**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**

**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**

Sérgio Brazolin

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Recursos Florestais, com opção em Tecnologia de
Produtos Florestais

**Piracicaba
2009**

Sérgio Brazolin
Biólogo

**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**

Orientador:
Prof. Dr. **MÁRIO TOMAZELLO FILHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Recursos Florestais, com opção em Tecnologia de
Produtos Florestais

Piracicaba
2009

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Brazolin, Sérgio

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 / Sérgio Brazolin. - - Piracicaba, 2009.
265 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Arborização 2. Árvores ornamentais 3. Biomecânica 4. Cupim 5. Densidade da madeir
6. 6. Espaço urbano 7. Fabaceae 8. Fungos xilófagos 9. Madeira - Anatomia - Deterioração
10. Raios X 11. Tipuana I. Título

CDD 634.9
B827b

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Dedico

Aos meus filhos, Pedro e Mariana.

AGRADECIMENTOS

Caro amigo Tonico,

Pois é, chego ao fim de meu doutorado, uma história longa e que envolveu muitas pessoas. Tudo começou numa conversa com o Prof. Dr. Mário Tomazello Filho, que de imediato e confiante, me aceitou como orientado. Acho que tem uma frase que você usa e sintetiza a relação de respeito, amizade, dedicação e acadêmica que estabeleci durante estes 5 anos com ele: "Esse é do nosso time". Outro que joga no time e que colaborou de forma fundamental para este trabalho foi o Dr. Takashi Yojo do IPT, que sempre me impressiona pelo conhecimento e coragem para encarar novos desafios, como a biomecânica de árvores; uma amizade também construída nos últimos 22 anos. Obviamente, nada seria possível se o Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP não tivesse me dado a oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

No IPT, o Dr. Oswaldo Poffo Ferreira, diretor do CT-Floresta em 2005, me apoiou e estimulou a desenvolver este trabalho. Atualmente nesse cargo, o Dr. Geraldo José Zenid acreditou e viabilizou o meu trabalho nas etapas mais difíceis; a amizade dos dois me é valiosa.

No Laboratório de Preservação de Madeiras e Biodeterioração de Materiais - LPB é onde tudo aconteceu, pois os meus colegas tiveram que assumir grande parte do meu trabalho para que eu pudesse chegar até aqui. E quando falo assumir, vc sabe o que significa - muitas responsabilidades, relatórios, viagens, reuniões etc. Mas o apoio deles foi muito sincero, pois traduziram em atitude e todos se envolveram com o meu trabalho, uns diretamente e outros torcendo de longe, mas torcendo. O Gonzalo pelos ensaios com cupins, além do sacrifício e forte incentivo nos momentos de dificuldade extrema; a Raquel pelo entusiasmo contagiante e crença no nosso trabalho; a Cyntia pela prontidão e interesse; a Bea pela ponderação e calma nos momentos necessários; o Sergio Matias, pela dedicação nas análises químicas e amizade; a Gisleine e o Luis Reis pelas responsabilidades assumidas e; a Linéia, por toda paciência e apoio administrativo. Capítulo especial desta história foi ter conhecido o Mário Albino, como vc sempre diz: "é do nosso time". Realmente, foi fundamental seu apoio, pois participou de todas as etapas, com esmero, paciência, conhecimento e o melhor de tudo, com

entusiasmo. Conquistou a todos do IPT com seu trabalho e caráter. Também devo citar o Hélio, João Faria, Agberto, Manoel, João Cândido, Daniel, Reginaldo (*in memorium*), Márcio da Silva, Mariana, Emerson, Kauê, Silvinha e Vera, seja pelo árduo trabalho de coletar e manipular as amostras (troncos de árvores) ou pela palavra de apoio no café. A Hélene, Luciana Faria e Luciana Marques indiretamente me ajudaram muito assumindo os trabalhos da ABPM e a Conceição, Cidinha, Maria de Lourdes e Valéria me incentivando e dando apoio logístico e administrativo. Enfim, senti que todos queriam me ajudar a fazer o doutorado e, se não "carregaram o piano", pelo menos "levaram a banqueta" ou "ouviram a música".

Ainda no IPT, a Maria José abriu as portas de seu laboratório para eu fazer toda a parte da microscopia e ensaios físicos e mecânicos, mas o que mais me marcou foi a amizade e o auxílio nos momentos difíceis, seja com incensos, florais e/ou uma palavra de carinho. Do time dela, a Cláudia pela presteza e dedicação na montagem das lâminas, o Zinaldo, pelo corte dos toretes e obtenção das amostras, o Paulinho e o Cláudio pela dedicação e esmero nos diminutos corpos-de-prova e ensaios. O Dr. Elias A. Nicolas pela fundamental ajuda e dedicação nas análises de distribuições de tensões do lenho, que foram feitas com presteza e paciência (Tonico, outro do nosso time!). A Maria Luísa, Regina, Marisa e Arlete do LCP pela orientação e apoio nas análises químicas.

Tenho que citar, o Dr Márcio A. R. Nahuz, a Lígia e o Dr. Laps pela torcida e por cada informação que me enviavam sobre as árvores que caíam, eventos, papers, avanços da informática entre outros, que foram muito úteis. O Dr. Rubens H. Dias pelo fundamental apoio nas análises estatísticas e questionamentos feitos, me forçando a refletir melhor sobre os meus dados e resultados; ele ter deixado suas férias para me auxiliar, não tem preço, Tonico.

Na Prefeitura Municipal do Estado de São Paulo, o Eng. Ricardo Borghiani, coordenador do projeto Operação Árvore Saudável em 2004, me apoiou na execução deste trabalho e a Eng. Nelma e o Darci, da subprefeitura da Lapa, que me forneceram todas as amostras de tipuanas, imprescindíveis para a execução deste trabalho; aprendi muito sobre arborização urbana com eles.

Lá em Piracicaba, tive apoio de todos do Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios-X em Madeiras, quando fui aprender a fazer as análises de densitometria, sendo, Luis, Guilherme, Matheus, Jedi, Angel, Moisés, Carlos e Maria.

Tem também as pessoas que são fundamentais pois te auxiliam não com amostras ou discussões acadêmicas, mas te dão conforto e força para continuar, como a Gracinda, pela companhia e leitura das entrelinhas da tese; o Valdecir Ramineli pelo companheirismo, o Dr. Valdecir A. Quarcioni pelo incentivo e exemplo, a Cláudia Saraceni por entender minha luta e segurar a barra da diferente, mas bela família que formamos juntos e, claro, Dona Irene e Sr. Boanerges.

Não posso esquecer o Antônio Carlos Franco Barbosa. Conhece esse rapaz, Tônico?. Falar de suas lâminas é dispensável, pois é só pegar centenas de dissertações e teses que passaram por vc e perceberás como seu trabalho é magnífico. Mas, para mim você foi muito especial, pois aprendi que a verdadeira genialidade, criatividade e sabedoria esta na simplicidade. Foi uma oportunidade ímpar ter sua companhia nas noites e finais-de-semana no laboratório; as conversas que tínhamos sobre todo este processo e sobre a vida, me ajudaram a compreender, organizar e nunca desanimar.

Muito obrigado amigo Tônico, vc também foi meu orientador. Acho que o Mário e o Takashi não irão se importar com isso, pois eles são "do time", certo?

Enfim, eu contei 65 pessoas envolvidas direta ou indiretamente nesta tese, mas com certeza, o número é bem maior, isso dá o que pensar...

"O caos é uma ordem por decifrar"
(inexistente *Livro dos Contrários* de José Saramago)

SUMÁRIO

RESUMO.....	15
ABSTRACT.....	17
LISTA DE FIGURAS.....	19
LISTA DE TABELAS.....	27
1 INTRODUÇÃO.....	31
2 OBJETIVOS.....	35
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
3.1 As árvores de tipuana: dendrologia, características de lenho e utilização na arborização urbana.....	37
3.1.1 Dendrologia das árvores de tipuana.....	37
3.1.2 As características do lenho das árvores de tipuana.....	39
3.1.3 As árvores de tipuana na arborização urbana.....	41
3.2 Biodeterioração do lenho das árvores.....	43
3.2.1 Biodeterioração do lenho por fungos apodrecedores.....	43
3.2.1.1 Tipos de podridão do lenho.....	44
3.2.1.2 Colonização do lenho das árvores por fungos apodrecedores.....	46
3.2.1.3 Espécies de fungos em árvores.....	50
3.2.2 Biodeterioração do lenho por cupins.....	53
3.2.2.1 Ocorrência de cupins em árvores urbanas.....	53
3.2.2.2 Ocorrência de cupins em árvores na cidade de São Paulo - SP.....	55
3.2.2.3 Danos causados pelos cupins nas árvores.....	57
3.3 Restrição e desenvolvimento de organismos xilófagos em árvores.....	59
3.4 Mecanismos de resistência das árvores.....	60
3.5 Biomecânica das árvores.....	63
3.6 Avaliação de risco de queda de árvores.....	68
3.6.1 Análise visual externa.....	68
3.6.2 Análise estrutural ou de estabilidade das árvores.....	73
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	81
4.1 Área de amostragem.....	81
4.2 Seleção da espécie para estudo: árvores de tipuana.....	83

4.3 Diagnóstico das características, da biodeterioração e análise de risco de queda das árvores de tipuana.....	83
4.3.1 Características e biodeterioração das árvores de tipuana.....	83
4.3.2 Análise de risco de queda das árvores de tipuana.....	86
4.3.3 Análise estatística.....	88
4.3.4 Modelo estatístico para a análise de risco de queda.....	89
4.4 Amostragem do lenho das árvores de tipuana.....	89
4.5 Avaliação da biodeterioração do lenho das árvores de tipuana.....	90
4.5.1 Exame macroscópico do lenho afetado.....	92
4.5.2 Caracterização da estrutura anatômica do lenho e dos mecanismos de resistência.....	92
4.5.3 Relação dos fungos apodrecedores e cupins-subterrâneos na biodeterioração do lenho das árvores de tipuana.....	94
4.5.4 Caracterização das propriedades físico-mecânicas do lenho sadio e deteriorado por fungos.....	96
4.6 Análise de distribuição de tensões do lenho sadio e deteriorado.....	100
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	101
5.1 Diagnóstico das características e biodeterioração das árvores de tipuana na área urbana.....	101
5.1.1 Condição de entorno.....	102
5.1.2 Estado geral.....	104
5.1.3 Características dendrométricas.....	108
5.1.4 Processos de biodeterioração por organismos xilófagos.....	110
5.1.4.1 Fungos apodrecedores.....	111
5.1.4.2 Cupins.....	114
5.1.4.3 Deterioração interna.....	116
5.2 Análise de risco de queda das árvores.....	117
5.3 Associação entre estado de sanidade biológica, características dendrométricas e risco de queda das árvores de tipuana.....	118
5.4 Biodeterioração do lenho das árvores de tipuana.....	133
5.4.1 Exame macroscópico do lenho sadio e deteriorado.....	133

5.4.2 Exame microscópico do lenho sadio e deteriorado.....	138
5.4.3 Suscetibilidade do lenho das árvores de tipuana ao cupim <i>Coptotermes gestroi</i>	153
5.5 Propriedades físicas e mecânicas do lenho sadio e deteriorado.....	156
5.5.1 Densidade de massa aparente por densitometria de raios X.....	156
5.5.2 Resistência à flexão estática.....	167
5.6 Análise de distribuição de tensões no lenho sadio e deteriorado.....	174
5.7 Parâmetros para diagnóstico das árvores de tipuana.....	182
6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	189
REFERÊNCIAS.....	193
ANEXOS.....	207

RESUMO

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

Os objetivos do presente trabalho foram: avaliar o processo de biodeterioração do lenho das árvores de tipuana na cidade de São Paulo e relacionar as alterações da sua estrutura anatômica e propriedades físico-mecânicas com o seu risco de queda. Nos passeios públicos de regiões selecionadas da cidade, 1109 árvores de tipuana foram caracterizadas quanto às condições de entorno, estado geral, variáveis dendrométricas, biodeterioração externa e interna e o risco de queda, estimado com modelo de cálculo estrutural desenvolvido pelo IPT. A biodeterioração e os mecanismos de resistência das árvores foram avaliados ao nível macroscópico e microscópico. As alterações nas propriedades do lenho de tipuana foram analisadas por densitometria de raios X e pelos ensaios físico-mecânicos (densidade de massa aparente; resistência à flexão) e aplicado o método de elementos finitos para análise da distribuição de tensões no lenho. As árvores de tipuana de elevada idade não apresentaram sinais de declínio, embora com estado geral considerado como crítico, pelo plantio em locais inadequados, manejo inapropriado e/ou ocorrência de injúrias. O lenho foi deteriorado por fungos apodrecedores, cupins-subterrâneos e brocas-de-madeira, sendo os fungos e cupins os principais organismos xilófagos, afetando a região do cerne; a associação entre os fungos, os cupins, as variáveis dendrométricas e o risco de queda foram estatisticamente significantes ao nível de 5 %. O cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi* ocorreu em elevados níveis de infestação nas árvores, sendo considerado, no entanto, como um organismo-praga secundário, fortemente associado com lenho previamente apodrecido por *Ganoderma* sp.. Os fungos apodrecedores ocorrentes foram classificados como de podridão branca e mole, sendo a primeira mais comum no cerne das árvores. Como mecanismo de resistência à biodeterioração observou-se a compartimentalização do lenho, caracterizada pelo acúmulo de extrativos nas células. Os fungos xilófagos causaram reduções significativas na densidade de massa aparente, tensão de ruptura à flexão estática e módulo de elasticidade em estágios incipiente e intenso de apodrecimento do lenho. Ruptura do tronco e o risco de queda das árvores de tipuana relacionaram-se, principalmente, com a intensidade da deterioração do lenho e com a sua dendrometria. A alteração da distribuição das tensões no lenho foi analisada em relação ao estágio, tamanho e localização da deterioração no tronco das árvores de tipuana.

Palavras-chave: Tipuana; Biodeterioração; Densitometria de raios X; Biomecânica; Fungo apodrecedor; Cupim; *Coptotermes gestroi*; *Ganoderma* sp.; Broca-de-madeira; Resistência à flexão; Densidade de massa aparente; Risco de queda

ABSTRACT

Biodeterioration, wood anatomy and falling risk analysis of tipuana, *Tipuana tipu* (Benth.). O. Kuntze trees, in the sidewalks of São Paulo city, SP

The objectives of the present work were to evaluate the process of biodeterioration in the wood of tipuana trees in the city of São Paulo and to relate the alterations in the anatomical structures and physical and mechanical properties with their falling risk. In the sidewalks of selected regions of the city, 1109 trees were characterized taking into consideration aspects as surroundings, general conditions, dendrometric variables, external and internal biodeterioration and falling risk estimated by using a structural model developed by IPT. The biodeterioration and the resistance mechanisms of the trees were evaluated at a macro and microscopic levels. The alterations on the wood properties were analysed by X-rays densitometry and by performing physical and mechanical tests (specific gravity; bending resistance); the tension distribution in the wood was analyzed by finite-elements method. The old aged trees encountered, did not show any sign of decline, even though, the general aspect of their surroundings was critical by the inadequate places they were planted; inappropriate management and/or occurrence of injuries. The trees had their trunks deteriorated by xylophagous organisms, mainly fungi and subterranean-termites, and some wood borer beetle too, which affected the heartwood. The association between the presence of the first two organisms, the dendrometric variables and the risk of falling, was statistically significant at the 5% level. The infestation of the trees by the subterranean-termite *Coptotermes gestroi* was at high levels, however, it was considered as a secondary plague-organism, because its attack was strongly associated with the previously decayed heartwood by *Ganoderma* sp.. The decaying fungi observed were classified as white rot and soft rot, being the white rot more common in the heartwood of the trees. As a resistance mechanism of the trees against biodeterioration, it was observed the compartmentalization of the wood characterized by the accumulation of extractives in the cells. Decaying fungi caused significant reductions in the following wood properties: specific gravity, rupture strength to bending and modulus of elasticity either in incipient or intense decay. Tree's trunk rupture and falling risk were associated mainly to biodeterioration intensity and dendrometric variables. The alteration of tension distribution in the wood was analyzed in relation to the stage, size and position of the deterioration in the wood of the trees.

Keywords: Tipuana; Biodeterioration; X rays densitometry; Biomechanics; Decaying fungus; Termite; *Coptotermes gestroi*; *Ganoderma* sp.; Wood borer beetle; Bending resistance; Specific gravity; Falling risk

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Caracterização dendrológica das árvores de tipuana: (A) aspecto geral na cidade de São Paulo; (B) detalhe da casca (escala = 10 cm); (C) folhas (escala = 5 cm); (D) fruto (escala = 1 cm); e (E) inflorescência (escala = 5 cm).38
- Figura 2 - Características do lenho das árvores de tipuana: fotomicrografias das seções (A) transversal, longitudinais (B) tangencial e (C) radial (100x).40
- Figura 3 - Podridão branca (A) no cerne de árvore de tipuana (seta) (escala = 0,20 m). Podridão parda (B) em conífera (Fonte: BLANCHETTE, 2003). Podridão mole (C) em *Tabebuia* sp. (ipê-amarelo) - escala = 1 cm (Fonte: BRAZOLIN, 1998).45
- Figura 4 – Apodrecimento em tipuana. A: apodrecimento do cerne (podridão branca) em corte transversal do lenho (seta) (escala = 0,20 m); (B) oportunismo não especializado ou apodrecimento do alburno (podridão branca) em injúria no colo (seta) (escala = 0,10 m).47
- Figura 5 - Rotas de infecção/colonização de fungos apodrecedores em árvores: (A) grandes feridas que expõem o cerne; (B) pequenos galhos secos e podres, sem cerne formado; (C) galhos e raízes com cerne formado; (D) infecção ectotrófico em raízes; (F) contato entre raízes saudáveis e afetadas por fungos. (Fonte: RAYNER; BODDY, 1988). (Desenho: OLIVEIRA-NETO)49
- Figura 6 - Processo de compartimentalização em árvore proposto por Shigo (1979, 1983). (1) barreira 1 - obstrução dos elementos vasculares axiais; (2) barreira 2 - lenho outonal do anel de crescimento; (3) barreira 3 - parênquima radial; (4) barreira 4 - Anel de crescimento modificado.61
- Figura 7 - Biomecânica em árvores: Axioma da tensão uniforme: (A) formação de calo (seta) em árvore de sibipiruna, para minimizar/equilibrar as tensões criadas no local da injúria, sendo que, a forma de "agulha" da cicatrização indica arranjo paralelo das fibras para minimizar tensões. Princípio da mínima alavanca: (B) ajuste do centro de gravidade para minimizar momento de flexão e (C) redução do comprimento de galho de árvore (torção) para resistir à flexão

(ventos fortes). Arranjo perpendicular dos anéis de crescimento (D) ao contato com uma superfície, minimizando cisalhamento entre os anéis na direção longitudinal (a) e da direção tangencial (b) (Fonte: MATTHECK; BRELOER, 1997). Tensão de crescimento: (E) crescimento adaptado de raiz em contato com tubulação subterrânea, observado pelo aumento da superfície de contato (axioma da tensão uniforme). 66

Figura 8 – Fraturas nas árvores: (A) fratura de tronco apodrecido de tipuana por esforços de flexão; (B) fratura longitudinal (cisalhamento) em eucalipto, causada por esforços de flexão; (C) fratura por torção em árvore (Fonte: MATTHECK; BRELOER, 1997); (D) fratura transversal em figueira com casca inclusa; (E) espessamento no colo (crescimento adaptado) de sibipiruna com apodrecimento do cerne. 67

Figura 9 - Regiões da cidade de São Paulo para diagnóstico do árvores de tipuana. A: Alto da Boa Vista; B: Alto da Lapa; C: Alto de Pinheiros; D: Cerqueira César; E: Paraíso; F: Pacaembu-Sumaré; G: Vila Nova Conceição. 82

Figura 10 - Penetrômetro utilizado na prospecção da deterioração interna do lenho de árvores de tipuana. 85

Figura 11 - Gráfico da prospecção interna do lenho deteriorado de árvore de tipuana. A): região da casca. B: lenho sadio. C: lenho com deterioração intensa. 86

Figura 12 - Avaliação da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. (A-B) exame macroscópico dos processos de biodeterioração dos toretes e de amostra com 15 cm de largura, aproximadamente ($n = 3$) do torete; (C) coleta de sub-amostra para caracterização da estrutura anatômica e propriedades físico-mecânicas; (D-F) determinação do perfil radial por densitometria de raios X; (G) obtenção de corpos-de-prova para ensaios físicos e mecânicos e análise da estrutura anatômica; (H-I) preparação de lâminas histológicas do lenho sadio e apodrecido e análise microscópica; (J) ensaio de densidade de massa aparente por imersão em mercúrio; e (K) ensaio de resistência à flexão estática. 91

- Figura 13 - Ensaio biológico da suscetibilidade do lenho de árvores de tipuana ao cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi*: (A) ninho e (B) canaleta de pvc com corpos-de-prova.95
- Figura 14 - Método de raios X e a obtenção das imagens radiográficas do lenho das árvores de tipuana. A: corte das amostras em equipamento de dupla serra; B: seções transversais das amostras; C: suporte com as amostras sobre o filme radiográfico; D: irradiação das amostras em equipamento de raios X; E: imagem radiográfica e sua análise nos programas CRAD e CERD e F: perfil da densidade aparente e respectiva amostra do lenho.97
- Figura 15 - Ensaios físicos e mecânicos do lenho das árvores de tipuana. A: climatização dos corpos-de-prova; B: ensaio de densidade de massa aparente do lenho por imersão em mercúrio; C: ensaio de flexão estática em máquina universal de ensaios, marca Kratos, modelo KE2000MPH.99
- Figura 16 - Modelo de falha à flexão estática: (a) tração simples - TS, (b) grã inclinada - GI, (c) "lascamento" - LA, (d) tração abrupta - TB, (e) compressão - CP, (f) cisalhamento horizontal.100
- Figura 17 - Morfologia de árvore de tipuana submetida à poda drástica, formando galhos epicórmicos.101
- Figura 18 - Árvore de tipuana. A: Injúria no tronco apresentando apodrecimento do alburno (seta). B: Raiz dobrada em resposta à barreira física (canteiro).106
- Figura 19 - Árvore de tipuana: (A) poda inadequada de raiz (escala = 5 cm); (B) poda lateral inadequada, deslocando o centro de gravidade da árvore.106
- Figura 20 - Árvore de tipuana. A: colo soterrado pelo canteiro alto. B: "dendrocirurgia" no tronco (escala = 0,10 m).107
- Figura 21 - Características dendrométricas das tipuanas. Distribuição em classes de (A) DAP, (B) altura total, (C) inclinação do tronco e (D) altura da primeira bifurcação.110
- Figura 22 - Ocorrência de organismos xilófagos (fungos apodrecedores, térmitas e brocas-de-madeira) na raiz, colo e tronco das árvores de tipuana.111

- Figura 23 - Corpos-de-frutificação em árvores de tipuana. (A) *Picnoporus sanguineus* em raiz exposta causando podridão branca (escala = 5 cm); de (B) *Ganoderma* sp., sobre a casca e no colo (escala = 5 cm)..... 113
- Figura 24 - Deterioração interna (%) do lenho de árvores de tipuana. (A) valor de 11%, referente à deterioração equivalente a 1/3 do raio do tronco; (B): valor de 44%, referente à deterioração equivalente a 2/3 do raio. 117
- Figura 25 - Ocorrência de fungos apodrecedores e de cupins-subterrâneos nas classes de DAP das árvores de tipuana. 120
- Figura 26 - Relação entre o DAP e a deterioração interna (%) do lenho das árvores de tipuana..... 121
- Figura 27 - Deterioração interna (%) do lenho e o DAP das árvores de tipuana. 123
- Figura 28 - Risco de queda e o DAP das árvores de tipuana 125
- Figura 29 - Risco de queda e deterioração interna das árvores de tipuana..... 130
- Figura 30 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana (amostra J) com cerne sadio sem extrativo (a) e com acúmulo de extrativo amarelado (b). 133
- Figura 31 - Secção transversal o lenho de árvores de tipuana (A, B e C = amostras K; D = amostra X) mostrando as linha de compartimentalização delimitando a área com ataque de fungo de podridão branca (lcf), de cupim-subterrâneo (lcc) e com túnel de broca-de-madeira (lcb) e as zonas de reação (zr). 136
- Figura 32 - Caracterização macroscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Podridão (A) branca, no cerne (seta); (B) branca (seta branca) e mole (seta preta), no alburno e no cerne, devido à remoção da casca. Podridão mole (C) no cerne (seta)..... 138
- Figura 33 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção longitudinal tangencial do lenho sadio (A) e afetado (B, C, D) por fungos de podridão branca, evidenciando canais de erosão na parede celular das fibras (setas) e buracos (*) para a passagem das hifas; secção transversal do lenho sadio (E) e biodeteriorado (F), com a parede celular das fibras erodidas e com a lamela média residual (seta)..... 141
- Figura 34- Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal (A) e longitudinal (B) do lenho sadio e transversal

(C, E) e longitudinal (D) afetado por fungos de podridão branca, com ataque preferencial da parede das fibras (a); vasos (b), parênquima axial (c) e radial (seta) mais preservados; secção longitudinal tangencial (F) evidenciando cavidades da parede celular das fibras (seta).....142

Figura 35 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção longitudinal tangencial do lenho com podridão branca. (A) colonização preferencial do lenho através dos vasos (a); (B) colonização intensa do parênquima axial (a) e radial (b); (C) colonização intensa dos vasos (a); (D) passagem das hifas do fungo através das pontoações (setas); (E) buracos (setas) na parede celular das células do parênquima axial formados pela hifa dos fungos; (F) buracos na parede celular das células do parênquima axial (setas) em estágio avançado de biodeterioração.143

Figura 36- Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal (A, B, C) e longitudinal tangencial (D) do lenho apodrecido por fungos de podridão branca, com a formação de placa pseudoesclerotal pelo crescimento das hifas septadas, espessas e pigmentadas dos fungos no lume dos vasos (a), fibras (b), parênquima axial (c) e radial (seta).....144

Figura 37 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal (A) e longitudinal tangencial (B) do lenho sadio, transversal (C) do lenho com podridão mole tipo 1, com cavidades na parede celular das fibras (setas); secção longitudinal tangencial (D) com cavidades alongadas na parede das fibras secções longitudinais tangenciais (E, F), sob luz polarizada, evidenciando cavidades cilíndricas (setas), alongadas, com as pontas cônicas (formato rombóide), interligadas e em ângulo com o eixo principal das fibras.146

Figura 38 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal do lenho sadio (A) e afetado por fungos de podridão mole tipo 1 (B, C), com ataque preferencial da parede das fibras (a); secção transversal (D) com vasos (a), parênquima axial (b) e radial (c) preservados; secção longitudinal tangencial (E). com cavidades discretas

(setas) nas células do parênquima axial em estágio avançado de apodrecimento; secção transversal (F) mostrando hifas pigmentadas e septadas no raio (seta)..... 147

Figura 39- Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal (A) e longitudinal tangencial (B) indicando a linha de compartimentalização (seta) e de impregnação das células do lenho (a); secções transversais (C, D) com preenchimento de extrativos no lume das células de vaso (a), parênquima axial (b), fibras (c) e raios (d), com impregnação da parede celular (setas); secções longitudinais tangenciais (E, F) indicando células dos raios sem (a) e com extrativos (b)..... 150

Figura 40 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal do lenho (sentido medula-casca), com a linha de compartimentalização (lc) e zona de reação (zr). (A) lenho sadio e sem deposição de extrativo; (B) zona de reação com deposição de extrativo nos vasos (a) e outras células (b); (C) linha de compartimentalização com deposição de extrativo nas células de vaso (a), parênquima axial (b), raios (c) e fibras (d); (D, E) sintomas característicos de podridão branca nas fibras (a), em 2 estágios, dissociando a estrutura do lenho..... 151

Figura 41 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção longitudinal radial do lenho, indicando a linha de compartimentalização. (A) lenho sadio e sem deposição de extrativo; (B, C, D) lenho sadio com deposição de extrativo (a), região intermediária com parede celular impregnada por extrativo e sem ataque de fungos (b) e afetada por fungos de podridão mole (c), com cavidade na parede celular das fibras.... 152

Figura 42 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. (A) Secção transversal com deposição de extrativos nas células de raio (a) e parênquima longitudinal (b); (B) longitudinal tangencial com deposição de extrativos nos vasos (a); impregnação da parede celular (setas).
..... 153

- Figura 43 - Suscetibilidade do lenho sadio e com podridão branca de árvore de tipuana ao cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi*. EXS - cerne com extrativo/sadio. APO - cerne com podridão branca. NS - cerne normal/sadio. 155
- Figura 44 - Ensaio de suscetibilidade de árvore de tipuana ao cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi*. (A) EXS - cerne com extrativo/sadio; (B) NS - cerne normal/sadio; (C) APO - cerne com podridão branca (escala = 1 cm). 156
- Figura 45 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana e respectivo perfil radial de densidade aparente do lenho, indicando as regiões de lenho normal/sadio (NS) e de extrativo/sadio (EXS) (AMOSTRA Y1). 158
- Figura 46 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana e respectivo perfil radial de densidade aparente do lenho, indicando as regiões de lenho normal/sadio (NS) e de zona de reação (ZR) (AMOSTRA K1). 159
- Figura 47 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana e respectivo perfil radial de densidade aparente do lenho, indicando as regiões de lenho normal/sadio (NS) e com podridão branca incipiente (PB_{INC}). Setas indicam a linha de compartimentalização do fungo com a formação de placa pseudoesclerotial. (AMOSTRA L3). 160
- Figura 48 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana e respectivo perfil radial de densidade aparente do lenho, indicando as regiões de lenho normal/sadio (NS) e com podridão branca intensa (PB_{INT}) e setas indicando a linha de compartimentalização (AMOSTRA D3). 161
- Figura 49 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana e respectivo perfil radial de densidade aparente do lenho, indicando as regiões de lenho normal/sadio (NS) com extrativo e sadio (EXS); podridão mole incipiente (PM_{INC}); podridão mole intensa (PM_{INT}) e; setas indicando a linha de compartimentalização (LC) (AMOSTRA E2). 162
- Figura 50 - Densidade de massa aparente média do lenho das árvores de tipuana, nos diferentes níveis de biodeterioração, através do método de densitometria de raios X e de mercúrio. 166
- Figura 51 - Variação da densidade de massa aparente obtidas por densitometria de raios X nas diferentes densidades aparente por imersão em mercúrio. 166

- Figura 52 - Tensão de ruptura (A) e módulo de elasticidade (B) do lenho de árvores de tipuana de diferentes padrões de biodeterioração. EXS - lenho com acúmulo de extrativos/sadio; ZR - zona de reação; NS - lenho normal/sadio; PB_{INC} - podridão branca incipiente; PB_{INT} - podridão branca intensa; PM_{INC} - podridão mole incipiente; PM_{INT} - podridão mole intensa. 169
- Figura 53 - Variação da tensão de ruptura (A) e do módulo de elasticidade (B) do lenho de árvores de tipuana em relação aos valores de densidades de massa aparente de diferentes padrões de biodeterioração. 170
- Figura 54 - Corpos de prova do lenho de árvores de tipuana evidenciando o modelo de falha sob flexão radial, com tração abrupta (A) e simples (B) - escala = 10 mm. 174
- Figura 55 - Intensidade de deterioração simulada do lenho de árvores de tipuana. (A) apodrecimento do cerne; (B) apodrecimento do cerne e oco aberto; (1) lenho normal/ sadio (NS); (2): lenho com 100 % de podridão branca intensa (PB_{INT}); (3) lenho com 16 % de podridão branca incipiente ou intensa (PB_{INC} ou PB_{INT}); (4) lenho com 66 % de podridão branca incipiente ou intensa. 175
- Figura 56 - Distribuição de tensões normais (1) e de cisalhamento (2) no lenho do tronco das árvores de tipuana com apodrecimento do cerne. (A) simulação 1- NS, 0 % de deterioração; (B) simulação 2- PB_{INT}, 100 % de deterioração; (C) simulação 3- PB_{INC}, 16 % de deterioração interna; (D) simulação 4 - PB_{INT}, 16 % de deterioração interna; (E) simulação 5- PB_{INC}, 66 % de deterioração; (F) simulação 6 - PB_{INT} - 66 % de deterioração interna. (*): lado tracionado. (LN) - linha neutra..... 180
- Figura 57 - Distribuição de tensões de flexão (1) e de cisalhamento (2) com apodrecimento do cerne e com oco aberto no tronco das árvores de tipuana. (A) simulação 1- NS, 0 % de deterioração interna e oco aberto; (B) simulação 2- PB_{INT}, 100 % de deterioração interna e oco aberto; (C) simulação 3- PB_{INC}, 16 % de deterioração interna e oco aberto; (D) simulação 4- PB_{INT}, 16 % de deterioração interna e oco aberto; (E) simulação 5 - PB_{INC}, 66 % de deterioração interna e oco aberto; (F) simulação 6 - PB_{INT} - 66 % de deterioração interna e oco aberto. (*): lado tracionado. (LN) - linha neutra. . 181

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos fungos, tipo de apodrecimento do cerne e parte afetada das árvores.	52
Tabela 2- Métodos utilizados na avaliação da perda de resistência mecânica do tronco de árvore associada ao apodrecimento por fungos.	74
Tabela 3 - Padrão mínimo de segurança de árvores com defeito no tronco	75
Tabela 4 - Regiões e limites da cidade de São Paulo, para diagnóstico do estado de sanidade biológica das árvores de tipuana.	81
Tabela 5 - Relação da profundidade e do diâmetro do sistema radicular com o DAP das árvores de tipuana.	88
Tabela 6 – Árvores de tipuana selecionadas na cidade de São Paulo para a caracterização do processo de biodeterioração do lenho.	90
Tabela 7 - Tratamentos estatísticos do ensaio biológico de suscetibilidade do lenho de árvores de tipuana ao cupim <i>Coptotermes gestroi</i>	95
Tabela 8 - Tipo de edificação e as árvores de tipuana.	102
Tabela 9 - Constituinte das árvores e relação com as injúrias provocadas nas árvores de tipuana.	104
Tabela 10 - Características dendrométricas das árvores de tipuana na área urbana de São Paulo, SP.	109
Tabela 11 - Ataque de fungos apodrecedores em tipuana.	112
Tabela 12 - Tipo de podridão do lenho em árvores de tipuana da cidade de São Paulo.	112
Tabela 13 - Ocorrência, ataque ao lenho e a atividade de cupins-subterrâneos em árvores de tipuana.	115
Tabela 14 - Risco de queda das árvores de tipuanas na cidade de São Paulo.	118
Tabela 15 - Relação entre fungos apodrecedores e cupins-subterrâneos das árvores de tipuana	118
Tabela 16 - Relação entre a ocorrência de organismos xilófagos e o DAP das árvores de tipuana	119
Tabela 17 - Relação entre deterioração interna e o DAP das árvores de tipuana.	121

Tabela 18 - Relação entre deterioração interna do lenho e o DAP das árvores de tipuana.....	122
Tabela 19 - Relação entre a ocorrência de organismos xilófagos e o risco de queda das árvores de tipuana.....	124
Tabela 20 - Relação entre o risco de queda e o DAP das árvores de tipuana	124
Tabela 21 - Relação entre o risco de queda e a altura total das árvores de tipuana. ...	126
Tabela 22 - Relação entre o risco de queda e a área da copa das árvores de tipuana.	126
Tabela 23 - Relação entre o risco de queda e a altura da primeira bifurcação das árvores de tipuana.....	127
Tabela 24 - Relação entre o risco de queda e o ângulo de inclinação do tronco das árvores de tipuana.....	127
Tabela 25 - Perfil das árvores de tipuana na cidade de São Paulo quanto ao estado de alerta/risco de queda	128
Tabela 26 - Frequência de ocorrência de deterioração interna em relação ao DAP das árvores de tipuana.....	129
Tabela 27 - Validação do modelo estatístico de risco de queda das árvores de tipuana	132
Tabela 28 – Exame macroscópico das árvores de tipuana da cidade de São Paulo. .	137
Tabela 29 - Perda de massa do lenho de árvores de tipuana, pinus e de eucalipto causada pelo cupim <i>Coptotermes gestroi</i>	155
Tabela 30 - Densidade de massa aparente média do lenho das árvores de tipuana, nos diferentes níveis de biodeterioração, através do método de densitometria de raios X e de mercúrio.....	165
Tabela 31 - Tensão de ruptura e módulo de elasticidade do lenho de árvores de tipuana de diferentes padrões de biodeterioração.	168
Tabela 32 - Redução da tensão de ruptura e do módulo de elasticidade do lenho das árvores de tipuana afetado por fungos de podridão branca e mole.....	172
Tabela 33 - Simulações dos estágios de biodeterioração do lenho das árvores de tipuana pelo método de elementos finitos.	175

Tabela 34 - Tensão normal e de cisalhamento máximas nas simulações pelo método de elementos finitos179

Tabela 35 - Atributos e parâmetros para o diagnóstico de árvores de tipuana na condição urbana.....183

1 INTRODUÇÃO

As árvores conferem uma dimensão especial na paisagem das cidades e desempenham um importante papel no bem estar das comunidades urbanas, seja pela capacidade de controle ou minimização dos efeitos adversos, resultantes da ocupação do meio urbano, ou influenciando na qualidade estética e psicológica da cidade (SCHROEDER, 1989; NOWAK; DWYER; CHILDS, 1998).

Para a Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente - SVMA da cidade de São Paulo, a vegetação arbórea é também extremamente importante, pois atenua os problemas do intenso processo de urbanização pela regulação do clima, manutenção da biodiversidade e controle da erosão, das inundações e da poluição atmosférica e sonora, também refletindo na qualidade de vida da população (SÃO PAULO; IPT, 2004).

Por outro lado, as árvores são diretamente afetadas nas intervenções urbanas, como no alargamento das vias, reparo das tubulações, manutenção da fiação aérea, construção ou reforma das casas, etc. O desenvolvimento e a sobrevivência das árvores nas cidades são ainda afetados por outros fatores como a compactação do solo, a falta ou excesso de água, poluição e estresse climático, além da incidência de pragas e de patógenos; como consequência, as árvores podem ter sua taxa de crescimento reduzida em comparação com as da mesma espécie no meio rural. (QUIGLEY, 2004).

A inexistência de planejamento urbano e a seleção e plantio inadequados das espécies arbóreas indicam a falta de critérios técnicos na correta implantação e manejo da arborização urbana, resultando na incompatibilidade das árvores com a infraestrutura urbana instalada, como, postes de iluminação, instalações subterrâneas, caixas de inspeção, etc. (SÃO PAULO, 2005).

Nessas condições, as árvores ficam mais sujeitas às injúrias, seguidas da biodeterioração do lenho por microorganismos e insetos, como fungos e cupins. Os cupins-subterrâneos são considerados como a principal praga nas árvores da cidade de São Paulo e de outros centros urbanos, sendo que, a espécie exótica *Coptotermes gestroi* apresentando grande dispersão nas árvores (MILANO; FONTES, 2002; COSTA-LEONARDO, 2002; TOLEDO; ROMAGNANO, 2006). Para muitos profissionais, que

cuidam da arborização, os cupins são ainda considerados a causa de queda de árvores na cidade.

Os "Relatórios de Despachos Autorizatórios de Supressão de Árvores" do DEPAVE/SVMA, de janeiro de 1998 a outubro de 2003, analisados pelo IPT (2004), mostraram que os pedidos de supressão das árvores apoiavam-se principalmente nos incisos II e III da Lei nº 10.365, de 22 de setembro de 1987, sendo referentes ao "estado fitossanitário" e "risco iminente de queda das árvores", sem que a PMSP aplicasse um protocolo padrão na avaliação das árvores para a tomada de decisão sobre o seu manejo adequado. Esta análise reforçou a biodeterioração do lenho por fungos apodrecedores e cupins-subterrâneos como importantes fatores na decisão para a supressão das árvores.

A SVMA (SÃO PAULO; IPT, 2004) atribuiu a causa da queda de árvores na cidade de São Paulo à (i) inadequação das espécies; (ii) alterações fisiológicas e morfológicas das árvores pela podas irregulares e supressão das raízes; (iii) biodeterioração no tronco das árvores por organismos xilófagos; e/ou iv) condições climáticas adversas (chuva, vento forte, etc.). Entretanto, estatísticas de queda de árvores de algumas subprefeituras, ou a inexistência destes dados, indicaram a necessidade de aplicação de critérios técnico-científicos padronizados para o diagnóstico das árvores quanto ao risco de queda e da implementação de um sistema de coleta e armazenamento de informações qualitativas e quantitativas do estado das árvores para gestão da arborização urbana, com foco no manejo preventivo.

Com relação à árvore, no aspecto biológico, o crescimento, desenvolvimento e a função desempenhada pelo sistema radicular, tronco e copa podem ser explicados pelas leis da física e da engenharia (biomecânica), cuja aplicação possibilita melhor entendimento das relações entre a forma e a função dos órgãos de um vegetal arbóreo. Para as árvores suplantarem as limitações impostas pelas condições do ambiente, devem apresentar nas suas diferentes partes, fatores de segurança confiáveis, sob a ótica da mecânica. Estes fatores devem ser ajustados durante o seu crescimento e diminuem com a sua idade e com o aumento das suas dimensões, ou seja, a susceptibilidade do sistema radicular, do tronco e da copa das árvores à falha mecânica aumenta em função do aumento de sua massa (NIKLAS, 1992).

Esta abordagem da biomecânica também foi utilizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT (2004), em um estudo realizado para a Prefeitura da Cidade de São Paulo – PMSP, para diagnosticar o estado de sanidade biológica das árvores, localizadas nos passeios públicos, e avaliar o seu risco de queda. Este estudo indicou a espécie *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze (tipuana) com a maior frequência relativa de ocorrência na cidade e Brazolin, Amaral e Tomazello-Filho (2006) discutiram a sua suscetibilidade aos cupins-subterrâneos e fungos apodrecedores.

Portanto, na avaliação das árvores, há necessidade da aplicação de critérios técnicos para o correto diagnóstico do risco de queda nos temporais com fortes ventos e que podem afetar a integridade das pessoas, veículos e edificações (AS ÁRVORES QUE MATAM, 2003; TEMPORAL NA PATAGÔNIA MATA 3 TURISTAS BRASILEIROS, 2004; ÁRVORE CAI SOBRE DOIS CARROS NA REGIÃO DA AVENIDA PAULISTA, 2007).

Neste contexto, as condições de crescimento das árvores, a biologia dos organismos xilófagos, as alterações nas propriedades anatômicas-físico-mecânicas do lenho sadio e deteriorado são necessárias e fundamentais para a compreensão do processo de biodeterioração e das forças de resistência da árvore aos esforços externos, permitindo melhor definição de critérios para predição do seu risco de queda.

2 OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar a biodeterioração do lenho de árvores de *Tipuana tipu* (tipuana), nos passeios públicos da cidade de São Paulo-SP, por fungos apodrecedores e cupins-subterrâneos. Visou, também, determinar a relação da biodeterioração e as alterações na estrutura anatômica e propriedades físico-mecânicas do lenho, com o risco de queda das árvores.

Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho foram:

- (i) caracterizar as árvores quanto às condições de entorno, seu estado geral, suas dimensões (dendrometria) e sanidade biológica;
- (ii) avaliar a biodeterioração do lenho por fungos apodrecedores e cupins-subterrâneos;
- (iii) analisar os mecanismos de resistência das árvores aos organismos xilófagos;
- (iv) avaliar a relação entre o cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi* e o fungo apodrecedor *Ganoderma* sp. no ataque do lenho de tipuana;
- (v) determinar as características anatômicas e as propriedades físico-mecânicas do lenho sadio e deteriorado das árvores;
- (vi) verificar a associação entre o estado de sanidade biológica, as características dendrométricas e o risco de queda das árvores;
- (vii) estabelecer parâmetros para o diagnóstico e a determinação do risco de queda das árvores.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 As árvores de tipuana: dendrologia, características de lenho e utilização na arborização urbana

3.1.1 Dendrologia das árvores de tipuana

Segundo Souza (2005), o resultado do *Angiosperm Phylogeny Group-APG II* reiterou a classificação de *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze na família Fabaceae (Leguminosae), subfamília Faboideae (Papilionoideae), sendo a espécie única do gênero (monotípico). Esta árvore também é conhecida, popularmente, por acácia-argentina, mocó, pau-de-mocó, petirica-guaçu, tipa-branca, tipuana, tipu ou tipa.

Tortorelli (1956); Mainieri e Chimelo (1986); Lorenzi, (2003) citaram que a ocorrência natural da espécie é restrita ao sul da Bolívia e norte da Argentina (províncias de Tucuman, Salta e Jujuy), desenvolvendo-se no estrato arbóreo superior, sendo uma das principais na altitude de 350-800 m e secundária acima de 850 m.

São árvores de grande porte, atingindo 40 m de altura e 1,6 m de diâmetro de tronco; fuste medianamente retilíneo e casca pardo-clara, saliente, sulcada longitudinalmente e gretada transversalmente. Os ramos são vigorosos, ascendentes, formando copa arredondada e frondosa. As folhas são compostas, imparipinadas, com 10-22 cm de comprimento; 4-10 pares de folíolos de 5 cm de comprimento e 1-2 cm de largura, geralmente alternados, oblongos, pinatinervados, nervura central bastante proeminente e as secundárias menos visíveis, de coloração verde uniforme em ambas as faces. Inflorescências axilares, pequenas, em racemos, flores amarelas constituídas por um estandarte, duas asas e uma quilha. Frutos do tipo sâmara, geralmente com uma ou duas sementes (Figura 1, A-E) (TORTORELLI, 1956; LORENZI, 2003).

Figura 1 - Caracterização dendrológica das árvores de tipuana: (A) aspecto geral na cidade de São Paulo; (B) detalhe da casca (escala = 10 cm); (C) folhas (escala = 5 cm); (D) fruto (escala = 1 cm); e (E) inflorescência (escala = 5 cm)

As tipuanas são árvores robustas, heliófilas e mesófilas, com crescimento médio a rápido, sendo medianamente longínqua (TORTORELLI, 1956).

Brun et al. (2007) estudando a fenologia e a influência de poda nas árvores de tipuana da cidade de Santa Maria-RS, observaram que a fenofase de desfolhamento ocorreu nas estações de outono-inverno (6 meses); a emissão dos botões florais (floração) em novembro-dezembro, com pico em novembro; a frutificação ocorreu de dezembro-setembro (do ano seguinte), com pico em fevereiro e queda de frutos de abril-junho. A prática de poda dos ramos das árvores de tipuana induziu a floração, a formação de folhas novas e a maturação dos frutos. A poda das árvores de tipuana realizada na época incorreta interferiu no seu comportamento fenológico.

Como curiosidade, a fumaça da queima da madeira de tipuana causa sensível incômodo aos olhos, podendo produzir cegueira; sua raiz é feculenta e venenosa, embora comestível quando reduzida a farinha e submetida ao fogo por repetidas vezes, sendo um recurso extremo em época de escassez nos estados do Piauí e Ceará; a sua casca é considerada tóxica (CORRÊA, 1974).

3.1.2 As características do lenho das árvores de tipuana

As árvores de tipuana possuem lenho moderadamente pesado, cerne e alburno indistintos e de coloração branco-amarelado uniforme, mais escuro e, às vezes, suavemente acinzentado quando exposto ao ar. O lenho é pouco brilhante, de textura média, grã direita e irregular, superfície ligeiramente áspera ao tato e cheiro e gosto imperceptíveis (TORTORELLI, 1956; MAINIERI; CHIMELO, 1986).

As características anatômicas macro e microscópicas do lenho (Figura 2) foram descritas por Tortorelli (1956); Mainieri e Chimelo (1986) e apresentam *parênquima axial* pouco visível a olho nu, abundante, vasicêntrico e, menos comum, aliforme e confluyente, formando pequenos trechos oblíquos ou faixas curtas, que às vezes, tornam-se mais longas, irregulares e onduladas; seriado de 2-4 células por série; células alargadas de 180-250 μm ; cristais rombóides de oxalato de cálcio muito abundantes, que em corte tangencial estão dispostos em fileiras verticais. Vasos de secção circular ou elíptica, visíveis a olho nu, em distribuição irregular por apresentar anéis semiporosos, às vezes bem acentuados no limite de certas camadas de

crescimento; maioria solitários (70%), quando múltiplos, de 2-4 vasos e raras cadeias radiais; de poucos a numerosos, 3-18 poros por mm²; pequenos a médios 50-170 µm de diâmetro tangencial; os poros múltiplos têm 130 µm de diâmetro. *Linhas vasculares* aparentes, escurecidas, numerosas, irregulares e vazias; placa de perfuração simples e área de perfuração ligeiramente oblíqua a horizontal; pontoações intervasculares médias com 8-10 µm de diâmetro tangencial, alternas, abertura inclusa e lenticular, guarnecidas; elementos vasculares muito curtos, com apêndices curtos. *Raios* muito finos, numerosos; na face tangencial são pouco notados sob lente e em disposição estratificada, regular e distinta sob lente; na face radial, o espelhado dos raios é muito pouco contrastado; homocelulares de células procumbente; unisseriados, às vezes localmente e raros bisseriados e trisseriados; extremamente baixos, variando de 113-260 µm de altura, com 4-9 células, sendo a maioria com 7-9 células de altura (80%); pouco numerosos a muito numerosos, 6-17 raios por mm, sendo a maioria com 14-17; pontoações radio-vasculares semelhantes às intervasculares; óleo resina presente. *Fibras* dispostas em fileiras radiais; de secção poligonal; libriformes com numerosas pontoações simples, paredes delgadas; curtas, com até 900 µm de comprimento. *Camadas de crescimento* demarcadas por anéis semiporosos. *Estrutura estratificada* regular de todos os elementos celulares.

Figura 2 - Características do lenho das árvores de tipuana: fotomicrografias das seções (A) transversal, longitudinais (B) tangencial e (C) radial (100x)

A madeira de tipuana apresenta baixa retratibilidade e baixa a média resistência mecânica, sendo indicada para embalagens leves e miolo de painéis e portas e para acabamento interno (guarnições, rodapés, etc.). Em condições adversas é considerada de baixa durabilidade natural ao ataque de organismos xilófagos. (MAINIERI; CHIMELO, 1986).

3.1.3 As árvores de tipuana na arborização urbana

Tortorelli (1956); Mainieri e Chimelo (1986); Lorenzi (2003); Macaya (2002) citaram que as árvores de tipuana são muito utilizadas no Brasil (estados do sul e sudeste) na Argentina, Bolívia, Chile, Estados Unidos, França e Argélia na arborização de ruas, avenidas e praças, devido ao grande e frondoso porte e às flores amarelas, pequenas e numerosas, que formam um tapete ao redor da planta. Ferrer e Zen (1984) reiteraram sua utilização na arborização urbana, por ser espécie de rápido crescimento, não aconselhando seu plantio em calçadas pequenas e sob rede elétrica.

Lima (1993) constatou que as árvores de tipuana estavam entre as 10 espécies mais comuns na arborização viária da cidade de Piracicaba-SP, sendo que afetou o calçamento, pelo crescimento superficial das suas raízes que se encontravam limitadas, pela compactação do solo e reduzida área livre. A ocorrência do fungo apodrecedor *Ganoderma* sp. foi relatada nas árvores, não sendo mencionada a ocorrência de térmitas. A tipuana não se encontrava na lista das selecionadas pela Prefeitura para novos plantios, pelos problemas no calçamento e por ser exótica, apesar de sua robustez.

Teixeira (1999) em censo das espécies de árvores em conjunto habitacional no município de Santa Maria - RS, observou que as de tipuana estavam entre as 10 espécies mais plantadas; Velasco (2003) constatou a presença de árvores de tipuana na cidade de Belo Horizonte - MG.

Sampaio (2006), em levantamento das árvores na cidade de Maringá-PR, constatou que, de 28.153 árvores, 3.775 eram de tipuana, sendo a segunda mais freqüente (13,4%), com distribuição considerada adequada na composição florística da cidade. Das árvores de tipuana, cerca 2.443 (19,6%) encontravam-se em condição sofrível, pelos danos físicos severos, visíveis sintomas de doenças, infestação de pragas, presença de cupins (978 árvores, 25,9%, sem identificar a espécie).

Angelis, Castro e Angelis Neto (2007), analisando as árvores da cidade de Maringá-PR constataram que 541 (12%) tipuanas apresentaram sintomas de cancro no tronco, de severidade baixa.

Silva (2007) se referiu à árvore de tipuana, da cidade de Pato Branco - PR, como uma espécie exótica, de baixa ocorrência, de grande porte e não compatível com as calçadas, descaracterizando a fisionomia da cidade, em região de floresta de araucária.

Faria, Monteiro e Fisch (2007), em análise qualitativa e quantitativa da arborização da cidade de Jacareí - SP, observaram que a espécie tipuana foi a de maior ocorrência nas seis principais vias, ultrapassando o limite de diversidade recomendado de 10 -15 % por espécie.

Silva et al. (2008) observaram na cidade de Mariópolis - PR que as árvores de tipuana eram a terceira espécie mais freqüente, sendo considerada inapropriada por danificar o calçamento e apenas para praças e parques; recomendaram que as árvores de tipuana deveriam ser gradualmente substituídas, num resgate às espécies da mata nativa de araucária da região.

Na cidade de São Paulo - SP, as árvores de tipuana foram extensivamente utilizadas na arborização urbana dos passeios públicos e praças dos bairros, ex.: Cerqueira César, Pacaembu, Sumaré, Paraíso, Alto da Lapa, Alto de Pinheiros. As primeiras mudas da espécie foram plantadas pela empresa City Lapa, responsável pelo loteamento dos bairros há cerca de 60-70 anos. Nos bairros da periferia, como Tatuapé, Mooca, Belém, Penha e São Mateus, foram plantadas em menor freqüência (BRAZOLIN¹, informação pessoal).

¹ BRAZOLIN, S. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT

Alguns bairros da cidade de São Paulo (ex.: Pacaembu), tombados pelo Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico, Arqueológico, Artístico e Turístico - CONDEPHAAT, caracterizam-se pelas árvores de tipuana formando túneis pelas suas copas densas e altas. A remoção de árvores de tipuana nesses bairros exigiria o replantio da espécie, sendo que, em outras condições, a PMSP não recomenda o seu plantio em área urbana (SÃO PAULO, 2005). O levantamento das árvores da cidade de São Paulo pelo IPT (2004) reiterou ser uma espécie totalmente inadequada para os passeios públicos estreitos, causando interferência na rede elétrica.

3.2 Biodeterioração do lenho das árvores

Como material orgânico, o lenho das árvores pode ser atacado e decomposto por insetos, fungos e bactérias, processo denominado de biodeterioração e caracterizado pela colonização das suas células e tecidos, causando alterações na estrutura anatômica e propriedades químico-físico-mecânicas. Na condição urbana, os fungos apodrecedores e/ou os cupins xilófagos são os principais organismos que afetam o lenho das árvores (IPT, 2004). No hemisfério norte a literatura científica relata que os fungos apodrecedores patógenos ou oportunistas estão comumente associados à queda de árvores. Os térmitas, com a maioria das espécies distribuída nos trópicos, são considerados pragas associadas às florestas plantadas e urbanas.

3.2.1 Biodeterioração do lenho por fungos apodrecedores

Shigo (1979) descreveu a biodeterioração do lenho das árvores como um processo de sucessão ecológica de microrganismos (bactérias e fungos). Entretanto, em estágio avançado de deterioração do lenho causada por fungos apodrecedores, diversos autores, como Wagener (1963); Shigo (1983); Yuong (1984); Foelkel e Busnardo (1986); Rayner e Boddy (1988); Mattheck e Breloer (1997); Blanchette (2003); Amaral et al. (2003); Brazolin, Amaral e Tomazello-Filho (2006); Brazolin, Chagas e Tomazello-Filho (2006); Tomazello-Filho, Brazolin e Chagas (2008) descreveram os 3 tipos de apodrecimento, segundo a atividade enzimática dos fungos, denominados de podridão branca, parda e mole (KÄÄRIK, 1975 apud OLIVEIRA et al., 1986).

3.2.1.1 Tipos de podridão do lenho

Podridão branca

Os fungos de podridão branca pertencem às Subdivisões Ascomycotina e Basidiomycotina e, de acordo com Oliveira et al. (1986); Eaton e Hale (1993); Lélis et al., (2001); Brazolin, Amaral e Tomazello-Filho (2006); Brazolin, Chagas e Tomazello-Filho (2006); Tomazello-Filho, Brazolin e Chagas (2008), o lenho atacado por estes fungos, na análise macroscópica, torna-se macio, esponjoso e mais claro que o sadio (Figura 3, A). Na madeira apodrecida podem ser observadas linhas escuras e de tonalidade marrom, que delimitam a região afetada, resultado de mecanismo de consolidação e compartimentalização do fungo. Estes fungos possuem sistema enzimático com capacidade de consumir os principais constituintes da parede celular e lamela média: celulose, hemicelulose e lignina. Algumas espécies de fungos são consideradas seletivas e degradam, nos estágios iniciais, somente a lignina da parede celular.

Podridão parda

Segundo Wilcox (1973); Oliveira et al. (1986); Eaton e Hale (1993); Lélis et al. (2001), a podridão parda é causada por fungos da Subdivisão Basidiomycotina, principalmente em madeira de coníferas. O lenho apodrecido torna-se friável, quebradiço e mais escurecido que o sadio (Figura 3, B). Estes fungos consomem, basicamente, a celulose e hemicelulose das paredes celulares, mantendo a lignina residual. Os tecidos do lenho atacados por estes fungos tornam-se rígidos, se rompem com baixas forças solicitantes, sendo difícil a predição do rompimento do caule das árvores afetadas.

Podridão mole

Os fungos de podridão mole, pertencentes às Subdivisões Ascomycotina e Deuteromycotina atacam preferencialmente a celulose e a hemicelulose, ao invés da lignina, produzindo, no entanto, cavidades na parede celular das células, que tornam o material rígido, mas pouco resistente à flexão. Nas árvores, esses fungos são citados

como importantes no processo de sucessão dos microrganismos, para o posterior estabelecimento dos fungos de podridão branca e/ou parda. Não são considerados, portanto, como a causa de drásticas alterações no lenho (RAYNER; BODDY, 1988)

Estes fungos se nutrem de materiais de reserva presentes nas células do lenho não danificando, nos estágios iniciais, a parede celular; com a gradativa diminuição de carboidratos livres e facilmente metabolizáveis, degradam os carboidratos da parede celular (OLIVEIRA et al., 1986). Macroscopicamente, o lenho quando atacado apresenta a camada superficial amolecida, escurecida e facilmente removível e a imediatamente abaixo, mostra-se sadia (Figura 3, C). Com a secagem do lenho surgem, na sua superfície, pequenas fissuras superficiais paralelas e transversais às fibras, com aspecto craqueado (BRAZOLIN, 1998). Wilcox (1973) descreveu em nível microscópico 2 tipos de ataque do lenho, sendo o do tipo 1, a forma clássica de deterioração (formação de cavidades na camada S2 da parede secundária da célula) e o tipo 2 (erosão da parede celular, a partir do lume das células).

Figura 3 - Podridão branca (A) no cerne de árvore de tipuana (seta) (escala = 0,20 m). Podridão parda (B) em conífera (Fonte: BLANCHETTE, 2003). Podridão mole (C) em *Tabebuia* sp. (ipê-amarelo) - escala = 1 cm (Fonte: BRAZOLIN, 1998)

3.2.1.2 Colonização do lenho das árvores por fungos apodrecedores

Segundo Rayner e Boddy (1988), a colonização do lenho de uma árvore pelos fungos ocorre em uma série de heterogêneos microambientes que inibem ou favorecem o seu estabelecimento. Os padrões de colonização são muito diversificados e de difícil classificação em categorias. Entretanto, Rayner (1986 apud RAYNER; BODDY, 1988), propôs que a colonização de fungos de podridão branca, parda e/ou mole pode ser descrita em cinco estratégias, que consideram a distribuição de água e sua relação com a aeração, sendo:

1ª. Apodrecimento do cerne (*heart rot*): é a maior causa da deterioração do lenho das árvores e de possíveis problemas de instabilidade estrutural (Figura 4, A).

2ª. Oportunismo não especializado (*sap rot*): envolve a colonização do alburno não suscetível, exposto por injúria ou pela morte da casca, resultando na descoloração do lenho e eventual apodrecimento (Figura 4, B). O termo *sap rot* ou apodrecimento do alburno foi proposto por Blanchette (2003).

3ª. Oportunismo especializado: os fungos se estabelecem em porções do tronco das árvores que estão sob condições micro-ambientais estressantes. Estes fungos possuem a capacidade de se adaptar e/ou modificar estes microambientes (especialização), levando vantagem sobre outros organismos competidores na captura de recursos nutricionais (oportunismo). O apodrecimento causado por estes fungos ocorre, principalmente, nos galhos e raízes mais afetados pelo estresse da planta; ascomicetos e basidiomicetos são reconhecidos por esta estratégia de colonização, tais como, *Hypoxylon* spp. e *Stereum* spp., respectivamente.

Figura 4 – Apodrecimento em tipuana. A: apodrecimento do cerne (podridão branca) em corte transversal do lenho (seta) (escala = 0,20 m); (B) oportunismo não especializado ou apodrecimento do alburno (podridão branca) em injúria no colo (seta) (escala = 0,10 m)

4ª. Patogenia ativa: alguns fungos apodrecedores podem colonizar o alburno sadio por mecanismos patogênicos conhecidos, sendo o ataque considerado necrotrófico, quando ocorre a destruição das células vivas do lenho. Nesta estratégia, os fungos (i) modificam as condições micro ambientais do lenho da árvore (ex.: degradação das membranas das pontoações) permitindo o avanço da deterioração ou (ii) atacam as células do câmbio, interrompendo as suas funções fisiológicas e expondo o xilema para a ação dos fungos e outros organismos. Nesta estratégia são reconhecidos 3 mecanismos, sendo: (i) *infecção ectotrófica das raízes*, quando os fungos produzem uma extensa massa micelial sobre a superfície da raiz e, posteriormente, matam as células do câmbio, colonizando seu interior (ex.: *Heterobasidion annosum*, *Ganoderma* spp. e *Armillaria* sp); (ii) *infecção por injúria*, quando o fungo estabelece um inóculo em tecidos expostos por injúrias, sendo utilizado por fungos seletivos que se desenvolvem em condições específicas de estresse da árvore/meio ambiente e/ou associados a algum vetor, como insetos (ex.: *Stereum sanguinolentum*; *Coriolus versicolor*); (iii) *cancros*, reconhecidos como porções de tecido de casca necrosado, resultado do crescimento de microrganismo patogênico e do apodrecimento do lenho subjacente à casca (ex.: *Hypoxylon* spp.)

5ª. Tolerância ao dessecação: em certas circunstâncias, a parte superior de uma árvore pode tornar-se sujeita ao dessecação ou a flutuações drásticas do teor de umidade do lenho, seja por doença ou atividade fisiológica alterada. Nestas condições, alguns fungos (ex.: vários ascomicetos e basidiomicetos oportunistas especializados) toleram os baixos ou flutuantes teores de umidade do lenho, tornando-se uma vantagem seletiva, estratégica para a colonização da planta.

Essas estratégias propostas por Rayner (1986 apud RAYNER; BODDY, 1988) não podem ser consideradas excludentes, podendo várias delas serem utilizadas por alguns fungos na colonização de uma árvore. A proposta deve ser considerada, portanto, como uma classificação artificial para o entendimento do processo de biodeterioração e/ou declínio de uma árvore.

As estratégias de apodrecimento do cerne e de oportunismo não-especializado (apodrecimento do alburno) estão, normalmente, associadas às injúrias e são os processos de biodeterioração mais significantes nas árvores, em termos econômicos e de risco de ruptura. Estes processos não estão associados, necessariamente, a fungos específicos e/ou ao declínio, como estabelecem as outras estratégias de colonização por fungos (oportunismo especializado, patogenia ativa ou tolerância ao dessecação).

Para a estratégia de apodrecimento do cerne, Rayner e Boddy (1988) propuseram duas classes distintas, freqüentemente observadas, sendo, o **apodrecimento no topo** (*top rot*), com origem na copa e com propagação em direção à parte inferior da árvore e o **apodrecimento na base** (*butt rot*), com origem nas raízes ou no colo do tronco que se propaga em direção à parte superior da árvore. As rotas de infecção/colonização mais significativas (Figura 5) são: i) grandes injúrias que expõem o cerne provenientes, normalmente, de podas e quebra de galhos; ii) pequenos galhos secos e podres, sem cerne formado, mas cujo apodrecimento pode atingir o cerne do tronco; iii) galhos ou raízes com cerne formado, cujo processo de deterioração pode iniciar-se no alburno, propagando-se para o cerne e depois para o tronco; iv) infecção ectotrófica de raízes; e v) contato entre raízes saudáveis e afetadas pelos fungos.

Figura 5 - Rotas de infecção/colonização de fungos apodrecedores em árvores: (A) grandes feridas que expõem o cerne; (B) pequenos galhos secos e podres, sem cerne formado; (C) galhos e raízes com cerne formado; (D) infecção ectotrófica em raízes; (E) contato entre raízes saudáveis e afetadas por fungos. (Fonte: RAYNER; BODDY, 1988). (Desenho: OLIVEIRA-NETO²)

² OLIVEIRA-NETO, M.A. de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.

Foelkel e Busnardo (1986) relataram a ocorrência de apodrecimento do cerne de *Eucalyptus saligna* e *E. grandis* (podridão branca), tendo como causa o apodrecimento de galhos. Os insetos, principalmente, as brocas-de-madeira podem também influenciar no apodrecimento do lenho das árvores, como o besouro-de-ambrosia *Monothrum scutellare* (família Scolytidae) observado por Svihra e Kelly (2004) no processo de infecção e de apodrecimento do tronco de árvores de *Quercus agrifolia* (carvalho), relacionando-se a maior atividade do inseto com o aumento do apodrecimento do cerne.

Apesar das diversas rotas, o apodrecimento do cerne está mais associado às injúrias causadas no sistema radicular, tronco e/ou galhos, que expõem o cerne (FELIX; SHIGO, 1977; YOUNG, 1984; FOELKEL; BUSNARDO, 1986; RAYNER; BODDY, 1988; SHORTLE; SMITH, 1998; BLANCHETTE, 2003). As outras rotas possuem, normalmente, especificidade com fungos patógenos e/ou oportunistas seletivos. Entretanto, a seletividade e capacidade de colonização do lenho pelos fungos que causam o apodrecimento do cerne estão relacionadas, principalmente, às condições micro ambientais nesta porção da madeira.

3.2.1.3 Espécies de fungos em árvores

As espécies de fungos das subdivisões Basidiomycotina e Ascomycotina são associadas ao apodrecimento do cerne das árvores, sendo os basidiomicetos mais frequentes e que causam danos mais expressivos. Quanto ao tipo de apodrecimento, mencionam-se a podridão parda e branca (RAYNER; BODDY, 1988; HARTMAN; PIRONE; SALL, 2000).

Yuong (1984); Hartman, Pirone e Sall (2000) indicaram que a presença de corpos-de-frutificação no lenho das árvores representa um estágio avançado de apodrecimento, ou seja, a árvore não teve a capacidade de limitar o processo de colonização.

Lima (1993), analisando as doenças e pragas das árvores da cidade de Piracicaba-SP observou a ocorrência de fungos do gênero *Ganoderma* sp. não estabelecendo, no entanto, relação com apodrecimento do lenho das árvores. Brazolin³ (informação pessoal) observou, da mesma forma, corpos-de-frutificação desse gênero presentes no lenho de árvores nas cidades de Piracicaba e São Paulo - SP, Porto Alegre - RS, Rio de Janeiro - RJ, Recife - PE, Vitória - ES, Curitiba - PR e Belo Horizonte - MG, associados ao apodrecimento do cerne.

Considerando que o sistema de fluxo de seiva orgânica e mineral (floema e xilema) é responsável pela manutenção das funções vitais das árvores, a ocorrência de apodrecimento restrito (mesmo avançado) do cerne não afeta o seu vigor, com a presença dos corpos-de-frutificação. O apodrecimento e injúrias em grandes extensões do alburno podem, no entanto, estar associados ao declínio e morte das árvores. A Tabela 1 relaciona a classificação, o nome científico e o tipo de podridão causada pelos principais fungos em árvores.

³ BRAZOLIN, S. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT

Tabela 1 - Classificação dos fungos, tipo de apodrecimento do cerne e parte afetada das árvores

Subdivisão	Espécie	Tipo de podridão	Parte da árvore
Basidiomycotina	<i>Armillaria</i> spp.	branca	Base
	<i>Collybia velutipes</i>	branca	-
	<i>Daedaleopsis confragosa</i>	branca	Topo
	<i>Fistulina hepática</i>	parda	Topo
	<i>Fomes fomentarius</i>	branca	-
	<i>Fomitopsis cytisina</i>	branca	Base
	<i>Ganoderma pfeifferi</i>	branca	base e topo
	<i>G. adpersum/applanatum</i>	branca	base e topo
	<i>G. lucidum</i>	branca	Base
	<i>G. resinaceum</i>	branca	Base
	<i>Grifola frondosa</i>	branca	Base
	<i>Heterobasidion annosum</i>	branca	Base
	<i>Inonotus dryadeus</i>	branca	Base
	<i>I. hispidus</i>	branca	Topo
	<i>I. radiatus</i>	branca	Topo
	<i>Laetiporus sulphureus</i>	parda	base e topo
	<i>Lyophyllum ulmarium</i>	parda	Topo
	<i>Meripilus giganteus</i>	branca	Base
	<i>Phaeolus schweinitzii</i>	parda	Base
	<i>P. pomaceus</i>	branca	Topo
	<i>P. weirii</i>	parda	Base
	<i>Pholiota squarrosa</i>	parda	Base
	<i>Pleurotus ostreatus</i>	branca	Topo
	<i>Polyporus squamosus</i>	branca	Topo
	<i>Rigidoporus ulmarius</i>	parda	Base
	<i>Schizophyllum commune</i>	branca	-
	<i>Sparassis crispa</i>	parda	base
	<i>Stereum gauspatum</i>	-	topo
	<i>Trametes versicolor</i>	branca	-
	<i>Tyromyces spliticus</i>	parda	topo
Ascomycotina	<i>Hypoxylon</i> spp.	branca	base e topo
	<i>Ustilina deusta</i>	-	base

Fonte: Rayner e Boddy (1988); Hartman, Pirone e Sall (2000)

3.2.2 Biodeterioração do lenho por cupins

Os cupins são insetos sociais da Ordem Isoptera, que formam colônias compostas por indivíduos de diferentes categorias, estando presentes, principalmente, nas regiões tropicais, com grande variedade de hábitos. De modo geral, a sociedade dos cupins é formada por 3 castas - reprodutores, operários e soldados, sendo essas duas formadas por indivíduos estéreis.

A casta dos operários é a categoria mais numerosa da sociedade, sendo responsável por todos os trabalhos na colônia como, a construção e reparos do ninho, o cuidado e a alimentação dos jovens e dos adultos das outras castas e busca de alimento (ataque das árvores).

A celulose do lenho é o alimento básico dos cupins xilófagos, sendo que a maioria das espécies não causa prejuízos e se alimenta da madeira parcial ou intensamente apodrecida, de partes mortas de vegetais, de gramíneas e de vegetais parcialmente decompostos por fungos cultivados nos chamados “jardins de fungos” (OLIVEIRA et al., 1986). A celulose é uma substância de difícil digestão sendo que a maioria dos cupins não tem ou não produz enzimas celulolíticas em quantidade suficiente. A digestão total ou parcial da celulose pelos cupins é possível devido à associação com microrganismos simbiontes flagelados e bactérias, que vivem no seu trato digestivo.

Estão descritas 2.864 espécies de cupins no mundo, sendo 312 no Brasil e pertencentes a 4 famílias: Kalotermitidae, Rhinotermitidae, Serritermitidae e Termitidae (CONSTANTINO, 2008). Na prática, os cupins são freqüentemente agrupados pelos hábitos de nidificação, sendo denominados cupins de madeira (a colônia se desenvolve integralmente na madeira seca ou úmida), de solo (a colônia se desenvolve no solo, subterrânea ou epígea) e arborícolas (a colônia se desenvolve sobre suporte, acima do solo, geralmente em uma árvore).

3.2.2.1 Ocorrência de cupins em árvores urbanas

No Brasil, os estudos sobre as árvores urbanas e a ocorrência de infestações termíticas são escassos, sendo que os cupins-subterrâneos são responsáveis por

grandes prejuízos às árvores e que também se constituem em seu abrigo (FONTES, 1998).

Na cidade do Rio de Janeiro - RJ, Laera (1998) descreveu a infestação crítica de cupins *Coptotermes havilandi* em árvores urbanas, relacionando-a com o manejo e o plantio de espécies inadequadas e condições de crescimento impróprias.

Coli e Costa-Leonardo (1999); Costa-Leonardo (2002) observaram na cidade de Rio Claro - SP a infestação de *C. gestroi* em árvores de sibipiruna (*Caesalpinia peltophoroides*), alecrim-de-campinas (*Holocalix balansae*), sombreiro (*Clitoria fairchildiana*), flamboyant (*Delonix regia*), jacarandá-mimoso (*Jacaranda mimosaeopholia*), pinheiro-da-austrália (*Agatis* cf. *robusta*), amoreira (*Morus alba*), pau-ferro (*Caesalpinia férrea*) e resedá (*Lagerstroemia speciosa*). As árvores de sibipiruna foram as mais suscetíveis ao ataque, não sendo indicada, por este motivo, na arborização urbana. Na mesma cidade, Santos; Costa-Leonardo (1999) observaram que a infestação dos cupins foi de 11%, sendo que 85% das árvores eram sibipiruna, alecrim-de-campinas e figueira e relacionada às podas mal realizadas; os autores recomendaram a substituição por árvores mais resistentes a estes organismos, como a murta (*Myciera tenella*) e o resedá.

Amaral et al. (2003) analisando árvores de pau-brasil (*Caesalpinia echinata*) e de sibipiruna do Parque da ESALQ - USP, em Piracicaba - SP identificaram cupins das famílias Termitidae e Kalotermitidae dos gêneros: *Nasutitermes* spp., *Neocapritermes* spp., *Embiratermes* spp., *Procornitermes* spp., *Cornitermes* spp. e *Rugitermes* spp.. Os cupins xilófagos *Nasutitermes* spp. estavam associados ao lenho apodrecido por fungos e atacando as regiões do alburno e do cerne do tronco das árvores das duas espécies. Bandeira et. al. (1998 apud MILANO; FONTES, 2002) assinalaram a presença de 5 espécies de *Nasutitermes* spp. atacando e construindo ninhos em árvores de parques urbanos e em áreas de vegetação natural em João Pessoa - PB.

Os cupins dos gêneros *Embiratermes* spp., *Neocapritermes* spp., *Procornitermes* spp. e *Cornitermes* spp. não estavam atacando o lenho, sendo coletados no solo junto ao colo das árvores. Os cupins do gênero *Embiratermes* spp., alimentam-se de matéria orgânica em decomposição e de raízes de mudas de plantas (ex.: *Eucalyptus* spp). Os cupins de espécies do gênero *Neocapritermes* spp. constroem

o ninho no interior do solo e alimentam-se de húmus e raízes de mudas (LEE; WOOD, 1971). Os cupins do gênero *Procornitermes* spp. apresentam hábito inteiramente subterrâneo, alimentando-se de excrementos de bovinos e de restos vegetais e os do gênero *Cornitermes* spp. podem, eventualmente, atacar plantas vivas e provocar algum tipo de dano às culturas (FERNANDES; CZEPAK; VELOSO, 1998; LÉLIS et al., 2001), sendo que, nas pastagens, se alimentam basicamente de material celulósico seco (ex.: folhas e raízes mortas de gramíneas).

Os cupins do gênero *Rugitermes* spp. são encontrados em madeira podre ou lenho afetado de árvores vivas que apresentam alto teor de umidade e em galhos já apodrecidos por fungos de podridão branca, por exemplo árvores de sibipiruna e de pau-brasil (AMARAL et al., 2003).

Na cidade de Goiânia - GO, Brandão et al. (2002) identificaram 9 espécies de cupins em 20 espécies de árvores, sendo *Coptotermes* sp, provável *C. havilandi*, *Heterotermes tenuis*, *Nasutitermes* off *minor*, *N. corniger*, *N. ephratae*, *N. kemneri*, *N. unduliceps*, *Microcerotermes strunkii* e *Neotermes* sp.. Neste estudo, *Nasutitermes* spp. ocorreu em 70% das colônias observadas nas árvores; *N. corniger* e *N. unduliceps* com as maiores ocorrências; *M. strunkii* e *Neotermes* sp. apresentaram maior ocorrência em árvores de sibipiruna e de monguba.

Na cidade de Maringá - PR, Sampaio (2006) em um levantamento de cupins realizado em 28.152 árvores dos passeios públicos constatou que 22% apresentavam vestígios da presença externa desses insetos, sendo que somente 14 árvores com a ocorrência de cupins eram jovens, com altura menor que 3 metros. Em relação às espécies de árvores, a sibipiruna apresentou a maior ocorrência de cupins, seguida pelas de tipuana. O autor não identificou os cupins não sendo, portanto, possível discernir os xilófagos e os não xilófagos.

3.2.2.2 Ocorrência de cupins em árvores na cidade de São Paulo - SP

Zorzenon e Potenza (1998) relataram que árvores comuns plantadas na cidade de São Paulo, como as de sibipiruna, jacarandá-mimoso, quaresmeira, acácia, ipê, paineira e tipuana, podem ser infestadas por cupins, com a possibilidade de causar a sua morte.

O IPT (2004) relatou duas espécies de cupins-subterrâneos nas árvores da cidade de São Paulo, *Coptotermes gestroi* (*haviglandi*) e *Heterotermes* sp. (somente em duas árvores) da família Rhinotermitidae, e uma espécie de cupim-arborícola, *Nasutitermes* sp. (somente em duas árvores), da Família Termitidae. *C. gestroi* é predominante nas árvores da cidade de São Paulo, estando associado aos grandes centros urbanos. Outros cupins não xilófagos (*Embiratermes* sp., *Cornitermes* sp., *Neocapritermes* sp., *Rugitermes* sp. e uma espécie da Subfamília Apicotermitinae) foram observados dispersos no solo junto ao colo das árvores. Anteriormente, Zorzenon e Potenza (1998) haviam relatado a presença de cupins desses gêneros em árvores da arborização da cidade de São Paulo.

Além da infestação das árvores ocorre, também, grande infestação dos cupins subterrâneos em edificações e que, através da dispersão subterrânea ou pela revoada, são propagados para as árvores, ocorrendo, também o inverso (GAY, 1946; HENDERSON; SHARPE; FELIX, 1995; FONTES, 1998; OSBRINK; WOODSON; LAX, 1999).

No levantamento realizado por Romagnano (2004) na região denominada de “centro expandido” da cidade de São Paulo e que inclui a maioria dos distritos com ocorrência de cupins nas edificações e nas árvores, o Jardim Paulista e a Vila Mariana representaram, respectivamente, 18 e 10% da ocorrência de infestações de cupins, confirmando a relação dos cupins nas árvores e nas edificações; nas regiões de Cerqueira César e Paraíso, ocorreram as maiores frequências de cupins nas árvores, na ordem de 25 e 24%, respectivamente.

A presença dos cupins em frequência variada nas regiões de São Paulo relaciona-se com a sua grande capacidade de dispersão e ao processo de urbanização da cidade. Nos locais que mantêm a diversidade de espécies da fauna nativa pode ocorrer um equilíbrio competitivo, não permitindo o avanço dos cupins-subterrâneos (MILANO; FONTES, 2002).

Segundo Amaral (2002), 24,51% das árvores diagnosticadas no bairro de Higienópolis apresentaram sintomas de ataque de cupins-subterrâneos *C. haviglandi*, sendo que as de alfeneiro, sibipiruna, figueira, espatódea e a tipuana, mostraram 12, 4, 2, 2 e 2 % de infestação, respectivamente.

Em diagnóstico realizado em 726 árvores de eucaliptos do Parque do Ibirapuera, Justi-Junior et al. (2004) observaram cupins em 22,78 % das árvores, pertencentes aos gêneros *Nasutitermes* spp., *Cryptotermes* spp., *Heterotermes* spp. e *Coptotermes* spp., este com maior ocorrência. Nessa mesma plantação de eucalipto, Silva-Filho et al. (2007) constataram a ocorrência de cupins na maioria das árvores analisadas não sendo, no entanto, identificados e diferenciados quanto ao hábito (xilófago ou não xilófago).

Em levantamento realizado por Toledo e Romagnano (2006) em 10,61% das árvores (DAP>10 cm) do bairro do Pacaembu, foi detectado cupim do gênero *C. gestroi* (havilandi), sendo a maior concentração de ataque nas árvores de sibipiruna, tipuana e alfeneiro, concluindo tratar-se de espécies suscetíveis a estes insetos.

Nas cidades de São Paulo e do Rio de Janeiro, Costa-Leonardo (2002) citou a ocorrência do cupim *C. havilandi* em inúmeras espécies de árvores urbanas como as de sibipiruna, tipuana, quaresmeira, paineira, guapuruvu, jacandá-mimoso, ipê, álamo, abacateiro, figueira, palmeira, eucalipto, falsa-seringueira, acácia cássia, alecrim, alfeneiro, pinheiro, choupo, pata-de-vaca, espatódea, mamorana-da-terra-firme e angico-branco.

3.2.2.3 Danos causados pelos cupins nas árvores

No Brasil não há informações referentes à quantificação dos prejuízos econômicos causados pelos cupins xilófagos nas árvores urbanas. Contudo, na cidade de Nova Orleans, Louisiana - EUA, o cupim *Coptotermes formosanus* foi responsável por perdas anuais estimadas em US\$ 6 milhões na arborização urbana (FREYTAG; CINK, 2001).

No tronco da árvore, o ataque de cupins está basicamente associado à porção do cerne. Corroborando esta afirmação, Fontes (1998); Coli e Costa-Leonardo (1999) registraram a ocorrência de *C. havilandi* infestando o cerne de árvores jovens e adultas, sem a presença de sinais externos e em árvores que nunca haviam sofrido poda ou outras intervenções comuns no meio urbano. Devido a esta constatação, os autores afirmaram que esta espécie, denominada como “cupim-do-cerne”, penetra pelas raízes

das árvores, fato também observado por Juttner (1997) com *C. formosanus*, que constrói galerias pelo interior do tronco, destruindo o cerne e deixando as árvores ocas.

No Canadá, Cooper e Grace (1987) observaram a ocorrência de cupins *Reticulitermes flavipes* nas raízes, progredindo seu ataque para o cerne das árvores, com a infestação iniciando-se no interior do seu tronco e nem sempre precedida ou associada a um ferimento. Esses autores e Amaral (2002) relacionaram a presença dos túneis construídos pelos cupins, na superfície do tronco (interna e externamente a casca), com a deterioração interna das árvores.

Kofoed (1934); Adamson (1943); Harris (1955); Becker (1975); Oliveira et al. (1986) associaram o ataque dos cupins xilófagos nas árvores à presença de tecidos mortos pela ação dos fungos apodrecedores podendo, este ataque progredir para o tecido sadio. Neste aspecto, Kalshoven (1963); Hickin (1971) consideraram o ataque dos cupins como secundário, onde ocorre, primeiramente, uma deterioração do lenho causada por fungos.

De acordo com Hickin (1971), os tecidos de lenho deteriorados são geralmente preferidos pelos cupins mais primitivos da família Kalotermitidae, mas também por alguns gêneros mais evoluídos, tais como *Amitermes*, *Microcerotermes* e *Nasutitermes*, com exceção de algumas espécies de *Coptotermes* spp. que atacam lenho sadio. Greaves et al. (1965, 1967 apud PERRY; LENZ; WATSON, 1985), encontraram em árvores de florestas de eucalipto na Austrália, uma independência entre os danos causados pelos cupins e pelos fungos.

Kalshoven (1962) mencionou a infestação de cupins do gênero *C. havilandi* (*javanicus*) como causa da morte de árvores de teca (*Tectona grandis*), na Malásia. As cavidades formadas na região do cerne do tronco afetaram os tecidos do alburno interferindo na circulação da seiva e causando a seca da copa das árvores. O gradual declínio das árvores de teca favoreceria o desenvolvimento das colônias de cupim pelo aumento da disponibilidade de alimento, sendo um longo processo dependente do vigor das árvores e do tamanho da colônia de cupim. Ainda, Lai et al. (1983) observaram o ataque de *C. formosanus* em raízes e no tronco (anelamento) de plantas de citrus e de eucalipto no Hawaii, induzindo a sua morte.

A durabilidade natural do tronco das árvores é resultado das características do seu cerne, sendo um fator importante na infestação pelos cupins. Estudos da ocorrência de cupins nas diferentes espécies de árvores na arborização urbana indicam sintomas de resistência e suscetibilidade ao ataque destes insetos (COLI; COSTA-LEONARDO, 1999; SANTOS; COSTA-LEONARDO, 1999; AMARAL, 2002; IPT, 2004; ROMAGNANO, 2004; SAMPAIO, 2006). Em árvores de espécies consideradas como resistentes e que foram infestadas por cupins, Becker (1975), sugere que o seu cerne perdeu a resistência natural pela sua idade elevada e senescência.

Diversos autores relacionam o manejo inadequado das árvores na condição urbana, como podas mal executadas, as injúrias, os danos causados por ventos fortes e o estresse com a suscetibilidade aos cupins xilófagos (HARRIS, 1971; FONTES, 1998; LAERA, 1998; COLI; COSTA-LEONARDO, 1999).

3.3 Restrição e desenvolvimento de organismos xilófagos em árvores

Oliveira et al. (1986); Rayner e Boddy (1998); Lélis et al. (2001) destacaram que os extrativos do lenho e o teor de umidade (relacionado ao regime gasoso; disponibilidade de oxigênio) interferem no ataque do cerne das árvores por fungos apodrecedores e insetos xilófagos.

Extrativos de madeira: são metabólitos secundários (ex.: ceras, gorduras, ácidos graxos, ácidos, álcoois, esteróides, resinas, terpenos, flavonóides, fenóis, etc.), produzidos pela árvore, podendo ser removidos por solventes orgânicos ou pela água, e que interferem na colonização dos fungos: i) como recurso nutricional (fonte de carbono); ii) inibindo seu crescimento (substância fungicida/inseticida); e (iii) como estimulante do crescimento (OLIVEIRA et al., 1986; RAYNER; BODDY, 1988). Segundo Farmer (1967 apud OLIVEIRA et al., 1986), os extrativos com propriedades fungicidas não se distribuem homogeneamente, tendo maior concentração na parte externa do cerne e próximo à base do tronco, diminuindo em direção à medula e ao topo das árvores. Os extrativos são encontrados principalmente nas células parenquimáticas, podendo ocorrer no lume dos vasos, fibras e outras células especializadas. No alburno

praticamente não há extrativos, entretanto, podem ser produzidos nesta região no caso de injúrias ou infecção/colonização por microrganismos. (SHIGO, 1979, 1983; RAYNER; BODDY, 1988). Portanto, como um fator de inibição relacionado com os extrativos, aplicam-se os termos “resistência natural” ou “durabilidade natural” com variações intra e interespecíficas nas árvores (OLIVEIRA et al., 1986; LÉLIS et al., 2001).

Teor de umidade: existem diversos padrões de distribuição de água dentro de uma árvore, mas de modo geral, podemos citar que o alburno apresenta maior teor de umidade do que o cerne e, conseqüentemente, o volume gasoso e disponibilidade de oxigênio são inversamente proporcionais (RAYNER; BODDY, 1988).

Então, o padrão de distribuição dos extrativos, da água e do oxigênio nos diferentes tecidos do lenho pode explicar a ocorrência e colonização do cerne por fungos apodrecedores e/ou insetos xilófagos, região onde as condições estimulam ou inibem o seu desenvolvimento. Além disso, o sucesso de colonização por uma dada espécie de fungo ou inseto depende de sua tolerância às condições físico-químicas do lenho.

3.4 Mecanismos de resistência das árvores

Segundo Pearce (2000), até a década de 70, o conceito de apodrecimento do cerne era bastante aceito como um processo saprofítico, com origem no xilema exposto a injúria. O alburno era considerado como resistente, ou seja, pouco ou não atacado pelos fungos, sendo a delimitação entre o cerne afetado e o alburno interpretada como um processo dinâmico, com a formação de zonas de reação para impedir o avanço do processo de infecção. (SHAIN 1967, 1971, 1979 apud PEARCE, 2000).

Shigo (1979, 1983), analisando o lenho de mais de 15.000 árvores, observou um processo de isolamento do tecido afetado por fungos para evitar a colonização do alburno sadio, sendo uma resposta à injúria e denominado **compartimentalização**, com as células vivas do alburno produzindo barreiras físicas e químicas na forma de fatores de resistência/fitoalexinas. A teoria da *Compartmentalization of Decay in Trees* – *CODIT* estabeleceu 4 barreiras ao ataque dos fungos, em ordem crescente de resistência (Figura 6), sendo: (1) após a formação da injúria/ferida, os elementos

vasculares axiais abaixo e acima do local da injúria, são obstruídos por tiloses, gomas e/ou outras substâncias e pelo processo de aspiração das pontoações; esta barreira deveria evitar a colonização do lenho no sentido longitudinal; (2) consiste na simples presença do lenho tardio do primeiro anel de crescimento adjacente à injúria, cujas células com paredes mais espessas limitariam a colonização pelo fungo no sentido radial; (3) consiste apenas na presença do parênquima radial, constituindo uma barreira "viva", prevenindo a colonização tangencial; (4) ocorre a formação de um anel de crescimento com anatomia e química modificadas, produzido para separar o tecido afetado do sadio em formação. A barreira 1 é a mais fraca das quatro; as barreiras 2 e 3 não são processos induzidos pela injúria ou colonização do lenho, e sim, fazem parte da anatomia e estrutura tridimensional da espécie; a barreira 4 seria a mais forte para separar o tecido afetado do sadio.

Figura 6 - Processo de compartimentalização em árvore proposto por Shigo (1979, 1983). (1) barreira 1 - obstrução dos elementos vasculares axiais; (2) barreira 2 - lenho outonal do anel de crescimento; (3) barreira 3 - parênquima radial; (4) barreira 4 - Anel de crescimento modificado

Shigo (1983) descreveu, ainda, a formação de regiões do lenho caracterizadas pela sua descoloração (zonas de reação) circundando o tecido apodrecido, com origem na injúria do alburno. Shortle; Smith (1998) associaram estas zonas de reação a fendas internas que ocorrem no lenho das árvores, indicando ser, principalmente, o processo de reação da árvore à injúria.

Para Felix e Shigo (1977), a resposta da árvore a uma injúria depende de vários fatores, como o tamanho, profundidade e posição da injúria e o vigor da árvore, relacionado com a sua capacidade e velocidade de cicatrização.

As reações observadas no lenho das árvores associadas à injúria e/ou à colonização por fungos, implicam que o desenvolvimento da lesão está relacionado às defesas ativas da árvore. Entretanto, Rayner e Boddy (1988) sugeriram um modelo onde as mudanças micro ambientais (teor de água e oxigênio) dos tecidos abaixo da injúria e a disfunção do xilema poderiam determinar o desenvolvimento da lesão sem a necessidade da indução de resistência, como uma resposta da árvore.

Ainda, Rayner e Boddy (1988), analisando as zonas de reação no lenho, observaram que apenas fungos não-basidiomicetos e bactérias eram isolados destas zonas de reação. Considerando essas observações e que uma injúria é colonizada por uma variedade de diferentes organismos em sucessão (SHIGO, 1979; RAYNER; BODDY, 1988; AMARAL et al., 2003) propuseram que a zona de reação é apenas um estágio inicial (ou uma pré-condição para o apodrecimento), onde os fungos não-basidiomicetos e bactérias detoxificariam os extrativos produzidos pela árvore como uma resposta à injúria e ao processo de colonização. Visualizou-se, então, que os basidiomicetos apodrecedores, os não-basidiomicetos e outros microrganismos quebram os mecanismos de resistência da planta (compartimentalização), como uma fase necessária ao apodrecimento.

Rayner e Boddy (1988) propuseram, ainda, que as diferenças do teor de umidade e da disponibilidade de oxigênio no tecido exposto, limitariam ou favoreceriam a formação das zonas de reação e, na seqüência, a colonização pelo fungo. Neste sentido, Pearce et al. (1997) demonstraram no lenho de árvores de *Acer pseudoplatanus* (plátano) um maior teor de umidade no xilema na zona de reação em

comparação com o alburno ainda sadio ou apodrecido, este último apresentando o menor teor de umidade.

Estas mudanças no teor de umidade do xilema são importantes na interação árvore-organismo, podendo favorecer ou inibir a colonização pelos fungos. Um aumento na quantidade de água pode agir como um solvente, permitindo que fitoalexinas acumulem na margem das lesões e constituam uma defesa ativa. Pearce (2000) reafirmou os estudos de Rayne e Boddy (1988) com um modelo de formação de zona de reação que relacionou a anatomia da madeira, o teor de umidade da injúria, o acúmulo de íons/pressão osmótica e a produção de compostos químicos para defesa (fitoalexinas).

Em síntese, todos estes modelos que explicam a colonização e a restrição dos fungos nas árvores não devem ser considerados mutuamente incompatíveis e elementos de todos podem propiciar as infecções (PEARCE, 2000).

3.5 Biomecânica das árvores

Niklas (1992); Mattheck (1991); Mattheck e Kubler (1995); Mattheck e Breloer (1997) introduziram, baseados na biomecânica de plantas, uma nova compreensão, definição e reconhecimento de vários tipos de defeitos que podem ocorrer em árvores e do seu comportamento diante de esforços solicitantes – uma visão que auxilia os arboricultores a entender e melhor manejar as árvores.

Neste sentido, Niklas (1992, 2002) desenvolveu esta abordagem mecânica analisando desde a árvore até a ultra-estrutura das suas células, passando pela interpretação do comportamento mecânico dos tecidos, considerando o lenho como uma estrutura complexa e não apenas um material homogêneo. Concluiu que o tamanho, a forma e o desenvolvimento dos tecidos primário e secundário influenciam na magnitude e distribuição das tensões internas no lenho das árvores. Como exemplo, em árvores de *Acer rufrinerve*, Sone, Noguchi e Terashima (2006) relacionaram as alterações anatômicas do lenho de galhos (ex.: espessura da parede das fibras) com os esforços solicitantes, causados pelo vento.

Já Koehler e Telewski (2006) discutiram a importância dos 3 principais componentes químicos da parede celular (lignina, celulose e hemicelulose) para estudos sobre a biomecânica de plantas transgênicas, considerando as alterações na estrutura e na composição das moléculas/polímeros e seu provável efeito nas propriedades mecânicas do lenho.

As árvores são expostas a vários esforços solicitantes, como os de tração, compressão e de cisalhamento, além dos momentos de flexão e de torção e, para evitar a ruptura dos seus componentes estacionários (tronco e sistema radicular) devem compensar estes esforços criando tensões internas e otimizando a sua forma, tamanho e estrutura, no que se denomina de **crescimento adaptado** (NIKLAS, 1992; MATTHECK; BRELOER, 1997).

Os fundamentos mecânicos da biomecânica em árvores foram organizados por Mattheck e Kubler (1995) em cinco teoremas (Figura 7, A-E) que explicam os principais mecanismos de otimização das árvores frente aos esforços solicitantes, sendo:

Axioma da tensão uniforme: como uma estrutura otimizada, a árvore distribui as forças uniformemente pela sua superfície, incluindo as forças “indesejadas”, na busca de equilíbrio estrutural.

Princípio da mínima alavanca: a árvore minimiza momentos externos reduzindo o comprimento da alavanca (galho ou tronco), sendo que os menores comprimentos podem ocorrer de forma ativa (encurvamento de galhos e troncos) e passiva (resposta das partes flexíveis da árvore à ação dos esforços solicitantes).

Paralelismo de fibras e distribuição de tensões: as tensões de cisalhamento são minimizadas quando as fibras, traqueídeos e anéis de crescimento são arranjados no sentido das forças longitudinais ou tangenciais solicitantes.

Anéis de crescimento e distribuição de tensões: a resistência do lenho depende da distribuição das tensões que atuam na árvore quando é solicitada por esforços externos, portanto, a direção e o arranjo dos anéis de crescimento são otimizados e adaptados ao grau e tipo de esforço.

Tensão de crescimento: regiões do lenho de menor resistência mecânica são compensados pelo crescimento da árvore, cuja distribuição e grau são controlados por tensões de crescimento; quando estas se contrapõem aos esforços críticos, a árvore pode romper.

Niklas (1992); Mattheck (1991); Mattheck e Kubler (1995); Mattheck e Breloer (1997) definiram, ainda, os mecanismos de fratura das árvores (Figura 8, A-D) causados por: i) flexão, quando as fraturas por esforços de flexão ocorrem na junção do tronco-galho, em troncos íntegros ou com cavidades causadas por fungos apodrecedores; (ii) cisalhamento, quando na base do tronco da árvore sadia ou deteriorada ocorrem fraturas longitudinais que podem levar ao seu rompimento; as fraturas podem ser observadas internamente quando o lenho da árvore sofre esforços de flexão e em cavidades formadas pela queda e/ou apodrecimento de galhos (iii) torção, que ocorrem normalmente em árvores com crescimento helicoidal de origem genética ou formado por esforços na copa aplicados em uma única direção; e (iv) forças transversais, em que fraturas são observadas no lenho dos troncos e galhos muito inclinados ou com crescimento curvo, ocorrendo processo de delaminação (separação das fibras no sentido longitudinal e em árvores com casca inclusa)

Vários destes fenômenos internos na árvore podem ser relacionados externamente à formação de tecidos que compensam estes esforços solicitantes, como calos, espessamentos no colo (Figura 8, E) e no tronco, cicatrizes e “costelas”.

Figura 7 - Biomecânica em árvores: Axioma da tensão uniforme: (A) formação de calo (seta) em árvore de sibipiruna, para minimizar/equilibrar as tensões criadas no local da injúria, sendo que, a forma de "agulha" da cicatrização indica arranjo paralelo das fibras para minimizar tensões. Princípio da mínima alavanca: (B) ajuste do centro de gravidade para minimizar momento de flexão e (C) redução do comprimento de galho de árvore (torção) para resistir à flexão (ventos fortes). Arranjo perpendicular dos anéis de crescimento (D) ao contato com uma superfície, minimizando cisalhamento entre os anéis na direção longitudinal (a) e da direção tangencial (b) (Fonte: MATTHECK; BRELOER, 1997). Tensão de crescimento: (E) crescimento adaptado de raiz em contato com tubulação subterrânea, observado pelo aumento da superfície de contato (axioma da tensão uniforme)

Figura 8 – Fraturas nas árvores: (A) fratura de tronco apodrecido de tipuana por esforços de flexão; (B) fratura longitudinal (cisalhamento) em eucalipto, causada por esforços de flexão; (C) fratura por torção em árvore (Fonte: MATTHECK; BRELOER, 1997); (D) fratura transversal em figueira com casca inclusa; (E) espessamento no colo (crescimento adaptado) de sibipiruna com apodrecimento do cerne

3.6 Avaliação de risco de queda de árvores

A avaliação de árvores com risco de ruptura (ou quebra de seus galhos) é apresentada em vasta literatura. Na Europa e nos EUA, com rígida legislação em casos de sinistro, os critérios para a caracterização de árvores de risco (*hazardous trees*) são estabelecidos em protocolos e guias, auxiliando no manejo e tomada de decisão. São apresentadas duas metodologias de avaliação das árvores, sendo (i) análise visual externa e (ii) análise estrutural.

3.6.1 Análise visual externa

Vários autores propõem a análise visual externa para a avaliação do risco de ruptura do tronco ou galhos de árvores; considerada como confiável para a predição de processos de biodeterioração interna do lenho em potenciais árvores de risco (KENNARD; PUTZ; NIEDERHÖFER, 1996). No entanto, na maioria dos casos de análise visual há falta de critérios para a tomada de decisão sobre o risco de ruptura da árvore e, conseqüentemente, a adoção do manejo adequado.

Neste sentido, o trabalho e a experiência de Wagener (1963) foram referências para a organização das informações sobre as árvores e os defeitos associados ao risco de queda. Foram analisadas árvores de coníferas de parques dos EUA, sendo proposto um diagnóstico criterioso considerando a observação dos sinais de doença, como os cancos, das injúrias que afetam o câmbio e de fendas e rachaduras entre outros. A análise foi focada no apodrecimento do cerne das árvores, considerado o principal defeito associado à sua queda.

Yuong (1984) reiterou que o risco de ruptura do tronco de uma árvore, pela ação do vento, aumenta com o seu apodrecimento, sendo que com a presença de apodrecimento, de declínio ou de instabilidade da árvore, o proprietário ou o poder público deve ser responsabilizado. Na Inglaterra, a corte judicial assume que as árvores devem ser periodicamente inspecionadas e, quando necessárias, tomadas as providências, sob pena de acusação de negligência. Face a esse aspecto legal, as árvores urbanas devem sofrer avaliação visual externa das evidências e de indicadores de apodrecimento, sendo que presença de corpos-de-frutificação, de cavidades e do

apodrecimento visível do lenho são sintomas de maior significância e os calos no tronco podem indicar cavidades com apodrecimento interno.

Os corpos-de-frutificação dos fungos, que se desenvolvem na parte aérea das árvores, têm sua origem no xilema afetado e indicam estágio avançado de apodrecimento. Young (1984) ressaltou que a presença desses no tronco das árvores não significa que estas estejam estruturalmente instáveis e dependem do volume de lenho sadio envolvendo o tecido afetado. Espécies de fungos, como *Meripilus giganteus*, são indicativas diretas de apodrecimento do sistema radicular. A presença de corpos-de-frutificação no solo, próximo ao tronco das árvores, pode ser de fungos benéficos (micorrízicos) ou saprofíticos, sendo poucos patógenos ou oportunistas. Portanto, a identificação das espécies de fungos é importante no manejo a ser aplicado.

Segundo Young (1984), as situações de risco de quebra no tronco associado ao seu apodrecimento, sem a presença de corpos-de-frutificação, são enumeradas a seguir, indicando que na decisão sobre o manejo das árvores deve-se levar em consideração a proximidade de edificações, acessibilidade dos seres humanos e de animais.

1) Sintomas de doença na copa das árvores: caracterizados pelos galhos secos, descoloração e tamanho anormal das folhas, podendo indicar o apodrecimento das raízes por fungos (ex.: *M. giganteus*, *Armillaria* spp., *Heterobasidion annosum*), sendo que agentes químicos e físicos podem, também, causarem sintomas similares, não sendo mutuamente exclusivos.

2) Grandes injúrias causadas, por exemplo, pela poda de galhos de grandes dimensões e de difícil cicatrização; nestes casos o apodrecimento da região do lenho pode progredir internamente; a casca desprendendo-se do tronco e a presença de cancrios constituem-se, da mesma forma, em indicações de apodrecimento do lenho das árvores.

3) Forquilhas de galhos: neste local pode ocorrer o acúmulo de água e de outros materiais, assim como, galhos em ângulo muito fechado, podem favorecer a formação de cascas inclusas; estes são pontos frágeis e que podem facilmente romper, no caso de instalação de apodrecimento.

4) Pequenos galhos quebrados ou podados nos locais de inserção de galhos maiores e/ou do tronco, nos quais pode iniciar e estabelecer o apodrecimento do lenho das árvores.

5) Movimentação do tronco de uma árvore e/ou do solo, sob a ação de ventos fortes, é bom indicativo sobre sua estabilidade.

Entretanto, a simples presença de sintomas de apodrecimento no lenho, na parte aérea e/ou no sistema radicular das árvores, não significa que exista risco iminente de queda, o qual depende da incidência, localização e da extensão do apodrecimento.

Sharon (1987) analisou nos EUA as árvores urbanas com risco de queda, no contexto da lei de negligência e da dificuldade de especialista tomar uma decisão, indicando as seguintes evidências objetivas de problemas: buracos de ninhos associados ao apodrecimento do lenho; calo de cicatrização de galhos, referente ao número e localização no tronco; galhos quebrados; apodrecimento do cerne que progride para o sistema radicular; raízes expostas e apodrecidas; presença de cancrios; forquilha nas árvores e; árvores com troncos inclinados. Enfim, sugeriu que o risco de queda de uma árvore ou de seus galhos está associado, principalmente, as alterações causadas por fungos apodrecedores, no entanto, não estabeleceu parâmetros para tomada de decisão.

Já Hickman, Caprile e Perry (1989) ao desenvolverem um sistema de avaliação de risco de árvores de *Quercus lobata* e *Q. wislizenii*, ressaltaram a necessidade da avaliação do ambiente, como o solo, irrigação, vento, aspectos estruturais (raiz, tronco e copa), de vigor (declínio) e de valor das edificações, equipamentos urbanos e de acesso de pessoas. É adotada uma ponderação qualitativa (escala de 1 - 5) na avaliação dos componentes do sistema resultando em um índice para cada árvore, permitindo assim, a priorização de ações corretivas e evitando-se os riscos à população e a aplicação de ações legais, caso ocorra a queda da árvore.

Edberg, Costello e Berry (1993) propuseram um protocolo (*California Tree Failure Report Program - CTFRP*) para a padronização das informações e a formação de um banco de dados de árvores, com sintomas de ruptura nos galhos, tronco e/ou raiz, considerando 26 atributos, sendo: identificação e localização da árvore; descrição da falha; defeitos estruturais (múltiplos troncos e bifurcação baixa, copa desequilibrada, casca inclusa, fendas, tronco inclinado, raiz dobrada/enovelada); apodrecimento ou injúria; histórico de manutenção; condições de solo e do sistema radicular (barreiras físicas, irrigação, cobertura vegetal, compactação do solo, topografia); condições climáticas no momento do acidente (direção, velocidade do vento, precipitação e temperatura); e a avaliação subjetiva do inspetor quando da ocorrência. Este protocolo permitiu a implantação de valioso banco de dados para as espécies arbóreas em condição de via urbana e de parque, melhorando o planejamento e manejo das florestas urbanas.

Edberg e Berry (1999), utilizando o protocolo CTFRP avaliaram as árvores de *Quercus agrifolia* e de outras folhosas e coníferas estabelecendo que o apodrecimento do sistema radicular e do colo das árvores são os padrões mais comuns da falha estrutural das espécies, incluindo, também, a presença de tronco curto; a avaliação da umidade e da compactação do solo foram parâmetros importantes de análise.

Na análise visual, o sistema radicular (diretamente ligado à estabilidade estrutural da árvore) é o ponto mais frágil da avaliação e, comumente, não é visível para ser analisado. Neste aspecto, Fraedrich (1999) estabeleceu parâmetros semi-quantitativos e empíricos pra avaliar o risco de ruptura de uma árvore na raiz, recomendando-se a remoção das árvores com 33% ou mais das raízes com apodrecimento. Menores porcentagens de apodrecimento são toleradas, excetuando-se as árvores inclinadas, com espaço limitado para o crescimento do sistema radicular, localizadas em áreas com ocorrência de ventos fortes, copa larga e densa e fratura do solo associada às raízes principais.

A *International Society of Arboriculture - ISA* é uma das mais importantes instituições relacionadas ao treinamento de arboricultores e difusão do conhecimento sobre arborização urbana, recomendando o Protocolo ISA (2003) como ferramenta auxiliar no reconhecimento de árvores com risco. No protocolo considera-se a presença

de doenças e de biodeterioração dos galhos, tronco e raízes; a arquitetura da árvore; as fendas; as condições do entorno, etc. No entanto, não estabelece parâmetros para a tomada de decisão, oferecendo apenas orientações genéricas para a diminuição dos riscos de queda das árvores.

O livro de Matheny e Clark (MATHENY; CLARK, 1994 apud HARRIS; CLARK; MATHENY, 2004) é recomendado pela ISA e propõe, em linhas gerais, que o risco de queda das árvores varia com a espécie, dimensão, tipo e localização do defeito e a natureza do alvo, envolvendo 3 componentes e as suas interações, sendo (i) a árvore com potencial estrutura para falha, (ii) o ambiente que pode contribuir para a ocorrência da falha e (iii) a pessoa ou objeto que pode ser afetada.

No Brasil, Gonçalves, Stringheta e Coelho (2007) apresentaram um método para aplicar na decisão de supressão de uma árvore, abordando a dimensão ecológica (natividade, idade e importância) e a dimensão paisagística (raridade, afetividade e posicionamento em relação ao indivíduo), além dos aspectos estruturais, ambientais e de entorno (alvo). As dimensões ecológica e paisagista, se equacionadas em outras metodologias de avaliação de árvores, podem contribuir para a tomada de decisão; neste método, o risco à vida das pessoas foi a variável com maior peso.

A metodologia de avaliação proposta por Mattheck e Breloer (1997), expressa no *Visual Tree Method – VTA*, é baseada nos conceitos da biomecânica das árvores, considerando o seu crescimento adaptado para o restabelecimento do axioma da tensão uniforme. O crescimento adaptado é considerado como um sintoma de defeito; se existente, sua correlação com uma falha mecânica ou biológica deve ser investigada mais profundamente com aparelhos não-destrutivos (ex.: penetrômetro, aparelhos de ondas de tensão, ultrassom, trado de incremento ou fractômetro). Constatada a causa do defeito, a quantificação e medição da resistência residual da porção não afetada devem ser feitas para a tomada de decisão quanto ao risco que a árvore oferece. O VTA propõe a simples comparação da segurança de árvore com defeito e sem defeito, sendo analisados, (i) a vitalidade, como galhos mortos, perda de folhas, casca solta, crescimento deficiente, demora nos processos de cicatrização e câmbio sem atividade; (ii) ataque de fungos, presença de corpos-de-frutificação, líquidos exsudando de feridas abertas e outros sinais de fungos; (iii) sintomas de defeitos mecânicos, como o

espessamento de colo e/ou tronco; protuberâncias/saliências no tronco, associadas às fraturas internas; e costela/nervura às fraturas longitudinais no interior do lenho ou à casca inclusa; (iv) fissuras em injúrias e fraturas na casca, devido aos esforços solicitantes (tração e compressão) e (v) ação do vento: espessamento de raízes; espessamento do colo; fraturas no solo e; tamanho da copa. O VTA é complementado por análises quantitativas da deterioração no tronco, perda de resistência mecânica pela ação de fungos apodrecedores e informações sobre o sistema radicular da árvore, para a tomada de decisão.

Atualmente, Clark (2007) cita que, na avaliação de risco das árvores na condição urbana são utilizadas as metodologias de Matheny e Clark (1994 apud HARRIS; CLARK; MATHENY, 2004) e o guia do *United States Department of Agriculture - USDA*. O guia do USDA (ALBERS; POKORNY; JOHNSON, 2003) tem como escopo oferecer uma ferramenta para auxiliar na priorização de árvores para o manejo e diminuição do risco, em 7 categorias de defeitos, sendo (i) apodrecimento do lenho, (ii) fendas/rachas, (iii) problemas no sistema radicular, (iv) bifurcações de galhos com problemas, (v) cancrios, (vi) arquitetura desfavorável/insatisfatória da árvore e (vii) árvores e galhos mortos. Os conceitos biomecânicos de Mattheck e Breloer (1997), a avaliação do entorno da árvore, associado ao seu uso pelas pessoas, a presença de equipamentos urbanos e um fator subjetivo do inspetor (sua opinião sobre o risco de queda da árvore), também foram incorporados no guia.

No Brasil, o IPT (2004) foi a primeira instituição a associar o risco de queda de árvores urbanas à ação de cupins-subterrâneos *Coptotermes gestroi*, que podem participar do processo de deterioração interna, juntamente com os fungos apodrecedores. Estes organismos não são diretamente associados ao risco de ruptura de uma árvore na literatura norte-americana e européia, pois sua ocorrência é bastante restrita nestes países.

3.6.2 Análise estrutural ou de estabilidade das árvores

Como complementação à análise visual das árvores, a avaliação de sua estabilidade estrutural, de ruptura e/ou da predição de risco pode ser feita unindo-se o conhecimento de 3 áreas: a matemática, a engenharia e a biologia (STERKEN, 2005).

Os primeiros trabalhos de análise estrutural das árvores foram baseados na avaliação da perda de resistência mecânica dos troncos afetados, com cavidades internas produzidas por fungos apodrecedores, considerado como o principal fator de queda de árvores. Para os cálculos da perda de resistência mecânica do tronco, causada por fungos apodrecedores, são apresentados quatro métodos (Tabela 2) (HARRIS; CLARK; MATHENY, 2004).

Tabela 2- Métodos utilizados na avaliação da perda de resistência mecânica do tronco de árvore associada ao apodrecimento por fungos

Método	Fórmula	Critério de decisão
Wagener (1963)	$(d^3/D^3) \times 100$ (1)	> 33 %, risco de ruptura
Coder (1989 apud HARRIS; CLARK; MATHENY, 2004)	$(d^4/D^4) \times 100$ (2)	20 - 44%, estado de alerta; > 45 %, risco de ruptura
Smiley; Fraedrich (1992)	$[d^3 + r(D^3 - d^3)]/D^3 \times 100$ (3)	> 33 %, risco de ruptura
Mattheck; Bleloer (1997)	t/R (4)	<0,30

Legenda:

d = diâmetro do apodrecimento interno; D = diâmetro do tronco; r = tamanho da abertura da cavidade/circunferência do tronco; t = espessura da parede sadia residual; e R = raio do tronco.

Fonte: Harris, Clark e Matheny (2004)

Em 1963, o *United States Forest Service - USFS* publicou o primeiro trabalho visando quantificar e associar o fator “apodrecimento do cerne” com a ruptura de árvores no campo (WAGENER, 1963). Com base na fórmula utilizada para avaliar a resistência de tubos de aço (módulo de resistência) foi proposta a fórmula (1) (Tabela 2) que relaciona o diâmetro do tronco da árvore (D) com o diâmetro da deterioração interna (d), levando-se em consideração as descontinuidades no tronco e as particularidades físico-mecânicas da madeira (anisotropia) (SMILEY; FRAEDRICH, 1992; KANE; RYAN; BLONJARZ, 2001).

Fundamentado na experiência de campo e aplicando a fórmula (1), Wagener (1963) propôs para o lenho das árvores de coníferas, um valor limite de perda de resistência mecânica de 33%, que equivaleria a 70% de perda do cerne devido ao apodrecimento estabelecendo-se, assim, o valor mínimo de espessura de parede sadia do tronco de uma árvore sem risco de ruptura (Tabela 3).

Tabela 3 - Padrão mínimo de segurança de árvores com defeito no tronco

Diâmetro do tronco da árvore sem casca (cm)	Espessura da parede sadia do tronco (cm)
40,00	6,25
50,00	7,50
60,00	8,75
70,00	10,00
80,00	11,25
90,00	13,75
100,00	15,00
110,00	16,25
120,00	17,50
130,00	20,00

Fonte: Wagener (1963)

O limite de perda de resistência (33%) foi proposto quando o apodrecimento do cerne do tronco das árvores de coníferas fosse predominante em relação a outros defeitos e, ainda, centrado no tronco. Não se trata de valor absoluto, devendo-se aplicar como um parâmetro referencial para distinguir árvore com perda de resistência (>33%) de outra sem risco de ruptura (< 33%). Em árvores de folhosas este limite de perda de resistência do tronco é menos aplicável devido à sua arquitetura complexa, maior índice de fechamento da copa e à possibilidade do apodrecimento do cerne se desenvolver a partir dos galhos.

Coder (1989 apud KANE; RYAN; BLONIAZ, 2001) adaptou a fórmula de cálculo de momento de resistência para sólidos sujeitos somente à flexão simples (fórmula 2, Tabela 2) definindo, assim, limites para risco de ruptura do tronco de árvores

por perda de resistência ao apodrecimento, sendo: (i) perda de resistência > 45%, existe risco de ruptura; (ii) entre 20 e 40%, a árvore deve ser avaliada com relação a outros defeitos; e (iii) perda < 20% programar inspeções anuais. A fórmula aplica-se para cilindros perfeitos sendo validada experimentalmente em condições de campo (HARRIS; CLARK; MATHENY, 2004).

Smiley e Fraedrich (1992) propuseram a fórmula (3) (Tabela 2), sendo uma adaptação matemática da fórmula (1), contemplando a situação de apodrecimento interno do tronco de uma árvore com uma abertura para o exterior (oco aberto), considerando, assim, a região da superfície do tronco das árvores como responsável pela transmissão de forças. Utilizando esta fórmula, avaliaram a perda de resistência do tronco de árvores de carvalho com apodrecimento no cerne que caíram em 1989, pelos ventos de 144 km/h do furacão Hugo. Constatou-se que o limite de 33% de perda de resistência do tronco teve 50% de acerto para as árvores que quebraram e 12% de erro para as árvores com apodrecimento no tronco, mas não quebraram. Reiterou-se este limite como máximo para caracterizar uma condição insegura do tronco das árvores e propôs-se que menores valores de perda de resistência (20-25%) poderiam ser recomendados para as árvores com múltiplos defeitos, em declínio, com apodrecimento em forquilhas, copas densas, com troncos inclinados e/ou em áreas mais expostas ao vento.

Por último, Mattheck e Breloer (1997) estabeleceram um critério (fórmula 4, Tabela 2) para a análise de risco de ruptura do tronco de uma árvore baseado na resistência à flambagem de um tubo. Com dados de análise de mais de 800 árvores de espécies de folhosas, concluíram ser improvável a ruptura de uma árvore com a razão $t/R > 0,3$ (t = mínima espessura da parede sadia residual de um tronco, com uma cavidade; R = medida total do raio do tronco). Foi estabelecido para a razão t/R o valor limite de 0,3 como um critério de falha do tronco de uma árvore com copa densa. Para troncos de árvores com cavidades excêntricas o critério pode ser aplicado se a deterioração ocupar mais do que a metade do diâmetro do tronco; caso contrário os valores de t e R podem ser considerados a menor espessura da parede residual do tronco e o raio da porção deteriorada mais a parede residual.

Nos quatro métodos de cálculo de perda de resistência do tronco aceita-se que até 1/3 de perda de resistência (até 70% de perda de lenho, representando o oco interno) a árvore não possui risco de ruptura, salvo pela ocorrência de outros defeitos. Os métodos propostos por Wagener, Smiley e Fraedrich e Mattheck e Breloer são empíricos e o de Coder baseado na engenharia para resistência de tubos a flexão. Neste sentido, Kennard, Putz e Niederhöfer (1996); Kane, Ryan e Bloniarz (2001); Kane e Ryan (2004) destacam que são necessários novos estudos para a determinação de valores críticos de perda de resistência do tronco de árvores, pela sua complexidade como estrutura e a pela dificuldade de se quantificar com precisão todas as variáveis durante a fase de inspeção.

Harris, Clark e Matheny (2004) citaram ainda que estes cálculos são de fácil aplicação, mas sua interpretação possui diversas dificuldades, sendo: i) a extensão da deterioração pode ser desconhecida uma vez que os troncos das árvores são normalmente irregulares (não cilíndricos) e a deterioração interna pode ser excêntrica com diversas espessuras de parede residual - diferente de um tubo metálico; ii) a distinção entre lenho sadio e afetado por fungos possui erros, podendo ser maior do que os aparelhos comumente utilizados para prospecção interna de uma árvore permitem distinguir, caso do lenho com ataque incipiente de fungos; iii) as propriedades físicas e mecânicas variam de espécie para espécie de árvore; iv) as fórmulas não podem ser utilizadas para cálculo da perda de resistência em raízes e galhos; seu conceito foi aplicado para troncos cilíndricos, como em coníferas; v) as árvores possuem a capacidade de suplantar pontos de menor resistência mecânica, quando os esforços solicitantes são altos - crescimento adaptado; vi) carecem informações históricas sobre a aplicação dessas fórmulas para diferentes espécies, tamanhos e tipos de aplicação de forças.

Segundo Harris, Clark e Matheny (2004), as fórmulas para a avaliação do risco de ruptura do tronco de uma árvore devem ser aplicadas como *ferramenta auxiliar* na análise do risco de ruptura e não o fator mais crítico, pois não possuem acurácia suficiente para expressar a habilidade de uma árvore resistir a esforços solicitantes externos. Sendo o vento o fator mais significativo sobre a estabilidade das árvores, propõe-se a análise (i) dos esforços na região da fundação (interação do sistema

radicular com o solo); (ii) da altura, do DAP, da densidade da copa, inclinação do tronco, presença de raízes tabulares e peso da árvore; e (iii) da topografia do terreno.

Com base nesses parâmetros, o IPT (2004) desenvolveu um modelo de cálculo estrutural, com fundamentos na biomecânica, para análise de risco de queda de árvores da cidade de São Paulo, categorizando-o em 3 níveis (pequeno, médio e grande), considerando as suas características (dendrométricas, estado de sanidade da raiz, colo e tronco, propriedades físico-mecânicas do lenho, peso total e fundação) e os esforços solicitantes devido ao vento e peso próprio. Esse modelo estrutural é diferenciado ao considerar (i) três condições de ruptura (tronco, colo e fundação); (ii) os cálculos do sistema radicular e as interações com forças do solo; e (iii) as forças de vento e fatores associados.

O modelo de cálculo estrutural do IPT e os métodos de cálculo de perda de resistência mecânica da madeira causada pelos fungos apodrecedores são estáticos, cuja carga dinâmica imposta pelo vento é traduzida em força estática aplicada em uma região da árvore (copa e/ou tronco). Uma evolução na avaliação de risco de ruptura é considerar a árvore como uma estrutura aeroelástica, ou seja, sujeita a um efeito dinâmico causado pelo modo de vibração da árvore, frente à frequência de rajadas do vento.

Peltola (2006) estudando modelos mecanicistas para a predição do risco de queda de árvores, reiterou que os até então desenvolvidos eram insuficientes para entender os efeitos de carregamento estático e para acessar a estabilidade mecânica da árvore, em comparação com carregamento dinâmico.

James (2003) mostrou a importância dos modelos dinâmicos na avaliação do risco de ruptura das árvores, considerando o vento como o principal fator de causa de queda, sendo que a resposta dinâmica da árvore depende da interação entre a frequência natural do tronco e dos galhos que minimizam a transferência de energia do vento para a estrutura da árvore (amortecimento).

Com base nesse princípio, Sterken (2005) estudou árvores e palmeiras (*Eucalyptus* spp., *Tipuana* sp. *Cupressus sempervirens*, *Pinus* spp. *Celtis* spp. *Brachychuton populneus* e *Cercis siliquastrum*) no Mediterrâneo e desenvolveu um protocolo de avaliação de risco de queda dessas plantas que sintetiza e integra os

métodos de cálculos de estabilidade desenvolvidos por Wessolly e Erb (1998 apud STERKEN, 2005) e Reinartz e Schlag (1997 apud STERKEN, 2005). O protocolo indica que a avaliação da estabilidade da planta é iniciada pelo diagnóstico visual da incidência do ataque de fungos apodrecedores, combinado com uma análise matemática da carga do vento, calculando-se os fatores de segurança da árvore sadia e estimando-se a velocidade crítica do vento, a frequência fundamental de vibração do tronco à flexão e a resistência de ruptura. Para a avaliação da segurança, os cálculos pressupõem que a parede residual de lenho deve ser suficiente para resistir aos esforços do vento, valor esse que depende do módulo de elasticidade, da resistência à compressão em diferentes direções anatômicas, do diâmetro e forma do tronco e das forças atuantes. O protocolo proposto considerou as copas uniformemente distribuídas e plantas rígidas e baixas, sendo que as mal podadas, com centro de gravidade deslocado e estruturas muito delgadas, devem ser cautelosamente consideradas na utilização de modelos matemáticos.

Delineia-se no futuro a utilização do método de elementos finitos para o estudo do comportamento estrutural de árvores sadias e afetadas e avaliação de seu risco de queda. Esse método é considerado uma ferramenta analítica, baseada em análise de tensões e deformações de um sólido. Entretanto, a complexidade estrutural das árvores limita o uso do método, bem como há falta de informações para a aplicação da técnica (ex.: geometria das raízes e dos galhos e definição matemática da arquitetura; distinção da parte sadia e afetada do lenho pelos organismos xilófagos e respectivas propriedades físico-mecânicas; orientação/inclinação das fibras na bifurcação dos galhos, etc.). O princípio tem fundamentação simples, através da qual a estrutura (sistema) sob análise é dividida em partes menores (elemento), até uma dimensão com uma identidade com propriedades definidas e comportamento mecânico entendido. Em seguida, a estrutura (sistema) é reconstruída com base nas partes menores (elementos) para a determinação do seu comportamento estrutural, pela simulação de esforços solicitantes/carregamento e verificação da distribuição de tensões no sistema a estes esforços (ZIENKIEWICZ, 1979).

Mattheck e Kubler (1995), utilizaram este método para estudar a distribuição de tensões em injúrias de árvores com diferentes geometrias e em processos de fraturas.

Nestes exemplos, os elementos geométricos foram definidos em coordenadas e o módulo de Young, coeficiente de expansão térmica, coeficientes de Poisson foram determinados e utilizados como propriedades para descrição das contrações transversais do lenho.

Fourcaud e Lac (2002) utilizaram também o método de elementos finitos para estudo do crescimento de plantas baseado nos princípios biomecânicos, analisando o equilíbrio de tensões relacionado ao incremento em peso/massa de uma nova camada (anel de crescimento) de madeira ou novo elemento vegetativo adicionado. Nestes estudos, tamanhos de tronco e de galhos realistas foram obtidos comparando-se com resultados publicados. Foucard et al. (2002) analisaram as tensões de crescimento no tronco e galhos em diferentes estratégias de crescimento, competição espacial, e curvatura do tronco.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de amostragem

A amostragem das árvores, realizada no presente trabalho, inclui sete regiões da área urbana da cidade de São Paulo, a saber, Cerqueira César, Pacaembu-Sumaré, Alto de Pinheiros, Alto da Lapa, Vila Nova Conceição, Paraíso e Alto da Boa Vista, com os limites relacionados e ilustrados na Tabela 4 e Figura 9. Estas regiões foram indicadas pela SVMA, pela ocorrência de árvores antigas e de elevada infestação de cupins-subterrâneos (ROMAGNANO, 2004).

Tabela 4 - Regiões e limites da cidade de São Paulo, para diagnóstico do estado de sanidade biológica das árvores de tipuana

Regiões	Limites das regiões
Alto de Pinheiros	Av. Prof. Frederico Hermann Júnior, Av. Das Nações Unidas, Av. Prof. Manoel José Chaves e Av. Pedroso de Moraes.
Pacaembu-Sumaré	Av. Dr. Arnaldo, Rua Bruxelas, Rua Prof. Paulino Longo, Rua Juazeiro, Rua Dona Balduína, Rua Ilhéus, Rua Almirante Pereira Guimarães, Av. Arnolfo Azevedo e Rua Desembargador Paulo Passalacqua.
Paraíso	Rua Bernardino de Campos, Av. 23 de maio, Rua Tutóia e Rua Dr. Rafael de Barros.
Alto da Lapa	Rua Brigadeiro Gavião Peixoto, Rua Vereador Antônio Muniz, Rua Pio XI e Rua Visconde de Indaiatuba.
Alto da Boa Vista	Rua Graham Bell, Rua Senador Vergueiro, Rua São José e Rua São Benedito.
Cerqueira César	Av. Paulista, Rua da Consolação, Rua Estados Unidos e Al. Casa Branca.
Vila Nova Conceição	Av. Antônio João de Moura Andrade, Av. República do Líbano, Av. Brigadeiro Luis Antônio e Av. Santo Amaro.

Figura 9 - Regiões da cidade de São Paulo para diagnóstico do árvores de tipuana. A: Alto da Boa Vista; B: Alto da Lapa; C: Alto de Pinheiros; D: Cerqueira César; E: Paraíso; F: Pacaembu-Sumaré; G: Vila Nova Conceição

4.2 Seleção da espécie para estudo: árvores de tipuana

Das inúmeras espécies arbóreas localizadas nos limites das sete regiões da cidade de São Paulo (item 4.1.) foram selecionadas as árvores de tipuana, considerando a sua (i) elevada frequência, (ii) idade avançada, (ii) sintomas de deterioração do lenho e (iii) visualização de organismos xilófagos no tronco (IPT, 2004; BRAZOLIN; AMARAL; TOMAZELLO-FILHO, 2006).

4.3 Diagnóstico das características, da biodeterioração e análise de risco de queda das árvores de tipuana

4.3.1 Características e biodeterioração das árvores de tipuana

O diagnóstico das características e dos processos de biodeterioração das árvores de tipuana foi desenvolvido através da sua (i) localização, (ii) demarcação em mapa de ruas e avenidas no espaço compreendido das sete regiões e (iii) aplicação de formulário contendo 40 atributos.

Os atributos referentes à localização, à condição de entorno, à dendrometria, ao estado geral e de sanidade biológica do sistema radicular, colo e tronco e deterioração interna foram utilizados para a caracterização das tipuanas localizadas nos passeios públicos da cidade de São Paulo - SP. Na análise foram incluídos os atributos que podem afetar a estabilidade da árvore, relacionados direta ou indiretamente à sua ruptura, que afetam o seu desenvolvimento e alteram as propriedades físico-mecânicas do seu lenho. Os seguintes atributos foram analisados e estão descritos no Anexo A:

Localização: data da inspeção; responsável pela coleta dos dados; logradouro/nº cadlog; número do imóvel e; tipo de logradouro;

Condições de entorno: tipo de edificação; tipo de via de tráfego; levantamento do pavimento; tipo de calçada verde e área permeável do canteiro.

Características dendrométricas: diâmetro altura do peito (DAP); altura da primeira bifurcação; altura total da árvore; altura da copa; diâmetro da copa; área da copa; índice de fechamento da copa e; inclinação do tronco.

O DAP foi medido com uma trena florestal a 1,3 m de altura e a altura total da árvore obtida com um clinômetro (medida indireta). As outras medidas foram levantadas por meio de fotografias, tendo como referência: uma baliza de 3 m colocada na posição vertical junto às arvores; a medida da distância do observador até a árvore; e os ângulos zenitais verticais da base e topo desta baliza. Os ângulos zenitais foram usados para avaliar a declividade do terreno, além de corrigir a distância horizontal do observador até a árvore.

Estado geral do sistema radicular, do colo e de tronco: árvore morta; barreira física do canteiro; injúria mecânica; raiz cortada/podada; raiz dobrada/enovelada; dendrocirurgia; colo soterrado; casca inclusa; rachadura; oco aberto; copa desequilibrada; e poda inadequada dos galhos.

Sanidade biológica do sistema radicular, colo e tronco: sadio; deteriorado; fungo apodrecedor; ataque de fungo no lenho (apodrecimento); corpo-de-frutificação; tipo de podridão; cupim-subterrâneo; cupim-de-madeira-seca; cupim-de-solo (outros, que não cupim-subterrâneo); ataque de cupim no lenho (desgaste); e atividade de cupim.

O diagnóstico de sanidade biológica foi realizado com uma sovela ou instrumento pontiagudo, uma pá de jardinagem e uma lanterna para verificação da deterioração em ocos abertos. A presença de cupins foi caracterizada pela ocorrência de resíduos, estrutura de ninho, de túneis ou vestígios de túneis na casca/entrecasca e pela dispersão no solo (o solo foi escavado a uma profundidade aproximada de 10 cm, junto ao colo e à raiz exposta). Os cupins foram coletados com uma pinça e acondicionados em vidros com álcool a 75 %; os corpos-de-frutificação de fungos apodrecedores colocados em sacos de papel. A identificação destes organismos foi realizada pelo Laboratório de Preservação de Madeiras e Biodeterioração de Materiais – LPB do IPT.

Porcentagem de deterioração interna: a análise interna do lenho das árvores para determinação da ocorrência e intensidade da deterioração causada por organismos xilófagos e quantificação do lenho sadio remanescente foi feita na base do tronco (colo) por meio de prospecção não-destrutiva, com auxílio de um aparelho tipo penetrômetro. O equipamento Sibtec - Digital Micro Probe® foi utilizado para verificar a perda de resistência mecânica do lenho, permitindo registrar, por meio de uma broca de aço de 0,9 mm de diâmetro, um gráfico no monitor de um *notebook*, acoplado ao equipamento (Figura 10). No tronco, a prospecção foi realizada apenas quando existia oco aberto. A Figura 11 exemplifica o registro de decaimento da resistência mecânica do lenho de uma árvore de tipuana com apodrecimento do cerne.

Figura 10 - Penetrômetro utilizado na prospecção da deterioração interna do lenho de árvores de tipuana

Figura 11 - Gráfico da prospecção interna do lenho deteriorado de árvore de tipuana. A): região da casca. B: lenho sadio. C: lenho com deterioração intensa

Todos os dados das árvores de tipuana foram coletados, pelos técnicos do IPT, no período de novembro de 2003 a outubro de 2004, no escopo do Projeto *Operação Árvore Saudável* do IPT para a SVMA da PMSP (IPT, 2004). Estes dados foram inseridos no aplicativo Sistema de Gestão da Arborização Urbana - SISGAU, desenvolvido e registrado pelo IPT para as análises posteriores.

4.3.2 Análise do risco de queda das árvores de tipuana

Para a análise do risco de queda das árvores de tipuana foi utilizado o modelo de cálculo estrutural desenvolvido pelo IPT (2004). Este modelo considera as seguintes variáveis para cálculo: i) as medidas dendrométricas; ii) o estado de sanidade biológica (deterioração interna) do lenho; iii) as propriedades físico-mecânicas do lenho; iv) o vento; v) a localização das árvores em associação com os fatores estatísticos de vento; vi) o sistema radicular (conceitual) e sua interação com o solo; e vii) a resistência do tronco e do colo (transição raiz-tronco). Este modelo supõe a ruptura da árvore de tipuana em 3 locais: i) na fundação, com o arrancamento da raiz e do solo (torrão); ii) na colo; e iii) no tronco.

As forças exercidas pelo vento e pelo peso da árvore são os principais esforços solicitantes no modelo. Os atributos e detalhes necessários para os cálculos estruturais do modelo são apresentados no Anexo B.

O risco de queda da árvore de tipuana foi categorizado em 3 níveis de alerta, sendo, mínimo, moderado e máximo. Neste estudo, as árvores categorizadas como estado de alerta moderado foram consideradas como máximo, devido às suas características limítrofes de dendrometria e estado de sanidade biológica. Os seguintes parâmetros foram utilizados no modelo:

(i) Propriedades físicas e mecânicas do lenho das árvores de tipuana (MAINIERI; CHIMELO, 1986): densidade de massa de 630 kg/m^3 ; resistência do lenho característica à compressão paralela às fibras de 28 MPa ; resistência à flexão de $66,5 \text{ MPa}$; e resistência ao cisalhamento de $9,1 \text{ MPa}$. Para a determinação do valor da resistência característica à compressão, flexão e cisalhamento, foi adotado um coeficiente de variação de 18% , sendo esta equivalente a $0,7$ do valor médio da resistência.

(ii) Características do solo: coesão (c) de 30 kPa ; ângulo de atrito em graus (Φ) de 25° ; peso específico natural (γ) de 15 kN/m^3 ; e inclinação do corte do bloco de solo em graus (α de 15°).

(iii) Dimensionamento do sistema radicular utilizando a relação da profundidade e diâmetro do sistema radicular com o DAP das árvores de tipuana (Tabela 5). Esta relação foi determinada durante trabalhos de transplante de árvores (HARRIS; CLARK; MATHENY, 2004) e através de fotografias de árvores de tipuana tombadas na cidade de São Paulo e analisadas em aplicativo de análise de imagens (OLIVEIRA-NETO⁴).

⁴ OLIVEIRA-NETO, M. A. de. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT

Tabela 5 - Relação da profundidade e do diâmetro do sistema radicular com o DAP das árvores de tipuana

Classes de DAP das árvores (m)	Relação do sistema radicular com o DAP das árvores de tipuana	
	Diâmetro da raiz/	Profundidade da raiz/
	DAP _{médio}	DAP _{médio}
0,10 a 0,20	10,0	4,0
0,21 a 0,30	10,0	2,4
0,31 a 0,40	10,0	1,7
0,41 a 0,50	8,9	1,3
0,51 a 0,60	7,3	1,1
0,61 a 0,70	6,2	0,9
0,71 a 0,80	5,3	0,8
0,81 a 0,90	4,7	0,7
0,91 a 1,00	4,2	0,6
1,01 a 1,10	3,8	0,6

4.3.3 Análise estatística

A associação entre o estado de sanidade biológica, as características dendrométricas e o risco de queda das árvores de tipuana foi analisada por meio de teste de independência (qui-quadrado). Os seguintes atributos de interesse foram estudados: i) cupim-subterrâneo x fungo apodrecedor; ii) DAP das árvores x cupim-subterrâneo; iii) DAP das árvores x fungo apodrecedor; iv) DAP das árvores x deterioração interna; v) risco de queda das árvores x cupim-subterrâneo; vi) risco de queda das árvores x fungo apodrecedor; vii) risco de queda das árvores x DAP das árvores; viii) risco de queda das árvores x altura total da árvore; ix) risco de queda das árvores x altura da primeira bifurcação; x) risco de queda das árvores x área da copa das árvores; xi) risco de queda das árvores x inclinação do tronco das árvores; e xii) risco de queda das árvores x deterioração interna do lenho.

A análise de variância de Kruskal-Wallis foi utilizada para estudar o atributo deterioração interna do lenho e a variável resposta DAP das árvores. Neste caso, o teste de Mann-Whitney foi utilizado para a comparação das médias dos tratamentos.

Foram considerados significantes os valores de $p < 0,05$, ou seja, nível de significância (α) de 5 %. O aplicativo *Statistica* (STATSOFTT INCORPORATION, 1997) foi utilizado para as análises estatísticas.

4.3.4 Modelo estatístico para a análise de risco de queda

Como um critério de ruptura do tronco das árvores de tipuana, foi definido um modelo estatístico de análise de risco de queda. Dos atributos coletados das árvores de tipuana (item 4.3.1), foram selecionados os mais importantes, a partir dos resultados dos testes de independência (item 4.3.3). A determinação dos atributos externos e internos (variáveis independentes) associados ao risco de queda das árvores de tipuana, segundo modelo de cálculo estrutural (IPT, 2004), foi feita pela análise de regressão linear múltipla, ao nível de significância de 5%, tendo como variável dependente o estado de alerta (mínimo ou máximo). No desenvolvimento do modelo foram utilizados os dados da análise de 400 árvores de tipuana, separadas por amostragem aleatória e balanceada, a partir da frequência de ocorrência dessas árvores nas duas categorias de estado de alerta e classes de DAP. A validação do modelo de regressão linear múltipla foi realizada nas 709 árvores de tipuana restantes.

4.4 Amostragem do lenho das árvores de tipuana

Treze toretes de tipuanas suprimidas na cidade de São Paulo pela PMSP, que caíram durante temporais no período de 2005 a 2008 e suprimidas do *campus* do IPT (Tabela 6), foram utilizados na caracterização do processo de biodeterioração do lenho causado por organismos xilófagos. Estes toretes foram coletados até uma altura máxima de 1 m do tronco, preferencialmente da região mais próxima ao solo (colo).

Das árvores A, B, C, D, E, H, J, X e Y foram tomadas as características do entorno, dendrométricas e estado de sanidade biológica. Os toretes de lenho foram transportados para o Laboratório de Preservação de Madeira e Biodeterioração de Materiais - LPB do IPT e mantidos em condições normais, tendo sido aplicada, previamente, uma solução de ácido bórico 3% na sua superfície para impedir o desenvolvimento de fungos emboloradores e manchadores.

Tabela 6 – Árvores de tipuana selecionadas na cidade de São Paulo para a caracterização do processo de biodeterioração do lenho

Árvore	Endereço/região	Data do corte	Procedimento de corte
A	Rua Pombal, 198, Sumaré	11/08/2005	supressão programada
B	Rua Pombal, 97, Lapa	11/08/2005	supressão programada
C e C'(*)	Prç John Lennon, s/n, Lapa	08/08/2006	queda de árvore
D	Rua Valença, 169, Sumaré	22/09/2006	supressão programada
E	Av. Mercedes, 830, Lapa	09/02/2007	queda de árvore
F e F'(*)	Av. Pompéia, s/n, Pompéia	26/02/2007	queda de árvore (**)
G	Rua Traipu, s/n, Lapa	22/07/2007	queda de árvore (**)
H	Rua Petrópolis, 179, Sumaré	14/09/2007	supressão programada
J	Rua Bartira, 351, Pompéia	06/10/2007	supressão programada
K	Subprefeitura da Lapa, s/n	2007	- (**)
L	Subprefeitura da Lapa, s/n	2007	- (**)
X	Campus do IPT	03/08/2008	supressão programada
Y	Campus do IPT	03/08/2008	supressão programada

(*) - Coleta de torete adicional, localizado acima da região do colo do tronco da árvore, para a realização de ensaio biológico de suscetibilidade do lenho (amostras C' e F'). (**) - Coleta das amostras do lenho realizada por técnicos da Subprefeitura da Lapa, SP, portanto sem dados do entorno e/ou dendrométricos.

4.5 Avaliação da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana

O processo de biodeterioração das árvores de tipuana e os mecanismos de resistência do lenho ao ataque de organismos xilófagos foram avaliados pelo exame macroscópico e microscópico da estrutura anatômica e suas propriedades físicas e mecânicas.

Essas análises foram desenvolvidas em regiões sadias e afetadas do lenho das árvores de tipuana, de acordo com a metodologia apresentada na Figura 12. Na secção transversal dos toretes foram demarcadas e cortadas 3 amostras radiais do lenho, com cerca de 15 cm de largura.

Figura 12 - Avaliação da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. (A-B) exame macroscópico dos processos de biodeterioração dos toretes e de amostra com 15 cm de largura, aproximadamente ($n = 3$) do torete; (C) coleta de sub-amostra para caracterização da estrutura anatômica e propriedades físico-mecânicas; (D-F) determinação do perfil radial por densitometria de raios X; (G) obtenção de corpos-de-prova para ensaios físicos e mecânicos e análise da estrutura anatômica; (H-I) preparação de lâminas histológicas do lenho sadio e apodrecido e análise microscópica; (J) ensaio de densidade de massa aparente por imersão em mercúrio; e (K) ensaio de resistência à flexão estática

A relação do apodrecimento do lenho (na região do cerne) e a ocorrência de cupins-subterrâneos foram determinadas pelo exame macroscópico dos toretes coletados e por ensaio de susceptibilidade, em condições de laboratório.

4.5.1 Exame macroscópico do lenho afetado

Os toretes do lenho foram macroscopicamente analisados, com auxílio de uma lupa com aumento de 10 x quanto ao local (cerne e alburno) e extensão do ataque de fungos apodrecedores, cupins-subterrâneos e brocas-de-madeira, tipo de apodrecimento e mecanismos de resistência da árvore, como zonas de reação (SHIGO, 1979, 1983).

4.5.2 Caracterização da estrutura anatômica do lenho e dos mecanismos de resistência.

A estrutura anatômica do lenho sadio e deteriorado das árvores de tipuana e o mecanismo de resistência aos organismos xilófagos foram caracterizados pelo exame macroscópico e microscópico.

Para as análises macroscópicas, as superfícies transversais das amostras do lenho das árvores de tipuana foram polidas em lixa de mesa para a visualização das regiões do cerne e do alburno, podridões, etc. Esta análise foi feita com auxílio de lupa com aumento de 10 x e de microscópio estereoscópico.

A análise microscópica foi realizada por meio de lâminas histológicas do lenho, sob microscopia de luz. Para o lenho das árvores de tipuana atacado por fungos apodrecedores, utilizou-se a técnica desenvolvida por Barbosa⁵, sendo:

Tratamento: as amostras de lenho apodrecido foram tratadas a frio em série de concentração crescente (30, 50, 60 e 75%) de Polietileno Glicol (PEG). Após a absorção do PEG, as amostras do lenho foram secas em papel absorvente, envolvidas em papel vegetal e acondicionadas em um dessecador com sílica gel e mantidas a baixa temperatura em geladeira.

⁵ BARBOSA, A. C. F. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.

Seccionamento: os corpos-de-prova do lenho foram fixados no micrótomo de deslize marca Leica modelo SM2000R e feitos cortes histológicos (15µm de espessura) nos 3 planos de estudo (transversal, longitudinal radial e tangencial) com navalha de aço tipo C. Para manter a integridade dos cortes das amostras de lenho intensamente apodrecidas, utilizou-se resina de policloreto de vinil (PVC) diluída em acetato de butila, aplicando-se uma fina camada com um pincel na superfície da amostra; após a evaporação do acetato de butila seccionou-se o lenho; antes do corte com a navalha foi aplicada fita adesiva na superfície da amostra do lenho para a manutenção da sua estrutura e facilidade do manuseio do corte.

Montagem das lâminas histológicas: os cortes histológicos do lenho foram (i) coloridos com picroanilina aquosa 1%, com leve aquecimento sem fervura; (ii) lavados em água destilada para retirada do excesso do corante; (iii) coloridos com safranina aquosa 1% (1-2 minutos); (iv) lavados em água destilada; (v) diferenciados (retirada dos corantes) e desidratados em série etílica (50, 70, 90 e 100%); (vi) lavados em acetato de butila; (vii) posicionados em lâminas histológicas com fina camada de bálsamo do Canadá e cobertos com lamínula de vidro; e (viii) secos durante 7 dias, com um peso de metal sobre a lamínula. Os corantes safranina e picroanilina foram utilizados para evidenciar a presença de hifas e esporos de fungos no lenho. Para os cortes finos das amostras do lenho tratadas com resina de PVC adotou-se procedimento diferenciado, sendo (i) coloridos com picroanilina e safranina; (ii) secados em papel absorvente; (iii) posicionamento em lâminas histológicas com película de adesivo de *Haupt* e prensagem até a impregnação dos cortes do lenho com o adesivo; (iv) submersos em álcool etílico absoluto e secos com papel de filtro, em álcool etílico-acetato de butila (50-50%) e em acetato de butila para a remoção da resina de PVC; (v) gotejado o bálsamo do Canadá sobre os cortes histológicos do lenho fixados no adesivo; e (vi) secos.

4.5.3 Relação dos fungos apodrecedores e cupins subterrâneos na biodeterioração do lenho de árvores de tipuana

A associação dos fungos apodrecedores e cupins xilófagos na biodeterioração do lenho foi analisada através do (i) exame macroscópico do lenho afetado de árvores de tipuana (item 4.5.1) e de (ii) ensaio biológico para avaliação da suscetibilidade do lenho sadio e afetado pelo fungo apodrecedor *Ganoderma* sp. ao cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi*.

Ensaio biológico da avaliação da suscetibilidade do lenho de árvores de tipuana ao cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi* (IPT, 2007): do cerne sadio (torete F') e apodrecido pelo fungo *Ganoderma* sp. (Torete C') de árvores de tipuana, foram retirados corpos-de-prova (50 x 25 x 15 mm; comprimento, largura, espessura, maior dimensão na orientação da grã). Estes corpos-de-prova do lenho foram obtidos, aleatoriamente, da porção do cerne, evitando-se a região medular e defeitos associados. Corpos-de-prova do lenho de árvores de *Pinus* sp. e de cerne de *Eucalyptus grandis* foram cortados nas mesmas dimensões e utilizados como madeira-referência suscetível ao ataque de *C. gestroi*. Cinco condições de ensaio foram definidas (Tabela 7): 3 espécies de madeira; duas regiões do cerne e biodeterioração por *Ganoderma* sp..

Os corpos-de-prova do lenho foram transferidos para uma câmara de climatização ($75 \pm 5\%$ UR; 27 ± 2 °C), determinada a sua massa inicial e mantidos até massa constante. Posteriormente, foram dispostos, de maneira aleatória, em canaletas de PVC, interligando 2 caixas de vidro com colônia de cupins *Coptotermes gestroi* e madeira de *Pinus* sp como alimento opcional (Figura 13). O conjunto foi mantido em câmara climatizada (controle da umidade e temperatura) por 4 semanas, sendo retirados os corpos-de-prova do lenho, limpos (resíduo de túnel dos cupins), climatizados e obtidas as massas finais. A suscetibilidade do lenho de árvores de tipuana ao ataque dos cupins *C. gestroi* foi determinada pela % de perda de massa, com 10 repetições por tratamento.

Tabela 7 - Tratamentos estatísticos do ensaio biológico de suscetibilidade do lenho de árvores de tipuana ao cupim *Coptotermes gestroi*

Nomenclatura	Tratamentos do lenho
NS	Cerne de tipuana sadio.
EXS	Cerne de tipuana sadio e com acúmulo de extrativos, de coloração amarelada.
APO	Cerne de tipuana apodrecido por <i>Ganoderma</i> sp.
P	Lenho de <i>Pinus</i> sp.
EG	Cerne de <i>Eucalyptus grandis</i>

Figura 13 - Ensaio biológico da suscetibilidade do lenho de árvores de tipuana ao cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi*: (A) ninho e (B) canaleta de pvc com corpos-de-prova

4.5.4 Caracterização das propriedades físico-mecânicas do lenho sadio e deteriorado por fungos apodrecedores.

Padrões de lenho sadio e alterado pelos fungos apodrecedores foram definidos e caracterizados pela (i) variação radial da densidade de massa aparente (densitometria de raios X), (ii) densidade de massa aparente e (iii) pela resistência à flexão estática do lenho de tipuana

Determinação do perfil radial da densidade aparente do lenho por densitometria de raios X: das amostras do lenho foram cortadas sub-amostras (20x10 mm, altura e espessura), fixadas em suporte de madeira e cortadas seções transversais (1x10 mm, espessura e altura) em aparelho de dupla serra circular. As amostras do lenho cortadas foram, em seguida, acondicionadas em sala climatizada (12h; 20°C; 50%UR) atingindo 10% umidade. Em seguida, foram dispostas sobre filmes de raios X e radiografadas utilizando-se do equipamento de raios X-Hewlett Packard, Faxitron 43805 N. As radiografias foram reveladas e através de scanner foram geradas imagens digitais com resolução de 1000 dpi, gravadas no sistema bmp e analisadas nos programas Crad e Cerd, obtendo-se os perfis densitométricos das amostras radiais do lenho (Figura 14). Os perfis densitométricos do lenho das árvores de tipuana permitem determinar os valores médios de densidade de massa aparente do lenho nas regiões sadias e afetadas por organismos xilófagos (AMARAL; TOMAZELLO-FILHO, 1998; TOMAZELLO-FILHO; BRAZOLIN; CHAGAS, 2008).

Os perfis densitométricos das amostras do lenho das árvores de tipuana, corroborados pelas análises macroscópica e microscópica, permitiram determinar os padrões de biodeterioração por fungos apodrecedores.

Figura 14 - Método de raios X e a obtenção das imagens radiográficas do lenho das árvores de tipuana.

A: corte das amostras em equipamento de dupla serra; B: seções transversais das amostras; C: suporte com as amostras sobre o filme radiográfico; D: irradiação das amostras em equipamento de raios X; E: imagem radiográfica e sua análise nos programas CRAD e CERD e F: perfil da densidade aparente e respectiva amostra do lenho

Fonte: Tomazello-Filho (2006)

Determinação da densidade de massa aparente do lenho de árvores de tipuana: nos corpos-de-prova dos padrões de lenho sadio e apodrecidos utilizados nos ensaio mecânico de flexão estática, determinou-se a densidade de massa aparente do lenho (15 % de umidade) com base na norma ASTM-D-2395-02 (ASTM, 2002), com o volume determinado por método hidrostático com mercúrio líquido (Figura 15, A-B), em substituição à água, aumentando a precisão do cálculo (eq. 1)

$$D = \frac{M}{V} \dots\dots\dots(1)$$

Onde:

D = densidade de massa aparente (g/cm³);

M = massa do corpo-de-prova (g);

V = volume do corpo-de-prova (cm³).

Os corpos-de-prova de lenho foram climatizados em temperatura e umidade controladas (5 dias; 20°; 70 %) atingindo 15 % de teor de umidade, determinando-se a sua massa e volume. Os valores de densidade de massa aparente dos corpos-de-prova do lenho, obtidos por imersão em mercúrio, foram correlacionados com os da análise densitométrica por raios X.

Determinação da resistência à flexão estática: das amostras do lenho dos toretes das árvores de tipuana foram identificados os padrões de lenho sadio e apodrecido, demarcados e cortados corpos-de-prova (5 x 5 x 75 mm) e determinados os valores de resistência e do módulo de elasticidade à flexão estática paralela às fibras, com esforço aplicado na direção radial pela norma NBR 7190/97, adaptada (ABNT, 1997). No esquema estático, os corpos-de-prova do lenho foram apoiados em vão livre (60 mm) e aplicada força no seu centro (Figura 15, C), registrando-se simultaneamente a flecha e a força, até atingir a ruptura ou a carga máxima para a determinação do valor máximo de tensão normal sob flexão ou tensão de ruptura (eq. 2) e do valor do módulo de elasticidade (eq. 3). O modelo de falha (fratura) dos corpos-de-prova apodrecidos por fungos foi avaliado segundo Bodig e Jayne (1992) ilustrado na Figura 16.

$$f = \frac{3 P_R L}{2 b h^2} \dots\dots\dots(2)$$

Onde:

f = tensão de ruptura ou força máxima (N);

P_R = força de ruptura ou máxima (N);

L = vão livre (mm);

B = largura do corpo-de-prova (mm);

H = altura do corpo-de-prova (mm).

$$E = \frac{\Delta P L^3}{4 b h^3 \Delta v} = \frac{(P_{40} - P_{10}) L^3}{4 b h^3 (v_{40} - v_{10})} \dots\dots\dots(3)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade (MPa);

P_{40} = força correspondente a 40 % da força máxima;

P_{10} = força correspondente a 10 % da força máxima;

δ_0 = flecha correspondente a P_{40} ;

V_{10} = flecha correspondente a P_{10} .

O teor de umidade dos corpos-de-prova do lenho foi obtido pela norma ASTM-D-4442 (ASTM, 2003), sendo os valores utilizados no cálculo da sua densidade de massa aparente e resistência mecânica.

Figura 15 - Ensaio físicos e mecânicos do lenho das árvores de tipuana. A: climatização dos corpos-de-prova; B: ensaio de densidade de massa aparente do lenho por imersão em mercúrio; C: ensaio de flexão estática em máquina universal de ensaios, marca Kratos, modelo KE2000MPH

Análise estatística: a análise de variância de Kruskal-Wallis foi utilizada para análise das propriedades físicas e mecânicas de lenho de tipuana sadio e afetado por fungos apodrecedores, sendo o teste de Mann-Whitney para a comparação das médias dos tratamentos, sendo adotado o nível de significância de 5 %.

Figura 16 - Modelo de falha à flexão estática: (a) tração simples - TS, (b) grã inclinada - GI, (c) "lascamento" - LA, (d) tração abrupta - TB, (e) compressão - CP, (f) cisalhamento horizontal

Fonte: Bodig e Jayne (1992, p. 305)

4.6 Análise de distribuição de tensões do lenho sadio e deteriorado

Os valores de resistência à flexão estática, módulo de elasticidade e de densidade de massa aparente (imersão em mercúrio) foram utilizados na análise da distribuição das tensões no lenho sadio e deteriorado do tronco de uma árvore hipotética. Esta análise foi realizada pelo método de elementos finitos com auxílio do aplicativo *SAP 2000 - Integrated Software for Structural Analysis & Design* (COMPUTER AND STRUCTURE INCORPORATION, 2008). Nesta ferramenta analítica, o lenho foi considerado como um material ortotrópico com nove parâmetros de elasticidade, sendo, o módulo de elasticidade paralelo às fibras (longitudinal), na direção radial e na direção tangencial, o módulo de cisalhamento longitudinal-radial, longitudinal-tangencial e radial-tangencial e o coeficiente de *Poisson* longitudinal-radial, longitudinal-tangencial e radial-tangencial. (BODIG; JAYNE, 1992). O módulo de elasticidade paralelo às fibras foi obtido pelo ensaio de flexão estática do padrão de lenho normal e sadio e deteriorado por fungos de podridão branca em 2 estágios de apodrecimento (incipiente e intenso), e os 8 parâmetros restantes, estimados a partir desse módulo.

As simulações para a visualização das tensões foram feitas por flexão na direção paralela às fibras e as tensões de cisalhamento na direção radial da árvore ou no sentido de aplicação da carga.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Diagnóstico das características e biodeterioração das árvores de tipuana na área urbana

Nas sete regiões selecionadas na área urbana do município de São Paulo (Tabela 4) foram analisadas 1109 árvores de tipuana com copa desenvolvida, característica da espécie e submetidas a diferentes níveis de poda. Além dessas árvores, foram observadas 196, com copa reduzida e formação de galhos epicórmicos no tronco, em reação a prática de podas drásticas, comumente aplicada em árvores com risco de queda iminente (Figura 17).

Figura 17 - Morfologia de árvore de tipuana submetida à poda drástica, formando galhos epicórmicos

A relação dessas árvores com o seu entorno na condição urbana encontrada na cidade de São Paulo (condição de entorno), a ação antrópica afetando a árvore (estado geral), suas características dendrométricas e a ocorrência de processos de biodeterioração são analisados a seguir.

5.1.1 Condição de entorno

Tipo de logradouro: das 1109 árvores de tipuana analisadas, 959 (86%) encontravam-se em passeios públicos e 150 (14%) em canteiros centrais ou ilhas de ruas e de avenidas. A Tabela 8 apresenta o tipo de edificação associado às árvores de tipuana, indicando a predominância de edificações residencial e comercial com valores de 51 e 17%, respectivamente. Segundo a PMSP (informação pessoal) as árvores de tipuana foram plantadas pela empresa incorporadora City, na fase de implantação dos bairros de Cerqueira César, Pinheiros, Pacaembu, Sumaré e Lapa no município de São Paulo, inicialmente planejados como áreas residenciais. Desta forma, 72% das árvores de tipuana localizavam-se em frente às instituições (hospitais; escolas), residências e casas comerciais e, se afetadas por prática inadequada de manejo ou por biodeterioração, podem oferecer riscos à população ou à propriedade.

Tabela 8 - Tipo de edificação e as árvores de tipuana

Tipo de edificação	Nº de árvores de tipuana (%)
Residencial	561 (51)
Comercial	188 (17)
Praça/parque/outra	183 (16)
Sem construção	75 (07)
Institucional	49 (04)
Cemitério/estacionamento	40 (04)
Em construção	13 (01)
Total	1109 (100)

Classificação das vias de tráfego: adotando-se a classificação das vias de tráfego aplicada pela Secretaria Municipal de Transportes - SMT, verificou-se que 464 árvores de tipuana (43%) foram plantadas em vias locais, 416 (37%) em vias coletoras

e 229 (20%) em vias arteriais. Portanto, 57% das árvores se desenvolvem em vias de tráfego rápido e intenso (vias coletoras e arteriais) representando, em caso de queda, riscos para a segurança das pessoas e para o tráfego de veículos da cidade de São Paulo (À SOMBRA DO PERIGO, 2006; FORÇA-TAREFA PARA LIMPAR ESTRAGOS, 2006; CICLONE DEIXA CERCA DE 200 MIL SEM ENERGIA NO RS; MUNICÍPIOS DECRETAM EMERGÊNCIA, 2008).

Tipo de pavimentação: com relação à pavimentação, temos que apenas 301 (27%) das árvores de tipuana foram plantadas em calçadas verdes, característica de bairros planejados, como Pacaembu, Sumaré, Alto de Pinheiros, Alto da Lapa e Alto da Boa Vista. Este tipo de cobertura de pavimento possibilita a percolação da água, aeração e atividade microbiológica do solo e troca de nutrientes, favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular das árvores (LIMA, 1993; EUER, 1996). Neste aspecto, os resultados do levantamento da área permeável dos canteiros mostraram que a maioria das árvores (877; 79%) foi plantada em canteiros inadequados e com área permeável insuficiente, ou seja, inferior a 3 m² (SÃO PAULO, 2005), sendo que para 31% (269) dessas árvores inexistia área permeável, com aplicação de cobertura de cimento envolvendo totalmente a base do tronco. De modo geral, somente nas calçadas verdes e nos canteiros centrais existia área de cobertura permeável e, na maioria dos casos, adequada para o crescimento e desenvolvimento normais das árvores de tipuana.

Observou-se, ainda, a existência de pavimento soerguido (levantamento de passeio) em 528 árvores de tipuana (48%) indicando que as barreiras físicas (guias e canteiros elevados) e/ou a compactação do solo restringiram a formação do sistema radicular (LIMA, 1993) e/ou mostram sinais de movimentação da fundação (sistema radicular e solo associado), devido aos esforços solicitantes (peso da própria árvore e ventos).

A condição inadequada diagnosticada para a maioria das árvores de tipuana na cidade de São Paulo pode afetar seu desenvolvimento, tornando-as suscetíveis ao ataque de pragas e de doenças e, conseqüentemente, com maior risco de ruptura. As condições de entorno refletem a falta de planejamento na fase de plantio e práticas de

manejo inadequado, sendo que a Portaria Intersecretarial nº 05/SMMA-SIS/02, que regulamenta o plantio de árvores na cidade de São Paulo, foi implementada somente no ano de 2002. A cidade de São Paulo necessita, ainda, um Plano Diretor de Arborização para definir as diretrizes da implantação, manejo e formação das florestas urbanas adequadas às necessidades da cidade e de sua população.

5.1.2 Estado geral

Todas as árvores de tipuana diagnosticadas na área urbana foram classificadas como vivas, ou seja, sem a indicação de declínio ou morte, normalmente traduzidos pela presença de galhos secos, folhas de coloração diferenciada ou sem folhas e com tronco seco (sem o fluxo de seiva elaborada) e sem casca.

Injúria: a frequência relativa de ocorrência de injúrias nas 3 partes - sistema radicular, colo e tronco é apresentada na Tabela 9. As injúrias diagnosticadas foram relacionadas à ação do homem, sendo mais afetado o tronco (Figura 18, A). Essas injúrias expõem o lenho e permitem a entrada de organismos xilófagos (ex.: fungos apodrecedores), causando o apodrecimento do cerne. Injúrias do sistema radicular e do colo do tronco das árvores de tipuana permitem a infecção e colonização por fungos patógenos, podendo levar as árvores ao declínio (RAYNER; BODDY, 1988).

Tabela 9 - Constituinte das árvores e relação com as injúrias provocadas nas árvores de tipuana

Parte da árvore	Nº (%) de árvores com injúrias
Sistema radicular	152 (14)
Colo	200 (18)
Tronco	358 (32)

Raiz dobrada e enovelada: a avaliação do sistema radicular indicou que 346 árvores (31%) apresentaram raízes dobradas e/ou enoveladas (Figura 18, B), sendo que em 44% (152) dessas árvores ocorreu nítida influência de canteiros de dimensões inadequadas (barreira física). Segundo Albers, Pokorny e Johnson (2003), essas

alterações no desenvolvimento das árvores ocorrem quando são plantadas em covas rasas, com solos compactados ou quando as raízes encontram barreiras para o seu crescimento. A ação antrópica constitui-se na principal causa da formação de raízes enoveladas e dobradas em árvores de tipuana, podendo em casos extremos, não observados no estudo, estrangular o tronco, danificar os tecidos funcionais (floema e xilema) e levar a árvore ao declínio. A queda de árvores foi relacionada, de acordo com Johnson (1999 apud ALBERS; POKORNY; JOHNSON, 2003), com a formação de raízes com estas alterações morfológicas.

Poda: a poda inadequada de raízes foi observada em 108 árvores de tipuana (10%) (Figura 19, A) aplicada, normalmente, para a remoção de parte do sistema radicular podendo, portanto, comprometer a sua estabilidade. A poda inadequada da copa foi determinada em 510 árvores de tipuana (46%), compreendendo o corte dos galhos laterais desenvolvidos ou bifurcados. Como resultado, cerca de 412 árvores de tipuana (36%) mostraram copa desequilibrada com deslocamento do centro de gravidade e, destas, 111 árvores (27%) com poda lateral (Figura 19, B). A poda da copa aplicada pode ser considerada tecnicamente inadequada e expõe o lenho das árvores aos fungos apodrecedores e insetos. Segundo Seitz (1996) a poda dos galhos das árvores deve ser realizada precocemente, evitando a formação de cicatrizes, consideradas a principal via de entrada dos organismos xilófagos.

Colo soterrado: o soterramento do colo foi observado em 97 árvores (9%), pela construção de canteiros altos, podendo acelerar o processo de biodeterioração do lenho, favorecer a instalação de ninhos de cupins-subterrâneos e dificultar a análise visual e prospecção. A queda de árvore de tipuana, na cidade de São Paulo em 2004, ocasionado pelo apodrecimento da base do seu tronco em função do soterramento foi mencionado por Barillari⁶ (Figura 20, A).

⁶ Barillari, C. T. Queda de árvores na cidade de São Paulo. São Paulo, 5 abr. 2005. Palestra ministrada aos funcionários da PMSP.

Figura 18 - Árvore de tipuana. A: Injúria no tronco apresentando apodrecimento do alburno (seta). B: Raiz dobrada em resposta à barreira física (canteiro)

Figura 19 - Árvore de tipuana: (A) poda inadequada de raiz (escala = 5 cm); (B) poda lateral inadequada, deslocando o centro de gravidade da árvore

Dendrocirurgia: foram observadas 33 árvores de tipuana (3%) com cavidades internas nos seus troncos, resultado da deterioração do lenho por organismos xilófagos, e que foram preenchidas com cimento e materiais diversos, como tijolos, resíduos da construção civil, vidro entre outros (Figura 20, B). Apesar da iniciativa de proceder-se à "dendrocirurgia" com o objetivo de restabelecer a resistência mecânica da árvore, o material de preenchimento das cavidades é inapropriado, pois permite a entrada e o acúmulo de água para o interior do tronco, acelerando o processo de apodrecimento do lenho.

Figura 20 - Árvore de tipuana. A: colo soterrado pelo canteiro alto. B: "dendrocirurgia" no tronco (escala = 0,10 m)

Rachaduras e casca inclusa: nas árvores de tipuana analisadas na cidade de São Paulo não foram verificadas rachaduras e casca inclusa no tronco, defeitos considerados indicadores de grande risco de ruptura (ALBERS; POKORNY; JOHNSON, 2003). As rachaduras podem resultar da perda de resistência do lenho aos esforços solicitantes (ex.: vento e peso da árvore). A casca inclusa é um ponto frágil de ruptura dos galhos a esforços de flexão agravado pelo apodrecimento do lenho na forquilha.

5.1.3 Características dendrométricas

As características dendrométricas das árvores de tipuana da cidade de São Paulo (Tabela 10) indicaram que 75% delas têm DAP > 0,50 m (Figura 21, A) sendo, portanto, árvores adultas, conforme informações dos técnicos da PMSP e moradores antigos. Apenas 16 árvores de tipuana (<1 %) possuíam DAP < 0,20 m, indicando que a espécie não tem sido utilizada na arborização recente dos bairros, sendo relevante ao considerar-se que o bairro do Pacaembu, tombado pelo Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico, Arqueológico, Artístico e Turístico - CONDEPHAAT, é caracterizado pela espécie.

A avaliação da altura total das árvores de tipuana indicou que 50% têm de 10-14 m e 25% acima de 14 m (Figura 21, B). Como a maior frequência destas árvores encontra-se em vias estreitas (ex.: bairros de Cerqueira César e Paraíso), o seu risco de queda devido ao vento deve ser considerado, uma vez que 75% dessas árvores têm diâmetro, altura e área de copa superiores a 7,0 m, 3,5 m e 20,0 m², respectivamente. Da mesma forma, o índice de fechamento da copa dessas árvores atingiu valores de 10 a 60% nos período de verão, outono e inverno de 2004, sendo considerado, também, como importante atributo na resistência aos ventos.

A inclinação do tronco de 75% das árvores de tipuana (Figura 21, C) foi inferior a 15°, sendo que somente 15 árvores (< 1 %) apresentavam tronco com inclinação > 30°. Albers, Pokorny e Johnson (2003), indicaram que árvores com inclinação do tronco superior a 40° devem ser removidas ou o alvo (equipamento ou propriedade) removido; no presente estudo apenas duas árvores de tipuana

apresentaram esta condição. A inclinação do tronco deve ser considerada como um importante atributo na análise de risco de ruptura das árvores de tipuana, juntamente com a biodeterioração do lenho, apesar dos mecanismos de compensação mecânica das árvores inclinadas, como a formação de lenho de reação, espessamento do colo e alteração no tamanho e forma das raízes (MATTHECK; BRELOER, 1997).

Com respeito à altura das primeiras bifurcações do tronco (Figura 21, D), verificou-se que 75% das árvores encontravam-se abaixo de 4 m. Como a rede elétrica situa-se entre 4 - 5 m de altura, ocorrem conflitos com a copa das árvores, que são corrigidos por meio de podas laterais e podas em "V" e que resultam em alta frequência de árvores com copas desequilibradas. Pode-se mencionar como agravante, a existência de 11 árvores de tipuana com 10 m de altura média total e com a 1ª bifurcação a menos de 1,5 m, estando sujeitas ao rompimento na região da forquilha.

Tabela 10 - Características dendrométricas das árvores de tipuana na área urbana de São Paulo, SP

Características dendrométricas das árvores de tipuana	Valores das características das árvores					
	Média	D. padrão	Mínimo	Máximo	1º Quartil	3º Quartil
DAP (m)	0,60	0,16	0,16	1,06	0,50	0,70
Altura total (m)	12,71	2,79	4,71	21,32	10,78	14,66
Altura da 1ª bifurcação (m)	3,22	0,89	0,43	11,00	2,69	3,61
Ângulo inclinação do tronco (°)	11,0	6,8	0,1	48,7	5,8	14,7
Diâmetro da copa (m)	9,76	2,71	1,63	23,63	7,99	11,53
Altura da copa (m)	4,82	1,53	0,84	11,19	3,78	5,73
Área da copa (m²)	32,44	18,85	0,92	133,21	21,64	40,50
Índice fechamento da copa (%)	36	9	10	60	30	40

Figura 21 - Características dendrométricas das tipuanas. Distribuição em classes de (A) DAP, (B) altura total, (C) inclinação do tronco e (D) altura da primeira bifurcação

5.1.4 Processos de biodeterioração por organismos xilófagos

Do total de 1109 árvores o levantamento de campo identificou 598 (54%) com deterioração do lenho do sistema radicular, colo ou tronco causada por organismos xilófagos (ex.: fungos apodrecedores, térmitas e brocas da madeira) (Figura 22), com a predominância do ataque dos fungos apodrecedores e dos cupins-subterrâneos.

Figura 22 - Ocorrência de organismos xilófagos (fungos apodrecedores, térmitas e brocas-de-madeira) na raiz, colo e tronco das árvores de tipuana

5.1.4.1 Fungos apodrecedores

Das 1109 árvores de tipuana analisadas, 338 (30%) árvores apresentavam os sintomas característicos de apodrecimento do lenho pelo ataque de fungos apodrecedores na raiz, colo ou tronco (Tabela 11), eventualmente com a detecção de corpos-de-frutificação. A infecção dos fungos xilófagos estava associada às injúrias, causadas pela poda das raízes e retirada da casca do caule, sendo a maior ocorrência no colo, seguindo-se o tronco e a raiz das árvores de tipuana. Para as raízes, o diagnóstico foi restrito às expostas, não sendo possível avaliar a região subterrânea. Quanto à intensidade do ataque, as árvores apresentavam um estágio avançado de apodrecimento (ataque moderado e intenso) na raiz, colo e tronco, totalizando-se 56, 82 e 77 %, respectivamente. Este grau de apodrecimento já atingia o cerne da árvore e, visivelmente, alteravam as propriedades físicas e mecânicas do lenho. Do total de árvores com ataque de fungos na raiz, 41 % (44 exemplares) apresentou injúrias e 36% (39) poda inadequada. No colo, 28 % (57 árvores), apresentaram injúrias e 43 % (87) oco aberto. No tronco, 60 % (76) com injúrias e 13 % (17) com oco aberto. Esses valores indicam a relação da deterioração por fungos apodrecedores com a exposição do lenho das árvores.

Tabela 11 - Ataque de fungos apodrecedores em tipuana

Local	Nº de árvores com ocorrência	Ataque - nº de árvores (%)		
		superficial	moderado	intenso
Raiz	107	47 (44)	37 (35)	23 (21)
Colo	204	34 (18)	85 (41)	85 (41)
Tronco	126	29 (23)	43 (34)	54 (43)

A Tabela 12 apresenta a frequência de ocorrência dos tipos de podridão encontrados no lenho das árvores de tipuana, indicando que a podridão branca é a mais frequente. Este tipo de podridão, segundo Blanchette (2003), é comum no lenho de árvores de folhosas sendo que, para as coníferas, a podridão parda é mais frequente. Entretanto, em uma grande porcentagem de árvores o apodrecimento foi considerado indeterminado, devido à dificuldade de acesso ao lenho apodrecido e de identificação "in loco", sendo necessária a confirmação laboratorial por meio de lâminas histológicas do lenho.

Tabela 12 - Tipo de podridão do lenho em árvores de tipuana da cidade de São Paulo

Local	Nº de árvores com ocorrência	Tipo de podridão - nº de árvores (%)	
		Branca	Indeterminada
Raiz	107	39 (36)	68 (64)
Colo	204	56 (27)	146 (73)
Tronco	126	44 (35)	85 (65)

Foram coletados 17 corpos-de-frutificação de espécies de fungos xilófagos nas árvores de tipuana, sendo: i) quatro na raiz causando podridão branca, sendo identificado somente o fungo *Picnoporus sanguineus* (família Polyporaceae) (Figura 23,A); ii) seis corpos-de-frutificação no colo, com 3 identificados como *Ganoderma* sp. (família Ganodermataceae), cinco desenvolve-se sobre a casca das árvores e sem sinais de associação com o lenho apodrecido (Figura 23,B) e um de *Ganoderma* sp. em oco aberto do tronco causando intenso apodrecimento característico de podridão branca; iii) sete corpos-de-frutificação no tronco, sem possibilidade de identificação.

Figura 23 - Corpos-de-frutificação em árvores de tipuana. (A) *Picnoporus sanguineus* em raiz exposta causando podridão branca (escala = 5 cm); de (B) *Ganoderma* sp., sobre a casca e no colo (escala = 5 cm)

A presença de fungos apodrecedores é indicação de que a biodeterioração relaciona-se às injúrias e ao manejo inadequado, como as podas das árvores, conforme mencionado por Amaral et al. (2003) na cidade de Piracicaba, SP. Não foram observadas árvores de tipuana mortas ou apresentando claros sintomas de declínio, indicando que o ataque do lenho por fungos apodrecedores não afetou significativamente o vigor das árvores, até o momento.

5.1.4.2 Cupins

Das 1109 árvores, 319 (29 %) apresentaram a ocorrência de cupins-de-solo na raiz, colo ou tronco. Destas, 307 (96%) com ocorrência de cupins-subterrâneos e 12 exemplares (4%) com outros cupins. Três espécies de cupins foram identificadas, sendo: i) *Coptotermes gestroi* (119 árvores) e *Heterotermes* sp. (uma árvore), ambos com hábito de nidificação subterrâneo e pertencentes à Família Rhinotermitidae; e ii) *Neocapritermes* sp. (12 árvores), cupim-de-solo da família Termitidae.

Cupim-subterrâneo: o ataque do lenho (desgaste) por cupins-subterrâneos foi observado em 225 árvores (20%) sendo verificados os insetos vivos em 119 exemplares árvores (11%). Em relação à parte da árvore afetada (Tabela 13), os cupins foram mais perceptíveis no tronco, pela presença de túneis e de seus vestígios sobre e sob a casca, não sendo observada atividade nas raízes, quando expostas. Esse grupo de cupins indica a preferência pelo ataque do lenho do colo e do tronco, ao invés das raízes das árvores de tipuana, conforme observações feitas em árvores tombadas na cidade de São Paulo, com ataque de cupins no tronco e com radicular sadio (BRAZOLIN⁷, informação pessoal).

A coleta e a análise da morfologia dos insetos e o diagnóstico das árvores de tipuana afetadas (ataque e atividade) indicaram tratar-se da espécie *Coptotermes gestroi*, ocorrendo em elevados níveis de infestação e apresentando grande capacidade de dispersão em centros urbanos, causando prejuízos à arborização urbana e edificações (ZORZENON; POTENZA, 1998; AMARAL, 2002; JUSTI-JUNIOR et al., 2004; IPT, 2004; ROMAGNANO, 2004; TOLEDO: ROMAGNANO, 2006; SILVA-FILHO et al., 2007). Esses resultados corroboram os apresentados por Romagnano (2004) de que o “centro expandido”, área delimitada pelas avenidas marginais da cidade inclui os distritos com comprovada ocorrência de cupins-subterrâneos.

⁷ BRAZOLIN, S. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT

O nível de infestação de cupins-subterrâneos nas árvores de tipuana é, com certeza, maior do que o constatado, considerando que as análises indicaram somente a sua ocorrência externa e também foram realizadas após períodos de chuva e/ou no inverno (baixa temperatura), dificultando a observação dos insetos. A biodeterioração do lenho das árvores por estes insetos constitui-se em um processo progressivo, pelo qual as árvores diagnosticadas com intensidade de ataque “leve”, poderão evoluir para um nível de ataque “intenso” e as árvores sem ocorrência de sintomas poderão ser afetadas, caso não sejam tomadas providências. Portanto, é necessária a aplicação de políticas públicas referente ao controle da infestação de cupins-subterrâneos nas árvores e nas edificações da cidade de São Paulo (ABBUD, 1999).

Tabela 13 - Ocorrência, ataque ao lenho e a atividade de cupins-subterrâneos em árvores de tipuana

Atributo	Cupins-subterrâneos - nº de árvores (%)			
	Grau	Raiz	Colo	Tronco
Ocorrência	sem	1106 (99)	947 (85)	852 (77)
	com	3 (<1)	162 (15)	257 (23)
Atividade	sem	1109 (100)	1035 (93)	1003 (90)
	leve	-	9 (1)	17 (2)
	moderada	-	32 (3)	56 (5)
	intensa	-	33 (3)	33 (3)
Ataque	sadia	1106 (99)	965 (87)	908 (81)
	leve	-	37 (3)	66 (6)
	intensa	3 (<1)	107 (9)	135 (12)

Outros cupins: os cupins-de-solo identificados como *Neocapritermes* sp. foram constatados em apenas 12 árvores de tipuana na região do solo quando remexido, próximos ao seu colo e raízes. Este cupim não é considerado como praga de árvores e pode atacar as plantas e/ou gramados em jardins ou galhos apodrecidos (MILANO; FONTES, 2002). Os cupins de nidificação arborícola e os de madeira seca e úmida não foram observados nas árvores de tipuana, apesar de que o cupim-arborícola *Nasutitermes* sp. (família Termitidae) e cupins-de-madeira-seca (família Kalotermitidae) terem sido notados em árvores da cidade de São Paulo (ZORZENON; POTENZA, 1998; AMARAL, 2002; JUSTI-JUNIOR et al., 2004; IPT, 2004).

5.1.4.3 Deterioração interna

Os resultados da análise interna do lenho na altura do colo das árvores de tipuana mostraram que 935 (84 %) apresentaram diferentes níveis de deterioração, sendo que, 142 árvores (13%) evidenciavam o oco aberto no tronco devido, provavelmente, a reação às injúrias. A frequência relativa de deterioração interna (%) do lenho (Figura 24) indicou que 528 árvores (48%) eram sadias ou com deterioração interna menor do que 1/3 do raio do tronco (<11 % deterioração interna); 412 árvores (37 %) com deterioração entre 1/3 a 2/3 (11% - 44%) e; 169 (15%) com deterioração maior que 2/3 (> 44%). No lenho do tronco, 60 árvores (< 1%) mostravam ocos abertos, com as suas prospecções indicando um valor médio de $32,8 \pm 14,5\%$ de deterioração interna.

As árvores de tipuana estão sujeitas aos organismos xilófagos como as de outras espécies, apresentando bom nível de resistência, pela longevidade de 70 anos verificada no presente trabalho. No entanto, os danos nos passeios públicos e na rede elétrica caracterizam negativamente as árvores dessa espécie, além de considerada como exótica. Conclui-se que o precário planejamento, manejo inadequado da arborização urbana, etc. devem ser considerados como responsáveis pela biodeterioração do lenho e redução da longevidade das árvores de tipuana na cidade de São Paulo.

Figura 24 - Deterioração interna (%) do lenho de árvores de tipuana. (A) valor de 11%, referente à deterioração equivalente a 1/3 do raio do tronco; (B): valor de 44%, referente à deterioração equivalente a 2/3 do raio

5.2 Análise de risco de queda das árvores

A análise do risco de queda das árvores de tipuana, indicou uma maior frequência de ocorrência de árvores classificadas em um estado de alerta mínimo do que em máximo (Tabela 14). O modelo de cálculo estrutural indicou a quebra de 177 árvores de tipuana, sendo 166 (94%) no colo (base do tronco), 4 (2%) no tronco e 7 (4%) no colo e tronco. Não houve predição de ruptura no sistema radicular e solo, indicando que o diâmetro e a profundidade do sistema radicular foram estimados para a condição urbana (Tabela 5).

Tabela 14 - Risco de queda das árvores de tipuanas na cidade de São Paulo

Estado de alerta	nº de tipuanas (%)
Mínimo	932 (84)
Máximo	177 (16)
Total	1109 (100)

5.3 Associação entre estado de sanidade biológica, características dendrométricas e risco de queda das árvores de tipuana

Estado de sanidade biológica: no diagnóstico das árvores de tipuana, observou-se uma associação entre a presença externa de fungos apodrecedores e de cupins-subterrâneos (Tabela 15), indicando a interação entre estes organismos no processo de biodeterioração de seu lenho.

Tabela 15 - Relação entre fungos apodrecedores e cupins-subterrâneos das árvores de tipuana

Fungo apodrecedor	Cupim-subterrâneo		Total
	presença	ausência	
presença	120	218	338
ausência	187	584	771
Total	307	802	1109

$\chi^2 = 14,85$, sendo $p < 0,05$; $\varphi = 0,12$

Estado de sanidade biológica do lenho e as características dendrométricas: considerando-se o DAP e a sanidade biológica externa das árvores de tipuana observaram-se diferenças estatisticamente significantes na frequência de

ocorrência de fungos apodrecedores e de cupins-subterrâneos, indicando uma associação com o DAP (Tabela 16). Pela Figura 25 podemos inferir que existe uma relação positiva entre a presença dos organismos xilófagos e o DAP; e uma relação negativa para a ausência desses organismos. Essas relações indicam que à medida que a árvore de tipuana envelhece (aumento do valor do seu DAP) aumenta a ocorrência de fungos e cupins, sendo que nas árvores mais jovens (menor valor do DAP) menor é a sua frequência.

Os coeficientes ϕ 's observados entre os fungos-cupins e entre fungos-cupins e o DAP (0,12, 0,10 e 0,18 respectivamente) indicaram associações fracas. Nos resultados das análises deve ser considerado que (i) o apodrecimento das árvores pelos fungos só foi observado quando da exposição do seu lenho, (ii) a presença de cupins no lenho das árvores independe da ação antrópica (injúrias) e (iii) a elevada umidade do solo em dias chuvosos de inspeção das árvores de tipuana dificultou a observação da presença de cupins.

Tabela 16 - Relação entre a ocorrência de organismos xilófagos e o DAP das árvores de tipuana

Classe de DAP (m)	Frequência de ocorrência - nº. de tipuanas (%)			
	Fungos apodrecedores (*)		Cupins-subterrâneos (**)	
	presente	ausente	presente	ausente
$0,16 < x \leq 0,36$	11 (16)	57 (84)	7 (10)	61 (90)
$0,37 < x \leq 0,56$	103 (29)	249 (71)	68 (19)	284 (81)
$0,57 < x \leq 0,76$	156 (32)	356 (68)	173 (33)	349 (67)
$0,77 < x \leq 0,96$	52 (34)	103 (66)	55 (35)	100 (65)
$0,97 < x \leq 1,16$	6 (50)	6 (50)	4 (33)	8 (67)
Subtotal	338	771	307	802
Total	1109		1109	

(*) - $\chi^2 = 10,09$, sendo $p < 0,05$; $\phi = 0,10$. (**) - $\chi^2 = 35,25$, sendo $p < 0,05$; $\phi = 0,18$

Figura 25 - Ocorrência de fungos apodrecedores e de cupins-subterrâneos nas classes de DAP das árvores de tipuana

Características dendrométricas e a deterioração interna do lenho: a análise interna do lenho das árvores de tipuana (em % de deterioração) em relação ao DAP (Tabela 17), indicou diferenças estatisticamente significantes na distribuição da deterioração do lenho por classe de DAP; existe uma associação mediana de coeficiente $\varphi = 0,51$ entre danos causados no lenho por cupins e fungos e o DAP. A Figura 26 ilustra uma associação positiva, com maior valor do DAP e maior % de deterioração interna do lenho e negativa nas árvores de menor valor de DAP, com menores % de deterioração do lenho.

Estudos realizados por Scheffer e Cowling (1966) corroboram os resultados obtidos para as árvores de tipuana ao explicar o apodrecimento do cerne de árvores de diferentes espécies ao atingirem idade mais avançada. Os autores observaram, ainda, diferenças na durabilidade natural no sentido medula-casca do tronco das árvores, diretamente proporcional ao diâmetro do cerne: com o envelhecimento das árvores pode ocorrer a conversão dos extrativos do cerne em compostos de menor toxidez, favorecendo o ataque do lenho pelos organismos xilófagos. O padrão de distribuição da

água e do oxigênio nos tecidos do lenho pode, também, estimular ou inibir o processo de apodrecimento do cerne por microorganismos e ataque de insetos (RAYNER; BODDY, 1998).

Tabela 17 - Relação entre deterioração interna e o DAP das árvores de tipuana

Classe de DAP (m)	Categoria de deterioração interna ^(*) ^(**) - nº. de tipuanas (%)			
	1	2	3	4
0,16 < x ≤ 0,36	30 (44)	34 (50)	3 (4)	1 (1)
0,37 < x ≤ 0,56	108 (31)	142 (40)	80 (23)	22 (6)
0,57 < x ≤ 0,76	33 (6)	159 (30)	236 (45)	94 (18)
0,77 < x ≤ 0,96	3 (2)	19 (12)	89 (57)	44 (28)
0,97 < x ≤ 1,16	0 (0)	0 (0)	4 (33)	8 (67)
Total	174	354	412	169

(*) - $\chi^2 = 286,79$, sendo $p < 0,05$; $\varphi = 0,51$. (**) - 1 - árvore sadia; 2 - deterioração menor que 1/3 do raio da árvore (equivalente a 11 %); 3 - 1/3 a 2/3 do raio (11 a 44 %) e; 4 - maior que 2/3 do raio (> 44 %).

Figura 26 - Relação entre o DAP e a deterioração interna (%) do lenho das árvores de tipuana

Com relação às categorias de deterioração interna do lenho detectou-se diferença significativa com o DAP das árvores de tipuana (Tabela 18; Figura 27). Os resultados dos testes de Mann-Whitney, mostraram que todas as categorias de deterioração interna diferiram significativamente entre si, inferindo-se que os valores médios dos DAP são bons indicadores de processos de biodeterioração instalados no interior das árvores, sendo: 0,47 m para árvores sadias; 0,55 m para árvores com deterioração inferior a 1/3 do raio do tronco; 0,66 m entre 1/3 e 2/3 e; 0,70 m para deterioração acima de 2/3. Nestas categorias, os valores médios de % de deterioração são 0 ± 0 %, $3,21 \pm 3,01$ %, $26,81 \pm 9,42$ % e $58,00 \pm 12,04$ %, respectivamente. Portanto, nas árvores de maiores valores de DAP o ataque de organismos xilófagos foi mais significativo, sendo que para as categorias 3 e 4 observou-se que em 75 % o DAP foi superior a 0,58 e 0,61 m, respectivamente.

Os resultados mostram, para as árvores de tipuana, o atributo DAP como indicativo da biodeterioração do seu lenho, principalmente, quando não se observa quaisquer indícios externos de ocorrência de organismos xilófagos. Na prática e de maneira conservadora, pode-se estabelecer que as árvores de tipuana com DAP superior a 0,60 m podem apresentar biodeterioração do seu lenho por fungos e/ou por cupins-subterrâneos. Em contrapartida, árvores com DAP inferior a 0,60 m podem apresentar lenho sadio ou com pequena deterioração

Tabela 18 - Relação entre deterioração interna do lenho e o DAP das árvores de tipuana

Categoria de deterioração interna (**)	DAP (m) (*)						
	n	Média	D. padrão	Mínimo	Máximo	1ºQuartil	3ºQuartil
1 (0 %) (a)	174	0,47	0,13	0,16	0,91	0,39	0,54
2 ($0 < x \leq 11$ %) (b)	354	0,55	0,13	0,17	0,91	0,47	0,64
3 ($11 < x \leq 44$ %) (c)	412	0,66	0,13	0,16	1,06	0,58	0,74
4 (> 44 %) (d)	169	0,70	0,14	0,22	1,06	0,61	0,80

(*) - Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 215,96$; $p < 0,05$. (**) - Teste de médias de Mann-Whitney: letras diferentes são estatisticamente significantes

Figura 27 - Deterioração interna (%) do lenho e o DAP das árvores de tipuana

Risco de queda das árvores e o estado de sanidade biológica do lenho:

observou-se uma associação entre a presença externa de organismos xilófagos (fungos apodrecedores e cupins-subterrâneos) e o risco de queda das tipuanas (Tabela 19). Neste caso, os dados indicaram uma maior frequência de ocorrência de fungos e de cupins nas árvores categorizadas no estado de alerta máximo e, ao contrário, menor frequência dos organismos nas árvores com estado de alerta mínimo. Os coeficientes φ de 0,14 e 0,07 indicam associações fracas para os cupins e fungos, respectivamente.

Tabela 19 - Relação entre a ocorrência de organismos xilófagos e o risco de queda das árvores de tipuana

Risco de queda	Cupim-subterrâneos (*)		Fungo apodrecedor (**)	
	presença	ausência	presença	ausência
Mínimo	233 (25%)	699 (75%)	270 (29%)	662 (71%)
Máximo	74 (42%)	103 (58%)	68 (38%)	109 (62%)
Subtotal	307	802	338	771
Total	1109		1109	

(*) - $\chi^2 = 20,99$, sendo $p < 0,05$; $\varphi = 0,14$; (**) - $\chi^2 = 6,27$, sendo $p < 0,05$; $\varphi = 0,07$

Risco de queda e as características dendrométricas das árvores: apenas a variação do DAP das árvores de tipuana apresentou diferença estatisticamente significativa em relação ao risco de queda (Tabela 20), indicando existência de associação entre os 2 parâmetros. Os valores de DAP são maiores para as árvores com estado de alerta máximo e menores para as de estado de alerta mínimo (Figura 28).

Tabela 20 - Relação entre o risco de queda e o DAP das árvores de tipuana

Classe de DAP (m)	Risco de queda (*) - n°. de tipuanas (%)	
	Mínimo	Máximo
$0,16 < x \leq 0,36$	65 (96)	3 (4)
$0,37 < x \leq 0,56$	327 (93)	25 (7)
$0,57 < x \leq 0,76$	428 (82)	94 (18)
$0,77 < x \leq 0,96$	108 (70)	47 (30)
$0,97 < x \leq 1,16$	4 (33)	8 (67)
Subtotal	932	177
Total	1109	

(*) - $\chi^2 = 75,82$, sendo $p < 0,05$; $\varphi = 0,26$

Figura 28 - Risco de queda e o DAP das árvores de tipuana

As características dendrométricas das árvores de tipuana, representadas pela sua altura total (Tabela 21), área de copa (Tabela 22), altura da primeira bifurcação (Tabela 23) e ângulo de inclinação do tronco (Tabela 24) não apresentaram associação com os resultados de risco de queda. O perfil médio das características dendrométricas das árvores categorizadas quanto ao seu estado de alerta (Tabela 25) corroboraram os resultados: somente o DAP médio apresentou maior diferença entre os estados de alerta máximo e mínimo, com os valores médios das demais características pouco diferindo. Deve-se, também, considerar que a dendrometria das árvores de tipuana foi alterada pelas práticas de manejo, principalmente pelas podas, que interferem na sua arquitetura e, conseqüentemente, na interação com os esforços solicitantes (peso próprio e vento).

Tabela 21 - Relação entre o risco de queda e a altura total das árvores de tipuana

Altura total da árvore (m)	Risco de queda (*)	
	Mínimo	Máximo
$4 < x \leq 6$	6	1
$6 < x \leq 8$	44	4
$8 < x \leq 10$	122	22
$10 < x \leq 12$	181	30
$12 < x \leq 14$	259	53
$14 < x \leq 16$	231	42
$16 < x \leq 18$	67	20
$18 < x \leq 20$	21	3
$20 < x \leq 22$	1	2
Subtotal	932	177
Total	1109	

(*) - $\chi^2 = 6,27$, sendo $p > 0,05$

Tabela 22 - Relação entre o risco de queda e a área da copa das árvores de tipuana

Área de copa (m ²)	Risco de queda (*) - nº de árvores	
	Mínimo	Máximo
$0 < x \leq 20$	214	22
$20 < x \leq 40$	479	100
$40 < x \leq 60$	192	45
$60 < x \leq 80$	36	8
$80 < x \leq 100$	8	1
$100 < x \leq 120$	2	1
$x > 120$	1	0
Subtotal	932	177
Total	1109	

(*) - $\chi^2 = 10,67$, sendo $p > 0,05$

Tabela 23 - Relação entre o risco de queda e a altura da primeira bifurcação das árvores de tipuana

Altura primeira bifurcação (m)	Risco de queda (*) - nº. de árvores	
	Mínimo	Máximo
$0 < x \leq 2$	40	5
$2 < x \leq 4$	767	155
$4 < x \leq 6$	114	15
$6 < x \leq 8$	8	2
$8 < x \leq 10$	2	0
$x > 10$	1	0
Subtotal	932	177
Total	1109	

(*) - $\chi^2 = 3,09$, sendo $p > 0,05$

Tabela 24 - Relação entre o risco de queda e o ângulo de inclinação do tronco das árvores de tipuana

Ângulo de inclinação (°)	Risco de queda (*) - nº. de árvores	
	Mínimo	Máximo
$0 < x \leq 10$	492	97
$10 < x \leq 20$	349	57
$20 < x \leq 30$	78	21
$30 < x \leq 40$	11	2
$40 < x \leq 50$	2	0
Subtotal	932	177
Total	1109	

(*) - $\chi^2 = 3,34$, sendo $p > 0,05$

Tabela 25 - Perfil das árvores de tipuana na cidade de São Paulo quanto ao estado de alerta/risco de queda

Perfil das árvores	Estado de alerta	
	Mínimo	Máximo
DAP (m)	$0,58 \pm 0,15$	$0,69 \pm 0,15$
Altura total (m)	$12,64 \pm 2,78$	$13,12 \pm 2,79$
Altura da 1ª bifurcação (m)	$3,25 \pm 0,92$	$3,13 \pm 0,71$
Ângulo de inclinação do tronco (°)	$10,8 \pm 6,7$	$11,0 \pm 7,0$
Diâmetro da copa (m)	$9,63 \pm 2,73$	$10,45 \pm 2,46$
Altura da copa (m)	$4,80 \pm 1,55$	$4,94 \pm 1,41$
Área da copa (m²)	$31,96 \pm 16,08$	$35,00 \pm 15,04$

Risco de queda e a deterioração interna do lenho: o modelo de cálculo estrutural proposto pelo IPT para a análise do risco de queda das árvores de tipuana apresentou uma forte associação ($\varphi = 0,99$) com a % de deterioração interna do lenho causada por organismos xilófagos (Tabela 26). A Figura 29 mostra que as árvores de tipuana categorizadas com estado de alerta máximo e mínimo apresentaram maior e menor % deterioração interna do seu lenho, respectivamente.

As árvores com estado de alerta de risco de queda mínimo, apresentaram uma deterioração interna média de $13,00 \pm 14,07$; 19 % (174 árvores) estavam sadias e 81 % (751 árvores) com deterioração de $19,9 \pm 21,2\%$. Sete árvores mostraram extensa deterioração do lenho, superior a 44 %, sendo 3 com pequena área de copa (poda inadequada) e quatro no limite dos cálculos estruturais de risco de queda, indicando que suas características dendrométricas e estado de sanidade do lenho estavam próximos ao estado de alerta máximo.

Das árvores de tipuana categorizadas com estado de alerta máximo, 162 (92%) mostraram deterioração interna do lenho superior a 2/3 do raio do tronco. Não houve categorização de árvore de tipuana sadia no estado de alerta máximo; 15 árvores de tipuana (8%) apresentaram deterioração do lenho menor do que 2/3 do raio com as

medidas dendrométricas indicando seu grande porte e com área de copa acima da média ($43,88 \pm 26,11 \text{ m}^2$) e algumas árvores esbeltas (pequeno DAP e elevada altura). Portanto, os parâmetros dendrométricos também devem ser considerados na análise de risco de queda das árvores de tipuana, apesar de não ter havido associação entre os atributos, a exceção do DAP das árvores.

A deterioração interna média do lenho apresentada pelas árvores de tipuana com estado de alerta máximo foi de $56,05 \pm 14,05 \%$, sendo, 75 % destas com deterioração do lenho acima de 48,69 %, ou seja, porcentagem equivalente a uma relação t/R de 0,25 (t = espessura mínima da parede sadia residual de um tronco; R = medida total do raio do tronco); esta relação está abaixo da proposta por Mattheck e Breloer (1997) de 0,3 (correspondente a uma deterioração interna de 44 %), para ruptura no tronco por flambagem, considerando uma árvore com copa densa. Mattheck, Bethge e Tesari (2006) também relacionaram maiores % de deterioração interna em árvores (70 %) com ruptura por cisalhamento.

Portanto, os resultados das árvores de tipuana confirmam os dos trabalhos de Wagener (1963), Coder (1989 apud HARRIS; CLARK; MATHENY, 2004), Smiley e Fraedrich (1992) e Mattheck e Breloer (1997) que relacionaram a ruptura de árvores à perda de resistência mecânica dos troncos afetados, com cavidades internas produzidas, principalmente, por fungos apodrecedores.

Tabela 26 - Frequência de ocorrência de deterioração interna em relação ao DAP das árvores de tipuana

Risco de queda	Categoria de deterioração interna ^(*) ^(**) - nº. de tipuanas (%)				
	1	2	3	4	Total
Mínimo	174 (19)	352 (38)	399 (43)	7 (1)	932
Máximo	0 (0)	2 (1)	13 (7)	162 (92)	177

(*) - $\chi^2 = 1107,32$, sendo $p < 0,05$; $\phi = 0,99$). (**) - 1 - árvore sadia; 2 - deterioração menor que 1/3 do raio da árvore (equivalente a 11 %); 3 - 1/3 a 2/3 do raio e (11 a 44 %); 4 - maior que 2/3 do raio (> 44 %).

Figura 29 - Risco de queda e deterioração interna das árvores de tipuana

Modelo estatístico para a análise de risco de queda das árvores: dos resultados da avaliação do estado de sanidade biológica, dendrometria, deterioração interna do lenho e risco de queda e sua associação, destacam-se os seguintes atributos externos e internos relacionados ao estado de alerta de risco de queda das árvores, sendo **i)** presença de fungo apodrecedor na raiz, no colo e/ou no tronco com corpos-de-frutificação ou biodeterioração do lenho; **ii)** presença de cupim-subterrâneo na raiz, no colo e/ou tronco com túneis e/ou vestígios, estrutura de ninho, ataque do lenho ou dispersão no solo; **iii)** diâmetro altura do peito (DAP) e; **iv)** % de deterioração interna do lenho. A análise de regressão linear múltipla para estabelecer a associação destes atributos do diagnóstico das árvores (variáveis independentes) com o estado de alerta (variável dependente), segundo o modelo de cálculo estrutural desenvolvido pelo IPT, é apresentada no Anexo C. O modelo linear (eq. 4) apresentou um coeficiente de determinação R^2 de 0,53 e probabilidade $p < 0,0000$, portanto, significativa ao nível de 5%.

$$Y = 1,073877 - 0,280445 \times \text{DAP} - 0,001465 \times \text{FG} - 0,069562 \times \text{CS} + 0,014252 \times \text{DET} \dots\dots\dots(4)$$

Onde:

Y = Estado de alerta, se:

$0 < Y \leq 1,5$, árvore em **estado de alerta mínimo**;

$Y > 1,5$, árvore em **estado de alerta máximo**.

DAP - diâmetro altura do peito (m);

FG - fungo apodrecedor (raiz, colo e/ou tronco): presente (1) e ausente (0).

CS - cupim-subterrâneo (raiz, colo e/ou tronco): presente (1) e ausente (0).

DET - % de deterioração interna no colo (%); atributo obtido em função da área transversal do tronco, calculada com a medida do DAP.

Neste modelo estatístico, observou-se que a presença externa de fungos apodrecedores e de cupins-subterrâneos pouco contribuiu, com probabilidades de 0,956953 e 0,017130, respectivamente, corroborando a fraca associação observada entre fungo-cupim e o risco de queda das árvores. Entretanto, o DAP ($p=0,002259$) e a % de deterioração interna ($p=0,000000$) foram atributos significantivos.

Apesar do valor do coeficiente de determinação ser relativamente baixo (0,53), o processo de validação do modelo estatístico para as 709 árvores de tipuana (Tabela 27) mostrou alta % de acerto na classificação das árvores com estado de alerta mínimo e máximo, sendo, mais precisa para as árvores no estado de alerta mínimo. Para as árvores de tipuana não categorizadas corretamente (% de erro), encontravam-se no limite do cálculo pelo modelo estatístico (i) $1,405 \pm 0,115$ e (ii) $1,537 \pm 0,027$, para as árvores em estado de alerta máximo e mínimo, respectivamente, além de sua similaridade de dendrometria e de deterioração interna do lenho. O modelo estatístico constitui-se em ferramenta auxiliar para predição do estado de alerta de risco de queda pela ruptura no colo-tronco das árvores de tipuana. A % de acerto pode ser considerada como probabilidade pelo (i) elevado número de árvores inspecionadas (espaço amostral) e (ii) os atributos aplicados podem ser utilizados no diagnóstico de árvores de tipuana de outras regiões urbanas da cidade de São Paulo.

Tabela 27 - Validação do modelo estatístico de risco de queda das árvores de tipuana

Estado de alerta	% de Acerto	% de erro	Nº e % de árvores analisadas
Mínimo	98 %	2 %	596 (84 %)
Máximo	81 %	19 %	113 (16 %)
Total	-	-	709 (100%)

A associação dos atributos de sanidade biológica, características dendrométricas, deterioração interna e o risco de queda das árvores indicou a complexidade do processo de biodeterioração do lenho, enfatizada por Shigo (1979), ressaltando-se os fungos apodrecedores e os cupins-subterrâneos. O estado de sanidade biológica do lenho afetado pelos cupins-subterrâneos (*C. gestroi*) e/ou fungos apodrecedores foi relacionado às características dendrométricas das árvores de tipuana e, conseqüentemente, com a sua ruptura, quando submetida a esforços acima do seu limite de resistência, conforme citado por Brazolin, Amaral e Tomazello-Filho (2006). O risco de queda das árvores relacionou-se, sobretudo, com a intensidade da biodeterioração do lenho, comprometendo as suas propriedades anatômico-físico-mecânicas: a ocorrência dos organismos xilófagos, a intensidade de danos do lenho e o DAP das árvores são importantes atributos no diagnóstico e na análise de risco de queda das árvores de tipuana.

5.4 Biodeterioração do lenho das árvores de tipuana

Os resultados da avaliação (i) macro e microscópica do lenho biodeteriorado das árvores de tipuana que caíram e cortadas pela PMSP e da (iii) suscetibilidade do lenho ao ataque do cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi* são apresentados a seguir.

5.4.1 Exame macroscópico do lenho sadio e deteriorado

Os resultados do exame macroscópico do lenho dos toretes das 13 árvores de tipuana são apresentados na Tabela 28 e Figuras 1 a 13 do Anexo D. O diâmetro médio do colo do tronco das árvores, com > 35 anos, de acordo a PMSP e moradores, foi de $0,74 \pm 0,21$ m

O cerne e o alburno do lenho das árvores de tipuana são indistintos, entretanto, observando-se, regiões de contorno irregular e com acúmulo de substância amarelada em 9 (69 %) amostras do lenho (Figura 30), considerada como extrativo(s) do lenho.

Figura 30 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana (amostra J) com cerne sadio sem extrativo (a) e com acúmulo de extrativo amarelado (b)

Com relação ao grau de biodeterioração do lenho, evidenciou-se sua intensa deterioração interna, com valor médio de $34 \pm 27 \%$, em relação à área transversal do tronco das árvores de tipuana; o lenho juvenil (cerne) foi biodeteriorado por fungos e/ou insetos (cupins e brocas-de-madeira), restando somente o lenho adulto, externo.

Fungo apodrecedor: o apodrecimento do cerne foi observado em 11 (85 %) das árvores de tipuana, confirmando as observações de Rayner (1986 apud RAYNER; BODDY, 1988) de, constituir-se em causa da deterioração e de problemas estruturais das árvores; os fungos apodrecedores provocaram a deterioração da região central interna do tronco (cerne), constituído por células do xilema não funcionais e com teor de umidade adequado para seu desenvolvimento. Esses fungos podem ser considerados seletivos, adaptando-se a regime gasoso característico e tolerando os possíveis extrativos alelopáticos tóxicos. Por outro lado, o apodrecimento do alburno das árvores, estratégia de oportunismo não especializado segundo Rayner e Boddy (1988), relacionou-se às injúrias, sendo detectado em apenas duas árvores D e F (15 %). Desta forma, pode-se inferir que o apodrecimento do cerne das árvores de tipuana originou-se no interior do tronco sem associação com injúrias provocadas na sua região externa.

Cupim-subterrâneo: dez (91%) árvores de tipuana mostraram infestação de cupins no cerne, evidenciada pela presença de oco interno e/ou vestígios de túneis no tronco, descritos por inúmeros autores, como Fontes (1998); Juttner (1997); Coli e Costa-Leonardo (1999). Na análise das amostras do lenho das árvores (C e J) identificou-se a espécie *Coptotermes gestroi* (família Rhinotermitidae).

O ataque dos cupins-subterrâneos observado somente na região do cerne apodrecido do tronco, pode-se inferir a existência de uma associação entre estes insetos e os fungos apodrecedores. Por outro lado, o ataque incipiente e restrito dos cupins no lenho das árvores de tipuana (C e D) evidenciou uma ocorrência secundária e indicativa da deterioração do lenho iniciada pelos fungos apodrecedores, conforme observado por Kalshoven (1963); Hickin (1971). Essas observações corroboram, também, os resultados de Cooper e Grace (1987) de que a infestação dos cupins-subterrâneos ocorre sem a indução de injúrias na superfície do tronco das árvores.

Broca-de-madeira: a incidência de brocas-de-madeira foi observada no lenho e apodrecido de 8 (61%) árvores de tipuana, caracterizada pelas galerias escurecidas e indicativas do besouro-de-ambrosia (família Scolytidae e/ou Platypodidae).

Das árvores de tipuana, apenas a árvore C apresentou sintomas de declínio, com poucas folhas na copa e ausência de exsudação de goma como mecanismo de defesa. Nesta árvore o apodrecimento do lenho inclui a região do alburno e do sistema radicular pelo fungo *Ganoderma* sp.. As demais árvores de tipuana com característica e pronunciada biodeterioração do cerne pelos fungos apodrecedores, cupins e brocas-de-madeira apresentavam-se vivas e sem sinais de declínio evidentes.

Mecanismo de resistência: o exame macroscópico da secção transversal do lenho evidenciou a formação de linhas escuras avermelhadas, denominadas de *linhas de compartimentalização*, delimitando ou separando o lenho biodeteriorado do sadio em todas as amostras analisadas (Figuras 1 a 13 do Anexo D e Figura 31), seja por fungos ou insetos xilófagos (cupins e de brocas-de-madeira).

Em 3 (23%) amostras do lenho das árvores de tipuana foram detectadas regiões mais escuras e avermelhadas, *zonas de reação*, (Figura 31), separando, também, o lenho biodeteriorado do sadio; verificou-se o apodrecimento do lenho por fungos de podridão branca nas amostras do lenho das árvores de tipuana (K, L) e infestação de besouros-de-ambrosia (família Scolitydae e/ou Platipodydae).na região central do lenho da árvore (X).

Essas alterações no lenho de árvores vivas foram descritas por Shigo (1979, 1983, 1984), como uma resposta às injúrias ou infecção por microrganismo ou insetos para compartimentalizar ou reduzir o avanço desses agentes infecciosos, denominando-se *processo de compartimentalização*. Para Hills (1962); Shigo e Hillis (1973); Manion e Zabel (1978); Shigo (1984) a zona de reação constitui-se em processo fisiológico de formação de cerne, resultante das alterações das células parenquimáticas vivas e não afetadas pelos fungos; o termo "cerne patológico" também foi proposto por Dadswell e Hillis (1962), considerando que diferentes extrativos podem ser encontrados no cerne, além dos normalmente formados pelo metabolismo das árvores.

Entretanto, as zonas de reação e linhas de compartimentalização observadas nas árvores de tipuanas (Figura 31) encontravam-se na região do cerne, onde não existem mais células fisiologicamente ativas. Segundo Shigo (1984) os mecanismos de compartimentalização no cerne não estão ainda bem esclarecidos havendo, entretanto, algumas evidências, como: i) atividade enzimática residual (oxidases) no cerne promovendo a formação/transformação de substâncias existentes (SHIGO; HILLIS, 1973; SHIGO, 1984); ii) oxidação de substâncias, principalmente fenóis, pela presença de oxigênio (HILLIS, 1962; KNOKE, 2003; SORZ; HEITZ, 2007) e/ou; iii) a indução por fungo apodrecedor na formação do cerne (zona de reação). As linhas de compartimentalização ao redor das galerias de broca-de-madeira no lenho das tipuanas, podem indicar um processo físico-químico, sem a participação de células vivas.

Figura 31 - Secção transversal o lenho de árvores de tipuana (A, B e C = amostras K; D = amostra X) mostrando as linha de compartimentalização delimitando a área com ataque de fungo de podridão branca (lcf), de cupim-subterrâneo (lcc) e com túnel de broca-de-madeira (lcb) e as zonas de reação (zr)

Tabela 28 – Exame macroscópico das árvores de tipuana da cidade de São Paulo

Parâmetros de descrição das amostras	Árvore de tipuana												
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	X	Y
Diâmetro do torete (m)	0,60	0,60	0,67	0,66	0,89	0,63	0,95	1,25	0,83	0,73	0,82	0,58	0,42
Deterioração interna (%)	27	30	100	65	16	32	33	21	36	28	54	0	0
Árvore viva / exsudação de seiva	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Cerne com acúmulo de extrativos	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Oco interno	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)
Apodrecimento do cerne	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)
Apodrecimento do alburno / injúria	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
Ataque de cupim-subterrâneo	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)
Ataque de broca-de-madeira	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Associação fungo e cupim	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)
Zona de reação (compartimentalização)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)
Linhas escuras (compartimentalização)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)
Figura (Anexo D)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

(+) presença ou (-) da característica analisada

5.4.2 Exame microscópico do lenho sadio e deteriorado

A análise microscópica do lenho das árvores de tipuana evidencia a ocorrência de podridão caracterizada como (i) branca e (ii) mole, segundo a descrição proposta por Nilsson (1988). A biodeterioração do lenho (cerne e alburno) das árvores de tipuana por fungos de podridão branca (Figura 32 A-B) ocorreu em 11 amostras (85 %), corroborando as análises realizadas por Blanchette (2003), indicando ser o tipo mais freqüente no lenho das espécies de folhosas.

No cerne de 5 árvores (A, D, E, G e J) e alburno de 1 árvore (F) (Figura 32, B-C), foi detectada a incidência de podridão mole citada, também, por Mattheck e Kubler (1995); Blanchette (2003) e Rayner e Boddy (1988) em outras espécies florestais. Os agentes causais da podridão mole do lenho são os fungos ascomicetos e não-basidiomicetos e Savory (1954), Duncan (1960), Eaton e Hale (1993), Brazolin, Tomazello-Filho e Schoenlein-Crusius (1998) mostraram que estes fungos ocorrem em madeira exposta a ambiente com alto teor de umidade e, desta forma, baixo teor de oxigênio, condição semelhante a condição descrita por Rayner e Boddy (1988) para o cerne das árvores vivas. Os fungos de podridão mole são importantes na sucessão de microrganismos, favorecendo o estabelecimento posterior dos fungos de podridão branca e parda, entretanto, não são considerados como causa de ruptura em árvores, pelo seu ataque restrito no lenho.

Figura 32 - Caracterização macroscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Podridão (A) branca, no cerne (seta); (B) branca (seta branca) e mole (seta preta), no alburno e no cerne, devido à remoção da casca. Podridão mole (C) no cerne (seta)

Podridão branca: no lenho das árvores de tipuana foram observados diferentes estágios de biodeterioração pelos fungos de podridão branca, caracterizados pela degradação simultânea, ou seja, não seletiva dos componentes da parede celular (lignina, celulose e hemicelulose), a partir da camada S₃, promovendo a formação de canais de erosão (Figura 33, A-D). A uniforme e gradual redução da espessura da parede celular, preservando a lamela média residual, foi observada em estágio avançado de apodrecimento (Figura 33, E-F), conforme descrito por Blanchette (1991); Blanchette, Obst e Timell (1994); Anagnost (1998); Luna et al. (2004); Tomazello-Filho, Brazolin e Chagas (2007). Esse padrão de deterioração do lenho por fungos de podridão branca, comum nas árvores de folhosas, é caracterizado como *podridão simultânea* (LIESE, 1970, NILSSON, 1988).

O ataque das células do lenho das árvores de tipuana por fungos de podridão branca, descrito na Figura 34 (A-E), mostra a degradação significativa da parede celular das fibras, causando a ruptura da estrutura do xilema; parede das células do parênquima axial e radial apresentou-se mais preservada, sendo degradada apenas nos estágios avançados, não sendo observada a erosão da parede dos vasos.

O ataque seletivo dos elementos anatômicos do lenho pelos fungos de podridão branca foi também observado por Anagnost (1998) e Tomazello-Filho, Brazolin e Chagas (2007) para outras espécies de folhosas e pode ser explicado pela quantidade e tipo de lignina presente na parede celular (HIGHLEY, 1983; ERIKSSON; WOOD, 1985, BUTCHER; NILSSON, 1982; NILSSON, 1988; BLANCHETTE, 1991). O lenho das coníferas, considerado mais resistentes ao ataque dos fungos de podridão branca, se caracteriza pela maior quantidade de lignina do tipo guaiacil, enquanto que, no lenho das folhosas, encontram-se os dos grupos metoxilados guaiacil e siringil. Considera-se, portanto, que a maior resistência da parede dos elementos anatômicos vasos e parênquimas está associada a maior quantidade de lignina guaiacil (MORA; ENCINAS, 2006).

Cavidades na camada S_2 (Figura 34, F) da parede celular das fibras, semelhantes às produzidas pelos fungos de podridão mole, foram observadas. Segundo Liese (1970); Anagnost (1998), a diferença das cavidades formadas por fungos de podridão mole e branca caracteriza-se pelo processo de penetração da hifa na parede celular, pelo formato da cavidade e, principalmente, pela expansão da cavidade com a completa remoção da camada S_2 na podridão branca.

Nas árvores de tipuana não foi observada a deslignificação seletiva do lenho, reconhecido como padrão da biodeterioração por fungos de podridão branca, caracterizado, através do exame microscópico, pela separação das células do lenho, devido à degradação da lamela média; este padrão de ataque do lenho está, principalmente, associado à espécie de fungo apodrecedor (NILSSON, 1988; SREBOTNIK; MESSNER, 1994; ANAGNOST, 1998; LUNA et al., 2004).

As hifas septadas e pigmentadas dos fungos de podridão branca utilizam, preferencialmente, como via de acesso ao interior do lenho, as células de vasos ao invés das do parênquima radial, no entanto, todas as células do lenho foram colonizadas nos estágios avançados de biodeterioração (Figura 35, A-C). A passagem das hifas de célula para célula ocorreu passiva (através das pontoações), e ativamente (por degradação enzimática) com a formação de buracos na parede celular (Figura 35, D-F), bastante evidentes nos estágios avançados de apodrecimento. Segundo Anagnost (1998), a formação dos buracos na parede das células é um sintoma comum no lenho de muitas espécies de folhosas e depende, também, da espécie de fungo de podridão branca; nas coníferas, o alargamento das pontoações também pode ser observado.

A consolidação do ataque e compartimentalização dos fungos de podridão branca foi caracterizada pela presença de linhas finas, escuras e irregulares no lenho das árvores de tipuana, resultado do intenso crescimento das hifas no lume das células de vaso, parênquima e de fibras, constituindo uma estrutura pseudoesclerotial com muitas hifas ramificadas, melanizadas e de parede espessa (Figura 36) (RAYNER; BODDY, 1988; TOMAZELLO FILHO; BRAZOLIN; CHAGAS, 2007).

Figura 33 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção longitudinal tangencial do lenho sadio (A) e afetado (B, C, D) por fungos de podridão branca, evidenciando canais de erosão na parede celular das fibras (setas) e buracos (*) para a passagem das hifas; secção transversal do lenho sadio (E) e biodeteriorado (F), com a parede celular das fibras erodidas e com a lamela média residual (seta)

Figura 34 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal (A) e longitudinal (B) do lenho sadio e transversal (C, E) e longitudinal (D) afetado por fungos de podridão branca, com ataque preferencial da parede das fibras (a); vasos (b), parênquima axial (c) e radial (seta) mais preservados; secção longitudinal tangencial (F) evidenciando cavidades da parede celular das fibras (seta)

Figura 35 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção longitudinal tangencial do lenho com podridão branca. (A) colonização preferencial do lenho através dos vasos (a); (B) colonização intensa do parênquima axial (a) e radial (b); (C) colonização intensa dos vasos (a); (D) passagem das hifas do fungo através das pontoações (setas); (E) buracos (setas) na parede celular das células do parênquima axial formados pela hifa dos fungos; (F) buracos na parede celular das células do parênquima axial (setas) em estágio avançado de biodeterioração

Figura 36 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal (A, B, C) e longitudinal tangencial (D) do lenho apodrecido por fungos de podridão branca, com a formação de placa pseudoesclerotial pelo crescimento das hifas septadas, espessas e pigmentadas dos fungos no lume dos vasos (a), fibras (b), parênquima axial (c) e radial (seta)

Podridão mole: no lenho das árvores de tipuana observou-se, em nível microscópico, a ocorrência de podridão mole em sua forma clássica, do tipo 1, caracterizada pela formação de cavidades na camada S₂ da parede secundária das células ao redor da hifa do fungo (Figura 37, A-D)

As cavidades na parede celular são alongadas, de diversos tamanhos e formas, unidas nas extremidades cônicas e em cadeias espirais formando ângulo com o eixo principal das fibras (Figura 37, E-F), observadas na secção longitudinal tangencial e radial.. A dimensão e a forma das cavidades na parede celular são, segundo Liese (1970), influenciadas pela duração da infecção, espécie de fungo e do lenho, tipo de célula e teor de umidade. Bayley; Vestal (apud SAVORY, 1954) demonstraram que as cavidades na parede celular acompanham a orientação helicoidal das microfibrilas de celulose.

Os sintomas característicos de cavidade da parede celular dos fungos de podridão mole são observados, preferencialmente, na parede das fibras; as cavidades não são observadas na parede das células do parênquima radial e dos vasos nos estágios avançados de deterioração; a parede das células do parênquima axial foi afetada em estágios avançados (Figura 38, A-E). Os sintomas de ataque seletivo dos fungos de podridão mole as células do lenho de árvores foram observados por Savory (1954), Nilsson (1982) e Brazolin (1998). Worrall et al. (1997 apud ANAGNOST, 1998) observaram que poucas espécies de fungos possuem a capacidade de degradar a parede das células do parênquima radial no lenho de folhosas; ao contrário do que ocorre no lenho das coníferas, quando os fungos de podridão mole colonizam a parede do parênquima radial. Daniel e Nilsson (1987) demonstraram que no lenho das árvores de *Betula verrucosa*, a natureza da lignina influenciou na resistência da parede dos diferentes elementos anatômicos aos fungos de podridão mole; quanto mais rica a parede em lignina do grupo guaiacil, maior a resistência; mais rica em siringil, menor a resistência. A quantidade total de lignina na parede celular foi também descrita como fator relacionado à resistência do lenho à podridão mole (NILSSON, 1982, BUTCHER; NILSSON, 1982). A colonização do lenho pela hifa dos fungos de podridão mole ocorreu inicialmente pelos vasos e parênquima radial, dispersando-se pelo parênquima axial e fibras, com os raios como via preferencial de acesso (Figura 38, F) (EATON; HALE, 1993, BRAZOLIN, 1998).

Figura 37 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal (A) e longitudinal tangencial (B) do lenho sadio, transversal (C) do lenho com podridão mole tipo 1, com cavidades na parede celular das fibras (setas); secção longitudinal tangencial (D) com cavidades alongadas na parede das fibras secções longitudinais tangenciais (E, F), sob luz polarizada, evidenciando cavidades cilíndricas (setas), alongadas, com as pontas cônicas (formato romboíde), interligadas e em ângulo com o eixo principal das fibras

Figura 38 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal do lenho sadio (A) e afetado por fungos de podridão mole tipo 1 (B, C), com ataque preferencial da parede das fibras (a); secção transversal (D) com vasos (a), parênquima axial (b) e radial (c) preservados; secção longitudinal tangencial (E), com cavidades discretas (setas) nas células do parênquima axial em estágio avançado de apodrecimento; secção transversal (F) mostrando hifas pigmentadas e septadas no raio (seta)

Mecanismo de resistência: no lume e na parede das células de vasos, fibras e do parênquima axial e radial das regiões do lenho com linhas de compartimentalização e zonas de reação detectou-se o acúmulo e a impregnação de substâncias de coloração laranja-avermelhada. Na região do lenho com as linhas de compartimentalização essas substâncias preenchem todo o lume das células (Figura 39). sendo, segundo Münch (1910 apud HILLS, 1962) e Hills (1962) consideradas como extrativos do lenho, oxidados pela presença de oxigênio. Da mesma forma, Sorz e Hietz (2007) atribuíram a formação de regiões de tonalidade avermelhada no cerne das árvores de *Fagus silvatyca* ao aumento da concentração de oxigênio; similar a observada no lenho da árvore de tipuana (árvore X).

A variação da estrutura anatômica do lenho de árvore de tipuana, no sentido medula-casca, evidenciando o processo de compartimentalização (Figura 40), mostra as regiões de (i) lenho sadio sem o acúmulo de extrativos; (ii) zona de reação com extrativo preenchendo o lume das células; (iii) linha de compartimentalização com o lume dos vasos, fibras e parênquima axial e radial preenchido por grande quantidade de extrativos; (iv) biodeterioração das células do lenho - nível incipiente a intenso - por fungo de podridão branca. Sintomas similares de isolamento do lenho afetado por fungos de podridão mole foram observados (Figura 41), com a formação de região intermediária de fibras com parede celular impregnada com extrativos entre o lenho sadio e o biodeteriorado. As análises microscópicas das linhas de compartimentalização e zonas de reação do lenho das árvores de tipuana permitem atribuir a ação fungicida ou fungistática aos extrativos depositados na parede e lume das células isolando a região sadia do lenho da afetada pelos fungos.

A literatura relata que injúrias na região do alburno do lenho das árvores, induzem as células do parênquima a sintetizarem extrativos no entorno do tecido lesionado, similares ao do processo de formação do cerne, criando-se uma zona de reação (SHIGO, 1984; LUCHI, 1998). Essa zona de reação foi descrita no alburno do lenho de árvores de *Acer pseudoplatanus* e de *F. silvatyca* por Pearce (2000), com o preenchimento do lume dos vasos, fibras e parênquima por substâncias insolúveis. A indução da resistência do lenho é caracterizada pelo aumento do teor de umidade, de

íons K, Mg e Ca, da pressão osmótica e de fitoalexinas na região próxima ao lenho afetado, além de elicitores exógenos originários do fungo.

No lenho das árvores de tipuana não foram observadas evidências de processo de defesa estrutural pós-formado ao ataque dos fungos de podridão branca e mole. No entanto, Shigo (1984) descreveu a formação de tecido do lenho, pela atividade cambial, com uma camada de células em resposta a injúria mecânica; Rioux e Baayen (1997) mostraram no lenho de árvores de *Populus balsamifera* a formação de camada de célula intensamente suberizada em reação à colonização do fungo *Ophiostoma ulmi*; Kreling et al. (2004) observaram no lenho de árvores de *Picea abies* uma estrutura anatômica de defesa contra a colonização do fungo apodrecedor *Heterobasidion annosum*, caracterizada pela divisão das células do câmbio e dos raios, acúmulo de inclusões fenólicas nos raios, ativação do parênquima do floema e formação de canais de resina traumáticos. Estes mecanismos ocorrem somente através das células cambiais ativas ou células desdiferenciadas não encontradas, comumente, no cerne ou em injúrias do alburno.

Portanto, no lenho das árvores de tipuana existe um mecanismo de resistência bioquímica, caracterizada pelo acúmulo de extrativos na linha de compartimentalização e zona de reação. No entanto, as análises histológicas não permitiram afirmar se este fator é pré (extrativo já presente no lenho) ou pós-formados (fitoalexinas) ou até ambos. A indução da produção de fitoalexinas por elicitores bióticos e/ou abióticos necessita, da mesma forma, ser esclarecida.

Em síntese, num processo de biodeterioração ficaram evidentes as complexas interações planta-microrganismo e a necessidade de aprofundamento dos mecanismos de ataque dos organismos xilófagos ao xilema secundário e de indução de resistência da árvore.

Figura 39 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal (A) e longitudinal tangencial (B) indicando a linha de compartimentalização (seta) e de impregnação das células do lenho (a); secções transversais (C, D) com preenchimento de extrativos no lume das células de vaso (a), parênquima axial (b), fibras (c) e raios (d), com impregnação da parede celular (setas); secções longitudinais tangenciais (E, F) indicando células dos raios sem (a) e com extrativos (b)

Figura 40 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção transversal do lenho (sentido medula-casca), com a linha de compartimentalização (lc) e zona de reação (zr). (A) lenho sadio e sem deposição de extrativo; (B) zona de reação com deposição de extrativo nos vasos (a) e outras células (b); (C) linha de compartimentalização com deposição de extrativo nas células de vaso (a), parênquima axial (b), raios (c) e fibras (d); (D, E) sintomas característicos de podridão branca nas fibras (a), em 2 estágios, dissociando a estrutura do lenho

Figura 41 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. Secção longitudinal radial do lenho, indicando a linha de compartimentalização. (A) lenho sadio e sem deposição de extrativo; (B, C, D) lenho sadio com deposição de extrativo (a), região intermediária com parede celular impregnada por extrativo e sem ataque de fungos (b) e afetada por fungos de podridão mole (c), com cavidade na parede celular das fibras

Cerne com acúmulo de substâncias: a deposição de extrativos (Figura 42) foi evidenciada no lume e na parede celular das células de vaso, parênquima axial e raios (principalmente) no lenho das árvores de tipuana.

Figura 42 - Caracterização microscópica da biodeterioração do lenho de árvores de tipuana. (A) Secção transversal com deposição de extrativos nas células de raio (a) e parênquima longitudinal (b); (B) longitudinal tangencial com deposição de extrativos nos vasos (a); impregnação da parede celular (setas)

5.4.3 Suscetibilidade do lenho das árvores de tipuana ao cupim *Coptotermes gestroi*

A perda média de massa (%) do cerne das árvores de tipuana sadio e apodrecido por *Ganoderma* sp., da madeira de *Pinus* sp. e do cerne de *Eucalyptus grandis*, submetidos ao ataque do cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi* é apresentada na Tabela 29 e Figura 43 e 44. A madeira de pinus e de eucalipto foi utilizada como testemunha e indicou a efetividade do ensaio.

O cerne de tipuana alterado por *Ganoderma* sp. (APO) foi mais afetado pelos cupins, com maiores valores de perda de massa, em relação ao normal (NS) e com extrativo de coloração amarelada (EXS); o cerne sadio/com extrativo mostrou-se mais resistente aos cupins, com menor valor de perda de massa, em relação ao cerne sadio/sem extrativo; o cerne sadio/sem extrativo foi intermediário para a perda de massa.

Os resultados indicam que a suscetibilidade do cerne das árvores de tipuana aos cupins de *C. gestroi*, com os extrativos conferindo uma maior durabilidade natural do lenho. No entanto, a significativa preferência dos cupins *C. gestroi* pelo lenho apodrecido evidencia uma interação entre cupins-lenho de tipuana afetado por fungos de podridão branca.

A adaptação dos hábitos alimentares dos cupins com a digestão da madeira parcialmente decomposta por fungos foi discutida por Sands (1969) e Grassé (1982), indicando a existência de uma relação entre os organismos, considerando a (i) difícil digestão da celulose e da lignina em relação ao amido, açúcares, proteínas, etc., e (ii) a capacidade de espécies de fungos detoxificarem substâncias repelentes e/ou tóxicas aos cupins. Os autores estabeleceram, em estudos laboratoriais, que espécies de cupins preferem o lenho pré-decomposto e quimicamente modificado, pela remoção dos extrativos pelos fungos xilófagos.

Os túneis construídos por cupins *Reticulitermes* spp. no lenho apodrecido de árvores indicam o direcionamento à região do tronco afetada por fungos xilófagos, segundo Esenther (1961 apud SANDS, 1969), sugerindo a existência de gradiente de material atrativo dos cupins. Inúmeros estudos indicam que fungos apodrecedores do lenho produzem substâncias voláteis atrativas, que foram isoladas, identificadas e testadas com diversas espécies de cupins; combinação destas substâncias com outras de natureza tóxica tem despertado interesse no desenvolvimento de medidas de controle (SANDS, 1969; GRASSÉ, 1982). A preferência dos cupins *C. gestroi* pelo lenho apodrecido por *Ganoderma* sp. observada na análise do lenho e no diagnóstico externo das árvores de tipuana na cidade de São Paulo, indica que esses insetos são organismos xilófagos secundários.

O resultado das análises macro e microscópicas do lenho e a sua interação com os organismos xilófagos confirma a complexidade do processo de biodeterioração do lenho de tipuana, suscetível ao ataque de fungos apodrecedores e cupins-subterrâneos. Entretanto, foram observados mecanismos de resistência ao ataque desses organismos xilófagos.

Tabela 29 - Perda de massa do lenho de árvores de tipuana, pinus e de eucalipto causada pelo cupim-
Coptotermes gestroi

Madeira	Tratamento	Perda de massa do lenho(%)
<i>Tipuana tipu</i>	EXS	2,7 ± 1,5
	NS	33,9 ± 18,8
	APO	66,4 ± 16,9
Pinus sp.	P	100,0 ± 0,00
<i>Eucalyptus grandis</i>	EG	58,8 ± 40,3

EXS - cerne com extrativo e sadio; NS - cerne normal e sadio; APO - cerne com podridão branca

Figura 43 - Suscetibilidade do lenho sadio e com podridão branca de árvore de tipuana ao cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi*. EXS - cerne com extrativo/sadio. APO - cerne com podridão branca. NS - cerne normal/sadio

Figura 44 - Ensaio de suscetibilidade de árvore de tipuana ao cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi*.
(A) EXS - cerne com extrativo/sadio; (B) NS - cerne normal/sadio; (C) APO - cerne com podridão branca (escala = 1 cm)

5.5 Propriedades físicas e mecânicas do lenho sadio e deteriorado

Os valores de densidade de massa aparente do lenho sadio e deteriorado das árvores de tipuana por densitometria de raios X e imersão em mercúrio e os dos ensaios de flexão estática são apresentados.

5.5.1 Densidade de massa aparente por densitometria de raios X

Perfil radial da variação de densidade de massa aparente: os perfis radiais de densidade aparente do lenho das árvores de tipuana, obtidos por densitometria de raios X, associados às alterações da estrutura macro e microscópica do lenho, permitem classificá-lo em 7 padrões de biodeterioração, a saber:

A. **normal e sadio (NS);** lenho claro com coloração branco-amarelado, camadas de crescimento evidentes e sem sintoma de ataque de fungos (Figura 45 a 49).

B. **com acúmulo de extrativos e sadio (EXS);** lenho claro com evidente coloração amarelada, formato e tamanho irregulares, camadas de crescimento perceptíveis, sem sintoma de ataque de fungos e com densidade de massa aparente, normalmente superior ao lenho normal sadio (Figura 45 e 49).

C. **com zona de reação e sadio (ZR)**; lenho escuro com coloração avermelhada, formato e tamanho irregulares, camadas de crescimento ainda perceptíveis, delimitando o lenho normal e sadio do biodeteriorado (mecanismo de resistência) e com densidade de massa aparente, normalmente superior ao lenho normal e sadio (Figura 46).

As linhas de compartimentalização (LC) no lenho das árvores de tipuana, características do mecanismo de resistência aos organismos xilófagos, com densidade de massa aparente nitidamente superior são, também, indicadas na secção transversal das amostras do lenho (Figura 48 e 49).

D. **com podridão branca incipiente (PB_{INC})**; lenho com descoloração esbranquiçada, formato e tamanho irregulares, camadas de crescimento ainda perceptíveis, brando decaimento da densidade de massa aparente do lenho em relação ao normal/sadio, sem mostrar evidências macroscópicas de redução das propriedades mecânicas e linhas escuras e finas de consolidação e compartimentalização do fungo, devido à formação de placa pseudoesclerotial (Figura 47).

E. **com podridão branca intensa (PB_{INT})**; lenho com descoloração esbranquiçada, formato e tamanho irregulares, camadas de crescimento do lenho não perceptíveis, aspecto esponjoso devido ao desfibrilamento do lenho, perda de resistência mecânica e drástico decaimento da densidade de massa aparente do lenho (Figura 48).

F. **com podridão mole incipiente (PM_{INC})**; lenho com descoloração escura e parda, formato e tamanho irregulares, brando decaimento da densidade de massa aparente do lenho em relação ao normal/sadio e sem evidências macroscópicas de redução das propriedades mecânicas (Figura 49).

G. **com podridão mole intensa (PM_{INT})**; lenho com descoloração escura e parda, formato e tamanho irregulares, camadas de crescimento do lenho não perceptíveis, friável, com característica perda de resistência mecânica e drástico decaimento da densidade aparente do lenho (Figura 49).

Figura 45 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana e respectivo perfil radial de densidade aparente do lenho, indicando as regiões de lenho normal/sadio (NS) e de extrativo/sadio (EXS) (AMOSTRA Y1)

Figura 46 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana e respectivo perfil radial de densidade aparente do lenho, indicando as regiões de lenho normal/sadio (NS) e de zona de reação (ZR) (AMOSTRA K1)

Figura 47 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana e respectivo perfil radial de densidade aparente do lenho, indicando as regiões de lenho normal/sadio (NS) e com podridão branca incipiente (PB_{INC}). Setas indicam a linha de compartimentalização do fungo com a formação de placa pseudoesclerotial. (AMOSTRA L3)

Figura 48 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana e respectivo perfil radial de densidade aparente do lenho, indicando as regiões de lenho normal/sadio (NS) e com podridão branca intensa (PB_{INT}) e setas indicando a linha de compartimentalização (AMOSTRA D3)

Figura 49 - Secção transversal do lenho de árvore de tipuana e respectivo perfil radial de densidade aparente do lenho, indicando as regiões de lenho normal/sadio (NS) com extrativo e sadio (EXS); podridão mole incipiente (PM_{INC}); podridão mole intensa (PM_{INT}) e; setas indicando a linha de compartimentalização (LC) (AMOSTRA E2)

Os valores de densidade de massa aparente média do lenho sadio e deteriorado das árvores de tipuana obtidos por densitometria de raios X e por imersão em mercúrio são apresentados na Tabela 30 e a Figura 50 e no Anexo E (Tabelas 1, 2). O valor referencial de densidade de massa aparente do lenho (15% de umidade) é de $0,63 \text{ g/cm}^3$ (MAINIERI; CHIMELO, 1989) corroborando os valores do lenho sadio pelo método do mercúrio (EXS, ZR e NS).

Os padrões de biodeterioração do lenho das árvores de tipuana mostraram diferenças significativas para os métodos de densitometria de raios X e de mercúrio, a saber: (i) os lenhos sadios (NS, EXS, ZR) diferiram do lenho com podridão branca ou mole no estágio incipiente e intenso; (ii) o lenho extrativo/sadio (EXS) de maior valor médio, diferiu do lenho normal/sadio (NS) e do lenho com zona de reação (ZR), este último pode ser considerado um padrão intermediário; (iii) o decaimento da densidade aparente do lenho causados pelos fungos de podridão branca e mole foi notado, diferindo entre si os lenhos com ataque incipiente (PB_{INC} e PM_{INC}) e intenso (PB_{INT} e PM_{INT}); (iv) para cada estágio de apodrecimento do lenho o ataque de fungos de podridão mole e branca não diferiu significativamente pela técnica de densitometria de raios X e pela técnica de imersão por mercúrio foi significativa para a podridão branca.

O valor médio da densidade aparente do lenho obtido pelos 2 métodos diferiu de $32,4 \pm 6,6 \%$, sendo maior para o de densitometria de raios X. Essa diferença, também constatada por Bucur et al. (2997), é devida às características de cada método (vide item 4.5.4, Material e Métodos) referentes principalmente a:

(i) dimensão longitudinal das amostras do lenho/intensidade de leitura: as amostras do lenho, no método de densitometria de raios X, apresentam homogeneidade longitudinal da sua estrutura anatômica (por sua espessura de 2 mm), com os valores de densidade expressando pontualmente o estado sadio ao biodeteriorado ao nível das células do lenho; as amostras do lenho, no método de mercúrio apresentam heterogeneidade longitudinal da estrutura anatômica (por sua altura de 75 mm), com os resultados de 1 leitura expressando o valor médio da variação das células/tecidos e dos diferentes níveis de biodeterioração biológica.

(ii) dimensão radial das amostras do lenho: as amostras do lenho, no método de densitometria de raios X, são completas e dispostas radialmente (sentido medula-casca) e os valores de densidade expressando as variações contínuas de densidade do lenho nos diferentes estágios de biodeterioração; as amostras do lenho, no método de mercúrio, são cortadas em larguras constantes no sentido medula-casca, podendo conter regiões do lenho com diferentes níveis de biodeterioração, expressos pelo valor médio da densidade.

(iii) comparação da densidade aparente do lenho: foram utilizados os valores médios da densidade aparente do lenho, para cada padrão de biodeterioração; há necessidade, no entanto, comparar os valores de densidade aparente de regiões idênticas do lenho aplicando os 2 métodos de análise.

Apesar das diferenças, as variações de densidade em diferentes estágios de deterioração e lenhos podem ser expressas por um modelo linear (Figura 51) com coeficiente de determinação (R^2) de 0,74 e correlação positiva (eq. 4). Portanto, os valores reais de densidade aparente do lenho podem ser obtidos por meio de densitometria de raios X e estimada a maioria das propriedades físicas e mecânicas (HUMPHREYS; CHIMELO, 1992; BODIG; JAYNE, 1992; DIAS; LAHR, 2004)

$$y = 0,5168x + 0,1653 \dots \dots \dots (5)$$

Onde:

y = densidade de massa aparente do lenho de árvore de tipuana obtida pelo método de imersão em mercúrio;

x = densidade de massa aparente do lenho de árvore de tipuana obtida pelo método de densitometria de raios X.

Neste trabalho, ficou evidente que a técnica não destrutiva de densitometria de raios X pode ser uma importante ferramenta no estudo das árvores, principalmente as espécies utilizadas na arborização urbana de pouco valor econômico, que carecem de informações tecnológicas sobre o lenho sadio e biodeteriorado.

Os resultados do trabalho indicam que técnica não destrutiva de densitometria de raios X constitui-se em importante ferramenta para a avaliação e discriminação do estado de sanidade do lenho das árvores de espécies utilizadas na arborização urbana. Neste sentido, Macchioni, Palanti e Rozenberg (2007) também sugeriram esta técnica para avaliação expedita da durabilidade natural de árvores .

Tabela 30 - Densidade de massa aparente média do lenho das árvores de tipuana, nos diferentes níveis de biodeterioração, através do método de densitometria de raios X e de mercúrio

PADRÃO DE BIODETERIORAÇÃO DO LENHO	DENSIDADE DE MASSA APARENTE DO LENHO (g/cm³)	
	Densitometria de raios X (*)	Imersão em mercúrio (**)
EXS	0,945 ± 0,161 a	0,675 ± 0,049 a
ZR	0,920 ± 0,150 ab	0,651 ± 0,062 a
NS	0,818 ± 0,085 b	0,601 ± 0,091 b
PB_{INC}	0,659 ± 0,079 c	0,510 ± 0,049 c
PM_{INC}	0,668 ± 0,040 c	(***)
PB_{INT}	0,413 ± 0,089 d	0,407 ± 0,089 d
PM_{INT}	0,442 ± 0,126 d	0,300 ± 0,062 e

(*) - Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 58,26$; $p < 0,05$; letras diferentes são estatisticamente significantes. (**) - Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 106,12$; $p < 0,05$; letras diferentes são estatisticamente significantes. (***) - Corpos-de-prova não obtidos, devido à irregularidade da forma e tamanho do apodrecimento por fungos de podridão mole no lenho. EXS - lenho com acúmulo de extrativos/sadio; ZR - zona de reação; NS - lenho normal/sadio; PB_{INC} - podridão branca incipiente; PB_{INT} - podridão branca intensa; PM_{INC} - podridão mole incipiente; PM_{INT} - podridão mole intensa.

Figura 50 - Densidade de massa aparente média do lenho das árvores de tipuana, nos diferentes níveis de biodeterioração, através do método de densitometria de raios X e de mercúrio

Figura 51 - Variação da densidade de massa aparente obtidas por densitometria de raios X nas diferentes densidades aparente por imersão em mercúrio

5.5.2 Resistência à flexão estática

Os valores da tensão de ruptura e o módulo de elasticidade à flexão estática no sentido radial do lenho dos 6 padrões de biodeterioração, através da densitometria de raios X, são apresentados na Tabela 31 e 3 (Anexo E) e Figura 52.

A tensão de ruptura e o módulo de elasticidade à flexão do lenho reduziram-se significativamente com o aumento do grau de biodeterioração do lenho por fungos de podridão branca ou mole. Os extrativos presentes no lume e na parede das células do lenho (lenho ZR e EXS) das árvores de tipuana induziram um aumento do valor da tensão de ruptura e do módulo de elasticidade, em comparação ao lenho contituído por células normais/sadias (lenho NS), indicando um efeito de aumento das propriedades mecânicas e de rigidez. A impregnação e a deposição dos extrativos na parede celular das células do lenho, evidenciadas pelas análises macro e microscópicas, refletiram, pelos resultados das avaliações densitométricas (ver item 5.5.1) em aumento da densidade do lenho e, desta forma, induzindo aumento na resistência mecânica. Dadswell e Hillis (1962) citaram que os extrativos podem conferir maior resistência mecânica e/ou estabilidade dimensional do lenho de espécies florestais e Tomazello-Filho, Brazolin e Chagas (2008), verificaram aumento nos valores de densidade aparente do lenho.

A tensão de ruptura e o módulo de elasticidade dos lenhos sadios de tipuana, com e sem extrativos (Tabela 31), mostraram-se inferiores aos da literatura (MAINIERI; CHIMELO, 1989), com indicação de 83,5 MPa para tensão de ruptura e 8506 MPa para o MOE, sendo no presente estudo aplicado um refinamento metodológico para a avaliação destas características do lenho de árvores de tipuana.

A biodeterioração induzida pelos fungos de podridão branca e mole no lenho das árvores de tipuana resultou em diferenças significativas na resistência a flexão, sendo mais evidente para os fungos de podridão branca, em função das alterações na estrutura anatômica microscópica (vide item 5.4.2, Figuras 33 a 38).

A variação dos valores de tensão de ruptura e do módulo de elasticidade do lenho das árvores de tipuana, em relação a sua densidade de massa aparente determinada por imersão em mercúrio em diferentes estágios de biodeterioração

(Equações 5 e 6), ajustaram-se aos modelos de potência, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,86 e 0,77, respectivamente, com correlações positivas (Figura 53). Esses modelos, na prática, permitem estimar as propriedades mecânicas do lenho das árvores de tipuana com os valores de densidade de massa aparente do lenho sadio ou apodrecido. Da mesma forma, permite inferir com maior precisão a resistência do lenho das árvores aos esforços exercidos pelo vento e pelo peso próprio por cálculos estruturais em modelos estático ou dinâmico.

$$y = 297,6x^{3,4073} \dots\dots\dots(6)$$

Onde: x = densidade aparente (g/cm³); y = Tensão de ruptura (MPa).

$$y = 18586x^{2,9634} \dots\dots\dots(7)$$

Onde: x = densidade aparente (g/cm³); y = mód. de elasticidade (MPa)

Tabela 31 - Tensão de ruptura e módulo de elasticidade do lenho de árvores de tipuana de diferentes padrões de biodeterioração

Padrão de biodeterioração do lenho	nº. de amostras	Tensão de ruptura (*) (MPa)	Módulo de elasticidade (**) (MPa)
ZR	19	83,84 ± 11,77 a	6461,16 ± 781,27 a
EXS	35	79,57 ± 15,32 a	5825,55 ± 1469,65 b
NS	35	62,00 ± 14,00 b	4641,67 ± 1014,43 c
PB_{INC}	16	28,03 ± 6,39 c	2245,19 ± 522,09 d
PM_{INT}	10	12,99 ± 7,20 d	1054,12 ± 473,90 e
PB_{INT}	34	4,66 ± 3,45 e	571,55 ± 404,40 f

(*) - Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 108,64$; $p < 0,05$; letras diferentes são estatisticamente significantes. (**) - Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 106,48$; $p < 0,05$; letras diferentes são estatisticamente significantes. EXS - lenho com acúmulo de extrativos/sadio; ZR - zona de reação; NS - lenho normal/sadio; PB_{INC} - podridão branca incipiente; PB_{INT} - podridão branca intensa; PM_{INC} - podridão mole incipiente; PM_{INT} - podridão mole intensa.

Figura 52 - Tensão de ruptura (A) e módulo de elasticidade (B) do lenho de árvores de tipuana de diferentes padrões de biodeterioração. EXS - lenho com acúmulo de extrativos/sadio; ZR - zona de reação; NS - lenho normal/sadio; PB_{INC} - podridão branca incipiente; PB_{INT} - podridão branca intensa; PM_{INC} - podridão mole incipiente; PM_{INT} - podridão mole intensa

Figura 53 - Variação da tensão de ruptura (A) e do módulo de elasticidade (B) do lenho de árvores de tipuana em relação aos valores de densidades de massa aparente de diferentes padrões de biodeterioração

A redução dos valores de tensão de ruptura e do módulo de elasticidade do lenho das árvores de tipuana afetado pelos fungos xilófagos em comparação com o normal/sadio (NS) foi significativa (Tabela 32), corroborada na literatura para inúmeras espécies de árvores e fungos xilófagos (TANAKA, 1991; ZABEL; MORRELL, 1992; BODIG; JAYNE, 1992; EATON; HALE, 1993; HIGHLEY, 1999; TOMAZELLO-FILHO, BRAZOLIN; CHAGAS, 2008). Observa-se que, no estágio incipiente de biodeterioração do lenho das árvores de tipuana, com discreta alteração macroscópica na sua coloração, ocorre uma significativa perda de resistência de 50 % e que atinge valores de 77-93% em estágio avançado do apodrecimento do lenho. A redução significativa da resistência mecânica do lenho de ash (*Fraxinus excelsior*) nos estágios iniciais de biodeterioração por *Inonotus hispidus* foi, da mesma forma, detectada por Young (1984). No lenho de árvores de folhosas em estágio incipiente de apodrecimento por fungos de podridão branca, Wilcox (1978 apud EATON; HALE, 1993) obteve para o MOE uma redução significativa de 4-20%. Portanto, a existência de regiões do lenho do tronco das árvores urbanas, com sintomas de biodeterioração incipiente, deve ser considerada no diagnóstico do risco de queda, pela redução significativa da resistência mecânica. Destaca-se que o lenho das árvores de folhosas é mais comumente afetado por fungos de podridão branca, em relação a mole, considerada importante no processo de sucessão de organismos deterioradores do lenho do que no risco de ruptura do tronco das árvores (SHIGO, 1979; MATTHECK; KUBLER, 1995).

As árvores de tipuana da área urbana da cidade de São Paulo apresentaram, nos estágios incipientes e intensos da biodeterioração por fungos de podridão branca, alterações na estrutura anatômica e nas moléculas de celulose e de lignina, caracterizadas pela formação de canais de erosão na parede das células e, desta forma, acarretando sensível perda de rigidez e resistência à flexão do lenho. As moléculas de celulose são os constituintes da parede celular responsáveis pela sua resistência à tração e a lignina a resistência a compressão e ao cisalhamento do lenho das árvores, segundo Oliveira et al. (1986) e Mattheck e Kubler (1995). O lenho de reação atua na prevenção de fraturas a esforços de flexão do tronco das árvores, sendo que nas coníferas (lenho de compressão) as traqueídes apresentam parede intensamente lignificada para resistir às tensões de compressão e nas folhosas (lenho

de tração) as fibras apresentam uma camada adicional de celulose (camada G) para suportar as tensões de tração. Os fungos de podridão branca podem decompor seletivamente a matriz de lignina da parede celular do lenho das árvores não havendo perda drástica da sua resistência à tração (MATTHECK; KUBLER, 1995).

Tabela 32 - Redução da tensão de ruptura e do módulo de elasticidade do lenho das árvores de tipuana afetado por fungos de podridão branca e mole

Padrão de biodeterioração do lenho	Redução em relação ao lenho normal/sadio (%)	
	Tensão de ruptura	Módulo de elasticidade
	(MPa)	(MPa)
PB _{INC}	55	52
PM _{INC} (*)	51	45
PB _{INT}	93	88
PM _{INT}	79	77

(*) - redução da propriedade mecânica do lenho, considerando 30,11 e 2534,31 MPa para tensão de ruptura e módulo de elasticidade, estimado com os modelos das equações 6 e 7, com 0,668 g/cm³ de densidade do lenho determinado por densitometria de raios X. PB_{INC} - podridão branca incipiente; PB_{INT} - podridão branca intensa; PM_{INC} - podridão mole incipiente; PM_{INT} - podridão mole intensa.

Os organismos xilófagos causadores de podridão mole formam cavidades na camada S2 da parede secundária das células do lenho, induzindo a depleção lenta e parcial das microfibrilas de celulose e tornando o lenho mais friável, com a presença da lignina residual na parede celular e na lamela média. Segundo Zabel e Morrell (1992) estas cavidades formam zonas de falha e consequente perda de resistência da parede celular, quando detectadas macroscopicamente não se observa resistência mecânica residual do lenho das árvores.

No lenho biodeteriorado das árvores de tipuana observou-se na estrutura anatômica microscópica a preservação das células dos raios, mesmo nos estágios avançados de apodrecimento, pelo conteúdo e tipo de lignina constituinte da sua parede, sendo importantes na resistência do tronco à flexão no sentido radial (MATTHECK; BRELOER; 1997; BURGERT; ECKSTEIN, 2001). As células de fibras conferem sustentação e resistência do tronco das árvores de tipuana, sendo as suas paredes celulares totalmente consumidas pelo ataque dos fungos apodrecedores, com redução dos valores de resistência das tensões de ruptura e módulo de elasticidade.

As análises microscópicas do lenho normal e biodeteriorado das árvores de tipuana possibilitam interpretar o modelo de falha dos corpos-de-prova nos ensaios de flexão (Tabela 3; Anexo E), indicando relação do tipo de podridão-modelo de falha do corpo de prova. Nos 10 corpos de prova de lenho afetado por podridão mole todos romperam por tração abrupta (Figura 54, A); nos 33 corpos de prova de lenho afetado por podridão branca, 66 % romperam por tração simples (Figura 54, B). O lenho de tipuana afetado por podridão mole tornou-se mais friável pela depleção da celulose, formando cavidades na camada S_2 da parede celular secundária, permanecendo a lignina residual. No lenho afetado por podridão branca a formação dos canais de erosão (podridão simultânea) na parede das fibras induziu maior suscetibilidade a ruptura por tração simples (Figuras 32 e 36). Bodig e Jayne (1993); Mattheck et al. (1995) associaram, também, os modelos de falha às alterações na estrutura molecular das células do lenho.

Os resultados indicam a importância da determinação do tipo de apodrecimento do lenho na avaliação do risco de queda das árvores de tipuana e de outras espécies em área urbana; o lenho atacado por fungos de podridão mole e parda (não detectada no presente estudo) que degradam preferencialmente a celulose da parede celular pode romper mais fácil e bruscamente, em relação aos fungos de podridão branca (MATTHECK; KUBLER, 1995).

Figura 54 - Corpos de prova do lenho de árvores de tipuana evidenciando o modelo de falha sob flexão radial, com tração abrupta (A) e simples (B) - escala = 10 mm

Em síntese, as alterações causadas pelos fungos apodrecedores provocam significativas alterações nas propriedades anatômico-físico-mecânicas do lenho das árvores tipuana; o tipo e o estágio da podridão pode levar à ruptura do tronco das árvores pelos esforços em valores acima da resistência mecânica.

5.6 Análise de distribuição de tensões no lenho sadio e deteriorado

Os parâmetros biológicos e de cálculo aplicados na análise da distribuição das tensões de árvore tipuana hipotética pelo método de elementos finitos (Anexo F) foram definidos pelos resultados da (i) caracterização das árvores de tipuana no ambiente urbano, (ii) análise macro e microscópica e (iii) ensaios físico-mecânicos do lenho sadio e deteriorado. Os parâmetros utilizados nas simulações das árvores de tipuana, realizadas pelo método de elementos finitos, são apresentados na Tabela 33 e Figura 55. As tensões normais e de cisalhamento máximas são apresentadas na Tabela 34 e a distribuição dessas tensões quando a árvore foi submetida à flexão com esforço aplicado no sentido radial ilustradas nas Figura 56 e 57.

Tabela 33 - Simulações dos estágios de biodeterioração do lenho das árvores de tipuana pelo método de elementos finitos

Simulação (nº.)	Nível de sanidade biológica do lenho (*)	Estratégia de apodrecimento (**)	Deterioração interna (%)	Representação (Figura 55)
1	NS	-	0	A1
2	PB _{INT}	-	100	A2
3	PB _{INC}	A	16	A3
4	PB _{INT}	A	16	A3
5	PB _{INC}	A	66	A4
6	PB _{INT}	A	66	A4
7	NS	-	0	B1
8	PB _{INT}	-	100	B2
9	PB _{INC}	B	16	B3
10	PB _{INT}	B	16	B3
11	PB _{INC}	B	66	B4
12	PB _{INT}	B	66	B4

(*) NS: lenho normal e sadio. PB_{INC}: podridão branca incipiente. PB_{INT}: podridão branca intensa.

(**) Árvore com (A) apodrecimento do cerne e (B) apodrecimento do cerne e um oco com 105 ° de abertura externa e 2 m de altura da base do tronco.

Figura 55 - Intensidade de deterioração simulada do lenho de árvores de tipuana. (A) apodrecimento do cerne; (B) apodrecimento do cerne e oco aberto; (1) lenho normal/ sadio (NS); (2): lenho com 100 % de podridão branca intensa (PB_{INT}); (3) lenho com 16 % de podridão branca incipiente ou intensa (PB_{INC} ou PB_{INT}); (4) lenho com 66 % de podridão branca incipiente ou intensa

Apodrecimento do cerne no tronco de árvore de tipuana (simulações nº. 1 a 6): na análise da distribuição das tensões paralelas às fibras, observa-se que as tensões normais são mínimas no centro do tronco (linha neutra) e máximas na superfície do tronco da árvore de tipuana (Figura 56, A1-F1). Esta distribuição de tensões na superfície da árvore é um axioma muito importante para a biomecânica, e conhecido como *axioma da tensão uniforme* (MATTHECK; KUBLER, 1995). No lado tracionado do tronco da árvore, observou-se o maior valor de tensão (4,9 MPa) em comparação com o lado comprimido (4,2 MPa). Portanto, no diagnóstico de risco de queda da árvore, o lado tracionado do seu tronco é o mais crítico, havendo necessidade de analisar a integridade do lenho e a presença, pela fragilidade de ocorrência de fratura por tração.

Na direção radial, surgem as tensões de cisalhamento (radial-longitudinal) na linha neutra, onde as tensões normais são mínimas (Figura 56, A2-F2). Portanto, estas tensões são máximas na região da medula e na madeira juvenil do tronco da árvore sadia ou totalmente apodrecida (Figura 56, A2 e B2).

A distribuição de tensões é idêntica para o lenho totalmente sadio ou totalmente apodrecido (Figura 56, A1-A2, B1-B2), considerando que a densidade de massa aparente e o módulo de elasticidade diferente não interferem nos valores e distribuição das tensões geradas. Entretanto, a tensão de ruptura de 4,7 MPa do lenho intensamente apodrecido por podridão branca, obtida nos ensaios mecânicos, é inferior à tensão máxima de 4,9 MPa, no lado tracionado observada na simulação, indicando que esta romperia o lenho do tronco. O apodrecimento total do lenho não é comum nas árvores, mas foi observado na árvore C, que rompeu no tronco, devido à ação do fungo *Ganoderma* sp..

Com relação à deterioração do lenho das árvores de tipuana por fungos de podridão branca observou-se que:

- para o apodrecimento incipiente ou intenso de 16 % da área do cerne, as tensões normais não se alteraram na superfície do tronco da árvore, sendo iguais à condição da árvore de lenho sadio (4,9 MPa). Entretanto, a tensão de cisalhamento aumentou e os pontos mais críticos foram deslocados em direção à superfície do tronco, provavelmente, já na região do lenho adulto (Figura 56, C2-D2). Na prática, o

tronco de uma árvore não romperá por tensão normal com a biodeterioração do seu cerne nessa magnitude.

- para o apodrecimento de 66 % de área do cerne, a tensão normal aumentou para o lenho com apodrecimento incipiente (5,9 MPa) e intenso (7,7 MPa) com o lado tracionado do tronco da árvore sempre mais solicitado (Figura 56, C1-F1). Observou-se, também, um aumento da tensão de cisalhamento e o deslocamento do ponto de maior solicitação para a superfície da árvore (Figura 56, C2-F2). Isto indica que nas árvores com intensa biodeterioração do lenho do tronco ocorre um acúmulo de tensões na sua superfície aumentando o risco de ruptura, corroborando os resultados de Mattheck, Bethge e Tesari (2006) que condicionaram a ruptura por flexão do tronco de uma árvore com grande oco interno (70 %) ao surgimento de fenda por cisalhamento.

As tensões normais e de cisalhamento e sua distribuição no lenho variaram a medida do avanço de sua biodeterioração; ou seja, no lenho das árvores com intenso ataque de podridão branca (PB_{INT}) os valores de tensão são maiores do que no lenho com ataque incipiente (PB_{INC}). Observou-se, também, que na condição de apodrecimento do lenho mais drástica (simulação nº. 6) a tensão normal e de cisalhamento aumentaram 57 e 189 % respectivamente, em comparação com as tensões do lenho normal e sadio. Portanto, pode-se inferir que, à medida que a deterioração do lenho evoluiu, a tensão de cisalhamento apresentou maior aumento, podendo se tornar dominante e determinante no processo de ruptura do tronco da árvore.

No lenho da árvore afetado pela podridão branca incipiente (PB_{INC}) a tensão normal foi maior com o aumento da área deteriorada, entretanto, a tensão de cisalhamento se manteve igual, ou seja, este estágio de deterioração, independentemente da área deteriorada, não tornou o lenho suscetível ao cisalhamento. No lenho da árvore afetado pela podridão branca intensa (PB_{INT}), as tensões normais e de cisalhamento variaram com o aumento da área deteriorada do tronco.

Apodrecimento do cerne e com oco aberto no tronco de árvore de tipuana (simulações nº. 7 a 12): na simulação de oco aberto do tronco das árvores observou-se um deslocamento e assimetria da distribuição das tensões de cisalhamento, indicando uma torção imposta pelo carregamento da árvore (Figura 57, A2-F2). Observou-se, também, um significativo aumento das tensões normais e de cisalhamento em comparação com a árvore sem a presença de oco aberto (simulações nº. 1 a 6). Isso indica que a distribuição e os valores das tensões no tronco das árvores depende da biodeterioração do seu lenho, dos defeitos e de sua localização; entretanto, os mesmos princípios mecânicos e tendências foram observadas, sendo: i) tensões normais mínimas no centro do tronco (linha neutra) e máximas na superfície do tronco da árvore (Figura 57, A1-F1); ii) surgimento de tensões de cisalhamento, onde as tensões normais são mínimas (Figura 57, A2-F2); iii) aumento de tensão normal e de cisalhamento à medida que o apodrecimento do cerne progride e se intensifica e; v) deslocamento dos pontos críticos ao cisalhamento em direção à superfície (Figura 57, C2-F2).

Em síntese, uma árvore submetida a esforços solicitantes, como o vento considerado como o principal componente, ocorre um acúmulo de tensões no lenho do seu tronco. O estado desta árvore pode ser alterado ou maximizado com a ocorrência de defeitos ou alterações anatômico-químico-físicas do lenho, como a biodeterioração causada por organismos xilófagos, fendas e injúrias. Entretanto, no tronco das árvores ocorre uma otimização/uniformização das tensões indesejadas nos pontos fragilizados, minimizando-se o risco de ruptura. O axioma da tensão uniforme observado, também, nas árvores de tipuana pode explicar o tamanho e formato dos troncos e das raízes, o surgimento de espessamento associado às fendas, o processo de cicatrização de injúrias, o espessamento do colo com deterioração interna e a formação de lenho de reação, sendo mecanismos responsáveis pelo aumento da resistência da árvore às tensões indesejáveis. Portanto, a compreensão do comportamento mecânico do lenho de uma árvore e o conhecimento e identificação dos mecanismos de otimização são primordiais na tomada de decisão sobre seu manejo correto.

Tabela 34 - Tensão normal e de cisalhamento máximas nas simulações pelo método de elementos finitos

Simulação (nº.)	Tensão normal (MPa)	Tensão de cisalhamento (MPa)
1	4,90	0,54
2	4,90	0,54
3	4,90	0,78
4	4,90	1,11
5	5,95	0,78
6	7,70	1,56
7	9,60	1,17
8	9,60	1,17
9	9,60	1,70
10	9,60	2,64
11	11,20	1,70
12	15,20	3,15

Figura 56 - Distribuição de tensões normais (1) e de cisalhamento (2) no lenho do tronco das árvores de tipuana com apodrecimento do cerne. (A) simulação 1- NS, 0 % de deterioração; (B) simulação 2- PB_{INT} , 100 % de deterioração; (C) simulação 3- PB_{INC} , 16 % de deterioração interna; (D) simulação 4 - PB_{INT} , 16 % de deterioração interna; (E) simulação 5- PB_{INC} , 66 % de deterioração; (F) simulação 6 - PB_{INT} - 66 % de deterioração interna. (*): lado tracionado. (LN) - linha neutra

Figura 57 - Distribuição de tensões de flexão (1) e de cisalhamento (2) com apodrecimento do cerne e com oco aberto no tronco das árvores de tipuana. (A) simulação 1- NS, 0 % de deterioração interna e oco aberto; (B) simulação 2- PB_{INT} , 100 % de deterioração interna e oco aberto; (C) simulação 3- PB_{INC} , 16 % de deterioração interna e oco aberto; (D) simulação 4- PB_{INT} , 16 % de deterioração interna e oco aberto; (E) simulação 5 - PB_{INC} , 66 % de deterioração interna e oco aberto; (F) simulação 6 - PB_{INT} - 66 % de deterioração interna e oco aberto. (*): lado tracionado. (LN) - linha neutra

5.7 Parâmetros para diagnóstico das árvores de tipuana

Os atributos relacionados as características dendrométricas, propriedades anatômica-física-mecânicas do lenho e de biodeterioração por organismos xilófagos associados a ruptura do tronco das árvores de tipuana no município de São Paulo são apresentados na Tabela 35. Outros atributos, como os de entorno (instalações e sua interferências) e inerentes às árvores de tipuana (anelamento de tronco, casca inclusa, declínio, doenças foliares e do tronco), embora não considerados no trabalho devem, também, ser avaliados.

A análise do risco de queda de um galho ou do tronco de uma árvore deve ser fundamentada pela aplicação de diversas áreas do conhecimento, como a da biologia, interação árvore-organismos xilófagos, matemática, engenharia, dentre outras, permitindo determinar sua estabilidade estrutural. Na tomada de decisão sobre a supressão de árvores urbanas devem ser considerados diferentes aspectos, recomendando-se a adoção de postura conservadora quando existe risco para a integridade das pessoas, animais e propriedades. Há necessidade do contínuo aprimoramento dos critérios aplicados na análise das árvores urbanas visando compreender os fatores de redução da resistência do lenho e que levam a sua ruptura. Dentre estes, ressaltam-se os organismos xilófagos que deterioram o lenho das árvores, sejam os fungos e os térmitas, especialmente nos países de clima tropical. Para a avaliação da estabilidade estrutural das árvores urbanas podem ser aplicados modelos matemáticos estáticos ou dinâmicos que, ao incluírem os parâmetros (defeitos) obtidos através de análise visual, tornam-se eficazes ferramentas para a tomada de decisão. Tem se constituído em tendência a simulação hipotética pela aplicação do método de elementos finitos apesar da complexidade envolvida com o conhecimento das árvores, incluindo o seu comportamento na condição urbana (dados históricos) e implicado na avaliação do risco de queda.

Tabela 35 - Atributos e parâmetros para o diagnóstico de árvores de tipuana na condição urbana

(continua)

Análise	Item	Atributo	Parâmetro	Observação
Condição de entorno	1	Tipo de edificação (*)	(+) - Cemitério, estacionamento, terreno baldio, terreno em construção, área industrial, praças, parques e áreas verdes. (++) - Residencial ou comercial (+++)- Institucional	Análise da segurança de pessoas, animais, propriedades e de problemas de tráfego/trânsito na cidade
	2	Via de tráfego (*)	(+) - Via local (++) - Coletora I e II (+++)- Via rápida ou arterial	
	3	Área permeável	Superior a 3 m ²	Associação com declínio e doenças na árvore.
	4	Levantamento de passeio	Soerguimento do solo e/ou do passeio público; rachaduras no solo e/ou no pavimento	Deslizamento do torrão (sistema radicular + solo) ou associado ao declínio devido à compactação do solo.
	5	Barreira física	Raízes dobradas e/ou enoveladas	A análise conjunta do vento dominante, da inclinação do tronco, do peso da árvore e do desequilíbrio de copa pode indicar risco de deslizamento do torrão.
	6	Canteiro elevado	Colo soterrado e/ou barreira ao crescimento do sistema radicular	Apodrecimento do colo, reduzindo secção resistente do tronco e, consequentemente, aumentando-se o risco de ruptura.

Tabela 36 - Atributos e parâmetros para o diagnóstico de árvores de tipuana na condição urbana
(continuação)

Análise	Item	Atributo	Parâmetro	Observação
	7	Injúria (*)	(+)- sem apodrecimento	Entrada de organismos xilófagos; monitoramento necessário
			(++) - com apodrecimento incipiente ou intenso	Monitoramento necessário
			(+++)- oco aberto	Acúmulo de tensões normais e de cisalhamento na superfície, com surgimento de torção da árvore. Verificar outros defeitos, como rachaduras e apodrecimentos, nos possíveis pontos de acúmulo de tensão.
Estado geral da árvore	8	Poda inadequada	Grandes galhos podados e desequilíbrio da copa.	Entrada de organismos xilófagos; acúmulo de tensões no lenho devido ao deslocamento do centro de gravidade da árvore.
			Raiz podada	Ancoragem da árvore no solo comprometida; deslizamento do torrão; análise em conjunto com a copa desequilibrada.
	10	Dendrocirurgia	Apodrecimento intenso no interior da árvore.	Quando mal realizada, acelera o processo de biodeterioração do lenho, devido ao acúmulo de água. Função apenas estética e não reestabelece resistência mecânica do tronco

Tabela 37 - Atributos e parâmetros para o diagnóstico de árvores de tipuana na condição urbana

(continuação)

Análise	Item	Atributo	Parâmetro	Observação
Estado geral da árvore	11	Rachadura	Abertura na raiz, no colo e/ou no tronco	Acúmulo de tensões na superfície do lenho que favorece o desenvolvimento de rachaduras; presença associada à ruptura por flexão em árvores com deterioração interna.
			Presença de corpo-de-frutificação.	Pode indicar apodrecimento interno, <i>Ganoderma</i> spp. associado a grandes % de deterioração interna.
			Podridão branca incipiente	Fragilidade do lenho com acúmulo de tensões; redução de cerca de 50 % na resistência à flexão, em relação ao lenho normal e sadio.
	13	Fungo apodrecedor	Podridão branca intensa	Fragilidade do lenho com acúmulo de tensões; redução de cerca de 90 % na resistência à flexão, em relação ao lenho normal e sadio.
			Podridão mole incipiente e intensa	Podridão importante no processo de biodeterioração, mas não associado diretamente à sua ruptura, pois seu desenvolvimento é restrito no lenho; redução de cerca de 50 e 80 % na resistência à flexão, para o ataque incipiente e intenso, respectivamente.

Tabela 38 - Atributos e parâmetros para o diagnóstico de árvores de tipuana na condição urbana
(continuação)

Análise	Item	Atributo	Parâmetro	Observação
Estado geral da árvore	14	Cupim-subterrâneo	Presença de túneis e/ou vestígios, insetos vivos, ninhos ou estrutura de ninhos, ataque do lenho e dispersão no solo.	<i>Coptotermes gestroi</i> pode ser considerado como organismo secundário e indicar que existe processo de apodrecimento no interior da árvore, devido à associação observada entre eles; Identificação da espécie necessária para confirmar se hábito xilófago.
	15	Deterioração interna x DAP (**)	P(1%) - $0,16 < DAP \leq 0,36$	Probabilidade de ocorrência de deterioração interna acima de 44 % (superior a 2/3 do raio do tronco) em relação ao DAP. Monitoramento para árvores com DAP maior do que 0,60 m.
			P(6%) - $0,37 < DAP \leq 0,56$	
			P(17%) - $0,57 < DAP \leq 0,76$	
			P(26%) - $0,77 < DAP \leq 0,96$	
Risco de queda	16	estado de alerta máximo x fungo apodrecedor (**)	P(67%) - $0,97 < DAP \leq 1,16$	
				Probabilidade da presença externa de fungo apodrecedor em árvores categorizadas em estado de alerta máximo.
Risco de queda	17	estado de alerta máximo x cupim-subterrâneo (**)	P(42%) - com cupim-subterrâneo	Probabilidade da presença externa de cupim-subterrâneo em árvores categorizada em estado de alerta máximo.
	18	Estado de alerta máximo x DAP (**)	P(4%) - $0,16 < x \leq 0,36$	Probabilidade de uma árvore apresentar estado de alerta máximo em relação ao seu DAP.
			P(7%) - $0,37 < x \leq 0,56$	
			P(18%) - $0,57 < x \leq 0,76$	
			P(30%) - $0,77 < x \leq 0,96$	
			P(67%) - $0,97 < x \leq 1,16$	

Tabela 39 - Atributos e parâmetros para o diagnóstico de árvores de tipuana na condição urbana
(conclusão)

Análise	Item	Atributo	Parâmetro	Observação
Risco de queda	19	Estado de alerta	P(0%) - sadia (0%)	Probabilidade de uma árvore
		máximo	P(1%) - deterioração $\leq 11\%$	apresentar estado de alerta
		x	P(7%) - $11\% < \text{deterioração} \leq 44\%$	máximo, em relação à % de
		% det. interna (**)	P(92%) - deterioração $\geq 44\%$	deterioração interna.
	20	Modelo estatístico (**)	$Y = 1,073877 - 0,280445 \times \text{DAP} - 0,001465 \times \text{FG} - 0,069562 \times \text{CS} + 0,014252 \times \text{DET}$	$0 < Y \leq 1,5$ = estado de alerta mínimo ; probabilidade de acerto de 98 %
				$Y > 1,5$ = estado de alerta máximo ; probabilidade de acerto de 81 %.

(*) - Escala de gravidade de acidente, devido à queda da árvore: (+) pouco crítico; (++) crítico; (+++) muito crítico. (**) - as porcentagens de ocorrência e de acerto, no caso do modelo estatístico, foram consideradas como probabilidades, tendo em vista: o grande número de árvores inspecionadas (espaço amostral) e a premissa de que a aplicação do método de diagnóstico proposto não deve ficar restrita às regiões analisadas, mas sim, ser extrapolada para outras regiões da cidade de São Paulo.

6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação à **arborização urbana**, nas regiões analisadas, na cidade de São Paulo as árvores de tipuana:

- são de elevada idade, não sendo utilizadas em programas recentes de arborização, inclusive em bairros tombados pelo CONDEPHAAT (ex.: Pacaembu);
- foram plantadas em área residencial e comercial e em importantes vias de tráfego intenso de veículos, oferecendo riscos à população, propriedades e causando problemas no trânsito em caso de queda;
- possuem grande porte e foram plantadas em locais inadequados, com interferência pela pavimentação, rede elétrica e canteiros; e
- são afetadas pela poda inadequada dos galhos e raízes e considerada como obstáculo aos equipamentos urbanos e rede elétrica.

Com relação ao **estado geral**, as árvores de tipuana:

- encontram-se em estado geral crítico, embora vivas e sem sinais aparentes de declínio;
- apresentam alteração da arquitetura e deslocamento do centro de gravidade;
- têm o lenho biodeteriorado por organismos xilófagos associados à queda de árvores, quando este é exposto por injúrias ou poda; e
- são afetadas pelo soterramento do colo e por "dendrocirurgia".

Com relação aos **processos de biodeterioração** das árvores de tipuana:

- o lenho foi deteriorado por fungos apodrecedores, cupins-subterrâneos e brocas-de-madeira;
- a sanidade biológica do lenho afetado pelos cupins-subterrâneos e fungos apodrecedores foi relacionada às suas características dendrométricas;
- os fungos apodrecedores e cupins-subterrâneos restringem-se ao cerne sem afetar o vigor das árvores, sendo o DAP indicativo de deterioração interna;

- os cupins *Coptotermes gestroi* e *Heterotermes* sp ocorrem em elevado e baixo nível de infestação das árvores, respectivamente, sendo secundários, atacando o cerne apodrecido;
- o cerne normal e sadio é suscetível ao ataque de *C. gestroi*, entretanto, extrativos de coloração amarelada conferem maior durabilidade natural;
- o cerne biodeteriorado por *Ganoderma* sp. é mais suscetível ao cupim *C. gestroi*;
- as podridões branca e mole foram os tipos identificados; a podridão branca é mais comum e significativa na ruptura da árvore e associada às injúrias na raiz, colo e tronco; e
- os fungos de podridão branca causam degradação não seletiva da parede celular das células do lenho; os de podridão mole são do tipo 1; ambas podridões restringiram-se às células das fibras do xilema.

Em relação aos **mecanismos de resistência** do lenho das árvores de tipuana:

- o mecanismo de resistência à biodeterioração é caracterizado pelo lenho de compartimentalização, com extrativos laranja-avermelhados no lume e parede dos vasos, fibras e parênquima axial e radial;
- ocorre aumento da rigidez e da resistência mecânica do lenho compartimentalizado.

Em relação às alterações nas **propriedades físicas e mecânicas** do lenho das árvores de tipuana, a densidade de massa aparente, tensão de ruptura à flexão estática e módulo de elasticidade do lenho são diminuídas pelos fungos de podridão branca e mole.

Com relação ao **risco de queda** das árvores de tipuana:

- relacionam-se as dimensões, entorno e sanidade biológica do lenho; e
- os esforços solicitantes (ex.: ventos) induzem tensões no lenho e que dependem do tipo, localização e estágio de biodeterioração.

Com relação às **árvores de tipuana** utilizada em arborização urbana:

- estão sujeitas aos organismos xilófagos como outras espécies, com nível de resistência, pela longevidade atingida (70 anos);
- os danos nos passeios públicos e rede elétrica caracterizam negativamente a espécie, além de considerada como exótica;
- o precário planejamento, manejo inadequado, etc. devem ser considerados como responsáveis pela biodeterioração do lenho e redução da longevidade das árvores.

REFERÊNCIAS

ABBUD, B. Eletropaulo troca árvores para preservar rede. **O Estado de São Paulo. Cidades**, São Paulo, 26 set. 1999. p. C-4.

ADAMSON, A.M. Termites and the fertility of soils. **Tropical Agriculture**, London, v. 20, n. 6, p.107-112, 1943.

ALBERS, J.S.; POKORNY, J.D.; JOHNSON, G.R. How to detect and assess hazardous defects in trees. In: POKORNY, J. D. (Coord.). **Urban tree risk management: a community guide to program design and implementation**. St. Paul: USDA, Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry, 2003. chap. 3, p. 41-116. (Technical Paper, NA-TP-03-03).

AMARAL, A.C.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela técnica de microdensitometria de raios X. **Revista Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 6, n. 11/12, p. 17-23, 1998.

AMARAL, R.D.A.M. **Diagnóstico da ocorrência de cupins xilófagos em árvores urbanas do bairro de Higienópolis na cidade de São Paulo**. 2002. 71 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

AMARAL, R.D.A.M.; BRAZOLIN, S.; LIMA, A.M.L.P.; BARILLARI, C.T. Ocorrência de organismos xilófagos em árvores de pau-brasil, *Caesalpinia echinata* Lam. (Leguminosae). In: CONGRESSO NACIONAL DE ARBORIZAÇÃO URBANA, 7., 2003, Belém. **Anais...** Belém: SBAU, 2003. 1 CD-ROM.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **D-2395-02**: standard test method for specific gravity of wood and wood-base materials. West Conshohocken, 2002. 9 p.

_____. **D-4442-92 (03)**: standard test method for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. West Conshohocken, 2003. 6 p.

ANAGNOST, S. Light microscopic diagnosis of wood decay. **IAWA Journal**, Leiden, v. 19, n. 2, p. 141-167, 1998.

ANGELIS, B.L.D. de; CASTRO, R.M. de; ANGELIS NETO, G. de. Ocorrência do cancro de tronco em árvores de acompanhamento viário na cidade de Maringá, Paraná. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 2, n. 2, p. 31-44, 2007.

ÁRVORE cai sobre dois carros na região da avenida paulista. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 23 jan. 2007.

AS ÁRVORES que matam. **Jornal da Tarde**, São Paulo, 12 mar. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-97**: estruturas de madeira. São Paulo, 1997. 107 p.

BECKER, G. *Coptotermes* in the heartwood of living trees in Central and West Africa. **Material und Organismen**, Berlin, v. 10, p. 149-154, 1975.

BLANCHETTE, R.A. Delignification by wood-decay fungi. **Annual Review of Phytopathology**, St. Paul, v. 29, p.381-398, 1991.

_____. **Wood decay**. Disponível em:

<<http://www.cals.ncsu.edu/course/pp318/profiles/decay/decay.htm>>. Acesso em: 12 fev. 2003.

BLANCHETTE, R.A.; OBST, J.R.; TIMELL, T.E. Biodegradation of compression wood and tension wood by white and brown rot fungi. **Holzforschung**, Berlin, v. 48, p. 34-42, 1994.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 721 p.

BRANDÃO, D.; LIMA FILHO, G.F. de; CARVALHO, R.A. de; FREITAS, G.A.; CHAVES, E.C.; SANTOS, T. Padrão de ocorrência de infestação por cupins na arborização urbana de Goiânia. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARBORIZAÇÃO URBANA, 6., 2002, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBAU, 2002. 1 CD-ROM.

BRAZOLIN, S. **Podridão mole em madeira de *Tabebuia* sp. (ipê) em torre de resfriamento de água: identificação e avaliação da capacidade de degradação dos fungos e alterações na estrutura anatômica da madeira**. 1998. 140 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeira) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

BRAZOLIN, S.; AMARAL, R.D.A.M.; TOMAZELLO-FILHO, M. Ocorrência de organismos xilófagos em árvores de *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze da cidade de São Paulo, SP. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, 4., 2006, Piracicaba. **Anais....** Piracicaba: ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.

BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M.P.; TOMAZELLO FILHO, M. Alterações na estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* causadas por fungos de podridão branca. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, 4., 2006, Piracicaba. **Anais....** Piracicaba: ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.

BRAZOLIN, S.; TOMAZELLO-FILHO, M.; SCHOENLEIN-CRUSIUS, I.H. Soft-rot in *Tabebuia* sp. wood used in water cooling tower: identification and degradation capacity of the fungi. In: ANNUAL MEETING OF IRG-WP, 29., 1998, Stockholm. **Proceedings...** Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation - IRG, 1998. 1 CD-ROM. (IRG/WP 98-10253).

BRUN, F.G.K.; LONGHI, S.J.; BRUN, E.J.; FREITAG, A.S.; SCHIMACHER, M.V. Comportamento fenológico e efeito da poda em algumas espécies empregadas na arborização do bairro Canobi, Santa Maria, RS. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 2, n. 1, p. 44-63, mar. 2007.

BUCUR, V.; GARROS, S.; NAVARRETE, A.; TROYA, T. de; GUYONET, R. Kinetics of wood degradation by fungi with x-ray microdensitometric technique. **Wood Science and Technology**, Reading, v. 31, p. 383-389, 1997.

BURGERT, I.; ECKSTEIN, D. The tensile strenght of isolated wood rays of beech (*Fagus sylvatica* L.) and its significance for the biomechanics of living trees. **Trees**, New York, v. 15, p.168-170, Fev. 2001.

BUTCHER, J.A.; NILSSON, T. Influence of variable lignin content amongst hardwood on soft-rot susceptibility and performance of CCA preservatives. In: ANNUAL MEETING OF IRG-WP, 13., 1982, Stockholm. **Proceedings...** Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation - IRG, 1982. 1 CD-ROM. (IRG/WP/1151).

CICLONE deixa cerca de 200 mil sem energia no RS; municípios decretam emergência. **Folhaonline**, 03 maio 2008.
<<http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u398223.shtml>>. Acesso em: 03 maio 2008.

CLARK, J. Investir, pesquisar e mapear a arboricultura são algumas das ações que podem minimizar a queda de árvores. **Informativo da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Belo Horizonte, ano 14, n. 4, p. 12, jan./mar. 2007.

COLI, F.O.; COSTA-LEONARDO, A.M. Infestação de árvores urbanas pelo cupim *Coptotermes havilandi* na região oeste da cidade de Rio Claro. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 9., 1999, Rio Claro. **Resumos...** Rio Claro: UNESP, 1999. p. 23.

COMPUTER AND STRUCTURE INCORPORATION. **Programa Integrated software for structural analysis & design - SAP 2000 - 12 advanced**. Berkeley, 2008.

CONSTANTINO, R. **Online termite database**. Disponível em:
<<http://www.unb.br/ib/zoo/docente/constant/catal/catnew.html>>. Acesso em: 18 jan. 2008.

COOPER, P.A.; GRACE, J.K. Association of the eastern subterranean termite, *Reticulitermes flavipes* (Kollar) (Isoptera: Rhinotermitidae), with living trees in Canada. **Journal of Entomological Science**, Griffin, v. 22, n. 4, p. 353-354, Oct. 1987.

CORRÊA, M.P. **Dicionário das plantas úteis do Brasil e das exóticas cultivadas**. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1974. v. 6.

COSTA-LEONARDO, A.M. **Cupins-praga: morfologia, biologia e controle**. Rio Claro: Edifurb, 2002. 128 p.

DADSWELL, H. E.; HILLIS, W. E. Wood. In: HILLIS, W.E. (Ed.). **Wood extractives**. London: Academic Press, 1962. chap. 1, p. 3-49.

DANIEL, G.; NILSSON, T. Comparative studies on the distribution of lignin and CCA elements in birch using electron microscopic x-ray microanalysis. In: ANNUAL MEETING OF IRG-WP, 18., 1987, Stockholm. **Proceedings...** Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation - IRG, 1987. 1 CD-ROM. (IRG/WP/1328).

DIAS, F.M.; LAHR, F.A.R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da amdeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 102-113, 2004.

DUNCAN, C.G. Soft rot in wood, and toxicity studies on causal fungi. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN WOOD PRESERVER'S ASSOCIATION, 56., 1960, New York. **Proceedings...** New York: AWPA, 1960. p. 27-35.

EATON, R.A.; HALE, M.D.C. **Wood: decay, pests and protection**. London: Chapman & Hall, 1993. 546 p.

EDBERG, R.J.; BERRY, A. Patterns of structural failures in urban trees: coast live oak (*Quercus agrifolia*). **Journal of Arboriculture**. Champaign, v. 25, n.1, p. 48-55, Jan. 1999.

EDBERG, R.J.; COSTELLO, L.R.; BERRY, A.M. **Guide to the California tree failure report form**. California, 1993. 11 p. Disponível em: <http://groups.ucanr.org/treefail/documents/Report_Form_and_Manual1773.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2007.

ERIKSSON, K.E.; WOOD, T.M. Biodegradation of cellulose. In: HIGUCHI, T (Ed.). **Biosynthesis and biodegradation of wood components**. London: Academic Press, 1985. p. 469-498.

EUER, C.G. **Doenças de árvores urbanas**. Colombo: EMBRAPA, CNPF, 1996. 18 p.

FARIA, J.L.G.; MONTEIRO, E.A.; FISCH, S.T.V. Arborização de vias públicas do município de Jacareí, SP. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 2, n. 4, p. 20-33, dez. 2007.

FELIX, R.; SHIGO, A.L. Rots e rods. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 3, n. 10, p. 187-190, Oct. 1977.

FERNANDES, P.M.; CZEPAK, C.; VELOSO, V.R.S. Cupins de montículos em pastagens: prejuízo real ou praga estética? In: FONTES, L.R.; BERTI FILHO, E. **Cupins: o desafio do conhecimento**. Piracicaba: FEALQ, 1998. p. 187-210.

FERRER, H.J.; ZEN, S.H. **Arborização urbana de Piracicaba: funções e estudo das condições limitantes de crescimento**. 1984. 27 p. Trabalho de conclusão (Graduação em Ecologia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, 1984.

FOELKEL C.E.; BUSNARDO C.A. O fenômeno de apodrecimento central do cerne de árvores vivas de *Eucalyptus*: qualidade da madeira. **IPEF**, Piracicaba, n. 33, p. 31-38, ago. 1986.

FONTES, L.R. Considerações sobre a complexidade da interação entre o cupim subterrâneo, *Coptotermes havilandi*, e a arborização no ambiente urbano. In: FONTES, L.R.; BERTI FILHO, E. **Cupins: o desafio do conhecimento**. Piracicaba: FEALQ, 1998. p. 109-124.

FORÇA-tarefa para limpar estragos. **Jornal da Tarde**, São Paulo, 21 nov. 2006.

FOURCAUD, T.; LAC, P. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses in trees: I. an incremental static finite element formulation. **Trees**, New York, v. 17, p. 23-30, July 2002.

FOURCAUD, T.; BLAISE, F.; LAC, P.; CASTÉRA, P.; REFFYE, P. de. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses in trees: II. Implementation in the AMPpara software and simulation of tree growth. **Trees**, New York, v. 17, p. 31-39, July 2002.

FRAEDRICH, B.R. **Tree structure evaluation**. 1999. Disponível em: <http://www.bartlett.com/post/pub/02-Tree_Structure_Evaluation_NH.pdf>. Acesso em: 10 maio 2008.

FREYTAG, E.D.; CINK, J.H. Field trials with premise (imidacloprid) termiticide for controlling formosan subterranean termites in trees in New Orleans, Louisiana. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON *COPTOTERMES FORMOSANUS* IN NEW ORLEANS, 2., 2001, Louisiana. **Abstracts...** New Orleans: USDA, 2001. p. 23.

GAY, F.J. A case of house infestation by a tree-dwelling colony of *Coptotermes frenchi* Hill. **Journal of the Council for Scientific and Industrial Research**, New Delhi, v. 19, p. 330-334, 1946.

GONÇALVES, W.; STRINGHETA, A.C.O.; COELHO, L.L. Análise de árvores urbanas para fins de supressão. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 2, n. 4, p. 1-19, dez. 2007.

GRASSÉ, P.P. **Termitologia**. Paris: Masson, 1982. t. 1: Anatomie, physiologie, reproduction, 676 p.

HARRIS, R.W.; CLARK, J.R.; MATHENY, N.P. **Arboriculture**: integrated management of landscape trees, shrubs, and vines. 4th ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2004. 578 p.

HARRIS, W.V. Termites and forestry. **Empire Forestry Review**, London, v. 34, p. 160-166, 1955.

_____. **Termites**: their recognition and control. 2nd ed. London: Longman, 1971. 180 p.

HARTMAN, J.R.; PIRONE, T.P.; SALL, M.A. **Pirone's tree maintenance**. 7th ed. Oxford: Oxford University Press, 2000. 545 p.

HENDERSON, G.; SHARPE, K.; FELIX, J. **Sufluramid baiting of termite infested trees in New Orleans**: a preliminary report. Baton Rouge: Louisiana State University, Agricultural Center, Department of Entomology. 1995. 12 p.

HICKIN, N.E. **Termites**: a world problem. London: Hutchinson, 1971. 232 p.

HICKMAN, G.W.; CAPRILE, J.; PERRY, E. Oak tree hazard evaluation. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 15, n.8, p. 177-184, Aug. 1989.

HIGHLEY, T. Influence of type and amount of lignin on decay by *Coriolus versicolor*. **Canadian Journal of Forest Research**, Montreal, v. 12, p. 435-438, 1983.

HILLIS, W.E. The distribution and formation of polyphenols within the tree. In: _____. (Ed.). **Wood extractives**. London: Academic Press, 1962. chap. 2, p. 60-123.

HUMPHREYS, R.D., CHIMELO, J.P. Comparação entre propriedades físicas, mecânicas e estereológicas para agrupamento de madeiras. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESSÊNCIAS NATIVAS, 2., 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Instituto Florestal, 1992. p. 480-490.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.

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: IPT, Divisão de Produtos Florestais, 2004. v. 1, 45 p.

_____. **Relatório técnico do ensaio para determinação da resistência da madeira de teca ao ataque de cupins-subterrâneos (*Coptotermes gestroi*)**. São Paulo: IPT, Centro de Tecnologia de Recursos Florestais, 2007. 4 p.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ARBORICULTURE **Recognizing tree hazard**.

Disponível em: <<http://www.isa-arbor.com/consumer/hazard.html>>. Acesso em: 03 jun. 2003.

JAMES, K. Dynamic loading of trees. **Journal of Arboriculture**. Champaign, v. 29, n. 3, p. 165-171, May 2003.

JUSTI JUNIOR, J.; POTENZA, M.R.; SANCHES, A.; GOMES, D.H.P.; SILVESTRE, D.F.; SILVA, R.C. de; ROTHERMUND, R.M. Levantamento da infestação de cupins em árvores do parque Ibirapuera. I – Análise parcial em eucaliptos. **Arquivos Instituto Biológico**, São Paulo, v. 71, p.161-162, 2004. Suplemento.

JUTTNER, A.S. Formosan termites in trees, part II. **Arborage**, p. 36-40. Disponível em: <<http://www.arborage.com>>. Acesso em: 18 jul. 2006.

KALSHOVEN, L.G.E. Observations on *Coptotermes havilandi* Holmgr. (Javanicus Kemn.) (Isoptera). **Beaufortia**. Zoological Museum, Amsterdam, v. 9, n. 101, p. 121-137, May 1962.

_____. *Coptotermes curvignathus* causing the death of trees in Indonesia and Malaya. **Entomologische Berichten**, Deel, v. 23, p. 90-100, 1963.

KANE, B.; RYAN, D. The accuracy of formulae used to assess strength loss due to decay in trees. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 30, n.6, p. 347-356, Nov. 2004.

KANE, B.; RYAN, D.; BLONIAZ, D. V. Comparing formulae that assess strength loss due to decay in trees. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 27, n.2, p. 78-87, Mar. 2001.

KENNARD, D.K.; PUTZ, F.E.; NIEDERHÖFER, M. The predictability of tree decay based on visual assessments. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 22, n.6, p. 249-254, Nov. 1996.

KNOKE, T. Predicting red heartwood formation in beech trees (*Fagus sylvatica* L.). **Ecological Modelling**, Towson, v. 169, p. 295-312, 2003.

KOEHLER, L.; TELEWSKI, F. W. Biomechanics and transgenic wood. **American Journal of Botany**. St. Louis, v. 93, n.10, p. 1433-1438, Oct. 2006.

KOFOID, C.A. (Ed.). **Termites and termite control**. 2nd ed. Berkeley: University of California Press, 1934. 795 p.

KREKLING, T.; FRANCESCHI, V.R.; KROKENE, P.; SOLHEIM, H. Differential anatomical response of Norway spruce stem tissues to sterile and fungus infected inoculations. **Trees**, New York, v. 18, p. 1-9, 2004.

LAERA, L.H.N. Cupins na arborização urbana no município do Rio de Janeiro. In: FONTES, L.R.; BERTI FILHO, E. **Cupins: o desafio do conhecimento**. Piracicaba: FEALQ, 1998. p. 125-132.

LAI, P.Y.; TAMASHIRO, M.; YATES, J.R.; SU, N.Y.; FUJII, J.K.; EBESU, R.H.. Living plants in Hawaii attacked by *Coptotermes formosanus*. **Proceedings of the Hawaiian Entomological Society**, Honolulu, v. 24, n. 2/3, p. 283-286, Oct. 1983.

LEE, K.E.; WOOD, T.G. **Termites and soils**. London; New York: Academic Press, 1971. 251 p.

LELIS, A.T. de; BRAZOLIN, S.; FERNANDES, J.L.G.; LOPEZ, G.A.C.; MONTEIRO, M.B.B.; ZENID, G.J. **Manual de biodeterioração de madeiras em edificações**. São Paulo: IPT, 2001. 54 p.

LIESE, W. Ultrastructural aspects of woody tissue disintegration. **Annual Review of Phytopathology**, St. Paul, v. 8, p. 231-258, 1970.

LIMA, A.M.L.P. **Piracicaba/SP: análise da arborização viária na área central e em seu entorno**. 1993. 238 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

LORENZI, H. **Árvores exóticas no Brasil: madeira, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2003. 382 p.

LUCHI, A.E. **Periodicidade de crescimento em *Hymenaea courbaril* L. e anatomia ecológica do lenho de espécies de mata ciliar**. 1998. 203 p. Tese (Doutorado em Botânica) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998.

LUNA, M.L.; MURACE, M.A.; KEIL, G.D.; OTAÑO, M.E. Patterns of decay caused by *Pycnoporus sanguineus* and *Ganoderma lucidum* (Aphyllophorales) in poplar wood. **IAWA Journal**, Leiden, v. 25, n. 4, p. 425-433, 2004.

MACAYA, J.B. Leguminosas arboreas arbustivas cultivadas en Chile. **Chloris Chilensis**, ano 2, n. 1, 1999. Disponível em: <<http://www.v.28>>. Acesso em: 16 maio 2008.

MACCHIONI, N.; PALANTI, S.; ROZENBERG, P. Measurements of fungal wood decay on Scots pine and beech by means on X-ray microdensitometry. **Wood Science and Technology**, Reading, v. 41, p. 417-426, 2007.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J.P. **Fichas das características das madeiras brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989. 432 p.

MANION, P.D.; ZABEL, R.A. sStem decay perspectives - an introduction in the mechanisms of tree defense and decay patterns. **Phytopathology**, St. Paul, v. 69, n. 10, p. 1135-1138, 1979.

MATTHECK, C. **Trees: the mechanical design**. New York: Springer-Verlag, 1991. 121 p. (Springer Series in Wood).

MATTHECK, C.; BRELOER, R.C. **The body language of trees: a handbook for failure analysis**. London: the Stationery Office, 1997. 239 p.

MATTHECK, C.; KUBLER, H. **Wood: the internal optimization of trees**. New York: Springer-Verlag, 1995. 129 p. (Springer Series in Wood).

MATTHECK, C.; BETHGE, K.; TESARI, I. Shear effects on failure of hollow trees. **Trees**, New York, v. 20, p. 329-333, 2006.

MATTHECK, C.; BRELOER, H.; BETHGE, K.A.; ALBRECHT, W.A.; ZIPSE, A.W. Use of the fractometer to determine the strength of wood with incipient decay. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 21, n.3, p. 105-112, May 1995.

MILANO, S.; FONTES, L.R. **Cupim e cidade: Implicações ecológicas e controle**. São Paulo: Edição dos autores, 2002. 142 p.

MORA, N. R.; ENCINAS, O. B. **Biodegradación de maderas**. Mérida: Universidad de los Andes, 2006. 111 p.

NIKLAS, K.J. **Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function**. Chicago; London: The University of Chicago Press, 1992. 607 p.

_____. Wind, size and tree safety. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 28, n. 2, p. 84-93, Mar. 2002.

NILSSON, T. Comments on soft rot attack in timbers treated with CCA preservatives: a document for discussion. In: ANNUAL MEETING OF IRG-WP, 13., 1982, Stockholm. **Proceedings...** Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation - IRG, 1982. 1 CD-ROM. (IRG/WP/1167).

_____. Defining fungal decay types - final proposal. In: ANNUAL MEETING OF IRG-WP,., 19, 1988, Madri. **Proceedings...** Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation - IRG, 1988. 1 CD-ROM. (IRG/WP/1355).

NOWAK, D.J.; DWYER, J.F.; CHILDS, G. Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. In: KRISHNAMURTHY, L.; NASCIMENTO, R. (Ed.). **Áreas verdes urbanas en Latinoamérica y el Caribe**. Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo, 1998. cap. 2, p. 17-38.

OLIVEIRA, A.M.F.; LELIS, A.T. de; LEPAGE, E.S.; LOPEZ, G.A.C.; OLIVEIRA, L.C.S. de; CAÑEDO, M.D.; MILANO, S. Agentes destruidores da madeira. In: LEPAGE, E.S. (Coord.). **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT; SICCT, 1986. v. 1, cap. 5, p. 99-278. (Publicação IPT,1637).

OSBRINK, W.L.A.; WOODSON, W.D.; LAX, A.R. Population of formosan subterranean termite, *Coptotermes formosanus* (Isoptera: Rhinotermitidae), established in living trees in New Orleans, Louisiana, U.S.A. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN PESTS, 3., 1999, Prague. **Proceedings...** Prague: Czech University of Agriculture, 1999. p. 341-345.

PEARCE, R.B. Decay development and its restriction in trees. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 1, n. 26, p. 1-11, Jan. 2000.

PEARCE, R.B.; FISHER, B.J.; CARPENTER, T.A.; HALL, L.D. Water distribution in fungal lesions in the wood of sycamore, *Acer pseudoplatanus*, determined gravimetrically and using nuclear magnetic resonance imaging. **New Phytologist**, Lancaster, v. 135, n. 4, p. 675-688, Apr. 1997.

PELTOLA, H.M. Mechanical stability of trees under static loads. **American Journal of Botany**, St. Louis, v. 93, n.10, p. 1501-1511, Oct. 2006.

PERRY, D.H.; LENZ, M.; WATSON, J.A.L. Relationships between fire, fungal rots and termite damage in Australian forest trees. **Australian Forestry**, Yarralumla, v. 48, n. 1, p. 46-53, 1985.

QUIGLEY, M.F. Street trees and rural conditions: will lon-lived trees reach full size in urbans condicions?. **Urban Ecosystems**. Netherlands, v.7, p.29-39. 2004.

RAYNER, A.D.M.; BODDY, L. (Ed.). **Fungal decomposition of wood: its biology and ecology**. Chichester: John Willey, 1988. 587 p.

RIOUX, D.; BAAYEN, R.P. A suberized perimedullary reaction zone in *Populus balsamifera* novel for compartmentalization in trees. **Trees**, New York, v. 11, p. 389-403, 1997.

ROMAGNANO, L.F.T.D. **Instrumentos de gestão ambiental integrada**: diretrizes para o controle de cupins-subterrâneos em ambientes construídos. 2004. 126 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2004.

SAMPAIO, A.C.F. **Análise da arborização de vias públicas das principais zonas do plano piloto de Maringa, PR**. 2006. 117 p. Dissertação (Mestrado em Análise Regional e Ambiental) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

SANDS, A.W. The association of termites and fungi. In: KRISHNA, K; WESSNER, F.M. **Biology of termites**. New York: Academic Press, 1969. v. 2, p. 495-524.

SANTOS, L.L.; COSTA-LEONARDO, A.M. Infestação de árvores urbanas pelo cupim *Coptotermes havilandi* na região leste da cidade de Rio Claro. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 9., 1999, Rio Claro. **Resumos...** Rio Claro: UNESP, 1999. p. 23.

SÃO PAULO: Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente. **Manual técnico de arborização urbana**. 2. ed. São Paulo, 2005. 45 p.

SÃO PAULO. Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente; IPT. **GEO cidade de São Paulo**: panorama do meio ambiente urbano. São Paulo; Brasília: PNUMA, 2004. 204 p.

SAVORY, J. G. Breakdown of timber by Ascomycetes and fungi imperfecti. **Annals of Applied Biology**, Wellsbourne, v. 41, n. 2, p. 336-347, 1954.

SCHEFFER, T.C.; COWLING, E.B. Natural resistance of wood to microbial deterioration. **Annual Review of Phytopathology**, St. Paul, v. 4, p. 147-168, 1966.

SCHROEDER, H.W. Esthetic perceptions of the urban forest: a utility perspective. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 15, n.12, p. 292-294, Dec. 1989.

SEITZ, R.A. **Poda de árvores**. Piracicaba: IPEF, 1996. 27 p.

SHARON, M.E. Tree health management: evaluating trees for hazard. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 13, n.12, p. 285-293, Dec. 1987.

SHIGO, A.L. **Tree decay**: an expanded concept. Washington: USDA, Agriculture Forest Service, 1979. 72 p. (Information Bulletin, 419).

_____. **Trees defects**: a photo guide. 1983. 167 p. Disponível em: <<http://www.chesco.com/~treeman/hardtoget/ntb168>>. Acesso em: 08 maio 2006.

_____. Compartmentalization: a conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves. **Annual Review of Phytopathology**, St. Paul, v. 22, p. 189-214, 1984.

SHIGO, L.A.; HILLIS, W.E. Heartwood, discolored wood, and microorganisms in living trees. **Annual Review of Phytopathology**, St. Paul, v. 11, p. 197-222, 1973.

SHORTLE, C.W.; SMITH, K.T. **A first look at tree decay**: an introduction to how injury and decay affect trees. Washington: USDA, Agriculture Forest Service, 1998. (NA-PR-02-98).

SILVA, L.M. Arborização de vias públicas e a utilização de espécies exóticas: o caso do bairro centro de Pato Branco, PR. **Scientia Agraria**. Curitiba, v. 8 n. 1, p. 47-53, 2007.

SILVA, L.M.; HASSE, I.; CADORIN, D.A.; OLIVEIRA, K.A. de; OLIVEIRA, F.A.C. de; BETT, C.F. Inventário da arborização em duas vias de Mariópolis, PR. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 3, n. 1, p. 36-53, mar. 2008.

SILVA-FILHO, D.; VEIGA, A.P.B.; POLIZEL, J.L.; COUTO, H.T.Z. do; BATISTA, J.L.F. Efeito de borda do inventário dos maciços de eucalipto do parque Ibirapuera por meio do uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 2, n. 1, p. 81-100, mar. 2007.

SMILEY, T.; FRAEDRICH, B.R. Determining strength loss from decay. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 18, n. 4, p. 201-204, July/Dec. 1992.

À SOMBRA do perigo. **Jornal da Tarde**, São Paulo, 22 nov. 2006.

SONE, K.; NOGUCHI, K.; TERASHIMA, I. Mechanical and ecophysiological significance of the form of a young *Acer rufrum* tree: vertical gradient in branch mechanical properties. **Tree Physiology**, Vitoria, v. 36, p. 1549-1558. 2006.

SORZ, J.; HIETZ, P. Is oxygen involved in beech (*Fagus sylvatica*) red heartwood formation? **Tree structure and function**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. p. 1-18. Disponível

em: <<http://www.springerlink.com.w10077.dotlib.com.br/content/865726q78u11xj73/fulltext>>. Acesso em: 12 mar. 2009.

SOUZA, V.C. **Botânica sistemática**. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2005. 640 p.

SREBOTNIK, E.; MESSNER, K. A simple method that uses differential staining and light microscopy to assess the selectivity of wood delignification by white rot fungi. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v.60, n. 4, p. 1383-1386, Apr. 1994.

STATSOFTT INCORPORATION. **Programa Statistica for windows**: programa estatístico para análise de dados (software). Tulsa, 1995.

STERKEN, P. **Manual para el análisis de estabilidad de arbolado mediterráneo**. Tradução de J. Belvis. e J. Llorens. 2005. Disponível em: < www.kpb-isa.nl >. Acesso em: 10 jun. 2007.

SVIHRA, P.; KELLY M. Importance of oak ambrosia beetles in predisposing coast live oak trees to wood decay. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 30, n.6, p. 371-376, Nov. 2004.

TANAKA, T. Evaluation of bending strenght by non-strenght methods of Ezomatzu with white pocket rot. In: ANNUAL MEETING OF IRG-WP, 22., 1991, Stockholm. **Proceedings...** Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation - IRG, 1991. 1 CD-ROM. (IRG/WP/2371).

TEIXEIRA, I.F. Análise qualitativa da arborização de ruas do conjunto habitacional Tancredo Neves, Santa Maria, RS. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 9-21, 1999.

TEMPORAL na Patagônia mata 3 turistas brasileiros. **Portal Terra Brasil**, 01 de jun. 2004. Disponível em: <<http://noticias.terra.com.br/brasil/interna/0,,OI335764-EI306,00.html>>. Acesso em 01 jun. 2004.

TOLEDO, S.R.G.; ROMAGNANO, L.F.T.D. Distribuição e ocorrência de cupim-subterrâneo *Coptotermes gestroi* em árvores urbanas no município de São Paulo, Pacaembu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOLOGIA, 16., 2006, Londrina: 2006. **Resumos...** Londrina: UEL, 2006. 1 CD-ROM.

TOMAZELLO-FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla***. 2006. 135 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade São Paulo, Piracicaba, 2006.

TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M.P. Application of x-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas, Ciencia y Tecnologia**, Concepción, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.

TORTORELLI, L.A. **Maderas y bosques argentinos**. Buenos Aires: Ed. Acme, 1956. 580 p.

VELASCO, G.D.N. **Arborização viária x sistemas de distribuição de energia elétrica**: avaliação dos custos, estudos das podas e levantamento de problemas fitotécnicos. 2003. 94 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade São Paulo, Piracicaba, 2003.

WAGENER, W.W. **Judging hazard from native trees in California recreational areas:** a guide for professional foresters. Berkeley: USDA, Agriculture Forest Service, Southwest Forest and Range Experiment Station, Research Paper: PSW-P1..1963, 29p.

WILCOX, W.W. Degradation in relation to wood structure. In: NICHOLAS, D.D (Ed.). **Wood deterioration and its prevention by preservative treatments:** degradation and protection of wood. Syracuse; New York: Syracuse University Press, 1973. v. 1, p. 107-148.

YOUNG, C.W.T. **The external signs of decay in trees.** London: Department of the Environmental, 1984. 11 p. (Arboricultural Leaflet, 1).

ZABEL, R.A.; MORRELL, J.J. **Wood microbiology:** decay and its prevention. London: Academic Press, 1992. 476 p.

ZIENKIEWICZ, O.C. **The finite element method.** 3rd ed. Columbus: McGraw Hill, 1977. 787 p.

ZORZENON, F.J.; POTENZA, M.R. **Cupins:** pragas em áreas urbanas. São Paulo: Instituto Biológico, 1995. 40 p. (IB. Boletim Técnico, 10).

ANEXOS

Anexo A - Descrição dos atributos de diagnóstico das árvores de tipuana

DESCRIÇÃO DOS ATRIBUTOS

BASE DE DADOS PARA CADASTRAMENTO E INVENTÁRIO

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

SECRETARIA MUNICIPAL DO VERDE E MEIO AMBIENTE – SVMA,

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT

Este documento contém dados utilizados pela Prefeitura do Município de São Paulo e pelo IPT no Projeto Operação Árvore Saudável para cadastramento e inventário das árvores da cidade.

O cadastramento e inventário foram feitos com o preenchimento dos seguintes campos:

LOCALIZAÇÃO

1. DATA DA INSPEÇÃO: deverá ser cadastrada a data em que ocorreu o cadastramento/inventário, utilizando-se 2 dígitos para o dia, 2 dígitos para o mês e quatro dígitos para o ano, nesta ordem.
2. RESPONSÁVEL PELA COLETA DOS DADOS: deverá ser identificado pelo nome o responsável do cadastramento/inventário do exemplar arbóreo.
3. LOGRADOURO: deverá ser cadastrado o nome da via e seu respectivo número de Cadastro de Logradouro (CADLOG).
4. NÚMERO DO IMÓVEL: deverá ser cadastrado o número do imóvel em frente ao qual se encontra o exemplar arbóreo. No caso de haver mais de um exemplar em frente ao mesmo imóvel, a primeira árvore deverá apresentar o número do imóvel e as seguintes deverão apresentar numeração estimada. Para estimar a numeração sugere-se somar o número de guias (cada guia = 1m) ao número do imóvel (atentando p/ manter um número par ou ímpar dependendo do lado da calçada) ou então, somando no mínimo 2 números, porém, sem ultrapassar o número do imóvel seguinte.

Obs.: no caso de não existir a numeração do imóvel em frente, o número deverá ser estimado das seguintes maneiras e nesta ordem de prioridade:

- entre o número do imóvel anterior e o próximo, contando-se o número de guias;
- árvores próximas de esquinas, considera-se o último número do CADLOG da esquina anterior (placa de rua) e o primeiro da esquina em que se situa o exemplar arbóreo;
- caso não haja nenhuma numeração de imóvel na calçada do exemplar arbóreo, um número deverá ser estimado a partir da numeração da calçada oposta;
- distância em metros da esquina até o exemplar arbóreo, para os casos onde houver praça, sem numeração.

5. TIPO DE LOGRADOURO (TL): deverá ser cadastrado o tipo de logradouro público onde se encontra o exemplar arbóreo. Tabela 1 – Localização.

TABELA 1 - LOCALIZAÇÃO/TIPO DE LOGRADOURO	
A	ALÇA DE ACESSO - acesso para uma via
B	CANTEIRO CENTRAL - localizado entre duas pistas rolantes
C	CANTEIRO LATERAL
D	ILHA - espécie de calçada, de nível mais alto que o da rua, erguida no meio desta a fim de separar as mãos de direção e servir como proteção aos pedestres
E	PASSEIO PÚBLICO - calçada destinada ao trânsito de pedestres
F	ESQUINA

CONDIÇÕES DO ENTORNO

6. TIPO DE EDIFICAÇÃO (TE): deverá ser cadastrado o tipo de edificação lindeira ao exemplar arbóreo. Tabela 2 – Edificação.

TABELA 2 - EDIFICAÇÃO	
A	COMERCIAL
B	INDUSTRIAL
C	INSTITUCIONAL
D	RESIDENCIAL
E	EM CONSTRUÇÃO
F	SEM CONSTRUÇÃO
G	PRAÇA/PARQUE/OUTRA ÁREA VERDE
H	CEMITÉRIO/ESTACIONAMENTO

7. TIPO DE VIA DE TRÁFEGO (VT): deverá ser cadastrado o tipo de via pública, nos termos da Portaria 21/02-DSV/SMT, de 21/05/2002. Tabela 3 – Via de Tráfego.

TABELA 3 - VIA DE TRÁFEGO	
A	VIAS DE TRÂNSITO RÁPIDO
B	ARTERIAL I
C	ARTERIAL II
D	ARTERIAL III
E	COLETORA I
F	COLETORA II
G	LOCAL

8. LEVANTAMENTO DO PAVIMENTO (LP): deverá ser informada a ocorrência ou não de levantamento do passeio público, causado por raízes.
9. TIPO DE CALÇADA VERDE (CVD): deverá ser informada a ocorrência ou não de calçada verde, considerando os seguintes tipos: faixa simples junto à guia; faixa simples junto ao alinhamento do lote; faixa simples central; faixa dupla e/ou; junta gramada.
10. ÁREA PERMEÁVEL (APER): área, ao redor da árvore, seja na forma de canteiro, faixa ou piso drenante, que permita a infiltração de água e a aeração do solo.

Largura: deverá ser lançada, em metros, utilizando-se 3 casas decimais, a largura da área permeável do canteiro. Campo de preenchimento obrigatório quando canteiro de secção retangular.

Comprimento: deverá ser lançado, em metros, utilizando-se 3 casas decimais, o comprimento da área permeável do canteiro. Campo de preenchimento obrigatório quando canteiro de secção retangular.

Diâmetro: deverá ser lançado, em metros, utilizando-se 3 casas decimais, o diâmetro da área permeável do canteiro. Campo de preenchimento obrigatório quando canteiro de secção circular.

CARACTERÍSTICAS DENDROMÉTRICAS

11. DIÂMETRO A ALTURA DO PEITO (DAP): esta medida é conseguida após retirada da medida do PAP efetuando-se o cálculo: $DAP = PAP/\pi$ e deve ser informada, em metros utilizando-se 3 casas decimais.
12. ALTURA DA PRIMEIRA BIFURCAÇÃO (APB): deverá ser lançada, em metros e utilizando-se uma casa decimal, a altura da primeira ramificação, medida do colo até a parte inferior do ramo mais próximo do solo.
13. ALTURA TOTAL DA ÁRVORE (ALTAR): deverá ser medida, com um clinômetro, a partir do nível do solo na região do colo até a parte mais elevada da copa e lançada, em metros utilizando-se uma casa decimal, a altura do exemplar arbóreo,.
14. ALTURA DA COPA (ALTCP): diferença matemática entre a altura total e a altura da 1 bifurcação, em metros utilizando-se uma casa decimal.
15. DIÂMETRO DA COPA (DCP): deverá ser lançado, em metros e utilizando-se 3 casa decimal, o diâmetro da projeção da copa.
16. ÁREA DA COPA (ACP - m²): calculada como a área de uma parábola considerando-se a altura (Altura total menos APB) e diâmetro da copa.
17. ÍNDICE DE FECHAMENTO DA COPA (IFC - %): valor atribuído segundo escala proposta para densidade de copa de árvores em florestas (Figura 1).

Figura 1 - Índice de fechamento da copa

18. INCLINAÇÃO DO TRONCO (INC): ângulo acentuado de inclinação em relação ao eixo principal ou eixo do tronco principal formando ângulo diferente de 90° com a linha do solo.

ESTADO GERAL

Os atributos relacionados ao estado geral da árvore deverão ser avaliados no **sistema radicular ou raiz (R)**, no **colo (CL)**, que corresponde à transição raiz/tronco, no **tronco (TR)**, eixo principal da árvore do colo até a primeira bifurcação da copa e/ou **copa (CP)**.

- 19.ÁRVORE MORTA (ARM): deverá ser informado quando o vegetal apresentar o tronco seco, ou seja, quando não houver fluxo de seiva pela árvore.
- 20.BARREIRA FÍSICA DO CANTEIRO (BFC): que impeçam as raízes de se desenvolverem normalmente
- 21.INJÚRIA MECÂNICA (IM): ferida ocasionada por alguma ação antrópica ou causa natural
- 22.RAIZ CORTADA/PODADA (RC): corte de raiz ou raízes de grande dimensão.
- 23.RAÍZ DOBRADA/ENOVELADA (RDE): raiz ou raízes estruturais dobrada em 90° ou mais.
- 24.DENDROCIRURGIA (DD): preenchimento de fenda, oco ou lesão com alvenaria ou outro material inerte
- 25.COLO SOTERRADO (CLST): cobertura do colo com terra
- 26.CASCA INCLUSA (CI): junção de galhos ou troncos de duas árvores onde a casca está voltada para o interior entre o galho e o tronco
- 27.RACHADURA (RCH): abertura longitudinal ou tansversal profunda
- 28.OCO ABERTO (OC): espaço vazio aparente, formado pelo ataque de organismos xilófagos
- 29.COPA DESEQUILIBRADA (CPDS): que se encontra desequilibrada podendo estar inclinada em direção ao leito carroçável (rua), imóvel ou passeio
- 30.PODA INADEQUADA DOS GALHOS (PDI): Drástica - remoção total da copa podendo permanecer, ou não, acima do tronco os ramos principais com menos de 1,0 metro de comprimento nas árvores adultas resultando apenas no tronco da árvore. Lateral - envolve o direcionamento da estrutura principal da árvore para apenas um lado. Em “V” - é a remoção dos galhos internos da copa, dando aos ramos principais a forma de V, entre outras práticas.

SANIDADE BIOLÓGICA

O **sistema radicular (R)**, **colo (CL)** e **tronco (TR)** da árvore deverão ser avaliados quanto à sua sanidade biológica com relação aos seguintes atributos:

31. SADIO (SD): exemplar arbóreo que não apresenta problemas de biodeterioração.
32. DETERIORADO (DET) - exemplar arbóreo que apresenta alterações indesejáveis produzidas pela ação, direta ou indireta, de seres vivos.
33. FUNGO APODRECEDOR (FG) - organismos que necessitam de compostos orgânicos como fonte de alimento.

Podridão branca (PB): degradação de todos os componentes químicos estruturais da madeira incluindo a celulose; a madeira deteriorada adquire uma coloração mais clara do que a sadia e uma consistência esponjosa, de fácil desfibrilamento.

Podridão parda (PP):

Podridão indeterminada (PI): outro apodrecimento. No campo é impossível confirmar/diferenciar a podridão parda da podridão mole, pois ambas degradam as moléculas de celulose e hemiceluloses e a madeira deteriorada fica friável e mais escura que a madeira sadia. A diferenciação só é possível por meio de análise de lâminas histológicas.

A presença de fungos apodrecedores nas árvores é caracterizada pelo:

34. ATAQUE DE FUNGO (FGATQ): corresponde à intensidade da deterioração causada pelo fungo no exemplar arbóreo, podendo ser classificado como:
- *Superficial*: deterioração muito leve ou pouco profunda, atingindo apenas pequena porção do alburno.
 - *Moderado*: deterioração completa do alburno podendo ou não atingir parte do cerne.
 - *Intenso*: deterioração completa do alburno e de grande extensão ou totalidade do cerne
35. CORPO-DE-FRUTIFICAÇÃO (FGCF): são estruturas produtoras de esporos, popularmente conhecidos como “cogumelos”, “orelha-de-pau” etc
36. CUPINS-DE-SOLO (CSO): a família Termitidae é a que contém o maior número de espécies. Os cupins desta família apresentam diferentes hábitos de nidificação. De acordo com a localização do ninho temos 3 tipos principais: epígeos, arbóreos e subterrâneos. Os ninhos epígeos são aqueles onde uma parte aflora na superfície do solo. Estão entre esses tipos de ninhos os conhecidos murunduns

freqüentemente encontrados em pastagens. Os ninhos subterrâneos podem apresentar uma única estrutura definida ou composta de várias estruturas, neste caso, denominadas cálias, ou ainda se limitar a uma rede de galerias e câmaras. Os chamados ninhos arbóreos formam uma estrutura bem definida, localizada sobre algum suporte, geralmente árvores, mas também sobre postes e mourões de cerca. Não menos freqüente, podem também ser encontrados nos forros/telhados das edificações, neste caso particularmente na zona rural.

37. CUPIM-SUBTERRÂNEO (CS): são assim denominados pelo fato de constituírem colônias freqüentemente no solo, podendo também ocorrer no interior de troncos ocos de árvores. Estes cupins pertencem à família Rhinotermitidae, e no Brasil a espécie *Coptotermes gestroi* (antigo *havilandi*) é a que corresponde aos maiores prejuízos econômicos ao homem

38. CUPIM-DE-MADEIRA-SECA (CMS): são aqueles cupins cuja colônia se desenvolve inteiramente dentro da madeira. Os representantes típicos desse grupo no Brasil são os cupins da família Kalotermitidae. Uma colônia de cupins-de-madeira-seca possui quantidade de indivíduos bem menor quando comparada às colônias de cupins-subterrâneos

39. ATAQUE DE CUPIM (ATQ): corresponde à intensidade da deterioração causada pelos cupins no exemplar arbóreo, podendo ser classificada como:

- *Leve*: deterioração superficial indicada pela presença de galerias de pequena profundidade no tronco da árvore.
- *Intenso*: deterioração intensa indicada pela presença de galerias de grande profundidade.

40. ATIVIDADE DE CUPIM (ATV) existência de cupins vivos no local.

- *Leve*: presença de alguns indivíduos.
- *Moderada*: presença de dezenas de indivíduos.
- *Intensa*: presença de centenas de indivíduos.

Obs.: A presença de cupins é caracterizada pela ocorrência de: **resíduo**, pelotas fecais, secas, eliminadas pelos cupins-de-madeira-seca, de aspecto granulado e formato elíptico, cuja coloração tende a acompanhar a mesma da madeira; **dispersão no solo**, cupins coletados no solo junto ao colo do exemplar arbóreo; **túnel**, estruturas

por onde os cupins se movimentam, construídas com fezes e partículas de solo e observadas no tronco sob a casca e / ou entrecasca; **vestígio de túnel**, sinais de túneis verificados no tronco sob a casca e / ou entrecasca; **estrutura de ninho**, fragmentos do ninho construído pelos cupins com fezes, partículas de solo e saliva, onde a colônia se abriga. Os ninhos se desenvolvem preferencialmente no solo e também no interior de troncos ocos de árvores, principalmente, na transição raiz / colo.

DETERIORAÇÃO INTERNA

% DETERIORAÇÃO NO COLO - após a prospecção do colo com o penetrômetro, calcular a porcentagem de deterioração interna, em relação à secção transversal do tronco na altura do DAP.

O tronco só é prospectado se possuir um oco aberto.

A Tabela 5 – Prospecção interna do colo e/ou tronco apresenta as informações a serem coletadas, ilustradas pelas Figuras 2 e 3

TABELA 5 – PROSPECÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DO COLO E/OU TRONCO COM PENETRÔMETRO

A	SETOR INCLINAÇÃO - quando houver inclinação do tronco, registrar qual é o setor que a árvore encontra-se inclinada, ou seja, aquele contrário ao setor do lado tracionado
B	SETOR LADO TRACIONADO - quando houver inclinação do tronco, registrar qual o setor mais tracionado, ou seja, aquele contrário ao setor da inclinação.
C	FUROS A,B, C,D - corresponde ao número de prospecções realizadas
D	PROFUNDIDADE MÁXIMA (cm) - deverá ser registrada a profundidade máxima em centímetros que a broca perfurou o colo e, de preferência, até a metade do DAP.
E	PAREDE SADIA (cm) - deverá ser registrada a extensão, em centímetros, de madeira sadia, sem ultrapassar a metade do DAP
F	SETOR - deverá ser registrado o setor onde foi realizada a prospecção
G	<p>OCO ABERTO NA BASE – espaço vazio aparente no colo, ou seja, com abertura</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>(A), (B) e (C)</u> - correspondem ao número de ocos no colo e/ou tronco ▪ <u>Abertura (m) ou "l"</u> – corresponde ao comprimento do oco aberto no colo. ▪ <u>Altura (m) ou "h1"</u> – corresponde à altura da extensão do oco aberto no colo. ▪ <u>Altura (m) ou "h2"</u> - corresponde à altura do colo até o oco aberto no tronco

Anexo B - Modelo de cálculo estrutural para análise de risco de queda de árvores

MODELO DE CÁLCULO ESTRUTURAL PARA ANÁLISE DE RISCO DE QUEDA DE ÁRVORE

1 Variáveis de cálculo

O modelo de cálculo estrutural para a avaliação de risco de queda de árvores foi desenvolvido pelo IPT (2004) e considera as seguintes variáveis de cálculo:

1.1 Medidas dendrométricas das árvores.

As medidas dendrométricas das árvores consideradas foram: o diâmetro e a inclinação do tronco, a altura da árvore, a altura e a largura da copa, o índice de fechamento da copa e o centro de aplicação das forças de vento na copa. Estas informações foram obtidas por levantamentos em campo que incluíram medições de distância, ângulos zenitais e fotos em duas direções ortogonais. e por meio de cálculos trigonométricos, contemplados no modelo estrutural para avaliação do risco de queda de árvores.

1.2 Estado de sanidade biológica das árvores

A biodeterioração causada por fungos e/ou cupins-xilófagos foi introduzida no modelo estrutural de duas maneiras: por medição da porção sadia da região do colo e do tronco, realizada por meio de prospecção interna e pelas observações visuais das árvores com sinais de ataque, sendo a presença de oco aberto e de rachas/fendas. Estas informações serviram de subsídios para avaliar os parâmetros geométricos da secção transversal resistente aos esforços mecânicos.

1.3 Características físicas e mecânicas da espécie

As seguintes características físicas e mecânicas da *Tipuana tipu* espécies foram consideradas no modelo estrutural (CHIMELO et al., 1986): densidade de massa; resistência e rigidez à compressão paralela às fibras; resistência e rigidez à flexão; resistência ao cisalhamento e à tração normal às fibras. Neste modelo, as características mecânicas foram correlacionadas à densidade de massa da madeira a

um teor de umidade de referência de 15%. A massa do tronco da árvore no estado verde foi calculada levando-se em conta o preenchimento das paredes celulares e o lume das células por água. A massa acima da primeira bifurcação foi calculada por um fator relacionado à massa do tronco. O valor máximo de massa da árvore foi utilizado para calcular o peso próprio de modo a simular a condição mais desfavorável de carregamento.

1.4 Sistema radicular (conceitual).

O sistema radicular (conceitual) foi simulado considerando-se o conjunto raiz e solo atuando como um bloco de fundação, submetido ao escorregamento, tombamento e afundamento. Basicamente, utilizaram-se os parâmetros de um solo comum da cidade de São Paulo. O ponto de pivotamento e as características geométricas do torrão de solo aderido à raiz foram parametrizados no modelo em função do diâmetro do tronco e densidade de massa de referência. Esta simulação foi conceitual, pois durante a inspeção das árvores, o sistema radicular não pode ser analisado quando ao seu tamanho e estado de sanidade biológica.

1.5 Solo

As características do solo utilizadas no modelo foram: o tipo de solo parametrizado pelo índice de coesão, o ângulo de atrito interno e o peso específico. A influência do teor de umidade não foi introduzida no modelo, mas adotou-se um valor representativo do solo comum da cidade de São Paulo.

1.6 Vento

As forças devidas ao vento, com ou sem a presença de chuva, constituem os principais esforços solicitantes, adicionados ao peso próprio da árvore. A presença de chuva prolongada pode ser um agravante adicional, visto que modifica as condições de umidade do solo e acrescenta um aumento no peso da árvore. Basicamente, os fatores de ajuste de velocidade do vento foram aqueles especificados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1988) na norma NBR 6123/88 – Forças devidas ao vento, sendo: o fator topográfico S1; o fator S2, relacionado às barreiras de vento,

altura e diâmetro da árvore e duração da rajada; e o fator estatístico S3, que corresponde ao tempo de recorrência de vento em diferentes níveis de probabilidade de sua ocorrência. O tempo de recorrência de vento foi ajustado para 2 e 5 anos. A Tabela 1 apresenta as relações entre o tempo de recorrência com o fator S3.

Tabela 1 - Relação entre o tempo de recorrência do vento e o fator S3

<i>Tempo de recorrência</i>	Níveis de probabilidade de ocorrência de vento (%)				
	41	50	63	75	90
2 anos (1)	0,67	0,64	0,60	0,57	0,53
5 anos (1)	0,77	0,74	0,70	0,66	0,61
50 anos (2)	1,10	1,06	1,00	0,95	0,88

Nota:

⁽¹⁾ - Valores adotados neste Projeto e calculados segundo a equação da página 71, anexo C, da Norma NBR 6123/88 - Forças devidas ao vento;

⁽²⁾ - Valores especificados pela norma para edificações.

Pode-se definir o tempo de recorrência ou tempo de retorno do vento como um período de tempo no qual é estudada a probabilidade de ocorrência da máxima velocidade média de vento medida sobre uma rajada, com duração de 3 segundos. A variável máxima velocidade média é um processo estocástico, onde quanto maior for o período de tempo considerado, maior será a probabilidade de uma dada velocidade ocorrer. Portanto, se considerarmos 2 períodos de retorno, 2 anos e 5 anos, com a mesma probabilidade, a máxima velocidade média será maior para o período de retorno de 5 anos ou, dada uma velocidade de vento a probabilidade da mesma ocorrer num período de 5 anos é maior do que num período de 2 anos. Quanto maior o período de retorno, maior será a máxima velocidade média do vento a ser utilizada no cálculo de esforços solicitantes nas árvores.

1.6.1 Localização das árvores em associação com os fatores estatísticos de vento

O tipo de edificação próxima à árvore e via de tráfego do logradouro, segundo classificação viária da Secretaria Municipal dos Transportes – SMT, foram considerados no modelo estrutural. A Tabela 2 apresenta a relação do fator S3 com a localização da árvore.

Tabela 2 - Fator S3 relacionado à localização da árvore (tipo de edificação e via de tráfego do logradouro)

Localização da árvore		Fator S3 x Tempo de recorrência	
		2 anos	5 anos
Tipo de Edificação	Institucional	0,67	0,77
	Residencial ou comercial	0,60	0,70
	Cemitério, Estacionamento, em construção, industrial, sem construção, praças parques e áreas verdes.	0,57	0,66
Via de Tráfego	Via rápida ou arterial	0,67	0,77
	Coletora I e II	0,60	0,70
	Via local	0,57	0,66

A velocidade característica do vento utilizada no cálculo da pressão dinâmica depende dos fatores S1, S2 e S3. Neste Projeto adotou-se o fator S1 igual a 1 e o fator S2 variando em função da altura e largura da árvore, sendo definido como categoria V (classificação para a cidade de São Paulo). O fator S3 leva em consideração o grau de risco de segurança requerido e a vida útil, 2 anos ou 5 anos, que pode ser o tempo de recorrência do vento crítico. As velocidades características em função da altura da árvore (fator S2), para os tempos de recorrência de 2 e 5 anos (fator S3), são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de velocidade característica do vento (km/h) em função da altura da árvore e do fator S3, considerando-se tempo de recorrência do vento de 2 anos e de 5 anos

Altura da árvore	Tempo 2 anos (F3)			Tempo 5 anos (F3)		
	0,57	0,60	0,67	0,66	0,70	0,77
10 m (S2 = 0,74)	61	64	71	70	75	82
15 m (S2 = 0,79)	65	68	76	75	80	88
20 m (S2 = 0,82)	67	71	79	78	83	91

1.7 Resistência do tronco e da transição tronco-raiz (colo)

A resistência da porção sadia de madeira no tronco e na região de transição tronco-raiz (colo) foi avaliada em função da densidade de massa da madeira e do estado de sanidade biológica das paredes interna e externa avaliadas por prospecção interna. Os valores característicos e de projeto das resistências mecânicas foram baseados na norma EUROCODE 5 - *Design of timber structures* (DD ENV 1995-1-1:1994). As resistências consideradas foram: compressão paralela às fibras, flexão, cisalhamento paralelo às fibras e tração normal às fibras. A rigidez utilizada foi o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras.

2 Mecanismos de ruptura das árvores (queda).

Para a definição dos mecanismos de ruptura das árvores foram consideradas as solicitações causadas pelo peso próprio, aplicadas ao tronco e à copa, e as forças devidas ao vento. No cálculo de esforços foram consideradas as seguintes variáveis: a altura da árvore e copa, a área de exposição ao vento, a intensidade do vento e a localização da árvore (tipo de edificação e a via de tráfego do logradouro). Os valores dos esforços solicitantes dependem dos fatores S1 (topográfico), S2 (altura e largura da árvore) e S3 relacionado com o tempo de recorrência de vento e probabilidade de

ocorrência, fixado em 2 e 5 anos, e da localização da árvore em relação ao tipo de edificação ou via de trânsito. Os 3 modos de ruptura considerados foram:

2.1 Fundação/arrancamento da raiz com o solo.

Neste caso, os modos de ruptura consistiram em deslizamento do conjunto raiz-solo, da estabilidade ao tombamento e da capacidade de carga. Esta avaliação foi realizada utilizando-se os seguintes parâmetros do solo: ângulo de atrito interno, coesão e densidade.

2.2 Transição tronco-raiz (colo).

Para analisar a ruptura na zona de transição tronco-raiz, utilizaram-se os parâmetros de resistência mecânica da secção sadia do tronco. As características geométricas da secção residual sadia foram calculadas em função do estado de sanidade das paredes internas avaliado por prospecção interna. Há duas maneiras de se considerar o efeito da deterioração biológica no cálculo da secção residual resistente: tronco com deterioração interna, o que dá a forma de um tubo vazado ou tronco com deterioração na parede externa com diminuição do diâmetro resistente. O mecanismo de ruptura levou em consideração a madeira, na situação de deterioração na parede externa, submetida à flexão e força normal.

2.3 Tronco

Para analisar a ruptura na região do tronco utilizaram-se os parâmetros de resistência e rigidez da secção sadia da madeira. O mecanismo de ruptura levou em consideração a madeira, na situação de deterioração na parede interna ou externa, dependendo da situação encontrada na prospecção do tronco. As tensões resultantes (compressão axial, flexão, cisalhamento por cortante, cisalhamento por torção, flexo-compressão e estabilidade à flambagem) foram comparadas às resistências de projeto. Neste modelo, houve uma atenuação do critério de ruptura da árvore por flambagem. Tipicamente, ocorre flambagem da árvore, segundo o modelo estrutural, quando o diâmetro do tronco é muito pequeno em relação à altura total e dimensões da copa. Considerando-se as características dendrométricas, árvores jovens são mais susceptíveis à flambagem. Ao

longo do tempo, o diâmetro do tronco aumenta mais acentuadamente que a altura do tronco e da copa, e assim, a esbeltez do tronco diminui e, conseqüentemente, o risco à flambagem.

3 Classificação da árvore quanto ao risco de queda

O risco de queda da árvore, considerado no modelo estrutural proposto pelo IPT, foi classificado nos seguintes níveis de alerta: mínimo, moderado e máximo.

3.1 Nível de alerta mínimo

Considerou-se com nível de alerta mínimo aquelas árvores com capacidade de resistir, com nível de segurança compatível com o EUROCODE 5, a ventos com velocidade correspondente a um tempo de recorrência ou retorno de 5 anos e variável em função da sua localização em relação ao tipo de edificação ou via de tráfego, considerada no fator S3. Este fator S3 está associado a um grau de risco ou probabilidade da velocidade do vento ser excedida, na média, uma vez em 5 anos.

Quando as árvores estiverem localizadas na zona de influência de uma edificação institucional ou tráfego de via rápida ou arterial, as mesmas devem resistir a uma velocidade de vento, cuja probabilidade de ser excedida na média uma vez em 5 anos é de 41% (S3 igual a 0,77).

Para árvores localizadas próximas a uma edificação residencial ou comercial ou tráfego de via coletora I e II, estas devem resistir a uma velocidade de vento cuja probabilidade de ser excedida na média uma vez em 5 anos é de 63% (S3 igual a 0,70).

Finalmente, se as árvores estiverem localizadas em um terreno sem construção, praças, parques ou áreas verdes ou tráfego de via local, as mesmas devem resistir a uma velocidade de vento cuja probabilidade de ser excedida na média uma vez em 5 anos é de 75% (S3 igual a 0,66).

3.2 Nível de alerta moderado

Considerou-se com nível de alerta moderado aquelas árvores com capacidade de resistir, com nível de segurança compatível com EUROCODE 5, a ventos com velocidade correspondente a um tempo de recorrência ou retorno do vento de 2 anos e

variável em função da sua localização em relação ao tipo de edificação ou via de tráfego, considerada no fator S3. Este fator S3 está associado um grau de risco ou probabilidade da velocidade ser excedida na média uma vez em 2 anos.

Quando as árvores estiverem localizadas na zona de influência de uma edificação institucional ou tráfego de via rápida ou arterial, as mesmas devem resistir a uma velocidade de vento cuja probabilidade de ser excedida na média uma vez em 2 anos é de 41% (S3 igual a 0,67).

Para árvores localizadas próximas a uma edificação residencial ou comercial ou tráfego de via coletora I e II, as mesmas devem resistir a uma velocidade de vento cuja probabilidade de ser excedida na média uma vez em 2 anos é de 63% (S3 igual a 0,60).

Finalmente, se as árvores estiverem localizadas em um terreno sem construção, praças, parques ou áreas verdes ou tráfego via de local, as mesmas devem resistir a uma velocidade de vento cuja probabilidade de ser excedida na média uma vez em 2 anos é de 75% (S3 igual a 0,57).

3.3 Nível de alerta máximo

Considerou-se com nível de alerta máximo aquelas árvores incapazes de resistir, com nível de segurança compatível com EUROCODE 5, a ventos, com velocidade correspondente a um tempo de recorrência ou retorno do vento de 2 anos e variável em função da sua localização em relação ao tipo de edificação ou tráfego, considerada no fator S3. Este fator S3 está associado um grau de risco ou probabilidade da velocidade ser excedida na média uma vez em 2 anos.

Quando as árvores estiverem localizadas na zona de influência de uma edificação institucional ou tráfego de via rápida ou arterial, as mesmas não resistiriam a uma velocidade de vento cuja probabilidade de ser excedida na média uma vez em 2 anos é de 41% (S3 igual a 0,67).

Para árvores localizadas próximas a uma edificação residencial ou comercial ou tráfego de via coletora I e II, as mesmas não resistiriam a uma velocidade de vento cuja probabilidade de ser excedida na média uma vez em 2 anos é de 63% (S3 igual a 0,60).

Finalmente, se as árvores estiverem localizadas em um terreno sem construção, praças, parques ou áreas verdes ou tráfego de via local, as mesmas não resistiriam a

uma velocidade de vento cuja probabilidade de ser excedida na média uma vez em 2 anos é de 75% (S3 igual a 0,57).

4 Considerações sobre o modelo de cálculo estrutural

Em árvores muito esbeltas podem ocorrer fenômenos aeroelásticos provocados pelo vento na estrutura, consequência do efeito dinâmico causado pelo modo de vibração da árvore frente à frequência de rajadas do vento; este fator não foi incorporado no modelo estrutural. O peso causado pela chuva foi outro fator não considerado, pois o índice de retenção de água da chuva depende da geometria e do tipo de superfície das folhas. Entretanto, no cálculo do peso próprio da árvore foi considerada a situação onde o lume das células da madeira (troncos e galhos) fosse totalmente preenchido de água.

Admitiu-se, também, que ao longo do período de tempo considerado no modelo estrutural (5 anos), as características dendrométricas e o estado de sanidade biológica das árvores permaneceriam constantes, o que na prática não ocorre.

Outras variáveis precisam, também, ser consideradas na análise de risco de queda das árvores, pois podem introduzir incertezas decorrentes da imprecisão na avaliação dos diferentes parâmetros utilizados no cálculo estrutural, sendo:

1. Os parâmetros de resistência e rigidez foram estimados a partir da densidade de massa de referência de determinada árvore, portanto esses parâmetros podem introduzir incertezas nos resultados do cálculo.
2. Os parâmetros da secção transversal sadia da árvore foram calculados com base na avaliação da parede sadia obtida por interpretação dos resultados das prospecções internas, em diferentes posições no colo, portanto trazem incertezas na espessura da parede sadia.
3. A estimativa do índice de fechamento da copa, responsável direto pelo cálculo da área exposta ao vento.
4. coeficiente de arrasto que se relaciona com as diferentes geometrias e superfícies das folhas das árvores.

5. Os parâmetros de solo foram adotados considerando-se os valores médios obtidos em sondagens na cidade de São Paulo e podem não retratar a situação de plantio de cada árvore.
6. As condições de permeabilidade do solo variam também de árvore para árvore em função da localização, fato que poderia influenciar no enraizamento, bem como na variação da resistência do solo com a chuva.
7. Os parâmetros de modelagem da raiz foram baseados na observação de árvores caídas, cujo sistema radicular foi exposto. Não se conhecem as características das raízes das diferentes árvores analisadas.
8. As simplificações na geometria do tronco e da copa necessárias no modelo estrutural para tornar possível o cálculo de propriedades geométricas da secção transversal.
9. Efeito de afunilamento do vento no local onde a árvore se situa não foi considerado, pois os dados não existem.
10. Enfim, vale ressaltar que trata-se de um modelo e que envolve algumas incertezas desconhecidas na determinação dos seus parâmetros e algumas análises subjetivas, considerando tratar-se de um ser vivo – a árvore.

Anexo C - Modelo estatístico para a análise de risco de queda

Regressão Linear Múltipla

Regression Summary for Dependent Variable: RQ2 (detdaprq.sta)

R= 0,73278609

R²= 0,53697545

Adjusted R²= 0,53228660

F(4,395)=114,52; p<0,0000; Std.Error of estimate: 0,25103

N = 400	BETA	St. Erro. of Beta	B	St. Err. of B	t(395)	p-level
Intercept			1,073877	0,051963	20,66626	0,000000
DAP	-0,118727	0,038623	-0,280445	0,091230	-3,07403	0,002259
ARVFG	-0,001883	0,034859	-0,001465	0,027127	-0,05401	0,956953
ARVCS	-0,085195	0,035587	-0,069562	0,029056	-2,39404	0,017130
CLPORDET	0,795271	0,039366	0,014252	0,000705	20,20176	0,000000

ANEXO D - Exame macroscópico do lenho de tipuana

1 Árvore A - Rua Pombal, 198, Sumaré, SP (Figura 1)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios de 0,60 m e 0,34 m, respectivamente, com reentrâncias, caracterizando um formato irregular; uma lateral do torete cortado.

Apodrecimento do cerne correspondendo a 27% da área do torete. Delimitando a região do apodrecimento, foram notadas linhas escuras, interpretadas como uma barreira ao ataque dos fungos.

Foi observado, também, ataque de broca-de-madeira no lenho sadio, sendo que o inseto não foi encontrado para identificação.

Observações feitas durante a supressão:

Esta árvore apresentava as seguintes medidas dendrométricas: DAP = 0,60 m; altura total = 8,20 m; altura da primeira bifurcação = 2,93, diâmetro da copa = 7,10 m; ângulo de inclinação do tronco = 21 °. Raiz dobrada e apodrecida. Pequena abertura no colo, cujo lenho encontrava-se com apodrecimento intenso.

A deterioração interna do lenho foi observada até a altura da primeira bifurcação da árvore, reduzindo a sua porcentagem à medida que aumentava a altura do tronco.

Para os técnicos da PMSP, a decisão pela remoção foi baseada no intenso apodrecimento do cerne no colo, apodrecimento de raízes, aliados ao tamanho e inclinação da árvore.

Figura 1 - Árvore A: Rua Pombal, 198, Sumaré, SP. A: Face transversal mostrando porção externa do lenho sadio (a) e porção interna com apodrecimento do cerne (b) - escala = 0,20 m. B: Túnel de broca-de-madeira na porção do cerne sadio, sem atividade do inseto (setas) - escala = 0,02 m. C: Linha escura (seta) delimitando/separando o lenho apodrecido (a) do lenho sadio (b) - escala = 0,02 m

2 Árvore B - Rua Pombal, 97, Sumaré, SP (Figura 2)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios 0,60 m e 0,30 m, respectivamente.

Apodrecimento do cerne e ataque de cupim-subterrâneo, com vestígios de galerias, restrito ao lenho apodrecido e sem atividade do inseto; estes cupins consumiram o material lenhoso formando um oco interno. A deterioração interna correspondeu a 30% da área do torete. Delimitando a região do apodrecimento e ataque de cupins, foram observadas linhas escuras interpretadas como uma barreira a este processo de biodeterioração.

Foi observado, também, ataque de broca-de-madeira no lenho sadio, sendo que o inseto não foi encontrado para identificação.

Observações feitas durante a supressão:

Esta árvore apresentava as seguintes medidas dendrométricas: DAP = 0,60 m; altura total = 15,78 m; altura da primeira bifurcação = 3,25 m; diâmetro da copa = 9,68 m; ângulo de inclinação do tronco = 13°. Oco aberto com apodrecimento intenso.

A deterioração interna do lenho foi observada até a altura da primeira bifurcação da árvore, reduzindo a sua porcentagem à medida que aumentava a altura do tronco.

Para os técnicos da PMSP, a decisão pela remoção foi baseada na intensa deterioração interna no colo, aliada ao tamanho da árvore.

Figura 2 - Árvore B: Rua Pombal, 97, Sumaré, SP. A: Face transversal mostrando o lenho sadio (a) e o oco interno (b) - escala = 0,20 m. B: linha escura (seta) delimitando/separando o apodrecimento do cerne (a) do cerne sadio (b) - escala = 0,02 m. C: túnel de broca-de-madeira (seta), sem atividade do inseto, atacando o lenho sadio (escala = 0,02 m). D: Ataque de cupim-subterrâneo (seta) restrito ao lenho apodrecido, cujo material foi consumido, formando o oco interno no colo; linha escura (seta preta) delimitando/separando o lenho apodrecido do lenho sadio - escala = 0,10 m

3 Árvore C - Praça John Lennon, s/nº, Lapa, SP (Figura 3)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, entretanto com pouca exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios de 0,67 m e 0,25 m, respectivamente, com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Apodrecimento do cerne e do alburno, ou seja, todo o torete apresentava-se apodrecido pelo fungo *Ganoderma* sp. Ataque de cupim-subterrâneo foi observado no tecido apodrecido, mas próximo à medula da árvore.

Observações feitas "in loco" no dia da queda:

Esta árvore apresentava as seguintes medidas dendrométricas: DAP = 0,63 m; altura total estimada = 10,00 m e altura da primeira bifurcação = 4,10 m. Segundo morador, a árvore tinha cerca de 40 anos de idade.

Encontrado intenso ataque de fungo apodrecedor no colo da árvore e em todo o sistema radicular. Enormes corpos-de-frutificação foram coletados e identificados como *Ganoderma* sp..

No centro do tronco, restrito basicamente à região da medula, existia um ataque de cupins subterrâneos, *Coptotermes gestroi* (pequeno oco). Alados foram observados no tronco, além de soldados e operários. Estrutura de ninho foi encontrada no tronco e no solo. O ataque de cupins se estendia até a altura do DAP. O sistema radicular não estava exposto, mas totalmente apodrecido.

Segundo técnico da Subprefeitura da Lapa, a árvore já estava em declínio e estavam programando sua remoção. No momento do corte, observou-se que estava produzindo pouca goma vermelha. Portanto, foi considerada uma árvore morta. O apodrecimento intenso da raiz reitera esta observação.

A queda da árvore se deu no dia 03.08.2006, sem ventos ou chuva. Não ocorreu batida de automóvel.

O rompimento foi na transição colo/raiz, devido ao estágio avançado de apodrecimento nesta região.

Figura 3 - Árvore C: Praça John Lennon, s/nº, Lapa, SP. A: Face transversal mostrando o lenho totalmente apodrecido por *Ganoderma* sp. (escala = 0,20 m). B: detalhe do lenho apodrecido (a); linha escura delimitando apodrecimento (seta) - escala = 0,02 m. C: oco produzido pelo ataque de *C. gestroi* (a) com linhas escuras delimitando o ataque (seta) - escala = 0,02 m

4 Árvore D - Rua Valença, 169, Sumaré, SP (Figura 4)

Amostra do tronco, retirada a cerca de 0,30 m do solo, proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios 0,66 m e 0,35 m, respectivamente; com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Apodrecimento do cerne e ataque de cupim-subterrâneo, com vestígios de galerias e sem atividade do inseto, restrito ao lenho apodrecido. Injúria no colo com a exposição do lenho e deterioração incipiente (apodrecimento do alburno). A deterioração interna correspondeu a 65% da área do torete. Delimitando a região da deterioração interna, foram observadas linhas escuras interpretadas como uma barreira a este processo de biodeterioração. Foi observado, também, o ataque de broca-de-madeira no cerne sadio e no cerne apodrecido, sendo que o inseto não foi encontrado para identificação.

Observações feitas durante a supressão:

Esta árvore apresentava as seguintes medidas dendrométricas: DAP = 0,66 m; altura total = 9,45 m; altura da primeira bifurcação = 3,00 m; diâmetro da copa = 5,70 m; ângulo de inclinação do tronco = 8,6°. Oco aberto com apodrecimento intenso. O morador estimou uma idade superior a 35 anos para esta árvore

O colo encontrava-se intensamente apodrecido e com ataque de brocas-de-madeira e cupins-subterrâneos. Esta porção do colo não foi possível a coleta, pois o estado era intenso de deterioração. Observou-se, também, "dendrocirurgia" (cimento), que pode ter acelerado o processo de biodeterioração por fungos. No tronco, apodrecimento superficial em uma grande ferida; ataque de escolitídeos e/ou platipodídeos (besouros de ambrosia). O sistema radicular apodrecido.

A deterioração interna do lenho foi observada pelo menos até a altura do DAP.

Apesar do estado de sanidade descrito, a árvore ainda estava viva, produzindo seiva elaborada/goma. Aparentemente, a grande ferida no tronco e a "dendrocirurgia" foram os fatores que levaram ao estado de sanidade encontrado.

A árvore estava bastante instável, balançando com pequeno esforço.

Figura 4 – Árvore D: Rua Valença, 169, Sumaré, SP. A: Face transversal mostrando o lenho sadio (a) e a deterioração interna (b); apodrecimento do alburno associado à injúria (c) - escala = 0,20 m. B: ataque de cupim-subterrâneo (a), restrito à região apodrecida do lenho (escala = 0,10 m). C: ataque de fungos (a) e galerias de broca-de-madeira no lenho sadio e apodrecido (setas brancas); linhas escuras delimitando o apodrecimento do cerne e as galerias das brocas-de-madeira (setas pretas) - escala = 0,10 m

5 Árvore E - Avenida Mercedes, 830, Lapa, SP (Figura 5)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios de 0,89 m e 0,40 m, respectivamente, com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Apodrecimento do cerne correspondendo a 16 % da área do torete. Delimitando a região do apodrecimento, foram notadas linhas escuras, interpretadas como uma barreira ao ataque dos fungos.

Foi observado, também, ataque de cupim-subterrâneo (galerias) no lenho apodrecido.

Observações feitas "in loco" no dia da queda:

Esta árvore apresentava as seguintes medidas dendrométricas: DAP = 0,73 m; altura total estimada = 13,00 m; altura da primeira bifurcação = 4,45; diâmetro da copa estimado = 13,00 m² e inclinação do tronco = 13°. O sistema radicular possuía cerca de 0,60 m de profundidade e 3,00 m de diâmetro.

Raízes com apodrecimento; a maior raiz estava sadia (rompimento); uma raiz cortada (talvez na época de reforma do passeio) com apodrecimento intenso. Externamente, não foi encontrado vestígio ou ataque de cupim-subterrâneo no colo ou tronco.

Esta árvore teve sua queda no dia 09 de fevereiro de 2007 e sua ruptura se deu na fundação.

Figura 5 - Árvore E: Avenida Mercedes, 830, Lapa, SP. A: Face transversal mostrando o lenho sadio (a) e a deterioração com oco (b) - escala = 0,20 m. B: lenho com ataque de fungos (a), delimitado por linha escura (seta) - escala = 0,02 m. C: parede interna do oco com ataque de fungos (a) e galerias de cupim-subterrâneo (setas) - escala = 0,10 m

6 Árvore F - Avenida Pompéia, s/nº, Pompéia, SP (Figura 6)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada (pouca). Diâmetro e altura médios 0,63 m e 0,22 m, respectivamente; com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Apodrecimento do cerne e do alburno. Ataque de cupim-subterrâneo, com vestígios de galerias e sem atividade do inseto, restrito ao lenho apodrecido, formando um oco interno com o consumo do lenho. A deterioração interna correspondeu a 32% da área do torete. Delimitando a região da deterioração interna, foram observadas zonas de reação e linhas escuras interpretadas como barreiras ao processo de biodeterioração.

Observações feitas durante a supressão:

Esta árvore caiu sobre um carro no dia 26 de fevereiro de 2007, durante uma tempestade, causando graves ferimentos no motorista. O torete foi coletado pelos técnicos da subprefeitura da Lapa e, segundo suas informações, a ruptura se deu no colo da árvore; as raízes também estavam intensamente apodrecidas.

Não foram coletadas as medidas dendrométricas da árvore.

Figura 6 - Árvore F: Av. Pompéia, s/nº, Pompéia, SP. A: Face transversal mostrando o lenho sadio (a) o oco interno, causado pelo cupim-subterrâneo (b) e o apodrecimento do alburno (c) - escala = 0,20 m. B: ataque de cupim-subterrâneo (seta branca), restrito à região com apodrecimento; zona de reação (seta preta) - escala = 0,02 m. C: Linha escura (seta) delimitando/separando o cerne com ataque de fungos (apodrecimento do alburno) do cerne sadio (escala = 0,10 m)

7 Árvore G - Rua Traipu, s/nº, Lapa, SP (Figura 7)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios 0,95 m e 0,30 m, respectivamente; com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Foi observado apodrecimento do cerne com disposição difusa circundando a região de oco interno. O ataque de cupim-subterrâneo foi notado pela formação de galerias na região de oco interno, sem atividade, restrito ao tecido apodrecido. A deterioração interna correspondeu a 33% da área do torete. Delimitando a deterioração interna, foram observadas linhas escuras, interpretadas como uma barreira a este processo de biodeterioração.

Ataque de broca-de-madeira foi observado no lenho sadio e apodrecido, sendo que o inseto não foi encontrado para identificação.

Outras observações:

Os técnicos da PMSP não coletaram outras informações da árvore.

Figura 7 - Árvore G: Rua Traipu, s/nº, Lapa, SP. A: Face transversal mostrando o lenho sadio (a) (b) e deterioração interna e oco (b), causados por cupim-subterrâneo e fungos apodrecedores (escala = 0,20 m). B: túnel de broca-de-madeira (setas) no lenho sadio e no apodrecido - escala = 0,02 m. C: apodrecimento do cerne (a); linha escura (setas) delimitando/separando a deterioração interna do lenho sadio (c) - escala = 0,02 m

8 Árvore H - Rua Petrópolis, 179, Sumaré, SP (Figura 8)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios 1,25 m e 0,40 m, respectivamente; com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Foi observado apodrecimento do cerne. A deterioração interna, representada por um oco, correspondeu a 21 % da área do torete. Delimitando a deterioração interna, foram observadas linhas escuras, interpretadas como uma barreira a este processo de biodeterioração.

Outras observações feitas durante a supressão:

Esta árvore apresentava as seguintes medidas dendrométricas: DAP = 1,10 m; altura total = 15,78 m; altura da primeira bifurcação = 3,25 m; diâmetro da copa = 9,68 m; ângulo de inclinação do tronco = 13 °.

O colo estava sadio externamente. Quando do seu corte, observou-se que a árvore foi atacada por cupins-subterrâneos, cujo oco progredia até a primeira bifurcação.

A decisão de remoção foi por causa de fenda no tronco, causada pelo rompimento do galho da primeira bifurcação.

Figura 8 - Árvore H: Rua Petrópolis, 179, Sumaré, SP. A: dois pedaços do torete demonstrando a existência de um oco interno na árvore (escala = 0,2 m). B: cordão micelial de fungo apodrecedor na parede interna do oco (escala = 0,02 m). C: lenho sadio (a) no plano transversal do torete e lenho apodrecido (b) na parede interna do oco, delimitado por linha escura (seta) - escala = 0,10 m

9 Árvore J - Rua Bartira, 351, Pompéia, SP (Figura 9)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios 0,83 m e 0,45 m, respectivamente; com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Foi observado apodrecimento do cerne com disposição difusa circundando a região de oco interno. O ataque de cupim-subterrâneo foi notado pela formação de galerias na região de oco interno, sem atividade, restrito ao lenho apodrecido. A deterioração interna correspondeu a 36% da área do torete. Delimitando a deterioração interna, foram observadas linhas escuras, interpretadas como uma barreira a este processo de biodeterioração.

Ataque de broca-de-madeira foi observado no lenho sadio e apodrecido, sendo que o inseto não foi encontrado para identificação.

Outras observações feitas durante a supressão:

Externamente no colo, não foi observado nenhum processo de biodeterioração por fungos, brocas e/ou cupins. No tronco havia uma racha, que permitiu a visualização de um oco que se estendia por todo o tronco; um intenso ataque de cupins-subterrâneos foi observado no alburno (tronco) com alados.

A decisão de remoção foi por causa de fenda no tronco e pela grande inclinação da árvore, cujo tronco já estava apoiado em estrutura metálica da residência.

Figura 9 - Árvore J: Rua Bartira, 351, Pompéia, SP. A: Face transversal mostrando o lenho sadio (a) e o oco interno (b), devido à deterioração por fungos e cupins-subterrâneos (escala = 0,20 m). B: região com ataque de fungos (seta branca); ataque de cupim-subterrâneo restrito ao lenho apodrecido (a); linha escura delimitando/separando a deterioração do lenho sadio (seta preta) - escala = 0,02 m. C: lenho sadio (a) e linha escura, vista do interior do tronco (b e seta) - escala = 0,02 m. D: galerias de cupim-subterrâneo (escala = 0,10 m)

10 Árvore K - Subprefeitura da Lapa, SP (Figura 10)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios 0,73 m e 0,27 m, respectivamente; com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Foi observado apodrecimento do cerne com disposição difusa circundando a região de oco interno. O ataque de cupim-subterrâneo foi notado pela formação de galerias na região de oco interno, sem atividade, restrito ao lenho apodrecido. A deterioração interna correspondeu a 28 % da área do torete. Delimitando a deterioração interna, foram observadas linhas escuras, interpretadas como uma barreira a este processo de biodeterioração.

A deterioração interna também estava envolta por área de lenho escurecido, denominada de zona de reação. A zona de reação se localizava ao redor do ataque de fungos apodrecedores.

Ataque de broca-de-madeira foi observado no lenho sadio, sendo que o inseto não foi encontrado para identificação.

Outras observações:

Endereço desconhecido da árvore (dado perdido).

Figura 10 - Árvore K: Subprefeitura da Lapa, SP. A: Face transversal mostrando o lenho sadio (a), deterioração interna (b) por fungos apodrecedores e cupins-subterrâneos, com formação de oco (escala = 0,20 m). B: ataque de fungos (a); lenho sadio (b); linha escura (seta) delimitando/separando o lenho apodrecido do sadio (escala = 0,1m). C: linha escura de delimitação do apodrecimento na face interna de oco (setas); ataque intenso de fungos (a) e de cupim-subterrâneo (b) - escala = 0,02 m. D: túnel de broca-de-madeira (seta preta) no lenho sadio; zona de reação (seta branca); e ataque de fungo de podridão branca (a) - escala = 0,1m

11 Árvore L - Subprefeitura da Lapa, SP (Figura 11)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios 0,82 m e 0,24 m, respectivamente; com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Foi observado ataque de cupim-subterrâneo com formação de galerias na região de oco interno. A amostra também apresentava ataque de fungos apodrecedores, em regiões pequenas localizadas ao redor do oco interno, com linhas escuras delineando o apodrecimento.

O ataque por cupins-subterrâneos ocorreu em áreas deterioradas por ataque de fungos.

Ataque de broca-de-madeira foi observado no lenho sadio, sendo que o inseto não foi encontrado para identificação.

Outras observações:

Endereço desconhecido da árvore (dado perdido).

Figura 11 - Árvore L: Subprefeitura da Lapa, SP. A: Face transversal mostrando o lenho sadio (a), a deterioração interna (b) por fungos e cupins-subterrâneos e o oco. (escala = 0,20 m). B: túnel de broca de madeira com zona de reação ao redor (seta branca), delimitada por linhas escuras; ataque de cupim-subterrâneo no lenho apodrecido por fungos (a) - escala = 0,02 m. C: Ataque de fungos (a) delimitado por linhas escuras (seta preta) - escala = 0,02 m

12 Árvore X - Campus do IPT,SP (Figura 12)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios 0,60 m e 0,30 m, respectivamente, com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Não foi observado ataque de cupim-subterrâneo ou apodrecimento do cerne ou do alburno

Ataque de broca-de-madeira foi observado no lenho sadio, com linhas escuras demarcando o ataque destes insetos, que não foram encontrado para identificação.

Na porção interna da amostra uma região escurecido, denominada de zona de reação, delimitada por linha escura.

Outras observações:

A decisão pela retirada da árvore foi devido à sua grande inclinação e por se tratar de uma área de estacionamento e passagem de caminhões.

Os dados de dendrometria foram perdidos.

Figura 12 - Árvore Y: *Campus* IPT, SP. A: Face transversal mostrando o lenho sadio (a) e a zona de reação (b) - escala = 0,20 m. B: túnel de broca de madeira no lenho sadio (caneta) e linha escura delimitando a zona de reação e o lenho sadio - escala = 0,03 m.. C: túnel de broca próximo à medula, na zona de reação - escala = 0,02 m

13 Árvore Y - Campus do IPT,SP (Figura 12)

Amostra do colo (transição raiz-tronco), proveniente de árvore ainda viva, ou seja, com exsudação de seiva elaborada. Diâmetro e altura médios 0,58 m e 0,30 m, respectivamente, com reentrâncias, caracterizando um formato irregular.

Não foi observado ataque de cupim-subterrâneo ou apodrecimento do cerne ou do alburno

Ataque de broca-de-madeira foi observado no lenho sadio, com linhas escuras demarcando o ataque destes insetos, que não foram encontrados para identificação.

Outras observações:

A decisão pela retirada da árvore foi devido à sua grande inclinação e por se tratar de uma área de estacionamento e passagem de caminhões.

Os dados de dendrometria foram perdidos.

Figura 13 - Árvore Y: *Campus* IPT, SP. A: Face transversal mostrando o lenho sadio (escala = 0,20 m). B: túnel de broca de madeira no lenho sadio (caneta), delimitada por linhas escuras - escala = 0,03 m

Anexo E - Ensaios físicos e mecânicos do lenho de tipuana

Tabela 1 - Densidade aparente média dos padrões de lenho de tipuana, obtidas por densitometria de raio X

ÁRVORE AMOSTRA		DENSIDADE APARENTE (g/cm ³)						
		EXS	ZR	NS	PB _{INC}	PM _{INC}	PB _{INT}	PM _{INT}
A	1	-	-	0,8055	0,7158	0,6306	-	-
	2	-	0,7998	0,6892	-	-	0,5464	-
	3	-	-	0,7396	0,6700	-	0,3446	0,3950
B	1	-	-	0,8235	-	-	-	-
	2	-	-	0,7883	0,7180	-	-	-
	3	-	-	0,8215	-	-	0,4293	-
C	1	-	-	-	-	-	0,3768	-
	2	-	-	-	0,663	-	0,4638	-
D	1	-	-	-	0,6934	0,7399	0,3681	-
	2	-	-	0,9051	0,7218	-	-	-
	3	-	0,7950	0,8921	-	-	0,2635	-
	4	-	-	0,7130	-	-	0,3882	-
E	1	-	-	0,8708	0,5502	0,6324	-	-
	2	0,9322	-	0,9798	-	0,6947	-	0,2608
F	1	-	-	0,7435	0,6140	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	0,5515	-
	3	-	-	0,8402	-	-	-	-
G	1	-	-	0,7475	-	0,6835	-	0,5746
	2	-	-	0,7714	0,8310	-	-	0,4345
	3	-	-	0,6831	-	-	-	0,5451
J	1	-	-	0,9163	-	0,6473	-	-
	2	0,7639	0,8177	-	-	-	-	-
	3	1,0081	-	0,7977	0,6624	-	-	-
	4	1,0270	1,0985	0,9281	-	-	-	-
K	1	-	0,8480	0,7831	-	-	-	-
	2	0,7648	-	0,7365	-	-	-	-
	3	1,0256	1,1466	-	-	-	--	-
L	1	-	-	0,6840	0,5271	-	0,3995	-
	2	-	-	0,8643	0,6993	-	-	-
	3	-	-	0,8045	0,6412	-	-	-
X	1	0,7639	-	-	0,5476	-	-	-
	2	0,8139	-	-	0,6340	-	-	-
	3	0,9239	0,8050	-	-	-	--	-
	4	1,2542	1,0510	-	-	-	-	-
Y	1	1,1192	-	0,9489	-	-	-	-
	2	-	-	0,8038	-	-	-	-
	3	-	-	0,9013	-	-	-	-
	4	-	-	0,9240	-	-	-	-

Tabela 2 - Densidade de massa aparente, por imersão em mercúrio, tensão de ruptura, m média dos padrões de lenho de tipuana, obtidas por densitometria de raios X e imersão em mercúrio

Árvore	Nº. amostra	Padrão de lenho	Densidade de massa aparente (g/cm³)	
			Raios X	Imersão Hg
A	2	PB _{INT}	0,398	0,290
B	3	PB _{INT}	0,409	0,260
C	1	PB _{INT}	0,377	0,279
D	1	PB _{INC}	0,693	0,474
D	3	PB _{INT}	0,263	0,325
E	1	PM _{INC}	0,632	0,541
E	2	PM _{INT}	0,261	0,221
F	2	PB _{INT}	0,551	0,408
F	3	NS	0,764	0,616
G	1	NS	0,614	0,492
G	2	PM _{INT}	0,435	0,445
G	3	PM _{INT}	0,484	0,351
J	1	NS	0,916	0,606
J	2	EXS	0,764	0,601
L	2	PB _{INC}	0,699	0,556
L	3	NS	0,805	0,701
X	1	EXS	0,764	0,652
X	2	EXS	0,814	0,683
X	3	EXS	0,924	0,662
X	4	EXS	1,254	0,705
Y	1	NS	0,949	0,656
Y	1	EXS	1,119	0,710
Y	2	NS	0,804	0,662
Y	3	NS	0,901	0,686
Y	4	NS	0,924	0,699
E	1	NS	0,871	0,645
E	2	EXS	1,172	0,668
E	2	LN	0,897	0,607
J	3	EXS	1,008	0,610
J	3	NS	0,798	0,604
J	4	EXS	1,027	0,596
J	4	NS	0,928	0,556
K	2	EXS	0,765	0,754
X	1	ZR	0,857	0,655

Tabela 3 - Densidade de massa aparente (imersão em mercúrio), tensão de ruptura, módulo de elasticidade e modelo de falha dos padrões de lenho de árvores de tipuana

(continua)

Padrão de lenho	Árvore/amostra	Densidade aparente (g/m³)	Tensão de ruptura (MPa)	MOE (MPa)	Modelo de falha (*)
EXS	E2	0,657	75,76	5739,69	GI
EXS	E2	0,686	70,42	4919,78	GI
EXS	E2	0,679	68,01	5221,22	GI
EXS	E2	0,681	69,77	5084,75	GI
EXS	E2	0,678	58,10	4565,94	GI
EXS	E2	0,652	81,06	5241,55	GI
EXS	E2	0,667	70,19	4688,14	GI
EXS	E2	0,656	75,22	4259,53	GI
EXS	J2	0,569	65,57	5098,61	TS
EXS	J2	0,702	99,75	7746,06	-
EXS	J2	0,618	70,91	4735,98	GI
EXS	J3	0,617	85,46	5791,13	TS
EXS	J3	0,725	88,88	6614,22	TS
EXS	J3	0,598	77,50	6231,96	TS
EXS	J4	0,546	59,78	5148,60	TS
EXS	J4	0,613	79,51	6342,09	TS
EXS	J4	0,660	87,63	6090,78	TS
EXS	K2	0,757	110,66	9298,28	-
EXS	K2	0,750	106,99	9803,43	TS
EXS	X1	0,676	79,36	6042,44	GI
EXS	X1	0,691	74,36	5854,53	GI
EXS	X1	0,643	65,14	5932,38	GI
EXS	X3	0,713	105,74	7937,53	GI
EXS	X2	0,693	103,48	8166,71	TS
EXS	X3	0,632	59,44	2927,63	TS
EXS	X4	0,712	92,39	5904,72	GI
EXS	X4	0,648	60,74	3250,28	TS
EXS	Y1	0,721	97,26	6692,06	GI
EXS	Y1	0,721	87,97	6286,97	TS
EXS	Y1	0,695	77,83	5732,63	TS
EXS	Y1	0,700	50,58	4008,65	TS
EXS	Y1	0,724	85,47	5811,77	GI

Tabela 3 - Densidade de massa aparente (imersão em mercúrio), tensão de ruptura, módulo de elasticidade e modelo de falha dos padrões de lenho de árvores de tipuana

(continuação)

Padrão de lenho	Árvore/amostra	Densidade aparente (g/m³)	Tensão de ruptura (MPa)	MOE (MPa)	Modelo de falha
EXS	Y1	0,728	96,33	6523,16	TS
EXS	Y1	0,727	80,09	5487,98	GI
EXS	Y1	0,676	67,58	4713,11	TS
NS	E1	0,634	80,64	7027,51	TS
NS	E1	0,656	93,04	7131,76	TS
NS	E2	0,625	55,79	3689,69	GI
NS	E2	0,620	69,37	4668,51	GI
NS	E2	0,593	63,50	4140,69	GI
NS	F3	0,602	42,95	4297,81	GI
NS	F3	0,624	50,97	5828,28	GI
NS	F3	0,601	50,83	4554,37	GI
NS	F3	0,600	48,36	4311,01	GI
NS	F3	0,650	49,24	3275,09	GI
NS	G1	0,428	60,83	4714,78	GI
NS	G1	0,383	61,76	4828,81	TS
NS	G1	0,590	62,34	4247,61	GI
NS	G1	0,567	64,99	4703,13	GI
NS	G3	0,560	57,28	4673,60	GI
NS	J1	0,626	68,73	4914,41	TS
NS	J1	0,586	52,37	4205,53	TS
NS	J3	0,590	65,82	5128,80	TS
NS	J3	0,605	52,82	4529,20	TS
NS	J4	0,582	74,16	5596,76	TS
NS	L3	0,723	94,74	6930,53	GI
NS	L3	0,696	71,57	5523,07	GI
NS	L3	0,696	70,44	5217,33	GI
NS	L3	0,691	51,54	3960,75	GI
NS	X1	0,463	41,11	3707,49	TS
NS	X1	0,503	53,63	4441,84	TS
NS	X1	0,423	37,45	2238,65	TS
NS	X1	0,491	57,12	3753,74	GI
NS	X1	0,482	54,05	3918,64	GI

Tabela 3 - Densidade de massa aparente (imersão em mercúrio), tensão de ruptura, módulo de elasticidade e modelo de falha dos padrões de lenho de árvores de tipuana

(continuação)

Padrão de lenho	Árvore/amostra	Densidade aparente (g/m³)	Tensão de ruptura (MPa)	MOE (MPa)	Modelo de falha
NS	Y1	0,659	63,61	4135,21	TS
NS	Y1	0,633	59,90	3832,48	TS
NS	Y2	0,662	62,68	3740,48	GI
NS	Y3	0,723	77,36	4810,96	TS
NS	Y4	0,743	94,34	5130,18	GI
NS	Y4	0,734	54,70	4649,64	GI
ZR	X1	0,668	84,16	6306,50	GI
ZR	X1	0,642	85,99	6778,39	GI
ZR	X2	0,597	70,63	5704,51	TS
ZR	X2	0,654	87,34	6640,12	TS
ZR	X2	0,714	103,11	7962,34	TS
ZR	X2	0,615	73,60	5735,22	GI
ZR	X2	0,668	94,39	7691,28	TS
ZR	X2	0,632	84,29	7249,56	TS
ZR	X3	0,454	53,16	5906,95	-
ZR	X3	0,599	71,65	5216,18	TS
ZR	X3	0,639	73,81	5421,14	GI
ZR	X3	0,692	75,74	5410,11	TS
ZR	X3	0,680	87,48	6498,18	GI
ZR	X4	0,738	93,49	6474,53	TS
ZR	X4	0,669	89,41	6791,96	TS
ZR	X4	0,633	87,68	6027,21	TS
ZR	X4	0,692	96,71	7051,48	TS
ZR	X4	0,661	84,53	6650,75	TS
ZR	X4	0,726	95,75	7245,52	GI
PB _{INC}	D1	0,448	29,10	1978,06	TS
PB _{INC}	D1	0,453	28,40	2207,97	TS
PB _{INC}	D1	0,470	21,82	1962,13	TS
PB _{INC}	D1	0,494	25,74	2183,96	TS
PB _{INC}	D1	0,440	17,87	1362,59	TS
PB _{INC}	D1	0,504	25,18	2158,15	TS
PB _{INC}	D1	0,467	19,66	2102,25	TS

Tabela 3 - Densidade de massa aparente (imersão em mercúrio), tensão de ruptura, módulo de elasticidade e modelo de falha dos padrões de lenho de árvores de tipuana

(continuação)

Padrão de lenho	Árvore/amostra	Densidade aparente (g/m³)	Tensão de ruptura (MPa)	MOE (MPa)	Modelo de falha
PB _{INC}	D1	0,502	27,49	2077,54	TS
PB _{INC}	D1	0,492	32,91	2587,67	TS
PB _{INC}	L2	0,549	33,84	2651,47	TB
PB _{INC}	L2	0,568	29,50	2332,86	TS
PB _{INC}	L2	0,579	30,63	2739,34	TB
PB _{INC}	L2	0,585	43,12	3584,01	TB
PB _{INC}	L2	0,564	20,81	1792,48	TS
PB _{INC}	L2	0,551	34,30	2613,11	TB
PB _{INC}	L2	0,493	28,08	1589,48	TB
PB _{INT}	A2	0,302	2,42	293,70	TB
PB _{INT}	A2	0,268	4,11	282,48	TL
PB _{INT}	A2	0,302	1,62	218,25	TB
PB _{INT}	A2	0,278	2,14	198,13	L
PB _{INT}	A2	0,309	2,88	291,89	TB
PB _{INT}	A2	0,277	2,72	283,66	TS
PB _{INT}	A2	0,286	2,74	328,59	TS
PB _{INT}	A2	0,302	3,59	334,96	L
PB _{INT}	B3	0,318	7,05	860,03	TS
PB _{INT}	B3	0,222	1,32	128,50	TS
PB _{INT}	B3	0,285	1,31	176,10	TS
PB _{INT}	B3	0,215	4,67	380,55	TS
PB _{INT}	C1	0,272	3,52	497,09	TS
PB _{INT}	C1	0,264	3,30	396,78	TS
PB _{INT}	C1	0,286	1,96	226,49	TS
PB _{INT}	C1	0,255	2,74	413,36	TS
PB _{INT}	C1	0,304	10,07	1242,99	TS
PB _{INT}	C1	0,292	3,69	482,31	TS
PB _{INT}	D3	0,325	10,63	797,97	TS
PB _{INT}	D3	0,339	14,15	830,83	TS
PB _{INT}	D3	0,321	12,64	995,27	TS
PB _{INT}	D3	0,324	3,73	415,16	TS
PB _{INT}	D3	0,315	11,17	939,24	TS

Tabela 3 - Densidade de massa aparente (imersão em mercúrio), tensão de ruptura, módulo de elasticidade e modelo de falha dos padrões de lenho de árvores de tipuana

(conclusão)

Padrão de lenho	Árvore/amostra	Densidade aparente (g/m³)	Tensão de ruptura (MPa)	MOE (MPa)	Modelo de falha
PB _{INT}	E2	0,197	4,48	543,32	TB
PB _{INT}	E2	0,234	1,34	128,37	TS
PB _{INT}	E2	0,215	1,17	122,12	TS
PB _{INT}	E2	0,234	1,07	144,05	TS
PB _{INT}	E2	0,223	4,41	439,96	TS
PB _{INT}	F2	0,381	5,88	1189,48	GI
PB _{INT}	F2	0,397	7,22	1147,10	GI
PB _{INT}	F2	0,421	5,71	1268,76	GI
PB _{INT}	F2	0,427	1,85	720,40	GI
PB _{INT}	F2	0,388	6,19	1545,93	TS
PB _{INT}	F2	0,433	5,09	1168,82	GI
PM _{INT}	G2	0,315	6,85	611,90	TB
PM _{INT}	G2	0,550	19,46	1429,72	TB
PM _{INT}	G2	0,410	24,38	1956,20	TB
PM _{INT}	G2	0,374	5,46	602,71	TB
PM _{INT}	G2	0,523	15,87	1452,90	TB
PM _{INT}	G2	0,497	18,31	1284,36	TB
PM _{INT}	G3	0,367	5,46	622,05	TB
PM _{INT}	G3	0,318	7,81	702,59	TB
PM _{INT}	G3	0,303	6,80	696,05	TB
PM _{INT}	G3	0,415	19,52	1182,74	TB

(*) - TS - tração simples; TB - tração abrupta; GI - grã inclinada; L - "lascamento"

Anexo F - Distribuição de tensões no lenho de tipuana

Método de elementos finitos

1 Parâmetros biológicos

Características dendrométricas: foram utilizados os valores médios dos atributos observados nas tipuanas da cidade de São Paulo, sendo: DAP de 0,60 m; altura total de 12,71m; diâmetro, área e índice de fechamento da copa de 9,75 m, 32,44 m² 36 %, respectivamente.

Estado de sanidade biológica: os seguintes estados de sanidade biológica foram considerados: A - lenho normal e sadio (NS); B - podridão branca incipiente (PB_{INC}); C - podridão branca intensa (PB_{INT}).

Estratégia de apodrecimento: duas estratégias foram consideradas, sendo: A - árvore com apodrecimento do cerne e; B - árvore com apodrecimento do cerne e um oco com abertura externa de 105 ° e altura de 2 metros, a partir do colo. Esta abertura foi definida por Smiley; Fraedrich (1992) como crítica para ruptura de árvores.

Deterioração do lenho: em relação à área transversal do tronco, as seguintes porcentagens de deterioração foram analisadas: A - 0 % (lenho sadio); B - 16 %; C - 66 % e; D - 100 % (lenho totalmente apodrecido).

2 Parâmetros de cálculo

Convenção de eixos e direções: direção 1 = eixo x; direção 2 = eixo y; direção 3 = eixo z (Figura 1).

Carregamento: força foi aplicada na direção do eixo x; F =1000 kgf, vento de aproximadamente 110 km/h.

Elementos finitos: a árvore foi dividida em 10 partes de 1 m de altura cada; a secção transversal do tronco foi dividida em 10 anéis, e em 24 setores circulares de 15 graus cada; a secção transversal tem 240 elementos (24 setores x 10 anéis); a árvore toda tem 2400 elementos (10 camadas x 24 setores x 10 anéis). Da árvore com oco aberto foram excluídos 7 setores, correspondendo a 105° nas 2 primeiras camadas, sendo o total de elementos de 2260.

Tensão: S3-3 é a tensão normal na direção paralela às fibras da madeira; S1-3 é a tensão de cisalhamento na direção radial.

Propriedades do lenho:

E1, E2, E3 (módulo de elasticidade)

G1-2 = G1-3 = G2-3 (módulo de cisalhamento)

$\nu_{1-2} = \nu_{1-3} = \nu_{2-3}$ (coeficiente de poisson)

$$E_2 = E_3 = E_1 / 20 \text{ (*)}$$

$$G_{1-2} = G_{1-3} = E_1 / 14,5 \text{ (*)}$$

$$G_{2-3} = G_{1-2} / 9 \text{ (*)}$$

(*) - aproximação baseada em Bodig; Jayne (1992)

OBS.: o material foi considerado transversalmente isotrópico nas direções 2 e 3, pois os valores de E e G são muito próximos para esses 2 sentidos, porém longitudinalmente, sentido 1, ele não pode ser considerado isotrópico pois as variações de E e G são muito maiores.

Propriedade	PB _{INT}	PB _{INC}	NS
E1	570 MPa	2250 MPa	4640 MPa
E2=E3	28,5 MPa	112,5 MPa	232 MPa
$\nu_{1-2} = \nu_{1-3}$	0,021	0,021	0,021
ν_{2-3}	0,57	0,57	0,57
G1-2=G1-3	39,5 MPa	155 MPa	320 MPa
G2-3	4,5 MPa	17 MPa	35 MPa

Figura 1 - Convenção de eixos na análise de elementos finitos