the ultrasonic properties of rubber wood. **Holzforschung**. v. 51, n.3, p.263-267, 1997.
- KAK, A. C.; SLANEY, M. **Principles of computerized tomographic imaging**. New York: IEEE Press, 1988.
- KANG, H.; BOOKER, R. E. Variation of stress wave velocity with the MC and temperature. **Wood and Science Technology**. v. 36, p. 41-54, 2002.
- KOLLMANN, F. **Tecnologia de la madera y sus aplicaciones**. Madrid: Tomo I. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiências y Servicio de la Madera. 674 p., 1959.
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. Principles of Wood Science and Tecnology. Vol. 1. **Solid wood**. New York, United States, 1968.
- LEAL, L. **Custos das árvores de rua. Estudo de caso: cidade de Curitiba/PR**. Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 115 p., 2007.
- LIMA, A. M. L. P.; CAVALHEIRO, F.; NUCCI, J. C.; SOUSA, M. A. L. B.; FIALHO, N. O.; DELPICCHIA, P. C. D. **Problemas de utilização na conceituação de termos como espaços livres, áreas verdes e correlatos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARBORIZAÇÃO URBANA, 2. São Luiz/MA. São Luiz: Imprensa EMATER/MA, p. 539 . 553, 1994.
- LLARDENT, L. R. A. **Zonas verdes y espacios libres en la ciudad**. Madrid: Closas. Orcoyen, 1982.
- LOBODA, C. R.; ANGELIS, B. L. D. Áreas verdes públicas urbanas: conceitos, usos e funções. **Ambiência**, v.1, n.1, p. 125-139, Guarapuava – PR, 2005.
- LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles**. São Paulo: Hucitec, 1985.
- MCDONALD, K. A. **Lumber defect detection by ultrasonics**. Forest Products Laboratory Res. Paper. FPL - 311. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1978.
- MILANO, M. S. **Avaliação quali-quantitativa e manejo da arborização urbana: exemplo de Maringá – PR**. Tese de doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná. 120p, 1988.
- MILANO, M. S.; DALCIN, E. **Arborização de vias públicas**. Rio de Janeiro: Light, 226 p., 2000.

- MISHIRO, A. Ultrasonic velocity in wood and its moisture content. Effects of moisture content gradients on ultrasonic velocity in wood. **Mokuzai Gakkaishi**. v.41, n.6, p.1086-1092, 1995.
- 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**. v. 29, n. 2, p. 66-78, 2003.
- NIKLAS, K. J. **Plant allometry: the scaling of form and process**. The University of Chicago. Chicago, 1994.
- NYLINDER, P. **Non destructive field sampling systems of determining the wood density of standing timber over large areas, variation within and between species and the influence of environmental and other factors on wood density**. Melbourne, IUFRO, 13p., 1965.
- NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A. W. **Sensibilidade dos ensaios de ultra-som à ortotropia elástica da madeira**. III Pan-American Conference for Nondestructive Testing – PANNDT. Rio de Janeiro, 2003.
- OLIVEIRA, A. M. F.; LELIS, A. T.; LEPAGE, E. S.; CARBALLERA LOPEZ, G. A.; OLIVEIRA, L. C. S.; CANEDO, M. D.; MILANO, S. Agentes destruidores da madeira. In: LEPAGE, E. S. (Coord.). **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, v. 1. p. 99-279, 1986.
- OLIVEIRA, F. G. R. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para ensaios não-destrutivos em madeira serrada por meio de ondas de ultra-som**. São Carlos, Tese (Doutorado) – EESC, USP, 2005.
- OLIVEIRA, F. G. R., CANDIAN, M., LUCCHETTE, F. F., SALGON, J. L., SALES, A. A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (*Goupia glabra*). **Building and Environment**. v. 40, n. 2, p. 297-300, 2005.
- OLIVITO, R. S. Ultrasonic measurements in wood. **Materials Evaluation**. April, p. 514-517, 1996.
- PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; REZENDE, M. A.; REZENDE, A. M.; SEVERO, E. T. F. Análise da densidade da madeira de *P. elliottii* Engelm. Por meio de radiação gama de acordo com as direções estruturais (longitudinal e radial) e a idade de crescimento. **Floresta e Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 47-57, 2003.

- PEREIRA, L. C.; FILHO, D. F. S.; FILHO, M. T.; COUTO, H. T. Z.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; POLIZEL, J. L. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, volume 2, número 2, 2007.
- PHILLIPS, L. E. **Urban trees: a guide for selection, maintenance and master planning**. New York: McGraw-Hill, 273 p., 1993.
- PINHEIRO, J. A. N. **Arborização urbana**. Webartigos.com. Disponível em: <http://www.webartigos.com/articles/9812/1/arborizacao-urbana/pagina1.html>. Acesso em 22 de julho de 2009, 2009.
- PIVETTA, K. F. L.; SILVA FILHO, D. F. **Arborização urbana**. Boletim Acadêmico. Série Arborização Urbana. UNESP/FCAV/FUNEP, 69p. Jaboticabal-SP, 2002.
- QUOIRIN, N. S. **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, 2004.
- REZENDE, M. A.; ESCOBEDO, J. F.; FERRAZ, E. S. B. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 39, p. 33-40, ago. 1988.
- RICHARDSON, B. A. **Wood preservation**. 2. ed. London: E & FN SPON, 226p., 1993.
- ROCHA, R. T.; LELES, P. S. S; OLIVEIRA NETO, S. N. Arborização de vias públicas em Nova Iguaçu, RJ: o caso dos bairros Rancho Novo e Centro. **Revista Árvore**. Volume 28, nº 4, Viçosa, julho-agosto, 2004.
- ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review**. Gen. Tech. Report. FPL– GTR – 70. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994.
- ROSS, R.J., PELLERIN, R.F., VOLNY, N., SALSIG, W.W., FALK, R.H. **Inspection of Timber Bridges Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools – A Guide for Use and Interpretation**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. (General Technical Report FPL-GTR 114), 1999.
- ROSS, R. J.; WANG, X.; MATTSON, J. A.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; GESKE, E. A.; WEHR, M. A. **Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small diameter logs**. 12 th Symposium NDT of Wood, University of Western Hungary, Sopron. Proceedings. p. 155-163, 2000.

- RUST, S. **A new tomographic device for the nondestructive testing of trees.** 12 th Symposium NDT of Wood, University of Western Hungary, Sopron. Proceedings. p. 233-237, 2000.
- SAKAI, H.; MINAMISAWA, A.; TAKAGI, K. Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. **Ultrasonics.** v. 28. p. 382-385, 1990.
- SGAI, D. R. **Fatores que afetam o tratamento para preservação de madeiras.** 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Setor de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- SHIGO, A.L. **Tree decay: an expanded concept.** Unites States Department of Agriculture Forest Service. Information Bulletin no 419, 72p., April, 1979.
- SHIGO, A.L. **Trees defects: a photo guide.** <http://www.chesco.com/~treeman/hardtoget/ntb168>, 167p., 1983.
- SILVA, A.G. **Importância da vegetação em ambientes urbanos.** Viçosa, MG: UFV, 36p. (Monografia de Graduação), 1998.
- SILVA, M. E. C. M.; LOUZADA, J. L. P. C. **Utilização de microdensitometria por raios-x na avaliação qualitativa da madeira de CHOUPÓ (*Populus x euramericana*.cv I. 214).** I Simpósio del Chopo. Página 469-479, Zamora, 2001.
- SILVA FILHO, D. F.; PIZETTA, P. U. C.; ALMEIDA, J. B. S. A.; PIVETTA, K. F. L.; FERRAUDO, A.S. Banco de dados relacional para cadastro, avaliação e manejo da arborização em vias públicas. **Revista Árvore**, vol. 26, nº 5, Viçosa, 2002.
- SILVEIRA, R. A.; MONTAGNER, L. H.; ONUKI, M. **Variação de resistência ao vento em procedências de *Eucalyptus salina smith* na região de Guairá, RS.** Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n.13, p. 1-8, 1986.
- SWIFT, M. J.; HEAL, D. W.; ANDERSON, J. M. **Studies in Ecology-Decomposition in Terrestrial and Aquatic Ecosystems.** Oxford: Blackwell, 1979.
- SIMPSON, W. T. Relationship between speed of sound and moisture content of red oak and hard maple during drying. **Wood and Fiber Science.** v.30, n.4, p.405-413, 1998.
- SIMPSON, W. T; WANG, X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying. **Forest Products Journal.** v. 51, n.10, p. 51-54, 2001.
- SOCCO, V., MARTINIS, R., SAMBUELLI, L., COMINO, E., NICOLOTTI, G. Feasibility of ultrasonic tomography for NDT of decay on living trees. **Res Nondestructive Evaluation**, 2002.

- TREVISAN, H.; MARQUES, F. M. T.; CARVALHO, A. G. **Degradação natural de toras de cinco espécies florestais em dois ambientes.** FLORESTA , Curitiba, PR, v.38, n.1, jan./mar. 2008.
- TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: Structure, properties, utilization.** New York: Chapman & Hall, 1991.
- TSUCHIKAWA, S.; TAKAHASHI, T.; TSUTSUMI, S. **Nondestructive measurement of wood properties by using near-infrared laser radiation.** Forest Products Journal. v. 50, n. 1, p. 81-86, 2000.
- VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira.** Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 21p., 1984.
- ZOBEL, B. J. Variation in specific gravity and tracheid length for several species of mexicans pine. **Silvae Genetica.** Frankfurt, 14 (1): 1-36, 1965.
- ZOBEL, B. J.; VAN BUIJTENEN, J. P. **Wood Variation – Its Causes and Control.** Springer Series in Wood Science, Ed. Timell, T. E., Springer-Verlag, 363 pp, 1989.
- WALLER, D. M. The dynamics of growth and form. **Plant Ecology** (Crawley, M. J., ed.). Blackwele Scientific Publications. Oxford, 291-320, 1986.
- WANG, X., ROSS, R. J., BRASHAW, B. K., ERICKSON, J. R., FORSMAN, J. W., PELLERIN, R. **Diameter effect on stress wave evaluation of modulus of elasticity of logs.** 13 th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. University of California. USA. Proceedings. p. 149-156, 2002.
- YOUNG, C.W.T. **The external signs of decay in trees.** Department of the Environmental, London. Arboricultural Leaflet, 1., 11p., 1984.

APÊNDICE A

A seguir são apresentados os gráficos de perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente para as seções A e B de todas as árvores ensaiadas. Os corpos-de-prova sem valores correspondentes de densidade aparente e velocidade de propagação da onda correspondem a orifícios na seção, onde não foi possível a extração de corpos-de-prova para a determinação da densidade.

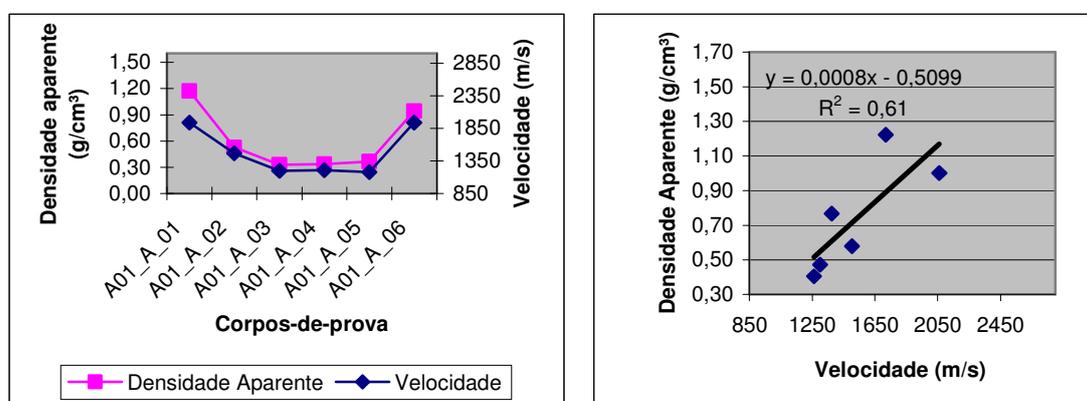


Figura A.01. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 01 – Seção A.

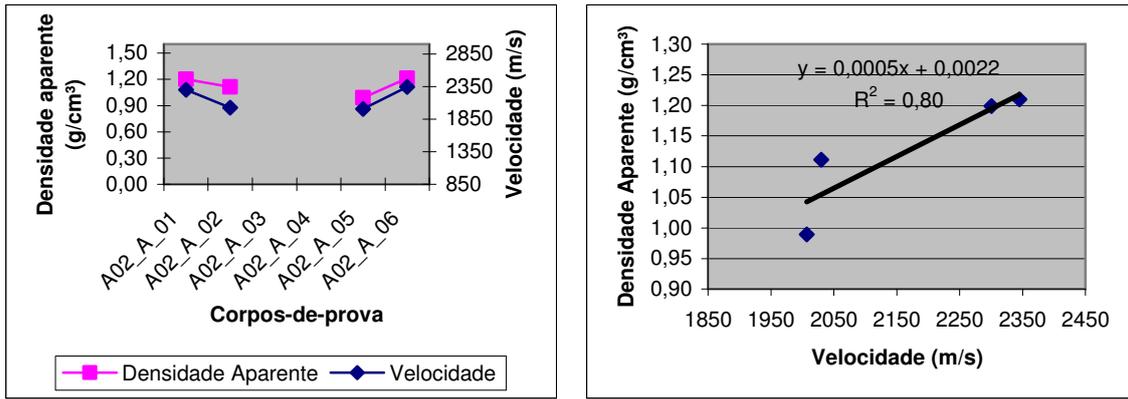


Figura A.02. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 02 – Seção A.

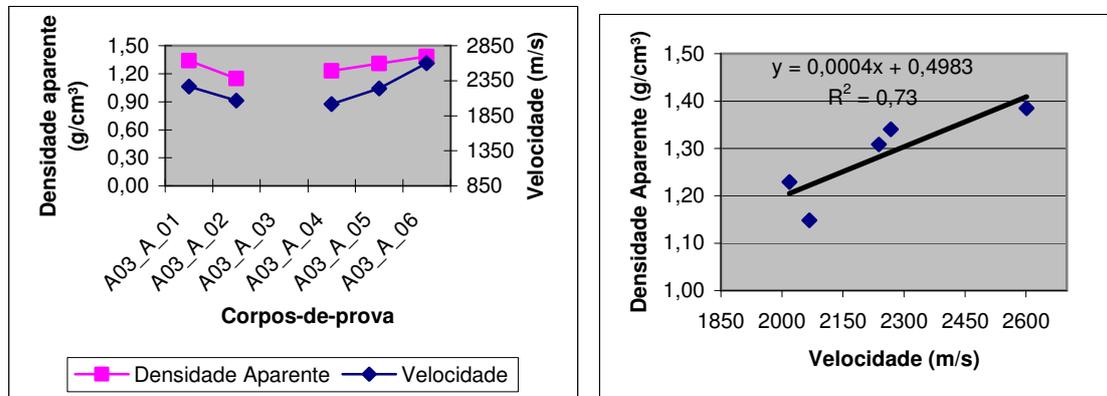


Figura A.03. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 03 – Seção A.

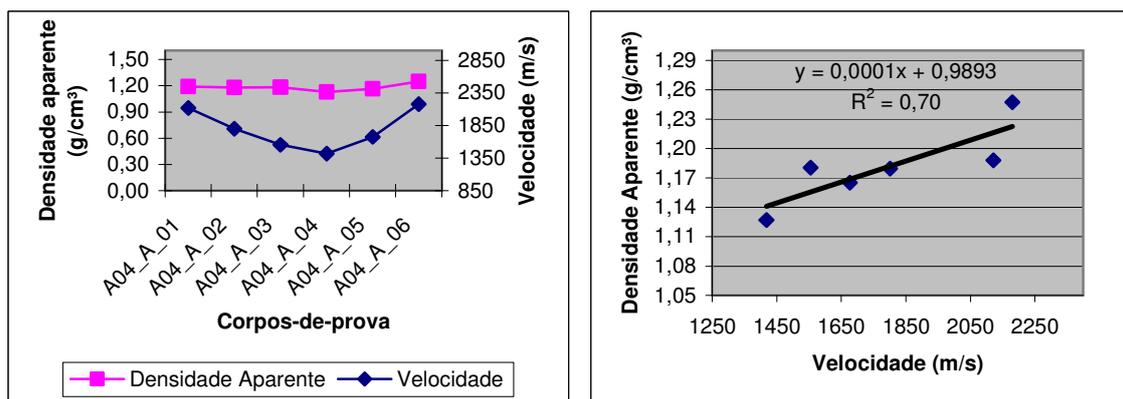


Figura A.04. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 04 – Seção A.

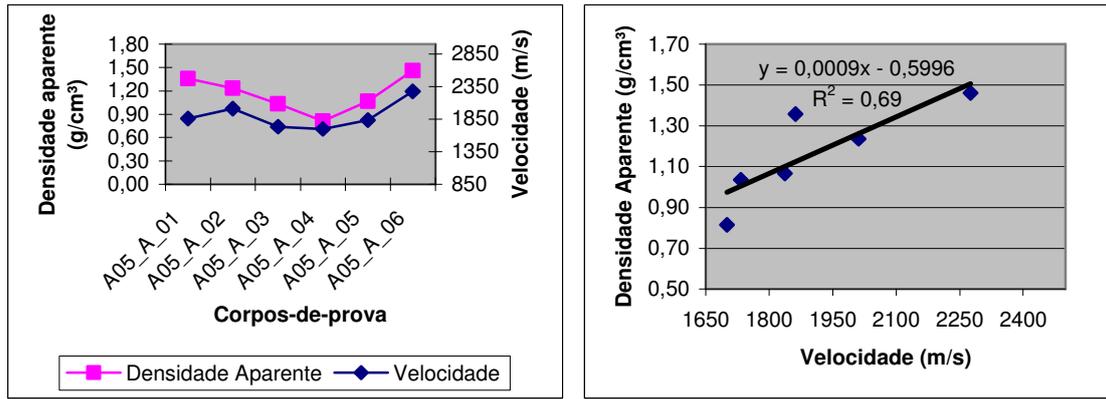


Figura A.05. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 05 – Seção A.

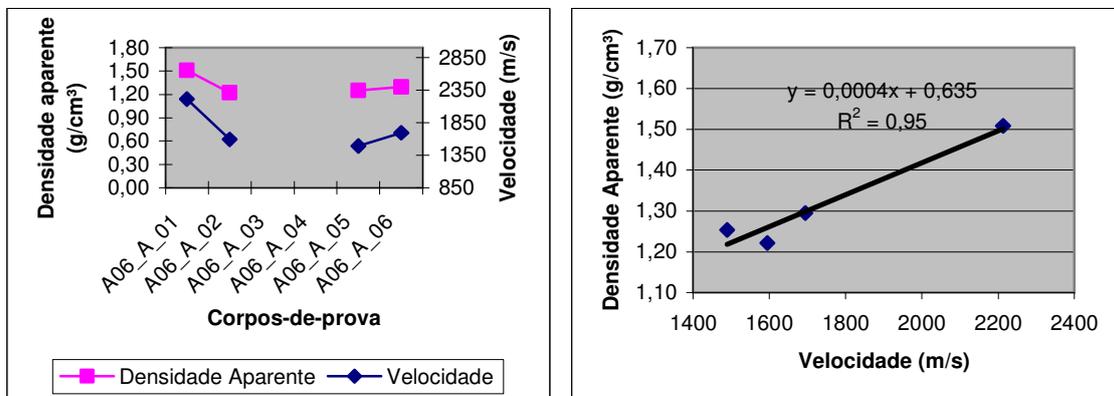


Figura A.06. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 06 – Seção A.

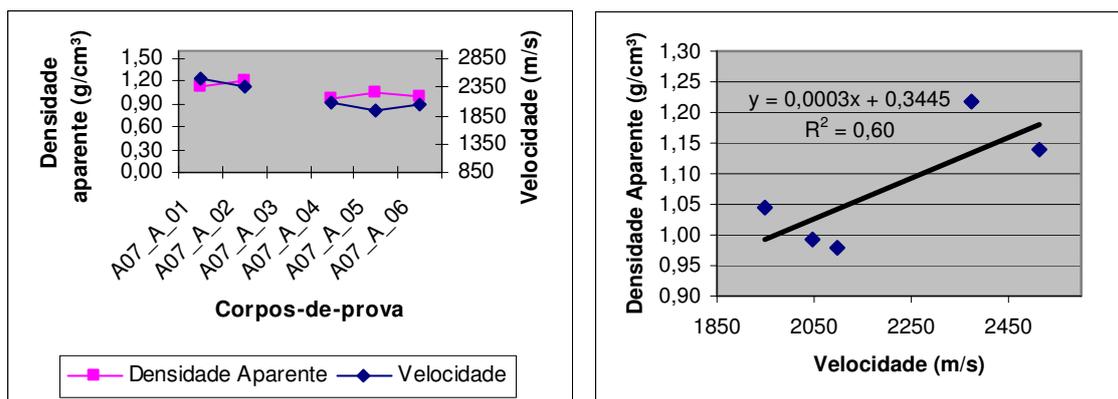


Figura A.07. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 07 – Seção A.

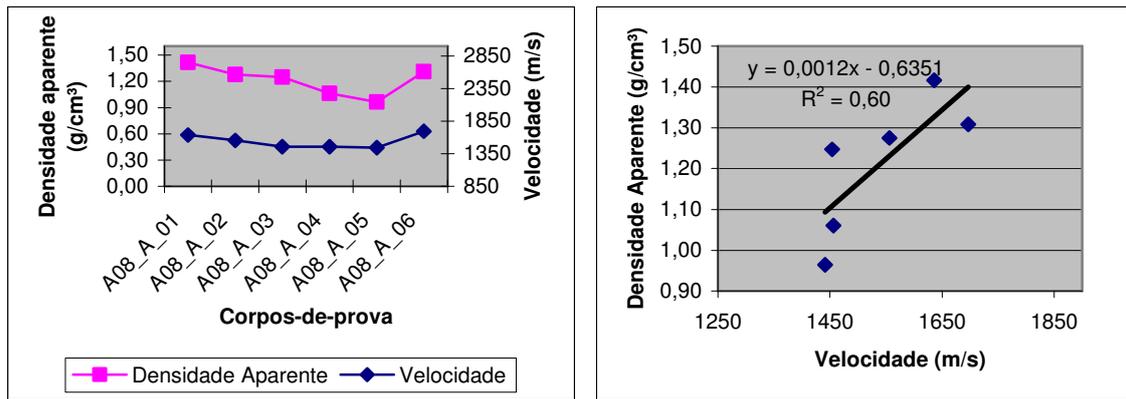


Figura A.08. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 08 – Seção A.

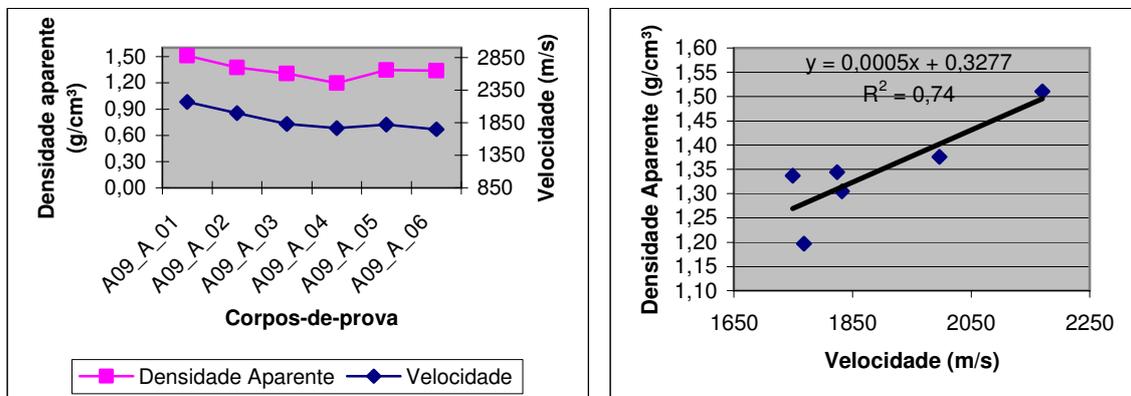


Figura A.09. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 09 – Seção A.

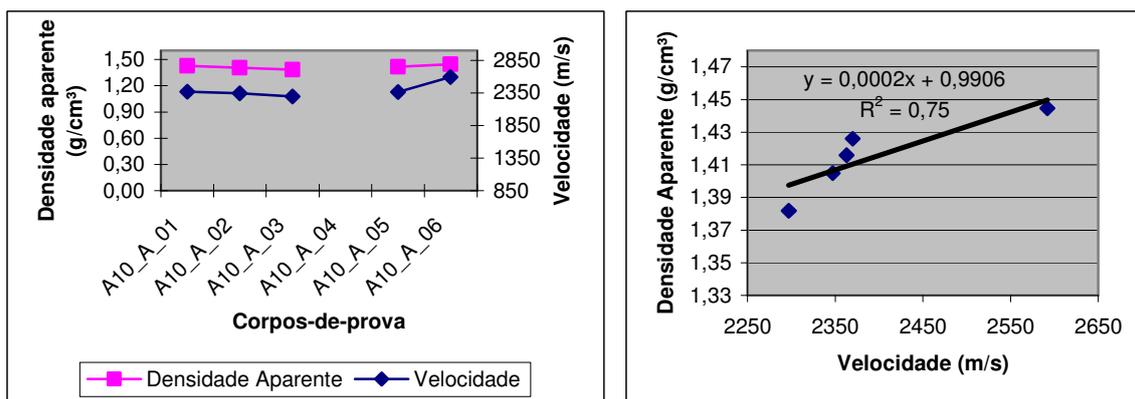


Figura A.10. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 10 – Seção A.

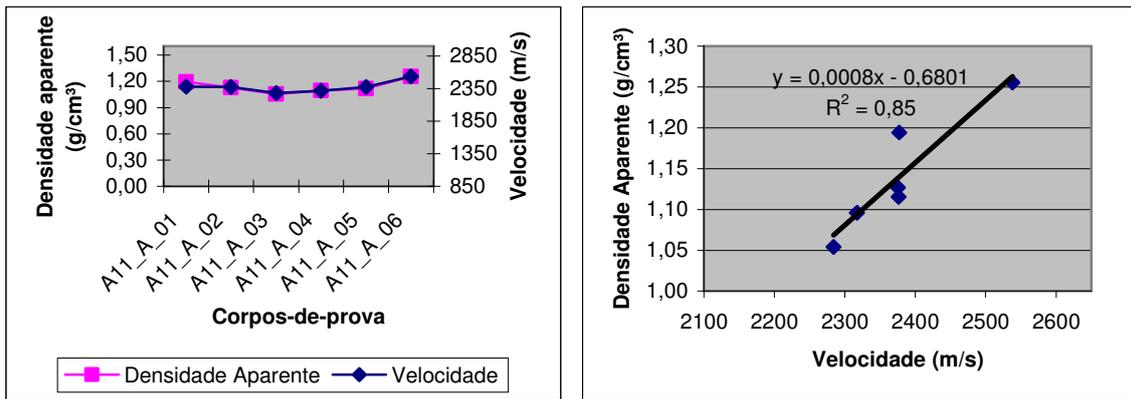


Figura A.11. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 11 – Seção A.

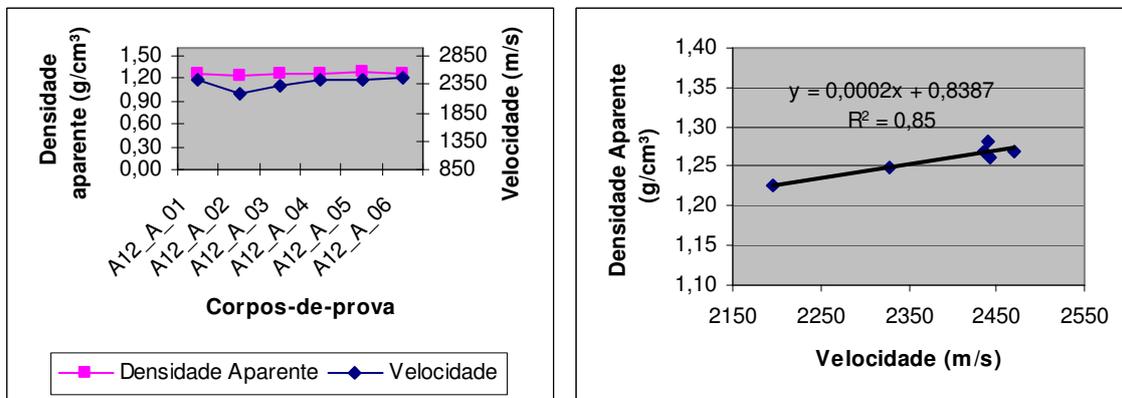


Figura A.12. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 12 – Seção A.

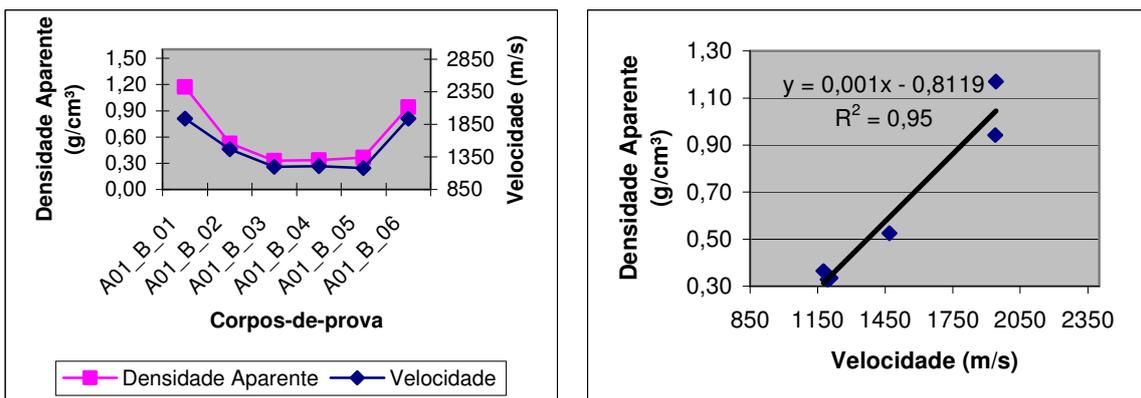


Figura A.13. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 01 – Seção B.

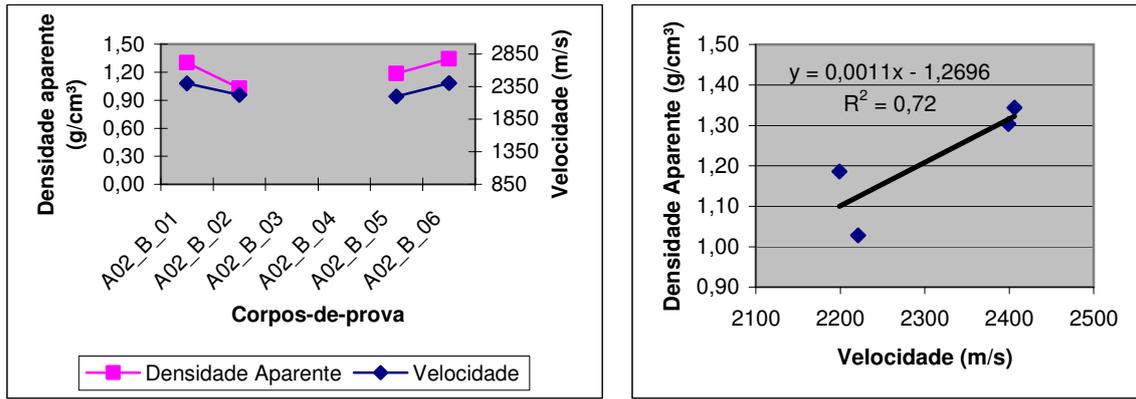


Figura A.14. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 02 – Seção B.

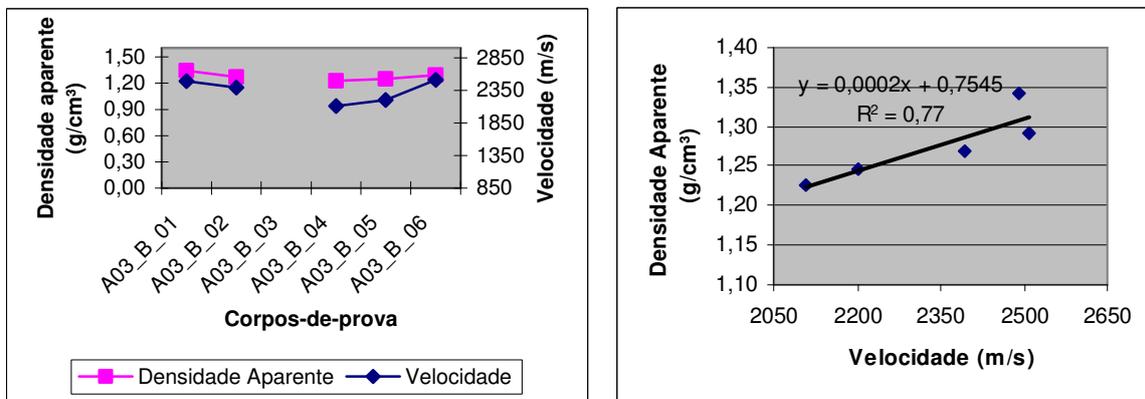


Figura A.15. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 03 – Seção B.

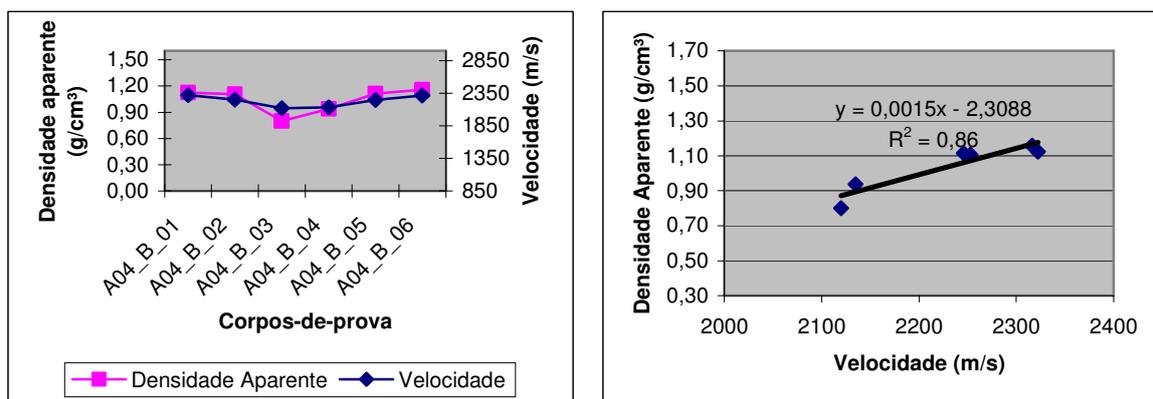


Figura A.16. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 04 – Seção B.

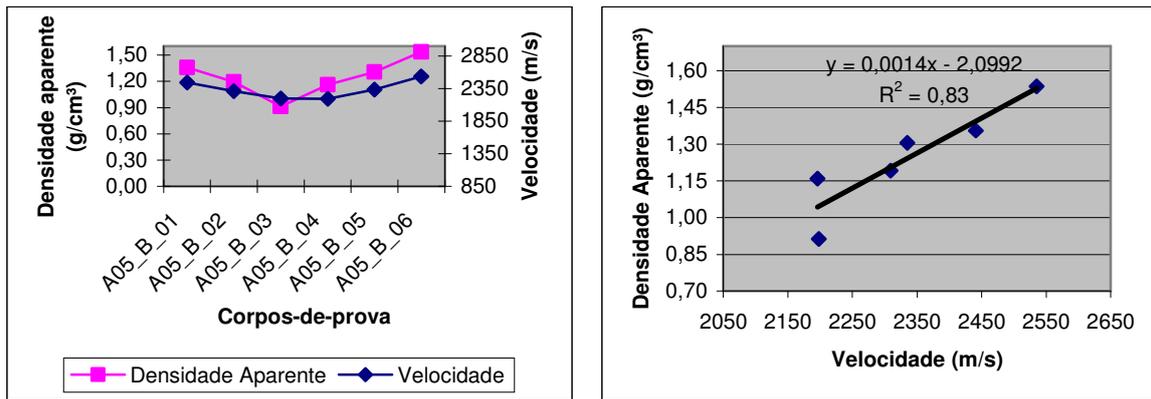


Figura A.17. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 05 – Seção B.

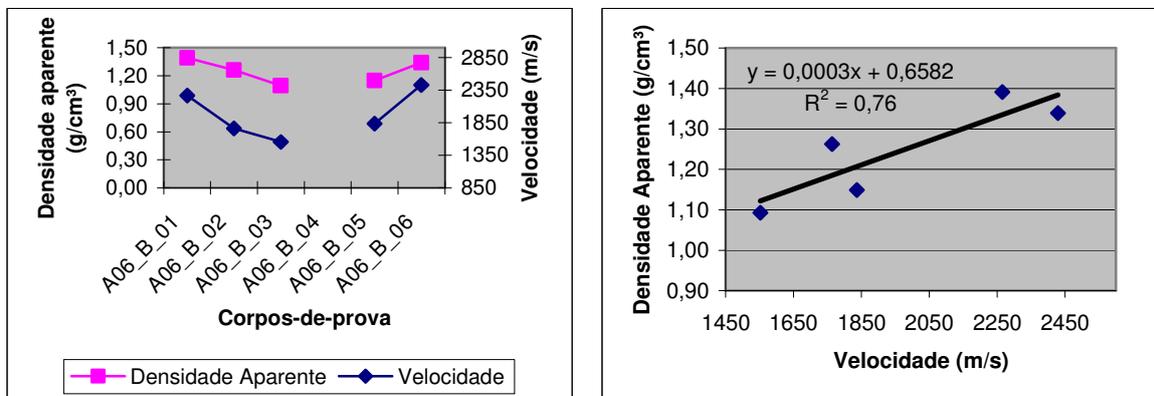


Figura A.18. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 06 – Seção B.

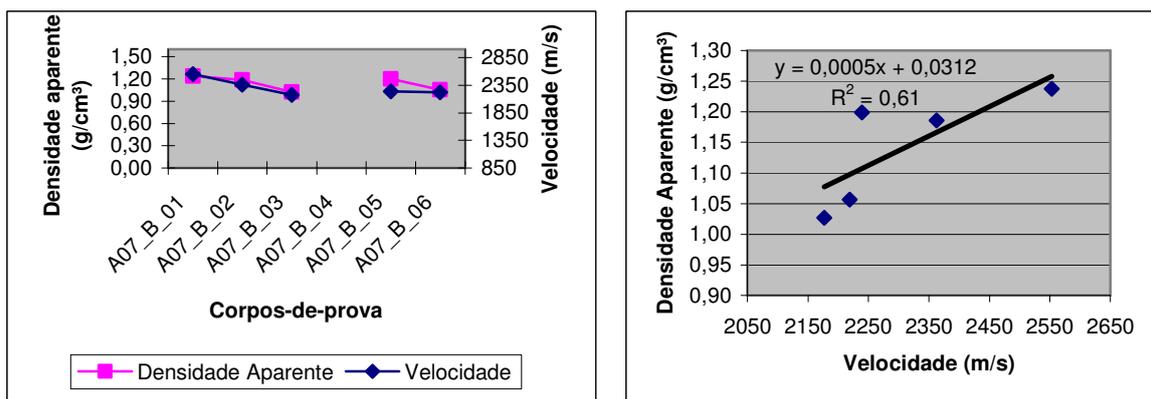


Figura A.19. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 07 – Seção B.

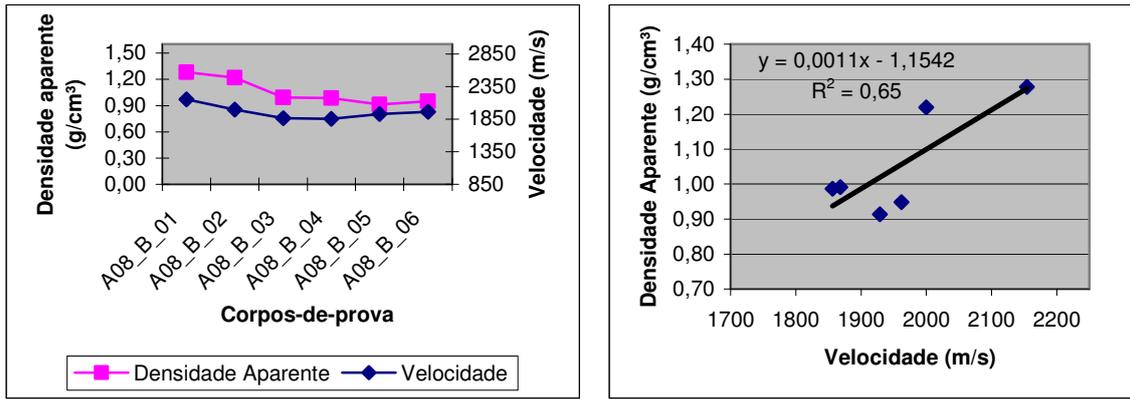


Figura A.20. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 08 – Seção B.

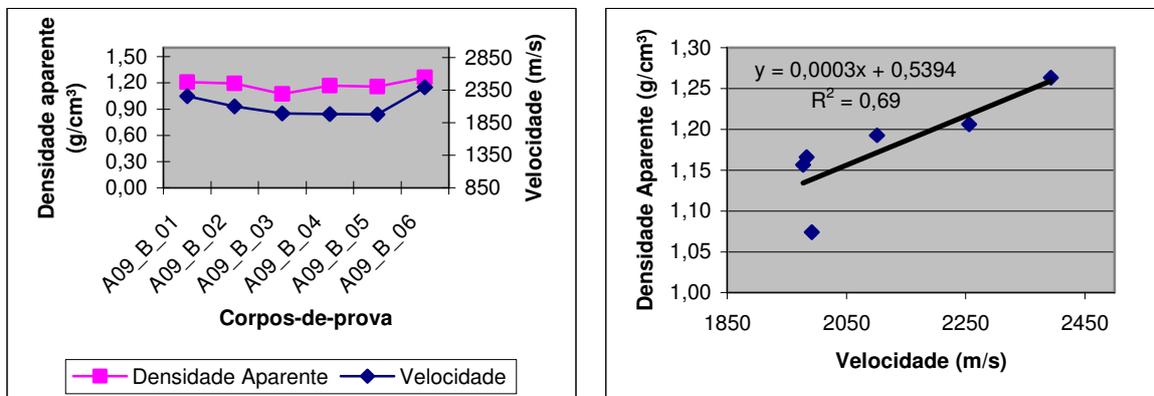


Figura A.21. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 09 – Seção B.

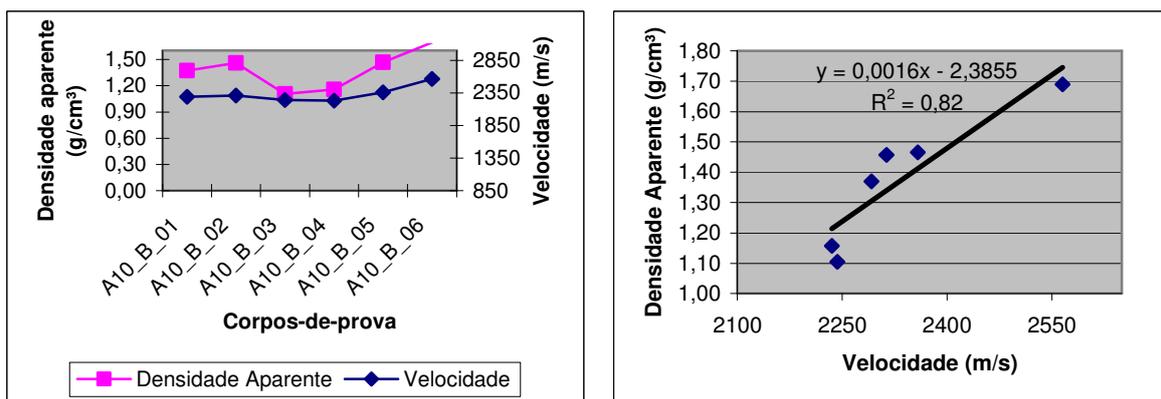


Figura A.22. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 10 – Seção B.

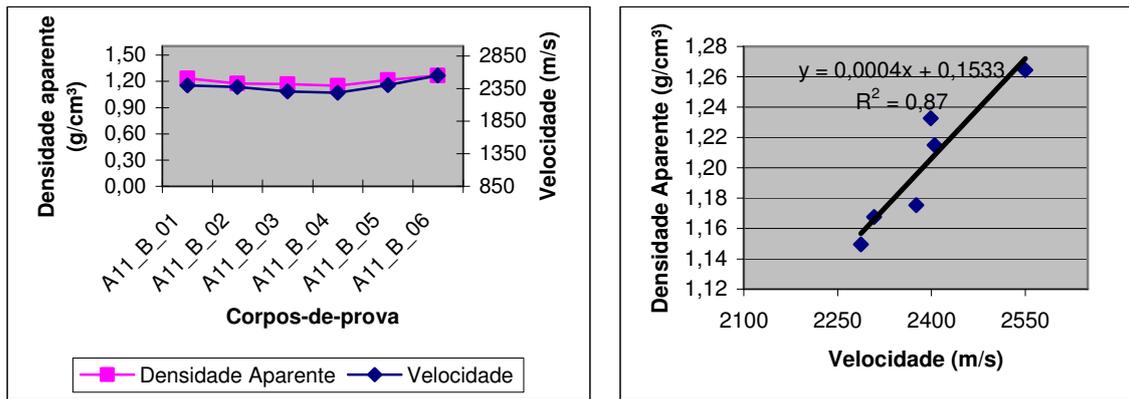


Figura A.23. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 11 – Seção B.

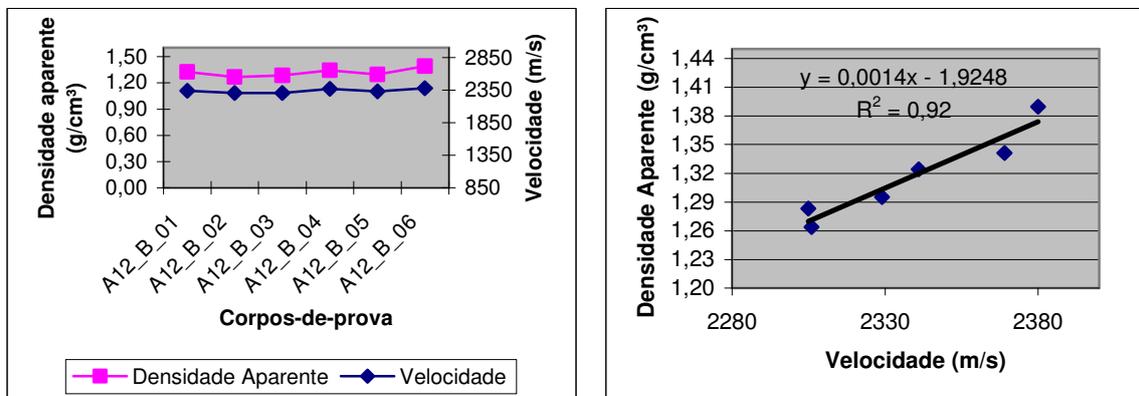


Figura A.24. Perfil de densidade aparente e velocidade de propagação da onda e o diagrama de dispersão da velocidade de propagação da onda versus densidade aparente – Árvore 12 – Seção B.

Da mesma forma que ocorreu para as seções C das árvores estudadas, foi possível verificar que os gráficos de perfil de densidade aparente (g/cm³) e de velocidade de propagação da onda (m/s) das amostras da espécie *Caesalpinea peltophoroides* para as seções A e B apresentaram tendência de distribuição dos pontos semelhantes. Pelos diagramas de dispersão verificou-se a tendência de aumento nos valores de velocidade de propagação da onda com o incremento da densidade aparente, estando de acordo com Carrasco; Azevedo Júnior (2003).