

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Velocidade de onda mecânica na avaliação de raízes de ancoragem de árvores
nas cidades**

Isabela Guardia

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

**Piracicaba
2020**

Isabela Guardia
Engenheira Florestal

Velocidade de onda mecânica na avaliação de raízes de ancoragem de árvores nas cidades
versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **DEMÓSTENES FERREIRA DA SILVA FILHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba
2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Guardia, Isabela

Velocidade de onda mecânica na avaliação de raízes de ancoragem de árvores nas cidades / Isabela Guardia. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

160 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Tomografia por onda mecânica 2. Raízes de ancoragem 3. Métodos não destrutivos 4. Avaliação de risco de árvores I. Título

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Claudete e Carlos, que sempre se esforçaram para possibilitar o melhor para mim e meus irmãos, agradeço pelo privilégio da vida e pelo eterno incentivo que me permitiu chegar até aqui e sempre ir além. Aos meus irmãos, Mariana e Leonardo, por me fazerem querer ser uma pessoa melhor e um exemplo como irmã mais velha.

Ao meu companheiro de vida, Raphael Denys Fava, pelas nossas alegrias e planos, pelo apoio às ideias nos momentos de animação e, principalmente, pelo incentivo até mesmo nos piores momentos. E também, é claro, por ser o melhor Mestre (em genética molecular de tomate!) a me auxiliar nas tomografias e no carregamento de madeira, tornando o trabalho mais fácil e mais tranquilo.

Aos meus avós Yolanda (in memoriam) e Manoel, que me ensinaram (ensinam) a amar as plantas, ao meu avô Theodoro (in memoriam) que me ensinou a falar e à minha avó Leonor (in memoriam) pelo eterno bom humor e por ter deixado em mim um pedaço de si.

Às minhas irmãs de coração da República Balaio, que comprovaram que nem toda família tem laços de sangue, e aos demais amig@s de Piracicaba, pelo companheirismo e por mostrarem a importância da diversão, dos desabafos e das risadas. À minha querida terapeuta Maria da Graça, profissional impecável e querida amiga, pelo incentivo e encorajamento nas questões acadêmicas e também artísticas.

Ao Professor Demóstenes, referência como pesquisador e um grande mentor, agradeço pelo conhecimento compartilhado e pela confiança depositada. Ao Jefferson, pela eterna paciência e ajuda a qualquer momento. À Giovana Oliveira, que não mede esforços para ajudar com tudo que puder e ainda ser terapeuta nos intervalos. À pós-doutoranda Rafaela Naves pela abençoada ajuda com o processamento estatístico.

Aos meus queridos colegas do Laboratório de Silvicultura Urbana da ESALQ/USP que me servem de exemplo e contribuem para meu crescimento nesta área, tanto com conhecimentos quanto nos momentos de descontração. E pelos maravilhosos momentos musicais no videokê.

Ao Prof. Dr. Mario Tommasiello e ao técnico Aparecido “Cido” Cândido Siqueira, pelo auxílio com o processamento das amostras de madeira e disponibilidade de tempo e equipamento.

Ao Dr. Rogério G. M. G. de Oliveira, pelos convites para participar como palestrante em cursos de Arborização Urbana, contribuindo para meu crescimento na área e pela sempre bem-vinda troca de conhecimentos e experiências.

Aos funcionários da Biblioteca Central da ESALQ, em especial à Silvia, e da Secretaria de Pós-Graduação, pela ajuda com a dissertação e com o processo de defesa.

Aos funcionários das empresas Forty (Limeira) e Engemaia (Piracicaba), pelo fornecimento de dados e de amostras que tornaram possíveis etapas cruciais deste estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo financiamento desta pesquisa na forma de bolsa de Mestrado, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo financiamento para a compra dos equipamentos Rinntech (processo 09/53931-6).

Às professoras e professores que tive na Escola AME durante o Ensino Fundamental e Médio, por incentivarem meu gosto pela ciência e vontade de continuar aprendendo sempre.

E a todas as pessoas que possuem como missão a geração do conhecimento voltado para o bem ambiental e social, compromisso do qual não desistem nem mesmo diante das muitas adversidades. “Nenhuma atividade no bem é insignificante. As mais altas árvores são oriundas de minúsculas sementes” (Chico Xavier).

“Que coisa surpreendente é um livro. É um objeto plano feito de uma árvore, com partes flexíveis (ainda chamadas de “folhas”) nas quais são impressos vários rabiscos escuros engraçados. Basta uma olhada e você está dentro da mente de outra pessoa, talvez alguém morto há milhares de anos. Ao longo dos milênios, um autor está falando clara e silenciosamente dentro de sua cabeça, diretamente para você. Escrever é talvez a maior das invenções humanas, unindo pessoas, cidadãos de épocas distantes que nunca se conheceram. Os livros quebram os grilhões do tempo. Um livro é a prova de que os humanos são capazes de fazer magia”.

Carl Sagan (1980) em *Cosmos*, Parte 11: A persistência da memória.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. A Arborização e seus efeitos no ambiente urbano	21
2.2. Interações na rizosfera urbana e seus benefícios	22
2.3. Biomecânica das árvores e suas raízes de ancoragem.....	24
2.4. Conflitos entre raízes e infraestrutura urbana.....	31
2.5. Risco de queda de árvores urbanas	37
2.6. Avaliação da integridade de árvores, raízes e amostras de madeira por onda mecânica	41
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	51
3.1. Procedência das árvores tomografadas com Arbotom e Arboradix e das amostras de madeira dos ensaios de tomografia com Arboradix.....	52
3.2. Método de Avaliação Visual de Árvores (VTA).....	55
3.3. Equipamentos utilizados para as tomografias de tronco e raízes: Arbotom® e Arboradix™ da Rinntech.....	56
3.4. Relação dos dados de velocidade de onda mecânica por Arbotom® com densidade de madeira por espécie	60
3.5. Análise estatística entre dados de velocidade de onda mecânica com Arbotom e de densidade da madeira	62
3.6. Ensaios de tomografia com Arboradix™ em amostras de madeira	62
3.7. Análise estatística dos dados de tomografia com Arboradix™ em amostras de madeira	71
3.8. Análise das tomografias de raízes de árvores com Arboradix™	72
3.9. Estudos de caso de tomografia com Arbotom® e Arboradix™ de árvores em cidades	73
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
4.1. Relação entre dados de velocidade de onda mecânica por tomografia com Arbotom e densidade da madeira	75
4.2. Resultados de tomografia de colo e raízes de tipuana (<i>Tipuana tipu</i> (Benth.) Kuntze) com Arbotom e Arboradix	80
4.3. Resultados das tomografias com Arbotom e Arboradix das árvores que forneceram as amostras de madeira	87
4.4. Resultados obtidos por tomografia das amostras de madeira com Arboradix	118
4.5. Estudos de caso: estatística e interpretação de tomografias de árvores com Arbotom e Arboradix	128
5. CONCLUSÕES	141
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	143
REFERÊNCIAS	145
ANEXOS.....	153

RESUMO

Velocidade de onda mecânica para avaliação de raízes de árvores nas cidades

Árvores nas cidades lidam com situações adversas específicas: ilhas de calor, conflito com mobiliário urbano, falta de espaço e manejo incorreto. No solo urbano, fatores como impermeabilização, compactação do solo, nutrição deficiente e injúrias mecânicas podem afetar negativamente o estabelecimento das raízes, ocasionando perda de integridade e resistência. Esses fatores facilitam a queda de árvores por falha no sistema de ancoragem das raízes, podendo provocar graves danos humanos e patrimoniais. A obtenção de diagnóstico de resistência e de ancoragem das árvores pode prevenir acidentes causados por queda de árvores nas cidades. O emprego de métodos não destrutivos na investigação da integridade de tronco e raízes de árvores urbanas é de extrema importância. São objetivos deste estudo: elucidar a correlação entre velocidades de propagação de onda mecânica ($m.s^{-1}$), obtidas com Arbotom e Arboradix, com densidade da madeira de amostras e árvores, gerando um modelo de correlação; verificar se diferentes tipos de pavimento no entorno das raízes geram interferência sobre as velocidades de onda com Arboradix e; aplicar os dados obtidos na interpretação dos gráficos de velocidade, visando embasar a avaliação das árvores e suas raízes de ancoragem nas cidades. Velocidades de tomografias com Arbotom foram comparadas com densidade da madeira por espécie na forma de regressão. Foram realizadas tomografias por Arboradix com amostras de madeira em laboratório, em cinco situações de pavimento, e tomografias com Arbotom e Arboradix nas árvores que forneceram as amostras, para comparação. Os resultados mostraram correlação positiva e significativa ($R^2=0,86$) entre velocidades por Arbotom e densidade de onze espécies de árvores. Tomografias com Arboradix indicaram diferença estatística entre os pavimentos grama e cimento, também observada nas tomografias em campo e nos estudos de caso. Entre a densidade básica das amostras e suas tomografias por Arboradix, apenas a condição testemunha gerou uma correlação positiva ($R^2=0,21$), porém não significativa. Os resultados sugerem interferência do tipo de pavimento sobre as velocidades de onda obtidas na tomografia com Arboradix. Dados de tomografia com Arbotom, nos planos radial e tangencial da madeira, se relacionaram melhor com a densidade da madeira do que dados com Arboradix no plano longitudinal da madeira. Tomografias de árvores urbanas confirmaram alguns resultados obtidos em laboratório com Arboradix e no processamento dos dados. Assim, sugerimos que a interpretação de tomografias com Arboradix considerem também o pavimento no entorno das raízes para resultados mais precisos. Estudos aprofundados, com maior n amostral, mais espécies e pavimentos diferentes devem ser conduzidos para uma melhor confirmação e compreensão dos resultados encontrados.

Palavras-chave: Tomografia por onda mecânica, Raízes de ancoragem, Métodos não destrutivos, Avaliação de Risco de árvores

ABSTRACT

Stress wave velocity in assessment of tree root anchorage in cities

Trees in cities face specific adverse situations, heat islands, confrontation with urban elements, lack of space and mishandling. In the urban soil, factors such as waterproofed and compacted soil, poor nutrition and mechanical damage can negatively affect root establishment, causing loss of root integrity and resistance. Trees falling due to failure or uprooting may cause serious damage to people and property. Therefore, the use of non-destructive methods in the investigation of urban tree trunk and root integrity is extremely important. Obtaining a diagnosis of mechanical strength and tree anchorage can prevent accidents caused by tree failures and falls in cities. Thus, the objectives of this study were: to elucidate the correlation between the wave propagation ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), with Arbotom and Arboradix, with the density of timber and trees; to verify if different types of pavement around the roots generate interference with Arboradix wave velocities and; apply the data obtained in the interpretation of velocity graphs to provide information regarding and the assessment of urban tree anchor roots. Arbotom tomographies were used to compare velocities with wood density per species. Arboradix tomography were performed in five pavement situations with wood samples in the laboratory, in the field with the trees that provided them, and in other trees for comparison. The results showed a positive and significant correlation ($R^2 = 0.86$) between speeds by Arbotom and density of eleven species of trees. Tomographies with Arboradix indicated a statistical difference between grass and cement pavements, also observed in tomographies in the field and in the case studies. Between the basic density of the samples and their tomography by Arboradix, only the control condition generated a positive correlation ($R^2 = 0.21$), but not significant. The results suggest the occurrence of pavement type interference in the mechanical wave velocities obtained in the Arboradix root tomography. Arbotom tomography data correlated better with wood density than Arboradix data. Urban tree scans confirmed laboratory results and data processing. Thus, we suggest that the interpretation of Arboradix tomographies also consider the pavement around the roots for more accurate results. In-depth studies with larger sample size, more tree species and different pavements should be conducted for better confirmation and understanding of the results found.

Keywords: Mechanical wave tomography, Anchor roots, Nondestructive methods, Tree risk assessment

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Modelo mecânico tradicional de árvores, para espécies folhosas (adaptado de GASPERINI et al., 2016)... 26
- Figura 2. Sistema radicular do modelo mecânico tradicional de árvores folhosas, com a articulação de rotação das raízes em caso de falha (MORELLI & RAIMBAULT, 2011 apud GASPERINI et al., 2016). 27
- Figura 3. Os três tipos básicos de sistema radicular. A: sistema em formato de coração com muitas ramificações. B: sistema em formato de prato com grandes raízes principais horizontais e secundárias profundas. C: sistema com grande raiz pivotante central e raízes laterais menores (STOKES & MATTHECK, 1996). 28
- Figura 4. Estágios de desenvolvimento morfológico do sistema radicular. Nos quatro primeiros estágios, A, B, C e D, a raiz principal (pivotante) exerce dominância. Nos estágios E e F, distinguem-se dois sistemas radiculares distintos: a raiz principal se estende em profundidade enquanto as raízes horizontais se concentram na camada superior do solo, desenvolvendo ramificações verticais vigorosas a partir da raiz principal. No estágio G, a degradação do sistema radicular começa no estágio H, com a morte progressiva das raízes mais profundas e continua no estágio J, com a morte até mesmo das raízes primárias. No estágio K, novas raízes horizontais e verticais se desenvolvem a partir do tronco antigo (MORELLI et al., 2017)..... 30
- Figura 5. Figura: Caminho A: medição entre dois pontos adjacentes entre si (1-2); caminho B: medição entre dois pontos intercalados (1-3); caminho C: intervalo de dois pontos entre uma medição feita entre dois pontos (1-4); caminho D: intervalo de três pontos entre uma medição feita entre dois pontos opostos em 90° (1-5) (LIN et al., 2011)..... 44
- Figura 6. Discos de madeira (à esquerda) e imagens tomográficas 2-D (à direita) de orifícios centrais de diversos tamanhos realizadas com avaliação por onda mecânica por Arbotom (LIN et al., 2011). 45
- Figura 7. a) Gráfico gerado pelo resistógrafo na análise interna de árvores, no qual o eixo x representa a distância interna percorrida pela agulha no lenho e o eixo y representa a resistência à penetração da agulha. b) Imagem gerada pela tomografia de impulso de uma seção transversal da árvore, onde rosa e vermelho indicam baixas velocidades de propagação de onda mecânica, representando madeira menos densa, enquanto o azul indica velocidades maiores, representando madeira mais densa (ROLLO et al., 2013). 47
- Figura 8. Trecho da Avenida Presidente Kennedy, no Bairro Nova Piracicaba, onde a espécie predominante na arborização viária é a tipuana (*Tipuana tipu*). Em primeiro plano, encontra-se tipuana T2, que recebeu tomografia com Arbotom e Arboradix. 53
- Figura 9. Exemplar de pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*) que recebeu tomografia com Arbotom e Arboradix e forneceu amostras de madeira, localizado na Área de Lazer da Rua do Porto, em Piracicaba-SP..... 54
- Figura 10. Indivíduos de sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum* (DC.) E.Gagnon & G.P.Lewis) nº2 em primeiro plano e nº1 ao fundo (à direita), que receberam tomografia com Arbotom e Arboradix e forneceram amostras de madeira, localizados no Largo Santa Cruz, em Piracicaba-SP. 55
- Figura 11. Equipamento completo de tomografia de tronco e raízes: Arbotom® e Arboradix™ ambos Rinntech. Fonte: [3] 58
- Figura 12. Demonstração de uso do tomógrafo com sensor Arboradix™ para detecção de raízes. Fonte: [5]. ... 59
- Figura 13. Imagem tomográfica, ou gráfico de linhas, gerada com o Arboradix™. Cada número no raio a partir do centro do tronco corresponde a um ponto de medição a cada metro de distância da árvore (Rinn, 2005). 60
- Figura 14. A: Demonstração de tomografia para detecção de raízes com Arboradix. Os sensores Arbotom são posicionados na região do colo da árvore e ligados por meio de cabos, sendo o último sensor Arbotom ligado à haste do Radix, a qual é posicionada nas raízes, quando houver afloramento, ou sobre o solo, onde recebe impulsos mecânicos na forma de batidas de martelo. B: Demonstração de tomografia com Arboradix em amostras de madeira. Os sensores Arbotom foram posicionados em um tronco para simular a região do colo da árvore e ligados por meio de cabos, sendo o último sensor Arbotom ligado à haste do Radix, a qual é posicionada a 1 m do último sensor, sobre a amostra ou sobre o solo, onde recebe impulsos mecânicos na forma de batidas de martelo. 64

- Figura 15. A: Tomografia das amostras de madeira com Arboradix™ na situação testemunha, na qual as amostras foram colocadas sobre cadeiras acolchoadas, com o intuito de mantê-las mais isoladas de possíveis interferências dos substratos sobre o quais as raízes estariam durante a tomografia de uma árvore. B: Tomografia das amostras de madeira com Arboradix™ sobre o substrato com grama, situação na qual o sensor Radix foi posicionado sobre uma extremidade da amostra de madeira, onde recebeu batidas de martelo para gerar impulsos de onda mecânica. C: Tomografia das amostras de madeira com Arboradix™ sobre o substrato com grama, situação na qual o sensor Radix foi posicionado diretamente sobre a grama, a aproximadamente 20 cm de distância da amostra de madeira, onde recebeu batidas de martelo para gerar impulsos de onda mecânica. D: Tomografia das amostras de madeira com Arboradix™ sobre o substrato de cimento, situação na qual o sensor Radix foi posicionado sobre uma extremidade da amostra de madeira, onde recebeu batidas de martelo para gerar impulsos de onda mecânica. E: Tomografia das amostras de madeira com Arboradix™ sobre o substrato de cimento, situação na qual o sensor Radix foi posicionado sobre uma extremidade da amostra de madeira, onde recebeu batidas de martelo para gerar impulsos de onda mecânica..... 67
- Figura 16. A: Amostras de madeira provenientes de galhos de árvores removidos em atividade de poda. B: Sub-amostras na forma de discos de madeira obtidos a partir de um corte na região central das amostras de galhos. C: Câmara à vácuo para saturação das sub-amostras. D: Sub-amostras dentro da câmara antes da colocação de água para saturação. E: Balança de precisão para obtenção da massa das sub-amostras. F: Obtenção da massa imersa das sub-amostras, realizada pela mesma balança da figura E. 70
- Figura 17. Imagem tomográfica obtida com Arboradix, com indicativo de velocidade em m s⁻¹ associada às cores do gráfico. Fonte: PEREIRA (2017). 72
- Figura 18. Gráfico da regressão logarítmica entre as velocidades médias de onda mecânica em m.s⁻¹ e os valores de densidade da madeira em g.cm⁻³ para cada espécie de árvore amostrada. O modelo logarítmico que descreve a regressão é $y=1533,27+462,04*(\log(x))$, com valor de R² ajustado de 0,86. 76
- Figura 19. Gráfico do tipo “*boxplot*” com a distribuição dos valores usados para calcular as médias de velocidade de onda (m.s⁻¹) de cada espécie, a mediana, a média e os limites inferiores e superiores, além da linha que representa a Densidade básica (g.cm⁻³) para cada uma das espécies. 78
- Figura 20. A: Tipuana T1 (*Tipuana tipu*), localizada na Av. Presidente Kennedy, Bairro Nova Piracicaba, com presença de extensa região de oco no caule (indicado pela seta), constatado pela tomografia com Arbotom (figura 21). B: Detalhe da tipuana (*Tipuana tipu*) T1, com restrição de raízes no lado do asfalto (à direita) e com possível poda de raízes na construção do canteiro (à esquerda). 81
- Figura 21. Imagem tomográfica obtida com Arbotom para a tipuana T1 (*Tipuana tipu*), apresentando a detecção de seu oco no caule pela área central de cor rosa, que corresponde às velocidades mais baixas na escala. 82
- Figura 22. Imagem tomográfica das raízes da tipuana T1 (*Tipuana tipu*) realizada com Arboradix..... 84
- Figura 23. A: Tipuana T2 (*Tipuana tipu*), localizada na avenida ao lado da tipuana T1, apresenta bom estado geral pela avaliação visual. B: Existe, porém, uma possível poda de raízes para construção do canteiro (à direita) e restrição de raízes no lado do asfalto (à esquerda). 85
- Figura 24. Imagem tomográfica do colo da Tipuana T2 (*Tipuana tipu*), realizada com Arbotom. 86
- Figura 25. Imagem tomográfica das raízes da tipuana T2 (*Tipuana tipu*) realizada com Arboradix..... 87
- Figura 26. A: Árvore da espécie angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), com diâmetro basal de 79,58 cm, localizada na Área de Lazer da Rua do Porto em Piracicaba-SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix. B: Angico-branco (*Anadenanthera colubrina*) com sensores do Arbotom posicionados em seu colo e afloramento de algumas das raízes de ancoragem. 91
- Figura 27. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 79,58 cm, de árvore da espécie angico-branco (*Anadenanthera colubrina*). 92
- Figura 28. Imagem tomográfica do sistema radicular de árvore da espécie angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), obtida com Arboradix. 93
- Figura 29. A: Árvore da espécie eritrina (*Erythrina falcata*), com diâmetro basal de 43,93 cm, localizada na Área de Lazer da Rua do Porto em Piracicaba – SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix. B: Eritrina (*Erythrina falcata*) com sensores do Arbotom posicionados na região do colo, apresentando afloramento de suas raízes de ancoragem. 94

- Figura 30. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 43,94 cm, de árvore da espécie eritrina (*Erythrina falcata*)..... 95
- Figura 31. Imagem tomográfica do sistema radicular de árvore da espécie eritrina (*Erythrina falcata*), obtida com Arboradix..... 96
- Figura 32. A: Árvore da espécie espatódea (*Spathodea campanulata*), com diâmetro basal de 46,79 cm, localizada na Área de Lazer da Rua do Porto em Piracicaba - SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix. B: Detalhe dos troncos codominantes da espatódea (*Spathodea campanulata*) durante tomografia de seu colo com Arbotom. 97
- Figura 33. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 46,79 cm, de árvore da espécie espatódea (*Spathodea campanulata*). 98
- Figura 34. Imagem tomográfica do sistema radicular de árvore da espécie espatódea (*Spathodea campanulata*), obtida com Arboradix..... 99
- Figura 35. A: Árvore da espécie freixo (*Fraxinus excelsior*), com diâmetro basal de 110,14 cm, localizada na Área de Lazer da Rua do Porto em Piracicaba-SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix. B: Freixo (*Fraxinus excelsior*) com sensores do Arbotom posicionados em seu colo e afloramento de algumas de suas raízes de ancoragem..... 100
- Figura 36. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 110,14 cm, de árvore da espécie freixo (*Fraxinus excelsior*). 101
- Figura 37. Imagem tomográfica do sistema radicular de árvore da espécie freixo (*Fraxinus excelsior*), obtida com Arboradix..... 103
- Figura 38. A: Árvores das espécies freixo (*Fraxinus excelsior*) à esquerda, e ipê-rosa (*Tabebuia rosea*) à direita, que cresceram encostadas, com diâmetro basal de 73,85 cm, localizadas na Área de Lazer da Rua do Porto, em Piracicaba-SP. Apenas o freixo forneceu amostras de madeira, enquanto as tomografias de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix foram realizadas em ambas simultaneamente. B: Detalhe da bifurcação entre o freixo (*Fraxinus excelsior*) ao norte e o ipê-rosa (*Tabebuia rosea*) ao sul, que cresceram encostados. 104
- Figura 39. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 73,85 cm, de árvores das espécies freixo (*Fraxinus excelsior*) e ipê-rosa (*Tabebuia rosea*), que cresceram encostadas. 105
- Figura 40. Imagem tomográfica obtida com Arboradix das raízes de árvores que cresceram encostadas, das espécies freixo (*Fraxinus excelsior*), na direção dos sensores R11 a R4; e ipê-rosa (*Tabebuia rosea*), na direção dos sensores de R5 a R10. 107
- Figura 41. A: Árvore da espécie pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*), com diâmetro basal de 109,82 cm, que apresenta fissura entre troncos codominantes, localizada na Área de Lazer da Rua do Porto em Piracicaba - SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix. B: Região do colo de árvore da espécie pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*), com sensores Arbotom e visível diferença na altura do solo entre os lados direito e esquerdo, onde havia a única raiz visível. 108
- Figura 42. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 109,82 cm, de árvore da espécie pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*). 109
- Figura 43. Imagem tomográfica do sistema radicular de árvore da espécie pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*), obtida com Arboradix..... 111
- Figura 44. Árvore nº1 da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), com diâmetro basal de 63,66 cm, localizada no Largo da Santa Cruz em Piracicaba - SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes. Sensores Arbotom estão posicionados no colo da árvore e sensor Arboradix no solo, mostrando afundamento da haste durante a tomografia..... 112
- Figura 45. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 63,66 cm, de árvore da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), indivíduo nº1..... 113
- Figura 46. Imagem tomográfica obtida com Arboradix, do sistema radicular de árvore da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), indivíduo nº1. 114

- Figura 47. Árvore nº2 da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), com diâmetro basal de 43,29 cm, localizada no Largo da Santa Cruz em Piracicaba - SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes. Sensores Arbotom estão posicionados no colo da árvore e sensor Radix no solo, mostrando afundamento da haste durante a tomografia.....115
- Figura 48. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 43,29 cm, de árvore da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), indivíduo nº2.....116
- Figura 49. Imagem tomográfica obtida com Arboradix, do sistema radicular de árvore da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), indivíduo nº2.....117
- Figura 50. Planilha com os dados referentes as 28 amostras de madeira, incluindo velocidades de onda obtidas nas cinco condições em laboratório (cadeira, cimento, grama, na grama e no cimento) e velocidades médias das tomografias de colo com Arbotom e de raízes com Arboradix, realizadas nas oito árvores que forneceram as amostras.120
- Figura 51. A: Gráfico do tipo “boxplot” com os valores de velocidade das tomografias de amostras de madeira sobre a cadeira e os pavimentos de cimento e grama. B: Gráfico do tipo “boxplot” com os valores de velocidade das tomografias de amostras de madeira com o sensor Radix posicionado na grama e no cimento.121
- Figura 52. Tabela com informações a respeito do solo sob tipos de coberturas comuns em ambiente urbano (NIERI, 2013).122
- Figura 53. Gráfico de dispersão que ilustra a correlação entre os valores de velocidade das tomografias de amostras de madeira sobre a cadeira *versus* a densidade básica calculada para essas amostras. A linha apresentada na figura é a tendência.124
- Figura 54. A: Tomografia com Arbotom, da região do colo de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, localizado próximo ao Restaurante Universitário da ESALQ/USP. B: Alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, com sensores do Arbotom posicionados, localizado próximo ao Restaurante Universitário da ESALQ/USP. Foto: Demóstenes Ferreira da Silva Filho. C: Tomografia com Arboradix, de raízes de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, realizada a 1 m de distância da base do tronco.129
- Figura 55. A: Segunda tomografia com Arbotom, da região do colo de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, localizado próximo ao Restaurante Universitário da ESALQ/USP. B: Alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, com sensores do Arbotom posicionados, localizado próximo ao Restaurante Universitário da ESALQ/USP. Foto: Demóstenes Ferreira da Silva Filho. C: Segunda tomografia com Arboradix, da região do colo de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, realizada a 2 m de distância da base do tronco.132
- Figura 56. A: Gráfico do tipo “boxplot” com os valores de velocidade da tomografia de raízes de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado nos pavimentos grama e cimento, a 1 m de distância do tronco. B: Gráfico do tipo “boxplot” com os valores de velocidade da tomografia de raízes de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) nos pavimentos grama e cimento, a 2 m de distância do tronco.134
- Figura 57. A: Tomografia com Arbotom da região do colo de árvore angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), obtida com Arbotom. B: Angico-branco (*Anadenanthera colubrina*) localizado próximo a uma construção no município de São Paulo-SP. Foto: Demóstenes Ferreira da Silva Filho, 2019. C: Imagem tomográfica de raízes de angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), obtida com Arboradix sob dois pavimentos, de grama e de cimento.136
- Figura 58. Gráfico do tipo “boxplot” com os valores de velocidade da tomografia de raízes de angico-branco (*Anadenanthera colubrina*) nos pavimentos cimento e grama, a 1 m de distância do tronco.138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Probabilidades de falha da árvore ou de parte dela (adaptada de ELLISON, 2005).	39
Tabela 2. Compilação da origem das árvores, tomografias e amostras utilizadas neste estudo, bem como as atividades realizadas com cada um desses elementos e onde cada uma ocorreu. As atividades marcadas com “Lab.” foram realizadas em laboratório e as marcadas com “Campo” foram realizadas no campo. Ao lado de cada atividade ou produto obtidos estão os números dos itens de Material e Métodos onde essas etapas estão detalhadas.	51
Tabela 3. Espécies estudadas e seus dados de velocidade média (m.s-1) de propagação de onda mecânica no interior do lenho, desvio padrão para as velocidades (m.s-1), amplitude de velocidades (m.s-1), densidade básica (g.cm ⁻³) obtida em literatura e n amostral. (*): densidades da madeira não definida entre básica e aparente. .	75
Tabela 4. Espécies estudadas e seus dados de velocidade média (m.s-1), de propagação de onda mecânica no interior do lenho, densidade da madeira (g.cm ⁻³) obtida em literatura (x), velocidade média estimada (y) a partir do modelo de regressão $V_m=1533,27+462,04*(\log(D_b))$ e resíduo entre a velocidade média real e a velocidade média estimada.	77
Tabela 5. Espécies estudadas e seus dados de densidade básica (g.cm ⁻³) em literatura, aplicados no modelo de regressão linear $V_m=1533,27+462,04*(\log(D_b))$ para obtenção da velocidade média estimada (m.s-1) de propagação de onda mecânica, a partir da densidade básica de cada espécie. Foi obtido o resíduo (m.s-1) referente à diferença entre a velocidade média real obtida com Arbotom e a velocidade média estimada de acordo com o modelo.	88
Tabela 6. Espécies estudadas e seus dados de velocidades médias obtidas por tomografia com Arboradix, sendo uma coluna com os valores médios de velocidade de onda presentes na escala de velocidades das imagens tomográficas e outra coluna com as velocidades médias calculadas pela metodologia de Mendes & Silva Filho (2019). O resíduo foi calculado pela diferença entre o valor central e a velocidade média calculada, para cada árvore.	90

1. INTRODUÇÃO

Imagine uma infraestrutura urbana que pode ser implantada no local em tamanho inicial reduzido, com baixo custo e que se autoconstrói ao longo do tempo, a partir de matéria-prima gratuita que retira diretamente do solo e do ar. Quando bem implantada, conduzida e manejada, estará pronta em poucos anos, realizando as mais diversas funções ambientais e fornecendo serviços ecossistêmicos.

Essa estrutura melhora a qualidade do ar (MCPHERSON et al., 1998), intercepta água da chuva, diminuindo enchentes (XIAO e MCPHERSON, 2002), evita o aquecimento excessivo do asfalto, diminuindo seu custo de manutenção (MCPHERSON e MUCHNICK, 2005), aumenta o conforto térmico pela diminuição da temperatura e aumento da umidade relativa do ar (BRUN et al., 2010), diminui o efeito das ilhas de calor urbanas (BARROS & LOMBARDO, 2016), produz flores, frutos e serve de abrigo para fauna, aumentando a biodiversidade (BRUN et al., 2007).

Seus benefícios sociais incluem embelezamento da paisagem (MULLANEY et al., 2015), gerando harmonia estética e amenizando a diferença entre a escala humana e outros componentes urbanos (SILVA FILHO et al., 2002), aumento do valor imobiliário das propriedades e redução de taxas de criminalidade (MULLANEY et al., 2015), atuando positivamente até mesmo sobre a saúde humana (MOREIRA et al., 2020).

Essa estrutura não é produto de tecnologia humana, no entanto, assim como os postes, a calçada e o asfalto, está sujeita ao desgaste, devendo receber manutenção e substituição quando necessário. Também está sujeita a falhas, sendo a menos grave a falta de fornecimento adequado de seus serviços ecossistêmicos aos munícipes, algo comparável a um poste de luz com a lâmpada queimada: está lá de pé, mas sem exercer sua função.

Já as falhas mais graves, decorrentes de condições inadequadas ou ações de manejo incorretas ou inexistentes, podem ameaçar o patrimônio e, nos piores casos, a integridade física ou a vida de alguém; algo comparável com a queda de um telhado ou o tombamento de um muro e, ainda assim, telhados e muros continuam sendo utilizados. No entanto, enquanto o retorno econômico dessa estrutura é frequentemente subestimado, os custos de danos causados por sua falha são amplamente divulgados (MULLANEY et al., 2015).

Mesmo após séculos de desenvolvimento urbano, existe uma estrutura que surgiu na Terra há milhões de anos, altamente eficiente e adaptável, além de extremamente barata

e acessível em comparação com outros materiais. Por ser uma estrutura biológica auto-otimizada, é capaz de reparar injúrias e compensar outras mudanças sofridas visando retornar ao seu estado ideal uniforme (MATTHECK & BRELOER, 1994).

Parece ser uma inovação tecnológica de ponta, capaz de mitigar sérios problemas das cidades, mas mesmo com todas essas vantagens e funções já citadas, essa estrutura tem sido negligenciada, estando ausente em muitos locais, tendo seu pleno funcionamento impedido por ações danosas, ou ainda, que muita gente não gostaria de tê-la na frente de sua casa, alegando que ela faz sujeira e quebra a calçada. Seus vizinhos também não querem uma dessas na frente de suas casas, mas todos os dias eles disputam espaço para estacionar seus carros sob a sombra da sua.

A grande discrepância entre essa e as demais infraestruturas urbanas é que a maioria das pessoas não conhece todos os benefícios que ela poderia fornecer, ao contrário dos postes e calçadas, que possuem funções simples e claras, e também essenciais para a vida nas cidades. Faz-se necessário que os cidadãos conheçam e possam usufruir desses serviços ecossistêmicos, mas também, que haja maior comprometimento do poder público em garantir um nível de segurança aceitável, investindo nas recomendações de implantação, manejo e ações preventivas que assegurem os benefícios e minimizem os eventuais riscos.

O nome dessa estrutura ainda não foi citado aqui, mas sem dúvida qualquer um saberia que se trata da árvore. As árvores de rua são parte integrante da infraestrutura verde das cidades, nenhum outro elemento estrutural é capaz de transformar tão dramaticamente o ambiente de uma vizinhança a um custo tão baixo como as árvores (MCPHERSON, 2000).

Segundo Mullaney et al. (2015), a maior parte da literatura disponível a respeito de árvores nas cidades tem origem em países de regiões temperadas, algo que pode ser resultante do aumento do financiamento para pesquisas nessas regiões e crescente interesse em informações sobre árvores urbanas. Essa limitação geográfica restringe o escopo e as conclusões das revisões e pesquisas em Silvicultura Urbana, extremamente necessários nas regiões tropicais. Informações adicionais sobre árvores nas cidades e seus benefícios, danos a infraestruturas e métodos de prevenção desses danos seriam altamente valiosos para embasar o manejo das árvores de rua nos ambientes urbanos (MULLANEY et al., 2015).

A combinação de informações escassas sobre árvores urbanas em regiões tropicais e a crescente ocorrência de eventos climáticos extremos reforça a necessidade de ampliar as pesquisas na área de Silvicultura Urbana, principalmente visando a prevenção de acidentes,

nos quais as árvores são as vítimas primárias, sofrendo em condições adversas ao seu desenvolvimento adequado, enquanto os munícipes podem se tornar as vítimas secundárias, sofrendo danos patrimoniais, ou no pior dos casos, pessoais.

A ocorrência de eventos climáticos extremos gera maior carga mecânica sobre as árvores, agravando situações preexistentes de desgaste na estrutura da madeira e perda de resistência biomecânica, principalmente na região do colo e das raízes de ancoragem. Portanto, a geração de informações a respeito da dinâmica dessas áreas mecanicamente mais vulneráveis das árvores deveria ser proporcional a esse aumento nas ocorrências de quedas de árvores, procurando fornecer embasamento para a tomada de ações de caráter preventivo.

Uma rápida busca sobre queda de árvores na internet resulta em centenas de ocorrências durante os meses chuvosos e as imagens mostram árvores obstruindo ruas, caídas em cima de carros, levando consigo postes e fiação. A queda ou falha de uma árvore é um evento extremo decorrente de um conjunto de fatores, partindo da falta de planejamento da arborização urbana, passando pela negligência com o manejo e culminando em árvores enfraquecidas, desgastadas, que entram em colapso sob o próprio peso.

A maior parte é de árvores de grande porte que caíram inteiras, isto é, quebraram na região do colo, ou foram arrancadas pelas raízes, sofrendo um pivotamento (*uprooting*). Esse tipo de queda indica falha mecânica na região do colo, a transição entre o caule e a inserção das raízes e, principalmente, falha nas raízes de ancoragem. Roatti et al. (2016) levantaram informações que saíram na mídia sobre falha de árvores e encontraram que em 90% dos casos as árvores caíram inteiras e 10% foram quedas de galhos. Diante disso, podemos imaginar que as árvores estão mais sujeitas a falhas que causam a queda delas inteiras, ou também, há o fato de que quedas de galhos causam menos danos, o que faz com que sejam menos reportados pela mídia.

Ainda considerando a árvore como parte da infraestrutura urbana, é necessário destacar que seu pleno funcionamento depende em grande parte da integridade de seu sistema de absorção e de sua estrutura de ancoragem, ambas funções do sistema radicular. O desempenho das árvores urbanas como provedoras de serviços ecossistêmicos não depende apenas da capacidade de seus sistemas radiculares em adquirir os recursos necessários ao seu desenvolvimento, mas também de fornecer ancoragem e sustentação mecânica para a árvore como uma estrutura (DAY et al., 2010).

Os conflitos entre as raízes de árvores e o pavimento geram grandes gastos monetários na mitigação dos danos resultantes. Esses gastos poderiam ser aproveitados de uma forma melhor se investidos na manutenção da saúde das árvores (MCPHERSON, 2000).

A carência de dados em Silvicultura Urbana é ainda mais profunda quando se trata da madeira de raízes, para as quais praticamente não há informações disponíveis. Devido à escassez de dados, as propriedades das raízes são geralmente assumidas como semelhantes às do tronco, no entanto, essa presunção pode estar incorreta. Isso também é agravado pelo fato de que as propriedades da madeira de muitas espécies de árvores urbanas são pouco conhecidas, visto que não possuem interesse econômico na indústria florestal (CAVALCANTI, 2018).

Detectar deterioração e cavidades em árvores de forma efetiva é uma questão importante para o gerenciamento da fitossanidade e segurança das árvores. Diversas técnicas de avaliação não destrutiva são empregadas para detectar deterioração em árvores e peças de madeira, de forma a identificar possíveis riscos (LIN et al., 2011). Imagens tomográficas fornecem resultados interessantes que confirmam a tomografia ultrassônica como uma potente ferramenta pouco invasiva para detecção de deterioração da madeira em árvores vivas, fornecendo resultados com alta precisão mesmo em situações complexas (SOCCO et al., 2004).

De acordo com Pereira-Rollo et al. (2014), a velocidade de um impulso através da madeira está relacionada com suas propriedades mecânicas e físicas, como densidade e módulo de elasticidade. Ambos esses atributos são influenciados pelo teor de umidade e pela estrutura anatômica da madeira.

Diversos estudos em comportamento de onda acústica e propriedades da madeira discutem a relação entre a velocidade de onda e módulo de elasticidade ou teor de umidade, assim como a correlação entre densidade da madeira e velocidade de onda, que poderia ser explorada mais a fundo para estimativas de densidade da madeira com uso de equipamentos (PEREIRA-ROLLO et al., 2014).

Sendo assim, o objetivo principal deste estudo foi utilizar o equipamento de tomografia de impulso Arbotom[®], juntamente com o sensor de raízes Arboradix[™], para a obtenção de informações a respeito de integridade de raízes de ancoragem por meio da velocidade de onda mecânica em $m.s^{-1}$, considerando que essa velocidade obtida é uma forma de aferição indireta de propriedades como densidade ou integridade da madeira avaliada.

Buscando confirmar essa função acima citada, o primeiro objetivo específico foi elucidar a correlação entre velocidade de propagação de onda ($m.s^{-1}$), medida por Arbotom® e Arboradix™, com a densidade da madeira de diversas espécies, gerando um modelo de regressão aplicável na interpretação de tomografias. O segundo objetivo específico foi verificar se existe interferência de diferentes tipos de cobertura de solo sobre as raízes ou em seu entorno nas velocidades de onda obtidas com Arboradix™. O terceiro objetivo específico foi aplicar o modelo de regressão e os dados obtidos a partir dos gráficos de velocidade na interpretação de tomografias, buscando informações a respeito das propriedades de Arbotom e Arboradix que facilitem o emprego desses equipamentos na avaliação de árvores urbanas e de suas raízes de ancoragem.

O objetivo futuro seria a geração de maior conhecimento a respeito das propriedades do Arboradix na avaliação das raízes, com a geração de novos modelos que facilitem a interpretação dos dados de velocidade de onda na prática, de forma que possam ser traduzidos em variáveis biológicas, para avaliação das raízes de ancoragem, além de considerar também as variáveis abióticas de entorno da árvore. Dessa forma, procuramos fornecer mais ferramentas para ações de manejo em caráter preventivo ou remediador, visando evitar quedas de árvores por falha de suas raízes de ancoragem. Essas recomendações visam diminuir os riscos presentes e atingir um nível de segurança aceitável para as árvores nas cidades.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A Arborização e seus efeitos no ambiente urbano

A Arborização Urbana atua sobre o conforto humano no ambiente por meio das características naturais das árvores em conjunto, proporcionando sombra para pedestres e veículos, redução da poluição sonora, melhoria da qualidade do ar, redução da amplitude térmica, abrigo para fauna e harmonia estética, amenizando a diferença entre a escala humana e outros componentes arquitetônicos como prédios, muros e avenidas (SILVA FILHO et. al., 2002).

O plantio de árvores em áreas urbanas é um processo complexo, que combina biologia, ciência do solo, arboricultura, entomologia, microbiologia, hidrologia e engenharia civil. A psicologia humana também desempenha um papel importante para o entendimento das interações e conflitos entre pessoas e árvores (URBAN, 2008). Assim, as árvores urbanas devem ser consideradas como parte integrante da infraestrutura verde das cidades, já que não existe nenhum outro elemento estrutural com um custo tão baixo capaz de atuar sobre o ambiente urbano da forma como as árvores o fazem (MCPHERSON, 2000).

As árvores de rua desempenham um papel fundamental na manutenção de comunidades urbanas saudáveis por meio do fornecimento de benefícios ambientais, sociais e econômicos, como fornecimento de sombra, redução de águas pluviais, melhor qualidade do ar e conectividade de habitat e paisagem para a fauna urbana. Além de tornar a cidade um ambiente mais habitável, os benefícios sociais das árvores incluem senso de comunidade e segurança e taxas reduzidas de crime. Os residentes também atribuem importância aos atributos estéticos e práticos, incluindo aumento do valor das propriedades (MULLANEY et al., 2015).

Em ambientes florestados, a temperatura tem uma queda acentuada à noite, mesmo durante os verões mais quentes, mas o mesmo não ocorre nas cidades, onde ruas e prédios emanam calor absorvido durante o dia e mantêm a temperatura de superfície alta mesmo à noite (WOHLLEBEN, 2017). A organização dos grandes aglomerados humanos em estruturas urbanas tem modificado a paisagem com estruturas que substituem cada vez mais os elementos naturais, feitas de materiais como asfalto, concreto, cerâmica, amianto, vidro e ligas metálicas. O mobiliário urbano, composto principalmente desses materiais, adquire

então elevada capacidade de absorção da radiação solar, condicionando um microclima seco e quente, formando as denominadas de “ilhas de calor”, as quais geram desconforto térmico e afetam a população pela alteração do balanço de energia (SILVA FILHO et al., 2005).

Silva (2012) estudou a relação entre áreas verdes urbanas e conforto térmico urbano e observou temperaturas de superfície na casa dos 60° graus no revestimento viário com asfalto. As elevadas temperaturas que atingem esses revestimentos de solo, principalmente o asfalto, contribuem para o desconforto térmico humano na forma de ilhas de calor. Esse fenômeno pode ser observado em cidades de dimensões variadas e ocorrem tanto em climas tropicais como temperados (STEWART & OKE, 2012).

No entanto, Zhou et al. (2011), observaram que a presença de vegetação arbórea é o principal fator para atenuação do fenômeno de ilhas de calor, bem como meios complementares como o uso de cores claras e telhados verdes. Barros & Lombardo (2016) verificaram temperaturas 8°C menores em áreas urbanas com cobertura arbórea, em relação em relação à áreas altamente urbanizadas sem cobertura vegetal. Além de diminuir o efeitos das ilhas de calor, as arvores urbanas também aumentam a biodiversidade local, fornecendo flores, frutos e abrigo para a fauna (BRUN et al., 2007).

No entanto, mesmo fornecendo diversos serviços ecossistêmicos, as árvores de rua e seus valores econômicos são frequentemente subestimados, enquanto os custos de danos causados por acidentes com árvores são amplamente divulgados (MULLANEY et al., 2015).

2.2. Interações na rizosfera urbana e seus benefícios

Day et al. (2010) examinaram os atuais conceitos de como as características do ambiente subterrâneo urbano afetam as raízes das árvores, assim como as formas pelas quais raízes das árvores contribuem para os processos biogeoquímicos neste ambiente subterrâneo. A rizosfera urbana é um ambiente crítico não apenas para a saúde das árvores, mas também para o ecossistema urbano. O desempenho das árvores urbanas não depende apenas da capacidade de seus sistemas radiculares em adquirir os recursos necessários ao seu desenvolvimento, mas também de fornecer ancoragem e sustentação para a árvore como um todo.

Contudo, condições um tanto quanto comuns no ambiente urbano, tais como a compactação dos solos, presença de infraestruturas subterrâneas, contaminação química, pH elevado, alterações de temperatura e umidade criam um ambiente subterrâneo alterado, que

frequentemente afetam padrões de crescimento, morfologia, fisiologia e desenvolvimento das raízes (DAY et al., 2010). Silva (2012) observou temperaturas de superfície na casa dos 60° graus no revestimento viário com asfalto, porém, ainda não são bem conhecidos e quantificados os efeitos dessas elevadas temperaturas sobre o desenvolvimentos das raízes de árvores e na rizosfera urbana como um todo.

Além disso, as práticas associadas à criação e manutenção de uma paisagem, como o transplante de árvores e a utilização de sistemas de irrigação, podem alterar a dinâmica de crescimento das raízes das árvores. Por outro lado, as próprias raízes das árvores são capazes de alterar seu ambiente, por meio de sua influência nas propriedades biológicas, físicas e químicas do solo. Estes processos são parte da ecologia da rizosfera urbana, gerando implicações tanto para o estabelecimento de árvores urbanas, como para a avaliação de potenciais serviços ecossistêmicos que essas árvores e, particularmente seus sistemas radiculares, fornecem à sociedade (DAY et al., 2010).

Day et al. (2010) puderam identificar algumas questões ainda pouco abordadas nos estudos da rizosfera urbana e das interações ecológicas dessas raízes no ambiente urbano. Os pontos seguintes são possíveis áreas de pesquisa futura propostos por eles, a partir da identificação de questões não respondidas dentro desse tema:

1. Comunidade biológica na rizosfera. Evidências abundantes apontam que os sistemas radiculares das árvores não podem ser totalmente compreendidos separadamente dos microrganismos da rizosfera. No entanto, ainda sabemos pouco sobre essas comunidades e como elas se desenvolvem em ambientes urbanizados. As interações ecológicas dentro da rizosfera podem não apenas influenciar o crescimento das árvores, mas também certos serviços ecossistêmicos fornecidos pelas árvores urbanas, como o tratamento de águas pluviais, que atualmente estão recebendo importância elevada (DAY et al., 2010).

2. Contaminação do solo. A crescente expansão urbana tem levado as cidades a ocuparem áreas anteriormente utilizadas para fins agrícolas ou industriais. Assim, profissionais que trabalham com árvores urbanas serão cada vez mais confrontados com o gerenciamento de árvores em áreas em fase de reabilitação, como os *brownfields*, locais onde houve uso industrial e existem resíduos contaminantes no solo. Apesar da existência de informação a respeito de raízes e solos disponíveis a partir de fitorremediação e despojos de minas, ela se concentra em maximizar a extração de contaminantes por plantas que eventualmente serão colhidas e descartadas com segurança. Pouco se sabe sobre os desafios de longo prazo para o cultivo de

árvores em áreas com solos contaminados e seus efeitos sobre as raízes dessas árvores (DAY et al., 2010).

3. Mudanças climáticas. Existem crescentes evidências científicas demonstrando que a temperatura global está aumentando, níveis de CO² atmosférico estão subindo, deposição de N na atmosfera está aumentando, e as ilhas de calor urbano estão gerando ozônio ao nível do solo. Todos esses fatores afetam o crescimento das raízes e o desenvolvimento, de maneira direta ou indireta, da parte aérea da planta. Quais serão as respostas em longo prazo dos sistemas radiculares e das árvores neste ambiente alterado? (DAY et al., 2010).

Os ecossistemas urbanos estão sob crescente investigação enquanto a sociedade esforça-se para gerenciar o ambiente urbano de forma sustentável. As árvores urbanas desempenham um papel crítico no meio urbano em vários níveis. À medida que formos capazes de aumentar nossa compreensão acerca dos complexos processos ecológicos na rizosfera, não seremos apenas capazes de gerenciar melhor as árvores da paisagem, mas também nos beneficiar plenamente do papel que elas desempenham nos processos dos ecossistemas urbanos (DAY et al., 2010).

2.3. Biomecânica das árvores e suas raízes de ancoragem

Árvores são estruturas dinâmicas submetidas a forças como o vento e a gravidade em sua parte aérea. Conforme cresce em tamanho, a árvore é submetida a forças maiores e responde a esse estresse adicionando madeira à sua base e alargando-a, região conhecida como colo da árvore (*trunk flare*). Essa é uma zona de transição entre o tronco e as raízes, ou seja, é o ponto de junção entre a parte vertical (tronco) e sua área de sustentação (raiz) e, como tal, seu crescimento deve ser levado em conta no plano de implantação das árvores, assim como deve ser periodicamente inspecionado para avaliação de sua integridade (URBAN, 2008).

A podridão de raízes em árvores urbanas é causada principalmente por fungos que atacam o sistema radicular e provocam sintomas na parte aérea como clorose ou descoloração, declínio da copa e até mesmo a morte das árvores. Consequentemente, a presença de podridão diminui a capacidade de ancoragem das raízes, as quais podem ser arrancadas do solo em condições de ventos fortes e tempestades, podendo provocar danos materiais e pessoais (AUER, 1996). Nesse contexto, mostra-se necessária a avaliação das propriedades físico-mecânicas do lenho sadio e deteriorado das árvores urbanas, para compreensão dos processos de

biodeterioração e das forças de tensão de ruptura, permitindo melhor definição de critérios para predição do seu risco de queda (BRAZOLIN, 2014).

Segundo Gasperini et al. (2016), a avaliação da estabilidade de árvores é atualmente empregada em ambientes urbanos como uma ferramenta de diagnóstico para monitorar e reduzir quedas de árvores. Baseada na aplicação de protocolos específicos de diagnóstico, a avaliação de árvores possui uma fase inicial de análise visual que pode ser complementada por inspeções internas com instrumentos. Essas duas fases da avaliação de estabilidade da árvore pretendem fornecer a identificação de desvios quantitativos ou qualitativos de modelos teóricos de estabilidade ideal de árvores (figura 1). Tais desvios, chamados de defeitos, possuem potencial de aumentar a probabilidade de falha ou queda da árvore (MORELLI, 2010; MORELLI, 2015 apud GASPERINI et al., 2016).

O reconhecimento e mensuração de tais defeitos em árvores são relacionados com um modelo mecânico estimado, o qual pressupõe algumas características como solidez anatômica e coesão entre as ramificações primárias, tronco principal e raízes superficiais de ancoragem (figura 1) (GASPERINI et al., 2016). Essa alta coesão entre três diferentes estruturas anatômicas da árvore é garantida pela presença de características anatômicas específicas localizadas tanto no nível da copa, como a região do colar dos galhos (*stipes*) e na base da árvore, como o engrossamento caracterizado como raízes tabulares (*buttresses*) (Albrecht et al., 1995; James K., 2003 apud GASPERINI et al., 2016).

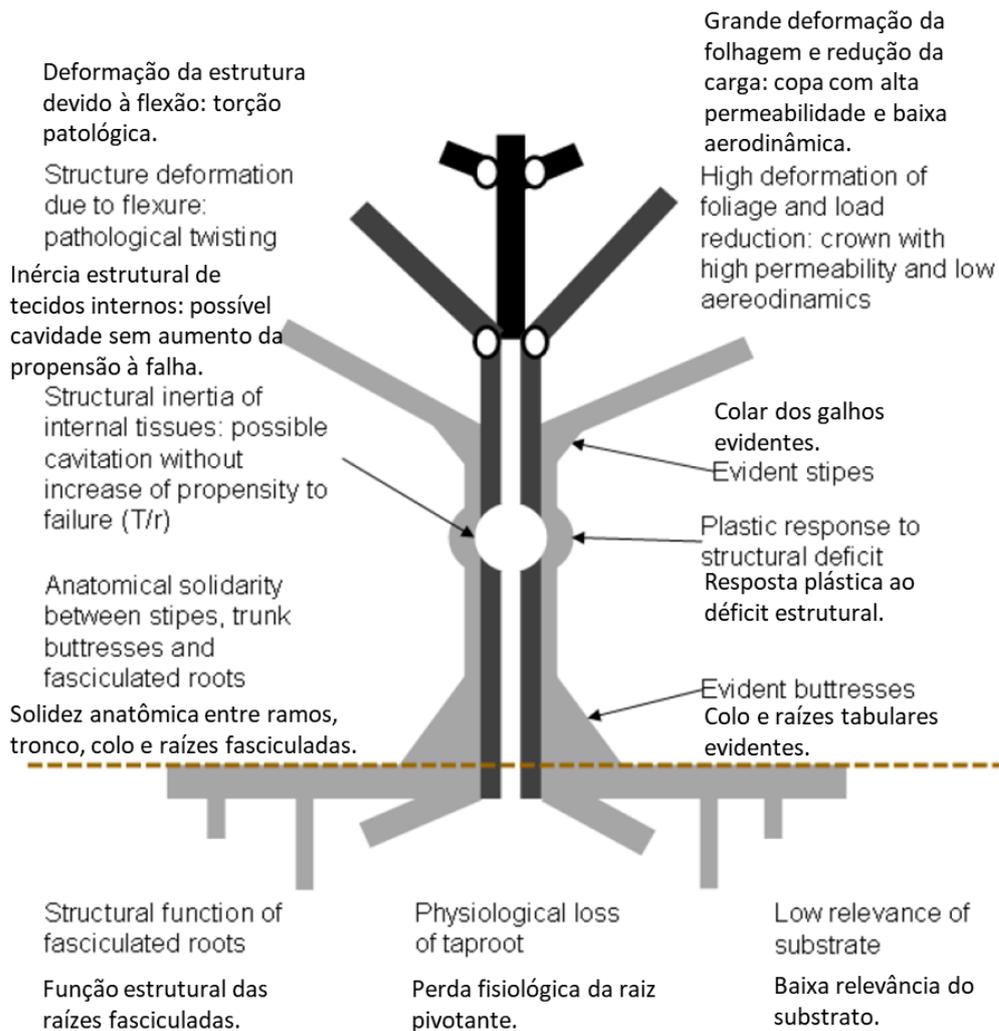


Figura 1. Modelo mecânico tradicional de árvores, para espécies folhosas (adaptado de GASPERINI et al., 2016).

A estabilidade das árvores depende da sua forma, sua resistência geral e, especificamente, do tipo de sistema radicular presente. Cargas externas, como ventos, devem ser transferidas do tronco para as raízes e delas para o solo, de forma a evitar a falha mecânica da árvore por sobrecarga. Se o sistema radicular for inadequado para ancoragem, a árvore irá tombar (quebrar na base ou colo – “*topple*”) ou pivotar (*uproot*). Assim, o sistema radicular das árvores deve ser extenso o suficiente para transferir cargas para o solo e forte o suficiente em áreas sob estresse contínuo para prevenir a quebra (STOKES & MATTHECK, 1996).

Durante tempestades, danos às árvores ocorrem na forma de quebra ou pivotamento, ambos resultando em tombamento e queda da árvore por sobrecarga de vento. Os valores críticos da carga de vento são diferentes entre essas duas formas de falha e depende das propriedades mecânicas do tronco e da ancoragem do sistema radicular no solo (DUPONT et

al., 2015). Quando uma árvore correspondente ao modelo descrito na figura 1 cai por soerguimento do sistema radicular (*uprooting*), ocorre uma rotação de toda a estrutura da árvore em torno da articulação de rotação (*hinge*) do sistema radicular da árvore (figura 2) (GASPERINI et al., 2016).

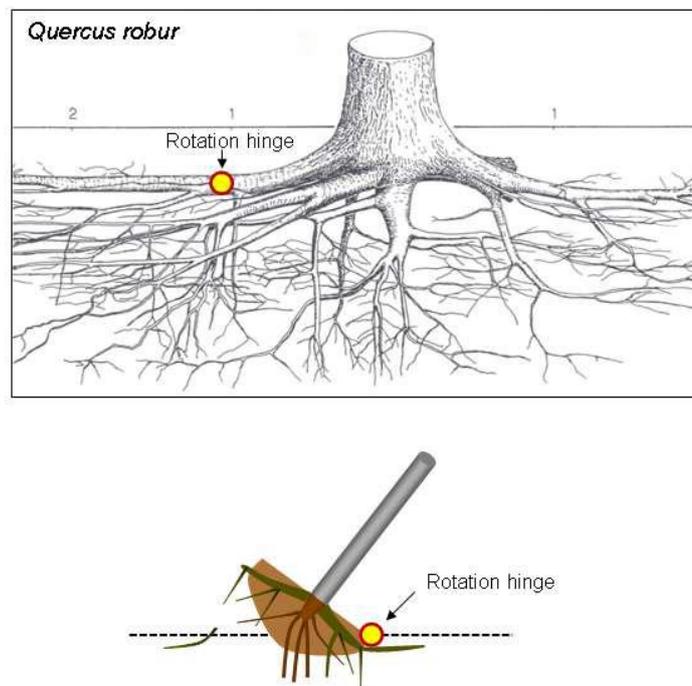


Figura 2. Sistema radicular do modelo mecânico tradicional de árvores folhosas, com a articulação de rotação das raízes em caso de falha (MORELLI & RAIMBAULT, 2011 apud GASPERINI et al., 2016).

Existem diversas formas pelas quais as raízes podem fornecer ancoragem às árvores. Büsgen et al. (1929 apud STOKES & MATTHECK, 1996) classificaram sistemas radiculares em três categorias principais, baseado em sua forma tridimensional básica. O tipo mais comum de sistema radicular em angiospermas é o sistema em “coração”, no qual raízes laterais verticais e horizontais se desenvolvem a partir da base do tronco (figura 3-A). Os sistemas em forma de “prato” são comuns em gimnospermas e consistem em raízes laterais se alongando horizontalmente a partir da base do tronco e raízes secundárias se desenvolvendo para baixo a partir laterais (figura 3-B). O terceiro tipo de sistema radicular encontrado em poucas espécies é aquele no qual uma raiz principal pivotante ancora a árvore diretamente, como uma estaca no solo (figura 3-C) (STOKES & MATTHECK, 1996).

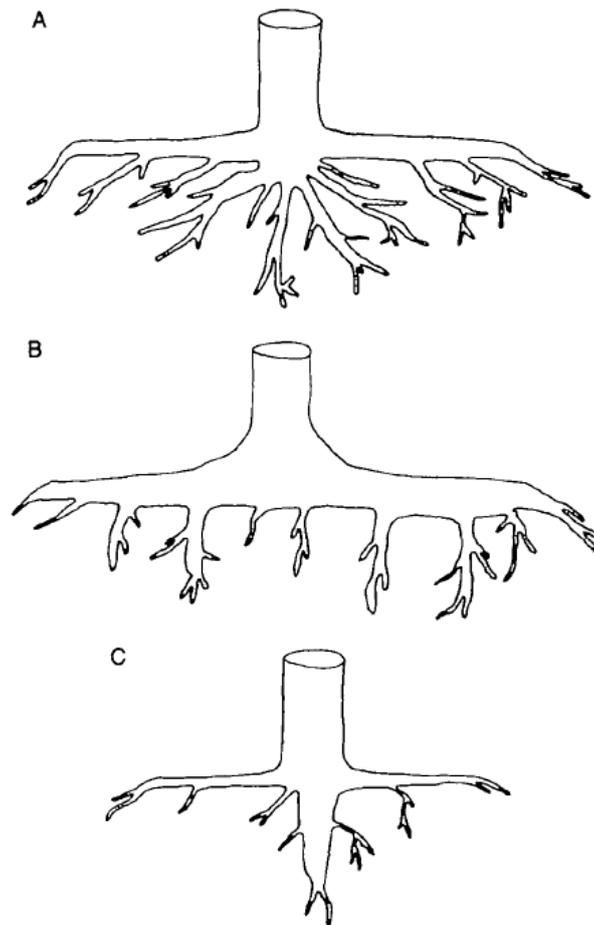


Figura 3. Os três tipos básicos de sistema radicular. **A:** sistema em formato de coração com muitas ramificações. **B:** sistema em formato de prato com grandes raízes principais horizontais e secundárias profundas. **C:** sistema com grande raiz pivotante central e raízes laterais menores (STOKES & MATTHECK, 1996).

O exame de resistência da madeira de raízes entre diferentes árvores indicou que espécies individuais investem em uma quantidade particular de recursos para o tecido radicular, dependendo das condições locais e do tipo de sistema radicular da espécie (STOKES & MATTHECK, 1996). Stokes & Mattheck (1996) observaram que as árvores redistribuem seus recursos para áreas que sofrem maior estresse mecânico, resultando em raízes menos afuniladas com áreas de resistência máxima.

Raízes laterais de sistemas em formato de prato, as quais se desenvolvem muito próximas à superfície do solo, sofrem muito mais força de tração do que as raízes afuniladas dos sistemas radiculares em formato de coração ou pivotantes, os quais se desenvolvem muito mais profundamente no solo e são protegidos das forças por ele. As forças de tração e compressão das raízes laterais em sistemas coração ou pivotante diminuem com o aumento

da distância da árvore no solo. A estabilidade das árvores aumenta quando as forças de carga externas podem ser dissipadas no solo de forma rápida e suave (STOKES & MATTHECK, 1996).

A Lei de Mohr-Coulomb de mecânica do solo também define algumas das interações entre raiz e solo, explicando as tensões de coesão e cisalhamento entre as partículas do solo sob o sistema radicular da árvore (MATTHECK & BRELOER, 1994). O estresse de cisalhamento é a medida da tendência de uma porção do solo a deslizar sobre a porção adjacente a ele. Essa tendência é resultado de uma força de fricção que, quanto maior, maior será o estresse de cisalhamento (MATTHECK & BRELOER, 1994).

Resumidamente, a força submetida pelo peso de uma árvore é a tensão normal, porém, diante de condições adversas, essa tensão pode aumentar a ponto da fricção entre a porção de solo aderida ao sistema radicular (*soil plate*) e o solo do entorno causar uma falha e a queda da árvore por soerguimento de raiz, ou pivotamento (*uprooting*) (MATTHECK & BRELOER, 1994).

Essas condições adversas incluem a ocorrência de eventos climáticos como ventanias, que incidindo sobre a copa da árvore aumentam a carga dela sobre o solo, e chuvas pesadas, que encharcam o solo e diminuem a coesão entre suas partículas; bem como a ocorrência de injúrias mecânicas ou podas drásticas de copa e raiz que afetam o equilíbrio das forças de tensão e compressão na árvore, aumentando assim sua carga sobre o solo, a ponto de causar seu cisalhamento e a queda da árvore (MATTHECK & BRELOER, 1994).

As formas pelas quais as raízes tipicamente interagem com o solo precisam ser bem compreendidas, especialmente em relação à mecânica do solo e ao Axioma de Estresse Uniforme (tradução livre de Axiom of Uniform Stress em MATTHECK & BRELOER, 1994), que consiste em uma lei natural de design que define que as árvores, assim como qualquer estrutura biológica que suporta cargas, tentam distribuir uniformemente as pressões recebidas, evitando que em sua estrutura haja a ocorrência de locais sobrecarregados (constituindo um possível ponto de falha) e subcarregados (com madeira excedente).

Árvores, como estruturas biológicas, tendem a fazer uma distribuição econômica de seu material, no caso a madeira, porém de forma a ser o mais resistente possível; sendo então, uma estrutura biológica auto-otimizada, que repara injúrias e compensa outras mudanças sofridas visando retornar ao seu estado ideal de cargas distribuídas uniformemente (MATTHECK & BRELOER, 1994).

No entanto, o próprio modelo mecânico de árvores tradicional representa uma condição de árvore em transição, dada sua natural evolução morfofisiológica, o que significa

que uma mesma espécie pode se adequar a diferentes modelos mecânicos no curso de sua vida (GASPERINI et al., 2016). Assim, a análise morfofisiológica se mostra uma ferramenta crucial na avaliação de estabilidade de árvores (figura 4) (GASPERINI et al., 2016; MORELLI et al., 2017).

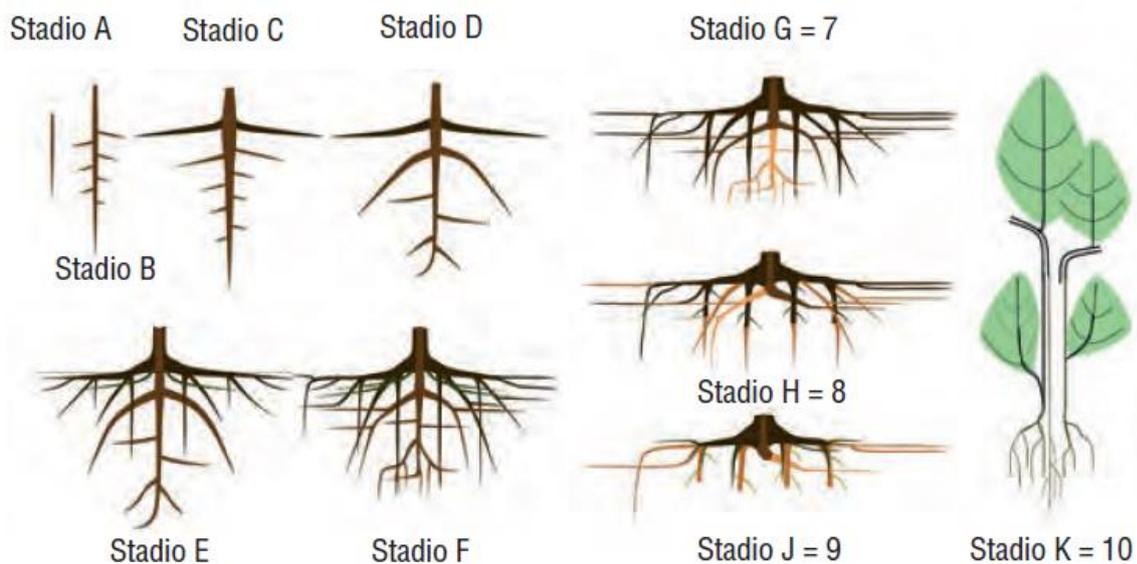


Figura 4. Estágios de desenvolvimento morfológico do sistema radicular. Nos quatro primeiros estágios, A, B, C e D, a raiz principal (pivotante) exerce dominância. Nos estágios E e F, distinguem-se dois sistemas radiculares distintos: a raiz principal se estende em profundidade enquanto as raízes horizontais se concentram na camada superior do solo, desenvolvendo ramificações verticais vigorosas a partir da raiz principal. No estágio G, a degradação do sistema radicular começa no estágio H, com a morte progressiva das raízes mais profundas e continua no estágio J, com a morte até mesmo das raízes primárias. No estágio K, novas raízes horizontais e verticais se desenvolvem a partir do tronco antigo (MORELLI et al., 2017).

Morelli et al. (2017) definiu uma sucessão de fases morfofisiológicas para árvores, que inclui o desenvolvimento do sistema radicular (figura 4). A primeira fase inclui os estágios A, B, C e D. No estágio A, a raiz pivotante exerce dominância e começa a se alongar verticalmente e sem ramificações. No estágio B, começam a se formar finas raízes laterais. No estágio C, as raízes principais começam a se desenvolver a partir da raiz pivotante. No estágio D, finalmente, a raiz pivotante se ramifica distalmente em várias raízes principais oblíquas. No final da fase 1, o ápice da raiz pivotante tem sua dominância reduzida. Na fase 2, ocorre a otimização de forma e função do sistema radicular. No estágio E, a raiz pivotante e suas ramificações aumentam em diâmetro e se aprofundam no solo, com ramificações mais vigorosas, e o estágio F, esse sistema atinge seu desenvolvimento máximo. Simultaneamente, ramificações verticais se aprofundam e algumas das raízes horizontais principais se orientam para baixo (MORELLI et al. 2017).

Na terceira fase, estágio G (figura 4), ocorre a manutenção da função potencial, o sistema radicular atinge sua máxima expansão e a raiz pivotante se torna biologicamente suplementar. Na fase 4 (H, J e K), ocorre a redução do sistema radicular. No estágio H, a raiz pivotante se degrada, o sistema se torna mais superficial e compacto, o que torna a árvore mais suscetível a mudanças ambientais, No estágio J, a degradação atinge toda a porção periférica do sistema e no estágio K, ocorre uma reorganização geral do sistema radicular. Seguindo o estímulo da parte aérea nessa fase, ocorre uma progressiva atividade de ramificação, porém as novas raízes não possuem localização específica, ficando localizadas na base do tronco, agora completamente oco, correspondendo à parte aérea (figura 4) (MORELLI et al. 2017).

Stokes & Mattheck (1996) afirmam que se as respostas do sistema radicular às sobrecargas externas forem identificadas, elas poderão ser manipuladas para emprego em futuros programas de melhoramento, ou o manejo das culturas florestais poderá ser alterado para induzir um aumento na estabilidade das árvores. A identificação de características que contribuem para a estabilidade das árvores é, portanto, de extrema importância para a Silvicultura Urbana, tanto no desenvolvimento de futuros programas de melhoramento, como para auxiliar na escolha da espécie adequada para cada local.

2.4. Conflitos entre raízes e infraestrutura urbana

Segundo Urban (2008), as raízes tendem a buscar condições de solo mais favoráveis possíveis a seu alcance, buscando e explorando os recursos disponíveis. Nessas condições, pavimento e calçadas presentes na região de expansão das raízes mais grossas podem ser afetados e danificados por elas, que são capazes de engrossar e formar calos em contato com obstáculos. No entanto, as raízes mais finas, que realizam absorção de água e nutrientes, são extremamente frágeis, facilmente danificadas pela compactação do solo, corte, falta ou excesso de água, extremos de temperatura e elementos tóxicos.

Em solos altamente compactados, a necessidade de encontrar água e oxigênio poderá causar crescimento errático e imprevisível das raízes, que irão buscar o caminho de menor resistência para esses recursos (URBAN, 2008). Em condições de ambientes naturais, de 60 a 90% do volume total de raízes de árvores encontram-se nos primeiros 20 cm de solo e praticamente todas as raízes de grande porte, que promovem a sustentação da árvore, encontram-se nos

primeiros 60 cm superiores do solo (RUARK et al. 1982; CUTLER et al., 1990; COUTTS e NICOLL, 1991; DOBSON, 1995 apud RANDRUP et al., 2001).

As árvores de rua, plantadas ao longo do sistema viário urbano, enfrentam um grande número de adversidades às quais as árvores na floresta não são submetidas. Quando o sistema radicular começa a se expandir, a árvore se depara com um subsolo extremamente mais compactado, além de obstáculos como calçadas e tubulações (WOHLLEBEN, 2017). Sendo assim, não é estranho que haja tantos conflitos entre árvores e calçamentos ou estruturas subterrâneas. Na floresta esse problema não existe, afinal a árvore consegue se expandir de forma quase ilimitada, mas na cidade é comum a ocorrência de danos ao encanamento pela expansão das raízes (WOHLLEBEN, 2017).

Pereira (2017) observou correlações negativas entre a presença de infraestruturas urbanas no entorno do sistema radicular de árvores e crescimento de raízes, destacando edificações próximas como as estruturas que geraram as correlações mais significativas, de $R^2=-0,70$ e $R^2=-0,57$, para tipuana (*Tipuana tipu*) e árvore-da-china (*Koelreuteria bipinnata*), respectivamente. Ou seja, quanto maior a estrutura urbana e mais próxima da área de crescimentos das raízes, menor é o estabelecimento do sistema radicular das árvores nas cidades.

Randrup et al. (2001) revisaram a literatura publicada a respeito de conflitos entre raízes de árvores e elementos urbanos como calçadas, ruas e meio-fio; e identificaram fatores que, quando presentes, aumentam a chance desses conflitos: espécies arbóreas que atingem grande porte, espécies de rápido crescimento, área de plantio com volume restrito de solo, horizonte superficial do solo muito raso, fundações pouco profundas, irrigação superficial, distâncias menores que 2 a 3 metros entre árvore e calçada, árvores com mais de 15 a 20 anos.

Uma das formas de dano causado por raízes de árvores ocorre quando estas crescem sob calçadas, estacionamentos, ruas e muros, onde o incremento físico em tamanho das raízes em crescimento podem causar levantamento e movimentação das estruturas (DAY, 1991). No entanto, os danos parecem ser menos severos em solos maleáveis e pouco compactados, que podem se deformar e dar espaço enquanto as raízes crescem, ao contrário de solos densos ou compactados como ocorre em terraplanagem e na fundação das ruas (DAY, 1991).

Diversos estudos apontaram que a principal causa de conflitos graves entre raízes e infraestruturas parece ser a limitação do espaço para o crescimento das árvores no ambiente urbano (BARKER, 1983; WONG et al., 1988; MCPHERSON e PEPPER, 1995; FRANCIS et al., 1996

apud RANDRUP, 2001). Randrup et al. (2001) sugerem ainda que, apesar da baixa disponibilidade de dados, quanto mais distante da calçada ou meio-fio a árvore se encontra, menor a probabilidade de ocorrer conflitos entre esses elementos.

McPherson (2000), estudando gastos municipais com conflitos entre raízes de árvores nas ruas e o pavimento adjacente, concluiu que espaços de plantio restritos foi o fator que mais contribuiu para gerar danos à pavimentação, enquanto que a inadequação das espécies de árvores plantadas foi o segundo fator mais expressivo.

Em relação às características das árvores, vários estudos apontaram fortes correlações entre as dimensões arbóreas e conflitos com infraestrutura. Segundo Wagar e Barker (1983), árvores de diâmetros maiores apresentaram maior severidade de conflitos com calçadas e meio-fio. Wong et al. (1988) constataram que a maior parte das árvores começou a causar algum tipo de dano com um DAP (diâmetro à altura do peito = 1,30 m) entre 11 e 20cm. O incremento em diâmetro está ligado às idades mais avançadas das árvores, o que indica que desde jovens, com um DAP pequeno como o citado anteriormente, já pode haver conflitos entre elas e as estruturas urbanas próximas.

Até certo ponto, os constantes conflitos entre árvores e infraestruturas urbanas promove diminuição do porte das árvores da floresta urbana, devido à substituição das árvores maiores por espécies de menor porte. A consequência disso é a diminuição da cobertura arbórea, afetando também os benefícios fornecidos por ela (MCPHERSON, 2000).

Barker (1983), Day (1991) e McPherson e Peper (1995 apud RANDRUP, 2001), comparando espécies de mesmo porte apontaram que, as que possuem crescimento mais rápido, como eucaliptos (DAY, 1991), são as que possuem maior frequência de interferências nas calçadas e que tais interferências ocorrem mais cedo, em comparação a espécies de crescimento mais lento. Alguns autores afirmam que as raízes proliferam mais em áreas com condições favoráveis ao seu crescimento (NICOLL e COUTTS, 1997; HARRIS et al., 1999 apud RANDRUP et al., 2001), como próximos a vazamentos de água ocasionados pela danificação prévia da infraestrutura.

Sydnor et al., (2000) amostraram aleatoriamente calçadas de diferentes idades, com e sem árvores adjacentes, e observaram que, mesmo em calçadas mais antigas, a presença de rachaduras em blocos de calçamento próximos às árvores não foi maior do que a observada em locais sem árvores, sendo que a proporção de blocos adjacentes a árvores é de apenas 10%.

Sendo assim, concluíram que a presença das árvores não foi um fator determinante para a quebra das calçadas durante o estudo.

Em relação ao levantamento dos blocos das calçadas, Sydnor et al., (2000) observaram que leva mais tempo para o crescimento das raízes afetar as calçadas do que o tempo que elas foram programadas para durar, entre 15 e 20 anos pois, antes desse período, não foram observados danos nas calçadas relacionados às árvores. Ainda que as raízes possam certamente afetar o calçamento, não se pode concluir que as árvores são a principal causa de danos nas calçadas.

Por muito tempo pensou-se que as raízes eram atraídas apenas pelo vazamento da umidade ou pelos nutrientes contidos nos efluentes, porém, um estudo da Universidade Ruhr, em Bochum, Alemanha, encontrou resultados diferentes: quando entrava no cano, a raiz permanecia acima do nível da água com nutrientes, ela buscava o solo mais solto, menos compactado que na superfície, onde há oxigenação e espaço para crescer. Ou seja, quando as raízes buscam um local mais propício para seu desenvolvimento, acabam entrando em conflito com o mobiliário urbano e tornam-se um problema (WOHLLEBEN, 2017).

As forças exercidas pelo crescimento radial das raízes são capazes de erguer estruturas leves, como calçamento, meio-fio, pavimentação, muretas ou, ocasionalmente, edifícios de apenas um andar, como garagens (BIDDLE, 1998 apud RANDRUP et al., 2001). O deslocamento ou a quebra dessas estruturas é geralmente progressivo (MACLEOD e CRAM, 1996 apud RANDRUP et al., 2001).

D'Amato et al. (2002), juntamente com a prefeitura municipal, realizaram um estudo entre 1999 e 2000 em Cincinnati, Ohio, nos EUA, examinando quatro gêneros de árvores de quatro famílias botânicas diferentes: *Quercus* (carvalho), *Koelreuteria* (árvore-da-china), *Zelkova* (zelkova), e *Gleditsia* (espinheiro-da-Virgínia). As árvores haviam sido plantadas nos 20 anos anteriores e foram observadas a condição da calçada próxima e a presença de raízes. As respostas para os quatro gêneros foram semelhantes: havia mais chance de se encontrar raízes sob rachaduras da calçada do que sob uma calçada intacta. Entre as calçadas observadas sem presença de raízes, 39% estavam intactas e 61% estavam rachadas. Para as calçadas com presença de raízes, apenas 16,2% estavam intactas, enquanto 83,9% estavam rachadas. Foram feitas também medições da concentração de oxigênio embaixo dos blocos de calçadas rachados e intactos. Foi constatada uma maior concentração de oxigênio sob as calçadas com rachaduras,

fato que pode estar contribuindo para um maior crescimento de raízes por baixo dessas calçadas já rachadas (D'AMATO, 2002).

Smiley (2008) comparou diversos métodos visando a redução dos danos nas calçadas causados por raízes de árvores viárias e concluiu que a instalação de tratamentos preventivos simultâneas à instalação da calçada ou da árvore são os métodos mais eficazes para reduzir os danos ao calçamento, principalmente quando são plantadas espécies arbóreas conhecidas por danificar o pavimento adjacente. No estudo com solo franco-argiloso moderadamente drenado, os tratamentos com barreira radicular foram os mais eficazes.

A instalação de espuma ou cascalho abaixo do pavimento também funcionou, uma vez que força o crescimento da raiz mais profundamente no solo. É provável que a combinação das barreiras verticais e tratamentos sob o solo possam reduzir ainda mais o risco de danos ao pavimento (SMILEY, 2008). No entanto, o planejamento das calçadas com a instalação desses tratamentos deve assegurar que o sistema radicular possa se desenvolver livremente pelo menos o suficiente para fornecer uma boa ancoragem mecânica à árvore, principalmente quando esta atingir seu porte máximo.

Wagar e Baker (1983) constataram em seu estudo que danos de raízes às calçadas e ao meio-fio dependem mais de questões de geometria, como dimensão da árvore e largura do canteiro, e de espécies de árvores do que da textura do solo. Previsivelmente, maiores diâmetros de árvores e canteiros estreitos foram duas condições associadas a danos mais severos. Uma medida em curto prazo para reduzir danos ao pavimento seria fornecer maior espaço para as árvores, além de selecionar espécies com menor potencial de causar dano. Diferenças de dano entre árvores da mesma espécie, tamanho e condições ambientais, sugere que, em longo prazo, danos ao pavimento poderiam ser evitados pela propagação e produção comercial de árvores e de porta-enxertos selecionados para níveis incomuns de dano.

Cutler, Gasson & Farmer (1990) investigaram as raízes de árvores que caíram após um evento de fortes ventos e chegaram às seguintes conclusões, a respeito dos principais fatores que podem contribuir para queda de árvores a partir de falha do sistema radicular:

- As árvores em seu auge de vigor, com altura média de 18 m e DAP menor ou igual a 0,5 m foram mais suscetíveis a sopro de vento do que árvores maduras ou doentes com copas ralas. Diâmetro do tronco e espessura máxima da raiz parecem estar relacionados, a tendência observada é que as árvores com troncos mais largos tenham raízes mais espessas, mas há variações interespecíficas e intraespecíficas. A

largura do tronco também pode estar relacionada ao raio da placa radicular (*root plate*), mas muitas outras variáveis também influenciam nessa característica (CUTLER, GASSON & FARMER, 1990).

- Em relação à profundidade, entre 45 e 50% das árvores relatadas tiveram raízes ocupando o metro superior do solo. As demais árvores tiveram raízes observadas até 2 metros de profundidade. No entanto, vale lembrar que existem variações. O tipo de subsolo também desempenha um papel importante na estabilidade da árvore: os solos arenosos proporcionam menos suporte do que os solos argilosos e os solos cascalhentos fornecem pouca sustentação às árvores (CUTLER, GASSON & FARMER, 1990).
- Em relação ao diâmetro, mais de 76% das árvores registradas não possuíam raízes na placa radicular com mais de 10 cm de espessura. De todas as árvores registradas, 36% não apresentaram raízes com mais de 5 cm de diâmetro. Recomenda-se evitar o corte ou poda dessas raízes próximas, responsáveis pela ancoragem das árvores, durante operações de manutenção de calçamento e redes subterrâneas e na realização de construções adjacentes às árvores (CUTLER, GASSON & FARMER, 1990).

Os resultados compilados no levantamento realizado por Randrup et al. (2001) apontaram que as cidades geram gastos monetários elevados na tentativa de resolver os conflitos entre as raízes das árvores e a infraestrutura urbana. A maior parte desses gastos é referente a problemas já existentes, no entanto, uma questão deve ser apontada: quanto desses gastos está sendo empregado para garantir a minimização desses conflitos no futuro? Conflitos entre raízes de árvores e pavimentos geram altos custos econômicos, ambientais, estéticos e sociais.

O resultado não é apenas um gasto monetário desnecessário, mas também a perda de benefícios fornecidos por árvores grandes e saudáveis com grande cobertura de copa. É necessária maior colaboração no manejo das infraestruturas cinza e verde das cidades, empregando estratégias para simultaneamente preservar os benefícios da floresta urbana e diminuir os gastos gerados por esses conflitos. Esses gastos poderiam inclusive ser aproveitados de uma forma melhor se investidos na manutenção da saúde das árvores (MCPHERSON, 2000).

2.5. Risco de queda de árvores urbanas

O ambiente urbano obriga as árvores a conviverem com situações adversas específicas deste meio, tais como altas temperaturas decorrentes de ilhas de calor, alterações de pluviosidade, maiores concentrações de poluentes e confronto com elementos urbanos, como garagens e rede elétrica. No solo urbano, muitas influências físicas e químicas podem afetar a saúde e o crescimento da arborização viária. Efeitos da impermeabilização das áreas no entorno, compactação do solo, poluição no subsolo, nutrientes excessivos ou insuficientes e injúrias mecânicas podem ter efeitos, tanto imediatos como de longo prazo, sobre o desenvolvimento e sobrevivência dessas árvores (QUIGLEY, 2004).

Prefeituras municipais e concessionárias de energia elétrica devem se preparar para evitar acidentes com árvores, que podem afetar o trânsito, os serviços de fornecimento de água, energia elétrica e causar danos às propriedades, assim como às pessoas (BRAZOLIN, 2009).

Ellison (2005) estudou a avaliação do risco em árvores amenizadoras de condições ambientais urbanas e definiu alguns termos tipicamente utilizados nessas avaliações:

2.5.1. Perigo

“Um perigo é a disposição de alo, condição ou situação para produzir dano” (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 1995 apud ELLISON, 2005). O perigo ou risco de falha de uma árvore está presente quando essa árvore tem potencial para causar danos a pessoas ou propriedades.

2.5.2. Risco

De acordo com Health and Safety Executive (1995) apud Ellison (2005), o risco é medido como a probabilidade de algo adverso acontecer. Uma avaliação de risco quantificada incorpora estimativas numéricas. O objetivo é identificar de alguma maneira quantitativa ou, pelo menos, comparativa, a conexão entre a probabilidade de uma ocorrência adversa e a exposição real ao dano.

2.5.3. Risco aceitável

Estamos constantemente expostos e aceitamos ou rejeitamos riscos de vários graus. Ao avaliar os perigos de falha de árvore, dois tipos de risco devem ser considerados: devemos considerar a pessoa sobre quem um risco é imposto, como com o vizinho de um dono de árvore, e a pessoa que aceita algum grau de risco em troca de um benefício, como um dono de árvore ou visitante de uma floresta ou floresta. Tendo considerado o Guia de Associação Médica Britânica Vivendo com Risco, em tradução livre, (HENDERSON 1987 apud ELLISON, 2005) e com particular referência à conclusão de que “poucas pessoas comprometeriam seus próprios recursos para reduzir um risco anual de morte que já era de 1 / 10.000”, Helliwell (1990) apud Ellison (2005) sugere que 1 / 10.000 pode ser um valor adequado para começar como limite de risco aceitável. No gerenciamento de árvores, pode-se adotar esse limite de 1 / 10.000 como risco aceitável ou optar por um nível mais alto ou mais baixo (ELLISON, 2005).

2.5.4. Custo e benefício

As árvores conferem muitos benefícios, sendo essenciais para o nosso bem-estar e conforto, portanto, a remoção de todos os riscos das árvores ocasionaria certo empobrecimento na qualidade de vida humana. Para contornar essas questões, é necessária a manutenção do equilíbrio entre os benefícios da redução de risco e os custos dessa redução de risco, não apenas financeiramente, mas também em termos de perda de benefícios relacionados à presença das árvores (ELLISON, 2005).

2.5.5. Avaliação de risco de árvores

Para que um risco de falha de árvore exista, deve haver potencial para falha da árvore e a possibilidade de resultar em ferimentos ou danos. A questão que o avaliador da árvore deve abordar é a probabilidade, ou o risco, de uma combinação de fatores que resultam em danos e a provável gravidade do dano (ELLISON, 2005). A metodologia proposta por Matheny e Clark (1994) tem sido amplamente empregada principalmente na avaliação dos riscos de falha de árvores em áreas urbanas e permite que os inspetores e gerentes de árvores priorizem ações corretivas de maneira estruturada. Essa metodologia propõe um sistema de classificação no qual, mediante avaliação visual, é aplicado um valor numérico de 1 a 4 para cada um dos três componentes que contribuem para o risco de falha da árvore: (1) potencial de falha, (2) tamanho

da parte da árvore que poderia falhar e (3) classificação do alvo. A soma das três pontuações é denominada “classificação de risco”, cujos valores variam de 3 a 12, que representa o risco mais grave (ELLISON, 2005).

Ellison (2005) propôs um sistema de avaliação quantificada do risco de árvores que quantifica o risco de forma estruturada, utilizando de forma modificada os três componentes do risco de árvore propostos por Matheny e Clark (1994): (1) probabilidade de falha, (2) potencial de impacto e (3) valor do alvo. O sistema permite a quantificação das probabilidades independentes dos três componentes, permitindo que seu produto (risco de dano) seja comparado com um nível de risco aceitável. O processo quantificado de avaliação de risco de árvores pode envolver inspeção detalhada e avaliação de cada árvore, ou exigir apenas uma visão geral de árvores e alvos. Na tabela 1 (adaptada de Ellison, 2005), temos as probabilidades de falha da árvore ou parte dela.

Probabilidade de falha: de que a árvore ou parte dela caia em um ano		
Alcance da probabilidade de queda	Porcentagem da probabilidade de queda	Razão da probabilidade
1: Muito alto	51-100	1/1
2: Alto	11-50	1/2
3: Moderado	1-10	1/10
4: Baixo	0,1-0,9	1/100
5: Muito baixo	< 0,1	1/1000

Tabela 1. Probabilidades de falha da árvore ou de parte dela (adaptada de ELLISON, 2005).

Uma probabilidade de morte ou lesão grave de 1 / 10.000 é sugerida como o limite de risco aceitável para o público em geral (Helliwell, 1990; Health and Safety Executive, 1996 apud, ELLISON 2005). Usando esse valor como limite aceitável, todos os riscos com uma probabilidade superior e ele exigem ações corretivas para reduzir o risco ao nível aceitável, a menos que o risco seja limitado a um indivíduo em particular - como um dono de árvore - que pode optar por aceitar um risco maior ou menor (ELLISON, 2005).

O risco de queda das árvores urbanas se agrava por fatores como escolha inadequada do local de plantio ou das espécies arbóreas. Somam-se a isto as interferências urbanas que

afetam o crescimento, como o tamanho de canteiros e calçadas, muitas vezes menores que o necessário, a presença das redes aéreas de abastecimento de energia e das redes subterrâneas de água, esgoto e gás. A execução de podas inadequadas por falta de treinamento pode desequilibrar a árvore e abrir caminho para patógenos que causam o apodrecimento do tronco e das raízes (BRAZOLIN, 2009).

A arborização realizada com baixa diversidade de espécies é também um fator relevante, uma vez que torna a floresta urbana mais suscetível a ocorrência de doenças e pragas. O conjunto desses fatores apontados contribui para o aumento no risco de queda das árvores (ROLLO, 2009).

Segundo Silva Filho & Polizel (2015), a avaliação do risco de queda identifica o nível de risco e recomenda ações a serem tomadas. Por meio da inspeção das árvores é possível avaliar e identificar o que pode ser feito para reduzir o risco e tomar medidas para fazê-lo. O mínimo necessário para que essa avaliação seja realizada em uma árvore é a inspeção visual, ou avaliação visual de árvores (VTA em inglês) (MATTHECK & BREOLER, 1994; SILVA FILHO & POLIZEL, 2015).

O diagnóstico visual realiza a análise de toda parte externa da árvore, da copa à base do tronco, considerando todos os problemas encontrados, tanto físicos como biológicos. Somando-se essas informações a um conjunto de análises do histórico e evidências, é possível desenvolver uma análise de risco completa que dará suporte à tomada de decisão quanto ao manejo e gestão das áreas verdes (BRAZOLIN, 2009). Tais avaliações devem aliar-se à análise da estrutura e de estabilidade das árvores, uma vez que lesões no tronco, bem como ataques causados por organismos xilófagos, que ocasionam perdas estruturais e menor resistência mecânica às árvores, o que aumenta o risco de ruptura das mesmas (ROLLO, 2009).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui a Norma ABNT NBR 16246-3 de 09/2019 intitulada Florestas urbanas – Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas, cuja Parte 3 é de Avaliação de Risco de Árvores. Essa Norma tem como objetivo estabelecer os requisitos para avaliação de risco de árvores, incluindo a integridade estruturas e outros fatores que afetem o nível de risco para as pessoas, propriedades ou serviços públicos, com o intuito de prover informações para o manejo adequados dessas árvores (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2019).

A Parte 3 da Norma ABNT NBR 16246-3 estabelece três níveis de Avaliação de Risco de árvores. No nível 1, é realizada apenas uma avaliação geral da árvore, sem focar em nenhum componente em particular. No nível 2 é realizada a Avaliação Visual de Árvores (VTA), uma

análise detalhada de cada parte da árvore, copa, tronco, colo, raízes visíveis e de seu entorno, como canteiro, calçada, presença de fiação aérea sobre a árvore etc. Nesse nível é definida se há a necessidade de avaliações mais detalhadas, com o emprego de equipamentos. O nível 3 é complementar ao nível 2, após a Avaliação Visual de Árvores é realizada a inspeção interna da árvore com equipamentos eletônicos não-destrutivos, como o tomógrafo e o resistógrafo e também pode ser realizada a escalada técnica, para inspeção de partes altas da árvore não visíveis a partir de uma observação ao nível do solo.

2.6. Avaliação da integridade de árvores, raízes e amostras de madeira por onda mecânica

Os danos em árvores urbanas frequentemente decorrem de problemas nas raízes (RINN, 2008). Mudanças que afetam diretamente a qualidade do solo são rapidamente percebidas pelas raízes, que reagem a elas e transmitem quimicamente essas condições para toda a árvore, o que faz com que a inspeção das raízes seja talvez a melhor forma de avaliar as perspectivas das árvores (URBAN, 2008). No entanto, ainda existem poucos trabalhos que investigam e exploram as características biomecânicas de raízes de árvores urbanas tanto sadias, quanto afetadas por patógenos ou injúrias. Portanto, faz-se necessária a realização de pesquisas para investigação e avaliação das raízes de sustentação das árvores urbanas.

Detectar deterioração e cavidades em árvores de forma efetiva é uma questão importante para o gerenciamento da fitossanidade e segurança das árvores. Diversas técnicas de avaliação não destrutiva são empregadas para detectar deterioração em árvores e peças de madeira, de forma a identificar possíveis riscos (LIN et al., 2011). Imagens tomográficas fornecem resultados interessantes que confirmam a tomografia ultrassônica como uma potente ferramenta pouco invasiva para detecção de deterioração da madeira em árvores vivas, fornecendo resultados com alta precisão mesmo em situações complexas (SOCCO et al., 2004).

Entre as técnicas de avaliação não destrutivas com maior potencial estão as desenvolvidas por investigação tomográfica, que permite a reconstrução de seções transversais inteiras da árvore, por meio de informações fornecidas pela passagem de energia através da madeira (PEREIRA, 2007), sendo capaz de gerar informações a respeito de seções transversais

inteiras, com uma única medição em cada um dos indivíduos avaliados, fornecendo informações sobre suas condições biomecânicas e fitossanitárias (ROLLO, 2009).

A tomografia por impulso mecânico (*stress wave tomography*) é baseada no princípio de que a propagação de ondas mecânicas na madeira está relacionada com suas propriedades mecânicas e integridade física. Ondas mecânicas se propagam em menor tempo na madeira mais densa, livre de defeitos físicos. Áreas irregulares (com rachaduras, cavidades ou podridão) possuem densidade de madeira mais baixa, o que requer maior tempo para que a onda atinja o segundo sensor, ou receptor. Medindo o tempo de transmissão da onda através da seção radial do caule, a condição interna da árvore pode ser determinada (ALLISON e WANG, 2015).

A tomografia ultrassônica demonstrou ser uma ferramenta muito efetiva para a detecção de podridão interna, localizando de forma precisa a posição da anomalia na madeira e estimando seu tamanho, formato e suas propriedades mecânicas (NICOLOTTI et al., 2003). O uso da imagem tomográfica é interessante para avaliar a saúde das árvores, pois é uma metodologia não destrutiva e abrangente (MENDES & SILVA FILHO, 2019).

De acordo com Allison & Wang (2015), a tomografia acústica emprega múltiplos sensores (de 8 a 32) para medir a transmissão de ondas mecânicas em múltiplas direções. Ondas mecânicas são geradas a partir de impactos causados por batidas de martelo sobre os sensores, e o tempo de transmissão dessas ondas é registrado por um computador, para cada um desses sensores. A partir desse tempo de transmissão e da distância percorrida, é calculada a velocidade de onda mecânica. Com esses dados registrados no computador, o software cria então uma imagem da distribuição das velocidades de onda mecânica na seção do tronco analisada. Essa imagem fornece um mapa das características internas da seção e, quando precisamente interpretada, pode determinar o tamanho e localização de defeitos internos no tronco (ALLISON e WANG, 2015).

O tomógrafo de ondas mecânicas (*stress wave tomography*) mede o tempo de propagação de impulsos das ondas entre vários sensores, que funcionam como emissores e receptores. Na presença de cavidade ou podridão localizada dentro da área investigada, os impulsos de onda de esforço sofrem desvios e, portanto, são recebidos com atraso pelos sensores receptores. Com base nos atrasos na recepção gerados pelos desvios, o software calcula as velocidades das ondas de esforço na seção transversal da árvore. Esta imagem tomográfica colorida revela a conectividade mecânica da seção transversal de madeira. A velocidade do

impulso alcançada no interior da árvore está altamente correlacionada com densidade, módulo de elasticidade e umidade de seus tecidos (RINN, 2008).

Segundo ROLLO (2009), a tomografia de impulso fornece uma imagem tomográfica que pode ser interpretada, gerando dados mais completos do que o resistógrafo, já que permite a quantificação precisa das áreas com deterioração de tecidos por meio da determinação da perda de força que ocorre devido a danos internos, constituindo a principal vantagem da tomografia em comparação com qualquer outro método atualmente estabelecido (RINN, 2016).

O emprego de métodos de onda acústica (i. e. onda mecânica) na avaliação de madeira é baseado na observação de impulsos acústicos se propagando longitudinalmente em uma amostra, fornecendo uma velocidade de onda dependente das propriedades dessa madeira e da porcentagem de umidade das amostras. Como essas características influenciam propriedades macroscópicas como rigidez, resistência e estabilidade da madeira, a aplicação de ondas mecânicas pode ser empregada para avaliar essas propriedades (DYCK, 2003).

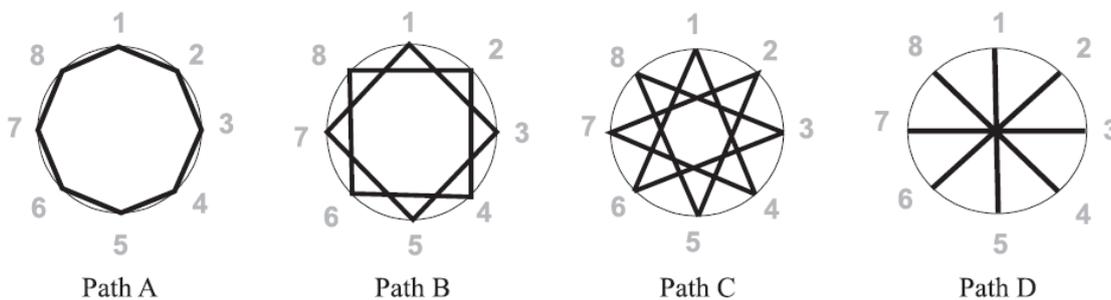
Medições acústicas em campo por Wang et al. (2007), forneceram informações relativamente precisas e confiáveis, que podem ser aplicadas na avaliação das propriedades mecânicas da madeira de árvores vivas. Análises de regressão indicaram boas correlações entre valores de onda em árvores e atributos como resistência e densidade de amostras obtidas a partir de árvores.

Cavalcanti (2018) avaliou raízes de árvores urbanas e concluiu que o ensaio de propagação de onda na direção longitudinal, realizado em condições de campo de forma indireta, pode ser feito na parte superior da raiz, as velocidades não se diferenciaram estatisticamente nas zonas superiores e inferiores. Esse mesmo resultado foi obtido para o ensaio longitudinal direto, no qual as velocidades foram estatisticamente equivalentes nas diferentes posições da seção transversal (CAVALCANTI, 2018). O ensaio de propagação de ondas em raízes de árvores na direção longitudinal, realizado de forma indireta, permite a obtenção de velocidades estatisticamente equivalentes às obtidas de forma direta, favorecendo o uso desse tipo de ensaio em condições de campo.

Tomazello et al. (2008) e Pereira-Rollo et al. (2014) realizaram densitometria por raios-x em amostras de madeira provenientes da seção transversal de troncos e detectaram um padrão, observado também em outras pesquisas, que indicava um incremento de densidade na direção medula-casca, ou seja, menor densidade na área central do tronco, o cerne, que progressivamente aumenta na direção do alburno. Esse padrão de densidade no sentido

cerne-alburno ou medula-casca parece estar ligado à idade da árvore (PEREIRA-ROLLO et al., 2014), assim como constatado por Allison & Wang (2015), os quais afirmaram que propriedades da madeira em árvores e troncos variam do cerne para a casca conforme a madeira juvenil se torna madeira madura. Essas propriedades também mudam da base para cima na mesma árvore e diferem entre árvores. Fatores como genética, condições de solo e ambientais afetam as características da madeira tanto em nível microscópico quanto macroscópico.

Em seu estudo de propagação de onda por tomografia em discos de madeira, Lin et al. (2011) definiram quatro diferentes trajetos de propagação, em relação à posição dos oito sensores utilizados, como: trajeto A, com medições de onda em pontos adjacentes entre si, como entre os sensores 1 e 2; trajeto B, em sensores intercalados entre si a um ângulo de 90° , como entre os sensores 1 e 3; trajeto C, com medições no intervalo a cada dois sensores, como entre sensores 1 e 4; e trajeto D, no intervalo a cada três sensores, opostos entre si com um ângulo de 180° , como entre sensores 1 e 5 (figura 5).



Path A, 2 measured points adjacent to each other; path B, a 1-point interval between 2 measured points; path C, a 2-point interval between 2 measured points; path D, a 3-point interval between 2 measured points.

Figura 5. Figura: Caminho A: medição entre dois pontos adjacentes entre si (1-2); caminho B: medição entre dois pontos intercalados (1-3); caminho C: intervalo de dois pontos entre uma medição feita entre dois pontos (1-4); caminho D: intervalo de três pontos entre uma medição feita entre dois pontos opostos em 90° (1-5) (LIN et al., 2011).

Em seus resultados, comparando os trajetos A, B, C e D, Lin et al. (2011) observaram que C e D foram mais efetivos do que A e B na detecção dos defeitos nos discos de madeira (figura 6), ou seja, a onda se propagou com maior velocidade na direção radial da madeira em relação à direção tangencial. Isso ocorre pelo fato de que a rota onda mecânica na madeira é a mais rápida, não a mais curta. Nas proximidades da direção tangencial, como no trajeto B, a

propagação da onda diminui na direção do sensor receptor, resultando em uma menor velocidade, mesmo não havendo defeito na madeira nesse local. Assim, a observação de velocidades de onda nos trajetos C e D se mostrou um método melhor para avaliação de defeitos internos na área central de uma árvore (LIN et al., 2011).

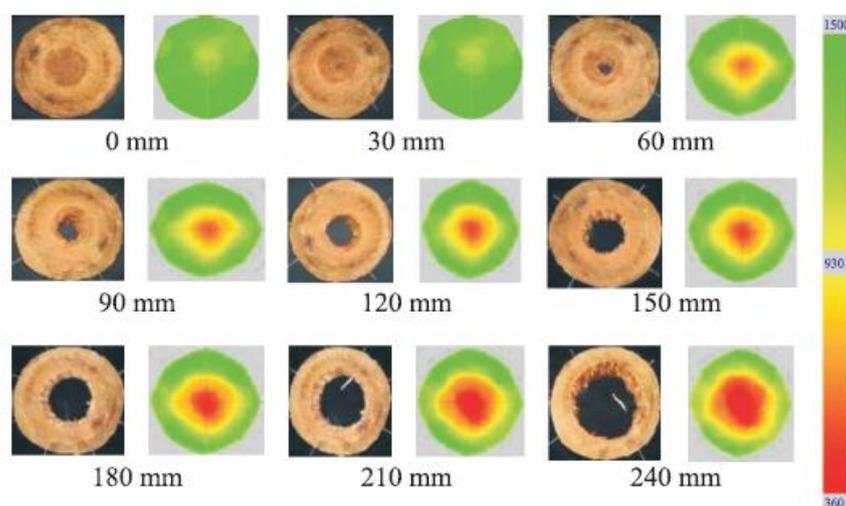


Figura 6. Discos de madeira (à esquerda) e imagens tomográficas 2-D (à direita) de orifícios centrais de diversos tamanhos realizadas com avaliação por onda mecânica por Arbotom (LIN et al., 2011).

Com a técnica de imagem tomográfica usada por Lin et al. (2011), as velocidades de onda mecânica tendem a aumentar conforme aumenta a densidade da madeira na seção transversal, e tendem a diminuir com o aumento da umidade da madeira, quando esta está acima do ponto de saturação das fibras.

De acordo com Socco et al. (2004), tomografias em árvores saudias muitas vezes indicam um padrão característico de uma zona de baixa velocidade periférica (tangencial) e uma zona interna de maior velocidade (radial). No entanto, essa distinção não parece ser causada por uma real diferença nas propriedades mecânicas da madeira, e sim por sua anisotropia.

Esse padrão também foi observado por Lin et al. (2011), em tomografias de discos de madeira, nas quais observaram que a velocidade de onda se propagou com mais velocidade na direção radial da madeira em relação à direção tangencial, na qual a propagação da onda mecânica diminui na direção do sensor receptor, resultando em uma menor velocidade periférica, mesmo não havendo defeito na madeira nesse local.

Apesar de fornecerem informações valiosas a respeito da situação interna atual da árvore, as avaliações tomográficas não revelam necessariamente a condição da madeira e informações sobre a compartimentalização de áreas com podridão e o crescimento radial compensatório esperado. Atualmente, esses aspectos podem ser avaliados por perfuração por resistógrafo com broca de resistência calibrável por densidade da madeira, para a identificação de zonas de compartimentalização da madeira. Assim, a perfuração com resistógrafo calibrado é uma ferramenta útil adicional aos resultados da tomografia de impulso, quando estes indicam que ações de manejo devem ser tomadas para a manutenção de um nível de segurança adequado da árvore (RINN, 2016).

No entanto, diferentemente do resistógrafo, a tomografia fornece informações a respeito de toda a seção transversal avaliada em apenas uma leitura, enquanto o resistógrafo necessitaria de várias leituras para avaliação de toda a seção (NICOLOTTI et al., 2003).

Para realizar uma comparação entre os dados obtidos com o tomógrafo e com o resistógrafo, devemos observar que esses equipamentos realizam as leituras de dados em escalas diferentes (figura 7 A-B). Sendo assim, é necessária a padronização das escalas desses dados, como sugerido por Rollo et al (2013). O resistógrafo registra uma nova leitura de resistência à penetração na madeira a cada 0,01 mm perfurado, sendo assim, serão calculados valores médios de em intervalos de 3 cm, com cada média representando cerca de 3000 leituras. Por meio da metodologia descrita acima, Rollo et al. (2013) puderam obter uma forte correlação (R^2 de 0,9977) entre os dados de tomografia e resistografia gerados, uma vez que as variações na densidade ao longo da madeira condicionam tanto a resistência à penetração do resistógrafo quanto as velocidades de onda mecânica obtidas pelo tomógrafo.

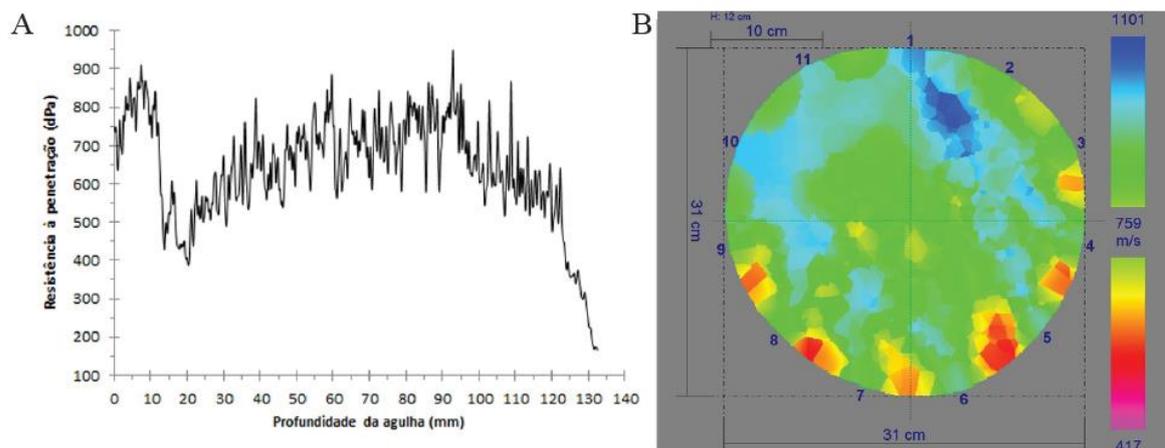


Figura 7. a) Gráfico gerado pelo resistógrafo na análise interna de árvores, no qual o eixo x representa a distância interna percorrida pela agulha no lenho e o eixo y representa a resistência à penetração da agulha. b) Imagem gerada pela tomografia de impulso de uma seção transversal da árvore, onde rosa e vermelho indicam baixas velocidades de propagação de onda mecânica, representando madeira menos densa, enquanto o azul indica velocidades maiores, representando madeira mais densa (ROLLO et al., 2013).

Outros aspectos vantajosos da tomografia seriam permitir mais facilmente a localização das áreas que apresentam perda de densidade e possivelmente lesões, dentro da seção de lenho avaliada (ROLLO et al., 2013).

A tomografia também gera um cálculo de perda de resistência mecânica em porcentagem e a direção dessa perda, indicando assim a direção em uma eventual queda ou quebra da árvore. No caso da tomografia de raízes, buscamos utilizar esses mesmos princípios para obter informações a respeito da ancoragem da árvore realizada pelas raízes de maior diâmetro, superficiais e próximas ao tronco. Outra vantagem é que o emprego do ultrassom como método para caracterização de madeira não exige grande número ou tamanho de amostras, o que qualifica uma grande vantagem, especialmente quando se trata de madeira de árvores urbanas, cuja obtenção de amostras deve ser mediante autorização e apenas quando necessário. Em relação às raízes, essa questão é ainda mais complexa, pois a obtenção de amostras desse tecido é muito mais dificultada no ambiente urbano comparada com a obtenção de amostras de tronco e galhos (CAVALCANTI, 2018).

Lin et al. (2011) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar orifícios artificiais em discos de árvores utilizando a técnica de tomografia por ondas mecânicas. A fim de simular diferentes tipos de defeitos, furos foram esculpados nas áreas centrais e laterais das seções transversais do tronco, e então as velocidades das ondas foram medidas em múltiplas direções e analisadas usando o sistema Arbotom. Encontraram diferenças óbvias nas velocidades das

ondas de tensão entre a área do furo e sua área circundante, e quando a relação entre a área do furo e a área transversal do disco ultrapassou 2,3%, o furo foi detectado pelo Arbotom. Além disso, foi observada uma diferença evidente nas cores mapeadas e velocidade de onda entre a área de cavidade e a madeira maciça adjacente (LIN et al. 2011)

Os danos em árvores urbanas geralmente decorrem de problemas nas raízes, sendo esta a razão pela qual tomografia de impulso em árvores é aplicada principalmente na região do colo, logo acima do solo. Com um equipamento de sensor para raízes associado ao tomógrafo por impulso utilizado por PEREIRA-ROLLO et al. (2014); ROLLO (2009) e ROLLO (2007), é possível a obtenção de dados a respeito da densidade das raízes de ancoragem e a geração de uma imagem tomográfica que pode ser correlacionada com as condições do conjunto de raízes do entorno, indicando padrões de níveis de perda de resistência e de densidade associados à condição fitossanitária.

O ultrassom é um método que pode ser empregado para diferenciar estatisticamente espécies baseado nas propriedades de resistência e rigidez da madeira de raízes, representando um método aplicável para obtenção de parâmetros para estudos biomecânicos em árvores (CAVALCANTI, 2018).

Para a análise tomográfica das raízes, um sensor adicional em uma haste de metal é conectado aos sensores ao redor da circunferência da árvore. Ao bater nesta haste com um martelo, os impulsos mecânicos são induzidos no solo em pontos selecionados ao redor da árvore. Se houver uma raiz suficientemente grossa e intacta no solo abaixo do ponto de medição, este impulso pode ser transmitido para a árvore onde os outros sensores a recebem. Da mesma forma a operação é realizada em toda a circunferência da árvore, em raízes com diferentes distâncias a partir do tronco. Consequentemente, é gerado um gráfico linear fornecendo tanto a posição de onde o impulso foi enviado para a árvore, como a velocidade das ondas de esforço recebidas pelos sensores (RINN, 2008).

Como descrito por RINN (2008), a haste de metal é posicionada em direção às raízes principais no entorno do caule, que formam a placa radicular (*root plate*). Os impulsos de onda de tensão são medidos e atribuídos a cores diferentes. De acordo com diferentes condições de solo (gramado, concreto, pavimento), as velocidades das ondas de esforço diferiram entre 100 e 500 m.s⁻¹. No concreto ou no pavimento, as velocidades tendem a ser mais elevadas em comparação ao solo. Em solo macio, as raízes puderam ser detectadas em uma profundidade entre 30 a 50 cm. Quando o solo é mais compactado, a detecção pode chegar até 1 m de

profundidade. Em última análise, essas medições fornecem um gráfico de linha que mostra a área em torno da árvore onde se encontram as raízes e qual a velocidade do impulso medida na base da árvore. No caso de não ocorrer a detecção de nenhuma raiz, infere-se que as raízes estejam ausentes ou sejam muito pequenas em diâmetro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A tabela 2 traz uma compilação do local de procedência das árvores tomografadas, das amostras de madeira e das tomografias utilizadas neste estudo, bem como o fornecedor de cada um desses elementos, juntamente com as principais atividades realizadas e produtos obtidos a partir delas. Cada uma dessas diferentes etapas será explicada em detalhe nos próximos itens de Material e Métodos. Os locais onde as atividades ocorreram estão indicados como “Lab.” para atividades que ocorreram em laboratório e “Campo” para atividades que foram realizadas no campo. A tabela 2 também indica o número do item correspondente à cada atividade para facilitar sua busca no sumário.

Atividades realizadas, produtos obtidos e itens no sumário	Origem das árvores, tomografias e amostras				
	Empresa Forty (tomografias)	Empresa Engemaia (amostras)	Tomografias Demóstenes	Piracicaba (árvores urbanas)	Outros locais
Velocidade média Arbotom: 3.4	Lab.		Lab.		Lab.
Densidade em literatura: 3.4	Lab.		Lab.		Lab.
Regressão Db x Vm: 3.5 e 4.1	Lab.		Lab.		Lab.
Obtenção das amostras: 3.6		Campo		Campo	
Arboradix amostras: 3.6 e 4.4		Lab.		Lab.	
Db calculada (amostras): 3.6		Lab.		Lab.	
Tomografia Arbotom: 3.3 e 4.3			Lab.	Campo	Lab.
Tomografia Arboradix: 3.3 e 4.3			Lab.	Campo	Lab.
Análises estatísticas com R: 3.7	Lab.	Lab.	Lab.	Lab.	Lab.
Aplicação Modelo Vm x Db: 4.3	Lab.		Lab.	Lab.	Lab.
Estudos de caso: 4.5	Lab.		Lab.	Lab.	Lab.

Tabela 2. Compilação da origem das árvores, tomografias e amostras utilizadas neste estudo, bem como as atividades realizadas com cada um desses elementos e onde cada uma ocorreu. As atividades marcadas com “Lab.” foram realizadas em laboratório e as marcadas com “Campo” foram realizadas no campo. Ao lado de cada atividade ou produto obtidos estão os números dos itens de Material e Métodos onde essas etapas estão detalhadas.

3.1. Procedência das árvores tomografadas com Arbotom e Arboradix e das amostras de madeira dos ensaios de tomografia com Arboradix

O projeto foi realizado no município de Piracicaba – SP, onde foram obtidas amostras de madeira provenientes de poda de árvores urbanas, sendo que as árvores que forneceram essas amostras, além de outras, receberam tomografia de tronco com Arbotom e de raízes com Arboradix. No entanto, algumas tomografias de árvores urbanas foram realizadas também em outros municípios, principalmente na região de Piracicaba e Limeira, assim como as tomografias das árvores utilizadas nos estudos de caso.

As árvores nas quais foram realizadas tomografias com Arbotom e Arboradix foram selecionadas de acordo com as condições do entorno, principalmente em relação ao pavimento local e condições visuais das raízes visíveis mais próximas, visando avaliar a condição do sistema radicular e obter um diagnóstico biomecânico das raízes responsáveis pela ancoragem das árvores.

Um dos locais amostrados foi a Avenida Presidente Kennedy, no Bairro Nova Piracicaba (figura 8), onde foi realizado inventário e inspeção de metade das árvores (SILVA FILHO & POLIZEL, 2015), sendo constatado que destas, cerca de 35% possui declínio de seu estado geral e risco de queda, necessitando de monitoramento periódico e preventivo [1].

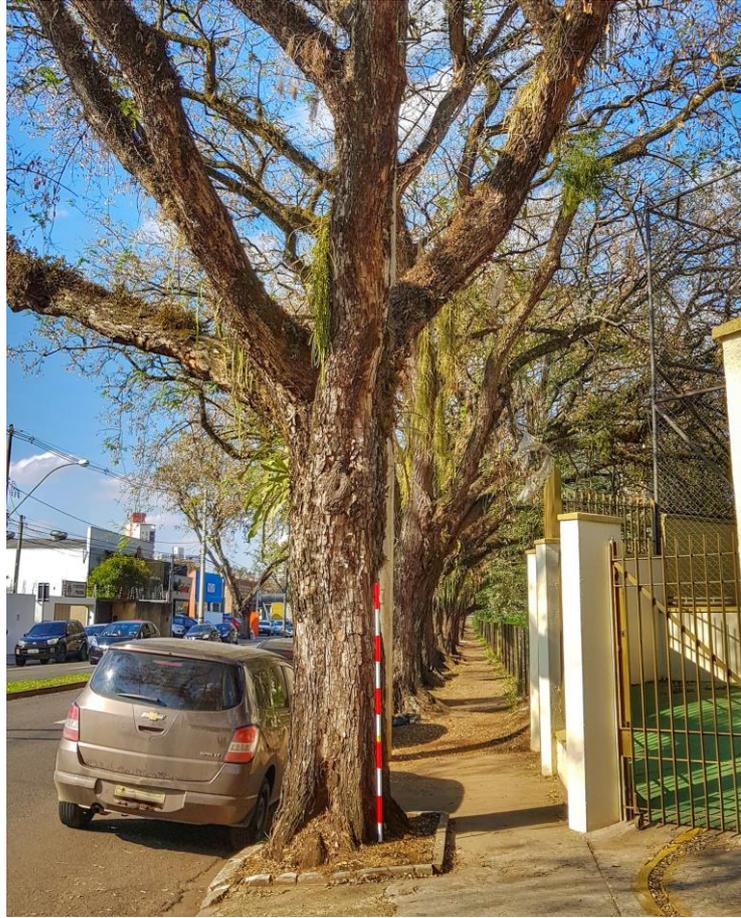


Figura 8. Trecho da Avenida Presidente Kennedy, no Bairro Nova Piracicaba, onde a espécie predominante na arborização viária é a tipuana (*Tipuana tipu*). Em primeiro plano, encontra-se tipuana T2, que recebeu tomografia com Arbotom e Arboradix.

Outro local onde foram realizadas tomografias com Arbotom e Arboradix foi a Área de Lazer da Rua do Porto, também em Piracicaba. Nela existem árvores de diversas espécies, localizadas entre pistas de corrida, bancos de praça e parque infantil (figura 9). Estão plantadas diretamente no solo, sem a presença de canteiros definidos. Nesse local, a empresa Engemaia, terceirizada que realiza serviços de poda de árvores, nos forneceu as amostras de madeira provenientes da poda de galhos de seis árvores de cinco espécies, sendo que posteriormente as árvores que forneceram essas amostras também receberam tomografia com Arbotom e Arboradix.



Figura 9. Exemplar de pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*) que recebeu tomografia com Arbotom e Arboradix e forneceu amostras de madeira, localizado na Área de Lazer da Rua do Porto, em Piracicaba-SP.

O segundo local onde foram realizadas tomografias com Arbotom e Arboradix foi o Largo Santa Cruz, em Piracicaba, de onde foram obtidas amostras de madeira de duas sibipirunas, também provenientes de poda de galhos pela empresa Engemaia. Esse local se assemelha a uma pequeno largo, onde as árvores existentes são apenas da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum* (DC.) E.Gagnon & G.P.Lewis), que se encontram em canteiros de terra batida ou também com presença de plantas herbáceas (figura 10).

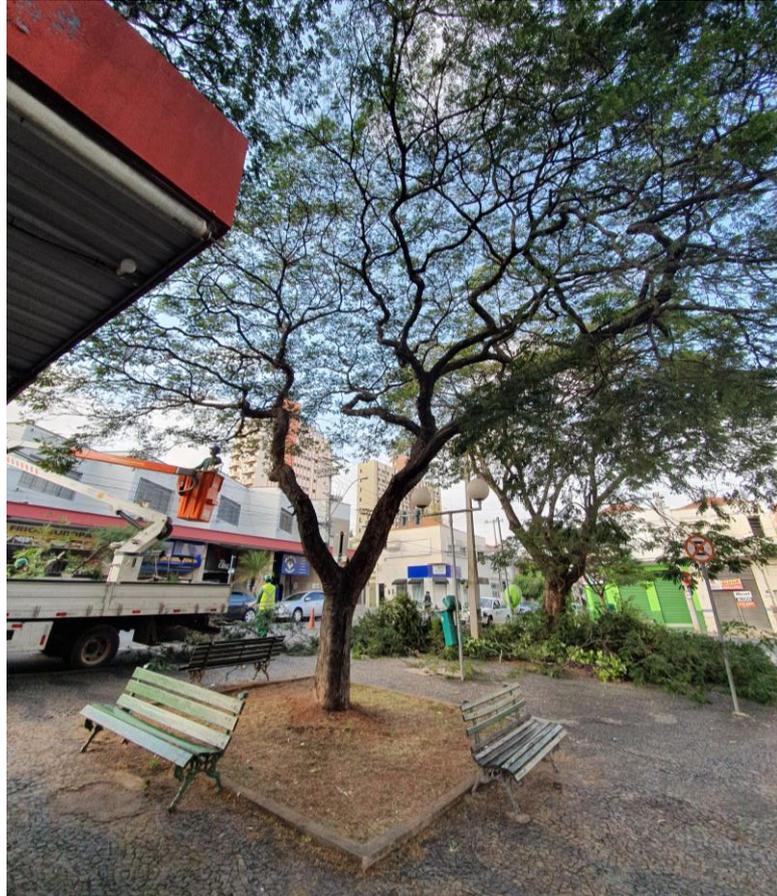


Figura 10. Indivíduos de sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum* (DC.) E.Gagnon & G.P.Lewis) n°2 em primeiro plano e n°1 ao fundo (à direita), que receberam tomografia com Arbotom e Arboradix e forneceram amostras de madeira, localizados no Largo Santa Cruz, em Piracicaba-SP.

3.2. Método de Avaliação Visual de Árvores (VTA)

A Avaliação Visual de Árvores (VTA) sugerida por Mattheck & Breoler (1994) foi feita da forma descrita por Silva Filho & Polizel (2015) e seguindo princípios da Sociedade Internacional de Arboricultura (International Society of Arboriculture - ISA) (MEILLEUR, 2006; INTERNATIONAL SOCIETY OF ARBORICULTURE, 2017). As variáveis quantitativas das árvores para obtenção dos dados biométricos relevantes para essa avaliação foram:

- DAP: Diâmetro do caule à Altura do Peito = 1,30 metros do solo, obtido por meio da fórmula $DAP = CAP/\pi$, sendo CAP: Circunferência à Altura do Peito;
- Inclinação em relação ao solo: calculada projetando-se o caule da árvore em um transferidor onde consideramos o ângulo reto igual a zero e o solo igual a 90°.
- Altura da Árvore: altura total da árvore medida com hipsômetro;

- Altura da Bifurcação ou da 1ª Ramificação – é a altura da base da árvore até a base da ramificação inicial da copa ou primeira ramificação medida com hipsômetro;
- Diâmetro do Colo: diâmetro do caule na base da árvore, obtido a partir da fórmula $D_{\text{Colo}} = C_{\text{Colo}}/\pi$, onde C_{Colo} é a Circunferência à Altura do Colo, ou base;
- Fitossanidade, presença de injúrias, partes secas e oco na base ou colo da árvore: a presença de copa e galhos secos podem ser indicativos de problemas fitossanitários no caule e sistema radicular; a extensão e localização de um oco ou injúria no colo podem determinar se existem significativas perdas de resistência estrutural e ancoragem da árvore, ocasionando um risco maior de queda da mesma;
- O cálculo relativo ao centro de gravidade da árvore: razão entre os diâmetros a 1,30m (DAP) e na base da árvore (D_{Colo}). Essa variável é calculada quando se observa que o DAP é maior do que o D_{Colo} , a base da árvore, à altura do colo, deve naturalmente ser mais larga do que a 1,30 m de altura. Quando isso não ocorre o risco pode aumentar, pois é indicativo da ausência de estrutura de sustentação no local onde ocorrem os maiores esforços de tensão e compressão na árvore (SILVA FILHO & POLIZEL, 2015).

3.3. Equipamentos utilizados para as tomografias de tronco e raízes: Arbotom® e Arboradix™ da Rinntech

Aqui são listados os equipamentos eletrônicos Arbotom® e Arboradix™ da Rinntech empregados nos métodos de investigação não destrutiva da integridade de tronco, colo e raízes das árvores a serem analisadas.

Pereira-Rollo et al., (2014) e Pereira (2007) produziram imagens tomográficas utilizando o tomógrafo de impulso Arbotom® em discos de madeira do tronco de árvores. Para isso, distribuíram 12 sensores equidistantes no disco atravessando as regiões da casca/alburno, até 1 cm de profundidade e realizaram o impulso por meio de batidas de martelo nos sensores. De cinco a seis batidas por sensor permitiu uma boa precisão nas medidas. As velocidades das ondas no interior da árvore entre os sensores foram calculadas pelo software do equipamento, produzindo um gráfico de velocidade de onda da seção transversal, ou imagem tomográfica.

O sensor para raízes Arboradix™ funciona como um emissor de impulso mecânico, posicionado no solo sobre o sistema radicular, inicialmente recebe esses impulsos por meio

de batidas de martelo do equipamento e em seguida emitindo esses impulsos através das raízes até os sensores na circunferência da árvore, os quais atuarão como receptores desse impulso. O gráfico, ou imagem tomográfica, foi elaborado da mesma forma que a imagem do Arbotom® descrita anteriormente.

3.3.1. Equipamento de tomografia de impulso Arbotom® da Rinntech

O Arbotom® [2] é uma unidade de tomografia por impulso que permite uma visão interna da condição estrutural das árvores por meio da interpretação dos dados de velocidade de propagação de onda mecânica em $m.s^{-1}$ em relação à densidade da madeira. Permite a detecção de podridão oculta, fissuras e cavidades internas, bem como suas respectivas dimensões, usando impulsos sonoros na forma de ondas mecânicas. Suas propriedades incluem: localização precisa de defeitos em árvores e madeira, método não destrutivo, fácil compreensão dos resultados medidos, avaliação rápida diretamente no local, envio automático dos dados para um notebook ou tablet, obtenção de medições bidimensionais ou tridimensionais da condição interna das árvores, por meio da geração de um gráfico ou imagem tomográfica.

Arbotom® Rinntech Pacote Profissional (figura 11): inclui 12 sensores de impulso com cabos, pinos de sensor de 60 mm, bateria recarregável de 12 V, kit de acessórios, conexão USB e Bluetooth para notebook, software ARBOTOM® 2-D para Microsoft Windows, estojo de transporte e manual detalhado (em alemão ou inglês).



Figura 11. Equipamento completo de tomografia de tronco e raízes: Arbotom® e Arboradix™ ambos Rinntech. Fonte: [3]

3.3.2. Sensor para detecção de raízes Arboradix™ da Rinntech

O Arboradix™ [4] é uma ferramenta de diagnóstico de raiz para ser usada em conjunto com o tomógrafo Arbotom®. Tem sido aplicado na Alemanha desde 2004 como parte de relatórios de peritos para encontrar raízes em áreas urbanas, antes de obras de escavação de solo e depois para verificação de impacto gerado pelas escavações em regiões com sistemas radiculares. Alcança raízes com diâmetro de até 2 cm em uma profundidade de até 50 cm sendo, portanto, ideal para amostragem de raízes mais superficiais de ancoragem. Procedimentos para a tomografia com Arboradix (figura 12):

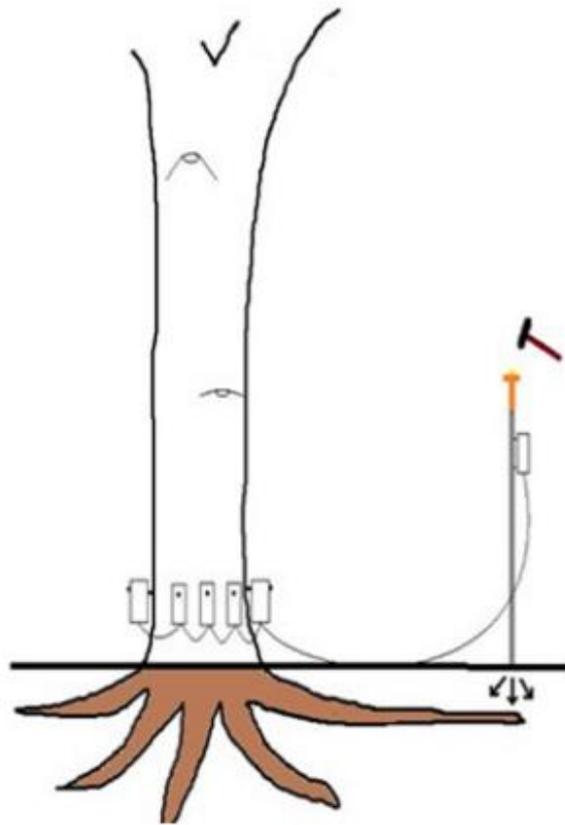


Figura 12. Demonstração de uso do tomógrafo com sensor Arboradix™ para detecção de raízes. Fonte: [5].

- Fixar os pregos de sustentação dos sensores na seção transversal do tronco à altura da base, distantes pelo menos 15 cm um do outro, atravessando as regiões da casca/alburno (cerca de 1,0 cm de profundidade) e posicionar os sensores do tomógrafo Arbotom, conectando-os entre si e por meio dos fios do equipamento;
- Posicionar o Arboradix sobre as raízes visíveis ou quando não visíveis, posicionar em outro ponto onde a presença de raízes seria esperada e, em seguida, bater sobre ele com o martelo que acompanha o equipamento;
- Os sensores Arbotom posicionados no colo da árvore recebem o impulso mecânico e enviam os dados a um tablete ou notebook;
- Ao serem detectadas pelo software Arbotom, as batidas do martelo irão gerar diferentes sons, indicando se o impulso foi recebido ou não, um som agudo específico sinaliza ao operador a detecção do impulso pelos receptores;

- Os gráficos de linhas gerados pelo software Arbotom a partir dos dados obtidos pelo Arboradix (figura 13) indicam a presença da raiz, sua velocidade de onda baseada em uma escala de cores, além de sua extensão ou distância a partir da base do caule, medida em metros a partir do posicionamento do sensor Radix em relação à árvore.

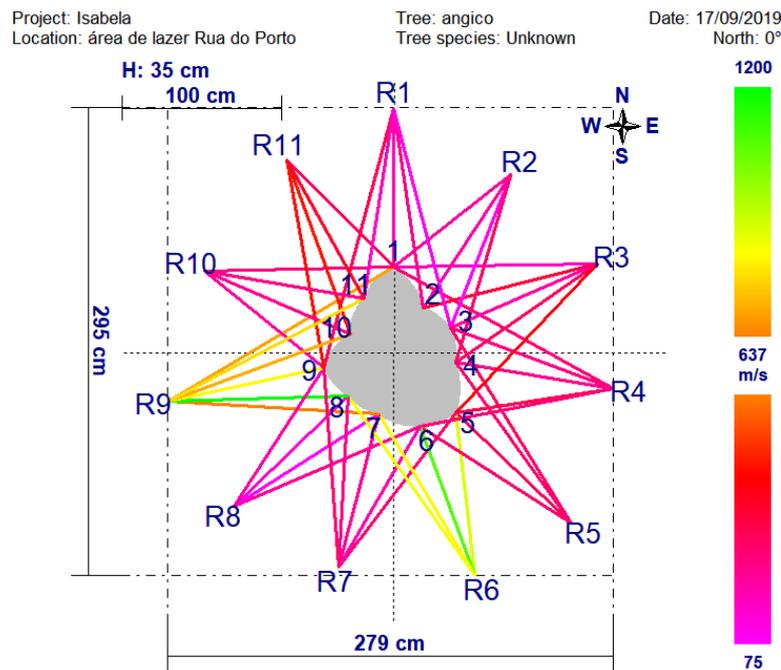


Figura 13. Imagem tomográfica, ou gráfico de linhas, gerada com o Arboradix™. Cada número no raio a partir do centro do tronco corresponde a um ponto de medição a cada metro de distância da árvore (Rinn, 2005).

3.4. Relação dos dados de velocidade de onda mecânica por Arbotom® com densidade de madeira por espécie

A empresa Forty Construções e Engenharia forneceu dados de tomografias realizadas com o equipamento Arbotom®, de árvores de espécies variadas em ambiente urbano, e foram utilizadas tomografias realizadas pelo Prof. Dr. Demóstenes Ferreira da Silva Filho. A partir do conjunto dessas tomografias, foram selecionadas entre as espécies mais comuns na arborização urbana do Estado de São Paulo e com maior quantidade de indivíduos tomografados. Com os dados dessas tomografias, foram calculadas as velocidades médias de onda mecânica para cada espécie. Buscando averiguar a correlação entre velocidades de onda

e densidade da madeira, foi realizada uma regressão, por meio do software R versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), entre essas velocidades médias calculadas por espécie e suas respectivas densidades básicas encontradas em literatura, segundo as fontes da Tabela 3 do item 4.1. de Resultados e Discussão.

A obtenção dessa correlação visou averiguar a precisão do equipamento e do software Arbotom em gerar variações de dados compatíveis com as diferentes densidades dos tecidos de tronco e raízes; além das variações de velocidade capazes de distinguir localmente tecidos saudáveis de tecidos comprometidos, para a avaliação da integridade das árvores.

A obtenção dessa correlação também visou o fornecimento de dados para a determinação de velocidades médias específicas para algumas das espécies mais comuns na arborização urbana. Para isso foi gerado um modelo de correlação que pode estimar as velocidades médias com base na densidade de diferentes espécies. Essas velocidades médias serviriam como valores de base para interpretação de tomografias de espécies com poucos indivíduos amostrados.

De acordo com Socco et al. (2004), a grande variabilidade de valores de velocidade em seções de tronco prova que a interpretação dos dados baseada em padrões de velocidade deduzidos em literatura ou em análise estatística é bastante aproximada.

Foram obtidas as velocidades ($m\ s^{-1}$) de propagação de onda mecânica na madeira e calculadas as médias para cada espécie, visando compará-las com a densidade básica específica e verificar se existe correlação. As médias de velocidade para cada espécie foram calculadas como recomendado no manual do Arbotom para aumentar a confiabilidade dos resultados, pelo método sugerido por Mendes & Silva Filho (2019), no qual a velocidade obtida para cada sensor deve ser menor do que 10% do desvio padrão, assim como sugerido no manual do equipamento Arbotom (RINNTECH, 2005).

Dessa forma, ignoramos os valores extremos, que podem distorcer a velocidade média individual, e utilizamos apenas as velocidades correspondentes aos valores 20% centrais para o cálculo da média para cada árvore. A utilização apenas dos valores centrais visa eliminar as velocidades muito baixas, referentes aos tecidos com perda de integridade ou de densidade por podridão ou lesão, e as velocidades muito altas, referentes à madeira de reação (tensão ou compressão) (MENDES & SILVA FILHO, 2019).

Os dados de densidade da madeira para as diferentes espécies consistem em densidade básica ou aparente e foram obtidos em diversas fontes de literatura, sendo que as

citações foram indicadas em cada caso particular na Tabela 3, no item 4.1. de Resultados e Discussão.

3.5. Análise estatística entre dados de velocidade de onda mecânica com Arbotom e de densidade da madeira

Para averiguar a correlação entre dados de tomografia e propriedades da madeira e gerar um modelo aplicável, as velocidades de onda e a densidade de madeira para cada espécie foram correlacionadas por meio de regressão analisadas estatisticamente por meio do software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), de acordo com a programação elucidada no item 6.1. dos Anexos, realizada com o auxílio da Pós-Doutoranda Rafaela Naves.

3.6. Ensaios de tomografia com Arboradix™ em amostras de madeira

Para gerar maior compreensão a respeito das propriedades do equipamento Arboradix™, ou sensor Radix para tomografia de raízes, foram realizados ensaios de tomografia em condições controladas com amostras. Para isso, foram selecionadas amostras de madeira com pelo menos um metro de comprimento, que é a unidade mínima de medição do sensor Arboradix™; e diâmetro maior que 8 cm, para posicionamento dos sensores. Nessas tomografias, foi posicionado um sensor Arbotom em uma extremidade da amostra e na outra extremidade, a um metro de distância, foi utilizada haste do sensor Arboradix.

Para a obtenção de amostras de diferentes espécies, foram selecionados galhos de árvores fornecidos pela Engemaia & Cia Ltda., empresa terceirizada que realiza serviços de poda e supressão de árvores no município de Piracicaba - SP. Na época da coleta de amostras, a empresa realizou serviços de poda na Área de Lazer da Rua do Porto e no Largo Santa Cruz no Centro, locais de onde foram coletadas amostras de oito árvores de seis espécies: angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), eritrina (*Erythrina falcata*), espatódea (*Spathodea campanulata*), freixo (*Fraxinus excelsior*), pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*) e sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*).

A escolha de amostras de madeira provenientes de galhos foi feita devido à dificuldade de obtenção de amostras provenientes de raízes de árvores urbanas, além de uma maior disponibilidade de galhos provenientes de serviços de poda de árvores, com dimensões

mínimas de comprimento e diâmetro que permitam o posicionamento do Arboradix sobre as amostras. A caracterização das amostras de madeira visou melhor entendimento das propriedades do equipamento de tomografia de raízes Arboradix, o que poderia ser realizado em qualquer tipo de madeira, desde que padronizado, como foi feito com as amostras de madeira neste estudo.

O processo de tomografia com Arboradix em amostras de madeira de galhos foi realizado seguindo o mesmo método realizado com esse equipamento em tomografia de raízes, incluindo alguns ajustes pertinentes para adequar o processo às amostras e às condições amostradas. Para a utilização do sensor Radix como emissor de onda mecânica, é necessário haver sensores Arbotom posicionados para atuarem como receptores do impulso mecânico, posicionados no colo da árvore, sendo o último deles ligado por meio de cabo ao sensor Radix, o qual é posicionado nas raízes ou sobre o solo, onde recebe impulsos mecânicos na forma de batidas de martelo (figura 14-A). O impulso transmitido pela haste do Radix é recebido pelos sensores Arbotom na base da árvore, e sua velocidade é registrada pelo software, para cada um dos pontos nos quais o sensor Radix recebeu os impulsos, gerando retas que formam a imagem tomográfica (figura 13).



Figura 14. A: Demonstração de tomografia para detecção de raízes com Arboradix. Os sensores Arbotom são posicionados na região do colo da árvore e ligados por meio de cabos, sendo o último sensor Arbotom ligado à haste do Radix, a qual é posicionada nas raízes, quando houver afloramento, ou sobre o solo, onde recebe impulsos mecânicos na forma de batidas de martelo. **B:** Demonstração de tomografia com Arboradix em amostras de madeira. Os sensores Arbotom foram posicionados em um tronco para simular a região do colo da árvore e ligados por meio de cabos, sendo o último sensor Arbotom ligado à haste do Radix, a qual é posicionada a 1 m do último sensor, sobre a amostra ou sobre o solo, onde recebe impulsos mecânicos na forma de batidas de martelo.

No caso da tomografia das amostras de madeira com Arboradix, três sensores Arbotom foram posicionados em um pedaço de tronco, para simular a região do colo da árvore, e ligados por meio de cabos, sendo o quarto e último sensor Arbotom posicionado na extremidade inferior da amostra e ligado à haste do Radix, a qual foi posicionada a 1,0 m do último sensor, sobre a amostra ou sobre o solo, onde recebeu os impulsos mecânicos na forma de batidas de martelo, os quais são então transmitidos para o sensor Arbotom na outra extremidade (figura 14-B).

Todas as amostras de madeira, provenientes de galhos, foram posicionadas de forma que a base do galho estivesse sempre voltada para o tronco, com a intenção de tornar essa amostragem a mais próxima possível de uma situação de tomografia em árvore viva. No entanto, não foi possível garantir que as amostras estivessem em condição de madeira verde, pois as amostragens foram realizadas no curso de semanas após o corte das mesmas.

Outro aspecto da metodologia que buscou ser fiel a uma tomografia real em raízes de árvores com Arboradix foi relacionado aos impulsos por batidas de martelo. Como mencionado anteriormente, o software Arbotom possui um sinal sonoro que indica o funcionamento do equipamento e a detecção dos impulsos mecânicos, o que facilita a contagem de batidas realizadas.

No caso das tomografias deste estudo, visando garantir a melhor acurácia possível, tanto das árvores quanto das amostras, foi definido um número mínimo de cinco batidas em cada ponto, podendo chegar a 10 batidas, como recomendado por Rinntech (2005). Esse número de batidas visa garantir que os impulsos mecânicos sejam gerados até que os erros apresentados na tabela “Delta[%]” do software Arbotom sejam inferiores a 10%, visando aumentar a confiabilidade dos dados (RINNTECH, 2005).

Na opção Delta, os dados são mostrados em porcentagem, portanto durante as tomografias buscamos que os valores sejam inferiores a 10, mas sempre os menores possíveis. Muitas vezes é possível atingir um Delta=0, porém, em algumas situações, só foi possível atingir um Delta mínimo de 3%, principalmente durante as tomografias das amostras de madeira com Arboradix e em algumas tomografias de árvores, nos casos em que as raízes demoraram a ser detectadas, como nas situações de soterramento de canteiro, explicadas em maior detalhe nos resultados.

Visando elucidar uma possível influência das características de solo ou pavimento no entorno ou por cima das raízes sobre velocidades de onda geradas durante tomografia com Arboradix, além de compreender o comportamento do software Arbotom nessa situação, foram realizadas tomografias com as amostras de madeira em três condições diferentes: na grama (Figuras 15-B e C), no cimento (Figuras 15-D e E) e em ensaio controlado (Figura 15-A), com as amostras sobre duas cadeiras acolchoadas, no qual buscamos isolar as amostras de possíveis interferências dos pavimentos sobre as velocidades obtidas, servindo, portanto, como tratamento testemunha (Figura 15-A).

Ambas as condições de pavimento testadas foram realizadas de duas formas, diferenciadas entre tomografia com o sensor Radix colocado diretamente sobre a amostra de madeira e tomografia com o sensor sobre dois tipos de substrato, grama e cimento, ao lado da amostra. A aplicação dessas condições visou capturar as possíveis diferenças entre as velocidades de onda, obtidas em duas condições comuns na tomografia de raízes de árvores: quando é possível posicionar o sensor sobre uma raiz visível e quando as raízes não estão

visíveis e o sensor é posicionado no solo, geralmente próximo de onde se espera que haja uma raiz. Assim, totalizamos cinco diferentes condições de tomografia com Arboradix, testadas com todas as amostras das seis espécies testadas, denominados: “cadeira” (Figura 15-A), “grama ” (Figura 15-B), “na grama” (Figura 15-C), “cimento” (Figura 15-D) e “no cimento” (Figura 15-E).



Figura 15. A: Tomografia das amostras de madeira com Arboradix™ na situação testemunha, na qual as amostras foram colocadas sobre cadeiras acolchoadas, com o intuito de mantê-las mais isoladas de possíveis interferências dos substratos sobre os quais as raízes estariam durante a tomografia de uma árvore. **B:** Tomografia das amostras de madeira com Arboradix™ sobre o substrato com grama,

situação na qual o sensor Radix foi posicionado sobre uma extremidade da amostra de madeira, onde recebeu batidas de martelo para gerar impulsos de onda mecânica. **C:** Tomografia das amostras de madeira com Arboradix™ sobre o substrato com grama, situação na qual o sensor Radix foi posicionado diretamente sobre a grama, a aproximadamente 20 cm de distância da amostra de madeira, onde recebeu batidas de martelo para gerar impulsos de onda mecânica. **D:** Tomografia das amostras de madeira com Arboradix™ sobre o substrato de cimento, situação na qual o sensor Radix foi posicionado sobre uma extremidade da amostra de madeira, onde recebeu batidas de martelo para gerar impulsos de onda mecânica. **E:** Tomografia das amostras de madeira com Arboradix™ sobre o substrato de cimento, situação na qual o sensor Radix foi posicionado sobre uma extremidade da amostra de madeira, onde recebeu batidas de martelo para gerar impulsos de onda mecânica.

3.6.1. Tratamento testemunha: tomografia de amostras de madeira com Arboradix™ visando isolar possíveis interferências do substrato

Nessa situação, a tomografia com Arboradix foi realizada com as amostras de madeira posicionadas sobre duas cadeiras acolchoadas, com dois tapetes dobrados, um em cada cadeira, sobre os quais foram posicionadas as duas extremidades das amostras, de forma que estas ficassem com a maior parte de sua extensão central elevadas no ar, sem contato com outros sólidos, como mostra a figura 15-A.

3.6.2. Tomografia de amostras de madeira com Arboradix™ sobre gramado

As tomografias das amostras realizadas sobre o substrato com grama visaram simular a situação de raízes em um canteiro gramado, em duas condições possíveis: I) quando existe afloramento de raízes superficiais de ancoragem sobre o solo, possibilitando o posicionamento do sensor Radix sobre essas raízes visíveis no momento da tomografia (figura 15-B); e II) quando não há afloramento de raízes e elas não estão visíveis na superfície do solo, o que exige o posicionamento do sensor Radix diretamente sobre o substrato, neste caso a grama, em local onde se acredita ser próximo de raízes de ancoragem (figura 15-C). Na situação II, a posição da haste do sensor Radix sobre a grama foi cerca de 20 cm de distância da extremidade da amostra (figura 15-C), simulando a distância mais provável que ocorreria se essa situação fosse uma tomografia de árvore, na qual existem sensores Arbotom fixados em seu colo que indicam a direção correspondente onde deve ser posicionado o Radix; por exemplo, a posição R1 do Radix é definida como a distância linear de um metro a partir do sensor Arbotom nº1 fixado no colo da árvore, algo que pode ser confirmado pela imagem tomográfica.

3.6.3. Tomografia de amostras de madeira com Arboradix™ sobre calçada de cimento

As tomografias das amostras realizadas sobre o substrato de cimento visaram simular a condição de árvores em canteiros em calçadas ou outras situações nas quais as raízes estejam próximas ou sob o cimento, em duas condições possíveis: I) quando existe afloramento de raízes de ancoragem visíveis entre o cimento ou na borda dele, possibilitando o posicionamento do sensor Radix sobre essas raízes no momento da tomografia (figura 15-D); e II) quando as raízes se encontram sob o cimento e não acessíveis na superfície, o que exige o posicionamento do sensor Radix diretamente sobre o pavimento, neste caso o cimento, em local onde se acredita ser próximo das raízes mais superficiais de ancoragem (figura 15-E). Na situação II, a posição da haste do sensor Radix sobre o cimento foi cerca de 20 cm de distância da extremidade da amostra (figura 15-E), simulando a distância mais provável que ocorreria se essa situação fosse uma tomografia de árvore, na qual existem sensores Arbotom fixados em seu colo que indicam a direção correspondente de onde seria posicionado o Radix, como explicado no item 3.6.2.

3.6.4. Cálculo de densidade básica das amostras de madeira

Todas as amostras de madeira (figura 16-A) foram cortadas no sentido do diâmetro para obtenção de discos que serviram como sub-amostras (figura 16-B) para o cálculo da densidade básica pelo método higrostático, descrito por Rodriguez & Tomazello-Filho (2019). Primeiramente, as amostras foram acondicionadas em câmara a vácuo (figura 16-C) cheia de água para total saturação por duas semanas (16-D), em seguida foram obtidas a massa úmida (figura 16-E) e a massa imersa em água (figura 16-F), em balança de precisão digital e uma casa decimal. Na sequência, as amostras foram secas em estufa por cerca de 72 horas, até atingirem um teor zero de umidade, o que foi determinado a partir da estabilização do peso das amostras durante a obtenção da massa seca das mesmas, em balança de precisão digital. O cálculo da densidade básica foi então feito em Excel (Microsoft Office Professional Plus versão 2010), seguindo a fórmula:

$$DB = [m. \text{seca} / (m. \text{úmida} - m. \text{imersa})] \text{ g.cm}^{-3}.$$



Figura 16. A: Amostras de madeira provenientes de galhos de árvores removidos em atividade de poda. **B:** Sub-amostras na forma de discos de madeira obtidos a partir de um corte na região central das amostras de galhos. **C:** Câmara à vácuo para saturação das sub-amostras. **D:** Sub-amostras dentro da câmara antes da colocação de água para saturação. **E:** Balança de precisão para obtenção da massa das sub-amostras. **F:** Obtenção da massa imersa das sub-amostras, realizada pela mesma balança da figura E.

3.7. Análise estatística dos dados de tomografia com Arboradix™ em amostras de madeira

Os dados de velocidade de onda nas cinco situações de tomografia com as amostras de madeira (“cadeira” ou testemunha, “cimento”, “grama”, “na grama” e “no cimento”), além da densidade de madeira calculada para cada uma das seis espécies das amostras, foram analisados estatisticamente por meio do software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), com auxílio da Pós-Doutoranda Rafaela Naves, de acordo com as programações elucidadas no item 6.2. dos Anexos.

3.7.1. Análise estatística de tomografias com Arboradix diretamente sobre o pavimento: situações “na grama” e “no cimento”

Nessas duas situações de tomografia com as amostras de madeira, a haste do Arboradix foi posicionada sobre os pavimentos, como nas figuras 15-C e 15-E. Assim, as variáveis foram nomeadas “na_grama” e “no_cimento” indicando o posicionamento do Radix durante essas tomografias. Esses dados foram analisados de acordo com a programação elucidada no item 6.2.1. dos Anexos. As análises incluíram Teste de Bartlett para Homogeneidade de Variância e Teste t.

3.7.2. Análise estatística de tomografias com Arboradix sobre as amostras de madeira, nas condições: “cadeira”, “cimento” e “grama”

Nessas três situações, a haste do Arboradix foi posicionada diretamente sobre as amostras de madeira, como nas figuras 15-A, 15-B e 15-D. Assim, as variáveis foram nomeadas como “cadeira” (testemunha), “grama” e “cimento” em relação ao substrato sobre o qual as amostras se encontravam durante essas tomografias. Esses dados foram analisados estatisticamente por meio do software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), de acordo com a programação elucidada no item 6.2.2. dos Anexos. As análises incluíram Teste de Bartlett para Homogeneidade de Variância, Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk, análise de variância e Teste de Tukey.

3.7.3. Correlação entre a densidade básica calculada para as amostras e as velocidades de onda mecânica

Os dados de velocidade de onda mecânica nas cinco situações de tomografia e os valores de densidade de madeira obtidos para cada uma das amostras foram analisados estatisticamente por meio do software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), com auxílio da Pós-Doutoranda Rafaela Naves, de acordo com a programação elucidada no item 6.2.3. dos Anexos.

3.8. Análise das tomografias de raízes de árvores com Arboradix™

A presença ou ausência de raízes, bem como sua integridade ou a perda dela, indicadas pela densidade das raízes em função da velocidade, além da influência do pavimento sobre as velocidades, foram parâmetros obtidos pela interpretação das imagens tomográficas com Arboradix, cujas cores do gráfico refletem a velocidade de propagação das ondas ($m \cdot s^{-1}$), processadas pelo software Arbotom. A classificação do grau de integridade ou perda dela no sistema radicular foi feito de modo semelhante à PEREIRA (2017), como descrito a seguir e ilustrado na figura 17.

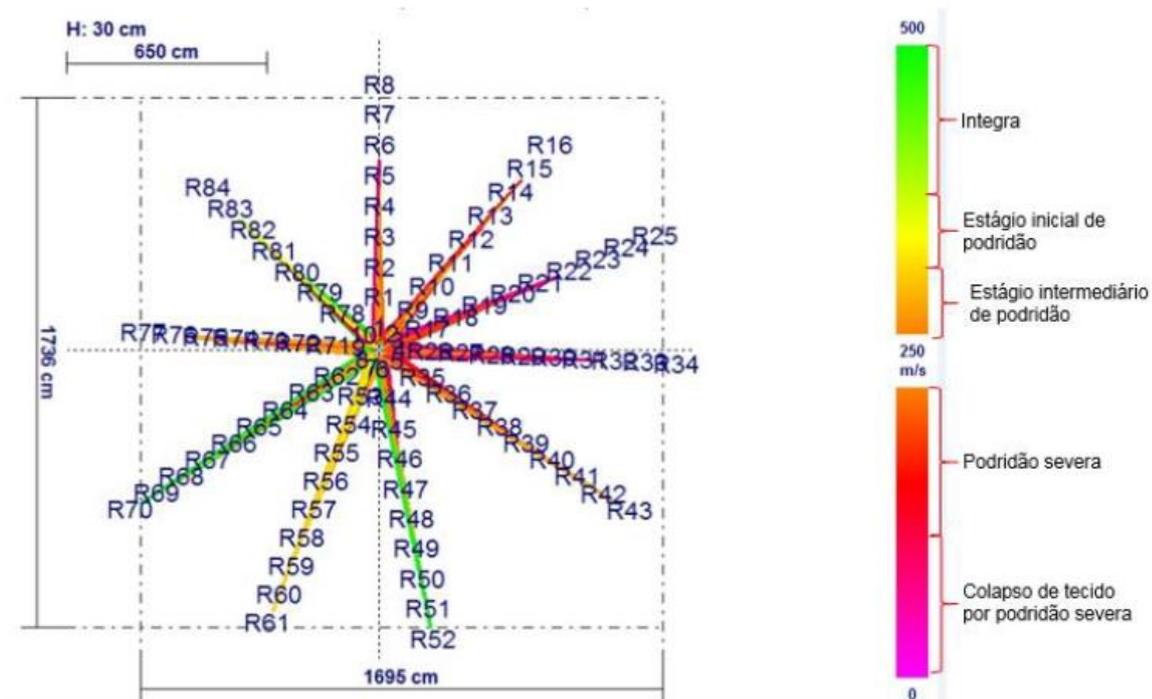


Figura 17. Imagem tomográfica obtida com Arboradix, com indicativo de velocidade em $m \cdot s^{-1}$ associada às cores do gráfico. Fonte: PEREIRA (2017).

- Raízes sadias: raízes com tecidos íntegros, comprimento compatível à função desempenhada pela mesma e sem apodrecimentos, podas, obstáculos ao crescimento ou modificações do crescimento morfológico das mesmas (PEREIRA, 2017);
- Raízes em grau de degradação inicial: raízes com tecidos em estágio inicial de apodrecimento ou degradação, com comprometimento inicial dos tecidos radiculares por meio de fatores bióticos ou antrópicos, reduzindo seu potencial de absorção de nutrientes (PEREIRA, 2017);
- Raízes em grau de degradação intermediária: com tecidos em estágio intermediário de apodrecimento ou degradação, com comprometimento dos tecidos radiculares e, em alguns casos, ocasionando modificações morfológicas em tecidos foliares como tamanho e coloração (PEREIRA, 2017);
- Raízes em grau de degradação severa: tecidos em estágio avançado de apodrecimento ou degradação, com comprometimento dos tecidos radiculares, refletindo em modificações morfológicas em tecidos foliares e, em casos mais severos, a ocorrência de galhos secos e perda de casca, presença de plantas hemiparasitas na copa e no tronco, além da presença de fungos apodrecedores com corpos de frutificação no tronco, raízes ou solo; sendo árvores consideradas com elevado risco de queda (PEREIRA, 2017);
- Raízes com grau de degradação severa e colapso de tecidos radiculares: possuem tecidos em estágio avançado de apodrecimento ou degradação, com comprometimento total dos tecidos radiculares por ações nocivas de fatores bióticos e antrópicos, cessando completamente o potencial de captação e distribuição de nutrientes no sistema radicular, podendo haver modificações morfológicas em tecidos foliares com raleamento da copa, elevada profusão de galhos secos de vários diâmetros e perda de cascas, além de corpos de frutificação de fungos apodrecedores no tronco, raízes afloradas ou no solo, e em alguns casos exsudações no lenho na base e tronco da árvore. São árvores com grande comprometimento estrutural e perda da capacidade de ancoragem das raízes, possuindo risco de queda elevado e, em muitos casos, sendo recomendada sua supressão como ação de manejo (PEREIRA, 2017).

3.9. Estudos de caso de tomografia com Arbotom® e Arboradix™ de árvores em cidades

Foram selecionadas algumas tomografias com Arbotom® e Arboradix™ realizadas pelo Prof. Dr. Demóstenes Ferreira da Silva Filho como estudos de caso, para comparação com os dados obtidos com as tomografias em amostras de madeira. Os dados de velocidade de onda mecânica para cada estudo de caso foram analisados estatisticamente por meio do software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), com auxílio da Pós-Doutoranda Rafaela Naves, de acordo com as programações elucidadas no item 6.3. dos Anexos. Os demais dados quantitativos e qualitativos dessas tomografias foram analisados da mesma forma descrita anteriormente para as demais tomografias de árvores. As análises incluíram Teste de Bartlett para Homogeneidade de Variância e Teste de Kruskal-Wallis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Relação entre dados de velocidade de onda mecânica por tomografia com Arbotom e densidade da madeira

A tabela 3 mostra as espécies arbóreas amostradas, cujos dados de tomografia por Arbotom foram processados para elucidar a relação entre as velocidades de onda mecânica (m.s^{-1}) com as densidades de madeira (g.cm^{-3}) para cada espécie e disponíveis em literatura segundo as fontes indicadas na tabela 3.

Espécie	Nome científico	Densidade da madeira (g.cm^{-3})	Velocidade média (m.s^{-1})	Amplitude de vel. (m.s^{-1})	DP vel. (m.s^{-1})	N amostral
paineira	<i>Ceiba speciosa</i>	0,28 Da [6]	858,46	810-866	33,30	4
espatodea	<i>Spathodea campanulata</i>	0,37 * [n.i.]	1000,65	881-1141	97,04	8
flamboyant	<i>Delonix regia</i>	0,38 Db [8]	1268,44	655-1721	440,47	7
monguba	<i>Pachira aquatica</i>	0,43 [7]	1108,50	1070-1127	35,67	4
sete-copas	<i>Terminalia catappa</i>	0,52 *[n.i.]	1694,45	1480-2177	237,30	10
alfeneiro	<i>Ligustrum lucidum</i>	0,55 *[n.i.]	1307,70	1020-1916	249,34	15
pata-de-vaca	<i>Bauhinia variegata</i>	0,6 *[6]	1275,78	954-1616	237,17	7
tipuana	<i>Tipuana tipu</i>	0,75 Db [9]	1432,48	1034-1750	226,42	12
mirindiba	<i>Lafoensia pacari</i>	0,93 Da [6]	1587,84	1317-1776	195,54	4
sibipiruna	<i>Cenostigma pluviosum</i>	0,978 Da [6]	1413,18	1059-1230	195,33	16
ipê-roxo	<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	1,07 * [10]	1555,11	1173-2257	442,22	7
pau-ferro	<i>Libidibia ferrea</i>	1,19 Da [6][11]	1596,00	1397-1753	159,73	7

Tabela 3. Espécies estudadas e seus dados de velocidade média (m.s^{-1}) de propagação de onda mecânica no interior do lenho, desvio padrão para as velocidades (m.s^{-1}), amplitude de velocidades (m.s^{-1}), densidade básica (g.cm^{-3}) obtida em literatura e n amostral. (*): densidades da madeira não definida entre básica e aparente.

A partir do cálculo das velocidades médias por espécie, observados na tabela 3, foi gerado no software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019) um gráfico do tipo “*boxplot*” (figura 20) para ilustrar a distribuição dos valores das árvores utilizadas para o cálculo das velocidades médias (m.s^{-1}) por espécie, bem como a distribuição das densidades de madeira (g.cm^{-3}) correspondentes por espécie.

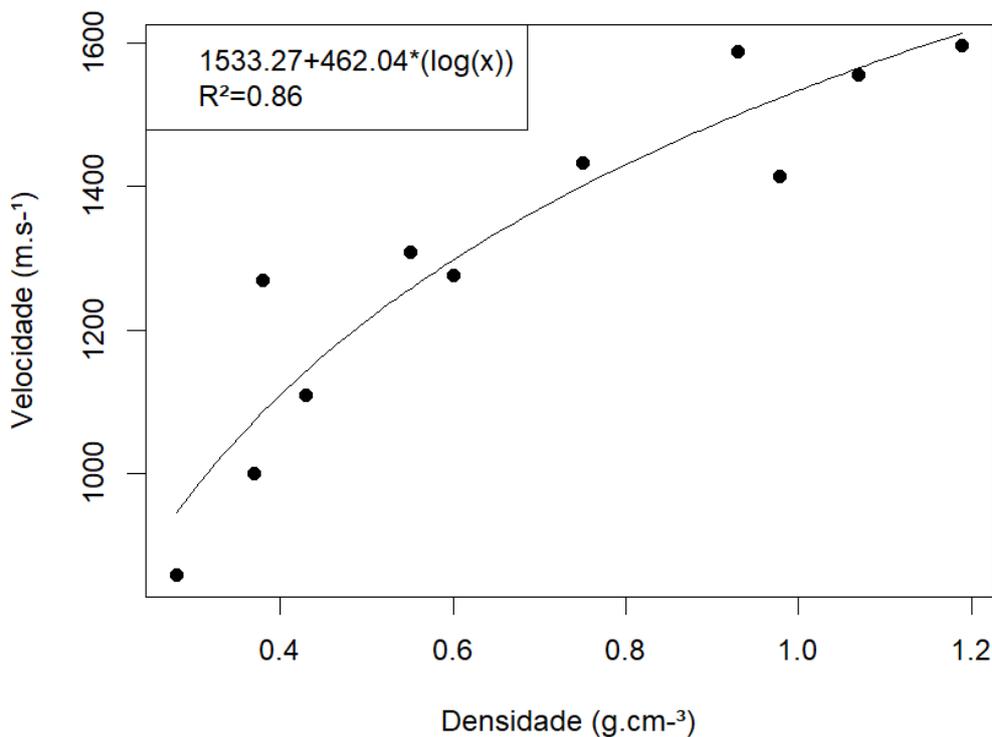


Figura 18. Gráfico da regressão logarítmica entre as velocidades médias de onda mecânica em m.s^{-1} e os valores de densidade da madeira em g.cm^{-3} para cada espécie de árvore amostrada. O modelo logarítmico que descreve a regressão é $y=1533,27+462,04*(\log(x))$, com valor de R^2 ajustado de 0,86.

O gráfico da figura 18 ilustra a regressão entre a densidade da madeira (g.cm^{-3}) obtida em literatura das onze espécies amostradas e as velocidades médias (m.s^{-1}) obtidas por tomografia com Arbotom, para tais espécies. O valor de R^2 ajustado foi de 0,86, indicando que a densidade intrínseca da madeira se correlaciona positivamente e de forma significativa com a velocidade de onda mecânica obtida por tomografia com Arbotom, para as espécies amostradas. Esse resultado sugere que os dados obtidos com o equipamento Arbotom e processados pelo seu software fornecem uma mensuração confiável das condições estruturais da madeira, ainda que seja um método de medição indireto por meio da cronometragem das ondas mecânicas propagadas na madeira.

A correlação obtida sugere que o Arbotom é capaz de detectar diferenças na densidade da madeira na ordem de $0,1 \text{ g.cm}^{-3}$, indicando precisão nos valores de velocidade obtidos. Pereira-Rollo et al. (2014) correlacionou positivamente ($R^2=0,85$) a densidade da madeira, obtida por densitometria de raios-x em intervalos de 5 mm, com a distribuição das velocidades de onda no mesmo plano dessa densitometria, indicando que a densidade

condicionada da madeira pode ser explicada com precisão pela velocidade de onda obtida por tomografia com Arbotom. Segundo Socco et al. (2004), a grande variabilidade de valores de velocidade em seções de tronco prova que a interpretação dos dados baseada em padrões de velocidade deduzidos em literatura ou em análise estatística é bastante aproximada.

O modelo logarítmico que descreve a regressão foi expresso como $y=1533,27+462,04*(\log(x))$, sendo a variável x a densidade da madeira em g.cm^{-3} e a variável y sendo a velocidade de onda em m.s^{-1} . Esse modelo gerou uma correlação positiva e significativa entre a densidade descrita em literatura para as espécies e suas velocidades de onda correspondentes para condições de madeira normal, isto é, sem valores de velocidade extremos, indicativos de madeira de reação (extremos superiores) ou de regiões com perda de densidade por podridão (extremos inferiores).

No entanto, é possível sugerir que esse modelo seja melhorado, com aumento do valor de R^2 , com a adição de mais espécies e mais indivíduos por espécie e, posteriormente, empregado para a definição de valores de base para velocidades de onda mecânica em madeira íntegra de diversas espécies comuns em arborização urbana. Tais valores de base poderiam gerar maior precisão nos dados obtidos com tomografia e assim auxiliar na interpretação das imagens tomográficas pelos usuários do equipamento Arbotom.

Nome científico	Velocidade média (m.s^{-1})	Densidade da madeira x (g cm^{-3})	Vel. m. estimada y (m.s^{-1})	Resíduo vel. m. real - vel. m. estimada (m.s^{-1})
<i>Ceiba speciosa</i>	858,46	0,28	1277,83	-419,38
<i>Spathodea campanulata</i>	1000,65	0,37	1333,76	-277,18
<i>Delonix regia</i>	1268,44	0,38	1339,11	-9,39
<i>Pachira aquatica</i>	1108,50	0,43	1363,92	-169,33
<i>Ligustrum lucidum</i>	1307,70	0,55	1413,31	29,86
<i>Bauhinia variegata</i>	1275,78	0,6	1430,77	-154,99
<i>Tipuana tipu</i>	1432,48	0,75	1475,54	154,65
<i>Lafoensia pacari</i>	1587,84	0,93	1518,71	310,00
<i>Cenostigma pluviosum</i> var. <i>cabralianum</i>	1413,18	0,978	1528,81	135,34
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	1555,11	1,07	1546,85	8,27
<i>Libidibia ferrea</i>	1596,00	1,19	1568,18	318,16

Tabela 4. Espécies estudadas e seus dados de velocidade média (m.s^{-1}), de propagação de onda mecânica no interior do lenho, densidade da madeira (g.cm^{-3}) obtida em literatura (x), velocidade média estimada (y) a partir do modelo de regressão $V_m=1533,27+462,04*(\log(D_b))$ e resíduo entre a velocidade média real e a velocidade média estimada.

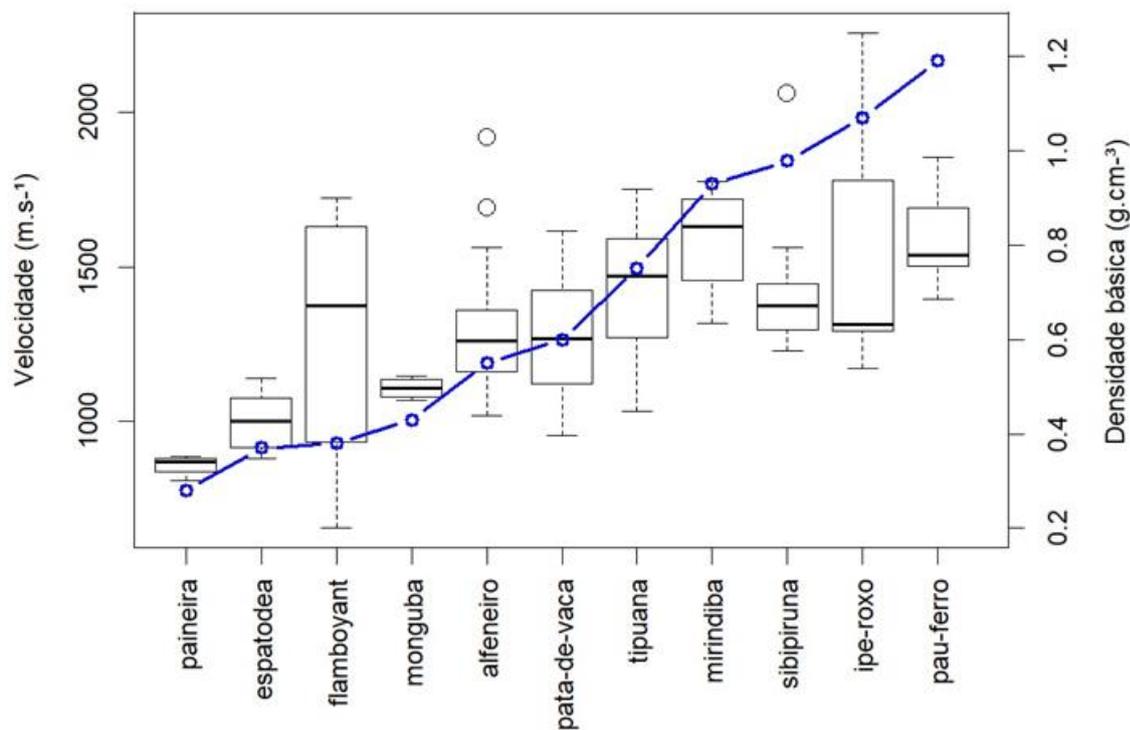


Figura 19. Gráfico do tipo “*boxplot*” com a distribuição dos valores usados para calcular as médias de velocidade de onda (m.s^{-1}) de cada espécie, a mediana, a média e os limites inferiores e superiores, além da linha que representa a Densidade básica (g.cm^{-3}) para cada uma das espécies.

A espécie sete-copas (*Terminalia catappa*, também conhecida como chapéu-de-sol) não foi incluída no gráfico de correlação entre velocidades e densidades (figura 18) ou no gráfico *boxplot* (figura 19), pois as análises estatísticas indicaram que seu comportamento seria de um *outlier*, assim, sua inclusão diminuiu a relevância do modelo de regressão obtido entre as velocidades e as densidades por espécie. Na tabela 3, podemos notar que a velocidade média para essa espécie, de $1694,45 \text{ m.s}^{-1}$, atingiu valor elevado e discrepante quando comparado com a velocidade média estimada de $1402,05$, calculada com base no modelo de regressão a partir de sua densidade de $0,52 \text{ g.cm}^{-3}$; mesmo com um n amostral de 10 árvores que, dentro do disponível para esse estudo, é um número suficiente para poder diluir possíveis valores discrepantes que gerariam resíduo entre a velocidade real obtida e a estimada pelo modelo.

Inclusive, mesmo que os dados de velocidades tenham sido processados de forma a remover os valores extremos, incluindo possíveis regiões de madeira de reação, mais densa, podemos observar na tabela 3 que o limite superior de velocidades para o chapéu-de-sol foi de 2177 m.s^{-1} , o segundo maior limite superior, atrás apenas do ipê-roxo, que possui

densidade de $1,07 \text{ g.cm}^{-3}$, bem mais elevada. O chapéu-de-sol já foi amplamente utilizado no passado na arborização urbana de algumas cidades, e por esse motivo os indivíduos dessa espécie que possuem necessidade de tomografia são de grande porte, inclusive, todas as velocidades consideradas na obtenção das médias por espécie foram geradas por árvores com DAP maior que 40 cm. Assim, uma possível explicação para ser essa discrepância seria o fato de que o chapéu-de-sol talvez apresente densidades maiores em indivíduos de grande porte no ambiente urbano, em relação à densidade dessa espécie registrada em literatura, o que poderia ser explicado pela presença de madeira de reação, por exemplo, que possui maior densidade que a madeira regular.

O flamboyant (*Delonix regia*) também foi uma espécie que apresentou valor médio de velocidade, de $1268,44 \text{ m.s}^{-1}$, mais elevado que sua velocidade estimada com base no modelo, de $1339,11 \text{ m.s}^{-1}$ a partir de sua densidade em literatura ($0,38 \text{ g.cm}^{-3}$), além de ter gerado um desvio padrão elevado, de 35% ($440,47 \text{ m.s}^{-1}$), dados que podem ser observados na tabela 3 e na figura 19. Essa espécie, inclusive, também apresentou um comportamento de *outlier*, quando seu n amostral era de apenas quatro indivíduos, mas com o posterior acréscimo de mais três árvores, seu desvio padrão diminuiu e sua velocidade média se apresentou mais condizente com seu valor de densidade. Ainda assim, o flamboyant apresentou uma amplitude de velocidade anormalmente grande em comparação com as demais espécies, entre 655 e 1721 m.s^{-1} , resultando no seu elevado desvio padrão, além de uma mediana bastante elevada em relação à sua média, indicando que a maior parte de seus valores de velocidade está acima do esperado para sua densidade.

A adição de mais tomografias de indivíduos de flamboyant poderia melhorar seus valores ou ajudar a elucidar as razões de uma variabilidade intraespecífica tão alta e valores de velocidade elevados para sua densidade. O flamboyant possui uma arquitetura peculiar em relação à região do colo, pela presença de áreas com alargamento condizentes com raízes tabulares. Uma possível explicação para as altas velocidades encontradas nessa espécie seria o acúmulo de madeira de sustentação presente nessa região, onde normalmente são posicionados os sensores para tomografia de colo com Arbotom.

A terceira espécie que apresentou valores de velocidade notáveis foi o ipê-roxo, com velocidade média de $1555,11 \text{ m.s}^{-1}$ e grande amplitude de velocidades, entre 1173 e 2257 m.s^{-1} , gerando um elevado desvio padrão de 28% ($442,22 \text{ m.s}^{-1}$), apesar de sua velocidade real ser condizente com a velocidade estimada a partir do modelo ($1525,08 \text{ m.s}^{-1}$). Durante a

compilação de tomografias fornecidas pela empresa Forty, não foi informado nome científico das sete árvores identificadas como “ipê-roxo”, havendo duas possibilidades: *Handroanthus impetiginosus*, com densidade de $0,96 \text{ g.cm}^{-3}$ e *Handroanthus heptaphyllus*, com densidade de $1,07 \text{ g.cm}^{-3}$. Os indivíduos então foram processados da mesma forma que as outras espécies, em seguida foram testadas as correlações entre sua velocidade média e ambas as densidades possíveis, o que acabou resultando na sua média de velocidade individual se adequando melhor ao modelo como *H. impetiginosus*, com o coeficiente de determinação R^2 ficando levemente superior, quando comparado com o uso da densidade de *H. heptaphyllus* e também quando usado um valor médio obtido entre as densidades das duas espécies.

No entanto, a escolha de usar essa densidade resultou em um desvio padrão elevado para o ipê-roxo, como pode ser observado na tabela 3 e na figura 19, devido à grande variabilidade de velocidades e amplitude de seus valores (tabela 3). Assim, também seria interessante ampliar a amostragem de tomografias de ambas as espécies de ipê-roxo, identificando a árvore em nível de espécie, não apenas gênero, e selecionando a densidade correta para o modelo, o que poderia melhorá-lo, além de aumentar o n amostral para diluir a variabilidade de velocidades.

4.2. Resultados de tomografia de colo e raízes de tipuana (*Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze) com Arbotom e Arboradix

Inicialmente, foram selecionados indivíduos de tipuana (*Tipuana tipu*), para realização de tomografias com Arbotom e Arboradix, em diferentes condições de fitossanidade da árvore e condições de entorno, como afloramento de raízes em canteiro de terra, na borda do asfalto ou no calçamento com cimento; visando testar como essas diferentes condições podem afetar o comportamento das velocidades de onda mecânica nas raízes. As imagens tomográficas com Arbotom e Arboradix obtidas a partir de alguns desses indivíduos foram demonstradas e discutidas a seguir.



Figura 20. A: Tipuana T1 (*Tipuana tipu*), localizada na Av. Presidente Kennedy, Bairro Nova Piracicaba, com presença de extensa região de oco no caule (indicado pela seta), constatado pela tomografia com Arbotom (figura 21). **B:** Detalhe da tipuana (*Tipuana tipu*) T1, com restrição de raízes no lado do asfalto (à direita) e com possível poda de raízes na construção do canteiro (à esquerda).

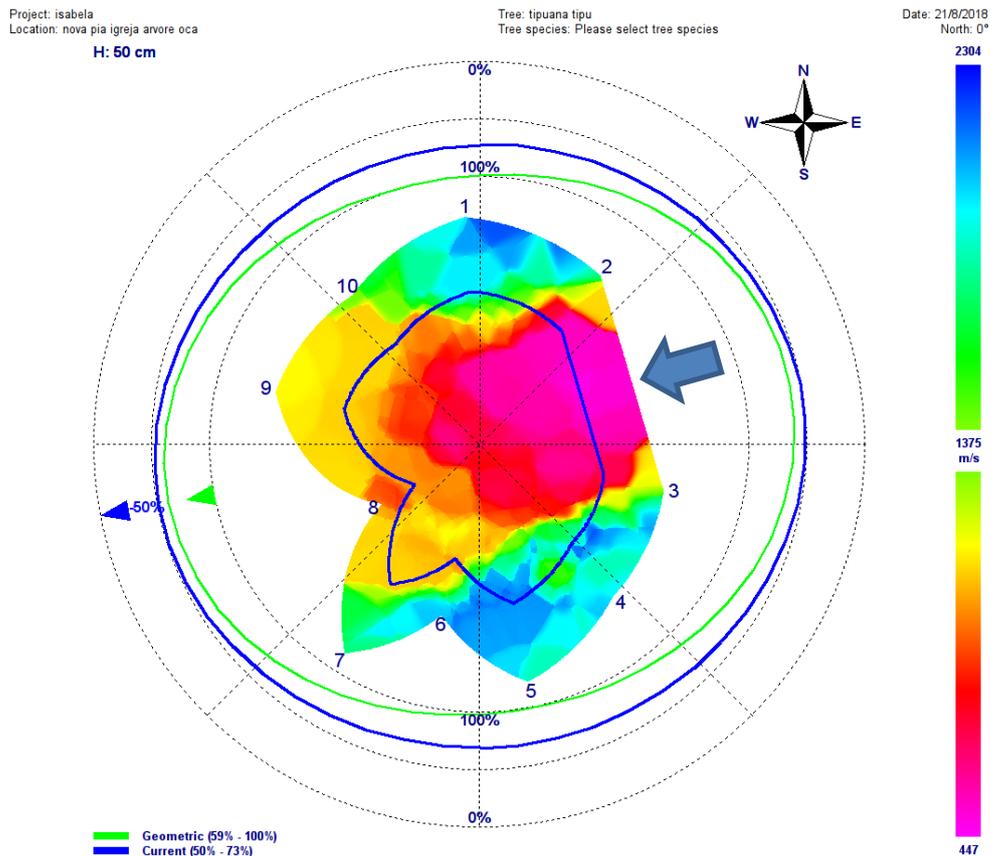


Figura 21. Imagem tomográfica obtida com Arbotom para a tipuana T1 (*Tipuana tipu*), apresentando a detecção de seu oco no caule pela área central de cor rosa, que corresponde às velocidades mais baixas na escala.

Por meio da avaliação visual e das imagens da tipuana T1, podemos notar a presença de uma extensa área de oco em seu tronco, indicado pela seta azul na figura 20-A, que pode ser localizado na imagem tomográfica com Arbotom na área representada pela cor rosa, indicada pela seta azul na figura 21. As setas indicam o local onde não foi possível posicionar nenhum sensor Arbotom devido ao oco, no entanto, sua detecção ocorre por meio da interpolação das velocidades dos sensores vizinhos à essa área.

A tomografia da tipuana T1 gerou velocidades de onda entre 447 e 2304 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com velocidade média de 837,14 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Sua velocidade média baseada no modelo de regressão é de 1475,54 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, a partir de sua densidade de 0,75 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, o que indica que a média de velocidade obtida para esta tipuana teve seu valor diminuído pelos valores inferiores de onda correspondentes à sua área de oco, onde as velocidades de onda são visivelmente inferiores.

Uma observação interessante é que a velocidade gerada pela região de oco possui um valor maior do que o valor conhecido de propagação de onda no ar, que é de 343 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. A subestimação do decréscimo da velocidade em zonas degradadas da madeira é conhecida

como “Efeito Wielandt” e ocorre pelo fato que as ondas mecânicas tendem a desviar das regiões degradadas, portanto a velocidade não corresponde exatamente à degradação dessas áreas mais lentas (IVANSSON, 1986; WIELAND, 1987 apud SOCCO et al., 2004).

Quando nos deparamos com uma imagem tomográfica por Arbotom como essa (ou como as das figuras 42 e 54-A discutidas adiante) em uma árvore viva, identificamos a perda de densidade em seu interior, mas o valor não reflete necessariamente uma área totalmente oca com total ausência de tecido arbóreo, a confirmação só ocorre caso o oco seja visível externamente, ou com a eventual remoção da árvore (figura 54-A), portanto, é fundamental que os usuários do Arbotom saibam interpretar casos como este.

Segundo Socco et al. (2004), esse problema é frequentemente detectado em experimentos: no processamento de tomografias, velocidades altas como em nós da madeira são detectadas satisfatoriamente em termos quantitativos, enquanto áreas de madeira degradada são detectadas com valores mais altos do que a velocidade real (SOCCO et al., 2004). Zonas de oco interno de tronco são facilmente detectadas por tomografia, mas sua velocidade frequentemente é o dobro da velocidade real de propagação de onda mecânica no ar (343 m.s^{-1}) e, portanto, essa questão deve sempre ser considerada durante a interpretação dos resultados de tomografia (SOCCO et al., 2004).

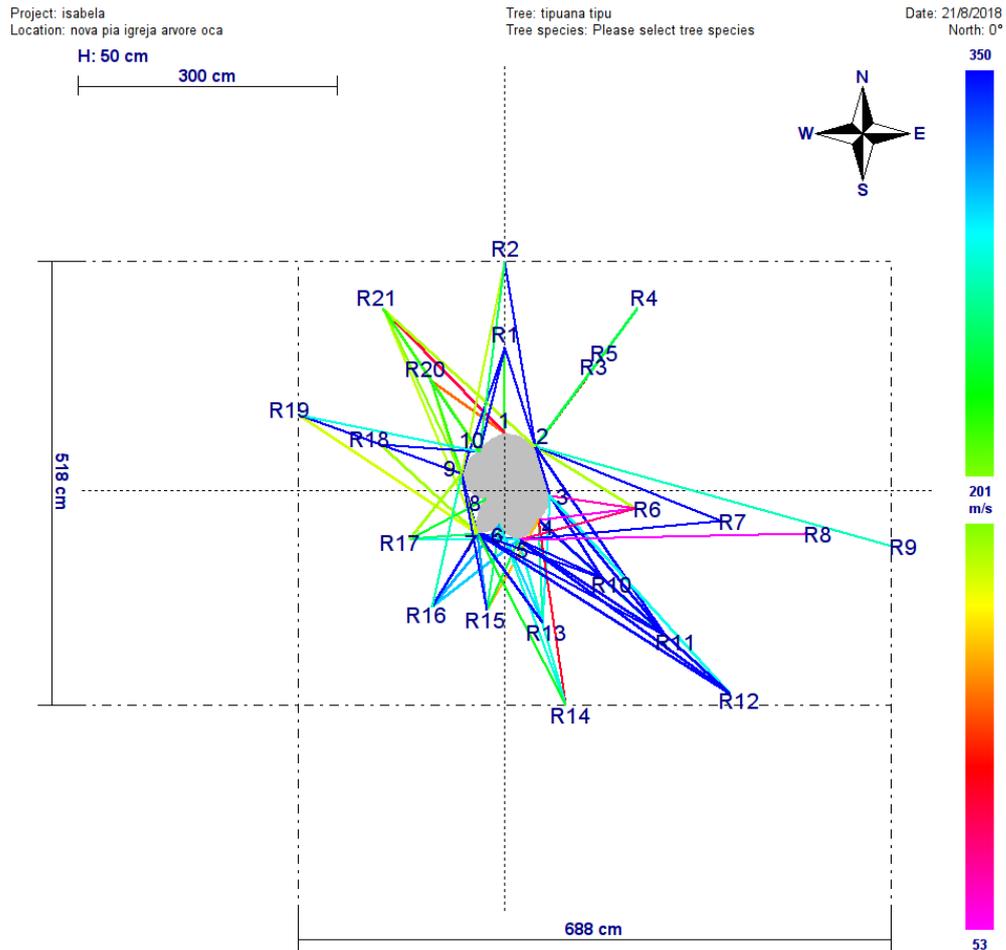


Figura 22. Imagem tomográfica das raízes da tipuana T1 (*Tipuana tipu*) realizada com Arboradix.

A tomografia das raízes da tipuana T1 com Arboradix resultaram em velocidades de onda mecânica entre 53 e 350 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com média de 202,85 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Considerando que o pavimento predominante nessa tomografia foi cimento, com alguns pontos de asfalto, os valores das retas geradas podem ser considerados compatíveis com essa situação de entorno, predominando nas cores azul e verde, com velocidades entre 220 e 350 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e média de 258,24 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

No entanto, essas velocidades se mostraram inferiores aos valores encontrados nas tomografias de amostras de madeira sobre o cimento, cuja média entre as 28 amostras foi de 444,07 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. A imagem tomográfica das raízes (figura 22) corresponde com as observações visuais de restrição de raízes no lado do asfalto (direção nordeste) e possível poda de raízes no lado oposto (direção sudoeste) para construção do canteiro e calçada (figura 20-B).

Ao lado da tipuana T1, foi selecionada a tipuana T2 para receber tomografia com Arbotom e Arboradix. Essa árvore se encontra nas mesmas condições de entorno que a

tipuana T1, porém na Avaliação Visual não apresenta lesões de tronco visíveis, sendo considerada com bom estado geral (figura 23-A e B).



Figura 23. A: Tipuana T2 (*Tipuana tipu*), localizada na avenida ao lado da tipuana T1, apresenta bom estado geral pela avaliação visual. **B:** Existe, porém, uma possível poda de raízes para construção do canteiro (à direita) e restrição de raízes no lado do asfalto (à esquerda).

Pela imagem tomográfica com Arbotom da tipuana T2, podemos confirmar que ela se encontra em bom estado geral, constatado também pela avaliação visual. Suas velocidades variaram entre 2663 e 1267 e velocidade média de 1471 m.s^{-1} . Como sua velocidade média baseada no modelo de regressão é de $1475,54 \text{ m.s}^{-1}$, é possível afirmar que essa tipuana apresenta velocidades condizentes com sua densidade de $0,75 \text{ g.cm}^{-3}$, indicando boa

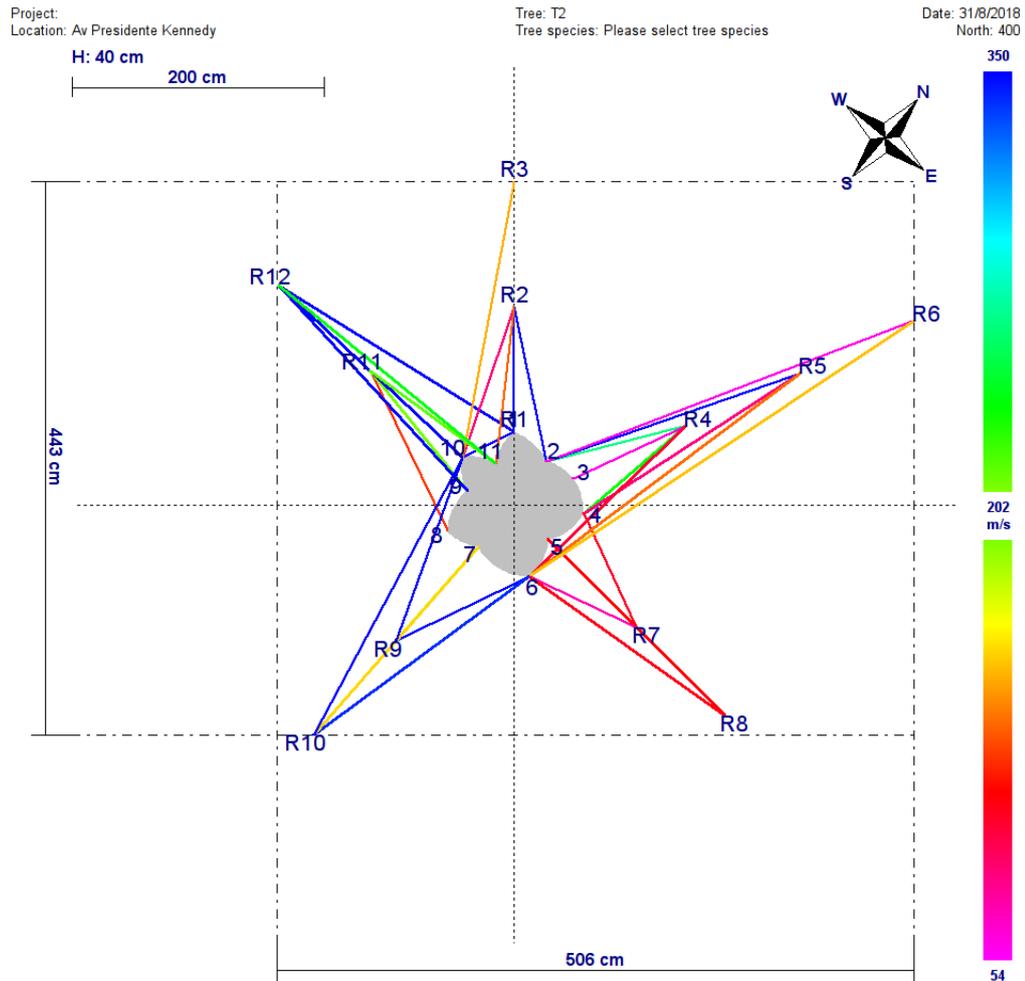


Figura 25. Imagem tomográfica das raízes da tipuana T2 (*Tipuana tipu*) realizada com Arboradix.

4.3. Resultados das tomografias com Arbotom e Arboradix das árvores que forneceram as amostras de madeira

As oito árvores que forneceram amostras de madeira para as tomografias em laboratório também receberam tomografias com Arbotom na região do colo e com Arboradix no sistema radicular, totalizando: um angico-branco, (*Anadenanthera colubrina*), uma eritrina (*Erythrina falcata*), uma espatódea (*Spathodea campanulata*), dois freixos (*Fraxinus excelsior*), um pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*) e duas sibipirunas (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*).

Com os dados dessas tomografias, as densidades de madeira para cada espécie (tabela 3) e o modelo gerado pela correlação entre velocidades de onda

$V_m=1533,27+462,04*(\log(Db))$, disponível no item 4.1 (figura 18), foi calculada a velocidade média estimada, de acordo com o modelo, para tomografias com Arbotom e Arboradix, para cada uma das espécies que forneceram as amostras (tabela 5).

As velocidades médias de tomografias com Arbotom e Arboradix para cada uma das árvores amostradas foram calculadas da mesma forma descrita no item 3.4., pela metodologia sugerida por Mendes & Silva Filho (2019), evitando os valores extremos de velocidade que podem distorcer a média e utilizando apenas os valores 20% centrais. Esses resultados foram comparados com as velocidades médias reais obtidas com tomografia dessas árvores em campo, gerando um resíduo de velocidade em $m.s^{-1}$ a partir da diferença entre velocidade média real e velocidade média estimada, e se encontram na tabela 5:

Espécie	Nome científico	x DB ($g.cm^{-3}$)	y vel. estimada Arbotom ($m.s^{-1}$)	vel. m. real Arbotom ($m.s^{-1}$)	Resíduo vel. real - vel estimada ($m.s^{-1}$)	vel. valor central ($m.s^{-1}$)
eritrina	<i>Erythrina falcata</i>	0,31	1298,26	1055,63	-242,63	1575
espatódea	<i>Spathodea campanulata</i>	0,37	1333,76	1366,33	32,57	2011
ipê-rosa	<i>Tabebuia rosea</i>	0,54	1409,63	915,5	-494,13	1996
freixo	<i>Fraxinus excelsior</i>	0,63	1440,56	956,69	-483,87	1586
freixo-ip	<i>Fraxinus excelsior</i>	0,63	1440,56	1518,50	77,94	2333
angico	<i>Anadenanthera colubrina</i>	0,93	1518,71	1577,26	58,55	2119
sibipiruna1	<i>Cenostigma pluviosum</i> var. <i>cabralianum</i>	0,98	1528,81	1696,79	167,98	2850
sibipiruna2	<i>Cenostigma pluviosum</i> var. <i>cabralianum</i>	0,98	1528,81	1098,50	-430,31	1818
pau-ferro	<i>Libidibia ferrea</i> var. <i>ferrea</i>	1,19	1568,18	1196,50	-371,68	1711

Tabela 5. Espécies estudadas e seus dados de densidade básica ($g.cm^{-3}$) em literatura, aplicados no modelo de regressão linear $V_m=1533,27+462,04*(\log(Db))$ para obtenção da velocidade média estimada ($m.s^{-1}$) de propagação de onda mecânica, a partir da densidade básica de cada espécie. Foi obtido o resíduo ($m.s^{-1}$) referente à diferença entre a velocidade média real obtida com Arbotom e a velocidade média estimada de acordo com o modelo.

O resíduo calculado entre as velocidades médias reais e as velocidades estimadas a partir do modelo apresentou tanto resultados positivos quanto negativos, indicando que cada

árvore mostrou uma variação de comportamento particular nas tomografias com Arbotom, que será discutida adiante para cada caso em mais detalhes. Outra questão interessante dessa tabela é a coluna de valores centrais de velocidade, que podem ser observados nas barras de escala de cores das legendas nas imagens tomográficas. Esses valores centrais não podem ser considerados como a velocidade média das tomografias, pois o software Arbotom não realiza esse cálculo, esses valores são definidos apenas com base nos valores superior e inferior de velocidades, presentes nos extremos da escala de cores. Esses valores extremos podem ser determinados automaticamente pelo software Arbotom ou definidos manualmente, o que gera melhor distribuição das cores e visualização das áreas com diferentes densidades, facilitando a interpretação dos resultados de tomografia.

A velocidade média real por sua vez, é calculada a partir dos valores apresentados na matriz de todos os valores da tomografia, pelo método sugerido por Mendes & Silva Filho (2019), portanto é mais próxima da média real de cada tomografia e mais confiável, pois é calculada de forma ponderada e com exclusão dos valores extremos de velocidade. Pela tabela 5, é possível observar que os valores centrais são sempre mais elevados do que ambas as velocidades real e estimada a partir do modelo, o que indica que ele não deve ser considerado como a velocidade média na interpretação dos dados tomográficos, pois tende a superestimar os valores reais encontrados, o que poderia encobrir a detecção de possíveis regiões de perda de densidade, que seriam indicadas por velocidades mais baixas.

Essa escala de valores na legenda das imagens tomográficas (figura 24 para Arbotom e 25 para Arboradix) pode ser definida automaticamente pelo software Arbotom quando selecionada essa opção, usando os valores extremos superiores e inferiores para definir a amplitude da barra. No entanto, geralmente é necessária a realização de ajustes manuais para que os valores máximo e mínimo de velocidades estejam bem contemplados na escala de cores, ou seja, de forma que as velocidades e suas respectivas cores estejam distribuídas de maneira que haja contraste entre elas, facilitando a interpretação do gráfico de área do tronco ou do sistema radicular.

Na Tabela 6 a seguir, ao se observar a coluna de resíduo, é possível notar que os valores centrais da barra de escala de velocidades das tomografias com Arboradix são mais elevados do que as velocidades médias calculadas, indicando que esses valores não correspondem à real velocidade média, que é calculada considerando os valores de cada ponto entre sensores, encontrados na matriz de velocidades de cada tomografia.

Espécie	Nome científico	Velocidade média Arboradix (m.s ⁻¹)		Resíduo: valor central – vel. m. calculada (m.s ⁻¹)
		valor central	calculada	
eritrina	<i>Erythrina falcata</i>	388,00	309,27	78,73
espatódea	<i>Spathodea campanulata</i>	525,00	272,67	252,33
freixo	<i>Fraxinus excelsior</i>	525,00	247,90	277,1
freixo-ip	<i>Fraxinus excelsior</i>	375,00	140,79	234,21
angico	<i>Anadenanthera colubrina</i>	637,00	440,21	196,79
sibipiruna 1	<i>Cenostigma pluviosum</i> var. <i>cabralianum</i>	375,00	282,04	92,96
	<i>Cenostigma pluviosum</i> var. <i>cabralianum</i>			
sibipiruna 2	<i>cabralianum</i>	325,00	245,18	79,82
pau-ferro	<i>Libidibia ferrea</i> var. <i>ferrea</i>	437,00	251,39	185,61

Tabela 6. Espécies estudadas e seus dados de velocidades médias obtidas por tomografia com Arboradix, sendo uma coluna com os valores médios de velocidade de onda presentes na escala de velocidades das imagens tomográficas e outra coluna com as velocidades médias calculadas pela metodologia de Mendes & Silva Filho (2019). O resíduo foi calculado pela diferença entre o valor central e a velocidade média calculada, para cada árvore.

Essa questão pode ser confirmada mediante a observação de algumas das imagens tomográficas com Arboradix (figuras 28, 34, 37, 40 e 43), nas quais é possível notar que as cores predominantes das retas do gráfico não correspondem às cores do valor central na barra de escala. Isso pode ser explicado pelo fato de que a velocidade média é calculada de forma ponderada, é feita a partir de todos os valores da matriz de velocidades e por isso reflete os valores predominantes, enquanto a barra da escala de cores apenas mostra a velocidade mínima no limite inferior e a velocidade máxima no limite superior, com o valor central no meio, sem que ele seja alterado pelo número de repetições de cada valor de velocidade, ao contrário da média a partir da matriz.

Assim, é comum que os valores superiores, inferiores e centrais da barra de cores não correspondam exatamente às velocidades máxima, mínima e média das tomografias com Arbotom e Arboradix, enfatizando a importância do cálculo de velocidade média em cada caso.

Os gráficos das velocidades de onda mecânica, ou imagens tomográficas, da região do colo e das raízes obtidas com Arbotom e Arboradix de cada árvore encontram-se nas figuras a seguir. Os resultados das imagens foram descritos de acordo com características qualitativas das árvores e de seu entorno, informações que auxiliam na sua interpretação, além de informações quantitativas como a densidade básica de cada espécie. Essas

características qualitativas podem ser observadas nas fotos das árvores, que se encontram juntamente com as imagens tomográficas, e serão descritas a seguir. Os dados quantitativos das tomografias dessas espécies encontram-se nas tabelas 5 e 6 já apresentadas e posteriormente na figura 50 no item 4.4.1. dos resultados da análise estatística realizada com o software R, com programação elucidada nos Anexos.

4.3.1. Angico-branco (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan)



Figura 26. A: Árvore da espécie angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), com diâmetro basal de 79,58 cm, localizada na Área de Lazer da Rua do Porto em Piracicaba-SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix. **B:** Angico-branco (*Anadenanthera colubrina*) com sensores do Arbotom posicionados em seu colo e afloramento de algumas das raízes de ancoragem.

Na tomografia de colo do angico-branco (*Anadenanthera colubrina*) (figura 29) predominaram velocidades de onda mecânica com valores entre 3000 e 1239 m.s⁻¹ (figura 31), e velocidade média calculada de 1577,26 m.s⁻¹. Sua velocidade média estimada pelo modelo de regressão linear foi de 1518,71 m.s⁻¹, calculada a partir de sua densidade de 0,93 g.cm⁻³

(tabela 5), gerando um resíduo de apenas $58,55 \text{ m.s}^{-1}$ (tabela 5), indicando proximidade entre as velocidades médias calculadas pela tomografia e estimada pelo modelo. Esses resultados de tomografia podem ser considerados condizentes com a alta densidade básica da madeira dessa espécie, de $0,93 \text{ g.cm}^{-3}$ (tabela 5), e não apontaram lesões internas, podridão ou perda de integridade da madeira.

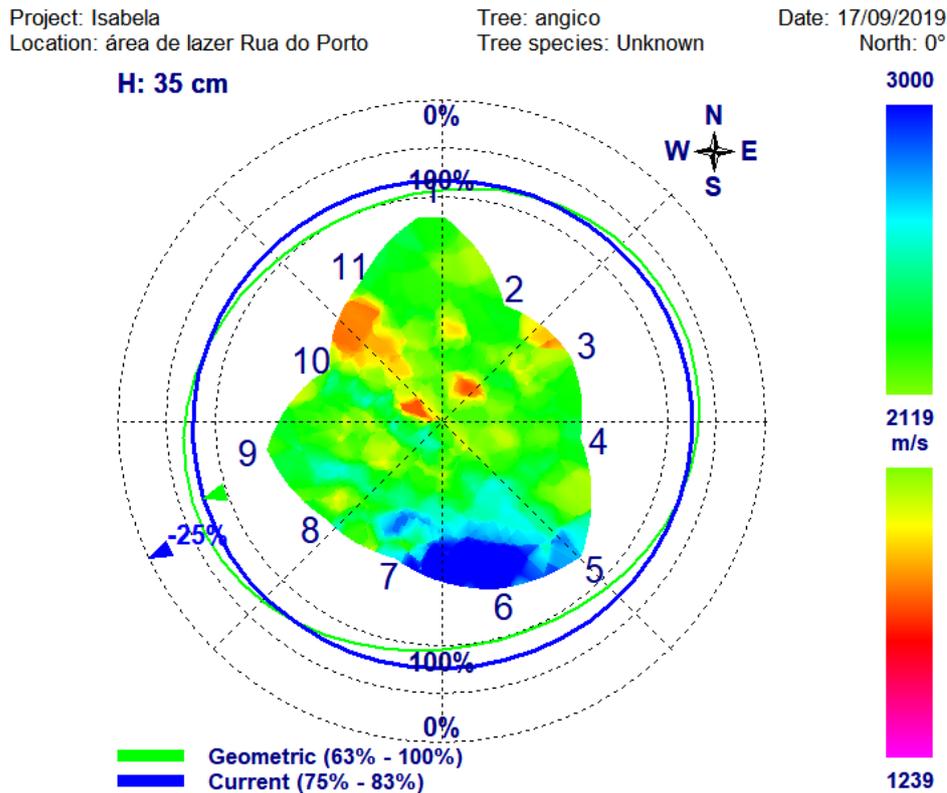


Figura 27. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 79,58 cm, de árvore da espécie angico-branco (*Anadenanthera colubrina*).

A tomografia de raízes apresentou velocidade média de $440,21 \text{ m.s}^{-1}$ e maior amplitude de valores, com retas de menores velocidades, entre 75 e $\approx 500 \text{ m.s}^{-1}$, representadas pelas cores rosa e vermelha (figura 28), onde não havia raízes visíveis e o sensor Radix foi posicionado sobre o solo de textura arenosa, substrato que provavelmente gera dissipação da onda, fazendo com que ela demore mais a chegar aos receptores no colo da árvore. Esse efeito do tipo de solo sobre as velocidades resultantes indica necessidade de atenção a possíveis interferências do substrato durante a interpretação das tomografias de raízes.

Outros pontos geraram maiores velocidades, entre 1200 e $\approx 700 \text{ m.s}^{-1}$, representadas pelas cores amarela e verde, como nos sensores R6 e R9 (figura 28), onde as raízes eram

visíveis (figura 26-B) e o sensor Radix foi posicionado exatamente em cima delas, onde recebeu o impulso mecânico na forma de batidas de martelo.

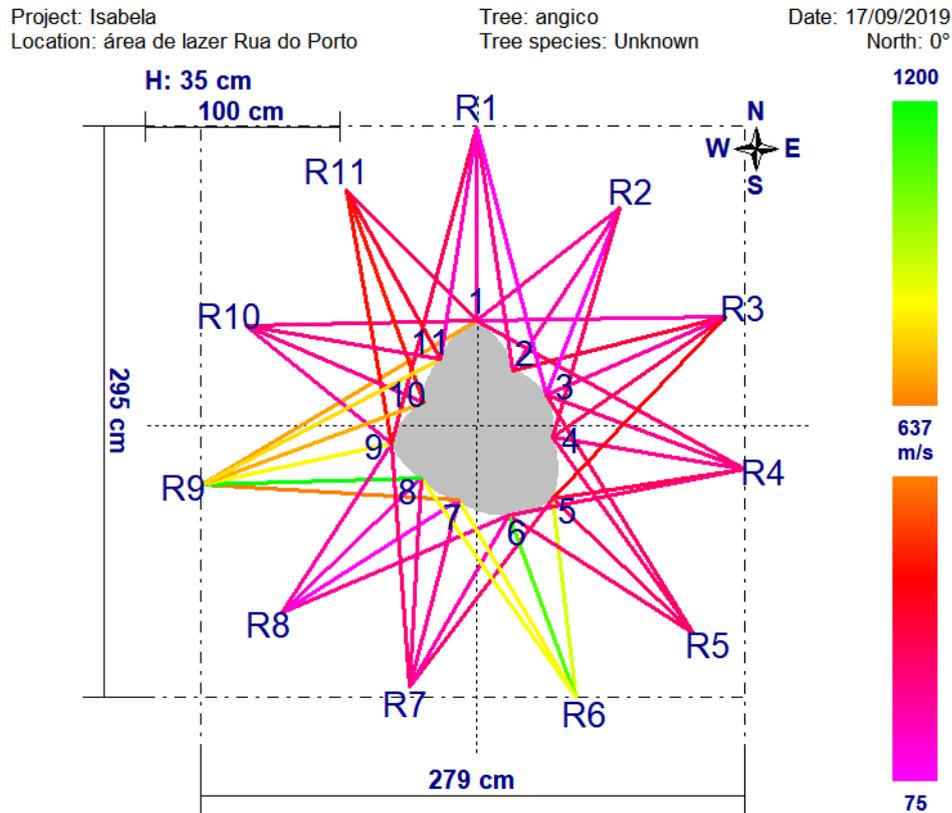


Figura 28. Imagem tomográfica do sistema radicular de árvore da espécie angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), obtida com Arboradix.

A média de velocidade obtida com Arboradix para essa árvore foi a de maior valor entre todas as espécies amostradas. Uma possível explicação, além da alta densidade básica conhecida para essa espécie, é o fato de haver afloramento raízes de ancoragem, o que permitiu o posicionamento do sensor Radix diretamente sobre elas, diminuindo uma possível dispersão de onda mecânica pelo solo que pode ter ocorrido em outros pontos dessa tomografia, indicados pelas velocidades inferiores.

4.3.2. Eritrina - *Erythrina falcata* Benth.



Figura 29. A: Árvore da espécie eritrina (*Erythrina falcata*), com diâmetro basal de 43,93 cm, localizada na Área de Lazer da Rua do Porto em Piracicaba – SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix. **B:** Eritrina (*Erythrina falcata*) com sensores do Arbotom posicionados na região do colo, apresentando afloramento de suas raízes de ancoragem.

Na tomografia de colo com Arbotom da eritrina (*Erythrina falcata*) (figura 29-A e B) as velocidades predominantes variaram entre 2100 e 1051 m.s⁻¹ (figura 30), com velocidade média de 1055,63 m.s⁻¹ e velocidade média estimada pelo modelo de 1298,26 m.s⁻¹, calculada

a partir de sua densidade básica, de $0,31 \text{ g.cm}^{-3}$. O cálculo do resíduo apontou que a velocidade real foi menor do que a estimada, com valor de $-242,63 \text{ m.s}^{-1}$ (tabela 5). No entanto, mesmo com velocidade média abaixo da estimada, esse resultado não acusou nenhuma lesão ou perda de densidade interna significativa no tronco, o que pode ser confirmado pela imagem tomográfica da figura 30.

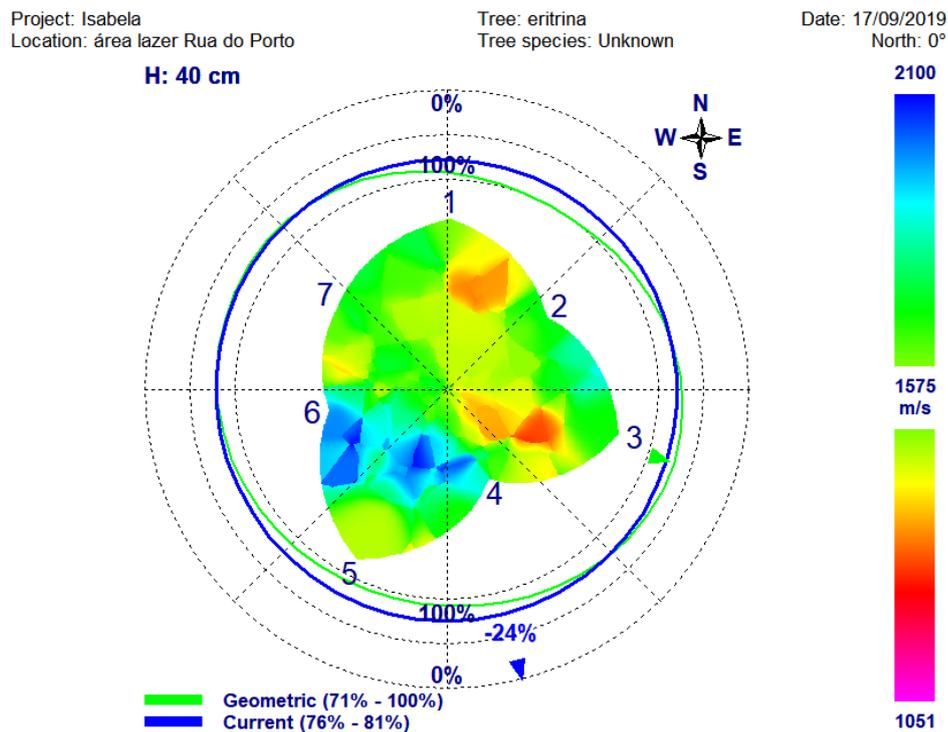


Figura 30. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 43,94 cm, de árvore da espécie eritrina (*Erythrina falcata*).

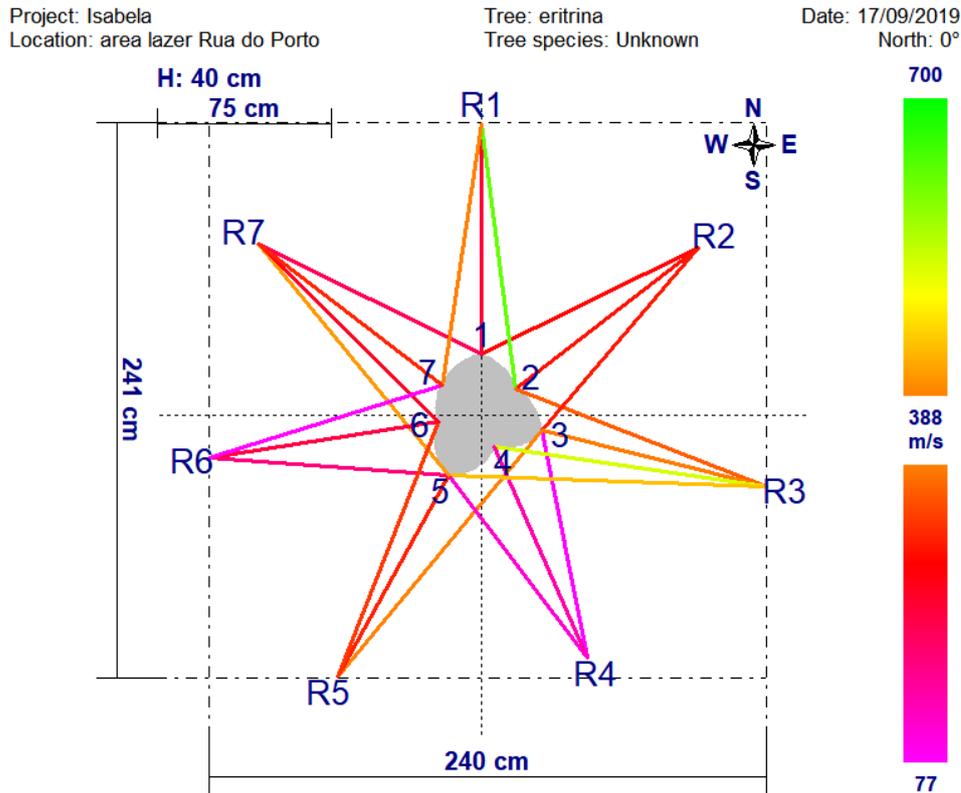


Figura 31. Imagem tomográfica do sistema radicular de árvore da espécie eritrina (*Erythrina falcata*), obtida com Arboradix.

A tomografia das raízes com Arboradix (figura 31) apresentou valores de velocidade predominantes entre 77 e 700 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e velocidade média de 309,27 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Considerando que a velocidade média com Arboradix sobre a grama, nas tomografias com amostras de madeira, foi de 117,6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com valores entre 208 e 51 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, os valores obtidos para essa eritrina poderiam ser considerados relativamente altos para a espécie, considerando sua densidade de apenas 0,31 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a menor entre as espécies amostradas (tabela 5). Isso pode ser explicado pelos valores de tomografia diretamente sobre as raízes, que se mostraram superiores.

Como podemos observar na figura 29-B, havia afloramento das raízes de ancoragem na superfície do solo e as retas de velocidades entre 388 e 700 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ nas cores verde, amarela e laranja (figura 31), foram geradas nos locais onde o sensor Radix foi colocado diretamente sobre essas raízes, nos pontos R1, R3, R5 e R7. As retas nas cores rosa e vermelho, R2, R4 e R6, com velocidades entre 77 e ≈ 300 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, foram geradas em pontos onde o Radix foi posicionado sobre a grama.

O posicionamento do sensor Radix diretamente sobre as raízes expostas nos pontos R1, R3, R5 e R7 pode ter contribuído para gerar velocidades de onda mais altas do que as

velocidades geradas sobre a grama para esta árvore, como observado também nas tomografias sobre a grama com as amostras de madeira (figura 50).

Esses resultados indicam a necessidade de obtenção de um modelo específico para as situações de raízes afloradas, visando evitar a superestimação das velocidades quando o sensor Radix é posicionado diretamente sobre essas raízes; um modelo para raízes que se encontram sob o solo e sob diferentes pavimentos, como o cimento.

4.3.3. Espatódea - *Spathodea campanulata* P. Beauv.



Figura 32. A: Árvore da espécie espatódea (*Spathodea campanulata*), com diâmetro basal de 46,79 cm, localizada na Área de Lazer da Rua do Porto em Piracicaba - SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix. **B:** Detalhe dos troncos codominantes da espatódea (*Spathodea campanulata*) durante tomografia de seu colo com Arbotom.

A tomografia com Arbotom da espatódea (*Spathodea campanulata*) (figura 33) indicou velocidades de onda entre 1422 e 2600 m.s⁻¹ (figura 39) e média de 1366,33 m.s⁻¹ (tabela 5). Sua velocidade estimada a partir do modelo de regressão foi de 1333,76 m.s⁻¹, com

base em sua densidade básica de $0,37 \text{ g.cm}^{-3}$ e seu resíduo entre a velocidade real e a estimada foi de apenas $32,57 \text{ g.cm}^{-3}$, indicando que a tomografia desse indivíduo foi bastante próxima do que se esperaria em relação à sua densidade, com base no modelo de regressão (tabela 5).

Uma observação interessante é que essa espatódea amostrada possui troncos codominantes (figura 32-B) que bifurcam a cerca de 30 cm acima do solo, logo acima da altura na qual foram colocados os sensores Arbotom (figura 32-A). Na tomografia do colo, é possível identificar a área de interferência dessa bifurcação na região central, nas cores amarelo, laranja e vermelho, onde as velocidades se mostraram ligeiramente inferiores em relação ao resto do tronco (figura 33). Essa região de decréscimo de velocidade pode estar indicando uma região onde há a presença de casca inclusa pelo crescimento de ramos codominantes com restrição de espaço. A casca inclusa representa uma área de menor estabilidade biomecânica e deve ser monitorada a longo prazo.

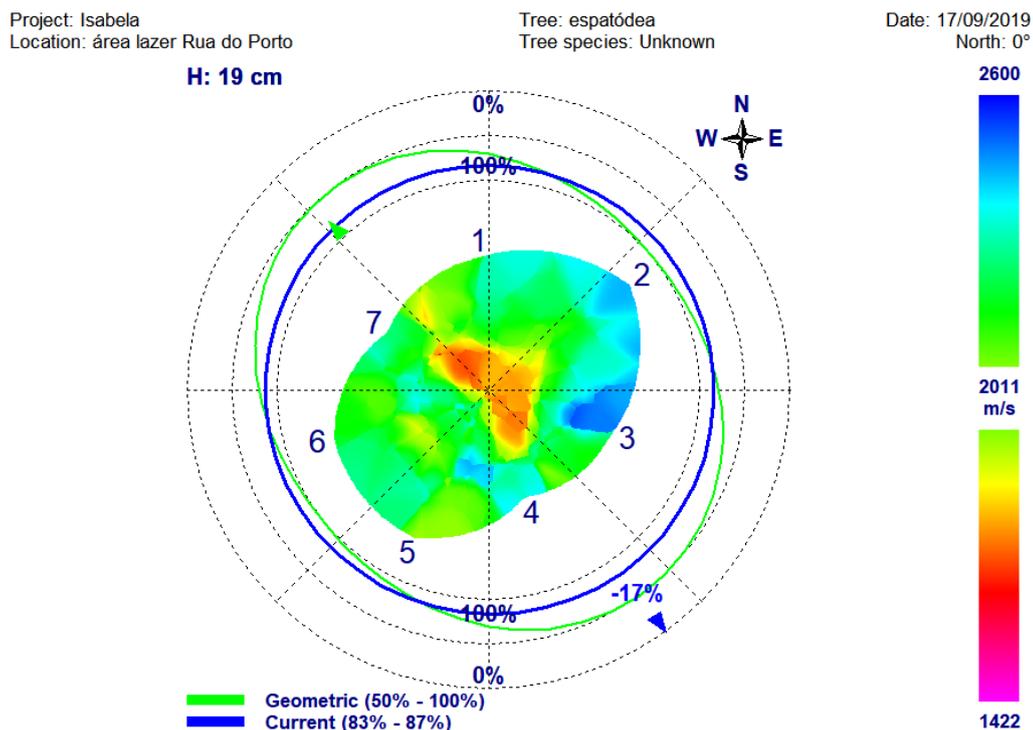


Figura 33. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 46,79 cm, de árvore da espécie espatódea (*Spathodea campanulata*).

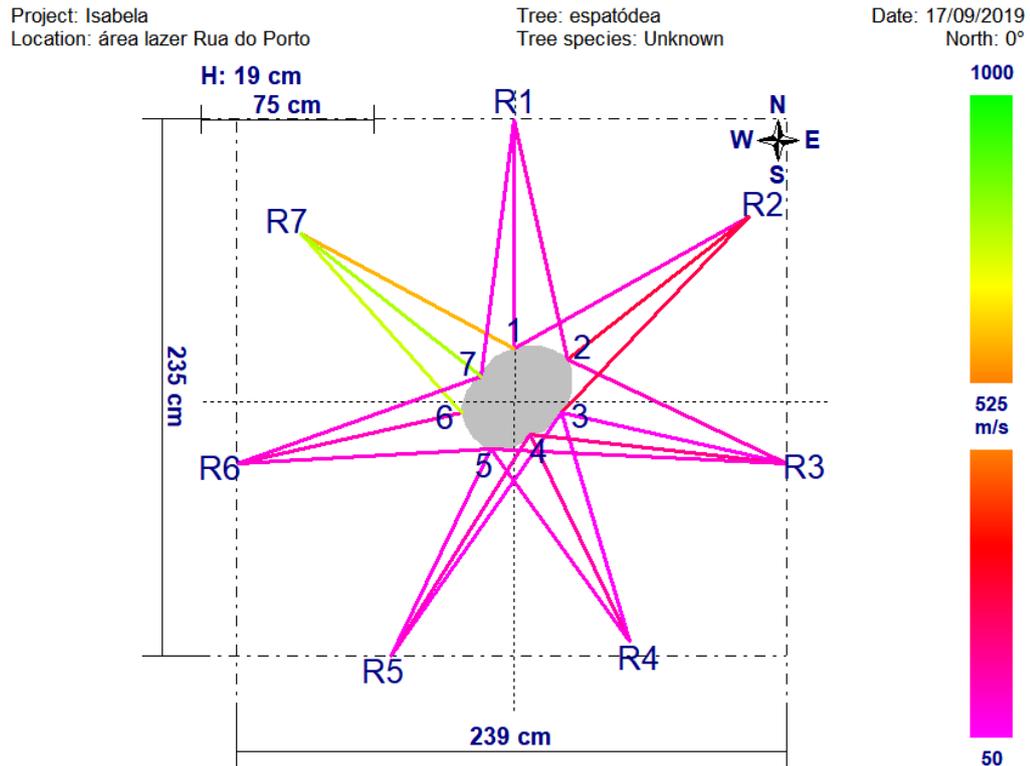


Figura 34. Imagem tomográfica do sistema radicular de árvore da espécie espatódea (*Spathodea campanulata*), obtida com Arboradix.

Na tomografia das raízes, a velocidade média foi de $272,67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e predominaram velocidades entre 50 e $\approx 200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, representadas pelas cores rosa e vermelho (figura 34), amplitude semelhante à encontrada nas tomografias na grama com amostras de madeira, com valores entre 51 e $208 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Apenas as retas que se originam do sensor R7 indicaram velocidades mais altas, acima de $\approx 700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nas cores verde e laranja, ponto onde o Radix foi posicionado sobre a única raiz de ancoragem visível, no lado da árvore onde o solo estava mais baixo devido à inclinação do terreno, facilitando esse afloramento das raízes superficiais de ancoragem (à direita na figura 32-A e à esquerda superior na figura 32-B).

O posicionamento do Radix exatamente sobre a raiz parece favorecer a propagação da onda mecânica em menor tempo, diretamente pela madeira, o que gera velocidades mais altas em relação às velocidades geradas por pontos onde o sensor Radix foi posicionado diretamente sobre o solo, o que implica na necessidade de se observar essas diferenças no momento da interpretação da tomografia de raízes.

4.3.4. Freixo - *Fraxinus excelsior* L.

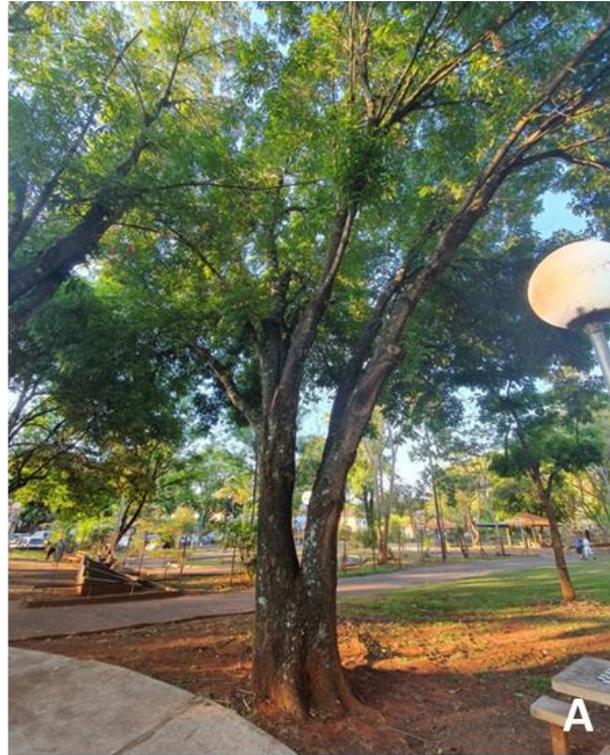


Figura 35. A: Árvore da espécie freixo (*Fraxinus excelsior*), com diâmetro basal de 110,14 cm, localizada na Área de Lazer da Rua do Porto em Piracicaba-SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix. **B:** Freixo (*Fraxinus excelsior*) com sensores do Arbotom posicionados em seu colo e afloramento de algumas de suas raízes de ancoragem.

A tomografia com Arbotom realizada na região de colo do freixo apresentou amplitude de velocidades com velocidades predominantes entre 672 e 2500 m.s⁻¹ (figura 36) e velocidade média de 956,69 m.s⁻¹. Apesar da ocorrência de um alto limite superior de velocidade, a média obtida para esse indivíduo pode ser considerada baixa, quando comparada à velocidade estimada de 1440,56 m.s⁻¹, calculada com base no modelo de regressão, a partir de sua densidade básica de 0,63 g.cm⁻³, resultando em um resíduo negativo de -483,87 m.s⁻¹ (tabela 5), indicativo de que essa árvore gerou uma velocidade média de onda cerca de 30% menor do que a estimada pela sua densidade.

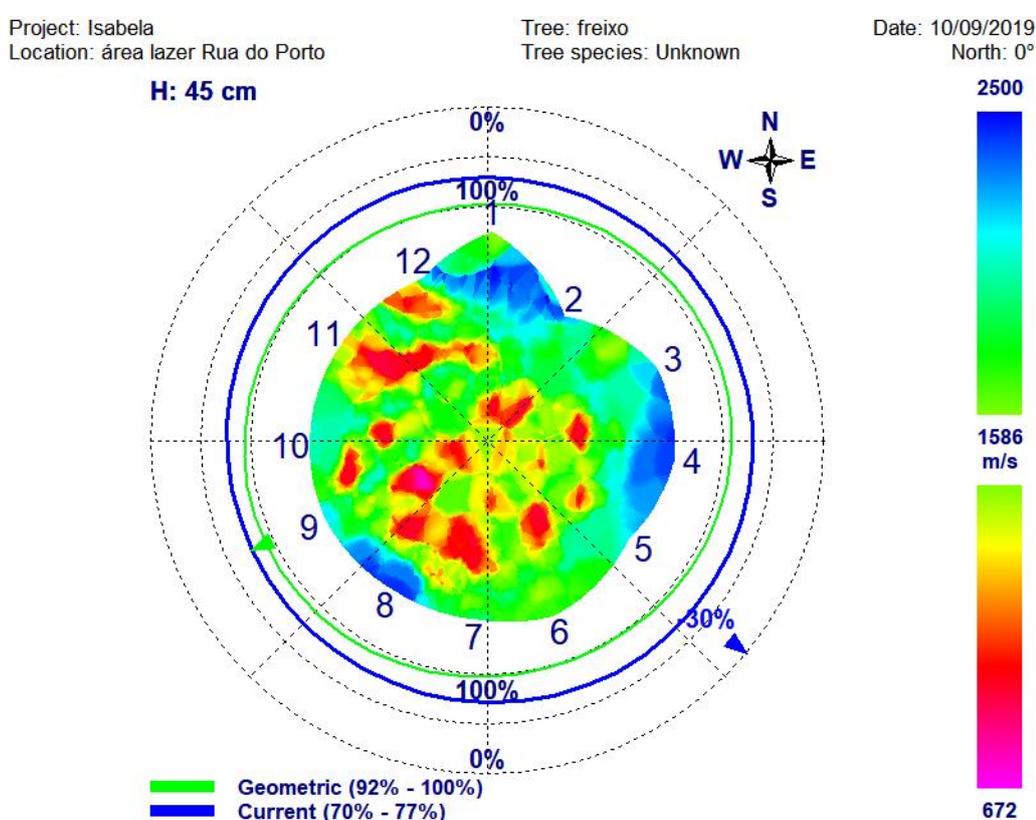


Figura 36. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 110,14 cm, de árvore da espécie freixo (*Fraxinus excelsior*).

Um aspecto que chama a atenção na tomografia desse freixo com Arbotom é a presença de alguns pontos na região central do tronco nas cores laranja, vermelho e rosa (figura 36), indicativas das velocidades mais baixas pela escala de cores, enquanto as cores azul e verde que indicam as velocidades mais altas da escala predominam na região periférica do tronco, mais próximas à casca. Diversos estudos apontaram um incremento de densidade

na direção medula-casca, ou seja, menor densidade na área central do tronco, o cerne, que progressivamente aumenta na direção do alburno (SOCCO et al., 2004; TOMAZELLO et al., 2008; LIN et al., 2011; PEREIRA-ROLLO et al., 2014; ALLISON & WANG, 2015; PALMA et al., 2018). Inclusive, segundo Pereira-Rollo et al. (2014), esse padrão de densidade no sentido cerne-alburno ou medula-casca parece estar ligado à progressão da idade da árvore. Também foi apontado que o tronco, dentro de certos limites, pode até mesmo ser oco (WESSOLY, 1995) e a raiz pivotante pode estar ausente, sem comprometer a estabilidade mecânica da árvore (MORELLI, 2015 apud GASPERINI et al., 2016).

Assim, baseado no elevado diâmetro basal de 110,14 cm deste indivíduo de freixo, é possível que sua idade seja suficientemente avançada para que ele apresente esse padrão de densidades decrescentes no sentido casca-medula, ou seja, esses valores de velocidade mais baixos do centro do tronco não indicam perda de densidade da madeira por deterioração em um grau que comprometeria a resistência da árvore, seria apenas parte de seu processo natural de envelhecimento, que para algumas espécies pode culminar em um tronco totalmente oco, sem comprometer a resistência da árvore (MORELLI, 2017).

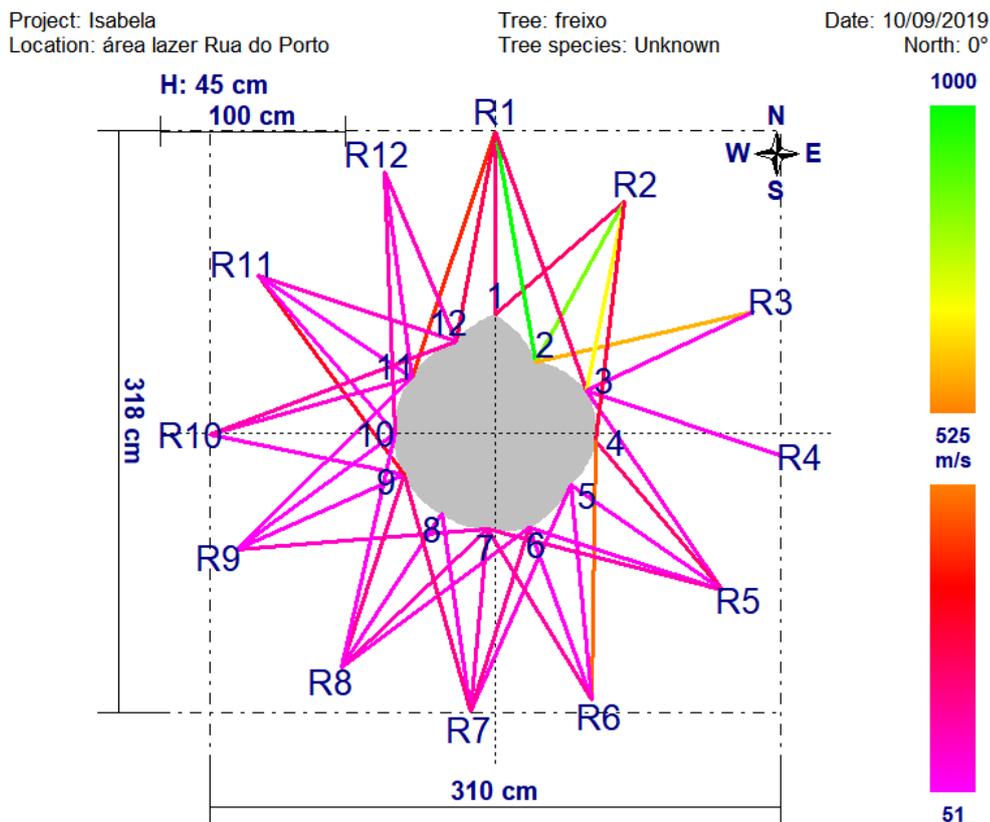


Figura 37. Imagem tomográfica do sistema radicular de árvore da espécie freixo (*Fraxinus excelsior*), obtida com Arboradix.

A tomografia das raízes do freixo com Arboradix resultou em velocidades com valores predominantes entre 51 e $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e velocidade média de $247,90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Foi observada uma predominância de velocidades de onda com os valores inferiores da escala, observadas na cor rosa, exceto por algumas retas com velocidades acima de $800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, em cores verde e amarela e laranja, nos sensores R1, R2 e R3 (figura 37), correspondentes aos pontos entre os sensores Arbotom 1 e 3, onde podem ser vistas raízes de ancoragem na superfície do solo (figura 35-B), sobre as quais o sensor Radix foi posicionado no momento da tomografia.

4.3.5. Freixo - *Fraxinus excelsior* L. e Ipê-Rosa - *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC.



Figura 38. A: Árvores das espécies freixo (*Fraxinus excelsior*) à esquerda, e ipê-rosa (*Tabebuia rosea*) à direita, que cresceram encostadas, com diâmetro basal de 73,85 cm, localizadas na Área de Lazer da Rua do Porto, em Piracicaba-SP. Apenas o freixo forneceu amostras de madeira, enquanto as tomografias de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix foram realizadas em ambas simultaneamente. **B:** Detalhe da bifurcação entre o freixo (*Fraxinus excelsior*) ao norte e o ipê-rosa (*Tabebuia rosea*) ao sul, que cresceram encostados.

Uma das árvores amostradas acabou se revelando como a junção de duas espécies que cresceram completamente encostadas desde a base, dando a impressão de ser uma mesma árvore com troncos codominantes, quando na verdade se tratava de um indivíduo de ipê-rosa (*Tabebuia rosea*) e um de freixo (*Fraxinus excelsior*) (figura 38-A e B). Posteriormente, foi identificado que as amostras de madeira provenientes deste caso eram originárias apenas da poda do freixo, sendo então considerada apenas essa espécie nos ensaios com as amostras de madeira. Na tabela 5, esse indivíduo está identificado como “freixo-ip” para diferenciar do outro indivíduo de mesma espécie, apresentado anteriormente.

Observando a intersecção das duas árvores em detalhe (figura 38-B), juntamente com a tomografia com Arbotom na região do colo (figura 39), feita abaixo da bifurcação, fica evidente a correspondência entre elas, dada a clara separação entre as duas espécies pelas cores e regiões do gráfico, sendo que o freixo gerou velocidades com os valores mais elevados

desta tomografia, entre ≈ 1500 e $3000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; e o ipê-rosa resultando nas velocidades menos elevadas deste caso entre 331 e $\approx 1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, nas cores laranja, vermelho e rosa.

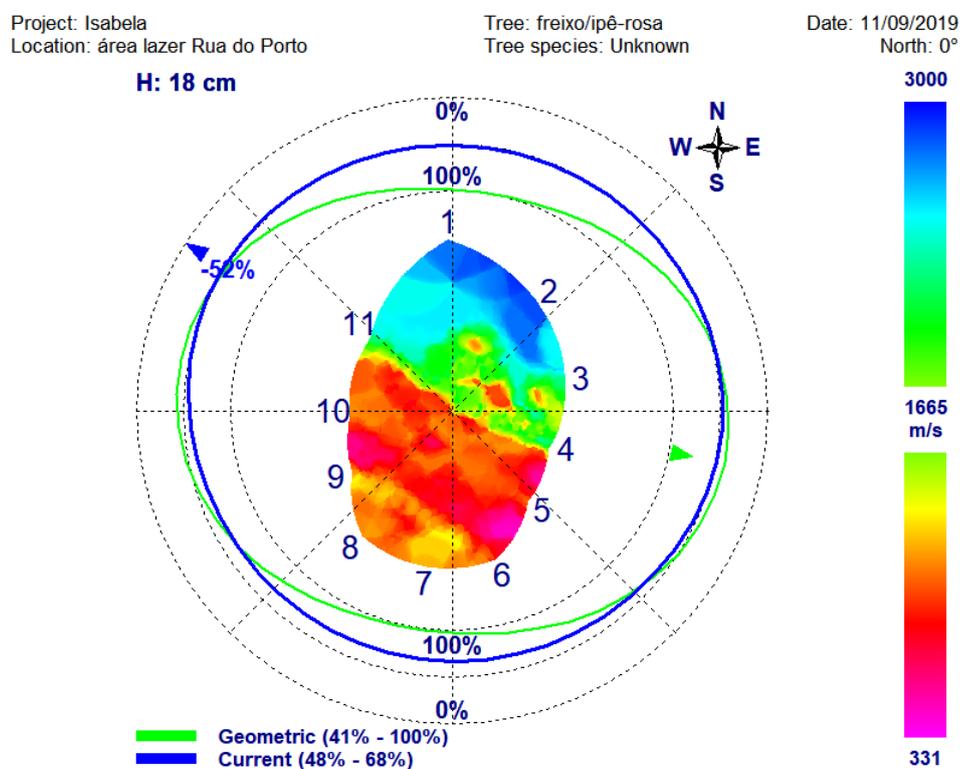


Figura 39. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de $73,85 \text{ cm}$, de árvores das espécies freixo (*Fraxinus excelsior*) e ipê-rosa (*Tabebuia rosea*), que cresceram encostadas.

O resíduo entre a velocidade real e a velocidade estimada para tomografia do ipê-rosa com Arbotom foi de $-494,13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (tabela 5), indicando que a tomografia desse indivíduo resultou em velocidades mais baixas do que o que seria esperado pelo modelo de regressão, em relação à sua densidade de $0,54 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

O resíduo entre as velocidades do freixo resultou em $77,94 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (tabela 5), pela diferença entre a velocidade real obtida com Arbotom e a velocidade estimada pelo modelo, a partir do valor de densidade de $0,63 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, indicando que os valores obtidos com a tomografia para esse freixo foi próxima do esperado, portanto condizente com sua densidade de madeira conhecida. Em comparação com os valores de tomografia do outro indivíduo de freixo amostrado (figura 36), este segundo freixo gerou velocidades mais próximas do esperado pela sua densidade básica e um dos motivos poderia o fato dele se encontrar em estágio mais juvenil que o indivíduo anterior. Isso pode ser concluído com base em seu

diâmetro, que podemos considerar, pela figura 38-A, como sendo quase metade do diâmetro basal total deste caso de “árvore dupla”, que foi de 73,85 cm, ou seja, o freixo isolado teria cerca de 35 cm de diâmetro, um valor condizente com um indivíduo arbóreo jovem para essa espécie.

Mesmo assim, o padrão de velocidades crescentes no sentido medula-casca, citado anteriormente, é identificável ao se observar a imagem tomográfica do freixo isoladamente, com as menores densidades indicadas pela cor vermelha em sua região central (figura 39). No entanto, testes adicionais seriam necessários para confirmar esses padrões observados e suas possíveis causas, incluindo tomografias de cada um dos caules separadamente, já que se tratam de duas árvores de espécies distintas.

A tomografia das raízes com *Arboradix* (figura 40) não apresentou diferenciação entre as duas espécies, gerando uma velocidade média de $140,79 \text{ m.s}^{-1}$ e predominância de valores entre 51 e 375 m.s^{-1} , nas cores rosa e vermelho; exceto por retas do sensor R2 em verde e laranja, chegando a 700 m.s^{-1} , onde havia uma raiz de ancoragem visível, observada no canto esquerdo da figura 40. A medição dessa raiz foi feita com o posicionamento da haste Radix diretamente sobre ela durante a tomografia de raízes, o que pode ter contribuído para esses valores mais altos de velocidade, já que a onda mecânica se propagou diretamente sobre a madeira, um sólido mais denso do que o gramado no entorno.

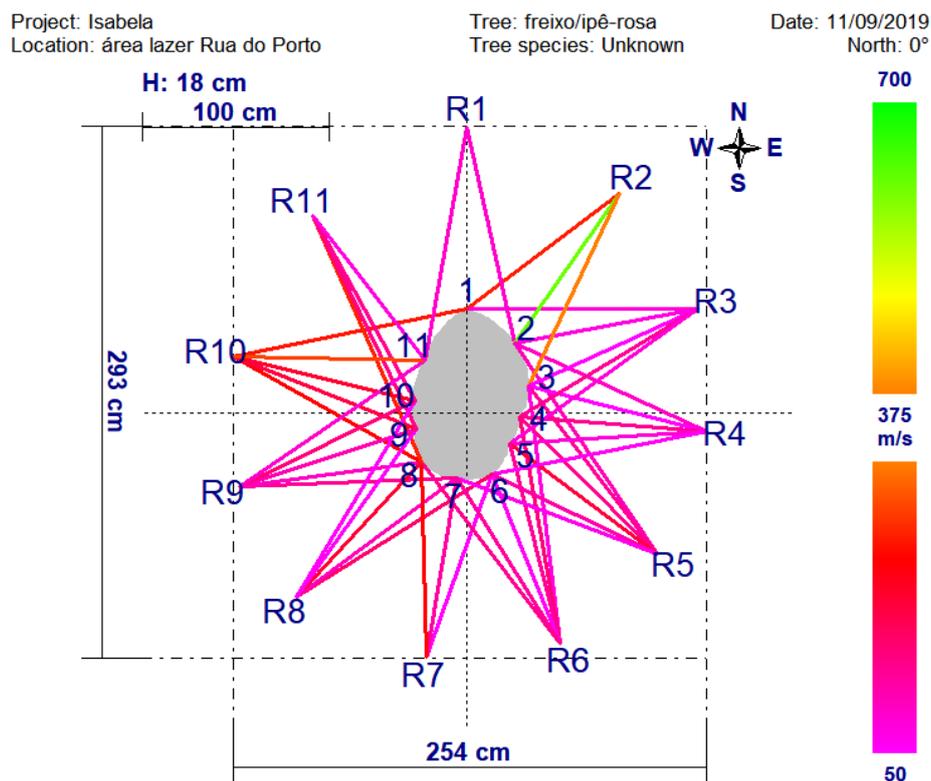


Figura 40. Imagem tomográfica obtida com Arboradix das raízes de árvores que cresceram encostadas, das espécies freixo (*Fraxinus excelsior*), na direção dos sensores R11 a R4; e ipê-rosa (*Tabebuia rosea*), na direção dos sensores de R5 a R10.

4.3.6. Pau-ferro - *Libidibia ferrea* (Mart. ex.Tul.) L. P. Queiroz var. *ferrea*

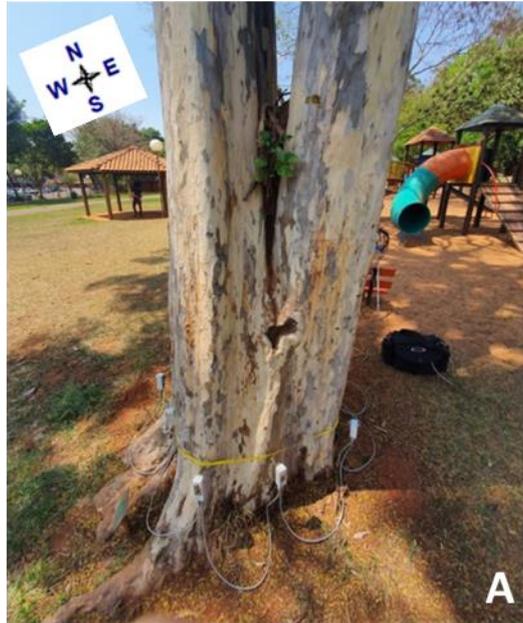


Figura 41. A: Árvore da espécie pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*), com diâmetro basal de 109,82 cm, que apresenta fissura entre troncos codominantes, localizada na Área de Lazer da Rua do Porto em Piracicaba - SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes com Arbotom e Arboradix. **B:** Região do colo de árvore da espécie pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*), com sensores Arbotom e visível diferença na altura do solo entre os lados direito e esquerdo, onde havia a única raiz visível.

O exemplar de pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*) gerou velocidades de onda por Arbotom com amplitude de valores predominantes entre 622 e 2800 m.s⁻¹ e média de 1196,50 m.s⁻¹ (tabela 5). Sua velocidade média estimada de acordo com o modelo de regressão foi de 1568,18 m.s⁻¹ (tabela 5), a partir de sua densidade de 1,19 g.cm⁻³, resultando em um resíduo de -371,68 m.s⁻¹, indicativo de uma velocidade obtida com Arbotom mais baixa do que a estimada para a espécie. Isso pode ser explicado pelo fato de que o pau-ferro foi a única árvore a fornecer amostras que apresentou uma lesão externamente visível no tronco: uma fissura profunda na bifurcação entre os dois troncos codominantes (figura 41-A), onde havia acúmulo de umidade, presença de casca morta, lixo e brotação de outras plantas.

Essa lesão pode explicar a ocorrência das velocidades mais baixas de onda, entre ≈1000 e 622 m.s⁻¹, nas cores vermelha e rosa apontadas pela tomografia com Arbotom na região central interna do tronco (figura 42). As velocidades obtidas nessa região sugerem a presença de uma região de perda de tecido condizente com um oco na madeira.

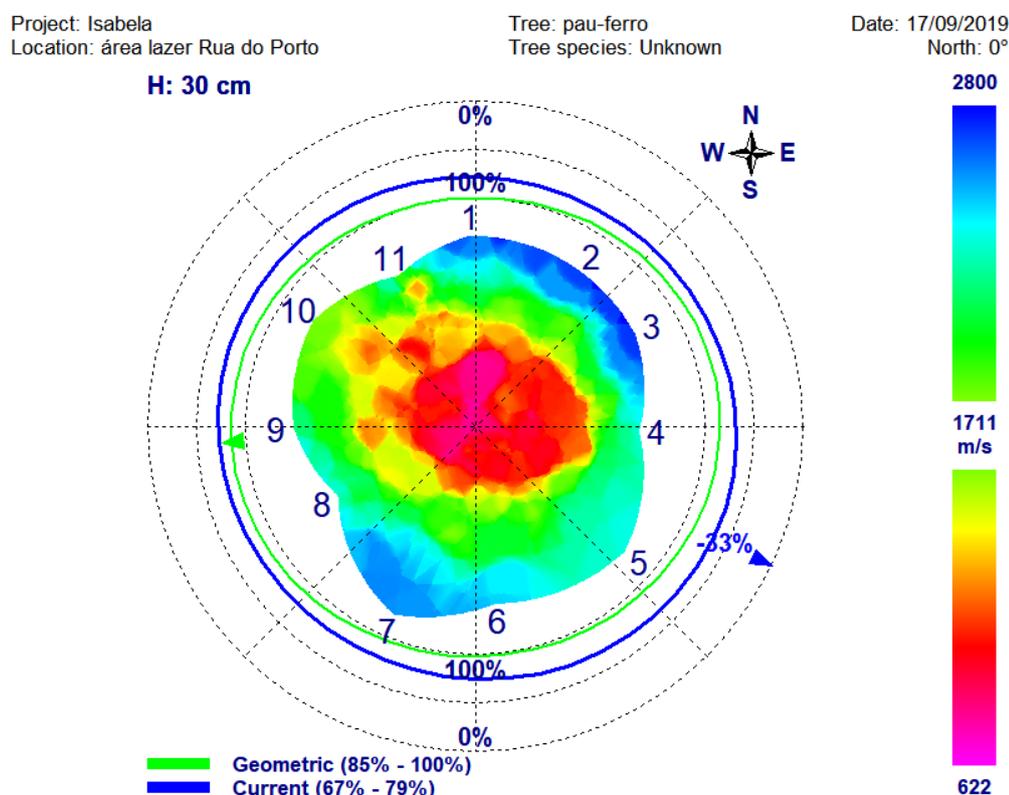


Figura 42. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 109,82 cm, de árvore da espécie pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*).

A média de velocidade de tomografia com Arbotom mais baixa do que a estimada para essa espécie ocorreu também com o primeiro freixo amostrado (figura 36), porém em uma área proporcionalmente menor e descontínua. O caso do freixo poderia ser explicado pelo decréscimo natural de densidade no sentido casca-medula com o incremento da árvore em diâmetro, padrão descrito por diversos pesquisadores (SOCCO et al., 2004; TOMAZELLO et al., 2008; LIN et al., 2011; PEREIRA-ROLLO et al., 2014; PALMA et al., 2018), assim como as duas sibipirunas e o estudo de caso com angico-branco, descritos a seguir.

Porém, no caso do pau-ferro, esse padrão com velocidades mais baixas na região central do tronco indica que existe uma perda de densidade de madeira na região central, não condizente com o processo natural de crescimento da árvore e sim, com a fissura observada entre os troncos codominantes, que caracteriza uma lesão interna descendente, ou seja, que começou na altura da primeira ramificação e se alastrou para baixo, sendo detectada por tomografia com Arbotom na região basal central do tronco.

Considerando que essa lesão interna poderia continuar evoluindo para uma perda de integridade da madeira capaz de comprometer a resistência da árvore, seria recomendável realizar um monitoramento periódico e preventivo nesse indivíduo de pau-ferro, com a realização de tomografias para futuras comparações e estimativa de progressão da lesão.

De acordo com os princípios de Avaliação de Risco de árvores (INTERNATIONAL SOCIETY OF ARBORICULTURE, 2017), essa necessidade de monitoramento existe pela localização desse indivíduo arbóreo, em uma área de lazer com grande circulação de pessoas, e pelo seu grande porte, com potencial para causar extensos danos no caso de uma eventual falha, se a fissura progredir para uma rachadura completa entre os troncos codominantes, ocasionando o tombamento de um ou ambos; ou no caso de queda da árvore inteira, falha na região do colo ou por perda de ancoragem das raízes (pivotamento ou *uprooting*) por progressão dessa lesão preexistente, visto que o sistema radicular se encontra parcialmente soterrado (o que será discutido adiante), podendo favorecer acúmulo de umidade que leva ao processo de podridão das raízes pela ação de organismos xilófagos.

A tomografia com Arboradix das raízes do pau-ferro (figura 43) teve velocidade média de $251,39 \text{ m.s}^{-1}$ (tabela 5) e apresentou predominância de velocidades que poderiam ser consideradas como relativamente baixas para a espécie, entre 74 e $\approx 400 \text{ m.s}^{-1}$ nas cores vermelho e rosa (figura 43). A exceção foram as retas do sensor R9, que apresentaram velocidades maiores, entre ≈ 600 e 800 m.s^{-1} nas cores verde, amarelo e laranja. Isso

provavelmente ocorreu pelo posicionamento do sensor Radix sobre as raízes de ancoragem visíveis na direção dos sensores 7, 8 e 9, vistas no canto esquerdo da figura 41-A, o que pode ocasionar menor tempo de propagação de ondas mecânicas diretamente pela madeira e gerar maiores velocidades, indicando a necessidade de um modelo específico para raízes afloradas.

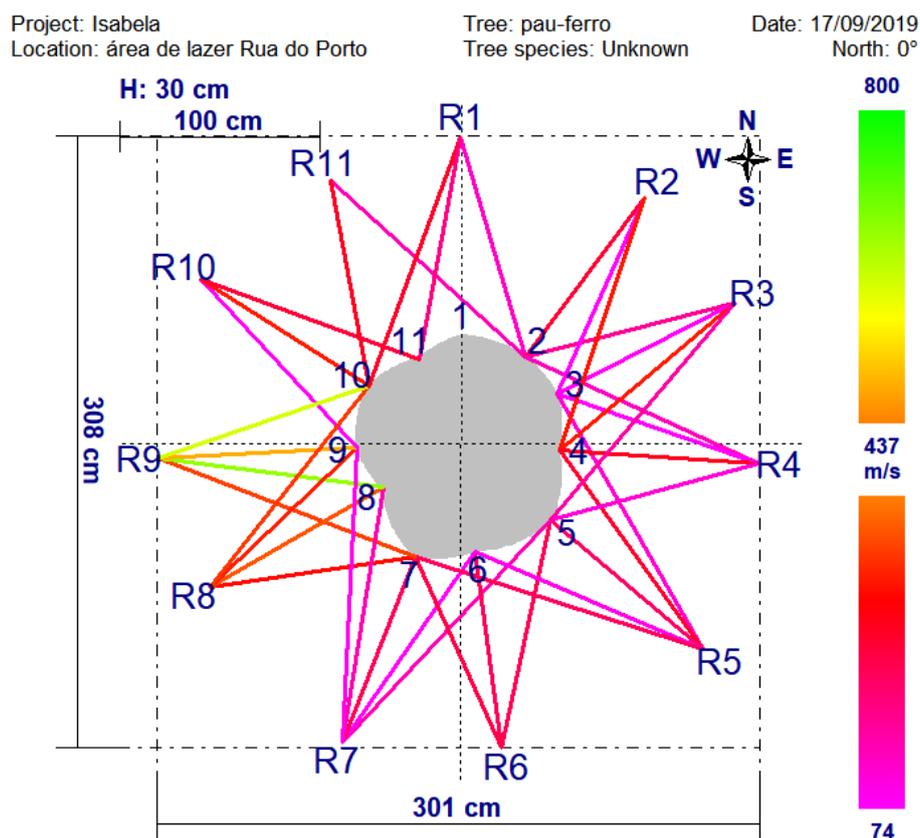


Figura 43. Imagem tomográfica do sistema radicular de árvore da espécie pau-ferro (*Libidibia ferrea* var. *ferrea*), obtida com Arboradix.

Na figura 41-B, é possível observar um claro desnível entre o solo, que está mais alto à esquerda da árvore e mais baixo à sua direita, apesar do local estar em terreno plano. Durante a tomografia de raízes, observamos que a haste do sensor Radix afundou cerca de 30 cm no solo arenoso com o impacto das batidas de martelo, antes que o software Arbotom começasse a indicar a detecção de velocidades de onda correspondentes às raízes.

Esse fato, somado com o solo mais alto nesse local adjacente a um parque infantil, indicam que houve aterramento do terreno na construção do parque. Como a árvore já se encontrava lá, suas raízes ficaram soterradas debaixo desse solo sômico oriundo de aterro e foram detectadas apenas após o afundamento da haste do Radix, quando esta se aproximou

mais delas sob a primeira camada de solo. Na tomografia de raízes, essa área corresponde aos pontos dos sensores R1 a R5, porém sem diferença relevante em relação aos demais sensores que obtiveram velocidades entre 74 e $\approx 400 \text{ m.s}^{-1}$, indicadas pelas retas em laranja, vermelho e rosa.

4.3.7. Sibipiruna - *Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum* (D.C.) E. Gagnon & G. P. Lewis nº1



Figura 44. Árvore nº1 da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), com diâmetro basal de 63,66 cm, localizada no Largo da Santa Cruz em Piracicaba - SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes. Sensores Arbotom estão posicionados no colo da árvore e sensor Arboradix no solo, mostrando afundamento da haste durante a tomografia.

A tomografia com Arbotom da região de colo do primeiro indivíduo de sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*) (figura 44) apresentou grande amplitude de velocidades de onda mecânica, com valores predominantes entre 1700 e 4000 m.s^{-1} , com

velocidade média de $1696,79 \text{ m.s}^{-1}$ e velocidade média estimada pelo modelo de $1528,81 \text{ m.s}^{-1}$, resultando em um resíduo entre essas médias de $167,98 \text{ m.s}^{-1}$ (tabela 5), indicando que a velocidade média obtida com tomografia foi superior à média estimada, com base no modelo de regressão linear, a partir de sua densidade de $0,978 \text{ g.cm}^{-3}$. No entanto, esses valores máximos, de 4000 m.s^{-1} , superaram até mesmo velocidades máximas do pau-ferro, que gerou o valor máximo de 2800 m.s^{-1} . Uma possível explicação para essas velocidades altas em sibipiruna seria a presença de madeira de reação na região indicada pela cor azul escuro, entre os sensores 6 e 1, na figura 45.

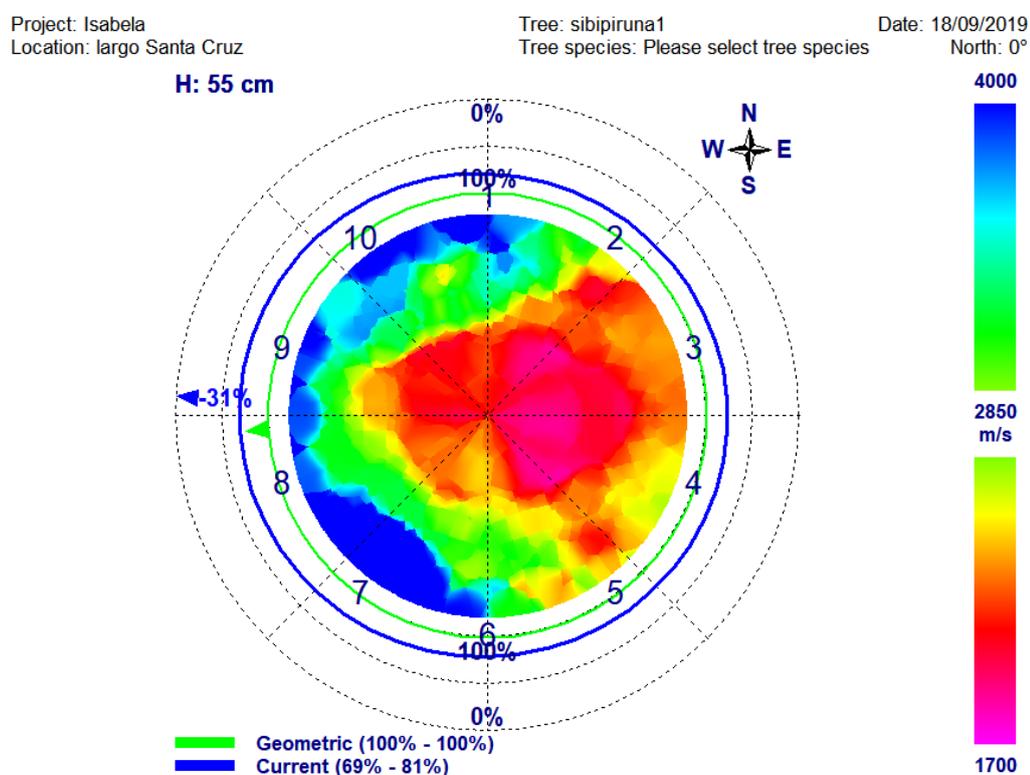


Figura 45. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 63,66 cm, de árvore da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), indivíduo n°1.

As velocidades inferiores da tomografia de colo, entre 1700 e $\approx 2000 \text{ m.s}^{-1}$ representadas pelas cores vermelho e rosa (figura 45), são altas o suficiente para essa espécie no sentido de não indicarem que essa área perdeu densidade de madeira de forma a afetar sua resistência, e sim, de serem condizentes com o padrão de densidade crescente no sentido medula-casca (SOCCO et al., 2004; TOMAZELLO et al., 2008; LIN et al., 2011; PEREIRA-ROLLO

et al., 2014; ALLISON & WANG, 2015; PALMA et al., 2018), como citado anteriormente no caso do primeiro freixo (figura 36).

No caso da tomografia de raízes dessa sibipiruna com Arboradix (figura 46), os valores de velocidade predominantes ficaram entre 51 e 700 m.s⁻¹, com velocidade média calculada de 282,04 m.s⁻¹ (tabela 5) e também foi observada a mesma situação que ocorreu com o pau-ferro: a haste do sensor Radix afundou cerca de 40 cm com as batidas de martelo, antes que o software Arbotom começasse a detectar velocidades de onda, o que indica o soterramento das raízes no canteiro, inclusive com o crescimento de plantas herbáceas nesse solo sobre as raízes (figura 44). As retas com valores entre 51 e ≈150 m.s⁻¹ nas cores vermelho e rosa (figura 46) revelam velocidades mais baixas, cuja possível explicação seria a dissipação dos impulsos mecânicos do Radix pela espessa camada de solo e plantas rasteiras que se encontram sobre o sistema radicular dessa sibipiruna (figura 46).

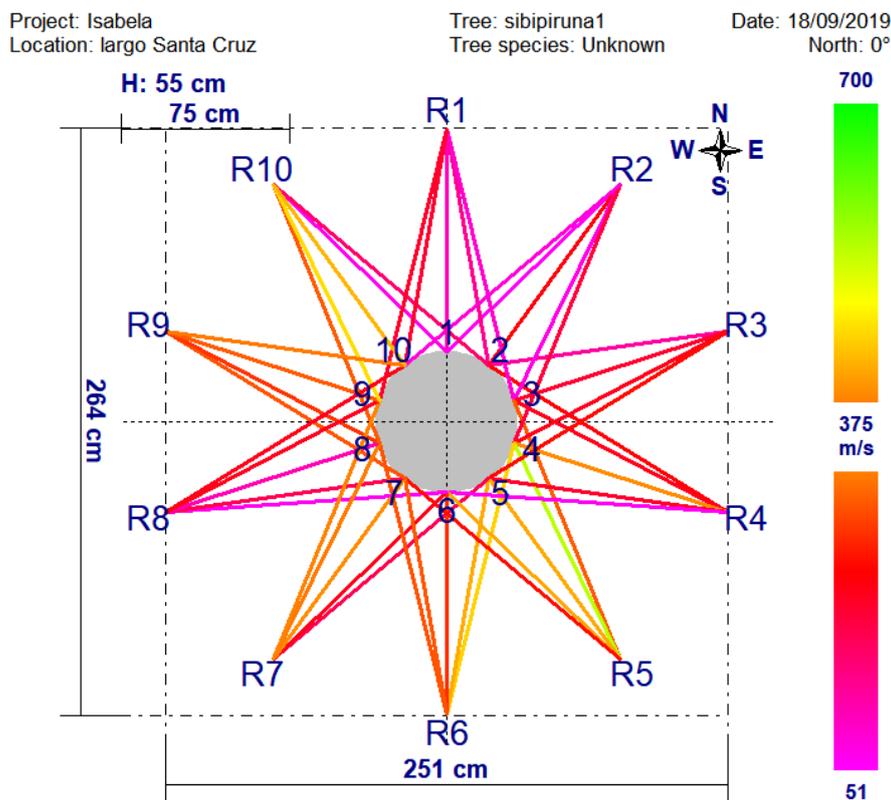


Figura 46. Imagem tomográfica obtida com Arboradix, do sistema radicular de árvore da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), indivíduo n°1.

No entanto, as retas nas cores laranja, amarelo e verde claro indicam velocidades entre 375 e ≈1000 m.s⁻¹ (figura 46), valores mais altos do que normalmente seria esperado em situações de raízes de ancoragem soterradas como, por exemplo, no caso do pau-ferro,

cujas raízes nessa situação geraram velocidades entre 74 e ≈ 400 m.s⁻¹ (figura 43). Uma possibilidade que explicaria essas retas de maior velocidade seria a presença de raízes de ancoragem detectadas abaixo dessa camada de solo e plantas, as quais propagariam as ondas mecânicas emitidas pelo Radix para os sensores no colo da árvore de forma mais direta, aumentando as velocidades resultantes nesses pontos.

4.3.1. Sibipiruna - *Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum* (D.C.) L. P. Queiroz nº2



Figura 47. Árvore nº2 da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), com diâmetro basal de 43,29 cm, localizada no Largo da Santa Cruz em Piracicaba - SP, que forneceu amostras de madeira e recebeu tomografia de tronco e raízes. Sensores Arbotom estão posicionados no colo da árvore e sensor Radix no solo, mostrando afundamento da haste durante a tomografia.

A segunda sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*) (figura 47) encontra-se ao lado da primeira sob condições de entorno semelhantes, sendo que ambas geraram

dados de tomografia com Arbotom e Arboradix com algumas similaridades. As velocidades predominantes obtidas com a tomografia de colo com Arbotom oscilaram entre 1136 e 2500 m.s⁻¹ (figura 48), sendo a velocidade média de 1098,50 m.s⁻¹. Isso resultou em um resíduo entre velocidade média real e estimada de -430, 31 m.s⁻¹, indicando que a tomografia com Arbotom para esta sibipiruna gerou velocidade média abaixo do que seria esperado pelo modelo de regressão, com base em sua densidade básica de 0,978 g.cm⁻³ (tabela 5).

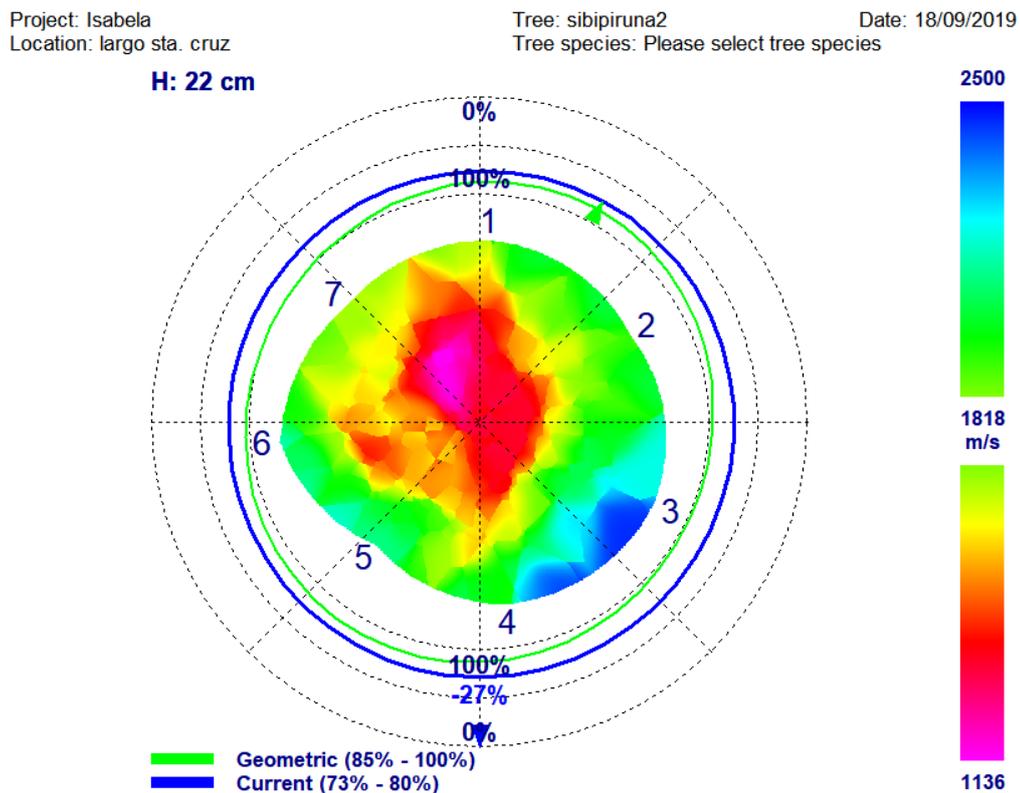


Figura 48. Imagem tomográfica obtida com Arbotom, em região de colo com diâmetro de 43,29 cm, de árvore da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), indivíduo n^o2.

A sibipiruna n^o2 não apresentou velocidades máximas tão elevadas quanto a anterior, porém gerou uma imagem tomográfica semelhante, no sentido de revelar uma área central no interior do tronco com diminuição das velocidades de onda, nas cores vermelho e rosa (figura 48), padrão que pode ser descrito como o incremento de densidade no sentido medula-casca, como observado anteriormente (SOCCO et al., 2004; TOMAZELLO et al., 2008; LIN et al., 2011; PEREIRA-ROLLO et al., 2014; ALLISON & WANG, 2015; PALMA et al., 2018), porém sem comprometer sua resistência mecânica, pois se trata de um padrão natural de crescimento da árvore.

A tomografia de raízes dessa sibipiruna teve velocidade média de $260,93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, com valores de velocidade predominantes entre 50 e $600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e também ocorreu da mesma forma que a árvore anterior e o pau-ferro, com afundamento da haste do Radix em cerca de 30 cm antes de começar a detectar as raízes (figura 47). As velocidades resultantes também foram mais baixas, nas cores vermelho e rosa, condizentes com a situação de soterramento das raízes, exceto por algumas retas na cor laranja claro, entre os sensores R5 e R6 (figura 49). Essas retas com velocidades mais altas, mesmo sob uma camada espessa de solo, podem indicar, assim como na sibipiruna anterior, a detecção de raízes de ancoragem presentes abaixo dessa camada superior de solo.

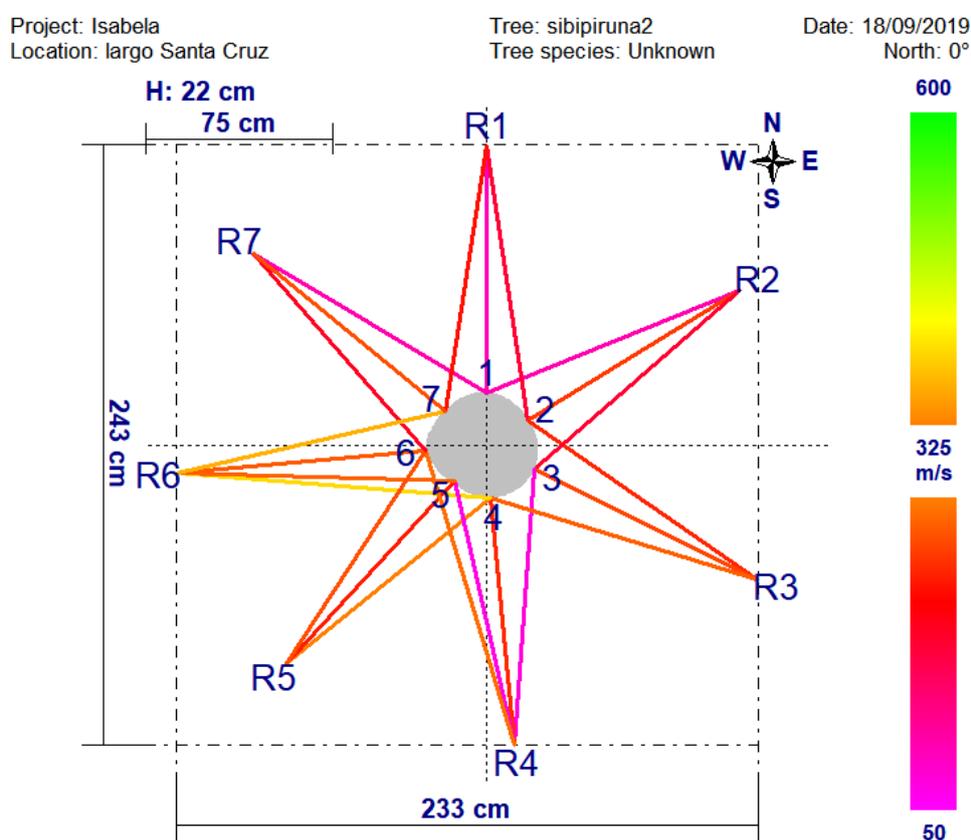


Figura 49. Imagem tomográfica obtida com Arboradix, do sistema radicular de árvore da espécie sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* var. *cabralianum*), indivíduo nº2.

4.4. Resultados obtidos por tomografia das amostras de madeira com Arboradix

4.4.1. Análise estatística das velocidades das amostras de madeira em diferentes ensaios de tomografia com Arboradix

Segundo Allison & Wang (2015), as propriedades da madeira em árvores e troncos variam do cerne para a casca conforme a madeira juvenil se torna madeira madura. Essas propriedades também mudam da base para cima na mesma árvore e diferem entre árvores. Fatores como genética, condições de solo e ambientais afetam as características da madeira tanto em nível microscópico quanto macroscópico. Apenas dessas variações naturais, estudos mostram que uma equação de onda unidimensional (como a que é empregada pelo Arboradix) é adequada para prever o módulo de elasticidade de troncos com alta precisão.

Palma et al. (2018) observaram que variabilidades intrínsecas da madeira foram refletidas na propagação de onda: velocidades radiais foram mais elevadas do que as tangenciais. As velocidades periféricas, obtidas na direção tangencial com ângulo máximo da direção radial, se apresentaram sempre menores, entre 60 e 70% da $V_{m\acute{a}x}$ do disco de madeira.

Áreas de nó da madeira também geraram aumento nas velocidades e foram observadas diferentes velocidades em madeira de reação e madeira oposta. Outra variação significativa na velocidade foi obtida em madeira juvenil, onde as velocidades foram entre 50 e 60% da velocidade máxima do disco. Assim, a presença de grande volume de madeira juvenil no tronco pode ser confundida com áreas deterioradas (PALMA et al., 2018).

O conhecimento dessas variações pode contribuir para melhorar o diagnóstico com tomografia baseada em ultrassom, e evitar a confusão entre reduções naturais de velocidade e reduções por madeira deteriorada (PALMA et al., 2018).

Consequentemente, a separação de troncos de madeira em classes usando tecnologia por métodos acústicos é amplamente adotada e reconhecida na indústria florestal (WALKER e NAKADA, 1999; HARRIS et al., 2003; HUANG et al., 2003; CARTER e LAUSBERG, 2003; WANG et al., 2002, 2004 apud ALLISON e WANG, 2015). Essa tecnologia é baseada na observação de centenas de impulsos acústicos ressonando longitudinalmente em uma amostra de madeira e fornecendo uma velocidade de onda dependente das médias ponderadas das propriedades da madeira e porcentagem de umidade da amostra.

Considerando que o módulo de elasticidade da amostra é igual à densidade vezes a velocidade de onda ao quadrado, a tecnologia está basicamente medindo propriedades das fibras que influenciam propriedades macroscópicas como rigidez, resistência e estabilidade (ALLISON e WANG, 2015). Cavalcanti (2018), não observou diferenças entre as propriedades elásticas da madeira de raízes e de tronco com o método de ultrassom, no entanto, não foi observada uma relação direta entre as propriedades de densidade, resistência e rigidez.

Existem, portanto, diversos estudos com tomografia por ondas mecânicas em amostras de madeira que encontraram alterações nas velocidades obtidas entre diferentes planos da madeira, tecido juvenil, presença de nós, causadas por características intrínsecas da madeira. Assim, é possível esperar que em tomografias com Arboradix também seja possível detectar alterações de velocidade causadas pelas propriedades do material amostrado ou em seu entorno, tanto em casos de tomografia de raízes no solo, como no caso das tomografias de amostras de madeira sob diferentes condições controladas.

Considerando a propagação da onda no caule da árvore, o material predominante é a madeira, mas no caso da avaliação de raízes, devemos considerar também o material no qual elas estão enterradas, no caso o solo, e o material sobre esse solo, como grama ou cimento. Pelo fato de terem contato direto com a madeira avaliada, os materiais de seu entorno devem ser considerados na interpretação das velocidades de onda obtidas, pois podem ocasionar uma possível interferência na propagação dessas ondas. Assim, o maior desafio é a tradução dessas informações em valores significativos e a posterior interpretação desses resultados (DYCK, 2003). O processamento estatístico dos dados de tomografia fornece parâmetros úteis, porém exige um operador experiente no processamento e na interpretação dos dados (SOCCO et al., 2004).

Os dados de velocidade de onda mecânica das amostras de madeira nas cinco situações de tomografia em laboratório (“cadeira”, “cimento”, “grama”, “na grama” e “no cimento”), bem como as velocidades médias obtidas com tomografia de colo com Arbotom e de raízes com Arboradix, para cada uma das árvores que forneceram tais amostras encontram-se na figura 50. Também se encontram os dados de densidade básica calculada para as amostras, densidade obtida em literatura (tabela 5) e diâmetro das amostras. Essa tabela foi usada para os cálculos estatísticos com o software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019) na qual constam todos os dados de campo e laboratório coletados e calculados para as amostras e suas respectivas árvores.

Espécie	Amostra	DB calculada	DB literatura	Veloc. m Arbotom	Veloc. m Arboradix	Velocidade cadeira	Velocidade cimento	Velocidade no cimento	Velocidade grama	Velocidade na_grama	d. amostra (mm)
angico-branco	1	0,559	0,93	1577,26	440,21	3125	2165	794	1883	51	95
angico-branco	2	0,457	0,93	1577,26	440,21	2096	3257	671	2058	104	85
angico-branco	3	0,554	0,93	1577,26	440,21	2571	2463	381	2151	105	101
espatódea	4	0,527	0,37	1366,33	272,67	443	2494	398	2160	97	115
espatódea	5	0,468	0,37	1366,33	272,67	1626	2141	250	2398	67	92
espatódea	6	0,443	0,37	1366,33	272,67	2294	1672	514	3731	126	99
eritrina	7	0,291	0,31	1055,63	309,27	858	1096	346	1332	67	80
eritrina	8	0,318	0,31	1055,63	309,27	828	985	237	1119	64	105
eritrina	9	0,300	0,31	1055,63	309,27	739	1122	313	842	160	77
freixo	10	0,583	0,63	956,69	247,90	1441	3012	479	2841	150	75
freixo	11	0,571	0,63	956,69	247,90	1869	1773	456	2146	144	112
freixo	12	0,602	0,63	956,69	247,90	1252	2817	477	2681	91	74
freixo_ip	13	0,486	0,63	1518,50	140,79	1502	1279	349	987	98	76
freixo_ip	14	0,475	0,63	1518,50	140,79	1721	1543	396	1506	115	94
freixo_ip	15	0,477	0,63	1518,50	140,79	1449	1718	407	1575	89	75
pau-ferro	16	0,808	1,19	1196,50	251,39	1916	2433	393	2331	107	86
pau-ferro	17	0,759	1,19	1196,50	251,39	3155	2985	507	3367	108	67
pau-ferro	18	0,746	1,19	1196,50	251,39	3226	2358	413	1905	83	93
sibipiruna	19	0,718	0,978	1481,95	260,93	903	3067	362	1577	81	68
sibipiruna	20	0,706	0,978	1481,95	260,93	859	2304	446	1773	80	55
sibipiruna	21	0,730	0,978	1481,95	260,93	1144	1245	596	1122	212	64
sibipiruna	22	0,773	0,978	1481,95	260,93	1089	955	596	2045	110	51
sibipiruna	23	0,757	0,978	1481,95	260,93	1025	969	528	1706	173	67
sibipiruna	24	0,756	0,978	1481,95	260,93	1706	3745	394	2198	165	51
sibipiruna	25	0,747	0,978	1481,95	260,93	1736	2577	433	956	182	60
sibipiruna	26	0,740	0,978	1481,95	260,93	2075	1484	628	822	69	56
sibipiruna	27	0,724	0,978	1481,95	260,93	1269	1064	200	1887	129	64
sibipiruna	28	0,734	0,978	1481,95	260,93	1248	2353	470	1795	208	90

Figura 50. Planilha com os dados referentes as 28 amostras de madeira, incluindo velocidades de onda obtidas nas cinco condições em laboratório (cadeira, cimento, grama, na grama e no cimento) e velocidades médias das tomografias de colo com Arbotom e de raízes com Arboradix, realizadas nas oito árvores que forneceram as amostras.

No gráfico da figura 51-A se encontram as velocidades de onda mecânica ($m.s^{-1}$) obtidas com Arboradix para os tratamentos nos quais o impulso mecânico foi realizado diretamente sobre as amostras de madeira, que se encontravam sobre a cadeira (tratamento testemunha), a grama e o cimento.

É possível observar que esses três tratamentos não apresentaram diferença estatística relevante entre si, dado que os valores de velocidades foram semelhantes entre eles, apresentando sobreposição das velocidades obtidas, o que pode ser observado pela distribuição dos valores desses três tratamentos em relação à escala, na figura 51-A. Esse resultado sugere que, gerando o impulso mecânico diretamente sobre a madeira, os valores de velocidade de onda resultantes se mostram mais uniformes, mesmo entre diferentes substratos no entorno da madeira.

As velocidades de onda mecânica ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) obtidas pela tomografia com Arboradix na grama e no cimento, situações nas quais o sensor recebeu impulsos mecânicos diretamente sobre os pavimentos, se apresentaram estatisticamente diferentes, como mostra o gráfico a seguir (figura 51-B), no qual podemos ver que ambos os agrupamentos de valores (*boxplots*) se mostraram distintos, pois não existe sobreposição de valores entre as velocidades obtidas na grama (entre ≈ 50 e $\approx 200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) e as velocidades obtidas no cimento (entre ≈ 200 e $\approx 800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

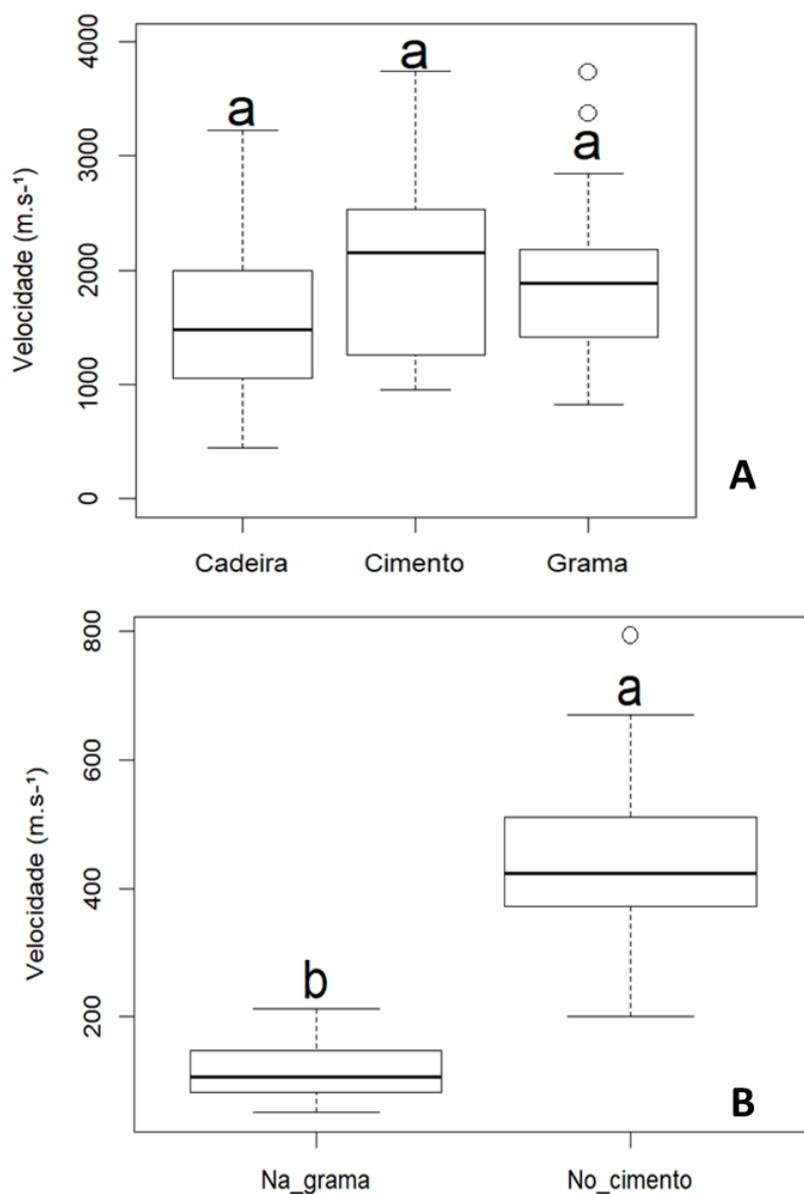


Figura 51. A: Gráfico do tipo “boxplot” com os valores de velocidade das tomografias de amostras de madeira sobre a cadeira e os pavimentos de cimento e grama. **B:** Gráfico do tipo “boxplot” com os valores de velocidade das tomografias de amostras de madeira com o sensor Radix posicionado na grama e no cimento.

É possível notar também que as velocidades de onda obtidas na grama tiveram uma amplitude de valores menor ($\approx 150 \text{ m.s}^{-1}$) do que as velocidades no cimento ($\approx 600 \text{ m.s}^{-1}$), assim como menor variabilidade de valores, o que pode ser visto pelas barras dos *boxplots* no gráfico da figura 51-B.

Uma possível explicação para essas ocorrências seria que o substrato gramado possivelmente dispersa certa quantidade do impulso mecânico realizado sobre si, atuando como um amortecedor do impacto gerado pelas batidas de martelo do equipamento Arboradix. Além disso, a onda provocada pelo martelo se propaga em menor tempo na superfície de cimento, mais denso e uniforme, em relação à superfície com grama, resultando em velocidades predominantemente maiores no cimento e menores na grama (figura 51-B).

Nieri (2013) fez um levantamento sobre diferentes coberturas de solo comuns em ambiente urbano, com informações a respeito de sua taxa de infiltração (%), densidade (g.cm^{-3}) e nutrição (figura 52). Os materiais constituintes dos substratos grama e cimento possuem densidades diferentes, dado que o cimento é predominantemente sólido e denso, portanto mais denso, enquanto a grama constitui uma superfície vegetal rugosa sobre um solo poroso, com espaços preenchidos por material vegetal, e poros com água e ar. Assim, a evidente diferença entre a densidade do solo sob esses pavimentos poderia ser um dos fatores responsáveis pelas interferências da grama e do cimento em diferentes graus sobre as velocidades de onda obtidas com Arboradix, observadas na figura 50, considerando que essas tomografias foram realizadas com as mesmas amostras para ambas as coberturas de solo, o que uniformiza os fatores intrínsecos da madeira que poderiam influenciar as velocidades.

Pavimentos	Infiltração (%)	Compactação (g cm^{-3})	Nutrição
Grama	98% (3)	1,3 (3)	Maior concentração de Nitrogênio e Fósforo (3);
Pedra	55% (4)	1,4 (4)	Maior concentração de Ferro (4);
Solo descoberto	35% (2)	1,6 (2)	Concentração de Ferro e Potássio (2);
Calçada (cimento)	29% (1)	1,8 (1)	Maior concentração de Cálcio (1);

Quadro 1 - Características dos pavimentos com informação baseadas na literatura

Fonte: 1) CRAUL (1992, p. 123); 2) KER (1995, p. 20); 3) MAUS et al., (2007, p. 7); 4) SANTOS et al. (2007, p. 5)

Figura 52. Tabela com informações a respeito do solo sob tipos de coberturas comuns em ambiente urbano (NIERI, 2013).

Pereira (2017) investigou árvores de diferentes espécies com Arboradix, sob condições diversas de área livre e cobertura do pavimento no entorno das árvores comuns em cidades, e não encontrou correlações significativas entre presença de raízes detectadas por tomografia com Arboradix e de área livre com diferentes coberturas ou pavimentos, ou seja, não foi possível afirmar que esses fatores de entorno influenciam diretamente no crescimento das raízes de árvores nas cidades. Assim, diferenças em velocidades de onda com Arboradix em substratos distintos não seriam necessariamente causadas pelo crescimento diferenciado das raízes em cada condição, mas talvez pudessem ser explicadas pela diferença entre os materiais desses pavimentos.

Em aplicações práticas de tomografia do sistema radicular, as situações dos gráficos 51-A e 51-B podem indicar que, quando existem raízes visíveis dentro do raio de 1 m da árvore, o posicionamento do sensor Radix diretamente sobre elas pode gerar velocidades de onda mais relacionadas às características da madeira da árvore e com menor influência do pavimento adjacente a essas raízes (figura 51-A). Já em casos de raízes não visíveis na superfície do solo, o sensor é posicionado diretamente sobre o pavimento adjacente ao sistema radicular, onde se espera que esteja próximo às raízes, e as velocidades de onda resultantes podem apresentar alterações relacionadas ao material constituinte desse pavimento (figura 51-B).

4.4.2. Relação entre velocidades por tomografia com Arboradix e densidade básica das amostras de madeira

Entre as três situações de tomografia das amostras com Arboradix, nas quais o impulso mecânico foi realizado diretamente sobre as amostras de madeira, sobre cadeira (tratamento testemunha), grama e cimento, a situação sobre a cadeira foi a única que gerou velocidades com correlação positiva entre a densidade básica calculada para cada amostra, com $R^2=0,21$, no entanto, essa correlação é considerada não significativa, devido ao valor de R^2 ter ficado abaixo de 0,5 (figura 53).

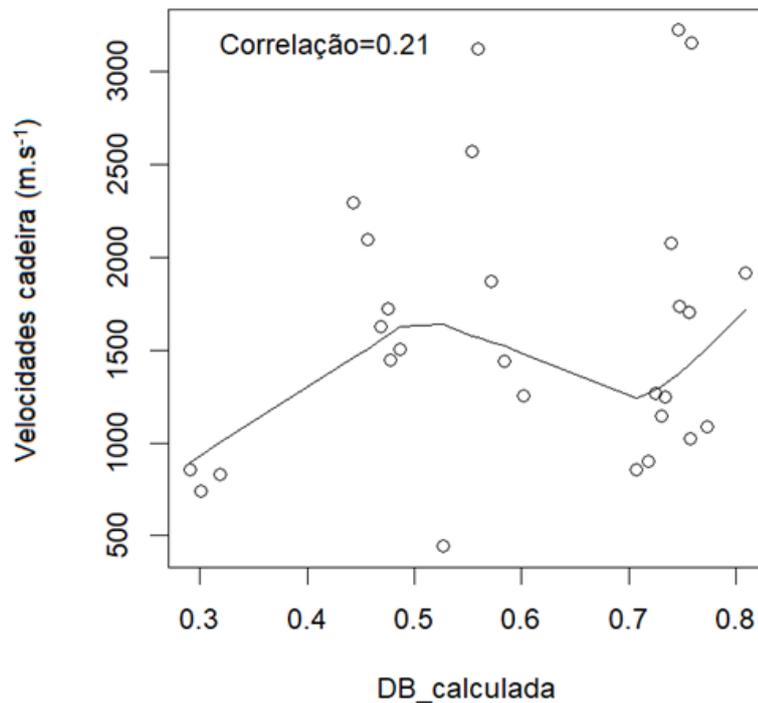


Figura 53. Gráfico de dispersão que ilustra a correlação entre os valores de velocidade das tomografias de amostras de madeira sobre a cadeira *versus* a densidade básica calculada para essas amostras. A linha apresentada na figura é a tendência.

O tratamento de tomografia com Arboradix sobre a cadeira foi realizado com o intuito de servir como tratamento testemunha, como explicado no item 3.6.1., visando isolar melhor as amostras da possível influência dos pavimentos sobre os quais as amostras estariam quando simulada uma situação de tomografia de raízes em campo. O resultado obtido pode ser indicativo de que as velocidades geradas nesse tratamento realmente se relacionaram mais com a densidade intrínseca das amostras, recebendo menor interferência dos materiais do entorno, no caso a grama e o cimento.

No entanto, devido à correlação baixa e não significativa, seria necessário realizar novos ensaios tomográficos, com o tratamento testemunha aprimorado, isolando o máximo possível as amostras de madeira dos substratos, buscando evitar interferências externas às velocidades de onda obtidas. Isso serviria para averiguar se as ondas mecânicas obtidas com Arboradix se assemelham às obtidas com Arbotom, quando propagadas apenas através da madeira, visando a possibilidade de geração de um modelo para valores esperados, semelhante ao gerado pela regressão entre velocidades com Arbotom e densidades por espécie.

Existem vários aspectos que podem explicar a diferença entre o resultado dessa correlação entre velocidade e densidade das amostras e a correlação demonstrada no item 4.1. (figura 18). Lin et al. (2001) verificou que a tomografia acústica provou ser a técnica mais efetiva para a detecção de podridão interna e localização de defeitos, além estimativa de seu tamanho, posição, formato e demais características, enquanto testes de transmissão de onda unidimensional (1-D) ainda fornecem informação limitada a respeito de defeitos em árvores, como é o caso da tomografia com Arboradix, tanto na avaliação de raízes, quanto nos ensaios em laboratório do presente estudo. No entanto, mesmo a tomografia é uma técnica que deve ser verificada quanto à sua correspondência no corte transversal da madeira, para melhor entendimento das relações entre seus resultados e os defeitos avaliados (LIN et al., 2011).

A tomografia de árvores com Arbotom, na qual os sensores são posicionados ao redor de seu colo ou tronco, mede a propagação de ondas mecânicas transversais, nos planos radial e tangencial da madeira, entre vários sensores posicionados ao redor do tronco, gerando um gráfico de área bidimensional desse plano tangencial (figura 48). Na tomografia de raízes com o Arboradix, é realizada a medição da velocidade de onda no plano longitudinal da madeira, com apenas o sensor Radix funcionando como emissor de ondas mecânicas, após receber os impulsos na forma de batidas de martelo. Os demais sensores, neste caso, funcionam apenas como receptores posicionados no colo da árvore. Assim, a tomografia com Arboradix resulta em um gráfico formado pelo conjunto de várias retas, ou medições unidimensionais (figura 49), geralmente apresentando uma imagem tomográfica semelhante a uma estrela, na qual cada ponta é uma medição com o Radix.

O estudo de Socco et al. (2004) apontou diferenças entre as velocidades radial e tangencial (detectadas na tomografia com Arbotom), devido à anisotropia da madeira, que pode gerar certo “sombreamento” de interferência nas imagens tomográficas. No entanto, essa interferência não parece influenciar a detecção de degradação interna nesses planos transversais. Tanto as velocidades anormalmente baixas, devido à podridão ou oco, quanto as anormalmente altas, como na presença de nós na madeira, foram detectadas com boa precisão, apesar da anisotropia (SOCCO et al., 2004).

No plano longitudinal (amostrado em tomografias com Arboradix) Socco et al. (2004) observaram que, as propriedades da madeira são afetadas por uma anisotropia mais marcante, o que ocasiona menor capacidade de diagnóstico de degradação da madeira pela velocidade longitudinal, em comparação com as velocidades geradas nos planos radial e

tangencial. Eles também observaram que a velocidade longitudinal e o módulo de elasticidade não discriminaram entre madeira saudável e degradada, enquanto as velocidades tangencial e radial em ambas essas situações se mostraram significativamente diferentes (SOCCO et al., 2004).

Segundo Pereira-Rollo et al. (2014), devido à natureza anisotrópica da madeira, as ondas mecânicas se propagam na direção de cada plano estrutural com velocidades diferentes. De fato, a tomografia com Arbotom em colo de árvores é feita no plano transversal da madeira, onde basicamente são os atributos anatômicos radiais e tangenciais que irão afetar a propagação de ondas. Assim, pode ser mais recomendável que estudos de densidade de madeira sejam feitos no plano transversal, pois muitas características anatômicas no plano longitudinal afetam mais outros atributos, como o módulo de elasticidade, do que a densidade (PEREIRA-ROLLO et al., 2014).

Considerando essas diferenças anatômicas entre os planos de corte da madeira, é possível que alguns aspectos das tomografias com Arbotom e Arboradix sejam baseados em propriedades físicas e mecânicas diferentes. Além disso, existem as distinções anatômicas entre os diferentes tecidos do caule, avaliados com Arbotom, e dos avaliados com Arboradix, que seriam as raízes e as amostras de madeira, sendo que estas no presente estudo são provenientes de galhos, ou seja, tecidos também distintos das raízes.

Outro aspecto a ser considerado é o fato de que a densidade condicionada da madeira é determinada pela quantidade de matéria na parede celular, água e ar presentes em um dado volume de madeira, portanto, no plano transversal, ela depende da espessura da parede celular e diâmetro do lúmen dos vasos condutores e fibras ao longo do anel de crescimento, juntamente com largura, comprimento e frequência dos raios, diferentemente do plano longitudinal (PEREIRA-ROLLO et al., 2014).

A baixa correlação entre velocidades e densidade das amostras também pode ser explicada pela pouca disponibilidade de amostras (baixo n amostral por espécie), resultando em baixa uniformidade, o que é difícil de correlacionar com uma densidade calculada com alta precisão e baixa variabilidade interespecífica. Wang et al. (2003) realizaram a avaliação de árvores comerciais de pequeno diâmetro de duas espécies por meio de ondas mecânicas, para identificar a qualidade estrutural de árvores jovens e o potencial valor agregado de produtos florestais. A análise estatística desse estudo resultou em boas correlações entre onda e o módulo de elasticidade da madeira, quando as duas espécies foram combinadas. No entanto,

a significância estatística foi reduzida com a separação das espécies, devido ao pequeno número amostral e a baixa amplitude de propriedades de madeira entre as duas espécies (WANG et al., 2003).

Pereira-Rollo et al. (2014) também indicou em seu estudo que o agrupamento de todos os seus dados foi suficiente para reduzir a influência de resíduos dos modelos de cada espécie, que tornaram tornam o coeficiente de determinação mais baixo (R^2 de 0,5), e aumentar a correlação (R^2 de 0,85), pois o intervalo de valores se tornou mais amplo (PEREIRA-ROLLO et al., 2014). Assim, espera-se que a obtenção de mais dados, adicionando novas espécies arbóreas e novos tratamentos, ou situações de pavimento amostradas, amplie o intervalo de valores de velocidades de onda para aumentar a correlação com a densidade das amostras ou outro parâmetro da madeira.

Posteriormente, Wang et al. (2007) empregaram novamente o método de onda mecânica na avaliação de árvores vivas e amostras de madeira verde obtidas de árvores caídas. Apesar das correlações positivas obtidas entre propagação das ondas e resistência e densidade de madeira, houve significativa variabilidade nos testes estáticos com as amostras, devido ao seu tamanho reduzido e ao método de corte delas, dificultando correlações preditivas. Em estudos futuros, Wang et al., (2007) sugerem o uso de amostras de tamanhos maiores. Ainda assim, os resultados de ambos os estudos ilustram o potencial da técnica de ondas mecânicas para avaliação da qualidade estrutural de madeira mesmo com menores diâmetros, sejam árvores ou amostras (WANG et al., 2003; WANG et al. 2007).

No entanto, mesmo amostras de madeira de árvores da mesma idade e do mesmo povoamento podem se mostrar diferentes entre si, quando avaliadas por métodos de onda mecânica longitudinal (ALLISON e WANG, 2015). Dyck (2003) avaliou dois talhões de pinheiro comercial, por meio de teste de velocidade acústica de toras de madeira, um método de mensuração de resistência e outras características intrínsecas da madeira. Mesmo para amostras semelhantes, a distribuição de valores de velocidade de onda teve ampla variabilidade. Segundo Dyck (2003), “todas as toras de madeira (*logs*) são diferentes entre si, mesmo que sejam de árvores clonais ou até mesmo provenientes da mesma árvore”. Dessa forma, é possível que a baixa correlação entre tomografia e densidade das amostras de madeira seja explicada pela alta variabilidade intrínseca da madeira. Esperamos que essa correlação possa ser melhorada com aumento do número amostral, para diluir essa alta variabilidade, além do aprimoramento das condições de tomografias em laboratório e campo.

Quando analisados em conjunto, os resultados dispostos nos gráficos 51-A, 51-B e 53 podem indicar a uma possível interferência do material de entorno sobre a velocidade de onda obtida nas amostras de madeira. Considerando que no presente estudo as amostras de madeira foram empregadas de forma a representarem raízes durante a tomografia com Arboradix, então podemos constatar a possibilidade de que os materiais que constituem o pavimento no entorno do sistema radicular de árvores nas cidades causem certa influência nos valores de tomografia dessas raízes.

4.5. Estudos de caso: estatística e interpretação de tomografias de árvores com Arbotom e Arboradix

A partir dos resultados obtidos com a tomografia das amostras, foram realizados os mesmos processamentos estatísticos com tomografias com Arbotom e Arboradix realizadas pelo Prof. Dr. Demóstenes Ferreira da Silva Filho, analisadas na forma de estudos de caso. Tais tomografias foram selecionadas a partir de condições de entorno do sistema radicular semelhantes às amostradas anteriormente, com a presença de ambos os pavimentos de cimento e de grama na mesma árvore. Dessa forma, foi possível isolar as variáveis biométricas das árvores e analisar os dados tomográficos para cada pavimento separadamente. Os dados das tomografias de raízes com Arboradix realizadas nesses casos foram selecionados e processados de acordo com a metodologia sugerida por Mendes & Silva Filho (2019), da mesma forma que as demais tomografias de árvores, como explicado no item 3.4 de Material e Métodos.

4.5.1. Tomografias de alecrim-de-Campinas - *Holocalyx balansae* Micheli. com Arbotom e Arboradix

O primeiro estudo de caso foi de um indivíduo da espécie alecrim-de-Campinas que precisou ser suprimido no campus da ESALQ, do qual restou apenas a base do tronco e o sistema radicular. A árvore encontrava-se em um canteiro de grama, na borda de uma calçada de cimento (figura 54-B). Assim, parte de suas raízes estavam sob a grama e parte sob o cimento.

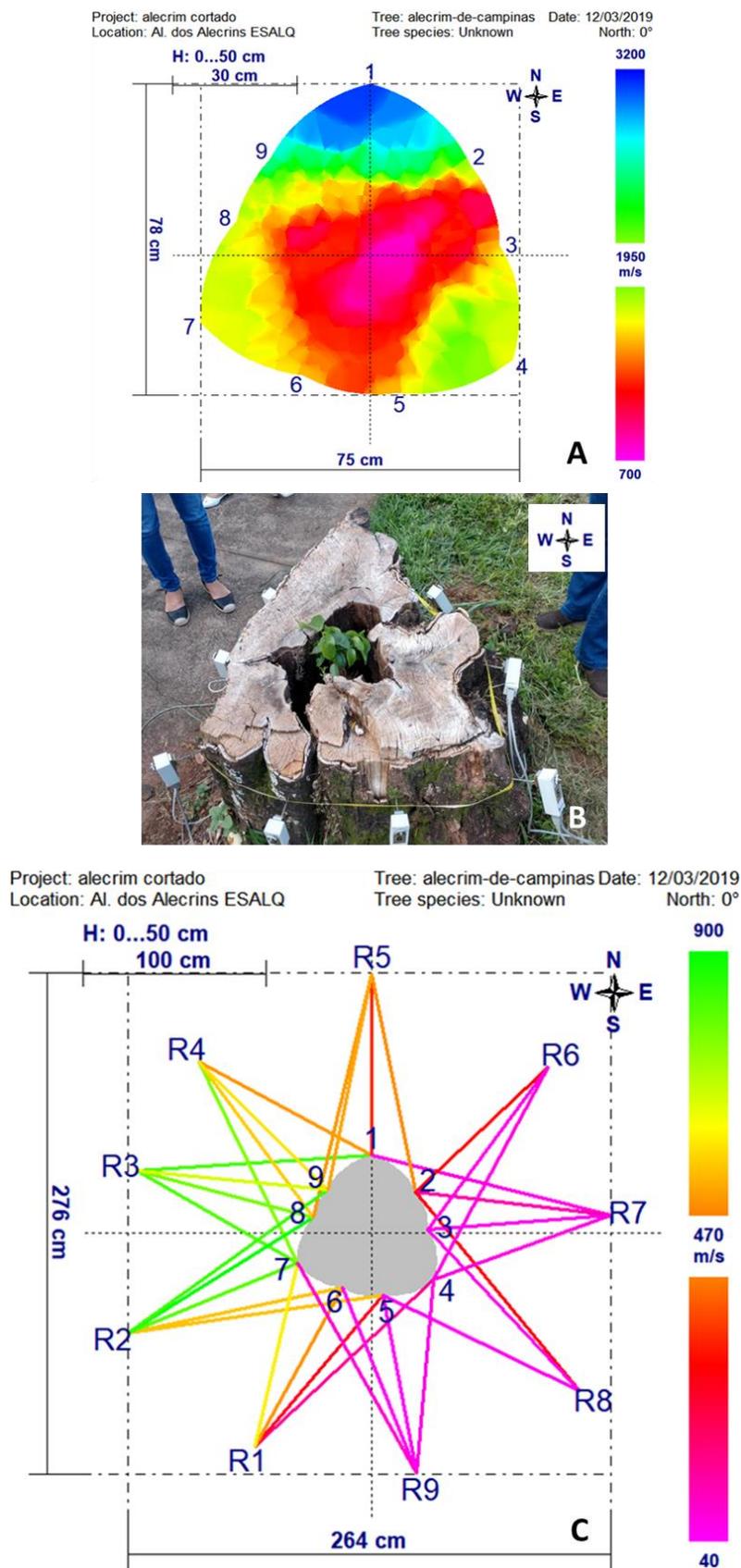


Figura 54. A: Tomografia com Arbotom, da região do colo de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, localizado próximo ao Restaurante Universitário da ESALQ/USP. **B:** Alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, com sensores do Arbotom posicionados, localizado próximo ao Restaurante

Universitário da ESALQ/USP. Foto: Demóstenes Ferreira da Silva Filho. **C:** Tomografia com Arboradix, de raízes de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, realizada a 1 m de distância da base do tronco.

A tomografia com Arbotom foi realizada na região do colo do tronco remanescente após remoção da árvore, como mostrado pelo posicionamento dos sensores na figura 55-B. A velocidade média obtida para essa tomografia foi de 958, 21 m.s⁻¹, sendo que os valores predominantes de velocidade variaram entre 700 e 3200 m.s⁻¹ (figura 54-A). A média obtida para nessa tomografia atingiu um valor menor do que a média de velocidade estimada pelo no modelo de regressão, que seria de 1458,81 m.s⁻¹, baseada na densidade de 0,69 g.cm⁻³ da espécie. Essa diferença pode ser explicada pela presença de uma extensa área de oco no interior do tronco, visível na figura 66, cuja detecção pelo Arbotom pode ser confirmada pela imagem tomográfica (figura 54-A), na qual observamos uma região com velocidades entre 700 e ≈1300 m.s⁻¹, nas cores rosa e vermelha.

A velocidade de onda correspondente à região do oco possui um valor maior do que o valor conhecido de propagação de onda no ar, que é de 343 m.s⁻¹. A subestimação do decréscimo da velocidade em zonas degradadas da madeira é conhecida como “Efeito Wielandt”, como explicada anteriormente, e ocorre pelo fato que as ondas mecânicas tendem a desviar das regiões degradadas, portanto a velocidade resultante não corresponde exatamente ao grau de degradação dessas áreas mais lentas (IVANSSON, 1986; WIELAND, 1987 apud SOCCO et al., 2004).

Quando nos deparamos com uma imagem tomográfica por Arbotom como essa, ou como as das figuras 21 e 42, em uma árvore viva, identificamos a perda de densidade em seu interior, mas o valor não reflete necessariamente uma área totalmente oca, com ausência de tecido, a confirmação disso só ocorre com a eventual remoção da árvore e visualização, portanto, é importante que os usuários do Arbotom saibam interpretar casos como este. Segundo Socco et al. (2004), zonas de oco interno de tronco são facilmente detectadas por tomografia, mas sua velocidade frequentemente é o dobro da velocidade real de propagação de onda mecânica no ar (343 m.s⁻¹) e, portanto, essa questão deve sempre ser considerada durante a interpretação dos resultados de tomografia.

Na figura 54-C, temos o gráfico da tomografia de raízes realizada com Arboradix no alecrim-de-Campinas, com o sensor Radix posicionado a uma distância de um metro a partir da base do tronco, como pode ser visto pelo comprimento das retas do gráfico (figura 54-C).

A média de velocidade calculada resultou em $432,53 \text{ m.s}^{-1}$, com valores predominantes variando entre 40 e 900 m.s^{-1} .

Pelo posicionamento da rosa-dos-ventos nas figuras 54-B e 54-C, podemos notar correspondência entre a tomografia com o sensor Radix sobre a grama, que gerou as retas de cores rosa e vermelha entre os sensores R6 e R9, com velocidades entre 40 e $\approx 400 \text{ m.s}^{-1}$, e a grama visível na figura 54-B. Também existe uma correspondência da tomografia com o sensor Radix sobre o cimento, que gerou as retas com as cores verde e amarela predominando entre os pontos R1 e R5, com velocidades entre 40 e $\approx 400 \text{ m.s}^{-1}$, e o cimento visível na figura 54-B.

Seguindo a diferença de cores nas retas geradas na figura 54-C, podemos notar uma distinção entre as velocidades geradas com o Radix sobre a grama e as geradas sobre o cimento, considerando a correspondência entre cores e velocidades na escala. Essa possível distinção de valores é semelhante à demonstrada no gráfico da figura 51-B. Assim, esses dados foram selecionados e processados da mesma forma que as tomografias das amostras de madeira, gerando o resultado apresentado no gráfico da figura 56-A, no qual as velocidades obtidas no cimento e na grama demonstraram diferença estatística. Esse resultado é semelhante ao obtido a partir das tomografias com as amostras realizadas diretamente nos pavimentos, como visto no gráfico da figura 51-B, no qual as velocidades para cimento e grama também foram estatisticamente diferentes entre si.

O segundo estudo de caso foi realizado a partir de uma tomografia do mesmo indivíduo de alecrim-de-Campinas cortado, citado anteriormente (figura 55-B), cuja tomografia com Arbotom encontra-se na figura 55-A. A tomografia com Arbotom foi realizada na região do colo do tronco remanescente após remoção da árvore, como mostrado pelo posicionamento dos sensores na figura 55-B. Pela observação das figuras 54-A e 55-A, é possível notar novamente a correspondência entre o oco da árvore e os valores de velocidade de onda mais baixos, indicados na figura 55-A a seguir pelas cores vermelho e rosa.

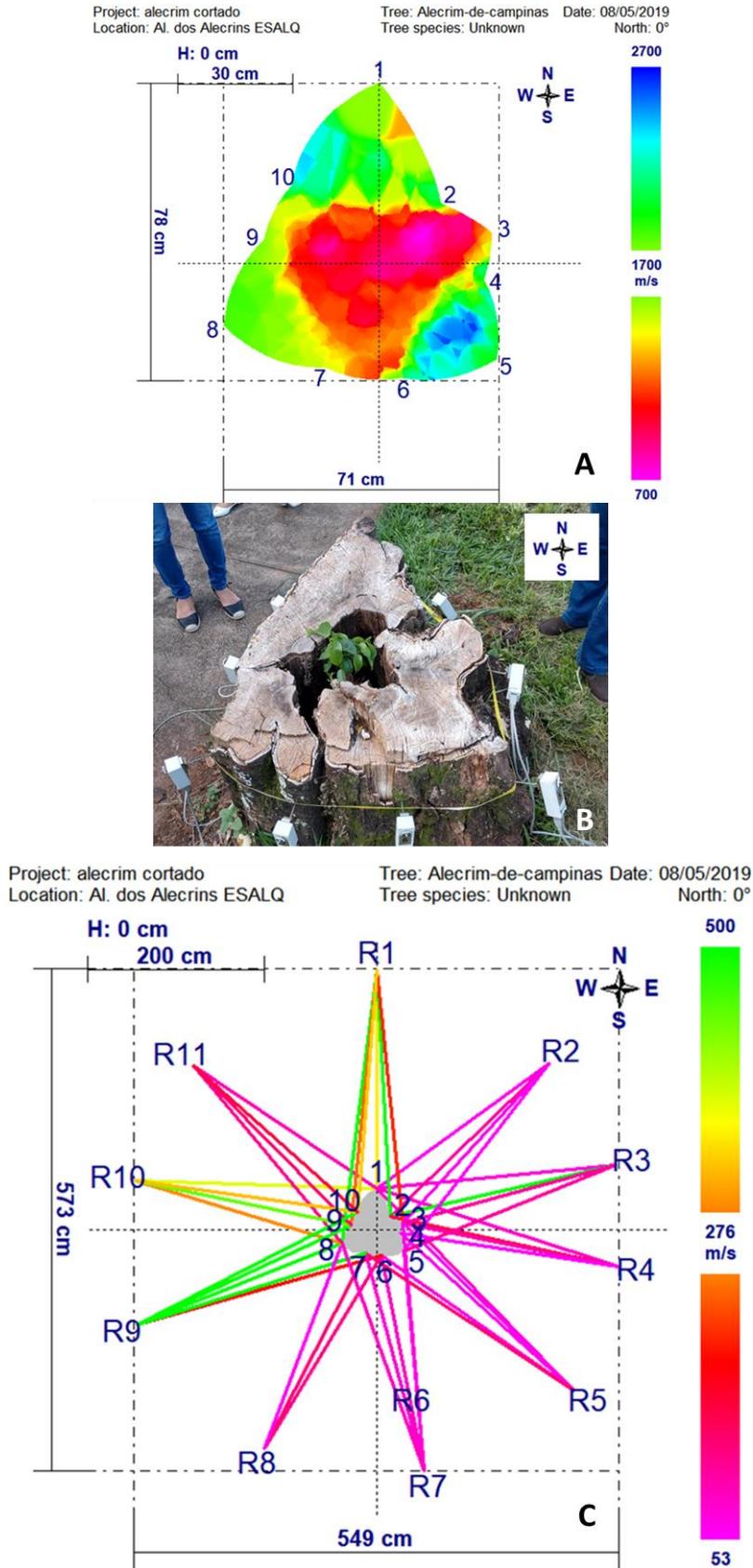


Figura 55. A: Segunda tomografia com Arbotom, da região do colo de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, localizado próximo ao Restaurante Universitário da ESALQ/USP. **B:** Alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, com sensores do Arbotom posicionados, localizado próximo ao Restaurante Universitário da ESALQ/USP. Foto: Demóstenes Ferreira da Silva Filho. **C:** Segunda

tomografia com Arboradix, da região do colo de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado, realizada a 2 m de distância da base do tronco.

No entanto, neste segundo caso, a tomografia com Arboradix foi realizada com o sensor de raízes posicionado a 2 metros de distância da base da árvore (figura 55-C). Pelo gráfico da figura 57-B, é possível notar que nesse caso as velocidades no cimento e na grama também foram estatisticamente diferentes entre si, assim como nos gráficos das figuras 51-B e 56-B. Na figura 5-C, temos o gráfico da tomografia de raízes realizada com Arboradix, com o sensor posicionado a uma distância de dois metros a partir da base do tronco (figura 70). A maior parte dos valores de velocidade obtidos variaram predominantemente entre 53 e 500 m.s^{-1} (figura 55-C), com média calculada de 121,84 m.s^{-1} .

Pelo posicionamento da rosa-dos-ventos nas figuras 55-B e 55-C, podemos notar correspondência entre as raízes tomografadas sob a grama, que geraram as velocidades inferiores entre 53 e $\approx 150 \text{ m.s}^{-1}$ nas retas de cores rosa e vermelha entre as posições R2 e R8 do sensor Radix, e a grama visível na figura 66. Os valores de tomografia sobre o cimento, que geraram velocidades superiores entre ≈ 380 e 500 m.s^{-1} nas retas de cores verde e amarela predominantes entre os sensores R9 e R1, exceto para R11, correspondem à área de cimento visível na figura 55-B.

A separação entre as cores geradas por tomografias nos pontos no cimento e na grama, com poucas exceções, configura situação semelhante à demonstrada no gráfico da figura 51-B e à imagem tomográfica com Arboradix para essa mesma árvore, a 1 metro do tronco (figura 54-C). No entanto, podemos observar certa sobreposição de valores de tomografia de raízes do alecrim-de-Campinas entre a grama e o cimento, visível nas retas de cor rosa escuro do sensor Radix R11 e na reta verde do sensor R3 da figura 55-C. Essa sobreposição pode indicar pontos onde outros fatores influenciaram as velocidades, como a presença de uma raiz sob a posição do sensor R3, o que poderia explicar o aumento da velocidade neste ponto, com propagação direta na madeira até o sensor 3, que atuou como receptor no tronco.

Os valores de velocidade as retas geradas pelos pontos do sensor Radix, foram agrupadas entre os que estavam na grama, sensores R2 a R8, e o que estavam sobre o cimento, de R9 a R1. Os dois grupos de valores foram então, analisados estatisticamente da mesma forma que os dois casos anteriores e as amostras de madeira.

Seus resultados estatísticos podem ser vistos no gráfico da figura 56-B, no qual os valores de velocidade de onda mecânica no cimento e na grama possuem diferença estatística entre si, assim como observado no gráfico da figura 56-A para essa mesma árvore e da figura 58 para o estudo de caso do angico-branco, explicado adiante. Esse resultado é semelhante ao obtido a partir das tomografias com as amostras realizadas diretamente nos pavimentos, como visto no gráfico da figura 51-B, no qual as velocidades para cimento e grama também foram estatisticamente diferentes entre si.

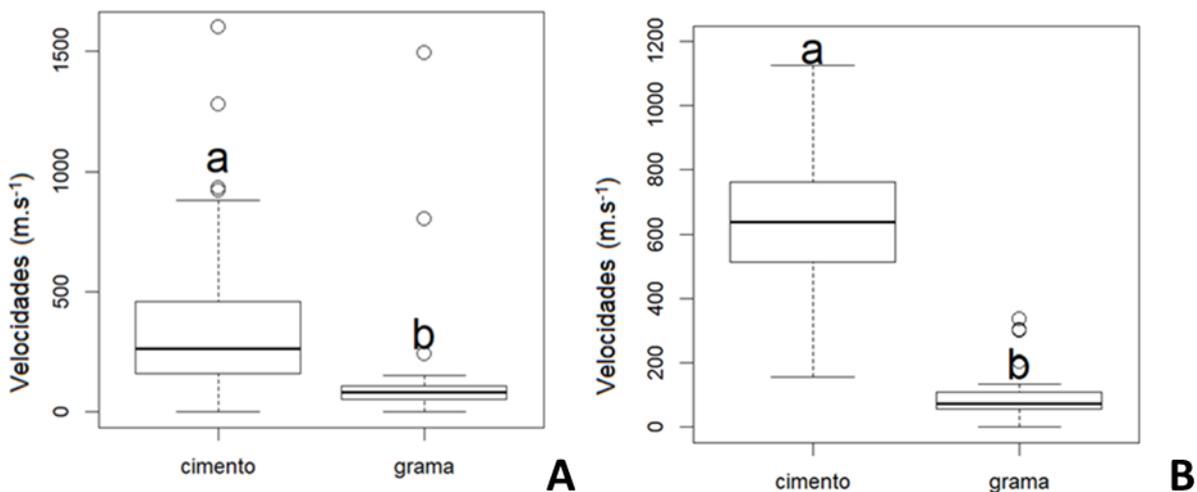


Figura 56. A: Gráfico do tipo “boxplot” com os valores de velocidade da tomografia de raízes de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) cortado nos pavimentos grama e cimento, a 1 m de distância do tronco. **B:** Gráfico do tipo “boxplot” com os valores de velocidade da tomografia de raízes de alecrim-de-Campinas (*Holocalyx balansae*) nos pavimentos grama e cimento, a 2 m de distância do tronco.

Comparando os resultados das duas tomografias deste de alecrim-de-Campinas, amostrando raízes a um metro e a dois metros de distância do tronco, podemos observar algumas diferenças e semelhanças. As velocidades para a grama a 1 metro e a 2 metros não demonstraram diferenças relevantes de valores, provavelmente devido à uniformidade desse substrato entre essas duas distâncias. No caso do cimento, pode ser observada uma diferença na amplitude de valores de velocidade, os quais se mostraram menores a 1 metro e maiores a 2 metros. A inclusão de pontos de asfalto e meio-fio na tomografia a 2 metros poderia ser responsável por explicar a alteração de velocidade nesse caso, gerando alguns valores superiores.

4.5.2. Tomografia de angico-branco - *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan com Arbotom e Arboradix

O terceiro estudo de caso foi realizado no município de São Paulo - SP, com um indivíduo de angico-branco que se encontra na borda de uma construção, com as raízes de um lado sob um solo exposto com grama e outro lado sob o cimento de uma edificação (figura 57-B).

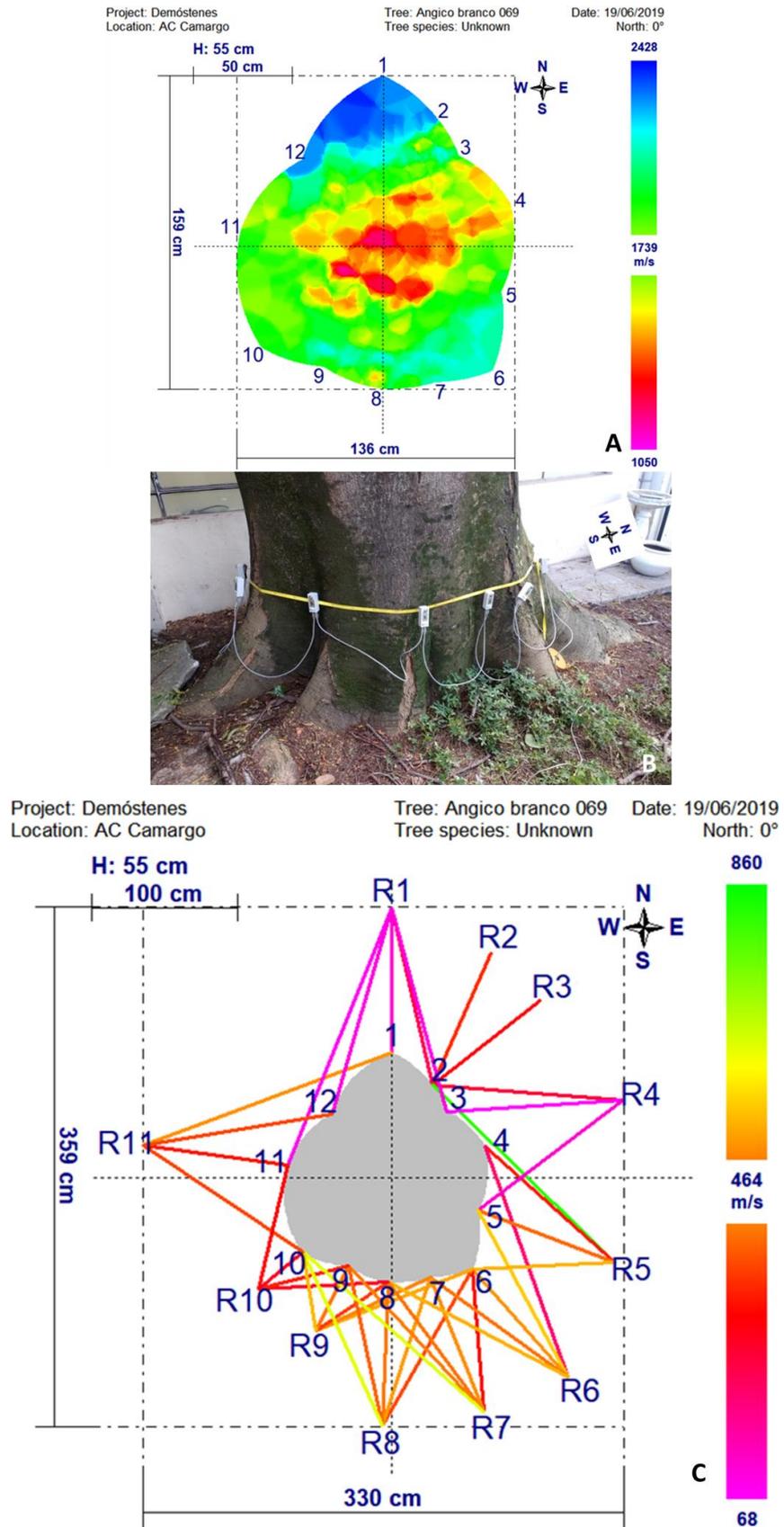


Figura 57. A: Tomografia com Arbotom da região do colo de árvore angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), obtida com Arbotom. **B:** Angico-branco (*Anadenanthera colubrina*) localizado próximo a uma construção no município de São Paulo-SP. Foto: Demóstenes Ferreira da Silva Filho, 2019. **C:** Imagem

tomográfica de raízes de angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), obtida com Arboradix sob dois pavimentos, de grama e de cimento.

A tomografia desse espécime de angico-branco realizada com Arbotom gerou a imagem tomográfica da figura 57-A, com valores de velocidade predominantes entre 1050 e 2428 m.s⁻¹ e média de 1303,43 m.s⁻¹. De acordo com o modelo de regressão gerado, a velocidade média estimada para esta espécie seria de 1518,71 m.s⁻¹, baseada em sua densidade de 0,93 g.cm⁻³. A velocidade média nesta tomografia se mostrou ligeiramente menor do que a velocidade estimada para a espécie, inclusive quando comparada com a velocidade média do angico-branco que forneceu as amostras de madeira (figura 27), cuja média foi de 1577,26 m.s⁻¹, porém, isso não reflete uma significativa perda de densidade, apenas se assemelha ao padrão descrito anteriormente no caso do freixo (figura 36), no qual o incremento em diâmetro ligado à idade da árvore gera um padrão de velocidade crescente na direção cerne-alburno ou medula-casca (ALLISON & WANG, 1998; SOCCO et al., 2004; TOMAZELLO et al., 2008; LIN et al., 2011; PEREIRA-ROLLO et al., 2014; PALMA et al., 2018).

A tomografia das raízes desse angico-branco com Arboradix gerou uma velocidade média de 526,76 m.s⁻¹ e a maior parte dos valores variou entre 68 e 860 m.s⁻¹, como pode ser observada na figura 57-C. Os valores de velocidade as retas geradas pelos pontos do sensor Radix, foram agrupadas entre os que estavam na grama, sensores R1 a R5, e o que estavam sobre o cimento, de R6 a R12. Os dois grupos de valores foram então, analisados estatisticamente da mesma forma que os dois casos anteriores. Seus resultados estatísticos podem ser vistos no gráfico da figura 58 a seguir, no qual os valores de velocidade de onda mecânica no cimento e na grama possuem diferença estatística entre si, assim como observado nos gráficos 51-B, 56-A e 56-B.

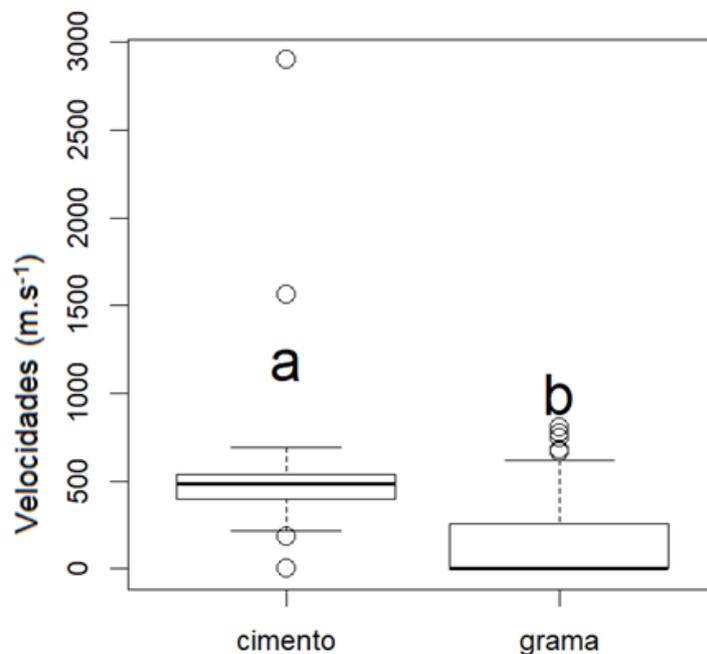


Figura 58. Gráfico do tipo “boxplot” com os valores de velocidade da tomografia de raízes de angico-branco (*Anadenanthera colubrina*) nos pavimentos cimento e grama, a 1 m de distância do tronco.

Os resultados estatísticos obtidos nesses três estudos de caso, somados aos resultados com as amostras de madeira, sugerem que o pavimento sobre as raízes e no seu entorno pode gerar certa distorção nas velocidades de onda mecânica, mesmo dentro de uma mesma árvore. A disparidade das velocidades de onda entre o cimento e a grama pode ser explicada pela grande diferença de composição entre eles, principalmente ao se considerar os valores baixos e algumas vezes nulos, que ocorreram na situação de solo coberto com grama, substrato que possivelmente dissipa certa quantidade do impulso mecânico realizado sobre ele, aumentando o tempo de propagação da onda e, conseqüentemente, diminuindo sua velocidade. Já o cimento normalmente possui uma composição uniforme e se apresenta como um sólido mais denso em relação ao pavimento grama sobre solo.

A tomografia com Arboradix fornece dados com maior precisão quando é possível posicionar o sensor Radix sobre raízes visíveis, pois nesse caso a propagação das ondas se dá diretamente pelos tecidos de madeira da árvore avaliada. No entanto, essa recomendação se torna paradoxal quando consideramos que a maioria das árvores das cidades não possui espaço de canteiro suficiente para encontrarmos raízes de ancoragem visíveis nem mesmo a um metro do caule. Além disso, as árvores que mais demandam tomografia com Arboradix

para avaliação de seu sistema radicular são justamente as que não possuem afloramento de raízes que poderiam ser avaliadas visualmente.

Assim, os resultados encontrados sugerem que uma interpretação mais precisa dos dados de tomografia de raízes com Arboradix deveria considerar não apenas os valores de velocidade, mas as condições de entorno das raízes que podem interferir nessas velocidades. O objetivo seria evitar que essas distorções detectadas nas tomografias não induzam a conclusões errôneas a respeito da presença ou ausência de raízes de ancoragem ou mesmo de sua condição fitossanitária, principalmente com o intuito de embasar corretamente as avaliações de risco de árvores e a tomada de decisões subsequentes em Silvicultura Urbana.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivos: elucidar a correlação entre velocidades de propagação de onda mecânica ($m.s^{-1}$), obtidas com Arbotom e Arboradix, com densidade da madeira de amostras e árvores, gerando um modelo de correlação aplicável na interpretação de tomografias; verificar se diferentes tipos de material de cobertura do solo no entorno ou sobre as raízes causam interferência nas velocidades de onda com Arboradix e; aplicar os dados obtidos na interpretação dos gráficos de velocidade, de forma que possam embasar a avaliação das raízes de ancoragem de árvores urbanas.

Foi encontrada significativa correlação ($R^2=0,86$) entre velocidades médias de onda obtidas com Arbotom e a densidade conhecida de diferentes espécies arbóreas, gerando um modelo que pode ser aplicado na definição de valores de base para interpretação de tomografias com Arbotom, baseado na densidade da espécie.

Foram observadas relevantes diferenças estatísticas entre tipos de cobertura de solo e velocidades de onda geradas por Arboradix em amostras de madeira, sugerindo que o equipamento é capaz de detectar a interferência desses materiais, a qual influencia na velocidade final gerada durante a avaliação das raízes superficiais de ancoragem. No entanto, a correlação entre velocidades de onda e densidade das amostras não foi significativa ($R^2=0,21$), demandando estudos mais aprofundados nesse aspecto.

Tomografias com Arbotom e Arboradix em ambiente urbano apresentaram padrões semelhantes aos encontrados nas tomografias das amostras de madeira, em relação aos tipos de cobertura do entorno das árvores, sugerindo que existe influência desses materiais também sobre a avaliação do sistema radicular de árvores urbanas.

Assim, os resultados encontrados sugerem que, para haver uma interpretação mais precisa dos dados de tomografia de raízes com Arboradix, deveriam ser consideradas não apenas os valores de velocidade gerados, mas as condições de entorno das raízes que podem interferir nessas velocidades. Essa interpretação mais detalhada é facilmente aplicável e poderia evitar que essa possível interferência detectada nas tomografias induza a conclusões errôneas a respeito da presença ou ausência de raízes de ancoragem ou mesmo de sua condição fitossanitária, principalmente no intuito de embasar corretamente a Avaliação de Risco de árvores e as posteriores recomendações em Silvicultura Urbana.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As dificuldades encontradas no presente estudo foram:

- A disponibilidade irregular de amostras de madeira provenientes de poda de árvores impediu que mais espécies pudessem ser incluídas no ensaio, além da baixa disponibilidade de amostras de comprimento maior ou igual a um metro e com diâmetro mínimo para a colocação dos pregos e sensores do Arbotom e Arboradix.
- Grande dificuldade de se retirar amostras de raízes de árvores sem comprometer a própria raiz, além da interferência do solo sobre o instrumento de obtenção das amostras, como a sonda de Pressler, bem como a grande ocorrência de pavimentação sobre o sistema radicular, impedindo o acesso direto às raízes.
- Muitas árvores nas cidades encontram-se em situações que dificultam o acesso às suas raízes, como pavimentação ou calçamento sobre elas, região do colo aterrada, presença de outras plantas ou serapilheira sobre a área radicular.

Sugestões para próximos passos visando maior respaldo científico a partir deste estudo:

- Acompanhar o agendamento de podas e supressões solicitadas pela prefeitura com a empresa terceirizada responsável, para obter amostras de madeira de outras espécies de ocorrência significativa na arborização urbana ou de interesse para este estudo, como: tipuana (*Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze), alfeneiro (*Ligustrum lucidum* W.T. Aiton), flamboyant (*Delonix regia* (Bojer ex Hook.) Raf.), chapéu-de-sol (*Terminalia catappa* L.) e ambas as espécies de ipê-roxo (*H. impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos e *H. heptaphyllum* (Vell.) Mattos), ampliando assim a análise das variações interespecíficas.
- Ampliar o número de amostras das espécies já contempladas neste estudo, incluindo novos indivíduos para análise de variações intraespecíficas.
- Ampliar as amostragens com o tomógrafo de raízes Arboradix, incluindo mais tipos de condições de entorno e de cobertura de solo comuns em árvores nas cidades, como asfalto, solo exposto compactado e solto, calçadas de pedra, lajotas de concreto, entre outras que se mostrarem representativas.

REFERÊNCIAS

- AUER, C. G. Doenças de árvores urbanas. EMBRAPA-CNPQ. Documentos, 1996.
- ALLISON, R. B. & WANG, X. Nondestructive Testing in the Urban Forest. In: ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, v. 48, n. 1, p. 77, 2015.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Florestas urbanas - Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas - Parte 3: Avaliação de risco de árvores. 2019.
- BARROS, H. R.; LOMBARDO, M. A. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo no município de São Paulo-SP. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, v. 20, n. 1, p. 160-177, 2016.
- BRAZOLIN, S. Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2009.
- BRAZOLIN, S., TOMAZELLO FILHO, M., YOJO, T., OLIVEIRA NETO, M. A. D., ALBUQUERQUE, A. R., & SETTE JÚNIOR, C. R. Mechanical and physical properties of *Tipuana tipu* wood deteriorated by decaying fungi. *Cerne*, v. 20, n. 2, p. 183-190, 2014.
- BERLAND, A.; SHIFFLET, S. A.; SHUSTER, W. D.; GARMESTANI, A. S.; GODDARD, H. C.; HERRMANN, D. L. & HOPTON, M. E. The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, v. 162, p. 167-177, 2017.
- BERLAND, A. & HOPTON, M. E. Comparing street tree assemblages and associated stormwater benefits among communities in metropolitan Cincinnati, Ohio, USA. *Urban forestry & urban greening*, v. 13, n. 4, p. 734-741, 2014.
- BRUN, F. G. K., DOBBERT, L. Y., SERVOLO FILHO, H. J., ZAIA, H. B. de A., & SILVA FILHO, D. F. Percepção dos usuários em relação ao conforto ambiental de duas áreas verdes de Piracicaba-SP. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, v. 5, n. 3, p. 59-81, 2010.
- BRUN, F. G. K.; LINK, D.; BRUN, E. J. O emprego da arborização na manutenção da biodiversidade de fauna em áreas urbanas. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, v. 2, n. 1, p. 117-127, 2007.
- CAVALCANTI, N. M. O. Propriedade da madeira de raízes de árvores urbanas: Urban tree roots wood properties. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2018.

- CUTLER, D. F.; GASSON, P. E. & FARMER, M. C. The windblown tree survey: Analysis of results. *Arboricultural Journal*, v. 14, n. 3, p. 265-286, 1990.
- D'AMATO, N. E.; SYDNOR, T. D.; KNEE, M.; Robin HUNT, R. & BISHOP, B. Which comes first, the root or the crack? *Journal of Arboriculture*, v. 28, n. 6, p. 277-282, 2002.
- Day, R.W. Damage of structures due to tree roots. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 5, p. 200–207, 1991.
- DAY, S. D.; WISEMAN, E. P.; DICKINSON, S. B. & HARRIS, J. R. Tree root ecology in the urban environment and implications for a sustainable rhizosphere. *Journal of Arboriculture*, v. 36, n. 5, p. 193, 2010.
- DENMAN, L. Are Street Trees and Their Soils an Effective Stormwater Treatment Measure? In: *The 7th National Street Tree Symposium*. 2006.
- DYCK, B. Precision forestry—The path to increased profitability. In: *Proceedings of the 2nd International Precision Forestry Symposium*, Seattle, Washington; University of Washington, Seattle. p. 3-8.2003.
- ELLISON, Michael J. Quantified tree risk assessment used in the management of amenity trees. *Journal of Arboriculture*, v. 31, n. 2, p. 57-65, 2005.
- GASPERINI, S.; ROATTI, B.; MORELLI, G. AFPP. Analysis of anatomic structures of trees in relation to uprooting behavior: the case study of *Pinus pinea*. In: *4e Conférence sur l'entretien des jardins, espaces végétalisés et infrastructures*. Toulouse, 2016.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF ARBORICULTURE. Basic Tree Risk Assessment Form. 2017.
- LIN, C. J., CHANG, T. T., JUAN, M. Y., LIN, T. T., TSENG, C. L., WANG, Y. N., & TSAI, M. J. Stress wave tomography for the quantification of artificial hole detection in camphor trees (*Cinnamomum camphora*). *Taiwan Journal of Forest Science*, v. 26, n. 1, p. 17-32, 2011.
- LORENZI, H. *Árvores brasileiras*, vol. 1, 7.ed. Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda Plantarum, Nova Odessa, 2016.
- LORENZI, H. *Árvores brasileiras*, vol. 2, 5.ed. Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda Plantarum, Nova Odessa, 2016.
- LORENZI, H. *Árvores brasileiras*, vol. 3, 2.ed. Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda Plantarum, Nova Odessa, 2016.
- LORENZI, H.; BACHER, L. B.; TORRES, M. A. V. *Árvores e arvoretas exóticas no Brasil: madeiras, ornamentais e aromáticas*. Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda., 2018.

- LUCKE, T. & NICHOLS, P. W. B. The pollution removal and stormwater reduction performance of street-side bioretention basins after ten years in operation. *Science of the Total Environment*, v. 536, p. 784-792, 2015.
- MATHENY, Nelda P.; CLARK, James R. A photographic guide to the evaluation of hazard trees in urban areas. International Society of Arboriculture, 1994.
- MATTHECK, C. & BRELOER, H. The body language of trees: a handbook for failure analysis. HMSO Publications Centre, 1994.
- MENDES, F.H.; SILVA FILHO, D.F. Frequency variation of mechanical waves of the impulse tomograph based on geographic north. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 47, n. 122, 2019.
- MCPHERSON, E. G. Expenditures associated with conflicts between street tree root growth and hardscape in California, United States. *Journal of Arboriculture*, v. 26, n. 6, p. 289-297, 2000.
- MCPHERSON, E. G.; & MUCHNICK, J. Effect of street tree shade on asphalt concrete pavement performance. *Journal of Arboriculture*, v. 31, n. 6, p. 303, 2005.
- MCPHERSON, E. G.; SCOTT, K. I.; SIMPSON, J. R. Estimating cost effectiveness of residential yard trees for improving air quality in Sacramento, California, using existing models. *Atmospheric Environment*, v. 32, n. 1, p. 75-84, 1998.
- MEILLEUR, Guy. Basic tree risk assessment. *Arborist News*, v. 15, n. 5, p. 12-17, 2006.
- MOREIRA, T. C., POLIZEL, J. L., SANTOS, I. D. S., SILVA FILHO, D. F., BENSENOR, I., LOTUFO, P. A., & MAUAD, T. Green Spaces, Land Cover, Street Trees and Hypertension in the Megacity of São Paulo. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 3, p. 725, 2020.
- MORELLI, G. & RAIMBAULT, P. & GASPERINI, S. & RIATTI, B. Legami inscindibili, *Arboricoltura Morfofisiologica, Potatura e Valutazione de Stabilità*. Estratto da Acer© Il Verde Editoriale. Milano, 2017.
- MULLANEY, J., LUCKE, T. & TRUEMAN, S. J. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, v. 134, p. 157-166, 2015.
- NIERI, E. M. Vigor nutricional de espécies arbóreas da arborização viária do bairro Margarida Galvan - Dois Vizinhos/PR. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

- 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.
- PALMA, S. S. A., GONÇALVES, R., TRINCA, A. J., COSTA, C. P., dos REIS, M. N., & MARTINS, G. A. Interference from Knots, Wave Propagation Direction, and Effect of Juvenile and Reaction Wood on Velocities in Ultrasound Tomography. *BioResources*, v. 13, n. 2, p. 2834-2845, 2018.
- PEREIRA, B. Análise dos efeitos do entorno urbano sobre o sistema radicular de árvores viárias de São Mateus do Sul - Paraná. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos/PR. 103p. 2017.
- PEREIRA, L. C., SILVA FILHO, D. F., TOMAZELLO FILHO, M. T., COUTO, H. T. Z., MOREIRA, J. M. M. P., & POLIZEL, J. L. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. *Revista da sociedade brasileira de arborização urbana*, v. 2, n. 2, 2007.
- PEREIRA-ROLLO, L. C., SILVA FILHO, D. F., TOMAZELLO FILHO, M., MORAES, S. O. & COUTO, H. T. Z. Can the impulse propagation speed from cross-section tomography explain the conditioned density of wood? *Wood science and technology*, v. 48, n. 4, p. 689-701, 2014.
- QUIGLEY, M. F. Street trees and rural conspecifics: will long-lived trees reach full size in urban conditions? *Urban Ecosystems*, v. 7, n. 1, p. 29-39, 2004.
- R CORE TEAM. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- RANDRUP, T. B.; MCPHERSON, E. G. & COSTELLO, L. R. A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs, and roads. *Urban Ecosystems*, v. 5, n. 3, p. 209-225, 2001.
- RINN, F. Root Diagnostics with Stress Wave Tomography. 2008.
- RINN, F. Tree root plate assessment by sounding. 2016.
- RINNTECH. User manual: arbotom 3-D tree impulse tomograph. Version 1.59 for Microsoft Windows 98, 2000, XP. Heidelberg: Microsoft, 42 p, 2005.
- ROATTI, B., MORELLI, G., GASPERINI, S. Tree failures in Italy: analysis of single events, consequences and distribution. In: 4e Conférence sur l'entretien des jardins, espaces végétalisés et infrastructures. Toulouse, 2016.

- RODRIGUEZ, D. R. O.; TOMAZELLO-FILHO, M. Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. *New Forests*, v. 50, n. 5, p. 821-843, 2019.
- ROLLO, F. M. Identificação de padrões de resposta à tomografia de impulso em tipuanas *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2009.
- ROLLO, F. M. D. A., SOAVE JUNIOR, M. A., VIANA, S. M., ROLLO, L. C. P., COUTO, H. T. Z. D., & SILVA FILHO, D. F. D. Comparison between resistography readings and tomographic images for internal assessment in trees trunks. *Cerne*, v. 19, n. 2, p. 331-337, 2013.
- ROLLO, L. C. P. Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2009.
- ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, v. 48, n. 1, p. 77, 1998.
- SILVA, I. M. Efeitos do uso e cobertura do solo sobre o conforto higrotérmico. Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012.
- SILVA FILHO, D. F., MEIRA, A. M.; SETTE Jr., C. R.; ALEXANDRINO, E. R.; NOGUEIRA, C. L.; GUARALDO, E.; OLIVATTO, F. ROLLO, F. M. A.; PARRA, J.; CHAGAS, M. P.; BIANCHI, M.; GABRIEL, M. V.; CELIDONIO, R. M. G. S.; FLORSHEIM, S. M. B. & COSTA, T. J. Levantamento do potencial de arborização e proposta para três bairros no município de Piracicaba/SP, Brasil. *REVSBAU*, Piracicaba–SP, v. 3, n. 4, p. 20-39, 2008.
- SILVA FILHO, D. F., PIZETTA, P. U. C., de 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*, v. 26, n. 5, 2002.
- SILVA FILHO, D. F. & POLIZEL, J. L. Cadastro, diagnóstico e valoração das árvores do Jardim da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Relatório. 69p. 2015.
- SMILEY, E. T. Comparison of methods to reduce sidewalk damage from tree roots. *Arboriculture and Urban Forestry*, v. 34, n. 3, p. 179, 2008.
- SOCCO, L. V., SAMBUELLI, L., NARTINIS, R. COMINO, E & NICOLOTTI, G. Feasibility of ultrasonic tomography for nondestructive testing of decay on living trees. *Research in Nondestructive Evaluation*, v. 15, n. 1, p. 31-54, 2004.
- STEWART, I. D. & OKE, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, n. 12, p. 1879-1900, 2012.

- SYDNOR, T. D.; GAMSTETTER, D.; NICHOLS, J.; BISHOP, B.; FAVORITE, J.; BLAZER, C. & TURPIN, L. Trees are not the root of sidewalk problems. *Journal of Arboriculture*, v. 26, n. 1, p. 20-29, 2000.
- TOMAZELLO, M., BRAZOLIN, S., CHAGAS, M. P., OLIVEIRA, J. T., BALLARIN, A. W., & BENJAMIN, C. A. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.
- URBAN, J. *Up By Roots: Healthy soils and trees in the built environment*. International Society of Arboriculture, 2008.
- VOLDER, A.; WATSON, T. & VISWANATHAN, B. Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 8, n. 4, p. 249-256, 2009.
- WAGAR, J. A.; BARKER, P. A. Tree root damage to sidewalks and curbs. *Journal of Arboriculture*, v. 9, n. 7, p. 177-181, 1983.
- WANG, X. ROSS, R. J.; MCCLELLAN, M.; BARBOUR, R. J.; ERICKSON, J. R. FORSMAN, J. W. & MCGINNIS, G. D. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood and Fiber Science*, v. 33, n. 4, p. 522-533, 2007.
- WANG, X.; ROSS, R. J.; PUNCHES, J.; BARBOUR, R. J.; FORSMAN, J. W. & ERICKSON, J. R. Evaluation of small-diameter Timber for value-added manufacturing: a stress wave approach. In: *Precision forestry: proceedings of the second International Precision Forestry Symposium*. Seattle, WA: Institute of Forest Resources, College of Forest Resources, University of Washington, p. 91-96. 2003.
- WESSOLLY, Lothar. Fracture Diagnosis of Trees Part 3: Boring is no way for reliable fracture diagnosis. *Stadt und Gruen* (9), p. 635-640, 1995.
- WONG, T. W.; GOOD, J. E. G.; DENNE, M. P. Tree root damage to pavements and kerbs in the city of Manchester. *Arboricultural Journal*, v. 12, n. 1, p. 17-34, 1988.
- XIAO, Q.; MCPHERSON, E. G. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. *Urban ecosystems*, v. 6, n. 4, p. 291-302, 2002.
- ZHOU, W.; HUANG, G. & CADENASSO, M. L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, v. 102, n. 1, p. 54-63, 2011.

- [1]. USP de Piracicaba detecta que 33% das árvores de bairro estão velhas. Disponível em:
<<http://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2013/04/usp-de-piracicaba-detecta-que-33-das-arvores-de-bairro-estao-velhas.html>>. Acesso em 01/1dez/2017.
- [2]. Arbotom®. Disponível em:
<<http://www.rinntech.de/content/view/7/35/lang,english/index.html>>. Acesso em 15/mar/2017.
- [3]. Equipamento completo do Arbotom® e Arboradix™. Disponível em:
<<http://www.arborest.ee/en/Services/tomograph/>>. Acesso em 15/mar/2017.
- [4]. Arboradix™. Disponível em:
<<http://www.ictinternational.com/products/arboradix/arboradix/>>. Acesso em 15/mar/2017.
- [5]. Demonstração do sensor Arboradix™. Disponível em:
<<http://tecnal.com.br/pt/produtos/sensor-para-deteco-de-razes-arboradix-rinntech/>>. Acesso em 15/mar/2017.
- [6] EMBRAPA. Espécies arbóreas brasileiras, Vol. 1, 2, 3, 4 e 5.
- [7] List of wood densities for tree species from tropical America, Africa, and Asia. Food and Agricultural Organization - United Nations. Disponível em:
<<http://www.fao.org/docrep/w4095e/w4095e0c.htm>>.
- [8] ANDRADE, A. M. de; CARVALHO, L. M. de. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do Estado do Rio de Janeiro. *Floresta e Ambiente*, v. 5, n. 1, p. 24-42, 1998.
- [9] José Elias de Paula, Karoline Pereira Costa. Densidade da madeira de 932 espécies nativas do Brasil. 248 p. Editora: Cinco Continentes. 2011.
- [10] IPEF. Identificação de espécies florestais. Disponível em:
<<http://www.ipef.br/identificacao/>>.
- [11] Paulo Ernani Ramalho Carvalho. Espécies Nativas para fins produtivos. Embrapa Florestas, 1998. Disponível em:
<<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/307865>>.

ANEXOS

6.1. Análise estatística entre dados de velocidade de onda mecânica com Arbotom e de densidade da madeira

Para averiguar a correlação entre dados de tomografia e propriedades da madeira e gerar um modelo aplicável, as velocidades de onda e a densidade de madeira para cada espécie foram analisadas estatisticamente por meio do software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), de acordo com a programação elucidada a seguir, realizada com o auxílio da Pós-Doutoranda Rafaela Naves.

- Ajuste e seleção de modelos:

```
> modelo_nulo=lm(dado1$velocidade~1)
> modelo_linear=lm(dado1$velocidade~dado1$densidade)
> modelo_log_x=lm(dado1$velocidade~log(dado1$densidade))
```

- Comparando esses três modelos:

```
> AICtab(modelo_nulo,modelo_linear,modelo_log_x)
      dAIC df
modelo_log_x  0.0  3
modelo_linear  4.5  3
modelo_nulo  21.2  2
```

- Conferindo normalidade dos resíduos do modelo_log_x:

```
> shapiro.test( residuals(modelo_log_x) )
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data:  residuals(modelo_log_x)
W = 0.9439, p-value = 0.5673
```

```
> summary(modelo_log_x)
```

```
Call:
```

```
lm(formula = dado1$velocidade ~ log(dado1$densidade))
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-109.82	-54.03	-17.65	41.39	182.23

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	1533.27	38.66	39.661	2.05e-11	***
log(dadol\$densidade)	462.04	57.35	8.057	2.09e-05	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Residual standard error: 89.18 on 9 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.8782, Adjusted R-squared: 0.8647

F-statistic: 64.91 on 1 and 9 DF, p-value: 2.091e-05

6.2. Análise estatística dos dados de tomografia com Arboradix™ em amostras de madeira

Os dados de velocidade de onda nas cinco situações de tomografia com as amostras de madeira (“cadeira” ou testemunha, “cimento”, “grama”, “na grama” e “no cimento”), além da densidade de madeira calculada para cada uma das seis espécies das amostras, foram analisados estatisticamente por meio do software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), com auxílio da Pós-Doutoranda Rafaela Naves, de acordo com as programações elucidadas nos subitens a seguir.

6.2.1. Análise estatística de tomografias com Arboradix diretamente sobre o pavimento: situações “na grama” e “no cimento”

Nessas duas situações de tomografia com as amostras de madeira, a haste do Arboradix foi posicionada sobre os pavimentos, como nas figuras 16 e 18. Assim, as variáveis foram nomeadas “na_grama” e “no_cimento” indicando o posicionamento do Radix durante essas tomografias. Esses dados foram analisados de acordo com a programação a seguir.

- Homogeneidade de variância:

```
> bartlett.test(log(velocidade)~trat)
```

```
Bartlett test of homogeneity of variances
```

```
data: log(velocidade) by trat
Bartlett's K-squared = 0.99786, df = 1, p-value = 0.3178
```

- Teste t:

```
> (modelo)
      welch Two Sample t-test
data: log(velocidade) by trat
t = -14.941, df = 52.076, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -1.553913 -1.185943
sample estimates:
 mean in group Na_grama mean in group No_cimento
           4.682018           6.051946
```

6.2.2. Análise estatística de tomografias com Arboradix sobre as amostras de madeira, nas condições: “cadeira”, “cimento” e “grama”

Nessas três situações, as variáveis foram nomeadas como “cadeira” (testemunha), “grama” e “cimento” em relação ao substrato sobre o qual as amostras se encontravam durante essas tomografias. Esses dados foram analisados estatisticamente por meio do software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), de acordo com a programação elucidada a seguir.

- Homogeneidade de variância:

```
> bartlett.test(log(velocidade)~trat)
      Bartlett test of homogeneity of variances
data: log(velocidade) by trat
Bartlett's K-squared = 1.0599, df = 2, p-value = 0.5886
```

- Normalidade dos Resíduos:

```
> shapiro.test(residuals(modelo))
      Shapiro-wilk normality test
data: residuals(modelo)
```

w = 0.97676, p-value = 0.1325

- Análise de variância:

```
> summary(modelo)
```

```
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
trat           2  1.006   0.5032   2.705 0.0729 .
Residuals     81 15.065   0.1860
```

```
---
```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

- Teste de Tukey:

```
> tukey
```

```
$statistics
```

```
      MSerror Df      Mean      CV      MSD
0.1859913 81 7.431045 5.803587 0.2751911
```

```
$parameters
```

```
test name.t ntr StudentizedRange alpha
Tukey  trat  3          3.376502 0.05
```

```
$means
```

```
      log((velocidade))      std  r      Min      Max      Q25      Q50
Q75
Cadeira          7.281116 0.4772247 28 6.093570 8.078998 6.977873 7.296591
7.577925
Cimento          7.539340 0.4194565 28 6.861711 8.228177 7.147098 7.674602
7.829828
Grama            7.472679 0.3927937 28 6.711740 8.224432 7.286519 7.541683
7.682223
```

```
$comparison
```

```
NULL
```

```
$groups
```

```
      log((velocidade)) groups
Cimento          7.539340      a
Grama            7.472679      a
```

```
Cadeira          7.281116      a
attr(,"class")
[1] "group"
```

6.2.3. Correlação entre a densidade básica calculada para as amostras e as velocidades de onda mecânica

Os dados de velocidade de onda mecânica nas cinco situações de tomografia e os valores de densidade de madeira obtidos para cada uma das amostras foram analisados estatisticamente por meio do software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), com auxílio da Pós-Doutoranda Rafaela Naves, de acordo com a programação elucidada a seguir.

- Ajuste e seleção de modelos:

```
> modelo_nulo=lm(dado1$velocidade~1)
> modelo_linear=lm(dado1$velocidade~dado1$densidade)
> modelo_log_x=lm(dado1$velocidade~log(dado1$densidade))
```

- Comparando esses três modelos:

```
> AICtab(modelo_nulo,modelo_linear,modelo_log_x)
      dAIC df
modelo_log_x  0.0 3
modelo_linear 4.5 3
modelo_nulo  21.2 2
```

- Conferindo normalidade dos resíduos do modelo_log_x:

```
> shapiro.test( residuals(modelo_log_x))
```

Shapiro-wilk normality test

```
data:  residuals(modelo_log_x)
W = 0.9439, p-value = 0.5673
```

```
> summary(modelo_log_x)
```

Call:

```
lm(formula = dado1$velocidade ~ log(dado1$densidade))
```

Residuals:

```
      Min       1Q   Median       3Q      Max
```

```
-109.82 -54.03 -17.65 41.39 182.23
```

Coefficients:

```

              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    1533.27     38.66  39.661 2.05e-11 ***
log(dado1$densidade) 462.04     57.35   8.057 2.09e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

```

Residual standard error: 89.18 on 9 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8782, Adjusted R-squared:  0.8647
F-statistic: 64.91 on 1 and 9 DF, p-value: 2.091e-05

```

6.3. Estudos de caso de tomografia com Arbotom® e Arboradix™ em árvores em cidades

Os dados de velocidade de onda mecânica para cada estudo de caso foram analisados estatisticamente por meio do software R, versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019), com auxílio da Pós-Doutoranda Rafaela Naves, de acordo com as programações elucidadas a seguir. Os demais dados quantitativos e qualitativos dessas tomografias foram analisados da mesma forma que as demais tomografias de árvores já escritas.

6.3.1. Estudo de caso 1: alecrim-de-Campinas cortado - tomografia com Arbotom e Arboradix a 1 m da base

- Homogeneidade de variâncias:

```
> bartlett.test(vel_grama~local,alecrim1)
```

```
Bartlett test of homogeneity of variances
```

```
data:  vel_grama by local
```

```
Bartlett's K-squared = 17.069, df = 1, p-value = 3.605e-05
```

```
Modelo não paramétrico
```

```
> modelo=kruskal.test(vel_grama~local,alecrim1)
```

```
> (modelo)
```

```
kruskal-wallis rank sum test
```

```
data: vel_grama by local
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 54.191, df = 1, p-value = 1.819e-13
```

6.3.2. Estudo de caso 2: alecrim-de-Campinas cortado - tomografia com Arbotom e com Arboradix a 2 m da base

- Homogeneidade de variâncias:

```
> bartlett.test(vel_grama~local,alecrim1)
```

```
Bartlett test of homogeneity of variances
```

```
data: vel_grama by local
```

```
Bartlett's K-squared = 26.565, df = 1, p-value = 2.548e-07
```

```
Modelo não paramétrico
```

```
> modelo=kruskal.test(vel_grama~local,alecrim1)
```

```
> (modelo)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: vel_grama by local
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 58.119, df = 1, p-value = 2.467e-14
```

6.3.3. Estudo de caso 3: angico-branco - tomografia com Arbotom e com Arboradix

- Homogeneidade de variâncias:

```
> bartlett.test(vel_grama~local,angico)
```

```
Bartlett test of homogeneity of variances
```

```
data: vel_grama by local
```

```
Bartlett's K-squared = 6.1852, df = 1, p-value = 0.01288
```

```
Teste não paramétrico
```

```
> modelo=kruskal.test(vel_grama~local,angico)
```

```
> (modelo)
```

```
kruskal-wallis rank sum test
```

```
data: vel_grama by local
```

```
kruskal-wallis chi-squared = 41.141, df = 1, p-value = 1.416e-10
```