



Investigação multidisciplinar do risco de queda de árvore: estudo de caso em pau-ferro, na Cidade de São Paulo, SP

Raquel Dias de Aguiar Moraes Amaral¹ Gisleine Coelho de Campos² Otávio Coaracy Brasil Gandolfo³ Vinicius Rafael Neris dos Santos⁴ Reinaldo Araújo de Lima⁵
 Rafael da Fonseca⁶

¹ Mestre em Recursos Florestais pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ / Universidade de São Paulo – USP - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT São Paulo, SP, Brasil
raquel@ipt.br

² Doutora em Engenharia Civil Pela Escola Politécnica – POLI / Universidade de São Paulo – USP / Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, São Paulo, SP, Brasil
gisleine@ipt.br

³ Doutor em Geociências pelo Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo – IGC / Universidade de São Paulo – USP / Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. São Paulo, SP, Brasil
brasilgandolfo@ipt.br

⁴ Doutor em Geofísica pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo – USP / Keruo Geo Soluções
vinicius@kerno.com.br

⁵ Graduado em Ciências Biológicas pela Universidade Nove de Julho / Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, São Paulo, SP, Brasil
reinaldol@ipt.br

⁶ Graduado em Engenharia Civil pela Universidade de Mogi das Cruzes – UMC / Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, São Paulo, SP, Brasil
rfonseca@ipt.br

Cite como
American Psychological Association (APA)

Amaral, R. D. A. M., Campos, G. C., Gandolfo, O. C. B., Santos, V. R. N., Lima, R. A. & Fonseca, R. (2022, Edição Especial, Novembro). Investigação multidisciplinar do risco de queda de árvore: estudo de caso em pau-ferro, na Cidade de São Paulo, SP. *Rev. Gest. Ambient. e Sust. - GeAS*, 11, 1-24, e22949.
<https://doi.org/10.5585/geas.v11i2.22949>

Resumo

Objetivo: Diagnosticar e analisar o risco de queda da árvore de pau-ferro a partir de uma metodologia desenvolvida pelos autores, descrita na forma de um fluxograma conceitual, e que integra resultados do diagnóstico fitossanitário, de eventuais movimentações do solo, da inclinação do tronco e, também, de métodos geofísicos para a tomada de decisão do risco e manejo.

Metodologia: Aplicação de procedimentos para análise do risco de queda da árvore considerando aspectos externos e internos, utilizando equipamentos não destrutivos, em paralelo ao controle da inclinação do tronco, dos deslocamentos verticais do solo e da raiz aflorada da árvore, além da caracterização do subsolo integrando métodos geofísicos.

Originalidade/Relevância: Este trabalho mostra a utilização de técnicas da engenharia civil e da geofísica para a análise do risco de queda de árvore no ambiente urbano.

Resultados: O exemplar arbóreo utilizado como estudo de caso apresentava cavidade aparente e apodrecimento intenso do lenho, além de raiz dobrada e descolada do solo, o que impossibilitava sua ancoragem e sustentação. A concentração de raízes abaixo da superfície do terreno não garantia a estabilidade devido à evolução dos deslocamentos verticais de superfície e inclinação do tronco para a avenida, sendo indicada sua supressão por apresentar risco de queda.

Contribuições sociais/para a gestão: As árvores oferecem inúmeros benefícios e a obtenção destes privilégios depende de uma gestão adequada que considere o seu manejo e monitoramento correto. A tomada de decisão do risco de queda deve estar pautada em diversas análises, preferencialmente baseadas em métodos não destrutivos, diminuindo as incertezas para que árvores não sejam suprimidas sem necessidade.

Palavras-chave: Árvore. Risco de queda. Solo. Geofísica.



Multidisciplinary investigation of tree falling risk: a case study in pau-ferro, in São Paulo, SP City

Abstract

Objective: Diagnose and analyze the falling risk in *pau-ferro* tree based on a methodology developed by the authors, described in the form of a conceptual flowchart, which includes results from the phytosanitary diagnosis, eventual soil movements, trunk inclination and, as well as geophysical methods for risk decision making and management.

Methodology: Application of procedures to analyze the risk of falling trees considering external and internal aspects, using non-destructive equipment, in parallel with the control of the trunk inclination, vertical displacements of the soil and the root outcrop of the tree, in addition to the characterization of the subsoil integrating methods geophysicists.

Originality/Relevance: This work shows the application of civil engineering and geophysical techniques to analyze the risk of tree falling in urban area.

Results: The tree specimen used as a case study had an apparent cavity and intense wood rot, as well as a bent and detached root from the ground, which made it impossible to anchor and support it. The concentration of roots, below the surface of the ground, did not guarantee stability due to the evolution of the vertical displacements of the surface and inclination of the trunk towards the avenue, and its suppression is indicated because it presents a risk of falling.

Social/Management Contributions: Trees offer numerous benefits and obtaining these privileges depends on proper management that considers their proper management and monitoring. Decision making regarding the risk of falling must be based on several analyses, preferably based on non-destructive methods, reducing uncertainties so that trees are not removed unnecessarily.

Keywords: Tree. Falling risk. Soil. Geophysics.

Investigación multidisciplinaria del riesgo de caída de árboles: un estudio de caso en pau-ferro, en la ciudad de São Paulo, SP

Resumen

Objetivo: Diagnosticar y analizar el riesgo de caída de árboles de pau-ferro utilizando una metodología desarrollada por los autores, descrita en forma de diagrama de flujo conceptual, que incluye resultados del diagnóstico fitosanitario, eventuales movimientos de suelo, inclinación del tronco y, así como métodos geofísicos para la decisión de riesgo y manejo.

Metodología: Aplicación de procedimientos para analizar el riesgo de caída de árboles considerando aspectos externos e internos, utilizando equipos no destructivos, en paralelo al control de la inclinación del tronco, desplazamientos verticales del suelo y afloramiento radicular del árbol, además de la caracterización de los métodos geofísicos de integración del subsuelo.

Originalidad/Relevancia: Este trabajo muestra el uso de ingeniería civil y técnicas geofísicas para analizar el riesgo de caída de árboles en el entorno urbano.

Resultados: El ejemplar de árbol utilizado como caso de estudio presentaba una aparente cavidad y una pudrición intensa de la madera, así como una raíz torcida y desprendida del suelo, lo que imposibilitaba su anclaje y apoyo. La concentración de raíces, por debajo de la superficie del terreno, no garantizaba la estabilidad debido a la evolución de los desplazamientos verticales de la superficie e inclinación del tronco hacia la avenida, y se indica su supresión por presentar riesgo de caída.

Contribuciones sociales/de gestión: Los árboles ofrecen numerosos beneficios y la obtención de estos privilegios depende de una adecuada gestión que considere su adecuado manejo y seguimiento. La toma de decisiones sobre el riesgo de caída debe basarse en varios análisis, preferentemente basados en métodos no destructivos, reduciendo incertidumbres para que no se eliminen árboles innecesariamente.

Palabras clave: Árbol. Riesgo de caída. Suelo. Geofísica.

Introdução

A NBR 16246-3 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019) estabelece os requisitos para avaliação de risco de árvores, incluindo a integridade estrutural e outros fatores



que afetam o nível de risco para pessoas, propriedades ou serviços públicos, com o intuito de prover informações para o manejo adequado.

A questão da integridade e dos riscos associados às árvores vem sendo estudada há muito tempo; desde a década de 1960, observa-se um crescente aumento do número de estudos relacionados à estabilidade das árvores. No entanto, ainda há incertezas e limitações para análise de risco de queda de árvores, o que dificulta a tomada de decisão sobre o manejo mais adequado (Amaral, 2002, 2014; Brazolin, 2009; Bobrowski, 2016; Rodrigues, 2019). Rollo (2009) reitera que uma desejável avaliação do risco de queda de árvores deve envolver etapas de análise visual externa, análise interna, estabelecimento de critérios para avaliação da ruptura e a tomada de decisão quanto ao manejo. Porém, em muitos casos, ainda se utiliza somente a análise visual externa para a definição do risco, não identificando possíveis danos internos (Carvalho, 2019). A utilização concomitante de métodos de avaliação interna é de grande relevância, pois possibilita um exame das condições do indivíduo arbóreo e o grau de resistência aos diversos esforços solicitantes, tais como flexão, torção, cisalhamento e forças transversais (Bobrowski, 2010).

Neste cenário, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (2003), desenvolveu inicialmente uma metodologia para a realização do diagnóstico da ocorrência de organismos xilófagos, que considera a análise visual externa e a análise interna não destrutiva do tronco, e aprimorou a análise de risco de queda baseada na biomecânica das árvores (Niklas, 1992; Mattheck & Breloer, 1997; Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2004; Brazolin, 2009; Amaral, 2014). Posteriormente, em meados do ano de 2019, o IPT ampliou os estudos, considerando a influência do solo local e a análise das raízes de árvores que se encontram abaixo da superfície do terreno, raramente mapeadas nas análises de risco realizadas no Brasil. O desenvolvimento destas atividades concatenadas para análise de um ser vivo configura uma inovação, pois reúne o conhecimento de diversas áreas para a tomada de decisão do risco de queda da árvore, a partir do conhecimento de algumas incertezas, como a análise do sistema radicular, não aparente, e o entendimento do comportamento do solo e sua influência na inclinação da árvore.

No presente trabalho, discute-se essa abordagem inovadora por meio de um estudo de caso de uma árvore de pau-ferro, para a tomada de decisão do manejo do exemplar arbóreo.

Metodologia

Caracterização da área de estudo

O presente estudo considerou a aplicação da metodologia desenvolvida em uma árvore de pau-ferro da espécie botânica *Libidibia ferrea*, família Fabaceae, localizada no





jardim do Edifício Adriano Marchini, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), na Universidade de São Paulo (USP), *campus* da capital (Figura 1A).

O clima predominante da região é o tropical, que se caracteriza por apresentar verões quentes e chuvosos e inverno seco e pouco frio (Climatologia de São Paulo, 2022). O relevo é plano e, dada a proximidade a importante curso de água, o nível de água no terreno é elevado. As camadas superficiais do solo apresentam matéria orgânica e elevada deformabilidade.

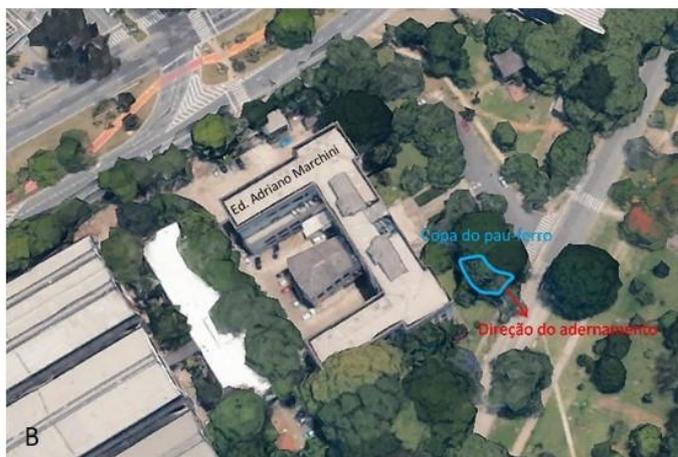
A árvore se encontrava em área ajardinada, com solo permeável, sem qualquer obstrução para o seu pleno desenvolvimento. No local havia outras árvores distribuídas de forma esparsa. O exemplar se apresentava com altura total aproximada de 18 m, diâmetro à altura do peito (DAP) de 58 cm e área de copa de 22 m². Estima-se ter 20 anos, a partir do porte que atinge quando adulto (São Paulo, 2015), considerando que não há informação precisa sobre a idade da árvore.

Como o IPT possui um plano de gestão da floresta urbana em seu campus, esta árvore foi diagnosticada com presença de cavidade aparente e inclinação do tronco, fato este empiricamente pouco observado em árvores desta espécie, e por isso ficou evidenciada a necessidade de um monitoramento específico, em especial pelo fato de que sua eventual queda atingiria a avenida Professor Almeida Prado, via com alto tráfego de veículos e que é a ligação principal para o terminal de ônibus da Cidade Universitária.



Figura 1

(A): Foto geral da árvore de pau-ferro localizada no jardim do Edifício Adriano Marchini – IPT, no campus da USP, na capital; e (B): Localização do pau-ferro em relação às vias locais, com tendência de tombamento no sentido da Avenida Prof. Almeida Prado



Fonte: Elaboração própria.

Procedimentos metodológicos e premissas para sua aplicação

O monitoramento do exemplar arbóreo envolveu a realização de inspeções periódicas para: I) verificar a progressão da biodeterioração (cupins xilófagos e fungos apodrecedores) e para categorizar a árvore quanto ao seu risco de queda em baixo, médio ou alto para ruptura no tronco; II) controlar a inclinação do tronco; III) avaliar a ação geotécnica do subsolo no que tange a sua resistência e sua deformabilidade a longo prazo; e IV) analisar o sistema radicular que se encontrava abaixo da superfície do terreno junto à árvore e as principais características físicas e litológicas do subsolo que complementam as investigações geotécnicas.

Para analisar o risco de queda da árvore de pau-ferro – em especial nos casos em que a categorização do risco de ruptura no tronco resulta em nível baixo ou médio – e tomar a decisão do manejo, como poda ou supressão, foram admitidas algumas premissas conceituais integrando todos os métodos utilizados, sendo:



- a. árvore em estudo encontra-se em ambiente urbano;
- b. a profundidade das raízes é de até 0,7 m;
- c. árvores de pau-ferro não costumam apresentar inclinação do tronco e nem raiz exposta;
- d. embora seja um ser vivo, a árvore pode ser associada a um elemento estrutural tipo viga em balanço, com vínculo duplo (rotação é permitida), em analogia aos estudos da área de engenharia civil;
- e. vale o axioma da biomecânica de equivalência e uniformidade de resistência entre o tronco da árvore e raiz;
- f. não houve obras de escavação próximas que pudessem comprometer a árvore;
- g. não há obras subterrâneas no local onde a árvore se encontra;
- h. são válidos os conceitos e leis da Mecânica dos Solos para caracterizar o maciço no qual a árvore em estudo se encontra;
- i. pode-se realizar ensaios invasivos (não prejudiciais) e não invasivos (geofísicos) para investigação das características do maciço de solo onde a árvore se situa;
- j. a superfície do terreno pode estar pavimentada, vegetada ou com solo exposto; no entanto, em áreas pavimentadas pode ser mais dificultosa a execução de ensaios geofísicos, com exceção do GPR.

1 Progressão da biodeterioração

A verificação da progressão da biodeterioração foi realizada por meio de inspeções periódicas, a cada três meses, durante um período de nove meses, utilizando-se a Tecnologia IPT para inspeção de árvores, método estabelecido em patente (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2003), e o software Arbio (Viríssimo et al., 2013) para o cadastro das metodologias de análise externa, análise interna do fuste e das simulações de risco de queda para a ruptura no tronco. A avaliação da árvore foi feita ao nível do solo, não sendo realizado qualquer trabalho em altura, segundo as definições da NR 35 – Trabalho em Altura.

1.1 Análise externa

Para esta análise são considerados seis itens: Identificação botânica; Dendrometria; Densidade; Estado geral; Condições de entorno; e Estado fitossanitário. A descrição completa de cada um é relatada na sequência, independentemente de ter sido observado na árvore de pau-ferro objeto do estudo de caso.

- a. Identificação botânica – realizada ao nível taxonômico possível, conforme material vegetativo (flor, fruto e folhas) disponível no momento da análise.



- b. Dendrometria – com auxílio de trena florestal e hipsômetro, foram levantadas as seguintes características da árvore: altura total, altura da 1ª bifurcação, área da copa, excentricidade e ângulo de inclinação do tronco aproximados, diâmetro à altura do peito – DAP e diâmetro do colo – DC quando a primeira bifurcação era inferior a 1,30 m.
- c. Densidade aparente da árvore, que fornece várias informações sobre as propriedades mecânicas da madeira – é determinada a partir da identificação da espécie arbórea e por meio de consulta às classificações disponíveis em literatura (Lorenzi, 1992; Silva et al., 2021).
- d. Estado geral – classificado inicialmente em: morta (sem fluxo de seiva); com declínio (apresentando sinais de doença, como casca solta, galhos secos ou parte da árvore já morta) ou vigorosa (sem quaisquer sinais de doenças ou pragas). Para as raízes aparentes, foi avaliada a ocorrência de dobra ou enovelamento, ferida/poda e barreira física. Na avaliação do tronco, observou-se a existência de múltiplos troncos, inclinação acentuada, casca inclusa, feridas, rachaduras e cavidade aparente, até a altura de dois metros. A avaliação do estado geral da copa consistiu na observação visual de epífitas e parasitas (figueira mata pau, erva-de-passarinho e fios de ovos), desequilíbrio de copa (deslocamento do centro de gravidade), galhos secos ou com deterioração, toco de poda, ramos epicórmicos, podas inadequadas (em “V”, drástica, lateral e com deterioração) e 1ª bifurcação com apodrecimento, ataque de insetos ou rachaduras. E ainda foi verificada a presença dos aspectos positivos de crescimento adaptado ou auto-otimização da árvore (biomecânica) para superar defeitos, como espessamento longitudinal (“costelas”), espessamento/protuberância no tronco e raízes tabulares. A ocorrência das ações antrópicas, tais como anelamento, estrangulamento, caiação/pintura, colisão de veículos, colo soterrado, preenchimento de cavidades, envenenamento e fixação de objetos também foi verificada.
- e. Condições de entorno – referem-se aos aspectos do ambiente construído que poderiam afetar o desenvolvimento da árvore e da sua exposição ao vento. Os atributos analisados foram: interferências com rede de energia elétrica aérea (rede primária, rede secundária, domiciliar, ramal elétrico, estai e transformador), caixa de inspeção, espécie arbórea, fachada de edificação, instalação subterrânea (água, esgoto, fluvial, gás e cabos elétricos), mobiliário urbano e postes. Caso a árvore se encontre no sistema viário, informações da calçada (largura e faixa livre para pedestres) e canteiro (adequação de área permeável e dimensões) também são coletadas. No que se refere à exposição da árvore ao vento, observou-se a disposição dos prédios e de outras árvores do entorno que pudessem oferecer uma barreira de proteção à árvore em estudo.





- f. Estado fitossanitário – foi verificada a ocorrência de fungos apodrecedores, cupins xilófagos e brocas de madeira no sistema radicular (quando exposto), no tronco e na copa (1ª bifurcação), até a altura de dois metros.

A presença dos fungos apodrecedores foi caracterizada pela observação de corpos de frutificação ou pelo ataque do lenho nas seguintes intensidades: superficial; moderado, quando atingia o alburno; ou intenso, quando progredia para o cerne.

No caso dos cupins, sua identificação se baseou no hábito de nidificação (subterrâneo, arborícola ou de madeira), na ocorrência de estrutura de ninho, túneis ou vestígios, no ataque do lenho, na dispersão no solo e na presença de resíduos (fezes) e atividade (insetos vivos). A ocorrência de brocas de madeira foi observada pelo seu ataque no lenho (orifícios, resíduos ou exsudado) ou pela presença do inseto.

Quando presentes, os cupins e as brocas de madeira foram coletados com uma pinça e acondicionados em vidros com álcool a 70% e os corpos de frutificação dos fungos apodrecedores em sacos de papel. A identificação desses organismos foi realizada pelo IPT.

1.2 Análise interna

A árvore foi analisada internamente quanto à ocorrência de deterioração e quantificação do lenho (alburno ou cerne) sadio remanescente. Esta análise foi feita por meio de prospecção não destrutiva, com auxílio de um aparelho tipo penetrógrafo, com uma broca de 1,5 mm de diâmetro. As análises com este equipamento baseiam-se na informação de que, durante o processo de deterioração do lenho, ocorre a diminuição da sua resistência à perfuração. Ressalta-se que o penetrógrafo registra apenas os dados que se encontram no local de passagem da broca. As prospecções foram realizadas no colo (transição raiz e tronco), a uma altura aproximada de 10 cm do solo, pois neste local se concentram tensões devido às forças da ação do vento sobre a copa e peso próprio, podendo levar a uma ruptura.

Para complementação dos dados obtidos com a prospecção, foi feita uma inspeção mais detalhada de toda a seção transversal da árvore com a utilização do tomógrafo por impulso mecânico (Figura 2) que, propagando ondas sônicas pelo interior da árvore, cria um mapa de velocidades percorridas no lenho que representam processos de alteração. Com estas duas análises, a árvore foi diagnosticada quanto à sua condição interna em: *sadia* ou *deteriorada* por organismos xilófagos. Quando constatada a existência de deterioração interna, calculou-se a porcentagem da área deteriorada aproximada em relação à área transversal do tronco, sendo estabelecidas as seguintes classes de deterioração: pequena, de 1,0 a 11,0%; média, de 11,1% a 44,0%; e grande, acima de 44,1%, conforme classificação proposta por Brazolin (2009).



Figura 2

(A): Módulos de sensores tomográficos; e (B) unidade de processamento de cálculo da onda mecânica



Fonte: Elaboração própria.

1.3 Análise do risco de ruptura do tronco

A análise do risco de ruptura do tronco foi feita a partir da análise externa e interna do fuste e ficou restrita à possibilidade de ruptura da árvore no tronco, até a altura de dois metros, quando observadas evidências externas de problemas. Não foi avaliada a quebra de galhos, o que exigiria trabalho em altura, nem o pivotamento do sistema radicular, pois não há ainda no Brasil um modelo matemático que considere a análise sobre o pivotamento ou



arrancamento do sistema radicular (torrão). Para tal análise, levaram-se em consideração as informações obtidas nas avaliações externas, relacionadas à condição biológica, estado geral e aspectos da biomecânica (crescimento adaptado ou auto-otimização), e interna (sadia e deteriorada), para categorização da árvore quanto ao seu risco de queda em: baixo, sem quaisquer defeitos significativos; médio, com defeitos associados à ruptura, mas ainda com processos de auto-otimização e sinais de manutenção de estabilidade estrutural; ou alto, cujos defeitos representam risco iminente de ruptura no tronco.

Para o risco de ruptura no tronco, até dois metros de altura, é utilizada a “regra do 1/3”, ou seja, qualquer deterioração interna não pode exceder a 2/3 do raio, permanecendo, no mínimo, 1/3 do lenho sadio, a partir da superfície do tronco. Esse parâmetro é válido desde que não haja outros fatores, como: feridas, ocos, desequilíbrio da copa ou inclinação acentuada do tronco (Mattheck & Breloer, 1997).

A relação entre a altura total da árvore (H) e o diâmetro do tronco (D), também conhecida como modelo de esbeltez, foi considerada, sendo o risco de ruptura indicado quando: $H/D > 50$, para árvores em locais de baixa incidência de ventos fortes ou protegidas por prédios e outras árvores, caso da árvore em estudo; ou $H/D > 30$, para árvores expostas aos esforços de ventos significativos. Esse modelo não é válido para árvores jovens ou com bifurcação baixa em relação à altura total da árvore (Mattheck, 2007).

Também foi utilizado um modelo dinâmico probabilístico para avaliação do risco da árvore para ruptura do tronco a partir da predição de ruína frente a 12 diferentes velocidades de vento (escala de Beaufort) (Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2021). Esse modelo utiliza os dados da dendrometria, densidade aparente, análise interna do fuste e fator de barreira (condição do entorno que indica a exposição da árvore aos ventos).

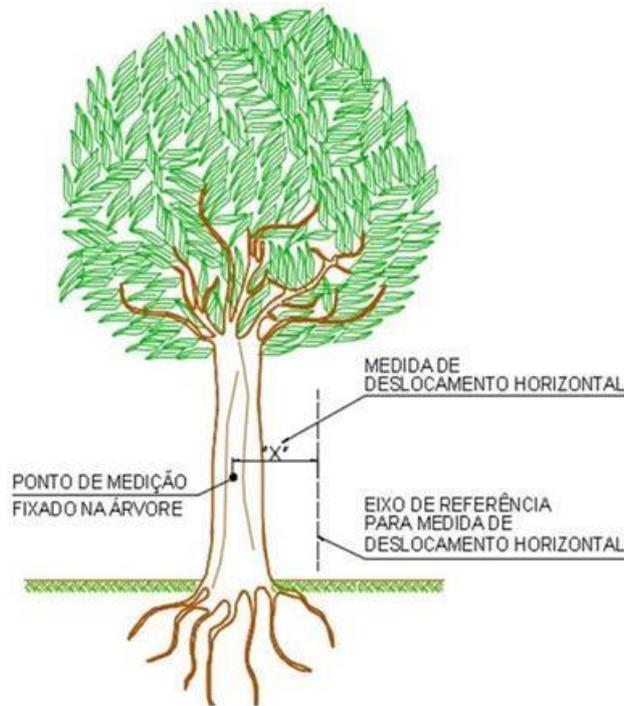
2 Controle da inclinação do tronco

O monitoramento da inclinação do pau-ferro foi realizado no período de 11 meses, por meio de leituras com intervalo máximo de dois meses, adotando-se menores intervalos de tempo nas estações chuvosas. O trabalho de monitoramento foi desenvolvido utilizando-se técnicas topográficas, com o uso de teodolito, régua milimétrica e pregos de aço para marcação das referências e pontos de medida. O estudo limitou-se a medidas em um plano bidimensional, visando à aferição do deslocamento horizontal (eixo x) de um ponto (Figura 3), com o objetivo de associar as medições realizadas a uma eventual tendência de adernamento da árvore.



Figura 3

Desenho esquemático das medidas de inclinação



Fonte: Elaboração própria.

3 Caracterização Geotécnica do Subsolo

A caracterização do subsolo foi feita por meio do monitoramento dos deslocamentos verticais da superfície do terreno e ensaios geofísicos, descritos a seguir:

3.1 Monitoramento dos deslocamentos

O monitoramento dos deslocamentos do solo superficial e da raiz aflorada da árvore de pau-ferro foi realizado no período de sete meses e tal periodicidade se deu de acordo com as discussões entre as equipes, com maior número de leituras nos períodos das estações chuvosas.

O objetivo do trabalho foi monitorar, por meio de instrumentação específica, a eventual ocorrência de recalques do solo superficial e da raiz aflorada da árvore de pau-ferro, e seus efeitos na estabilidade da árvore. A instrumentação foi composta por pinos de recalque, marcos superficiais, pregos fixados às raízes aparentes e uma referência fixa no edifício Adriano Marchini, com leituras por meio de nível topográfico de precisão e régua de invar.

Em paralelo ao monitoramento de campo, fez-se um estudo teórico do comportamento do solo local no que tange ao desenvolvimento dos recalques de longo prazo e a sua capacidade de suporte para correlação com o comportamento indicado pela instrumentação.



3.2 Ensaios geofísicos

A caracterização do subsolo foi feita ao longo de um período de três meses, a partir da integração dos resultados de diferentes métodos geofísicos, não invasivos: eletrorresistividade (imageamento elétrico), sísmica de refração, ensaio com ondas de superfície (MASW) e *Ground Penetrating Radar* (GPR). Estas técnicas foram aplicadas para avaliar principalmente a presença e a distribuição das raízes que se encontravam abaixo da superfície do terreno, as propriedades do solo (porosidade e teor de umidade), além da verificação da eventual existência de interferências subterrâneas para confirmação das informações contidas nas plantas da área fornecidas pela USP.

O método da eletrorresistividade mede a distribuição de resistividade elétrica do solo por meio da injeção de corrente elétrica utilizando eletrodos fixados na superfície do terreno. A resistividade elétrica é a capacidade que o meio tem de se opor à passagem dessa corrente, sendo que meios mais arenosos, por exemplo, apresentam maiores valores de resistividade, enquanto que meios com maior teor de água apresentam menores valores. A sísmica de refração e o MASW medem o tempo de percurso de uma onda acústica gerada por uma fonte artificial (marreta) que percorre as camadas da terra. A velocidade de propagação dessas ondas está ligada às propriedades físicas do meio, como densidade, teor de água e especificamente com o MASW, a rigidez do material. Já o GPR trata-se de um método de reflexão de ondas eletromagnéticas de alta frequência (10 MHz a 2600 MHz), emitidas por uma antena na superfície, em que é possível obter uma imagem em alta resolução do subsolo, em que a profundidade de investigação varia de acordo com a frequência utilizada e as propriedades do meio.

Com a finalidade de contribuir para a interpretação dos resultados dos ensaios geofísicos (indiretos) e a obtenção de dados mais confiáveis, foi feita uma sondagem a trado manual (ensaio mecânico invasivo) para caracterização tátil-visual dos horizontes de solo existentes nas camadas superficiais (até 4 m de profundidade) do terreno.

Nesta análise geofísica buscou-se caracterizar a subsuperfície e relacionar os resultados com o comportamento estrutural da árvore, juntamente com as análises de recalque do solo, para auxiliar na análise do risco de queda e na tomada de decisão do correto manejo.

Para a investigação das características do subsolo, foi estabelecido um perfil (linha com 24 m de extensão) sobre o qual foram efetuados os ensaios de eletrorresistividade (imageamento elétrico), sísmica de refração e MASW e a sondagem direta com furo a trado. Para a eletrorresistividade utilizou-se um arranjo de eletrodos dipolo-dipolo, com espaçamentos múltiplos de 1 m e 2 m. Já para a sísmica de refração utilizou-se um sísmógrafo de 24 canais e geofones de 8 Hz (4 Hz para o MASW) além de uma marreta como



fonte sísmica. Já para a caracterização do sistema radicular que se encontrava abaixo da superfície do terreno, utilizou-se uma antena GPR de 800 MHz, com uma área de aquisição de 5,0 m x 5,0 m ao redor da árvore de pau-ferro, com perfis nas direções X e Y espaçados de 0,2 m. O cálculo de porosidade e teor de umidade foram obtidos a partir de modelos clássicos presentes na literatura (Topp et al., 1980; Ledieu et al., 1986) que relacionam o parâmetro constante dielétrica, medido pelo GPR, com as propriedades do solo.

4 Fluxograma para análise do risco de queda

A partir dos estudos desenvolvidos, foram elaborados os princípios conceituais para organização de um fluxograma que contextualizasse o processo de tomada de decisão do risco de queda da árvore de pau-ferro e do seu manejo, ou qualquer outra árvore a ser analisada, considerando a integração de todos os resultados dos métodos utilizados, sendo: classificação do risco de ruptura do tronco, o controle da inclinação do fuste, a avaliação das características geotécnicas do subsolo e a análise do sistema radicular que se encontrava abaixo da superfície do terreno.

No fluxograma apresentado também foram consideradas as seguintes práticas de manejo: adequação de canteiro, faixa permeável, edificações ou equipamentos urbanos; remoção de alvo ou restrição de ocupação ou circulação de pessoas; avaliação técnica especializada para doenças e outras pragas; instalação de sistemas de sustentação, como cabeamento ou escoras; transplante; poda de galhos; tratamento fitossanitário; monitoramento do exemplar arbóreo; e supressão.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos em cada uma das etapas do estudo são apresentados e discutidos de forma isolada e, ao final, uma análise integrada do conjunto de informações permite a consolidação da metodologia desenvolvida na forma de um fluxograma orientativo para a tomada de decisão quanto ao manejo das árvores em ambiente urbano.

Progressão da biodeterioração

Durante o período de nove meses de monitoramento da árvore de pau-ferro, não houve alteração na dendrometria e nem na progressão da biodeterioração do lenho. A árvore de pau-ferro apresentou-se com, aproximadamente, 18 m de altura total, diâmetro à altura do peito (DAP) de 58 cm, altura da 1ª bifurcação de 1,5 m, inclinação do tronco de 20 graus, excentricidade e área da copa de 2 m e 22 m², respectivamente.

A árvore estava vigorosa, encontrava-se em área ajardinada, com solo permeável, e com a presença de um aterro (material inconsolidado) sobre camadas de solo.



No sistema radicular notou-se a presença de raiz dobrada e descolada do solo (Figura 4A) impossibilitando sua ancoragem e distribuição de forças de segurança para a sustentação do tronco. Esta raiz também se apresentava com espessamento, entretanto, estava localizada do lado tracionado à inclinação do fuste (Figura 4B), o que significava relevante perda de ancoragem.

O tronco apresentava-se com cavidade aparente de 40 cm de altura x 16 cm de largura (Figura 4A) localizada no lado cisalhado. Em ambos os lados da cavidade, observou-se o crescimento adaptado de “costelas” que são reforços estruturais que podem compensar estruturalmente esta região fragilizada (cavidade), contudo, em um dos pontos, verificou-se o descolamento/fratura de parte do lenho, que pode ter sido ocasionado por tensões de tração, devido ao adernamento do tronco.

Figura 4

A: Raiz dobrada, descolada do solo e local da cavidade; e B: Inclinação do tronco com levantamento da raiz



Fonte: Elaboração própria.



Em sua última inspeção, a copa apresentou-se com poucas folhas, comparada aos outros exemplares de pau-ferro do entorno, e leve desequilíbrio, devido à sua excentricidade. Notou-se também a presença de galhos secos e senis, toco de poda e brotação epicórmica.

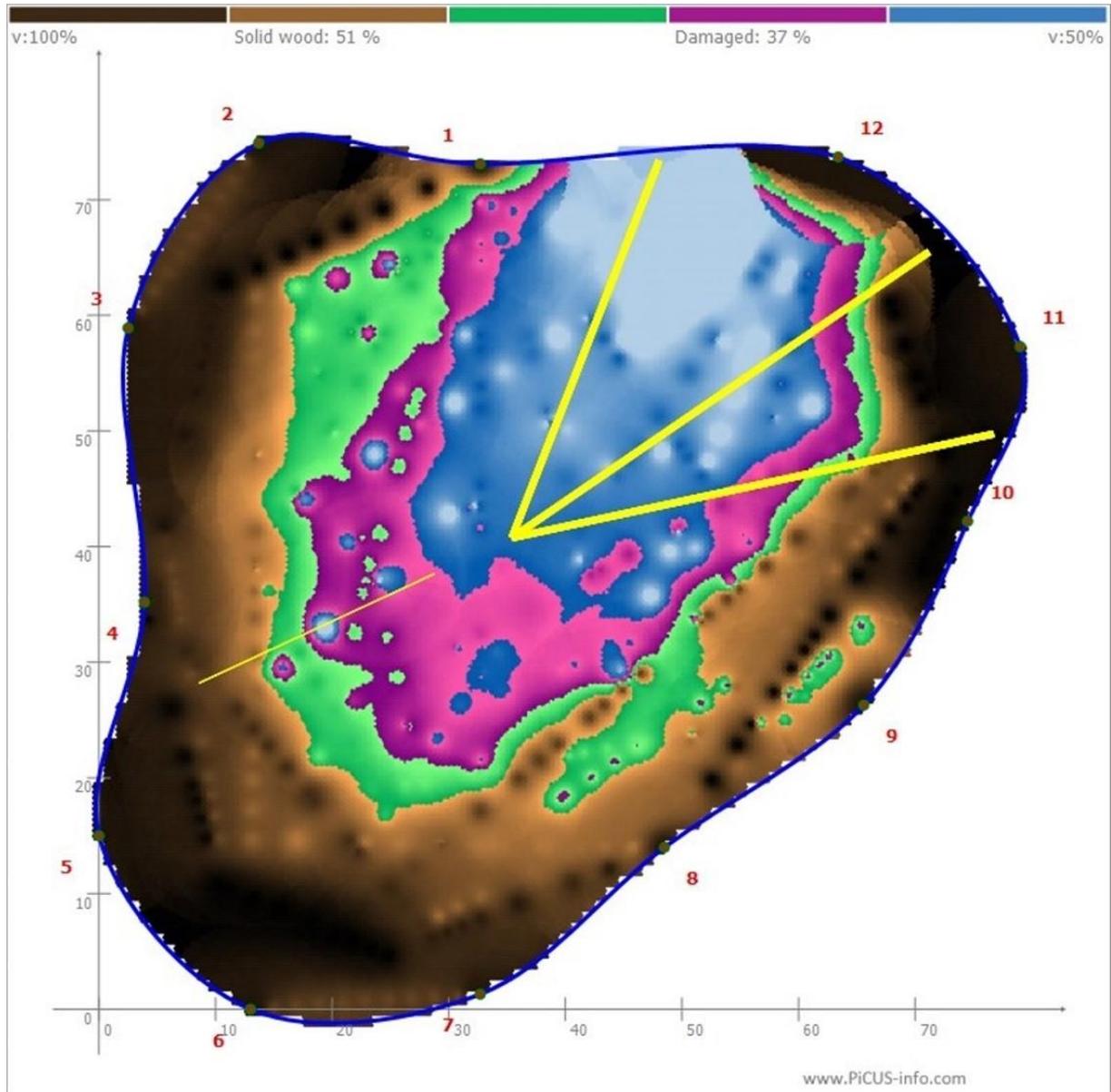
Na avaliação do estado fitossanitário, foi observada a ocorrência de fungos apodrecedores de intensidade superficial na copa, moderada nas raízes aparentes e intensa, causada por podridão branca, no interior da cavidade do tronco.

O diagnóstico interno realizado por meio de tomografia por impulso mecânico (Figura 5) e prospecção (Figura 6) mostrou que a árvore de pau-ferro apresentava uma média deterioração na região do tronco. De acordo com a Figura 5, há indicação de que a tomografia não evidenciou a cavidade, localizada entre os pontos 3 e 4, provavelmente por ter sido feito acima desta região.



Figura 5

Imagem tomográfica da seção transversal da região do tronco. As numerações nos eixos X e Y apontam o diâmetro aproximado da seção analisada. A numeração no entorno da geometria representa os pontos dos sensores de medição; e as linhas amarelas, local com tendência de rachaduras do lenho. As cores preta e marrom indicam lenho sadio, com alta velocidade da onda mecânica; as cores lilás e azul indicam lenho com intensa deterioração ou ausência de lenho (cavidade), ou seja, baixa velocidade da onda mecânica. A cor verde, lenho com alteração nas suas propriedades mecânicas, mas ainda com resistência

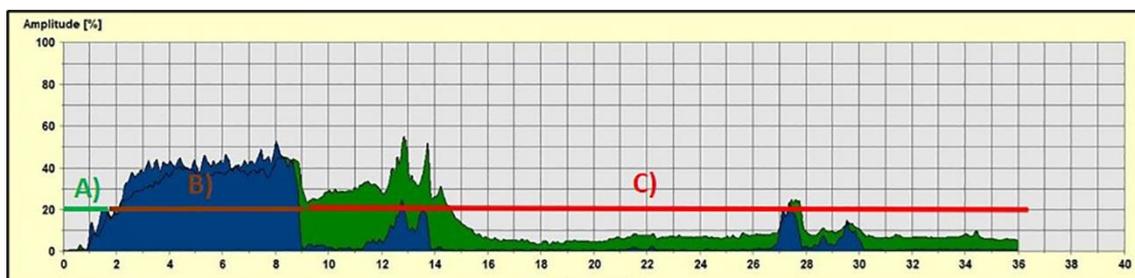


Fonte: Elaboração própria.



Figura 6

Leitura de um dos gráficos da prospecção do tronco da árvore, entre os pontos 1 e 12 (Figura 5). Indicação da resistência mecânica do lenho à penetração da broca (eixo Y) e profundidade da penetração (eixo X). (A): Linha verde representa região da casca/alburno; (B) linha marrom representa o lenho sadio; e (C): Linha vermelha representa o lenho com deterioração



Fonte: Elaboração própria.

A deterioração encontrada na região do tronco mostrou-se estável em todo período de monitoramento, com pouca evolução, mantendo-se classificada como média deterioração. A regra do “1/3” não pôde ser aplicada já que a árvore apresentava cavidade aparente. A análise do modelo de esbeltez ($H/D=19$) indicou risco baixo, bem como o modelo dinâmico probabilístico com baixa probabilidade de ruptura, mesmo com alta velocidade de vento.

Diante do exposto, pode-se concluir que a categorização da árvore de pau-ferro quanto ao seu risco de queda para ruptura no tronco, considerando apenas os resultados da análise externa e interna, é média; com defeitos associados à ruptura, mas ainda com processos de auto-otimização e sinais de manutenção de estabilidade estrutural.

Controle da inclinação do tronco

Assim como os recalques do solo, as medidas de adernamento indicaram tendência de movimentação, com velocidades de desenvolvimento baixas.

Características Geotécnicas do Subsolo

a) Deslocamentos do solo

As medições topográficas indicaram a ocorrência de movimentações de pequena magnitude, confirmando a presença de solos compressíveis nas camadas superficiais do terreno, onde se encontravam as raízes de sustentação do pau-ferro, conforme indicado pelo resultado do GPR, a seguir. Cabe destacar que o período de monitoramento foi relativamente curto para avaliação quantitativa de deslocamentos, mas o suficiente para a confirmação de tendência de comportamento.

b) Métodos geofísicos





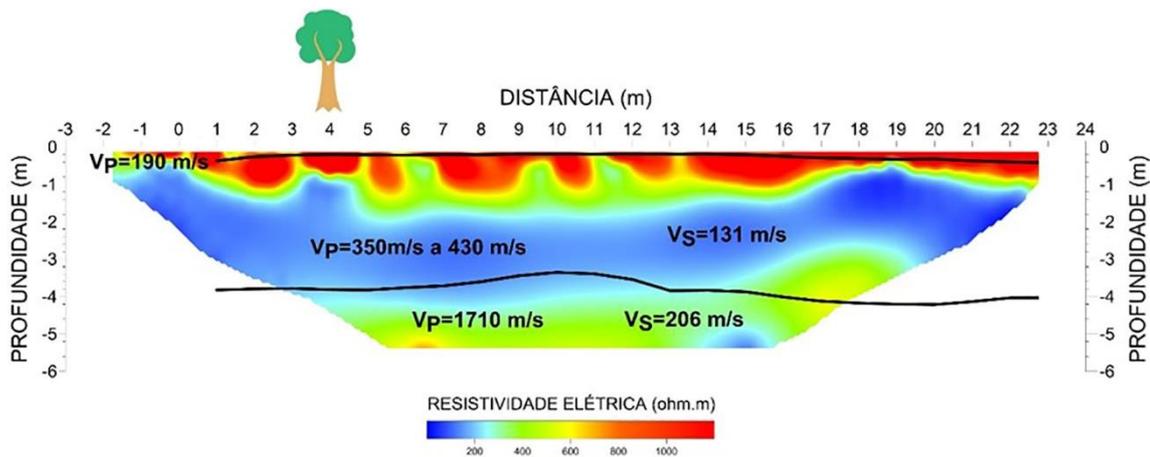
A Figura 7 mostra o resultado do levantamento geofísico, sob o formato de uma seção 2D, representando a subsuperfície no entorno da árvore que estava localizada na posição 4 m. As cores da seção correspondem à distribuição da resistividade elétrica no subsolo, parâmetro que tem uma forte relação com o teor de umidade do solo.

Observa-se uma região mais rasa e com valores altos de resistividade (cores quentes), sobreposta a uma camada de baixa resistividade (tonalidades em azul).

Sobre esta seção 2D, adicionalmente, estão assinaladas as interfaces (linhas em preto) e os valores de velocidades das ondas sísmicas V_P (onda compressional) e V_S (onda de cisalhamento), parâmetros obtidos pelo método da sísmica de refração e pelo ensaio MASW, respectivamente.

Figura 7

Seção 2D modelada, com os resultados integrados dos ensaios geofísicos (eletrorresistividade, sísmica de refração e MASW)



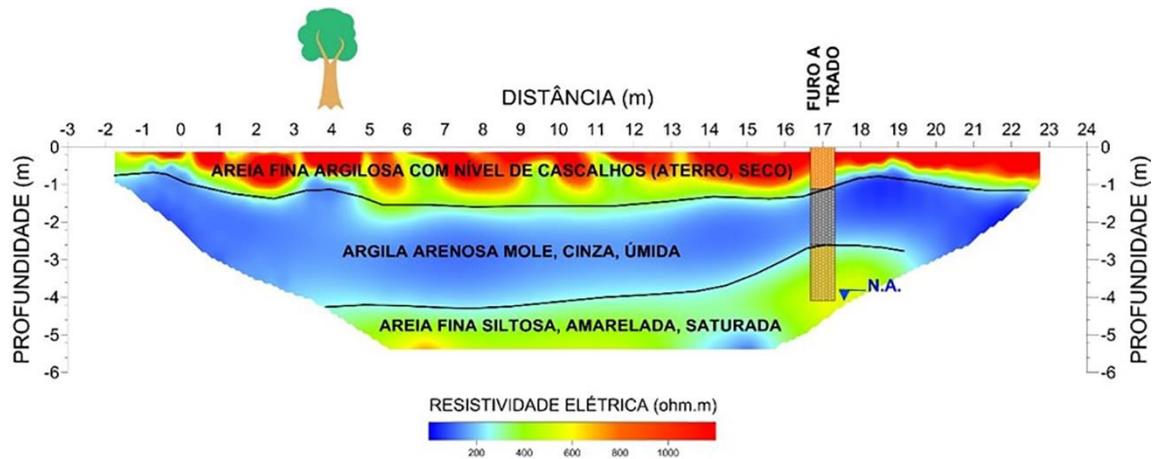
Fonte: Elaboração própria.

Agregando as informações diretas obtidas com o furo a trado foi estabelecida uma correlação dos resultados dos ensaios geofísicos com as litologias identificadas. Este resultado é mostrado sobre a mesma seção 2D apresentada na Figura 7 e as respectivas litologias que ocorrem no local (Figura 8).



Figura 8

Modelo de subsuperfície, interpretado com base nos resultados dos ensaios geofísicos (indiretos) e das informações diretas obtidas com o furo a trado, mostrando as litologias que ocorrem na área e suas condições com relação à ocorrência de água no subsolo



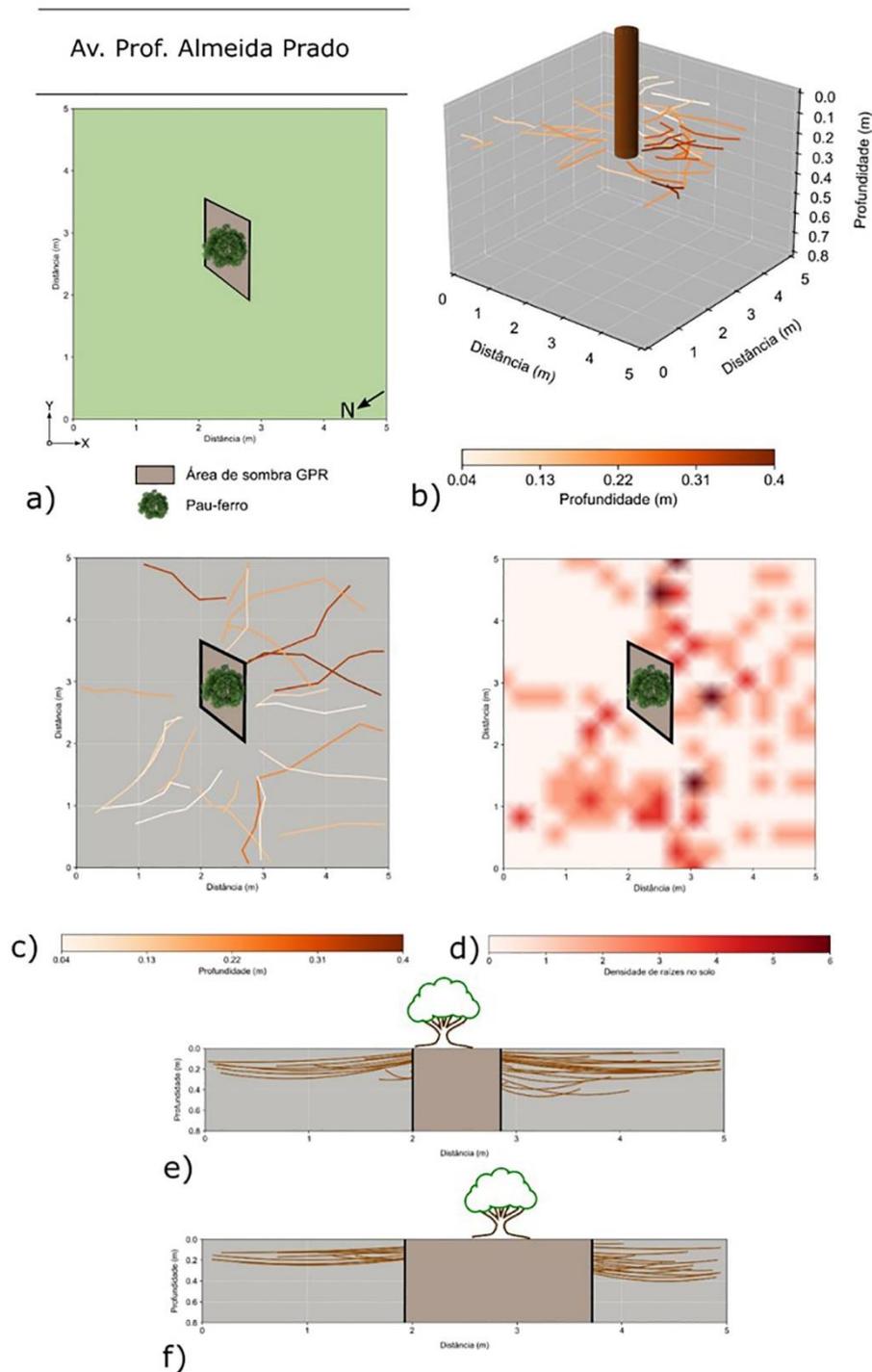
Fonte: Elaboração própria

A Figura 9 mostra a representação do sistema radicular obtido pelo processamento dos dados GPR. Na Figura 9a tem-se o esquema da área de aquisição, com o pau-ferro ao centro e as duas direções X e Y de aquisição. A profundidade máxima onde foi possível mapear as raízes foi de 0,4 m, no solo de areia fina argilosa e aterro. As raízes estavam distribuídas em toda a região analisada, não sendo observada uma direção preferencial, quando examinadas em 3D, na visualização da Figura 9b em função da profundidade (2D), no mapa de contagem de raízes no subsolo e nos perfis nas duas direções de aquisição (Figuras 9b, 9c, 9d, 9e e 9f, respectivamente), indicando uma boa disposição e não havendo impedimento para o seu desenvolvimento. Com uma resolução (dimensão mínima de detecção pelo GPR) de 3,1 cm, o diâmetro das raízes encontradas variou entre 3,5 cm e 8,9 cm. Já o solo superficial (até 1,3 m) apresenta porosidade de 23% e conteúdo de água de 29%, mostrando-se um solo compacto e seco, além da confirmação da inexistência de outras ocorrências no solo (tubulações ou cabos elétricos), conforme analisado nas plantas disponíveis da área.



Figura 9

Representação do sistema radicular do pau-ferro obtido pelo método GPR. a) Croqui esquemático da área de aquisição. b) Distribuição tridimensional do sistema radicular. c) Distribuição espacial variando com a profundidade do sistema radicular. d) Mapa de ocorrência de raízes no subsolo. e) Perfil na direção X com a distribuição das raízes. f) Perfil na direção Y com a distribuição das raízes



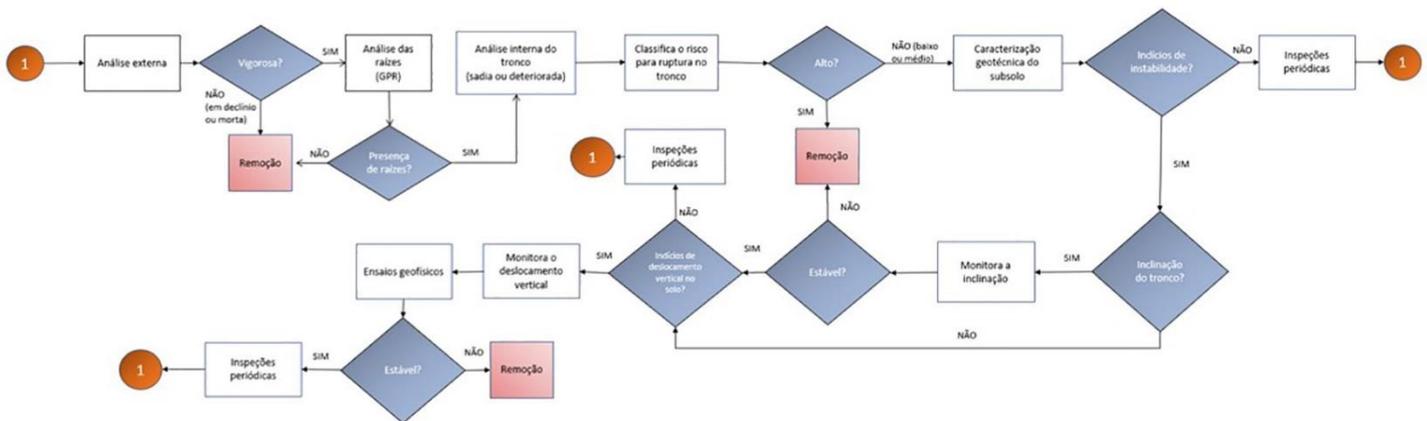
Fonte: Elaboração própria.



O fluxograma (Figura 10) integra as premissas e os resultados do diagnóstico fitossanitário, do deslocamento do solo, do controle da inclinação do tronco e dos métodos geofísicos para a tomada de decisão do manejo da árvore.

Figura 10

Fluxograma de procedimento para análise do risco de queda da árvore de pau-ferro



Fonte: Elaboração própria.

Para a tomada de decisão do risco, utilizando o fluxograma proposto, foi verificada a avaliação de alvo considerando a área ao redor da árvore, circunscrita num raio de 1,5 vezes a altura total do exemplar arbóreo, caso ocorresse a queda da árvore. Nessa análise, foram avaliados possíveis riscos aos bens materiais e à vida humana, pela frequência de circulação de pessoas ou veículos nas proximidades da árvore e tipo de via. A análise de alvo auxilia na priorização de ações de manejo, principalmente quando não há possibilidade de remoção do alvo ou isolamento da área a ser afetada pela possível queda da árvore.

Apesar de a árvore de pau-ferro possuir um sistema radicular estabelecido, foram constatadas evidências objetivas de risco de queda devido à evolução dos recalques de superfície, ou seja, o abaulamento da superfície do terreno no entorno da árvore, e consequente inclinação do tronco em direção à Avenida Professor Almeida Prado, via com alto tráfego de veículos. Diante do exposto, recomendou-se a remoção da árvore.

Conclusões

A seguir, são apresentadas as conclusões da análise do risco de queda da árvore de pau-ferro a partir da integração de dados dos resultados do conjunto de ensaios, medidas e monitoramentos realizados, segundo a metodologia proposta:



- O pau-ferro possui raízes pouco profundas, dispostas em planos concentrados a poucos centímetros abaixo da superfície do terreno, estando, portanto, suscetível às eventuais interferências e deformabilidades da camada superficial do terreno;
- O subsolo local apresenta uma camada superficial de aterro, na qual se encontram as raízes do pau-ferro, sobrejacente a solo de elevada compressibilidade, saturado, sujeito a recalques quando submetido a incrementos de carregamento;
- Os deslocamentos verticais de superfície evoluem lentamente com o passar do tempo, assim como a inclinação do tronco do pau-ferro;
- A inclinação do tronco altera a excentricidade da copa e possibilita a mudança do eixo de gravidade, favorecendo a queda;
- Apesar da cavidade aparente no tronco, foram encontradas concentrações de raízes nesta área.

Em face dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta, que amplia o conceito do risco de queda para além daquela que envolve apenas a ruptura do tronco, conclui-se que a árvore de pau-ferro analisada se encontra com risco de queda, devendo ser suprimida, para não colocar em risco a infraestrutura, bens materiais e vidas humanas.

A árvore de pau-ferro estava vigorosa, localizada em área ajardinada, com solo permeável, e com a presença de um aterro (material inconsolidado) sobre camadas de solo. O exemplar apresentava cavidade aparente e apodrecimento intenso do lenho no tronco. Observou-se raiz de grande diâmetro dobrada e descolada do solo impossibilitando a ancoragem e distribuição de forças de segurança para a sustentação do tronco. As concentrações de raízes observadas abaixo da superfície do terreno não garantiam a estabilidade da árvore devido à evolução dos deslocamentos verticais e a inclinação do tronco para a Avenida Professor Almeida Prado. Diante do exposto, a árvore foi indicada para supressão por apresentar evidências objetivas de risco de queda.

Destaca-se que o trabalho realizado deve ser considerado como uma fotografia do momento do diagnóstico. Cada árvore, de acordo com as características da espécie (densidade de massa da madeira e durabilidade natural), medidas dendrométricas (altura total, área da copa), idade, local que se encontra plantada e seu estado geral, reage de maneira específica frente a uma lesão ou ataque sofrido por agentes biológicos e ação do vento e chuva.

Tendo como base um projeto desenvolvido em parceria com a Prefeitura do Município de São Paulo (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2004), de maneira geral, recomenda-se, para as árvores com ocorrência de cupins e fungos xilófagos (deterioração externa ou interna), uma periodicidade de monitoramento de dois anos entre as inspeções. Exceção feita para as árvores classificadas com risco médio, para a qual sugere-se inspeções anuais. Para as árvores saudáveis, de três a cinco anos.



Ressalta-se que não é possível garantir que não ocorra algum problema antes desses prazos, visto ainda existirem incertezas nas análises de árvores como a ocorrência de eventos climáticos de forte intensidade.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado a partir do Termo de Cooperação (nº 0070/2019) firmado entre o IPT e a empresa Kern Geo Soluções. SANTOS, V. agradece a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio institucional e financeiro para o desenvolvimento do Projeto PIPE (processos: 2019/09483-0, 2020/09315-8). Os autores agradecem também aos pesquisadores e técnicos do IPT que apoiaram e ajudaram no desenvolvimento das pesquisas e atividades de campo.

Referências

- Amaral, R. D. A. M. (2002). *Diagnóstico da ocorrência de cupins xilófagos em árvores urbanas do bairro de Higienópolis na cidade de São Paulo*. Dissertação de mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.
- Amaral, R. D. A. M. (2014). Diagnóstico e análise de risco de queda de árvores. In *Anais do IV Encontro de Gestores de Jardins Históricos*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *ABNTNBR 16246-3. Florestas urbanas – Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas – Parte 3: Avaliação de risco de árvores*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Bobrowski, R. (2010). A avaliação de árvores e ações de manejo de risco. In *Anais do II Seminário de Atualização Florestal & XV Semana de Estudos Florestais*. Irati-PR, Brasil. Universidade Estadual do Centro-Oeste.
<https://anais.unicentro.br/sef/iisef/pdf/palestras/Bobrowski.pdf>
- Bobrowski, R. (2016). Problemas e distinções entre métodos de avaliação da condição geral de árvores urbanas. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, Piracicaba, 11(2), 01–11. <http://dx.doi.org/10.5380/revsbau.v11i2.63437>
- Brazolin, S. (2009). *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, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.
- Carvalho, C. A. (2019). *Tomógrafo de impulso como método não destrutivo para determinação da sanidade de árvores plantadas às margens do rio Carahá no município de Lages, SC*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, Brasil.
- Climatologia de São Paulo. (2022). *Climatempo*.
<https://www.climatempo.com.br/climatologia/558/saopaulo-sp>
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. (2003). *Metodologia para diagnóstico de cupins*. (BR INPI patente nº PI0300643).





- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. (2004). *Relatório técnico do Diagnóstico e Análise de Risco de Queda das Árvores de Vias Públicas da Cidade de São Paulo – Projeto Operação Árvore Saudável*. São Paulo: Divisão de Produtos Florestais.
- Ledieu, J., De Ridder, P., De Clercq, P., & Dautrebande, S. (1986). A method of measuring soil moisture by time domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 88(3/4), 319–328. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90097-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90097-1)
- Lorenzi, H. (1992). *Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil*. Viçosa: Editora Plantarum.
- Mattheck, C. (2007). *Updated Field Guide for Visual Tree Assessment*. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe Gm. 170p.
- Mattheck, C., & Breloer, R. C. (1997). *The body language of trees: a handbook for failure analysis*. London: Stationery Office.
- Niklas, K. J. (1992). *Plant biomechanics: na engineering approach to plant form and function*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Rodrigues, M. R. (2019). *Geoprocessamento aplicado a gestão de riscos de queda de árvores: estudo de caso em um bairro no município de Belém – PA*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Gestão de Risco e Desastre na Amazônia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
- Rollo, F. M. A. (2009). *Identificação de padrões de resposta a tomografia de impulso em tipuanas (Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze)*. Dissertação de mestrado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.
- São Paulo. (2015). Prefeitura de São Paulo. Secretaria Municipal do Verde e Meio Ambiente. *Manual técnico de arborização urbana (3a ed.)*. São Paulo, PMSP. 124 p.
- Silva, C. E. S., Martins, B. C., Carvalho, P. C. L., Reis, C. A.; Maciel, N. S. R., Pereira, M. G., Gomes, F. J. B., Rolim, S. G., Piotto, D., Carvalho, A. M., & Latorraca, J. V. F. (2021). Caracterização física, mecânica e de trabalhabilidade de madeiras de seis espécies da Mata Atlântica. In: W. V. Vangelista (Ed.). *Madeiras Nativas e Plantadas do Brasil qualidade, pesquisas e atualidades* (pp. 19–41). Guarujá: Cientifica Digital. <https://doi.org/10.37885/210303812>.
- Topp, G., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574–582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp (2021). *Escala Beaufort*. Recuperado de <https://www.fca.unesp.br/#!/instituicao/departamentos/solos-recursos-ambientais/sra/estacao-meteorologica/vento---escala-beaufort/>
- Viríssimo, D. B., Russo, M. C., Machado, M. C., Brazolin, S., Amaral, R. D. A. M., & Yojo, T. (2013). *Patente: ARBIO - Programa de Computador*. (BR patente nº BR512013001323-2).