



FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

MÔNICA RUY

**MODELAGEM DO COMPORTAMENTO BIOMECÂNICO DE
ÁRVORES**

MODELING THE BIOMECHANICAL BEHAVIOR OF TREES

Campinas

2020

MÔNICA RUY

**MODELAGEM DO COMPORTAMENTO BIOMECÂNICO DE
ÁRVORES**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, na Área de Métodos Não Destrutivos Aplicados a Materiais, Estruturas e Árvores

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Raquel Gonçalves

Co-Orientador: Prof. Dr. William Martins Vicente

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELA ALUNA MÔNICA
RUY, E ORIENTADA PELA PROFA.
DRA.RAQUEL GONÇALVES.

Campinas

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

R944m Ruy, Mônica, 1990-
Modelagem do comportamento biomecânico de árvores / Mônica Ruy. –
Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Raquel Gonçalves.
Coorientador: William Martins Vicente.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Agrícola.

1. Biomecânica. 2. Método de elementos finitos. I. Gonçalves, Raquel,
1961-. II. Vicente, William Martins, 1980-. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Modeling the biomechanical behavior of trees

Palavras-chave em inglês:

Biomechanics

Finite element method

Área de concentração: Métodos Não Destrutivos Aplicados a Materiais, Estruturas e
Árvores

Titulação: Doutora em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Raquel Gonçalves [Orientador]

Manuel Guaita Fernandez

Cinthy Bertoldo Pedroso

Guillermo Iñiguez González

Takashi Yojo

Data de defesa: 21-02-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-5200-1871>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/4213810494617048>

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Mônica Ruy**, aprovada pela Comissão Julgadora em 21 de fevereiro de 2020, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Raquel Gonçalves – Presidente e Orientador

Dr. Manuel Guaita Fernandez – Membro Titular

Dr. Cinthya Bertoldo Pedroso – Membro Titular

Faculdade de Engenharia Agrícola
Unicamp

Dra. Guillermo Iñiguez González – Membro Titular

Dr. Takashi Yojo – Membro Titular

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do discente.

Dedico esse trabalho a cada
pessoa que deixei para trás
quando resolvi mudar de
vida, sobretudo a meus
amados pais, Benedito e
Isabel, e ao Fernando.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo à vida por cada oportunidade que colocou no meu caminho, por me dar forças para seguir conquistando meus objetivos e, principalmente, por cada pessoa que tive o privilégio de conhecer e de ter na minha trajetória.

Agradeço à Raquel Gonçalves, orientadora e amiga, exemplo de ser humano pessoal e profissionalmente. Quanta sorte de te ter como inspiração. Vou sempre repetir: a vida acadêmica seria muito mais fácil se todos tivessem o privilégio de ser orientados por alguém como você. Esse trabalho não existiria se não fosse você.

Agradeço à minha família (número um): meus pais (Isabel e Benedito), meu irmão (Bruno) e o Fernando (não consigo não te considerar parte dos meus). O apoio de vocês sempre foi essencial para cada barreira que eu tive que enfrentar. O amor e carinho que tenho por vocês me dá, cada dia, forças para seguir lutando por meus objetivos.

Agradeço meus companheiros – amigos – do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LabEND) da Feagri: Rafael, Nádia, Ingrid, Gustavo, Douglas e Gabriela. Além de toda a ajuda para a realização do trabalho, vocês sempre fizeram meus dias mais felizes.

Agradeço ao Prof. Dr. Manuel Guaita e toda a equipe do PEMADE que me deu tanto apoio nos últimos meses. Em especial ao José Antonio, por dedicar tempo para me ensinar princípios que necessitava para o desenvolvimento desse projeto; à Belém e à Maria, que desde antes de eu chegar em Lugo me dão todo o suporte que preciso.

Agradeço à minha segunda família, que Lugo me deu: Helga, Dani e André. Obrigada por me aceitarem e por cada momento compartilhado. Vocês são demais.

Agradeço a tantos amigos especiais que entraram na minha vida e que estiverem ao meu lado nos últimos meses, me ajudando a enfrentar todas essas mudanças: Marcel, Diego, Geuza, Thaís, Fran, Ana, Daniela. Obrigada.

Agradeço aos meus amigos de sempre, que vem compartilhando minhas conquistas há anos e que fazem parte importante da minha vida: Aman, Dani, Giu, Iara, Carol, Maitê, André, Rodolfo, Gustavo.

Agradeço a uma das melhores coisas que me aconteceu no último ano: meu anjinho de quatro pernas, Aura. Quantas horas estive ao meu lado enquanto eu lutava contra o computador.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por financiar minha Bolsa de Estudos de Doutorado (08/2016 a 08/2018) - Código de Financiamento 001 - e por bolsa através do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (09/2018 a 02/2019) – Processo 88881.189004/2018-01.

*“A ciência nunca resolve
um problema sem criar
pelo menos outros dez”*

George Bernard Shaw

RESUMO

O gerenciamento da análise de risco de queda de árvores envolve conhecimento multidisciplinar, incluindo biologia e engenharia. Assim, a biomecânica tem sido utilizada para aliar aspectos biológicos (características de crescimento, anatomia das árvores e agentes de biodeterioração) ao comportamento mecânico de árvores. Esta pesquisa teve como objetivo geral verificar se, utilizando conceitos de biomecânica e de elementos finitos (MEF), é possível propor modelo estrutural para descrever, de forma aproximada, o comportamento de árvores. Para atingir o objetivo inicialmente foi realizada, para espécies mais usualmente utilizadas na arborização urbana do estado de São Paulo, caracterização da dendrometria de tronco e de galhos e levantamento de adaptações (tigmomorfogênese) mais frequentemente verificadas, as quais foram utilizadas na concepção e avaliação do modelo. O segundo passo foi avaliar efeitos de relações dendrométricas no comportamento estrutural de árvores, para detectar os parâmetros que mais afetam a estabilidade e as tensões às quais a mesma está submetida, permitindo focar a avaliação dos modelos utilizando esses aspectos. Na etapa final, modelos com níveis de complexidade crescentes foram propostos por meio do MEF. Esses modelos foram avaliados utilizando resultados de ensaio de campo (*pulling test*) e comportamento esperados, pela literatura, para a distribuição de tensões. No modelo final adotado foram testadas incorporações de áreas deterioradas no fuste. Considerando a complexidade desse indivíduo (árvore), os resultados permitem concluir que o modelo proposto nesta pesquisa permite avanços importantes em análises de risco de queda, uma vez que é possível utilizar propriedades diferenciadas para a madeira de raízes, fuste e galhos, assim como propriedades para o solo. Além disso, o modelo também permite simular a inclusão de diferentes tipos e dimensões de deterioração e de tigmomorfogênese produzida pelas árvores.

Palavras-chave: biomecânica, dendrometria, tigmomorfogênese, método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Managing tree risk analysis involves multidisciplinary knowledge, including biology and engineering. Thus, biomechanics has been used to combine biological aspects (growth characteristics, tree anatomy and biodeterioration agents) with the mechanical behavior of trees. This research had, as general objective, to verify if using concepts of biomechanics and finite elements (FEM), it is possible to propose structural model to describe, in an approximate way, the behavior of trees. To achieve the objective, initially it was performed, for species most commonly used in urban afforestation in the São Paulo state, characterization of the trunk and branch dendrometry and survey of adaptations (tigmomorphogenesis) most frequently verified which were used in the design and evaluation of the model. The second step was to evaluate the effects of dendrometric relationships on the structural behavior of trees, in order to detect the parameters that most affect the stability and stresses to which it is subjected, allowing to focus on the evaluation of the models using these aspects. In the final step, models with increasing levels of complexity were proposed through the MEF. These models were evaluated using results of field tests (*pulling test*) and behavior expected, by the literature, for the distribution of stresses. In the final model adopted, incorporations of deteriorated areas in the stem were tested. Considering the complexity of this individual (tree), the results allow us to conclude that the model proposed in this research allows important advances in risk analysis of tree fall, since it is possible to use different properties for the roots, stem and branches wood, as well as properties to the soil. In addition, the model also allows simulating the inclusion of different types and dimensions of deterioration and tigmomorphogenesis produced by trees.

Key words: biomechanics, dendrometry, tigmomorphogenesis, finite element method

SUMÁRIO

1. Introdução Geral	12
2. Artigo 01: Characterization of trunk and branch dendrometry and of the most common thigmomorphogenesis responses of urban afforestation species	14
Abstract.....	15
Introduction	16
Material and Methods	18
Results and Discussion	22
Conclusions	30
References	31
3. Artigo 02: Effect of dendrometric relationships on the behavior of trees for biomechanical studies.....	34
Abstract.....	35
Introduction	36
Material and Methods.....	37
Results and Discussion	42
Conclusions	55
References	56
4. Artigo 03: Proposta de modelo estrutural representativo do comportamento de árvores	58
Resumo	59
Introdução.....	60
Material e métodos	62
Resultados.....	69
Conclusões.....	83
Referências Bibliográficas.....	84
5. Discussão Geral	87
6. Conclusões Gerais	92
7. Referências Bibliográficas.....	94

1. Introdução Geral

As mudanças climáticas e os eventos extremos resultantes das mesmas têm ocasionado grande número de quedas de árvores, muitas vezes com resultados trágicos. Assim, a análise do risco de queda de árvores é, atualmente, tema fundamental em termos de segurança e de preservação da arborização nos espaços urbanos.

No entanto, análises simplistas e imediatistas não permitem chegar a resultados de risco conclusivos e viáveis para serem transferidos para a comunidade. A complexidade da análise do risco de queda está no fato de o diagnóstico envolver muitos aspectos biológicos (relações dendrológicas, capacidade adaptativa e de resiliência de árvores, agentes biodeterioradores com seus respectivos sintomas e consequências), mas também aspectos mecânicos (ações externas atuantes em árvores e consequentes esforços solicitantes, propriedades mecânicas da madeira saturada das diferentes regiões que compõe a árvore (fuste, galhos e raízes), respostas envolvendo a estabilidade dessa estrutura).

Modelos estruturais são ferramentas poderosas para avaliar o comportamento mecânico de estruturas e têm sido muito utilizados em seu dimensionamento. Esses modelos permitem inferir e antecipar o conhecimento do comportamento de estruturas frente a esforços e, assim, prever sua ruína. Assim, apesar da grande complexidade envolvida no comportamento de árvores, tais modelos, com incorporação de adaptações, poderiam ser também utilizados para simular, de forma simplificada, o comportamento de árvores, viabilizando a inferência do risco de queda frente à cargas de vento (principal ação em árvores), parâmetros dendrométricos (altura, relação altura/diâmetro, conicidade etc.), perdas de resistência provocadas por biodeterioração ou instabilidades provocadas por problemas no enraizamento, dentre outras.

Árvores podem ser consideradas, simplificada, estruturas com esquema estático engastado-livre e sujeitas a cargas gravitacionais e de vento. No entanto, mesmo com essa simplificação, são muito mais complexas do que as estruturas convencionais, por serem seres biológicos, vivos e com grande resiliência e capacidade adaptativa para suportar os esforços aos quais são submetidas. Essas características peculiares fazem com que o comportamento da ruptura da madeira de árvores, frente a esforços, seja diferente do comportamento da madeira seca, usual em estruturas de madeira. Galhos e fuste de

árvores podem sofrer grandes deflexões, superando muito o trecho linear de elasticidade, e ainda continuarem estáveis. Assim, há que ser consciente que modelar o comportamento de árvores é um desafio complexo, não sendo esperados níveis elevados de acurácia. Por outro lado, diante de tantas incertezas que permeiam a inferência do risco de queda de árvores, atingir uma aproximação que auxilie essa importante tarefa pode ser considerada contribuição científica valiosa.

Considerando os aspectos mencionados, o objetivo geral dessa pesquisa foi verificar se, utilizando conceitos de biomecânica e de elementos finitos (MEF), é possível propor modelo estrutural para descrever, de forma aproximada, o comportamento de árvores.

Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos foram:

- Caracterizar a morfologia externa e a arquitetura média, bem como as adaptações morfológicas (Tigmomorfogênese) mais comuns em espécies usuais na arborização urbana do Estado de São Paulo.
- Avaliar o efeito de parâmetros dendrométricos de árvores (altura, esbeltez e conicidade), submedidas a cargas gravitacionais e de vento, no deslocamento e nas tensões às quais a árvore está submetida, utilizando modelo desenvolvido com uso de Método dos Elementos Finitos.
- Estudar, propor e testar modelo estrutural que permita inferir o comportamento da árvore frente aos carregamentos, iniciando por modelos simplificados e madeira íntegra e progredindo para modelos mais complexos, com incorporações de deteriorações e adaptações morfológicas.

A tese foi redigida em formato alternativo, sendo o corpo do texto composto por três artigos, os quais foram elaborados para alcançar os objetivos específicos propostos. A Introdução, Discussão e Conclusões Gerais permitem visualizar, juntamente com os artigos, a tese proposta para o desenvolvimento desta pesquisa em nível de doutorado e os resultados alcançados.

2. Artigo 01: Characterization of trunk and branch dendrometry and of the most common thigmomorphogenesis responses of urban afforestation species

Submetido ao periódico **Trees**

Characterization of trunk and branch dendrometry and of the most common thigmomorphogenesis responses of urban afforestation species

Mônica Ruy, Raquel Golçalves, Gustavo Henrique Garcia Lopes, Hendricus Hüge

Abstract

The dendrometric characteristics of trunks and branches are important in biomechanical analysis, particularly in studies involving numerical simulation models. In these models, it is generally necessary to use simplifications for proposing the structural scheme of trees. So, it is necessary to understand some of the dimensional relationships involved in this structure. In addition, trees are living elements and have great adaptation capacity (thigmomorphogenesis), which are important symptoms to better understand their behavior and resilience. The objective of this paper was to present the dendrometric characteristics of trunks, branches and canopies of the species *Handroanthus pentaphylla*, *Cenostigma pluviosum*, *Tipuana tipu*, *Schinus molle*, *Caesalpinia ferrea* and *Schinus terebinthifolius* and also to carry out a survey of the main thigmomorphogenesis responses of some of these species. The mean height of the species varies between 5.3 m and 11.7 m; their slenderness (height to diameter at breast height ratio), between 13.1 and 23.4, and the ratio between canopy height and tree height, between 0.65 and 0.86. The taper of the trunk shows great variation within the species (0.04 to 0.11), in contrast to the taper of the branches, which does not greatly vary between species and does not vary at all between branching levels within the same species. The branches' branching angle does not vary at the different levels, but does vary between species, ranging from 63.2° to 82.2°. The most common compensation mechanisms of the studied species are longitudinal cracks (33%) and the inclusion of bark (31%).

Keywords: tree height, tree taper, tree thinness, branch taper, branch branching angle, compensation mechanisms

Introduction

Urban afforestation has been assigned increasingly greater value, due to the beneficial effects it provides to communities, and is no longer seen only as ornamental, but as functional, seeing as green areas play an important role in retaining the water in the atmosphere, contributing to evapotranspiration and acting as a filter in the retention of pollution (Kontogianni *et al.*, 2011). However, this afforestation must be monitored, in order to avoid accidents with falling branches or trees, as well as interference in urban equipment. For this reason, there are currently many studies proposing methodologies for inferring the risk of trees falling, from visual analysis to the application of models that allow simulating the behavior of trees in relation to the efforts to which they are submitted. Brüchert and Gardiner (2006) cite different authors who show the importance of establishing a relationship between the architecture (shape) and the biomechanics of the tree in the definition of its risk of falling.

Dendrometry is a branch of biology that studies the dimensions of plants. In trees, these data are more abundant for the trunk, for which the quantification of biomass has greater commercial importance. However, in a tree biomechanics study aimed at analyzing the risk of falling, more general dendrometric parameters, also involving branches and roots, are important, as they are related to the tree's stability (Kontogianni *et al.*, 2011; Coder, 2007; Peltola *et al.*, 2000).

Trees are biologically designed to support the medium loads to which they are subjected, such as their own weight, wind and snow (Coder, 2007). This ability to support loads is explained by natural selection, and also by the tree's adaptation mechanisms, called thigmomorphogenesis (Kontogianni *et al.*, 2011; Moore e Maguire, 2004; Gardiner, 1995).

The wind is considered the most important load related to the falling of trees (James *et al.*, 2006). Kane (2008) suggests that trees in perfect conditions (without any trace of deterioration) would withstand winds of up to 30 m/s, but also that dendrometric characteristics have great influence on stability, making the same tree able to resist winds with higher speeds or causing it to fall due to the action of winds with speeds below this value.

The dendrometric characteristics considered most important by the literature (Kontogianni *et al.*, 2011; Coder, 2007; James *et al.*, 2006; Brudi e van Wassenae, 2002; Cullen, 2002) are total height (H), slenderness ($\lambda = L/DCH$) (which involves knowledge of the diameter at breast height (DBH) and the total height (L)), and the size of the canopy, since it is the one receiving

the wind load and directly influencing the drag coefficient (James *et al.*, 2006). Asymmetric canopies tend to increase the instability of trees (Kontogianni *et al.*, 2011).

The dendrometric aspects of the branches also influence the way trees receive the actions of the wind, and, therefore, their stability (Moore and Maguire, 2004). In addition, in simplified models, used to represent some types of trees (Niklas and Spatz, 2000), the trunk can be considered a set of cones, and the branches can be replaced by moments applied to the trunk (Figure 1), information being needed to estimate the weight of the branches and the taper of the trunk.

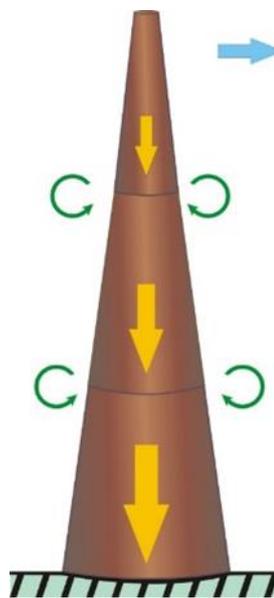


Figure 1 Simplified tree typology for analysis in a structural estimation program to obtain efforts and displacements.

Legend: yellow: gravitational loads; green: forces derived from the weight of the branches; blue: wind load; blue stripe: fixation of the trunk into the ground

The concept of adaptive growth (thigmomorphogenesis) proposes that trees develop optimized methods to resist and distribute the horizontal and vertical efforts to which they are subjected, as well as respond to injuries or deteriorations (Brüchert and Gardiner, 2006). Thus, understanding these adaptations better can help understand what is happening to the tree in terms of efforts and, by associating them with the conditions of deterioration and with the tree's mechanical properties, obtain a clearer and more specific definition of the risk of falling. External visual analyses are used to verify the occurrence of these adaptations or symptoms, flexing effort which are considered indicative of the trees' condition (Wagener, 1963).

The longitudinal fractures at the junction of branches and trunks can be symptoms of bending efforts greater than those the tree is able to withstand, while longitudinal fractures at the base of the trunk are related to high shearing (Brazolin, 2009; Mattheck e Breloer, 1997). Thickening and calluses on the collar and trunk are symptoms related to internal phenomena within the tree, such as attacks by biodeteriorating agents, which are reflected in the unique formation of the tissue so that the tree is able to level off tensions (Brazolin, 2009; Mattheck and Breloer, 1997). Other examples of external signs observed in trees that are indicative of factors linked to loss of resistance are the presence of abscesses in the trunk, which indicate internal rotting of the wood, bark included, and canopy displacements, which suggest instabilities caused by wind forces (Mattheck and Breloer, 1997).

Considering the aspects mentioned, the objective of this article was to present the dendrometric characteristics of trunks, branches and canopy of species that are common in the urban afforestation of the state of São Paulo, Brazil, and also to characterize the main thigmomorphogenesis responses of some of these species.

The experimental design consisted of dendrometric measurements (trunk and branches) in nine adult specimens of each of the six species adopted, within the campus of the University of Campinas, located in the city of Campinas, state of São Paulo, Brazil. For three of the species, the types of adaptations (thigmomorphogenesis) were also evaluated, using, in this case, 30 trees of each species.

Material and Methods

The species *Handroanthus pentaphylla* (Ipê rosa), *Cenostigma pluviosum* (Sibipiruna), *Tipuana tipu* (Tipuana), *Schinus molle* (Aroeira salsa), *Caesalpinia ferrea* (Pau ferro) and *Schinus terebinthifolius* (Aroeira pimenteira) were adopted for the research, considering the results of evaluations held in 183 cities in the state of São Paulo to survey the most common species in public spaces (Leão *et al.*, 2016), as well as the information on species available in the campus of the University of Campinas (UNICAMP). Leão *et al.* (2016) used the data obtained in the 183 municipalities to estimate the percentage of cities in which a particular species was found (Figure 2). The species *Schinus terebinthifolia* (Aroeira pimenteira) was not mentioned in the research by Leão *et al.* (2016), but it was adopted in this study because it is very common in the place considered for the research.

The collection of data was carried out at the campus of the University of Campinas (UNICAMP), located in the district of Barão Geraldo, in the city of Campinas (22°49'02.9"S 47°04'11.5"W), state of São Paulo, where the mean precipitation data (between 1990 and 2018) varies from 275.7 mm in January to 32.6 mm in August, and the mean temperature (in same period), from 25.2° to 18.1°.

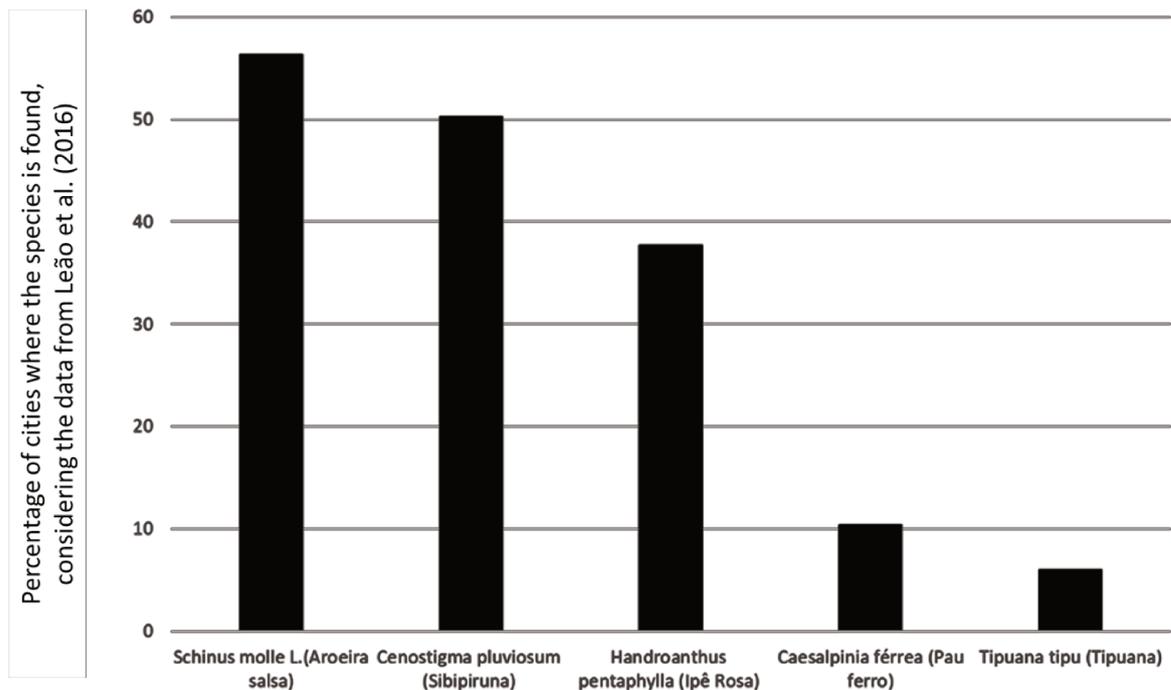


Figure 2. Species adopted in the research and information related to the percentage of cities in the state of São Paulo (Leão *et al.* 2016) in which they are found.

Nine specimens of each of the six species were used for the dendrometric characterization of trunk and branches, whereas for the characterization of thigmomorphogenesis, 30 specimens of each of three of the species (*Cenostigma pluviosum*, *Tipuana tipu* and *Schinus Terenbithifolius*) were considered.

For dendrometry, all trees measured were randomly chosen within the campus of the University of Campinas (UNICAMP); for thigmomorphogenesis, those that showed some type of adaptation were selected, also in the campus of UNICAMP.

In each tree, the canopy area (CA), the total height (H) and the height of the canopy (h) were measured using a hypsometer (Haglöf, Sweden), and the diameters at breast height (DBH), at the base (DAB) and at the first branching (DAFB) were measured using a caliper (Haglöf, Sweden).

For the determination of canopy area, firstly, the type of canopy of the species was visually assessed according to the models indicated in the Technical Manual for Urban Arborization of the Municipal Secretariat of the Environment of the city of São Paulo (Figure 3a). An approximate geometric shape was considered for each type of canopy (Figure 3.b) to obtain the mean angles on which to base the estimation of their area.

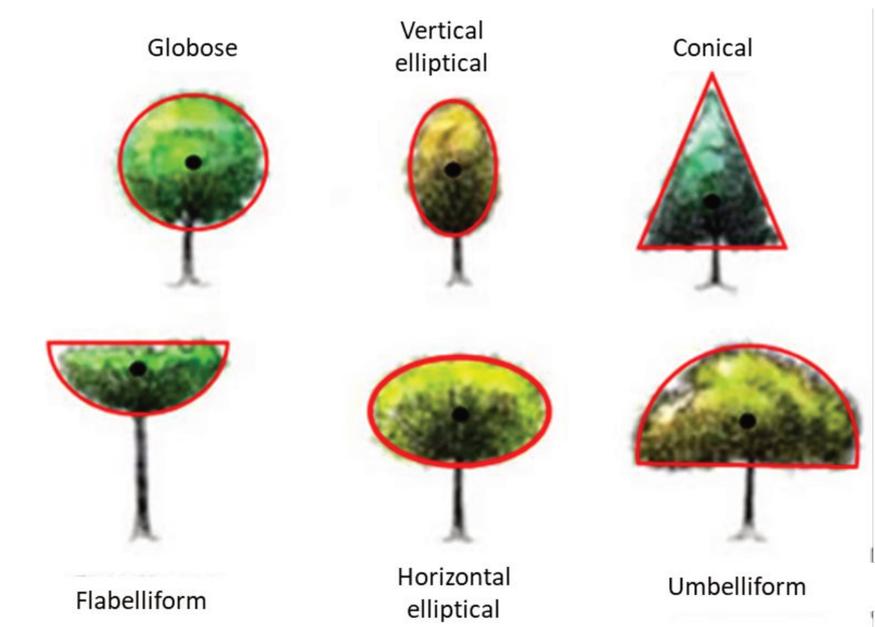


Figure 3. Types of canopy architecture and their approximate geometric representations
Source: Technical Manual for Urban Arborization of the Municipal Secretariat of the Environment of the city of São Paulo

Three branching levels were measured for each branch (Figure 4). From the first to the third branching, the angles between the branches, the circumference at the base of the branch (D1), the circumference before the next branch (D2) and the length of the section between these measurements (C) were estimated.

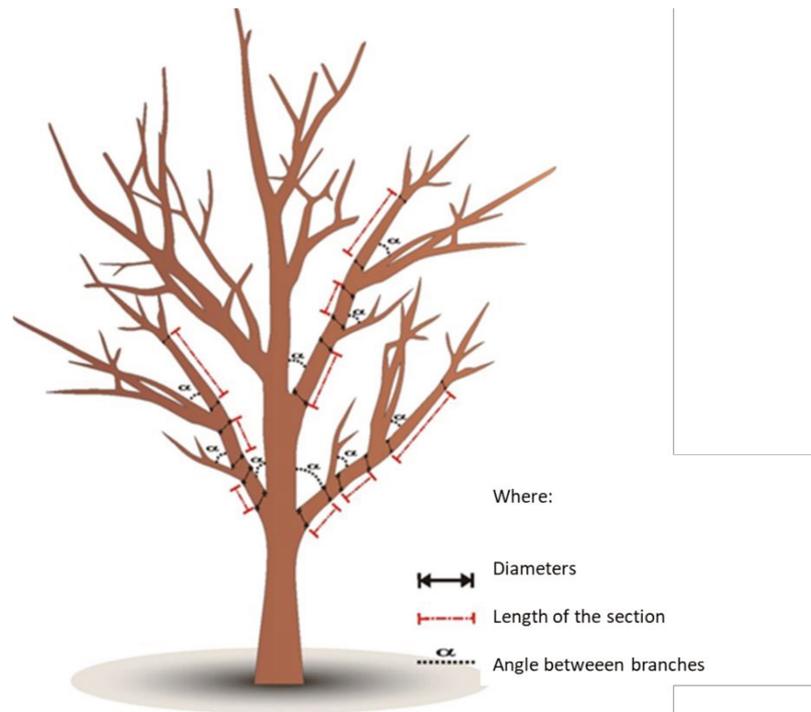


Figure 4. Scheme of measurement positions for the branches

With the values of the diameter of the branches (D_1 and D_2) at each measurement point and the length of the section between them (C), the mean diameters (Equation 1), the taper indexes (IC – Equation 2)) and the volume (V) were estimated (Equation 3) for each of the three branch sections. For the analysis of the results, the absolute values of the taper index were used, since diameter D_2 was not always higher than D_1 . In total, 398 branches were measured, considering the six species, the nine specimens of each species, and the 3 branching levels.

$$D_m = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad \text{Equation 1}$$

$$IC = \frac{D_1 - D_2}{C} \quad \text{Equation 2}$$

$$V = \frac{\pi C}{3} \left[\left(\frac{D_1}{2} \right)^2 + \frac{D_1}{2} \times \frac{D_2}{2} + \left(\frac{D_2}{2} \right)^2 \right] \quad \text{Equation 3}$$

Where: D_1 = diameter at the base of the branch; D_2 = diameter before the next branch; C = length between measurements.

The trunk taper (i_C) was estimated using Equation 4, considering the diameters at the base (DAB), the diameter at the point of the first branching (DAFB), and the height of the canopy (h).

$$i_C = \frac{DAS - DAB}{h} \quad \text{Equation 4}$$

For the analysis of thigmomorphogenesis, data collection consisted in identifying the presence of compensation mechanisms – inclusion of bark, localized increase in diameter, abscess in the trunk, calluses on the surface, longitudinal cracks, folds on the surface, curving and canopy displacement (Figure 5).

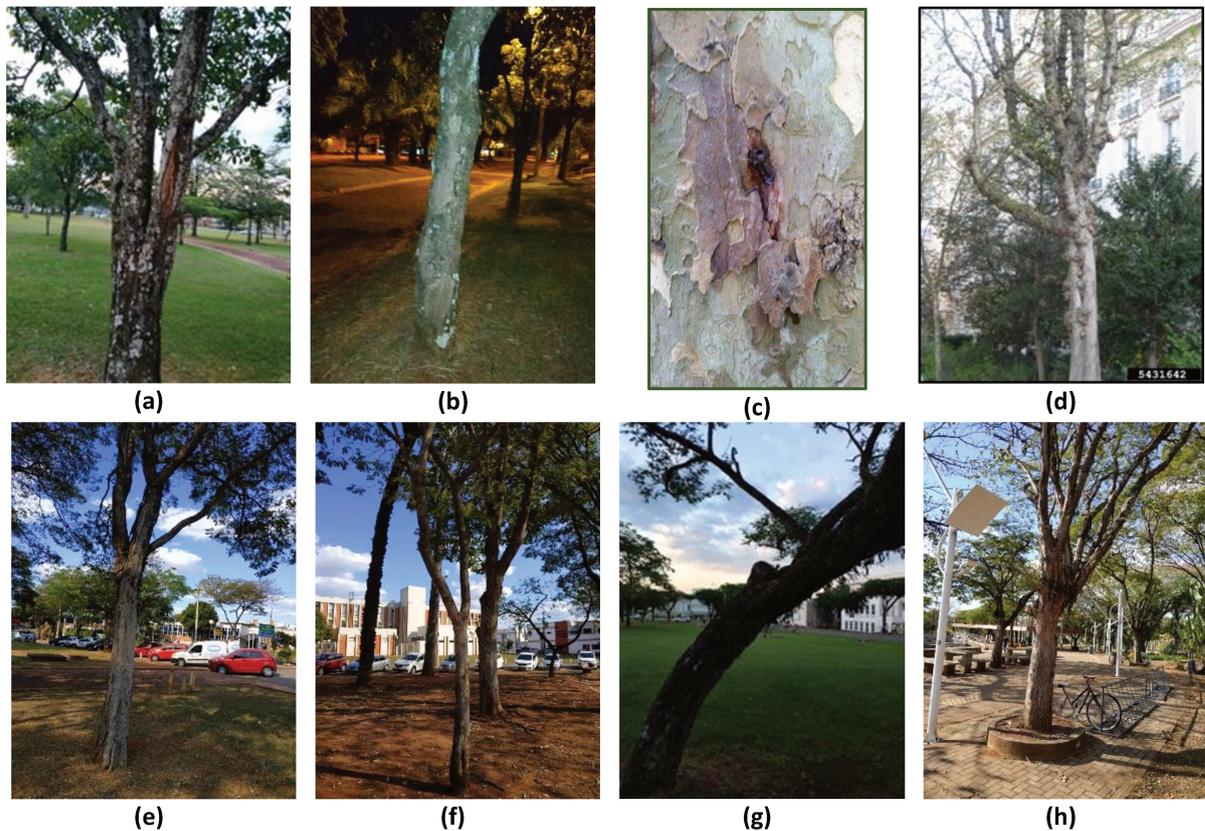


Figure 5. Examples of the trees' compensation mechanisms: a. Inclusion of bark; b. Localized increase in diameter; c. Abscess in the trunk; d. Calluses on the surface; e. Longitudinal cracks; f. Folds on the surface; g. Curving; h. Canopy displacement.

Results and Discussion

Tree (trunk and canopy)

The total height (H) of the trees of the different species showed normal distribution and was, together with the base diameter (DAB), the parameter with the lowest coefficient of variation

(Table 1). The comparison between the means of the different species (95% confidence level) indicates that there are five different groups with statistically different heights (Table 1). Kontogianni *et al.* (2011) points out the height of the tree as one of the major indexes related to its stability, being responsible for 39% of the variability of the model proposed by them to infer the stability of trees. Popa (2000) also considers that height is a fundamental parameter to evaluate stability, indicating that trees with height above 20 m are at great risk of falling. This effect of height on stability is related to the force generated by the wind load at the base, which is considered as being applied to the canopy's center of gravity (Horacek, 2003). Considering this parameter (height), Kontogianni *et al.* (2011) classified the stability of the trees in four classes, in descending order, class 1 (high stability) corresponding to trees with heights lower than 5 m, class 2 to trees with heights between 5 and 10 m, class 3 to trees with heights between 10 and 15 m, and class 4 (low stability) to trees with heights greater than 15 m. Taking this classification into account, five of the six species evaluated in this research would fall into class 2, with only the *Tipuana tipu* tree in class 3 (Table 1) and no species into class 4.

The diameters at the base (DAB) and at breast height (DCH) of the different species also showed normal distribution and, statistically, four groups differed (Table 1). The diameter at the height of branching (DAFB), also with normal distribution, differed in three groups, probably because its coefficient of variation was higher than that of DAB and DACH. Taper (i_C), which uses DAB, DAFB and h as parameters, together with the canopy area (CA), was the parameter with the highest coefficients of variation (Table 1).

The literature (Coder, 2007; James *et al.*, 2006; Sterken, 2005) indicates slenderness (λ), given by the ratio between total height and DCH, as an important parameter related to the tree's stability. Considering this ratio, the species studied in this research were separated into three statistically different groups (Table 1). *Tipuana tipu* was the species with the highest average slenderness value (23.4). The classification proposed by Kontogianni *et al.* (2011) suggests that trees with $\lambda < 30$ are very stable, which indicates that, by this parameter, all species studied in this research would be considered as such. For the 54 trees tested in this research, only one tree of the species *Schinus Terebinthifolius* had slenderness ($\lambda = 32$) higher than the limit ($\lambda = 30$) proposed by Kontogianni *et al.* (2011) as representative of very stable trees, while all the others were below this limit and, also, well below the maximum limit proposed by this author for very unstable trees ($\lambda > 90$).

The size of the canopy influences the force exerted by the wind, because trees with large canopies will more absorb the wind's pressure, generating greater drag force on the trunk, thus being an important parameter in biomechanical analyses aimed at the risk of falling. The canopy area varied greatly between the species studied in this research (Table 1), but as the variability within the species themselves was also high (Table 1), they were statistically divided into four groups (Table 1). In terms of the canopy's architecture, the species were basically divided into two – globose and flabelliform (Figure 3). The canopy's dimension is also considered fundamental for the stability of trees (Kontogianni *et al.*, 2011; Coder, 2007; James *et al.*, 2006; Sterken, 2005). Kontogianni *et al.* (2011) points out that it is important that the height of the canopy is proportional to the total height of the tree, indicating that trees for which this ratio is below 0.5 would have better stability, while trees for which this ratio is greater than 1.0 would be less stable. These authors concluded that this proportionality is responsible for 47% of the variability of the model proposed by them to infer the stability of trees. Regarding this parameter, the statistical analysis indicated that the species were divided into three groups (Table 1), the *Tipuana tipu* tree being the one with the highest ratio (0.86). The *Tipuana tipu* tree would be in the third of four ranges proposed by Kontogianni *et al.* (2011), in decreasing order of stability. All other species would be classified in the second (between 0.51 and 0.75) of the four ranges proposed by Kontogianni *et al.* (2011). It is important to highlight that this parameter is associated to the type of canopy shape, that is representative of the species, causing some species, even those with larger diameters, to show a low ratio between canopy height and total height.

Table 1. Mean dendrometric data: total height – H (m), canopy height – h (m), diameter at the base – DAB (m), diameter at breast height – DABH (m), diameter at the first branching – DAFB (m), trunk taper – i_c ((DAB – DAFB)/L), canopy area – CA (m²), ratio between canopy height and total height (R) and thinness ($\lambda=H/DABH$)

Species*	H	h	DAB	DCH	DAFB	i_c	R	AC	λ
<i>Handroanthus pentaphylla</i>	6.9 (17%)	2.0 (30%)	0.46 (32%)	0.38 (26%)	0.35 (25%)	0.05 (62%)	0.70 (11%)	71.9 (44%)	18.6 (19%)
Ipê rosa	c	a	b	b	bc	ab	ab	b	b
<i>Cenostigma pluviosum</i>	6.9 (16%)	1.7 (31%)	0.48 (16%)	0.40 (16%)	0.36 (26%)	0.06 (79%)	0.75 (8%)	74.2 (30%)	17.9 (28%)
Sibipiruna	c	a	bc	b	c	ab	b	bc	b
<i>Tipuana tipu</i>	11.7 (23%)	1.6 (28%)	0.55 (15%)	0.50 (17%)	0.42 (21%)	0.09 (80%)	0.86 (5%)	119.8 (55%)	23.4 (16%)
Tipuana tipo	e	a	c	c	c	bc	c	d	c
<i>Schinus molle</i>	5.3 (13%)	1.9 (14%)	0.28 (11%)	0.24 (20%)	0.22 (18%)	0.04 (50%)	0.65 (8%)	23.8 (25%)	23.0 (15%)
Aroeira salsa	a	a	a	a	a	a	a	a	c
<i>Caesalpinia ferrea</i>	8.0 (17%)	2.7 (28%)	0.68 (15%)	0.62 (18%)	0.42 (42%)	0.11 (64%)	0.65 (21%)	92.2 (56%)	13.1 (24%)
Pau ferro	d	b	d	d	c	c	a	c	a
<i>Schinus Terenbithifolius</i>	6.2 (21%)	1.9 (22%)	0.33 (17%)	0.28 (20%)	0.26 (20%)	0.04 (58%)	0.68 (11%)	34.2 (38%)	22.6 (23%)
Aroeira pimenteira	b	a	a	a	ab	a	a	a	c

*Scientific name and common name

– The values in parentheses correspond to the coefficient of variation

– Different letters in the columns indicate statistical difference with 95% confidence.

Branches

Considering each species in isolation, the variability, represented by the coefficients of variation, the angle of the branching and the mean diameter of the branches were much lower than their taper index and volume (Table 2). This result is expected, since both taper index and volume depend on the length of the branch section, which varied according to the position of the branching.

The taper of the branches is an important parameter for defining the tree's architecture, allowing biomechanical studies to perform more accurate modeling of the real behavior of trees, replacing the tubular models. In the statistical analysis of the taper, the transformation of variables (\log_{10}) was used to obtain the normality of the data, and it was found that, within the same species, there was no statistical difference in this parameter between branching levels. Between species, considering the general mean of the three branching, only *Handroanthus pentaphylla* differed from the others, with the lowest value (Table 2). All other species showed statistically equivalent taper, *Caesalpinia ferrea* having obtained the highest mean value (Table 3).

The volume of the branches can be used to estimate the weight, which is important information for biomechanical analysis. Between species, the volume was statistically different in three groups. The species *Schinus molle* was statistically equivalent to the species *Schinus Terenbithifolius*, with the lowest mean volume of branches, regardless of the branching level; the species *Caesalpinia ferrea*, *Handroanthus pentaphylla* and *Poincianella pluviosa* were statistically equivalent, with the intermediate mean volumes, and the *Tipuana tipu* species obtained the highest mean volume of branches (Table 2).

Considering each species in isolation, differently from the result obtained for taper and angle, in general, the volume statistically differed between branching levels. This occurred as a consequence of the differentiation between diameters, which, for all species, decreased from the branches located in the vicinity of the trunk to the more distant ones.

Table 2. Means and coefficient of variation (%) of branching angle ($^{\circ}$), taper indexes and mean diameters (m) and volumes (m^3) at different branching levels (1, 2 and 3).

Species Scientific and common name	Angle ($^{\circ}$)			Taper Index			Mean diameter			Volume		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
<i>Handroanthus pentaphylla</i> Pink Tab	65.1 11.6%	64.5 11.3%	64.9 12.1%	0.014 77.6%	0.0076 62.3%	0.011 62.3%	0.22 35.4%	0.19 39.8%	0.14 38.6%	0.020 76.9%	0.016 87.1%	0.0076 81.2%
<i>Poincianella pluviosa</i> False Brazilwood	65.6 16.7%	62.0 11.5%	62.0 12.1%	0.026 100%	0.014 118%	0.015 152%	0.25 25.4%	0.19 27.7%	0.15 34.4%	0.028 82.6%	0.016 69.8%	0.0076 99.4%
<i>Tipuana tipu</i> Tipa	79.3 11.5%	77.3 13.3%	79.6 9.1%	0.020 95.5%	0.019 59.6%	0.017 63.7%	0.32 19.9%	0.24 27.9%	0.20 27.3%	0.069 77.3%	0.039 117%	0.022 53.9%
<i>Schinus molle</i> Peruvian Peppertree	78.8 70.8%	75.2 11.3%	73.1 6.9%	0.022 75.2%	0.022 65.1%	0.010 81.2%	0.13 20.7%	0.11 27.4%	0.10 25.7	0.0093 92.7%	0.0042 105%	0.0039 63%
<i>Caesalpinia ferrea</i> Brazilian Ironwood	66.8 139%	70.0 97.6%	69.5 98.4%	0.023 25.5%	0.018 17.7%	0.016 27.8%	0.22 35%	0.18 36.0%	0.13 39.4%	0.020 107%	0.014 87.8%	0.0046 81.4%
<i>Schinus Terenbithifolius</i> Brazilian Peppertree	79.2 23.8%	83.3 13.9%	84.5 25.6%	0.019 97.4%	0.018 72.9%	0.018 138%	0.18 23.8%	0.14 29.8%	0.10 30.5%	0.011 63.2%	0.0078 101%	0.0028 68.9%

Within the same species, the branching angle did not vary statistically at the different levels, showing that it is a characteristic of the species' architecture and, according to Yeatts (2012), a genetically controlled characteristic. In the different species, the mean branching angle (regardless of the level) varied from 63.2° to 82.2°, and was statistically different in three groups: *Handroanthus pentaphylla* and *Poincianella pluviosa*, with the lowest value; *Caesalpinia ferrea*, with the intermediate values; and *Tipuana tipu*, *Schinus molle* and *Schinus terenbithifolius*, with the highest values (Table 2).

Yeatts (2012) and Minamino and Tateno (2014) concluded that, at any height, the ratio between the sum of the cross-section of all branches above a branching (child branches ΣC) and the trunk's cross-section immediately below the branching point (mother branch M) is greater than 1.0, contradicting *Leonardo Da Vinci's law*, which indicates that this ratio is equal to 1.0. Yeatts (2012) concluded that the greater the branching angle, the greater the $\Sigma C/M$ ratio. The same conclusion was proposed by Minamino and Tateno (2014), but in the case of these authors, the increase in $\Sigma C/M$ as a function of the angle, as well as the distance of its value from 1.0, is dependent on the ratio between the weight of the lateral branches and the weight of the main axis ($\Sigma C_{\text{lateral}}/\Sigma C_{\text{main}}$). Minamino and Tateno (2014) suggested that $\Sigma C_{\text{lateral}}/\Sigma C_{\text{main}}$ varies from close to zero (when the weight of the lateral branches is close to that of the main axis) to one (when the weight of the the lateral branches is lower than that of the main axis), and showed that $\Sigma C/M$ decreases with the increase in $\Sigma C_{\text{lateral}}/\Sigma C_{\text{main}}$. For $\Sigma C_{\text{lateral}}/\Sigma C_{\text{main}}$ close to 1.0 (lateral branches with low weight compared to the main axis) the $\Sigma C/M$ ratio is also close to 1.0 and has little dependence on the angle. In the case of this research, the smaller lateral branches were not measured, so it is not possible to evaluate the exact $\Sigma C/M$ ratio. However, even without considering the areas of the smaller lateral branches, the $\Sigma C/M$ ratio ranged from 0.92 to 1.19. Bearing in mind that this ratio did not consider the dimension of the smaller lateral branches, the values would be higher the larger their size, getting even closer to the results (1.02 to 1.31) obtained by Yeatts (2012) and the results (1.0 to 1.5) obtained by Minamino and Tateno (2014) for conditions similar to those of this research.

Compensation mechanisms

Considering the 90 trees of the 3 studied species, longitudinal cracks (33%) and the inclusion of bark (31%) were the most common compensation mechanisms. Canopy displacement (17%), localized increase in diameter (13%) and folds on the surface (10%) appear in intermediate

proportions. Finally, bending (4%), calluses on the surface (3%) and abscesses in the trunk (1%) may be found to a lesser extent. This result is important to evaluate trees of these species, since longitudinal cracks and inclusion of bark are defects that indicate a serious risk of rupture (Albers *et al.*, 2003). For species considered individually, there are variations, but in general, the types of thigmomorphogenesis remain in proportions close to the mean values (Figure 6).

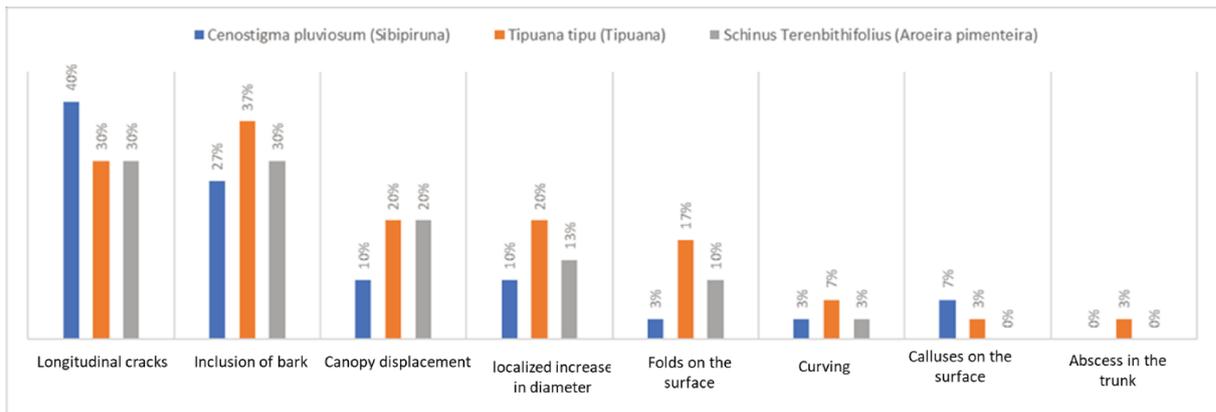


Figure 6. Incidence (%) of compensation mechanisms in the different species

Considering that the inclusion of bark is considered a determining factor for the risk of branches falling (Brazolin, 2009; Albers *et al.*; 2003) and that the percentage of its occurrence was high in the species studied, this parameter is deserving of special attention, seeing as, depending on the branches' size, them falling may cause serious accidents.

Localized increases in diameter are characterized by the growth of wood in a specific region, which generally occurs as a result of the compensation for structural losses caused by cavities with internal decay (Brazolin, 2019). The calluses associated with the formation of buds at the base of the tree usually indicate stress resulted from some chronic situation or emergency suffered by the tree and, in general, are not associated with structural problems, such as the calluses that occur along the trunk (Sinclair e Lyon, 2005; Blanco *et al.*, 2013). Although the compensation wood indicates a zone of deterioration or efforts greater than the tree is able to support, its appearance also indicates that the individual has the ability to react to the problem, and is therefore healthy. Hence, in addition to representing a point of attention in the visual analysis, it is an interesting aspect to be introduced in simulation models, in order to, for instance, make it possible to infer the quantification of the result of this compensation in trees with cavities or decay.

The abscess in the trunk represents a pathological phenomenon, characterized by the secretion of liquid, which is associated with a process of infection triggered by biodeteriorating agents. Abscesses themselves do not represent a structural risk for trees, but are indicative of attacks and illnesses (Blanco *et al.*, 2013). Thus, the mechanical effects are associated with the emergence of abscesses (deteriorations caused by rotting fungi) and, therefore, with the loss of strength and reduction in the tree's ability to react to external actions.

The angle of the trunk or canopy of inclined trees deviates from the main axis. In cities, these characteristics can derive from the search for light and, in open environments, from the systematic action of the wind in a preferential direction. Inclined trees tend to reinforce their structure with the formation of reaction wood. When the symptom is found at the base, it is also common for the roots to grow more on the opposite side of the inclination. This characteristic will not necessarily generate a structural problem if the individual has an adequate root system. However, in cases where the tree is strongly inclined perpendicularly to the direction of the incidence of winds, the possibility of torsion defects in the trunk or branches increases (Blanco *et al.*, 2013). There is no defined degree of inclination that indicates certainty of risk of falling, but a critical threshold proposed for the angle would be around 40° (Pokorny *et al.*, 2003). Generally, a sudden inclination can be an indication of defects or potential risk.

Conclusions

- The mean height of the species varies from 5.3 m to 11.7 m; their slenderness (height to diameter at breast height ratio), from 13.1 to 23.4, and the ratio between canopy height and total height, from 0.65 to 0.86, thus not being, according to the literature, within the critical limits in terms of stability. Among the species studied, the *Tipuana tipu* tree is the one with the highest instability indexes when considering these parameters.
- The taper of the trunk and branches is a parameter that can affect the modeling of trees. In the case of the trunk, the taper varied greatly within the species, with coefficients of variation ranging from 50% to 80%. Between species, it varied from 0.04 to 0.11, with statistical differences. In the case of the branches, the taper did not vary between branching levels within the same species, and, in general, neither did it vary between species.
- Regarding the branching angle, although there was no statistical variation at the different levels, variations between species were found, with mean values ranging from 63.2° to 82.2°.

– For the compensation mechanisms obtained in all species, longitudinal cracks (33%) and the inclusion of bark (31%) are the most common. Canopy displacement (17%), localized increase in diameter (13%) and folds on the surface (10%) appear in intermediate proportions. Finally, bending (4%), calluses on the surface (3%) and abscesses in the trunk (1%) may be found to a lesser extent.

References

Albers J, Hayes E (2003) How to detect assess and correct hazard trees in recreational areas. Minnesota Department of Natural Resources, St. Paul, MN.

Brazolin S (2009) Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, *Tipuana tipu* (Benth) o Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP. Dissertation. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP.

Brüchert F, Gardiner B (2006) The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of *Sitka spruce* (*Picea sitchensis*, Pinaceae). *American Journal of Botany* 93:1512-1521.

Brudi E, Van Wassenae P (2002) Trees and statics: Non- destructive failure analysis. In: E.T. Smiley, and K.D. Coder (Eds.). *Tree Structure and Mechanics Conference Pro-ceedings: How Trees Stand Up and Fall Down*, International Society of Arboriculture, Champaign, Illinois, pp 53-69.

Coder K (2007) Storm wind loads on trees. Warnell School of Forest and Natural Resources, University of Georgia. <https://urbanforestrysouth.org/resources/library/citations/storm-wind-loads-on-trees>. Accessed 14 April 2020

Cullen S (2002) Trees and wind: wind scales and speeds. *Journal of Arboriculture* 28:237-242.

Gardiner, BA (1995) The interactions of wind and tree movement in forest canopies. In: *Wind and Trees*. Cambridge University Press, New York, pp. 41-59.

Horáček, P (2003) Introduction to tree statics & static assessment. Presentation. In: *Proc. Workshop, Westonbirt*, p. 69.

James K, Ades PK, Haritos N (2006) Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany* 93(10):1522-1530.

- Kane B (2008) Tree failure following a windstorm in Brewster, Massachusetts, USA. *Urban Forestry & Urban Greening* 7:15-23.
- Kontogianni A, Tsitsoni T, Goudelis G (2011) An index based on silvicultural knowledge for tree stability assessment and improved ecological function in urban ecosystems. *Ecological Engineering* 37:914-919.
- Leão MM et al (2016) Avaliação do estado da arte da arborização urbana no estado de São Paulo. In: 20 Congresso brasileiro de arborização urbana, Belo Horizonte, MG, Brazil.
- Mattheck C, Breloer H (1997) *The body language of trees: a handbook for failure analysis*. Stationery Office Books, London.
- Minamino R; Tateno M (2014) Tree Branching: Leonardo da Vinci's Rule versus Biomechanical Models. *Plos ONE* 9(4): e93535. Doi: 10.1371/journal.pone.0093535
- Moore JR; Maguire DA (2004) Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. *Trees* 18:195-203. Doi: 10.1007/s00468-003-0295-6
- Niklas KJ; Spatz HC (2000). Wind-induced stresses in cherry trees: evidence against the hypothesis of constant stress levels. *Trees* 14:230-237.
- Peltola H et al (2000). Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 135:143-153.
- Pokorny J et al (2003) *Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation*. USDA Forest Service Northeastern Area State and Private Forestry: Technical Bulletin. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/11070>. Accessed 14 April 2020
- Popa I (2000) The analysis of tree stability at the wind action by uniform couples. *Bucovina Forestieră* 9(1-2):21-29.
- Sánchez-Blanco M, Artajo M, Septién Arceredillo A (2013) *Defectos y anomalías del arbolado viario de Madrid: Guía de reconocimiento y diagnóstico*. Área de gobierno de medio ambiente y movilidad, Madrid.
- (2015) *Manual Técnico de arborização urbana*. Secretaria Municipal Do Verde E Do Meio Ambiente, São Paulo.
- Sinclair W; Lyon HH (2005) *Diseases of trees and shrubs*. Comstock Publishing Associates, New York.

Sterken, P (2005) A Guide For. Tree-Stability Analysis.

Wagener WW (1963) Judging Hazards from Native Trees in California Recreational Areas: a guide for professional foresters. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, CA.

Yeatts FR (2012) Tree shape and branch structure: mathematical models. Mathematical and Computational. Forestry&Natural-Resource Sciences 4(1): 2-15.

3. Artigo 02: Effect of dendrometric relationships on the behavior of trees for biomechanical studies

Submetido ao periódico **Urban Forestry & Urban Greening**

Effect of dendrometric relationships on the behavior of trees for biomechanical studies

Mônica Ruy, Raquel Gonçalves, William Martins Vicente, Douglas Pereira Moraes

Abstract

The dimensions of trees (dendrometric characteristics) play an important role in biomechanical studies aimed at estimating tree fall risk, since they influence their mechanical behavior in the face of forces to which they are subjected, and also their stability. The objective of this research was to evaluate the effect of dendrometric parameters of trees subjected to gravitational and wind loads on the value and distribution of results of displacement, normal stress and shear stress. Applying the Finite Element Method (FEM), a 3D model was used to perform linear static analysis. The simulated tree was considered totally intact (no deterioration or thigmomorphogenesis) and the architectural model was based on average characteristics of tree species commonly used in urban afforestation in the state of São Paulo, Brazil. Three scenarios were simulated for the analyses: set slenderness and taper and varying height; set height and taper and varying slenderness; and set height and slenderness and varying taper. The results make it possible to conclude that tree height has a greater influence on displacement; slenderness has a greater influence on normal and shear stress; and taper is the factor that has the least influence on displacement and normal and shear stress. Besides the values, dendrometric factors and load levels affect the position of normal and maximum shear stresses, which move from the base of the tree to higher points on the trunk, showing that, in addition to variation in diameter along the trunk, the composition between the moments generated by wind load and gravitational loads (trunk and branches) varies with the displacement undergone by the tree. Numerical simulation proved to be an adequate tool to evaluate, in a simple and prompt manner, parameters that influence tree fall risk, enabling an increase in the number of studies and findings available to the scientific community.

Keywords: tree height, tree slenderness, tree trunk taper, normal tree stresses, tree shear stresses, tree trunk displacement

Introduction

Dendrometry is a branch of forestry concerned with estimating forest resources by determining the dimension and volume of trees in a given area (Silva, 1979). It is now an established practice in the forest sector.

The dimensions of trees (base diameter, diameter at breast height – DBH, height, length of branches, etc.) can be measured directly and in a simple way. Thus, in addition to being an important tool for the forestry industry, the simplicity of measuring dendrometric parameters can be valuable tool to assess fall risk of urban trees in biomechanical analyses.

Sellier and Fourcaud (2009) concluded that geometry and dimensions had a more significant effect on the dynamic response of trees subjected to wind loads than their wood properties, and that non-linear behaviors were a function of the architecture of branches. Bearing in mind that wind is the most important load in fall risk analysis (Ancelin et al., 2004), this result indicates the importance of tree dendrometry. In models to predict tree fall due to mechanical actions, it is very important to know not only the mechanical characteristics of the stem and branches, but also the dimensions and shape of the trees (Brüchert and Gardiner, 2006).

Milne and Blackburn (1989) concluded that, in general, maximum normal stresses occur between 20% and 60% of total tree height (H), but that the heights of maximum stress points increase according to the tree's slenderness (λ), which is the ratio of total tree height (H) to diameter at breast height (DBH). Taller and more slender trees are more fragile in terms of breakage and uprooting (Ancelin et al., 2004).

Studies such as that by Milne and Blackburn (1989) were carried out using static pulling tests, which are costly, time-consuming and only possible in field conditions with enough space for the installation of equipment and displacement of trees. Consequently, there are not many results quantifying the influence of dendrometric factors on the biomechanical behavior of trees. Such an analysis could be simplified with the use of computational models, enabling in-depth studies to understand the dendrometric relationships of trees that can lead to calculations of safety factors to be used in management of tree fall risk.

The objective of this paper was to evaluate the effect of dendrometric parameters of trees (height, slenderness and taper of trunk) subjected to gravitational and wind loads, simulated at three loading levels (5 kN, 10 kN and 15 kN), on the value and longitudinal position of the maximum values of displacement, normal stress and shear stress.

Material and Methods

To evaluate the effect of dendrometric parameters on the behavior of trees subjected to wind loads, three scenarios were proposed. In the first scenario, slenderness (λ) and taper (T) were set, while total trunk height (H) varied (Table 1). In the second scenario, H and T were set while λ varied, and, finally, in the third scenario, H and λ were set while T varied (Table 1). The values of λ , H and T were set considering dendrometric characterizations previously performed in six species of trees commonly planted in cities in the state of São Paulo, Brazil (Ruy 2020). With the set values of H and λ , DBH was calculated, and with the set taper value, the diameters of the base and top were calculated (Table 1).

Table 1 Scenarios with variation of total tree height (H), slenderness (λ) and taper (T), and data on diameter at breast height (DBH), diameter at stem base (Db) and diameter at stem top (Dt) calculated from those parameters.

Scenario	Condition	H M	λ	T	DBH m	Db m	Dt m
1	1	5	22	0.030	0.23	0.27	0.116
	2	10	22	0.030	0.45	0.49	0.194
	3	15	22	0.030	0.68	0.72	0.271
	4	20	22	0.030	0.91	0.95	0.348
	5	25	22	0.030	1.14	1.18	0.425
2	1	7.5	8	0.030	0.94	0.98	0.752
	2	7.5	16	0.030	0.47	0.51	0.283
	3	7.5	24	0.030	0.31	0.35	0.127
	4	7.5	32	0.030	0.23	0.27	0.048
	5	7.5	40	0.030	0.19	0.23	0.002
3	1	7.5	22	0.010	0.34	0.35	0.279
	2	7.5	22	0.020	0.34	0.37	0.217
	3	7.5	22	0.030	0.34	0.38	0.155
	4	7.5	22	0.050	0.34	0.41	0.031

* $\lambda = H/DBH$; $T = (Db-Dt)/H$ or $T = (Db - DBH)/1.3$

To simulate the values of the wind loads, the calculations were made using the standard for calculating wind forces on structures (ABNT NBR 61231, 1988). In this standard, basic wind speed (V_0) is shown on the Brazilian isopleth map considering five regions in which it varies from 30 m/s to 50 m/s (108 km/h to 180 km/h). Coefficients (S1, S2 and S3) are used to calculate the characteristic speed ($V_k = S1*S2*S3 V_0$). S1 takes into account the terrain condition of the structure's location, which in this work was considered as an acclivity ($S1 = 1.1$) to include the

most critical wind situation. S2 takes into account the obstacles surrounding the structure and its largest horizontal or vertical dimension. The calculation of this coefficient ($S2 = 0.88$) considered category III, consistent with the characteristics of the environs of an urban area without tall buildings, to account for the case of less protected trees; and class A (heights below 20 m), based on the heights of the trees previously researched by the group (Ruy, 2020). S3 considers the damage caused by a potential fall. In this case, a high risk situation was considered (areas with high occupancy), with a value set at $S3 = 1.0$. Knowing the characteristic speed, the pressure exerted by the wind (q) on the structure is given by Equation 1.

$$q = 0,613V_k^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad \text{Equation 1}$$

In general, in studies of trees subjected to wind loads, for reasons of simplification, wind pressure (q) is transformed into concentrated load (P_v), obtained by multiplying that pressure (q) by the area of the front surface of the crown (A_c). This load is then applied to the crown's center of gravity. To this end, one must define the shape and dimensions of the crown to be simulated. From previous research (Ruy 2020) it was found that the most common type of crown (67%) among the species adopted was the globose (round) crown. Thus, first the crown of the tree (Figure 1.a) was simplified to a circumference (Figure 1.b) with a diameter equal to the total height of the tree (H) minus the height of the beginning of the crown or first bifurcation (h). The height of the first bifurcation, obtained in a previous work by the research group for various species used in urban afforestation in the state of São Paulo (Ruy, 2020), was close to two meters, which was the height set for the simulations in this research. With these data, the area and center of gravity of the crown were calculated and, in an iterative way, wind load values were calculated to allow simulation, for the crown diameters obtained in the proposed scenarios (Table 1), wind speed values within the ranges shown in the standard isopleth map (ABNT NBR 6123). From this iteration, wind loads of 5 kN, 10kN and 15kN were defined, which made it possible to simulate basic wind speeds from 4.6 m/s to 60.8 m/s (Table 2). The wind forces (5 kN, 10 kN and 15 kN) were applied to the crown's center of gravity for simulations using FEM (Figura 1.d).

Table 2. Crown diameter (D_c) and area (A_c), considered with globose (circular) architecture and iteratively calculated basic wind speeds for three final wind load values to be considered in simulations of different scenarios with total tree height variation (H) and initial crown height set at 2.0 m

Scenario	Force of 5 kN					Force of 10 kN			Force of 15 kN		
	H	D_c	A_c	q	V_0	A_c	q	V_0	A_c	q	V_0
	m	m	m ²	N/m ²	m/s	m ²	N/m ²	m/s	m ²	N/m ²	m/s
1	5	3	7.1	707.4	35.1	7.1	1414.7	49.6	7.1	2122.1	60.8
	10	8	50.3	99.5	13.2	50.3	198.9	18.6	50.3	298.4	22.8
	15	13	132.7	37.7	8.1	132.7	75.3	11.5	132.7	113.0	14.0
	20	18	254.5	19.6	5.8	254.5	39.3	8.3	254.5	58.9	10.1
	25	23	415.5	12.0	4.6	415.5	24.1	6.5	415.5	36.1	7.9
2 and 3	7.5	5.5	23.8	210.5	19.1	23.8	420.9	27.1	23.8	631.4	33.2

Scenario 1: Slenderness 22; taper 0.030; and total tree height ranging between 5m, 10m, 15m, 20m and 25m

Scenario 2: Tree height 7.5 m; taper 0.030; and slenderness ranging between 8, 16, 24, 32 and 40

Scenario 3: Tree height 7.5 m; slenderness 22; and taper ranging between 0.010, 0.020, 0.030 and 0.050

The data obtained in tests of tree architecture characterization (Ruy, 2020) were used to calculate the taper of branches, making it possible to obtain their respective volumes (Ruy, 2020). By associating the volume with the average density calculated for the species (Garcia, 2018), it was possible to determine the load related to the actual weight of the wood of the trunk (W_{stem}) and branches ($W_{branches}$) of these trees. In addition to the actual weight of the wood (trunk and branches), the load resulting from the weight of the leaves was also considered, according to the phenology of each species. As stated by Drumond et al (1996), leaf weight accounts for around 4.0% of the stem weight. The load related to the weight of the branches and leaves was used to calculate the moments applied to the stem (Figura 1.d).

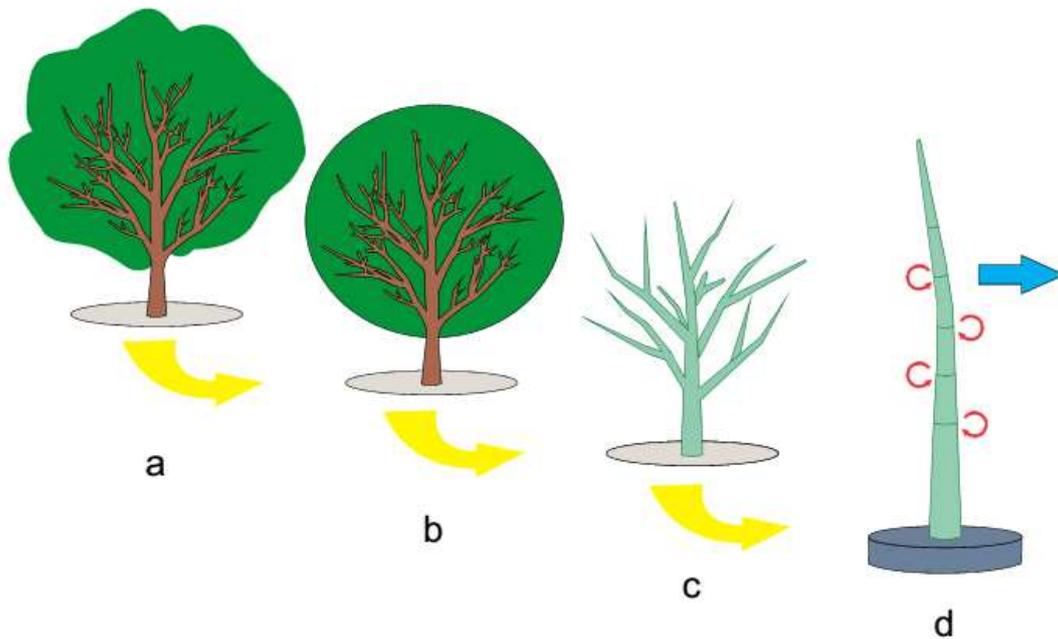


Figure 1. Representation of the tree for the model (a), simplification of the crown to an approximate geometric figure (b), simplified tree without leaves and disregarding the smallest branches (c) and idealized model considering the weight of branches as moments and the wind load applied to the center of gravity of the crown (d)

By applying the Finite Element Method, a 3D model was developed using Ansys R18.2 software, with which linear static analysis was performed. The simulated tree was considered completely intact (without deterioration or thigmomorphogenesis), and the architectural model was based on average characteristics of common tree species in urban afforestation in the state of São Paulo, Brazil (Ruy 2020).

The stem (without the crown and branches) was created assuming that the tree was composed of a series of (i) cylindrical elements differing in diameter (d_i) along the length (l_i) of each element (larger at the base and smaller at the top), as proposed by Niklas and Spatz (2000) – Figure 2. In the computational model, the system, composed by stem and root (Figure 2), is anchored in the soil. So, the model was created based on three main parts, as proposed by Rahardjo et al. (2014). The first part consists of a 16 m x 16 m (length and width) soil box; the second part consists of the root, considered to be cylindrical in shape and equivalent in size to the crown; and the third part consists of the stem, whose dimensions were adopted according to the scenarios (Table 1).

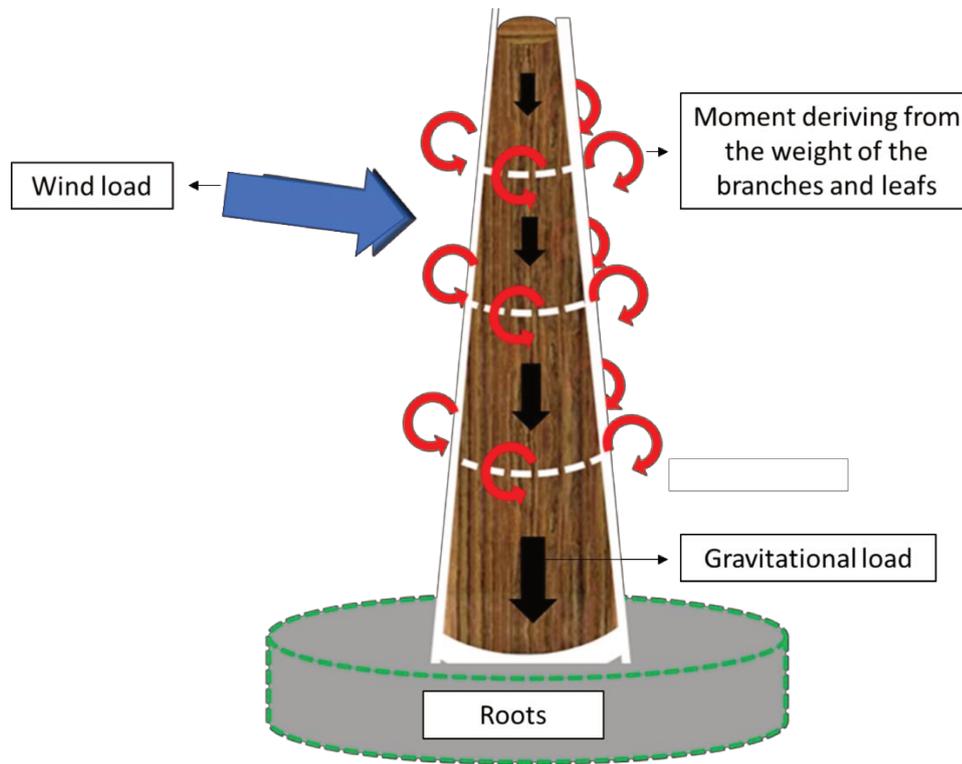


Figure 2. Simplified tree typology to be used in the software aiming to obtain displacements and stresses.

In the simulation, the soil properties were obtained from the work by Rahardjo et al. (2014), which considered the soil as isotropic.

The tree stem wood was considered as orthotropic and the values adopted in the simulations were those of average physical and mechanical properties, in the saturated condition, of species previously studied in the research group. The model used three elasticity moduli – longitudinal (E_L), radial (E_R) and tangential (E_T), three in-plane shear moduli (G_{RT} , G_{LT} and G_{LR}) and three in-plane Poisson coefficients (ν_{LR} , ν_{LT} and ν_{RT}). In the complete characterization of this material, six Poisson coefficients were obtained (ν_{RL} , ν_{TL} , ν_{LR} , ν_{TR} , ν_{LT} and ν_{RT}) – Table 3. However, the computational program only allows the incorporation of three values, since it uses reciprocal relationships internally (Equation 2):

$$\frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}; \frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_L}; \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T} \quad \text{Equation 2}$$

Given that the ν_{RL} and ν_{TL} Poisson coefficients are very small (Table 3) and, in practice, they are experimentally obtained with less precision, the calculations were performed providing the program with the values of ν_{LR} e ν_{LT} . In the case of the RT plane, both Poisson coefficients are higher (Table 3), but following the same logic, the highest value was used (ν_{RT}).

Table 3. Average elastic parameters considered in the model.

Elastic parameters	
E_L [MPa]	10387
E_R [MPa]	1908
E_T [MPa]	1290
G_{RT} [MPa]	515
G_{LT} [MPa]	1173
G_{LR} [MPa]	1573
ν_{RL}	0.09
ν_{TL}	0.08
ν_{LR}	0.49
ν_{TR}	0.46
ν_{LT}	0.64
ν_{RT}	0.78

By entering the model (Table 1) and wood (Table 3) parameters in the software, according to the simplified typology adopted (Figure 2), for each scenario (Table 1) were obtained the values for displacement (Δ), normal stresses (σ) and shear stresses (τ), as well as the position of the maximum values of these parameters along the trunk.

Results and Discussion

Maximum displacement is more affected by height variation than by slenderness and taper variation for all levels of simulated wind loads (Figure 3). The loading level affects the behavior of displacement variation from slenderness (Figure 3). For the lowest loading level (5 kN), displacement only starts being affected by slenderness for values above 30 while for the other loading levels (10 kN and 15 kN), slenderness above 24 is already sufficient to affect displacement (Figure 3). At the simulated loading levels, taper does not affect maximum trunk displacement (Figure 3).

In all scenarios, conditions and loading levels, maximum displacement was at the top (Y values in Tables 4 to 6). This result was expected due to the conditions imposed on the model (cantilever).

In wooden structures, the maximum displacement allowed for the cantilever condition, which is the case of the tree, is given by Brazilian standard (ABNT NBR 7190/97) the length of the

piece (L)/100. This maximum displacement is based on the concept of Ultimate Limit State and aims to limit damage to structural elements or only for visual aesthetic reasons. One easily verifies (Tables 4 to 6) that in none of the scenarios or loading levels was the displacement compatible with this limit, which would be 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm and 250 mm for trees with heights of 5 m, 7.5 m, 10 m, 15 m, 20 m and 25 m, respectively. However, it is important to remember that the limits set in structural calculation standards are not suitable for plants, which throughout growth experience situations of high deformation due mainly to exposure to wind, and have adaptive capacity (Mattheck et al., 1993) that does not exist in structural elements. This adaptive capacity means that the elastic limit used in structural elements does not apply to trees, which deform far beyond that limit without presenting permanent deformations. Sani et al. (2012) suggest an effect of aero-elastic interaction between wind loads and trees and emphasize that tree falls are caused by the interaction between toppling forces caused by wind combined with the weight of the tree outside the center of gravity. Based on research by Sani et al. (2012), one can infer values of horizontal displacement of trees tops varying from about 1800 mm for a 21-m tree subjected to a simulated wind load of 12 kN; 1500 mm for a 17-m tree subjected to a 10-kN wind load; and 2500 mm for a 19.5-m tree subjected to a 14-kN wind load. These simulated wind load values were applied in a pulling test up to the tree base inclination limit admitted by this test, considered as an elastic limit. For these heights the elastic limits established in the Brazilian standard for wooden structure calculations (ABNT NBR 7190) would be 210 mm, 170 mm and 195 mm, indicating that the trees have limits about 10 times higher.

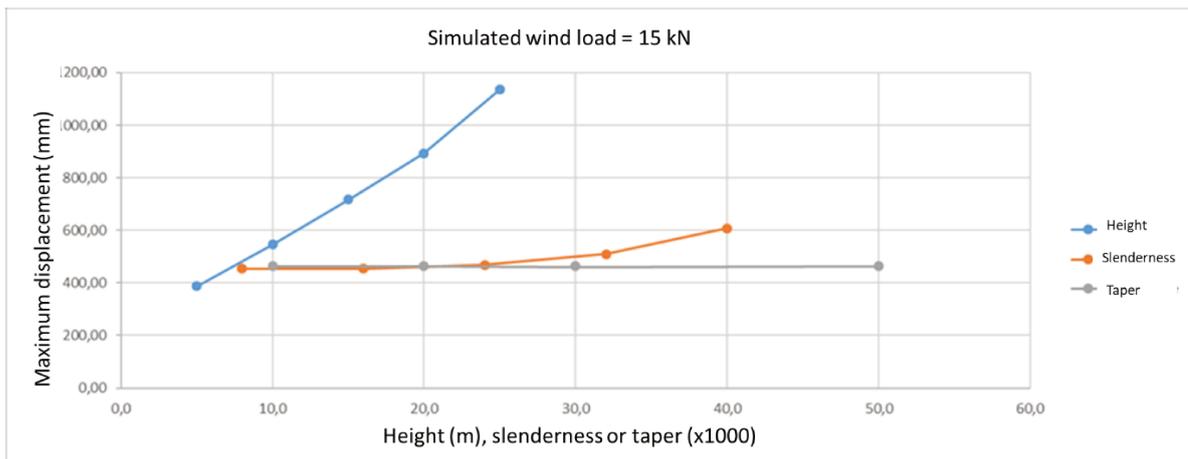
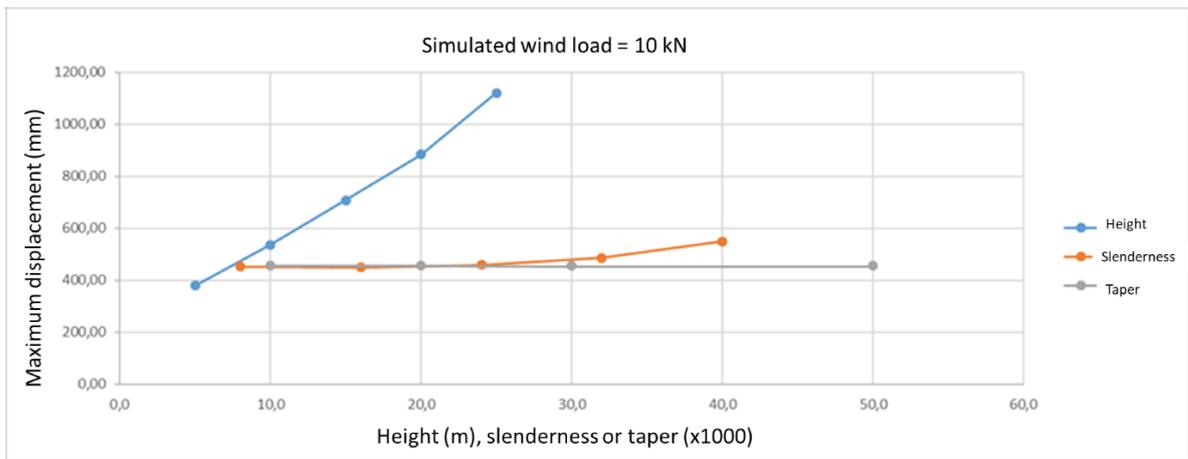
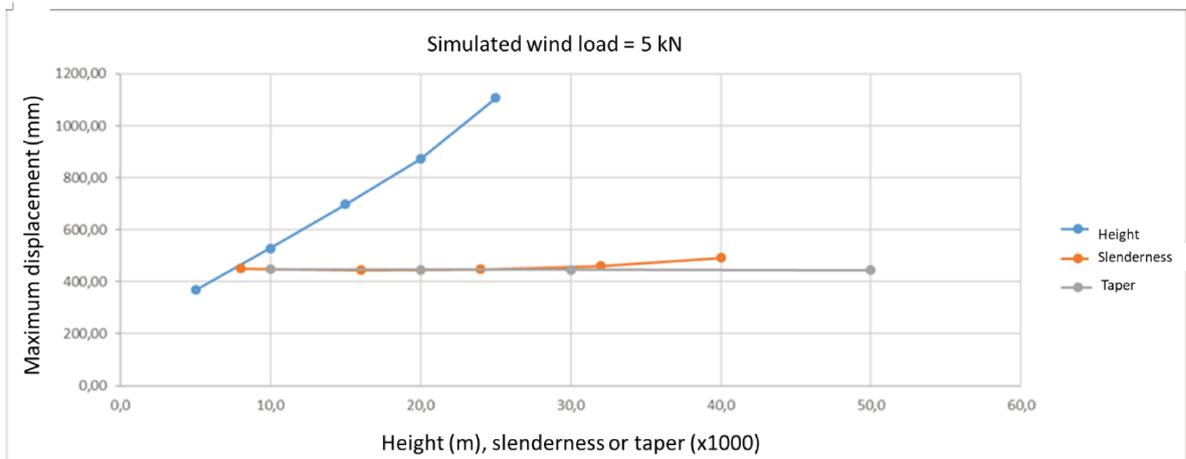


Figure 3. Behavior of the variation of maximum trunk displacement (mm) in relation to tree height (m), slenderness and taper (x1000) for three levels of simulated wind load.

Table 4. Values and positions ($Y=\%H$) of maximum (Δ) displacement (mm), maximum negative (σ^-) and positive (σ^+) normal stresses (MPa), and maximum negative (σ^-) and positive (σ^+) shear stresses (MPa) for values of height (H), slenderness (λ) and taper ($C \times 10^2$) adopted in each of the simulated scenarios. Simulated wind load 5 kN

H	λ	C	Δ	Y	σ^-	Y	σ^+	Y	τ^-	Y	τ^+	Y
5	22	3	369	100	3.87	0	5.04	0	1.29	0	1.05	0
10	22	3	529	100	4.68	0	5.27	0	1.78	0	1.66	0
15	22	3	699	100	5.21	0	6.15	0	1.93	0	2.08	0
20	22	3	873	100	6.47	0	5.41	0	2.44	0	2.70	0
25	22	3	1050	100	5.20	0	2.81	0	1.82	0	2.02	0
7.5	8	3	451	100	6.39	0	5.87	0	2.11	0	2.50	0
7.5	16	3	445	100	4.69	0	5.32	0	1.57	0	1.77	0
7.5	24	3	448	100	3.68	0	5.11	0	1.30	0	1.34	0
7.5	32	3	461	100	6.83	48.7	6.94	48.9	2.63	48.9	2.82	48.9
7.5	40	3	492	100	26.13	73.3	24.30	48.9	8.38	48.9	8.68	48.9
7.5	22	1	448	100	4.00	0	5.77	0	1.39	0	1.40	0
7.5	22	2	448	100	4.10	0	6.14	0	1.45	0	1.43	0
7.5	22	3	447	100	4.48	0	5.03	0	1.30	0	1.26	0
7.5	22	4	446	100	4.41	0	6.36	0	1.52	0	1.60	0

Table 5. Values and positions ($Y=\%H$) of maximum (Δ) displacement (mm), maximum negative (σ^-) and positive (σ^+) normal stresses (MPa), and maximum negative (σ^-) and positive (σ^+) shear stresses (MPa) for values of height (H), slenderness (λ) and taper ($C \times 10^2$) adopted in each of the simulated scenarios. Simulated wind load 10 kN

H	λ	C	Δ	Y	σ^-	Y	σ^+	Y	τ^-	Y	τ^+	Y
5	22	3	379	100	4.81	44.4	6.41	66.7	1.50	36.4	1.50	36.4
10	22	3	537	100	4.81	0	6.03	0	1.84	0	1.66	0
15	22	3	708	100	5.25	0	6.88	0	1.98	0	2.10	0
20	22	3	883	100	6.54	0	5.96	0	2.46	0	2.74	0
25	22	3	1060	100	5.19	0	3.09	0	1.84	0	2.03	0
7.5	8	3	453	100	6.36	0	6.12	0	2.12	0	2.49	0
7.5	16	3	449	100	4.69	0	5.95	0	1.61	0	1.77	0
7.5	24	3	459	100	4.28	24.2	6.14	0	1.54	24.5	1.38	0
7.5	32	3	485	100	12.90	48.7	14.05	48.9	5.35	48.9	5.72	48.9
7.5	40	3	550	100	50.60	73.3	49.76	48.9	17.21	48.9	17.78	48.9
7.5	22	1	456	100	4.15	61.2	7.00	0	1.51	0	1.43	0
7.5	22	2	456	100	4.53	61.2	7.31	0	1.64	0	1.43	0
7.5	22	3	455	100	4.50	0	5.95	0	1.41	24.5	1.26	0
7.5	22	4	455	100	5.67	61.2	8.26	24.5	2.16	24.5	2.26	48.9

Table 6. Values and positions ($Y=\%H$) of maximum (Δ) displacement (mm), maximum negative (σ^-) and positive (σ^+) normal stresses (MPa), and maximum negative (σ^-) and positive (σ^+) shear stresses (MPa) for values of height (H), slenderness (λ) and taper ($C \times 10^2$) adopted in each of the simulated scenarios. Simulated wind load 15 kN

H	λ	C	Δ	Y	σ^-	Y	σ^+	Y	τ^-	Y	τ^+	Y
5	22	3	388	100	7.16	66.7	9.77	36.7	2.23	36.4	2.23	36.4
10	22	3	545	100	4.97	0	6.79	0	1.91	0	1.66	0
15	22	3	717	100	5.30	0	7.62	0	2.03	0	2.12	0
20	22	3	893	100	6.65	0	6.51	0	2.49	0	2.79	0
25	22	3	1070	100	5.18	0	3.37	0	1.88	0	2.05	0
7.5	8	3	454	100	6.32	0	6.37	0	2.13	0	2.47	0
7.5	16	3	454	100	4.88	61.2	6.57	24.5	1.69	0	1.77	0
7.5	24	3	469	100	6.46	24.2	8.12	48.9	2.26	24.5	1.90	48.9
7.5	32	3	510	100	18.98	48.7	21.15	48.9	8.06	48.9	8.62	48.9
7.5	40	3	608	100	75.07	73.3	75.22	0	26.04	48.9	26.88	48.9
7.5	22	1	464	100	6.22	61.2	8.24	0	1.69	0	1.47	0
7.5	22	2	463	100	6.79	61.2	8.49	0	1.83	0	1.43	0
7.5	22	3	463	100	5.57	61.2	6.87	0	2.06	24.5	1.43	48.9
7.5	22	4	464	100	8.50	61.2	12.42	24.5	3.22	24.5	3.42	48.9

For maximum normal stresses (positive and negative) – Figures 4, 5 and 6, and for maximum shear stresses (positive or negative) – Figures 7, 8 and 9, the influence of slenderness is the most significant, while taper is the factor with the least influence. Height variation had a small influence, remaining stable or increasing slightly for trees of heights up to 20 m and showing a small decrease in value when the height of the tree exceeds 20 m, both on the compressed edge and the tension edge (Figures 4 a 9).

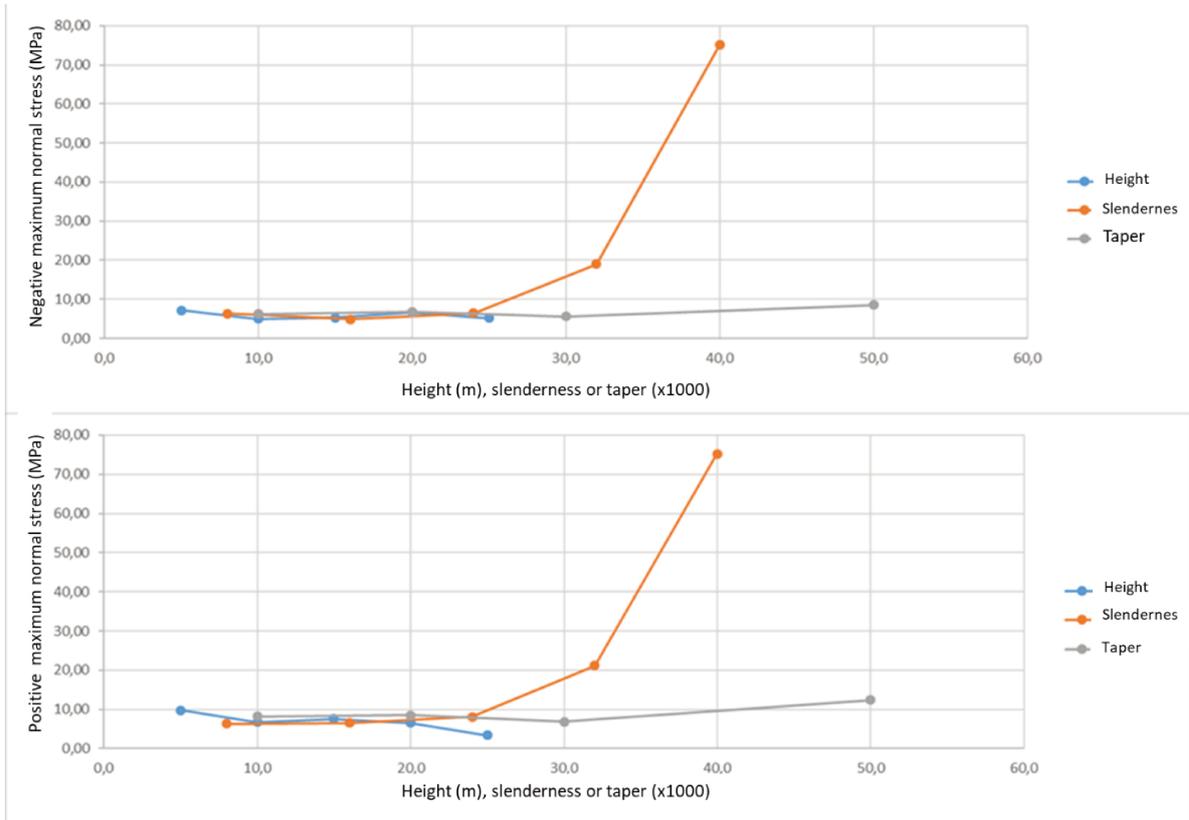


Figura 6. Behavior of normal stresses due to variation in height, slenderness and taper for a simulated wind load of 15 kN

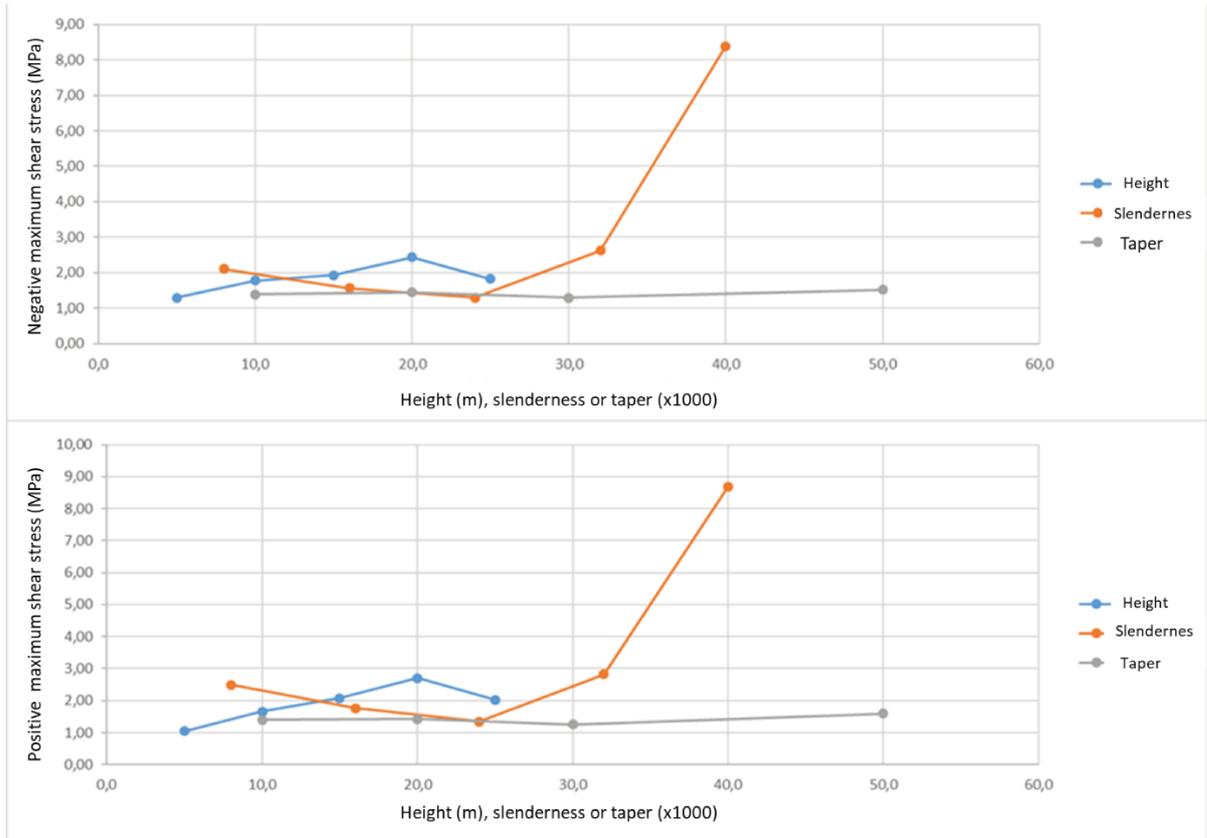


Figure 7. Behavior of shear stresses due to variation in height, slenderness and taper for a simulated wind load of 5 kN

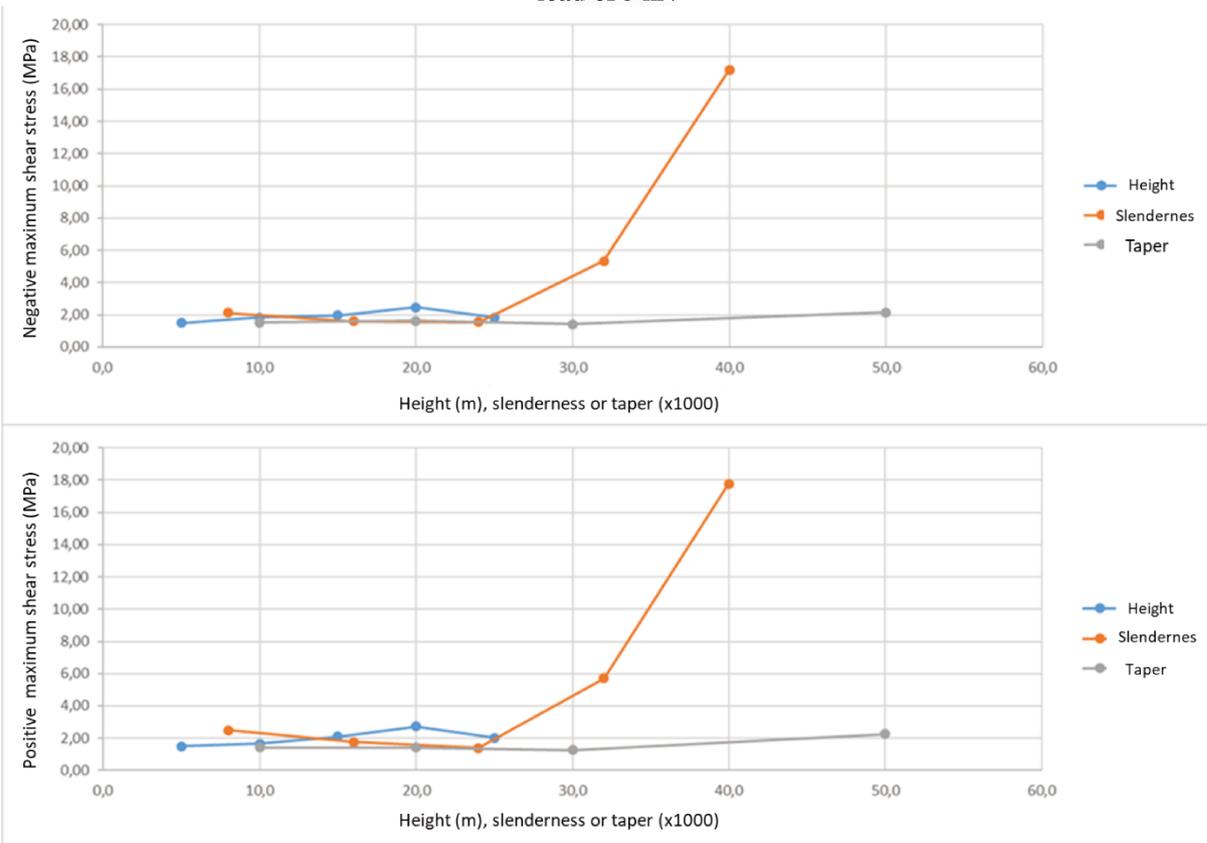


Figure 8. Behavior of shear stresses due to variation in height, slenderness and taper for a simulated wind load of 10 kN

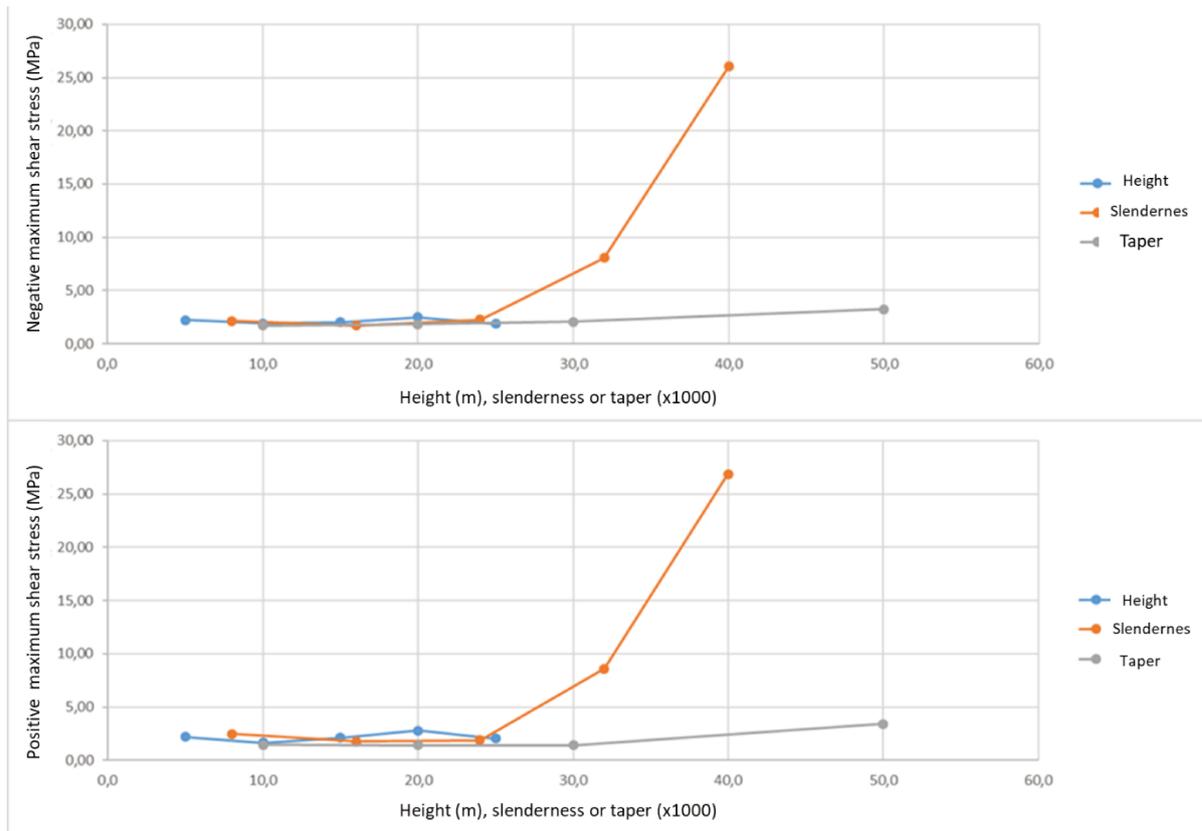


Figure 9. Behavior of shear stresses due to variation in height, slenderness and taper for a simulated wind load of 15 kN

In scenario 1 (Table 1), in trees with heights ranging from 10 m to 25 m, the maximum normal stresses (positive and negative) always occur at the base, regardless of the simulated wind load level (Y in Tables 4 to 6). However, in the shortest tree (5m), the maximum normal stresses occur only at the base for the lowest wind load level (5kN) – Table 4. For the other levels (10kN and 15kN) the maximum normal stresses occur in intermediate trunk zones, between about 37% and 67% of the height (Tables 5 and 6). The position of the maximum normal stresses may indicate that in shorter trees the gravitational stresses, caused by the actual weight of the trunk and branches, have a significant effect for wind load levels in which trunk displacement causes a reduction in the moment arm, responsible for the maximum moment in the base. The reduced normal stress in trees with heights above 20 m may also have been produced by the effect of greater trunk displacement, which causes a reduction of the moment caused by the wind load, although it is still greater than that caused by the gravitational loads. Besides being influenced by stem displacement, the variation of the position of the maximum moment is influenced by the variation of the diameter along the stem, which directly interferes in the value of the area of the cross section and of the moment of inertia, therefore of the acting stress. Niklas and Spatz

(2000) simulated a 13-m tall tree composed of three cylindrical elements with successive diameter reduction, without considering the branches, subjected to corresponding wind-speed loads of 10, 20 and 50m/s. The authors' results show that although the bending moments increased from the top to the base of the tree and the maximum moment was located close to the base, the normal stresses varied along the stem following a third degree polynomial. Results obtained by Milne and Blackburn (1989) show that the maximum normal stresses occur between 19% and 63% of the tree's total height (H), a result also obtained in this work for the shortest trees (5 m). In the case of the results of Milne and Blackburn (1989), the shortest tree was also the one with the highest maximum moment position (63%) and stress distribution along the shaft generally followed a fourth degree polynomial. Mamada et al. (1984) found that for uniformly tapered stems, trees of the *Cryptomeria japonica* species subjected to wind and snow loads had breakage located between 50% and 70% of the tree's height. The variation in the distribution of stresses along the stem is influenced by stem displacement, which causes variation in the weight of the relationship between moments caused by gravitational and wind loads (Petty and Swain, 1985).

The behavior of the shear stresses simulated in Scenario 1 (trees of different heights) was similar to that of normal stress, with maximum stress (positive and negative) at the base for trees ranging from 10 m to 25 m high and with position variation for trees 5 m high (Tables 4 to 6). For this scenario and a simulated wind load of 5kN the maximum values were at the base, and for simulated wind load levels of 10 and 15kN the maximum values (negative and positive) occurred at about 36% of the height (Tables 5 and 6).

In scenario 2, with varying slenderness and set height (7.5 m) and taper (0.030), the position of the maximum normal stresses (positive and negative) cease to be at the base for $\lambda \geq 32$ at the lowest level of simulated wind load (Table 4), for $\lambda \geq 32$ at the intermediate simulated wind load level (Table 5) and for $\lambda \geq 16$ at the maximum simulated wind load level (Table 6). This height variation occurs in a different way for positive and negative stresses.

For shear, the position of maximum values (positive and negative) remains at the base at any level of simulated wind load for $\lambda \geq 16$ (Tables 4 to 6), starting to change position for $\lambda \geq 32$ at the minimum level of simulated wind load (Table 4) and for $\lambda \geq 24$ at the intermediate and maximum load levels (Tables 5 and 6).

It is important to emphasize that the studies by Milne and Blackburn (1989) and Niklas and Spatz (2000) attribute stress variation along the stem to trunk slenderness, with displacement

from the base (where the maximum moments occur due to the action of wind forces) to the upper regions of the stem. Those authors also reject the hypothesis of constant stress distribution along the stem and conclude that such distribution is strongly dependent on the relationship between height and diameter.

In scenario 3, with set height (7.5 m) and slenderness (22) and varied taper, there is a change in the maximum normal stress (negative and positive) of the base from a simulated 10-kN wind load (Tables 4 to 6). Position variations differ between normal and shear stresses as well as between positive and negative stresses (Tables 5 and 6). The maximum negative normal stress for simulated wind loads of 10kN and 15kN starts occurring at around 60% H for all taper levels (Tables 5 and 6).

A compilation of results of pulling tests with more than 4500 trees carried out in ten different countries shows that, as expected, taller trees are subjected to higher wind loads (Wessolly, 2004 cited by Detter et al., 2005), with an increase in the resulting moment at the base. However, the resulting stresses are strongly influenced by the diameter of the stem (Wessolly, 2004 cited by Detter et al., 2005).

In engineering, structure evaluation is performed using a safety factor, which is typically considered the relationship between load capacity and acting load (Timoshenko, 1956). This ratio must be greater than or equal to one for the structure to be considered reliable. However, a large number of publications indicate that plants are structures that withstand much higher stresses than those expected by conventional design resistance calculation (Tateno and Bae, 1990; Tateno, 1991; Mattech et al., 1993; Niklas, 1994; Niklas, 2000). Proposals for measurements of plant safety factors have been developed through studies of the relationship between breakage stresses and expected service stresses in situations of applied external forces (Niklas, 2000). Thus, tree safety factors reported in the literature are generally based on studies with the application of static loads (Niklas, 1994), such as pulling tests. Niklas and Spatz (2000) showed that the safety factors in trees vary sinusoidally, so that the lowest safety factors occur for peripheral branches and the lower parts of the trunk. On the other hand, the middle parts of the tree have significantly higher safety factors. According to the authors, this is a strategy of the tree for the branches to break first, reducing the crown and thus reducing the wind drag forces acting on the trunk. This strategy is also logical when compared with the results obtained in this and other studies already mentioned, in which maximum stresses are verified in intermediate areas of the trunk. Mattheck et al. (1993) indicate that tree trunks withstand

stresses 4 to 5 times higher than those expected for wood, and Niklas and Spatz (2000) also conclude that those values would be between 3 and 5, not being constant along the stem.

Considering the characteristic resistance in bending, in the saturated condition, of the species used in the simulation ($f_{m,k} = 39$ MPa), the relations proposed in the European standard (EN 384) were used to infer the characteristic resistances in tension ($f_{t,k} = 0.6 f_{m,k} = 23$ MPa), compression ($f_{c,k} = 5 (f_{m,k})^{0.45} = 26$ MPa) and shear ($f_{v,k} = 0,2 (f_{m,k})^{0.80} = 3,75$ MPa). EN 14081 was used to determine the design values (Equation 2), considering for the solid wood modification coefficient (k_{mod}), service 3 class (totally exposed directly to rainwater and weather) and short-term loading class (permanent + wind), resulting in $k_{mod} = 0.70$. For the partial safety coefficient, the solid wood $\gamma_m = 1.3$ equivalent was used.

$$f_{w,d} = k_{mod} \frac{f_{w,k}}{\gamma_m} \quad \text{Equation 3}$$

Where: $f_{w,d}$ = design resistance; k_{mod} = modification coefficient; and γ_m = partial safety coefficient

Thus, considering engineering parameters applied to conventional wooden structures, design resistance was inferred in tension ($f_{t,d} = 12,4$ MPa), compression ($f_{c,d} = 14$ MPa) and shear ($f_{v,d} = 2,0$ MPa) of the saturated wood. With the design resistances, considered to be the load capacity, and the acting forces (normal stress and shear stress) from the simulations, the safety factors were calculated using the traditional expression for structures (relationship between load capacity and active load) for all scenarios and conditions (Table 7).

Considering the capacity of trees to withstand much higher active (service) loads than those withstood by structures in general, as highlighted in the literature presented above (between 3 and 5 times higher), stem breakage is only expected to occur when the safety factor reaches levels of 0.20 (5 times higher than a conventional wooden structure) to 0.33 (3 times higher than a conventional wooden structure). Thus, adopting the 0.33 ratio (minimum value obtained in the literature) as a critical value for tree fall risk, it is expected that for the conditions of scenarios 1 and 3 the trees will withstand all levels of simulated wind loads at all simulated heights and tapers (Table 7). For scenario 2, in turn, shear stresses may represent fall risk for $\lambda \geq 32$ (Table 7), at the maximum levels (15 kN) of simulated wind load. For $\lambda \geq 40$, there is fall risk for all simulated load levels (Table 7).

If safety factors below 1.0 were used as an indication of fall risk, it would be concluded that wind speeds of around 19 m/s (Table 1) would already be enough to breakage trees in all tested scenarios (Table 7). Given that the isopleth graph used in Brazil to indicate basic wind speeds from different regions indicates values from 30 m/s to 50 m/s, a very high number of trees would be expected to fall in Brazil.

Table 7. Safety factors (relationship between load capacity and acting load) of normal and shear stresses for three simulated wind load values and the different scenarios and conditions in each scenario.

Scenario	C	Force of 5 kN				Force of 10 kN				Force of 15 kN			
		σ^-	σ^+	τ^-	τ^+	σ^-	σ^+	τ^-	τ^+	σ^-	σ^+	τ^-	τ^+
1	1	3.62	2.46	1.55	1.90	2.91	1.93	1.33	1.33	2.18	1.27	0.90	0.90
	2	2.99	2.35	1.12	1.20	2.91	2.06	1.09	1.20	2.32	1.83	1.05	1.20
	3	2.69	2.02	1.04	0.96	2.67	1.80	1.01	0.95	2.03	1.63	0.99	0.94
	4	2.16	2.29	0.82	0.74	2.14	2.08	0.81	0.73	2.35	1.90	0.80	0.72
	5	2.69	4.41	1.10	0.99	2.70	4.01	1.09	0.99	4.53	3.68	1.06	0.98
2	1	2.19	2.11	0.95	0.80	2.20	2.03	0.94	0.80	2.29	1.95	0.94	0.81
	2	2.99	2.33	1.27	1.13	2.99	2.08	1.24	1.13	2.35	1.89	1.18	1.13
	3	3.80	2.43	1.54	1.49	3.27	2.02	1.30	1.45	2.28	1.53	0.88	1.05
	4	2.05	1.79	0.76	0.71	1.09	0.88	0.37	0.35	1.00	0.59	0.25	0.23
	5	0.54	0.51	0.24	0.23	0.28	0.25	0.12	0.11	0.28	0.16	0.08	0.07
3	1	3.50	2.15	1.44	1.43	3.37	1.77	1.32	1.40	2.00	1.50	1.18	1.36
	2	3.41	2.02	1.38	1.40	3.09	1.70	1.22	1.40	1.92	1.46	1.09	1.40
	3	3.13	2.47	1.54	1.59	3.11	2.08	1.42	1.59	2.35	1.80	0.97	1.40
	4	3.17	1.95	1.32	1.25	2.47	1.50	0.93	3.01	1.69	1.00	0.62	0.58

Scenario 1: Slenderness 22; taper 0.030; and height conditions: 5m, 10m, 15m, 20m and 25m

Scenario 2: Tree height 7.5 m; taper 0.030; and slenderness conditions: 8, 16, 24, 32 and 40

Scenario 3: Tree height 7.5 m; slenderness 22; and taper conditions: 0.010, 0.020, 0.030 and 0.050

* Values in parenthesis indicate the safety factor required to reach the minimum expected value (unit) in conventional structures

Conclusions

Numerical simulation is an adequate tool to evaluate, in a simple and prompt manner, parameters that influence tree fall risk, enabling an increase in the number of studies and findings available to the scientific community. In this research, the simulations showed that:

- Tree height has a greater influence on displacement, while slenderness has a greater influence on normal and shear stresses. Taper is the factor that has the least influence on displacement and normal and shear stresses.

- Dendrometric factors and stress levels affect not only the value but also the position of maximum normal stresses, which move from the base of the tree to higher points on the trunk, showing that section variation, associated with the composition between moments caused by wind load and gravitational loads (trunk and branches), varies with the displacement undergone by the tree.

References

ABNT NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro. 1988.

ABNT NBR 7190 - Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro. 1997.

Ancelin, P., Courbaud, B., Fourcaud, T., 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest Ecology and Management*, 203, 101-121.

Brüchert, F., Gardiner, B., 2006. The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce (*Picea sitchensis*, Pinaceae). *American Journal of Botany*, 93(10), 1512-21.

Detter, A.; Brudi, E.; Bischoff, F., 2005. Statics Integrated Methods: Results from pulling tests in the past decades. In: *La visión del Árbol: actas del 9º Congreso de Arboricultura*. Barcelona, 103-112.

Drumond, M. A. et al., 1996. Alterações fitossociológicas e edáficas na Mata Atlântica em função das modificações da cobertura vegetal. *Revista Árvore*, 20(4).

Garcia, G. H. L. 2018. Propriedade da madeira de galhos de espécies utilizadas na arborização urbana. Dissertation, Faculdade de Engenharia Agrícola/Unicamp, Campinas.

Mamada, S., Kawamura, Y., Yashiro, M., Taniguchi, T., 1984. The strength of plantation sugi trees. *Journal of Japosenese Wood Research Society*, 30, 443-466.

Mattheck, C., Bethge, K., Schäfer, J., 1993. Safety factors in trees. *Journal of Theoretical Biology*, 165, 185-189.

Milne, R., Blackburn, P., 1989. The elasticity and vertical distribution of stress within stems of *Picea sitchensis*. *Tree Physiology*, 5, 195-205.

- Niklas, K. J., 1994. Interspecific allometries of critical buckling height and actual plan height. *American Journal of Botany*, 81, 1275-1279.
- Niklas, K. J., 2000. Computing factors of safety against wind-induced tree stem damage. *Journal of Experimental Botany*, 51 (345), 797-806.
- Niklas, K. J., Spatz, H.-C., 2000. Wind-induced stresses in cherry trees: evidence against the hypothesis of constant stress levels. *Trees*, 14, 230-237.
- Petty, J. A., Swain, C., 1985. Factors Influencing Stem Breakage of Conifers in High Winds. *Forestry*, 58(1), 75-101.
- Rahardjo, H. et al., 2014. Understanding the stability of Samanea saman trees through tree pulling, analytical calculations and numerical models. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 355-364.
- Ruy, M. 2020. Modelagem do comportamento biomecânico de árvores. PhD Theses. Faculdade de Engenharia Agrícola/Unicamp, Campinas.
- Sani, L. et al., 2012. Preliminary experiments and verification of controlled pulling tests for tree stability assessments in Mediterranean urban areas. *Biosystems engineering* 112, 218-226.
- Sellier, D., Fourcaud, T., 2009. Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds. *American Journal of Botany*, 96(5), 885-896.
- Silva, J. A. A., 1979. Princípios básicos de dendrometria. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, pp. 191.
- Tateno, M., 1991. Increase in lodging safety factor of thigmomorphometrically dwarfed shoots of mulberry tree. *Physiologia Plantarum* 81, 239-243.
- Tateno, M., Bae, K., 1990. Comparison of lodging safety factor of untreated and succinic acid 2,2-dimethylhydrazide-treated shoots of mulberry tree. *Plant Physiology* 92, 12-16.
- Timoshenko, S. P., 1956. *Theory of elastic stability*. McGraw-Hill, New York.
- UNE-EN 14081 Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section. Madrid. 2005.
- UNE-EN 384 Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Madrid, 2017.

4. Artigo 03: Proposta de modelo estrutural representativo do comportamento de árvores

Proposta de modelo estrutural representativo do comportamento de árvores

Resumo

Árvores podem ser consideradas, simplificada, estruturas com esquema estático engastado-livre e sujeitas a cargas gravitacionais e de vento. Mesmo com essa simplificação, são estruturas muito mais complexas do que as convencionais, por serem seres biológicos, vivos e com grande resiliência e capacidade adaptativa. Na engenharia modelos estruturais são ferramentas usuais, pois permitem simular o comportamento de estruturas e, como consequência, auxiliam no dimensionamento e na avaliação de risco de ruína. Assim, com adaptações, tais modelos também poderiam ser ferramentas de análise de risco de queda de árvores. Essa pesquisa teve como objetivo propor sequência de modelos estruturais, com incremento de complexidade, e analisar o alcance de cada um deles para inferir, de forma aproximada, o comportamento de árvores frente a cargas gravitacionais e de vento. Para atingir esse objetivo os modelos foram desenvolvidos por meio de um software de elementos finitos (MEF). A validação dos modelos foi realizada por meio de comparação dos resultados de deslocamento, obtidos em simulações do modelo e em ensaio de campo (*pulling test*) de um exemplar da espécie *Khaya ivorensis*. O modelo adotado como mais adequado para representar o comportamento de árvores sob a ação de cargas gravitacionais e de vento foi testado, também, em simulações nas quais foram incorporadas deteriorações no fuste. Considerando as limitações existentes para modelar uma estrutura de tão grande complexidade como é o caso da árvore, o modelo proposto permite obter valores coerentes de deslocamentos verticais e de tensões normais e de cisalhamento, tanto na condição sã quanto com presença de biodeteriorações em diferentes níveis, dimensões e posições.

Palavras-chaves: biomecânica, risco de queda de árvores, método dos elementos finitos.

Introdução

As mudanças climáticas e os eventos extremos resultantes delas ocasionam, ano após ano, grande número de quedas de árvores, muitas vezes com resultados trágicos, tornando a análise do risco de queda de árvores tema fundamental em termos de segurança das cidades. O tema envolve questões multidisciplinares, incluindo biologia e engenharia. Assim, a biomecânica busca aliar aspectos biológicos (relações dendrológicas, capacidade adaptativa e de resiliência de árvores, agentes biodeterioradores com seus respectivos sintomas e consequências) ao comportamento mecânico de árvores, que crescem buscando seu equilíbrio estrutural e realizam adaptações para a manutenção desse equilíbrio durante a vida.

O fuste de uma árvore pode ser considerado como uma viga engastada-livre, se comportando segundo previsto na teoria de Timoshenko ou de Euler (Wessolly e Erby, 1998 citado por Martinez e Dias, 2016). Essa viga teria o diâmetro variando com a altura, com seção transversal circular ou elíptica, sendo o peso da copa da árvore analisado como uma força vertical aplicada no centro de gravidade da árvore e o vento como uma força horizontal aplicada no centro de gravidade da copa (Milne e Blackburn, 1989).

Para sobreviver e crescer, as árvores precisam constantemente se adaptar em ambientes em que a gravidade e o vento desempenham papéis importantes (Niklas, 1992). Uma premissa fundamental é que as plantas não podem violar as leis básicas da física (Niklas, 1992). A gravidade faz com que a madeira do tronco das árvores seja submetida a esforços de compressão ao mesmo tempo que os galhos, estruturas em balanço, sofrem esforços de flexão. As árvores passam por processo de ganho de carga conforme crescem (diâmetro e altura) e têm aumento no número de ramificações. À medida que a árvore cresce, a força de arrasto gerada pela pressão do vento agindo sobre as ramificações também aumenta (Niklas, 1992). As forças atuantes nos galhos e no tronco das árvores são transmitidas para seu sistema radicular por meio de momentos.

A composição modular das plantas (raiz, tronco e galhos) é outro aspecto importante na avaliação de equilíbrio de árvores (Niklas, 2001). Além de cada órgão apresentar propriedades particulares, de acordo com suas funções na árvore, a morfologia individual dos órgãos e as propriedades do tecido variam de acordo com o crescimento e com danos prévios sofridos (Niklas, 2001). Assim, conhecer as propriedades físico-mecânicas do lenho sadio é fundamental para compreender o processo de degradação, bem como da resistência da árvore aos esforços

internos e externos, permitindo melhorar a definição dos critérios para predição do seu risco de queda (Brazolin, 2009).

Spatz e Bruechert (2000) destacam que o comportamento da ruptura da madeira de árvores frente a esforços é muito diferente do comportamento da madeira seca e fisiologicamente inativa em estruturas convencionais de madeira. Galhos e fuste de árvores podem sofrer grandes deflexões, superando muito o trecho linear de elasticidade, e ainda continuarem estáveis (Spatz e Bruechert, 2000). Em dimensionamentos estruturais as hipóteses simplificadoras de cálculo são usualmente baseadas em pequenos deslocamentos e respostas lineares, o que não ocorre no caso de árvores. Além disso, árvores são estruturas de grandes dimensões e de geometria complexa, fazendo com que métodos aplicados em estruturas convencionais tenham que ser adaptados para representarem, ainda que de forma aproximada, seu comportamento.

O vento é uma carga dinâmica, e a resposta da árvore a essa carga também é essencialmente dinâmica, envolvendo cargas inerciais devido ao movimento, amortecimento, dissipação de energia e frequência natural de vibração (James *et al.*, 2014). Entretanto, análises dinâmicas de árvores expostas à carga de vento são complexas e, por esse motivo, muitos estudos adotam análises estáticas como aproximação da realidade (James *et al.*, 2004; Brudi e Wassenaer, 2002) sendo escassos os estudos que utilizam análises dinâmica (James, 2003; James *et al.*, 2006; Sellier e Fourcaud, 2009). Embora os estudos estáticos sejam considerados boas aproximações, é importante ter em mente que as cargas aplicadas dinamicamente podem amplificar o movimento e/ou causar efeitos maiores do que os promovidos pelas cargas estáticas (James, 2003). Apesar de todas as limitações, estudos visando a obtenção da velocidade crítica do vento para o qual a árvore irá perder a estabilidade têm sido realizados com uso de análises estáticas (Peltola e Kellomaki, 1993).

Do ponto de vista prático, o ensaio de tração (*Pulling test*) é o método estático mais conhecido e aplicado em campo para avaliações de riscos de queda. Esse método foi proposto para acessar a segurança de troncos e de raízes de árvores no final dos anos 80 (Sinn e Wessolly, 1989 citado por Detter *et al.*, 2005). No entanto, é um método caro, que necessita de muito tempo para aplicação e não há certeza de que seus resultados simulem, de forma apropriada, as respostas naturais e dinâmicas de árvores sujeitas a cargas de vento, uma vez que a inferência é realizada com níveis muito baixos de carga (Hale *et al.*, 2012). Esses baixos níveis de carga são utilizando no ensaio de *Pulling test* para evitar que se ultrapasse os limites elásticos da árvore, causando danos irreversíveis. Assim, o ensaio em geral é abortado quando a inclinação da árvore no

engastamento atinge $2,5^\circ$, considerado como limite típico para que o limite de proporcionalidade (LP) não seja superado. De forma geral, durante o ensaio a inclinação do fuste próximo do ponto de engastamento é verificada por meio de inclinômetro, e as deformações (tração e compressão) que ocorrem nas camadas exteriores do tronco são também mensuradas por meio de elastômetros. O *pulling test* utiliza o LP como parâmetro para inferir a resistência da árvore, mas, como já citado anteriormente, árvores são capazes de suportar limites muito mais elevados de deformações, fazendo com que sejam necessários estudos para verificar se as extrapolações para os limites de fratura são adequadas (Detter *et al.*, 2014). Assim, apesar dos ensaios estáticos de campo serem considerados como importantes ferramentas de análise do comportamento biomecânico de árvores, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas mais práticas e de menor custo, que resultem em resultados equivalentes. Além disso, o número de árvores disponíveis para serem submetidas a esses ensaios de tração (*Pulling test*) é limitado (Dupuy *et al.*, 2005).

Assim, cientistas vêm estudando formas de utilizar modelos numéricos que possam ser utilizados como ferramentas eficientes para estimar a distribuição de deformações e de tensões ao longo do fuste de árvores sujeitas a cargas gravitacionais e de vento (Gaffrey e Kniemeyer, 2002); em avaliações dos efeitos das características arquitetônicas da raiz e das propriedades do solo na distribuição de tensões no sistema radicular de árvores (Tesari e Mattheck, 2003) e, também, na análise de ruptura de árvores (Rahardjo *et al.*, 2014).

O objetivo desta pesquisa foi propor sequência de modelos estruturais, com incremento de complexidade, e analisar o alcance de cada um deles para inferir, de forma aproximada, o comportamento de árvores frente a cargas gravitacionais e de vento.

Material e métodos

Aplicando o Método dos Elementos Finitos (MEF) foram desenvolvidos uma série de modelos utilizando *software* computacional Ansys R18.2, com o qual foi realizada análise linear estática. A árvore simulada foi considerada, inicialmente, totalmente íntegra (sem deteriorações ou defeitos estruturais). O modelo arquitetônico foi baseado em características geométricas (Tabela 1) de um exemplar da espécie *Khaya ivorensis*, localizado em ambiente rural do município de Campinas SP (Linhares, 2019).

Tabela 1. Parâmetros dendrométricos do Mogno africano (*Khaya ivorensis*) considerados no modelo.

Altura total [m]	9,4
Altura do início da copa [m]	3,1
Diâmetro a altura do peito (DAP) (cm)	23,5
Diâmetro de Base (DAS) (cm)	31,5
Diâmetro de Copa (Lc) (m)	5,9
Altura de Copa (Hc) (m)	6,3
Tipo de Copa	Simpodial – Elíptica Vertical
Área de Copa (Ac)	28,7

A madeira do fuste da árvore foi considerada como ortotrópica e os valores adotados nas simulações das propriedades mecânicas (Tabela 2) foram obtidos de pesquisas anteriores do grupo. A densidade da madeira na condição saturada foi de 800 kg/m^3 . Nos modelos foram utilizados três módulos de elasticidade - longitudinal (E_L), radial (E_R) e tangencial (E_T), três módulos de cisalhamento nos planos (G_{RT} , G_{LT} e G_{LR}) e três coeficientes de Poisson (valores máximos) nos planos (ν_{LR} , ν_{LT} e ν_{RT}).

Tabela 2. Parâmetros elásticos da madeira do fuste da árvore da espécie Mogno africano (*Khaya ivorensis*) na condição saturada

E_L [MPa]	7757
E_R [MPa]	969
E_T [MPa]	1551
G_{RT} [MPa]	194
G_{LT} [MPa]	776
G_{LR} [MPa]	582
ν_{LR}	0,49
ν_{LT}	0,68
ν_{RT}	0,64

A madeira utilizada na simulação (*Khaya ivorensis*) apresenta módulo de elasticidade médio de 9755 MPa na condição seca (12% de umidade). Assim, utilizando a norma Europeia (EN 338, 2010) é possível classificar essa madeira como (D18), cujo módulo de elasticidade médio (E_{m0} ,

médio) é de 9500 MPa. Ainda segundo a EN 338, uma espécie classificada como D18 apresenta resistência característica na compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) de 18 MPa, na tração paralela às fibras ($f_{t0,k}$) de 11 MPa e no cisalhamento ($f_{v,k}$) de 3,5 MPa.

Para determinar os valores de cálculo (Equação 1) utilizou-se a EN 14081, considerando para o coeficiente de modificação (k_{mod}) a madeira maciça, a classe de serviço 3 (totalmente exposto diretamente a água de chuva e intempéries) e a classe de carregamento de curta duração (permanente + vento), resultando em $k_{mod} = 0,70$. Para o coeficiente parcial de segurança (γ_m) foi utilizado o que corresponde à madeira maciça, cujo valor é 1,3. Esse cálculo é uma simplificação, uma vez que a condição na madeira na árvore é sempre saturada. No entanto, aplicar os coeficientes de redução da resistência para a madeira saturada e sobrepor o k_{mod} e o γ_m seria impor à árvore muita penalização.

$$f_{w,d} = k_{mod} \frac{f_{w,k}}{\gamma_m} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: $f_{w,d}$ = resistência de cálculo; k_{mod} = coeficiente de modificação e γ_m = coeficiente parcial de segurança

Dessa forma, calculou-se a resistência de cálculo na tração ($f_{t,d} = 5,9$ MPa), na compressão ($f_{c,d} = 9,7$ MPa) e no cisalhamento ($f_{v,d} = 1,9$ MPa). Os valores de tensão normal atuante na borda tracionada (valores positivos), provenientes da simulação, foram comparados com as resistências de cálculo na tração. Da mesma forma os valores de tensão normal atuante na borda comprimida (valores negativos), provenientes da simulação, foram comparados com as resistências de cálculo na compressão. As tensões atuantes de cisalhamento (positivas e negativas) foram comparadas com a resistência de cálculo ao cisalhamento.

Para simular as cargas de vento foram utilizados 5 valores (1118 N, 1940 N, 3580 N, 4080 N, 5090 N), aplicados por Linhares (2019) em teste de tração realizado no exemplar com as características geométricas apresentadas na Tabela 1.

Em geral, para estudos de árvores submetidas a cargas de vento utiliza-se, como simplificação, a transformação da pressão do vento (q) em carga concentrada, obtida pela multiplicação dessa pressão pela área da superfície frontal da copa. Essa carga é então aplicada no centro de gravidade da copa. Essa simplificação é mais bem aplicada em árvores com arquitetura monopodial (Figura 1A). No entanto, no caso de modelo com copa simpodial (Figura 1B), considerou-se que a forma mais adequada para representar a carga de vento foi dividindo essa carga entre os galhos simulados.

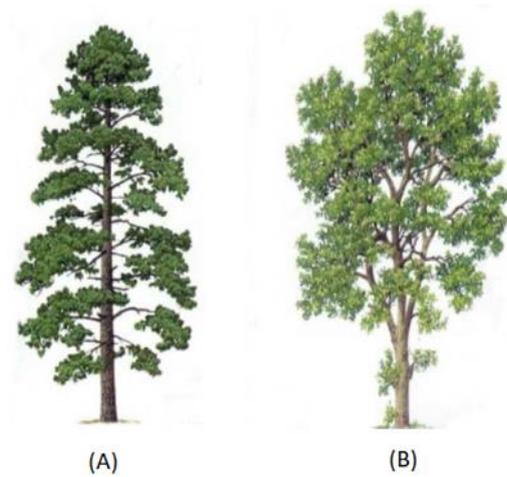
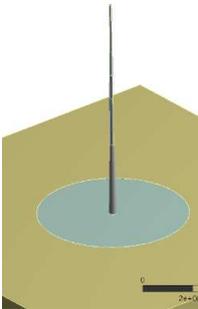
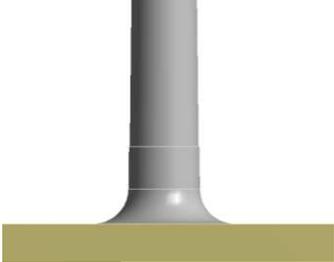
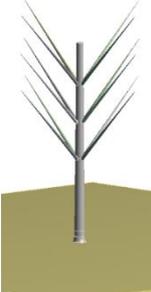
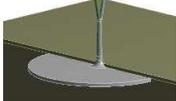


Figura 1. Arquitetura de árvores monopodial (A) e simpodial (B)

Durante o desenvolvimento da pesquisa foram desenvolvidos modelos estáticos (Tabela 3) com diferentes níveis de complexidade em termos de geometria e de simulação (elementos vigas e modelo 3D).

Tabela 3. Descrição dos modelos em ordem crescente de complexidade

Modelo	Características	Tipo de Arquitetura	
		Monopodial	Simpodial
Modelo 1 Elemento Viga	Utilização de elementos vigas. O fuste foi considerado um cilindro, utilizando-se o diâmetro médio. O engastamento do fuste no solo foi considerado rígido. Para a arquitetura monopodial os galhos foram representados como momentos ao longo do fuste.		
Modelo 2 Base Plana	Modelo 3D. O fuste foi considerado um cone. O engastamento do fuste (base plana) no solo foi considerado rígido. Para a arquitetura monopodial os galhos foram representados como momentos ao longo do fuste.		
Modelo 3 Simulação do torrão	Modelo 3D. O fuste foi considerado um cone. O engastamento foi feito por meio de uma semiesfera criada na base do fuste. Foi acrescentada a fixação da árvore em um torrão inserido em uma caixa de solo de 16m x 16m. Para a arquitetura monopodial os galhos foram representados como momentos ao longo do fuste. Para a arquitetura simpodial foi adicionado um par de galhos.		
Modelo 4 Simulação do Colo	Modelo 3D. O fuste foi considerado um cone. O engastamento foi feito por meio de uma semiesfera criada na base do fuste. Nessa etapa foi simulado o encurvamento do fuste na região de encontro com a raiz, mecanismo que permite reproduzir melhor a distribuição real das tensões.		
Modelo 5	Modelo 3D criado considerando forma de engastamento proposto por Rahardjo <i>et al</i> (2014). Para a arquitetura Monopodial foram inseridos galhos, distribuídos de maneira simétrica ao longo do fuste. Para a arquitetura simpodial foi inserido mais um par de galhos.		

O Modelo 5 foi criado com base em três partes principais, similar ao proposto por Rahardjo *et al.* (2014) - Figura 2. A primeira parte é composta por solo *in situ* de 16 m x 16 m (comprimento e largura); a segunda é composta pela raiz, com forma cilíndrica e dimensões baseadas no diâmetro da copa da árvore; e a terceira parte é composta pelo fuste, com dimensões também equivalentes ao do indivíduo analisado (Tabela 1).

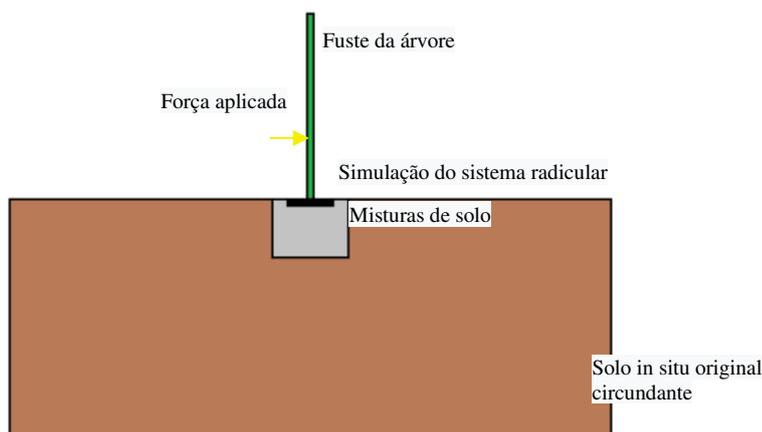


Figura 2. Representação do modelo numérico simulado por Rahardjo *et al.* (2014). Adaptado de Rahardjo *et al.* (2014)

O modelo proposto por Rahardjo *et al.* (2014) considerou as propriedades da madeira da raiz, do fuste e dos galhos como iguais e isotrópicas, diferenciando da proposta desta pesquisa, que considera a diferenciação das propriedades da madeira proveniente dessas três partes da árvore e, também, a ortotropia da madeira (Tabela 2). Para isso foram utilizados resultados de propriedades físicas (densidade) e mecânicas de raízes e de galhos obtidas anteriormente no grupo de pesquisa. Assim, a partir do Modelo 3, foram aplicadas, além das propriedades do fuste (Tabela 2), as propriedades de galhos e de raiz (Tabela 4). A densidade adotada para a madeira saturada da raiz foi 850 kg/m^3 e dos galhos 462 kg/m^3 .

Tabela 4 Parâmetros elásticos da madeira saturada de raiz e de galhos considerados no modelo.

Propriedade	Raiz	Galho
E_L [MPa]	11284	5218
E_R [MPa]	981	503
E_T [MPa]	1509	611
G_{RT} [MPa]	942	470
G_{LT} [MPa]	232	99
G_{LR} [MPa]	724	322
ν_{LR}	0,48	0,60
ν_{LT}	0,70	0,63
ν_{RT}	0,62	0,68

O solo foi considerado como material isotrópico (Rahardjo *et al.*, 2014), com densidade de 1720 kg/m³, módulo de elasticidade (E) de 13,50 MPa e coeficiente de Poisson (ν) de 0,4 (Rahardjo *et al.*, 2009).

Na simulação de cada modelo foram obtidos valores de deslocamento (total e direcional) e tensões normais (na zona comprimida e tracionada). As tensões de cisalhamento foram obtidas apenas para os modelos 3D, uma vez que nos modelos que trabalham apenas no plano XY não é possível obter esse parâmetro.

Como forma de validação, os valores de deslocamento, na direção paralela ao eixo de aplicação das cargas de ventos, obtidos em cada modelo, para cada uma das 5 cargas aplicadas, foram comparados aos resultados de deslocamento horizontal obtidos por ensaio de tração (Linhares, 2019). Para o modelo que apresentou melhor adequação de valores de deslocamento, quando comparado com o ensaio de campo, foram simulados defeitos internos, a fim de analisar o comportamento do modelo na detecção da influência dessas características no equilíbrio estrutural de árvores.

Os defeitos foram simulados através da inserção de uma esfera no tronco a uma altura de 1,3 m em relação ao solo (DAP). Foram simuladas situações com defeitos de diferentes dimensões e de diferentes condições de perda de resistência na região. No caso de deterioração provocada por fungos foram simuladas as podridões parda e mole (Tabela 5) considerando os dados de perda de resistência apresentadas por Brazolin (2009).

Tabela 5 Parâmetros utilizados para analisar a influência de deteriorações provocadas por fungos

Tipo de ataque biológico	Perda de E_m^* %	Perda de f_m^* %	Dimensão da deterioração em relação ao raio do fuste (simulação) %
Podridão branca incipiente	52	55	25
Podridão branca intensa	88	93	50
Podridão mole intensa	77	79	70

*Baseado em Brazolin (2009)

Tanto para as simulações de deterioração por fungos (Tabela 5) quanto de zonas com ocos, foram consideradas posições centralizadas e deslocadas, bem como diferentes dimensões de defeito. Para as dimensões foram consideradas a relação entre o raio do defeito (R_{defeito}) e o raio do fuste (R_{Fuste}), totalizando cinco situações:

1. Defeito centralizado. $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{Fuste}}$
2. Defeito centralizado. $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{Fuste}}$
3. Defeito centralizado. $R_{\text{defeito}} = \frac{2}{3} R_{\text{Fuste}}$
4. Defeito deslocado em X. $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{Fuste}}$
5. Defeito deslocado em X. $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{Fuste}}$

Resultados

Avaliação dos modelos utilizando como base a comparação dos deslocamentos obtidos em simulação numérica com os obtidos em ensaio de tração no campo (*Pulling test*)

Os valores de deslocamento obtidos por todos os modelos apresentam diferenças em relação aos valores obtidos em ensaio estático (Tabelas 6 e 7). A árvore ao ser submetida a carregamentos, não apresenta o mesmo comportamento de estruturas convencionais de madeira, concreto e aço; de forma que não se pode esperar que seu comportamento esteja exatamente em conformidade com os modelos desenvolvidos para tais estruturas (James, 2014; Miller, 2005). Assim, é importante estar ciente das limitações de tentar obter valores exatos e reconhecer que, para árvores, a teoria e a realidade não coincidem perfeitamente (Miller, 2005).

Considerando os modelos de copa monopodial, a diferença mínima de deslocamento quando comparado aos ensaios de tração de campo realizados por Linhares (2019) foi de 15% (Tabela 6: Modelo 4 – 5090 N) e a máxima de 107% (Tabela 6: Modelo 5 – 1118 N).

Para a copa de arquitetura simpodial as diferenças entre os resultados dos modelos e os resultados do ensaio de tração (Linhares, 2019) variaram entre 7% (Tabela 7: Modelo 5 – 5090 N) e 76% (Tabela 7: Modelo 2 – 1118 N).

Tabela 6 Valores de deslocamento horizontal (mm) obtidos em ensaio de tração (Linhares, 2019) e nos modelos desenvolvidos utilizando arquitetura de copa monopodial para os cinco modelos testados na pesquisa

Força [N]	Ensaio de tração	M1	M2	M3	M4	M5
1118	17	9,87 (42)	1,89 (89)	-0,37 (102)	3,90 (77)	-1,15 (107)
1940	25	17,13 (31)	3,27 (87)	4,64 (81)	9,12 (64)	4,92 (80)
3580	24	31,62 (-32)	6,04 (75)	14,47 (40)	19,50 (19)	17,02 (29)
4080	28	36,03 (-29)	6,88 (75)	17,46 (38)	22,66 (19)	20,72 (26)
5090	34	44,95 (-32)	8,58 (75)	23,69 (30)	29,03 (15)	28,21 (17)

*Os valores entre parêntesis indicam a diferença percentual entre os valores obtidos em ensaio de tração e os valores obtidos por cada simulação.

Tabela 7 Valores de deslocamento horizontal (mm) obtidos em ensaio de tração (Linhares, 2019) e nos modelos desenvolvidos utilizando arquitetura de copa simpodial.

Força [N]	Ensaio de tração	M1	M2	M3	M4	M5
1118	17	4,29 (75)	4,08 (76)	5,75 (66)	7,17 (58)	6,54 (62)
1940	25	7,61 (70)	7,08 (72)	10,11 (60)	12,32 (51)	11,38 (54)
3580	24	14,23 (41)	13,07 (46)	18,40 (23)	22,62 (6)	21,33 (11)
4080	28	16,24 (42)	14,90 (47)	20,91 (25)	25,73 (8)	25,12 (10)
5090	34	20,32 (40)	18,58 (45)	25,99 (24)	32,02 (6)	31,49 (7)

*Os valores entre parêntesis indicam a diferença percentual entre os valores obtidos em ensaio de tração e os valores obtidos por cada simulação.

Para todas as simulações, a diferença percentual entre os deslocamentos obtidos em ensaio de campo e com uso dos modelos diminui conforme aumenta a intensidade da carga aplicada (Tabelas 6 e 7). Maiores cargas atuantes elevam o risco de queda da árvore, portanto a diminuição das diferenças entre o ensaio de campo e a simulação com o aumento da carga pode ser considerado fator positivo ao validar o modelo para ser utilizado em análises de risco de queda.

O Modelo 1 (Figura 3) é o mais simples em termos de tempo de elaboração e execução, o que poderia significar economia de tempo operacional em situações nas quais o número de árvores a serem simuladas é elevado. Os resultados de deslocamentos obtidos por esse modelo se apresentam, em média, 53% menores (copa simpodial) que os valores obtidos em ensaio de tração em campo (Tabela 7). Para copa monopodial (Tabela 6) os deslocamentos obtidos no modelo com a aplicação das duas primeiras cargas (1118N e 1940N) foram inferiores (37%) aos obtidos por ensaio de campo, enquanto para as demais cargas foram superiores (31%). Além das diferenças entre os valores (de campo e simulados), por ser o modelo mais simples não permite a adição de regiões com biodeterioração ou com características relacionadas ao crescimento adaptativo.

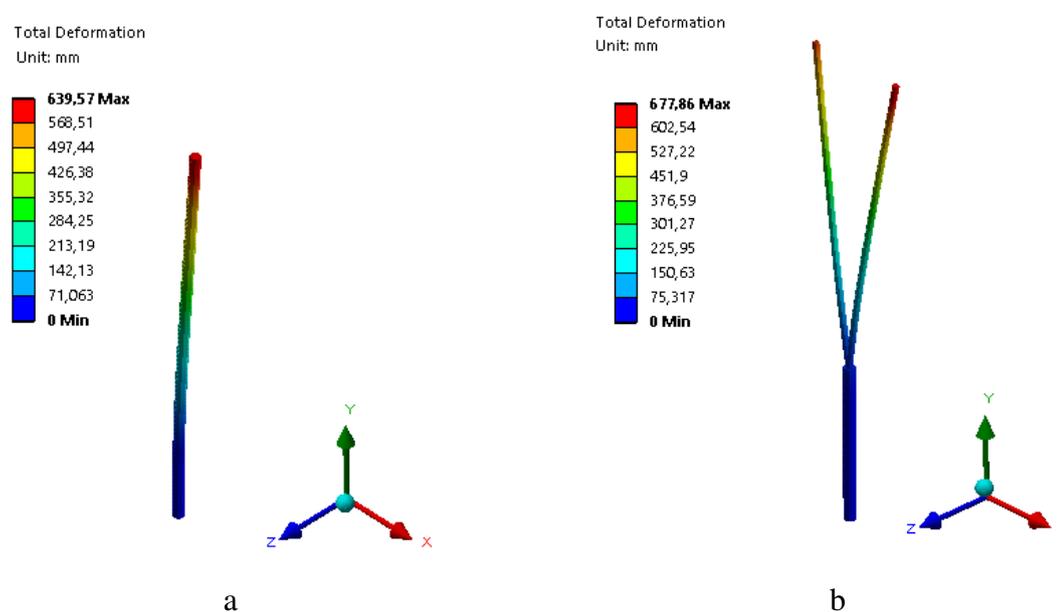


Figura 3 Deslocamentos horizontais obtidos pelo Modelo 1 na aplicação de carga de 5090N: (a) copa monopodial e (b) copa simpodial.

O Modelo 2 (Figura 4) foi o que apresentou valores numericamente mais distintos dos obtidos em ensaio de campo para os dois tipos de copa (Tabelas 6 e 7). Enquanto os deslocamentos obtidos no ensaio de tração variaram entre 17 e 34 mm, os deslocamentos obtidos pelo modelo de copa simpodial variaram entre 4,08 e 18,58mm (Tabela 7), portanto com diferenças de 76% e 45%, respectivamente. O Modelo 2 para a copa monopodial (Tabela 6) apresentou comportamento ainda mais distinto, com deslocamentos (1,89 – 8,58) em média 80% inferiores aos valores de ensaios de campo.

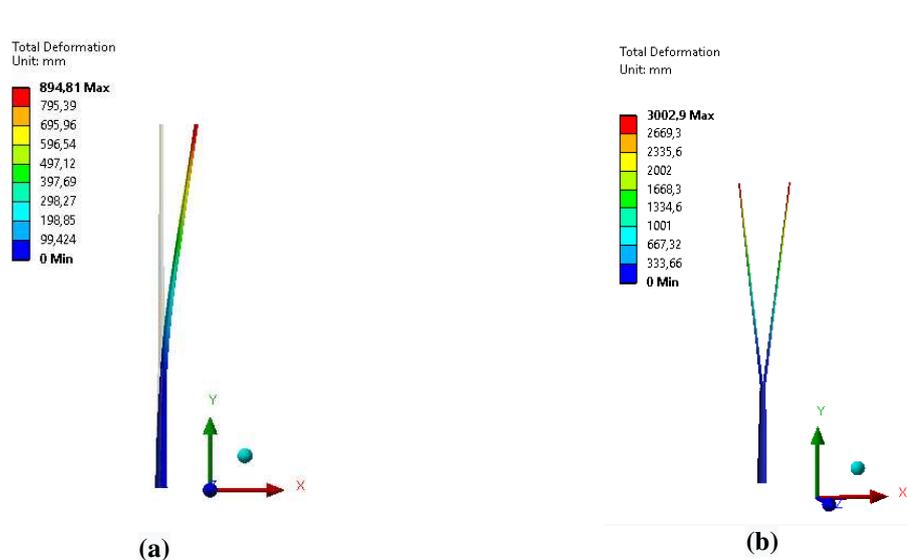


Figura 4 Deslocamentos horizontais obtidas pelo Modelo 2 na aplicação de carga de 5090N: (a) copa monopodial e (b) copa simpodial.

O Modelo 3 (Figura 5) permitiu simular a raiz, com diâmetro igual ao diâmetro da copa da árvore e com propriedades mecânicas diferenciadas (Tabela 4). Por apresentar um grau de complexidade mais elevado, com maior quantidade de elementos, o Modelo 3 permite incorporar análises de biodegradação e tigmomorfogênese. Considerando a importância da composição modular da árvore (Niklas, 2001), para o Modelo 3 cada parte da árvore (raiz, fuste e galho) foi simulada com propriedades mecânicas diferentes (Tabelas 2 e 4), assim como o solo. Assim, além de permitir levar em conta as propriedades diferenciadas de cada parte da árvore (raiz, fuste e galhos), o Modelo 3 também permite considerar as propriedades do terreno onde está inserido o indivíduo (Figura 5). No entanto, a incorporação desses elementos não produziu, para o deslocamento, reduções significativas de diferenças com os do ensaio de campo, quando comparados com o modelo 1 e copa monopodial, por exemplo (Tabelas 6 e 7). Tendo em vista que esse modelo permite a incorporação do torrão, é possível que o uso de propriedades desse elemento (porção de terra relativamente endurecida e aderida às raízes), ao invés de somente propriedades da raiz, permita atingir melhores resultados.

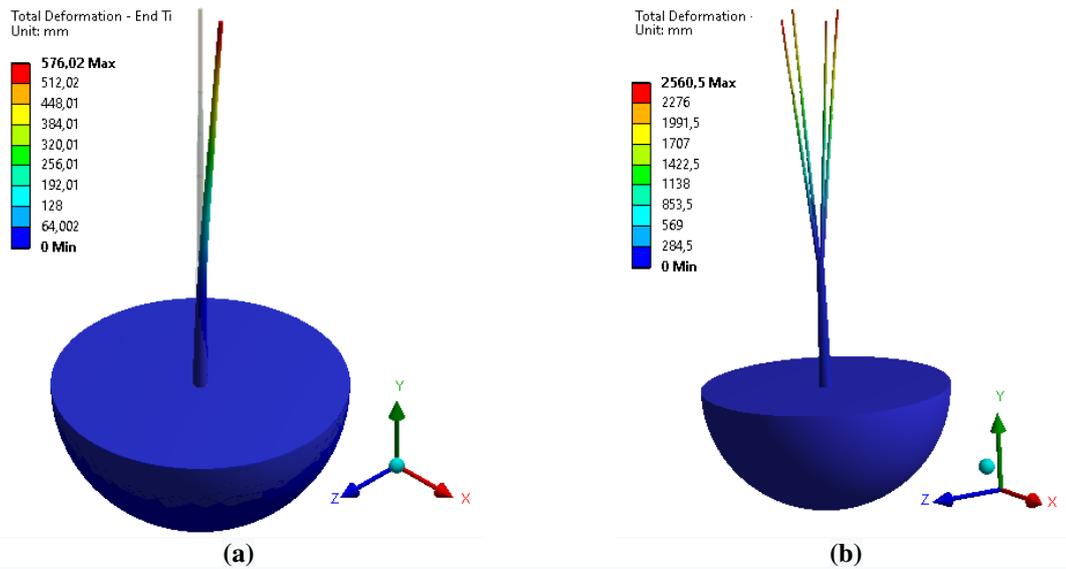


Figura 5 Deslocamentos horizontais obtidas pelo Modelo 3 na aplicação de carga de 5090N: (a) copa monopodial e (b) copa simpodial.

Com base no Modelo anterior, foi desenvolvido o Modelo 4 (Figura 6), no qual além da presença do torrão e de sua inserção em um solo, foi simulado o encurvamento (colo) do fuste na região de encontro com a raiz. Tal mecanismo é importante para simular, de forma mais adequada, a distribuição das tensões entre as partes da árvore. Em relação ao deslocamento horizontal, o Modelo 4 foi o que apresentou resultados mais semelhantes aos obtidos em ensaio de tração por Linhares (2019) – Tabelas 6 e 7. Para a arquitetura monopodial, o modelo apresentou diferença média de 39%, sendo que para cargas maiores (mais críticas em relação a risco de queda), a diferença cai para 15% (Tabela 6). Para o modelo considerando a copa simpodial a diferença se mostra ainda menor, sendo de 26% considerando a média de todos os índices de carga e de 6% para o valor máximo da carga aplicada (Tabela 7).

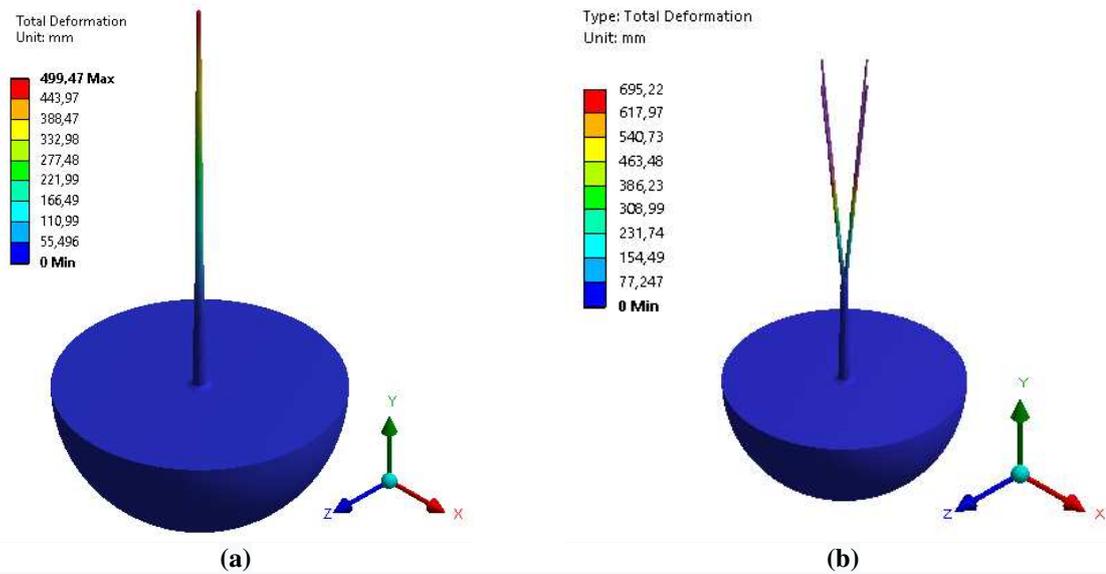


Figura 6 Deslocamentos horizontais obtidas pelo Modelo 4 na aplicação de carga de 5090N: (a) copa monopodial e (b) copa simpodial.

Além de valores de deslocamento horizontal próximos aos valores obtidos por Linhares (2019) em ensaios de campo da árvore simulada, as tensões de cisalhamento obtidas pelo Modelo 4 apresentam distribuição das tensões de cisalhamento mais próximas das esperadas considerando-se as bases teóricas de distribuição de tensões em elementos estruturais (Figura 7).

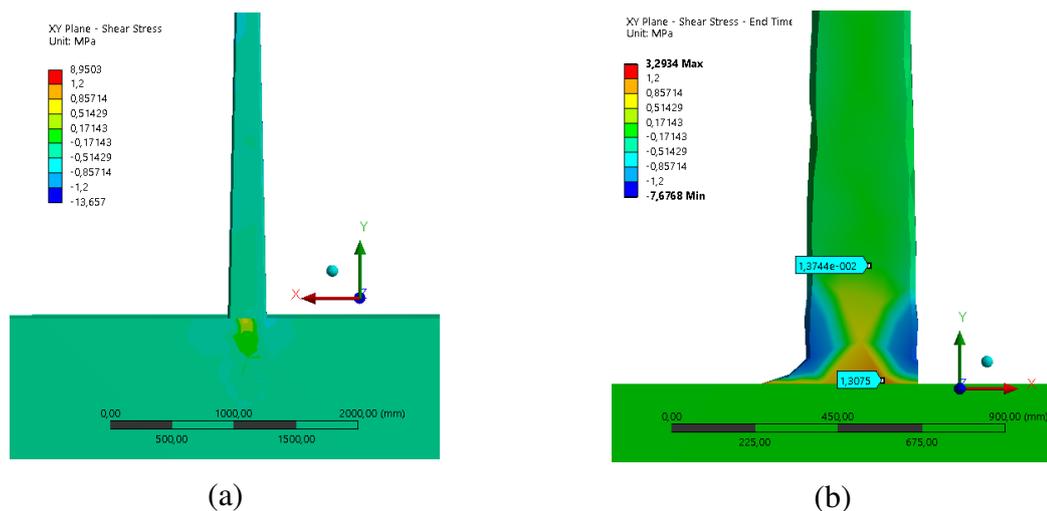


Figura 7 Detalhe da distribuição das tensões de cisalhamento no (a) Modelo 3 – copa simpodial - e no (b) no Modelo 4 – copa simpodial.

Ao utilizar os métodos dos elementos finitos para calcular os efeitos das características arquitetônicas da raiz e das propriedades do solo na distribuição de tensões no sistema radicular

de árvores, Tesari e Mattheck (2003) encontraram diferença entre a tensão de cisalhamento na base da árvore (região de transição entre fuste e raiz) e a tensão de cisalhamento no fuste (Figura 8). O comportamento da distribuição das tensões de cisalhamento obtidas pelo Modelo 4, apresentado nessa pesquisa, foram compatíveis com o comportamento relatado por Tesari e Mattheck (2003), embora a relação entre as tensões de cisalhamento na base e no fuste tenham sido superiores às obtidas pelos autores (46), tanto para a copa monopodial (82) quanto para a copa simpodial (95) – Figura 7 b.

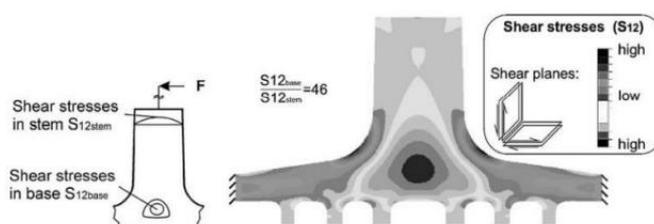


Figura 8. Tensões de cisalhamento calculadas por método de elementos finitos por Tesari e Mattheck (2003)

Além de apresentar resultados adequados na comparação com os valores obtidos por Linhares (2018), a distribuição das tensões de cisalhamento próximas às obtidas na literatura (Tesari e Mattheck 2003) faz com que este modelo possa ser considerado adequado para a proposição em análises de risco de queda.

O desenvolvimento do Modelo 5 se baseou em proposta de Rahardjo *et al.* (2014) - Figura 9. Além dos elementos propostos pelo autor (Rahardjo *et al.*, 2014), nessa pesquisa foram introduzidos os galhos e a região de encontro entre o sistema radicular e o fuste foi representado por uma curvatura (colo), como no caso do Modelo 4. Assim como os modelos anteriores (3 e 4), cada parte da árvore (Tabelas 2 e 4) e o solo foram simulados com diferentes propriedades mecânicas, permitindo, portanto, a adequação para diferentes condições de uso do modelo em análises de risco.

Em relação ao deslocamento horizontal, o Modelo 5 apresentou, no geral, valores menores que os obtidos por Linhares (2019) – Tabelas 6 e 7. Para a copa monopodial houve diferença média de 52% entre os dois valores (Tabela 6). Já para o modelo que representa um indivíduo simpodial, há diferença média de 29%, com diferença mínima de 7% para a máxima carga aplicada (Tabela 7).

De maneira análoga ao observado pelos resultados do Modelo 4, o Modelo 5 apresenta um comportamento da distribuição das tensões de cisalhamento em conformidade com os

resultados publicados por Tesari e Mattheck (2003) – Figura 9, mas as diferenças das relações entre as tensões na base e no fuste foram superiores às obtidas no Modelo 4 (128 para copa monopodial e 90 para copa simpodial) – Figura 9.

Assim, o Modelo 5 também apresenta características adequadas para a simulação de árvores.

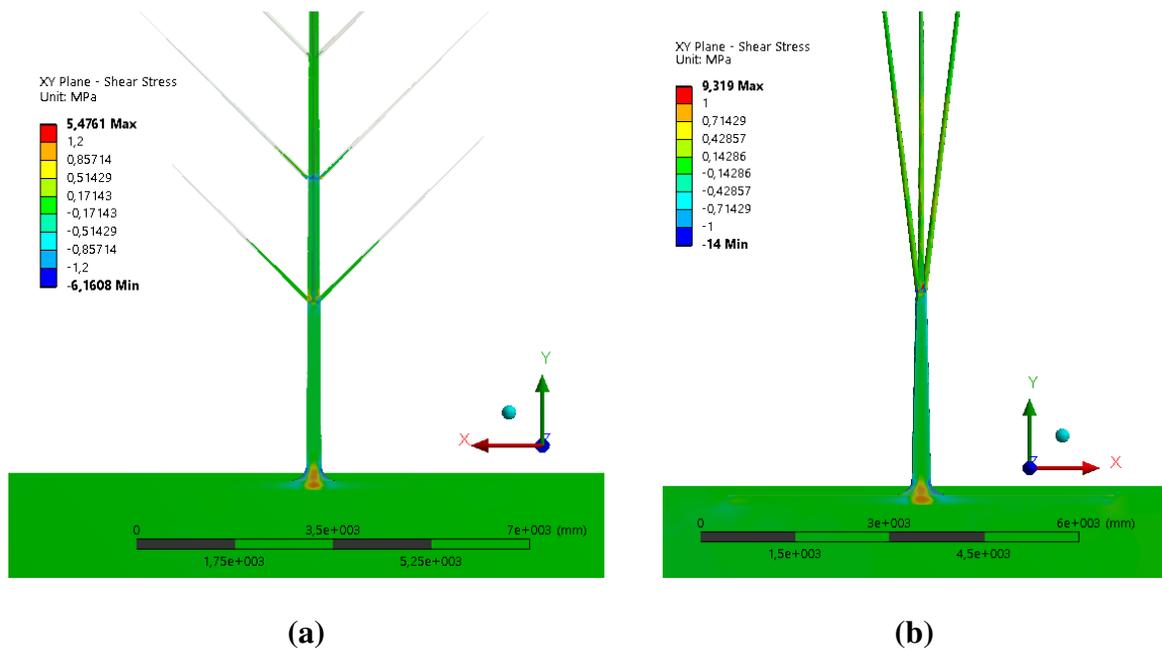


Figura 9. Exemplo de resultados de tensões de cisalhamento (a) copa monopodial e (b) copa simpodial para o Modelo 5.

Estudo de caso utilizando o Modelo 4 submetido a cargas gravitacionais e cargas de vento simuladas – árvore sadia

Segundo a Escala de Beaufort, ventos com velocidades de até 10 m/s (Escala 5) são considerados regulares. Na mesma escala, velocidades entre 11 e 14,5 m/s (Escala 6) já seriam capazes de movimentar troncos de árvores, acima de 17 m/s causar quebra de galhos grandes e superior a 24 m/s a queda de árvores. Assim, para análises gerais de risco de queda de árvores, sem penalização extrema de indivíduos saudáveis, a consideração de ventos regulares é adequada.

As análises que se seguem foram realizadas utilizando o Modelo 4 simulando cargas equivalentes a ventos de velocidade de 10 m/s, intensidade para a qual não são esperados danos em indivíduos saudáveis.

A literatura indica que o fator de segurança (capacidade de carga/carga atuante) de árvores não pode ser entendido da forma convencional (no mínimo igual a um), uma vez que as árvores suportam valores de tensão muito mais elevados do que os esperados para a madeira em estruturas (Tateno e Bae, 1990; Tateno, 1991; Mattech *et al.*, 1993; Niklas, 1994; Niklas e Spatz, 2000). Mattech *et al.* (1993) e Niklas e Spatz (2000) sugerem que árvores poderiam suportar tensões 3 a 5 vezes superiores às esperadas para a madeira sem romper. Detter *et al.* (2005), observaram que esses fatores crescem conforme o diâmetro do fuste cresce, podendo chegar a fatores da ordem de 5. Além disso, parâmetros de resistência da madeira obtidos em ensaios de corpos de prova não são compatíveis com tensões suportadas por fuste de árvores, ainda dentro do LP (Detter *et al.*, 2014; Ruel *et al.*, 2010). Considerando esses resultados o fator de segurança de árvores, utilizando o conceito convencional (resistência/tensão atuante), poderia estar entre 0,33 (tensão suportada igual a 3 vezes o limite esperado em cálculos convencionais de resistência de projeto) e 0,20 (tensão suportada igual a 5 vezes o limite esperado em cálculos convencionais de resistência de projeto) sem que a mesma rompesse. Esse resultado foi utilizado por Ruy (2020) para definir árvores com risco de queda como as que apresentassem fator de segurança inferiores a 0,33 (considerando capacidade de carga três vezes superior a de estruturas convencionais).

Os resultados obtidos na simulação do Modelo 4 indicaram que para o cisalhamento o fator de segurança da árvore foi superior a 1,0 (1,81) como esperado para as estruturas, enquanto para a compressão foi de 0,86 e para a tração de 0,54 (Figura 10) indicando que, considerando os resultados da literatura, essas árvores não seriam de risco para a velocidade de vento simulada (10 m/s). Destaca-se que a simulação apresentou, como vantagem, verificar que tipo de esforço está sendo o mais crítico para a árvore, que no caso desse exemplo é a tração. Esse conhecimento, aliado à imagem da distribuição das tensões que pode ser obtida pelo MEF, permite detectar, também, a posição crítica dessa tensão (Ruy, 2020).

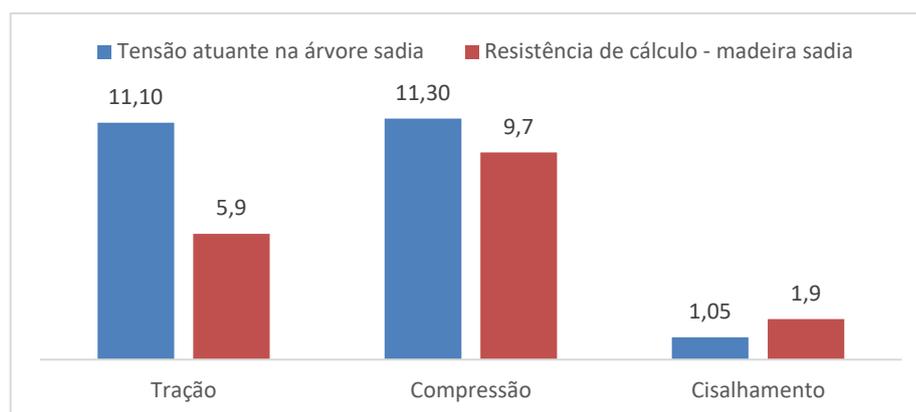


Figura 10. Tensões normais e de cisalhamento atuantes na árvore sadia simulada como sendo submetida a vento de velocidade 10 m/s e resistência de cálculo da madeira, também na condição sadia, calculada da forma convencional utilizada para dimensionamento de estruturas

Estudo de caso utilizando o Modelo 4 submetido a cargas gravitacionais e cargas de vento simuladas – árvore com deteriorações

Os ataques de agentes biodeterioradores são responsáveis pelo surgimento de regiões da árvore com perda de resistência mecânica ou com ocos. Essas deteriorações em alguns casos não podem ser detectadas com o uso apenas de análises visuais. Ferramentas tecnológicas, como a tomografia acústica, podem ser utilizadas para a quantificação de regiões com ocos ou com perda de resistência, porém para uma tomada de decisão a respeito do risco de queda é essencial inferir como esses defeitos influenciam o equilíbrio estrutural da árvore.

A simulação do modelo permite verificar que, embora as tensões normais (tração e compressão) também sofram variação com as deteriorações analisadas nessa pesquisa em diferentes dimensões e posições (Tabela 5), é o cisalhamento que apresenta maior sensibilidade nas alterações quando comparadas com as obtidas na madeira sã (Figura 11). Pesquisa de Mattheck *et al.* (2006) conclui que, em árvores com deteriorações, primeiramente a falha ocorrerá por cisalhamento e, posteriormente pelas tensões normais.

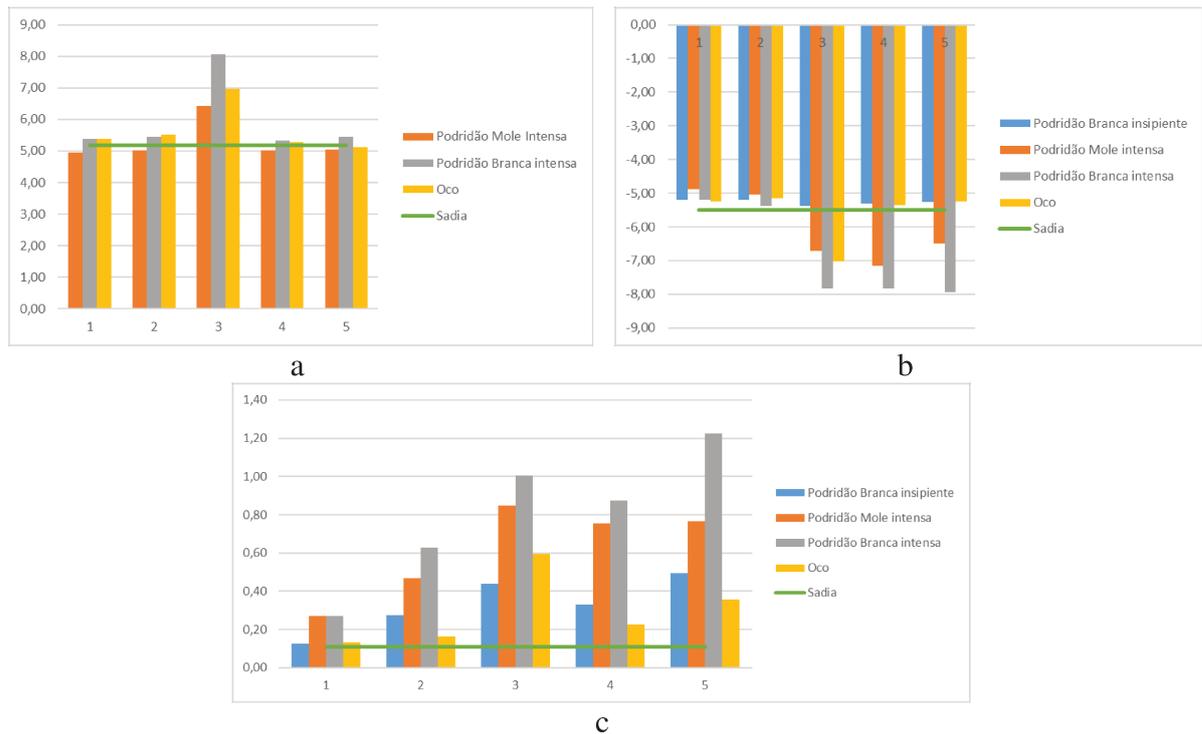


Figura 11. Tensões normais positivas (a) e negativas (b) e tensões de cisalhamento (c) considerando a madeira sadia e com diferentes deteriorações simuladas em cinco condições variando a posição e o de raio do defeito (R_{defeito}) em relação ao raio do fuste (R_{fuste})

Legenda: 1= Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{fuste}}$; 2 = Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{fuste}}$; 3 = Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{2}{3} R_{\text{fuste}}$; 4 = Defeito deslocado em X com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{fuste}}$ e 5 = Defeito deslocado em X com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{fuste}}$

Considerando as perdas de resistência propostas por Brazolin (2009) para a madeira deteriorada, e a introdução desses defeitos no fuste (Tabela 5), a simulação utilizando o Modelo 4 indica que a presença de podridão branca insipiente não indicaria risco de falha estrutural no cisalhamento (Figura 12). Independentemente da dimensão e da localização da região afetada do fuste, os valores de tensões cisalhantes máximas na região da deterioração foram inferiores a resistência de cálculo da madeira (0,85 MPa) considerando a perda sofrida como consequência da deterioração (Brazolin, 2009).

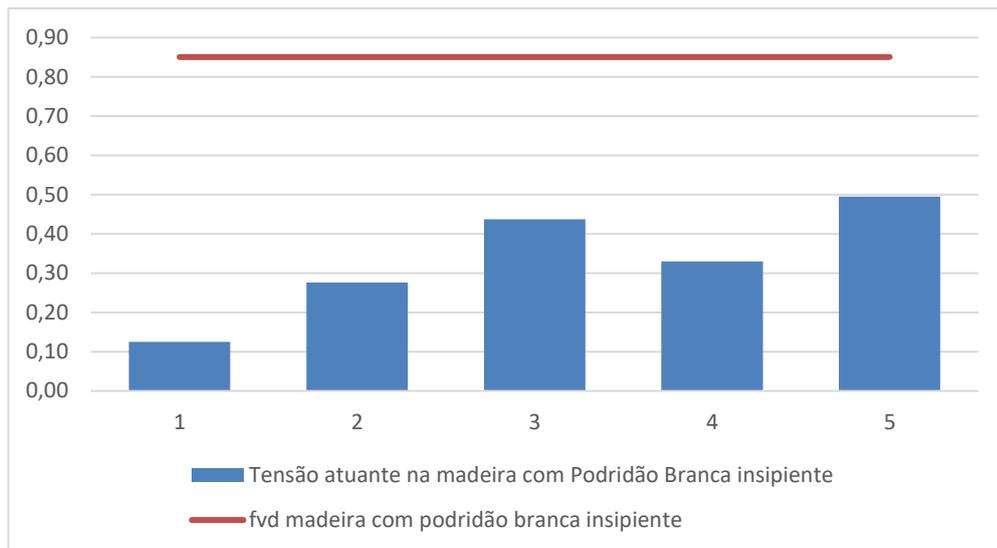


Figura 12. Tensões de cisalhamento atuantes na região do defeito simulado e resistência de cálculo ao cisalhamento da madeira com ataque de podridão branca insipiente considerando cinco condições com variação de posição e raio do defeito (R_{defeito}) em relação ao raio do fuste (R_{fuste})

Legenda: 1= Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{fuste}}$; 2 = Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{fuste}}$; 3 = Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{2}{3} R_{\text{fuste}}$; 4 = Defeito deslocado em X com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{fuste}}$ e 5 = Defeito deslocado em X com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{fuste}}$

Ao analisar a presença de podridão mole intensa, é possível verificar que, nesse caso, a dimensão e a localização do defeito influenciam na tensão de cisalhamento atuante e, portanto, na relação entre a resistência de cálculo e a tensão atuante (fator de segurança) - Figura 13. Para defeitos centralizados com raios menores de $\frac{1}{3}$ raio do tronco, a árvore apresenta fator de segurança superior a 1,0 (1,48), Figura 13. Entretanto, com o aumento da área afetada os fatores de segurança começam a ser inferiores a um: 0,63 (defeito centrado com raio igual a $\frac{1}{2}$ raio do fuste); 0,40 (defeito centrado com raio $\frac{2}{3}$ do raio do fuste); 0,45 (defeito deslocado com $\frac{1}{3}$ do raio do fuste) e 0,33 (defeito deslocado e com raio $\frac{1}{2}$ do raio do fuste) – Figura 13. Considerando valores críticos de fatores de segurança os inferiores a 0,33 (Mattheck *et al.*, 1993; Niklas e Spatz 2000), a árvore seria de risco para o cisalhamento quando o defeito está deslocado e apresenta raio de cerca de $\frac{1}{2}$ do raio do fuste).

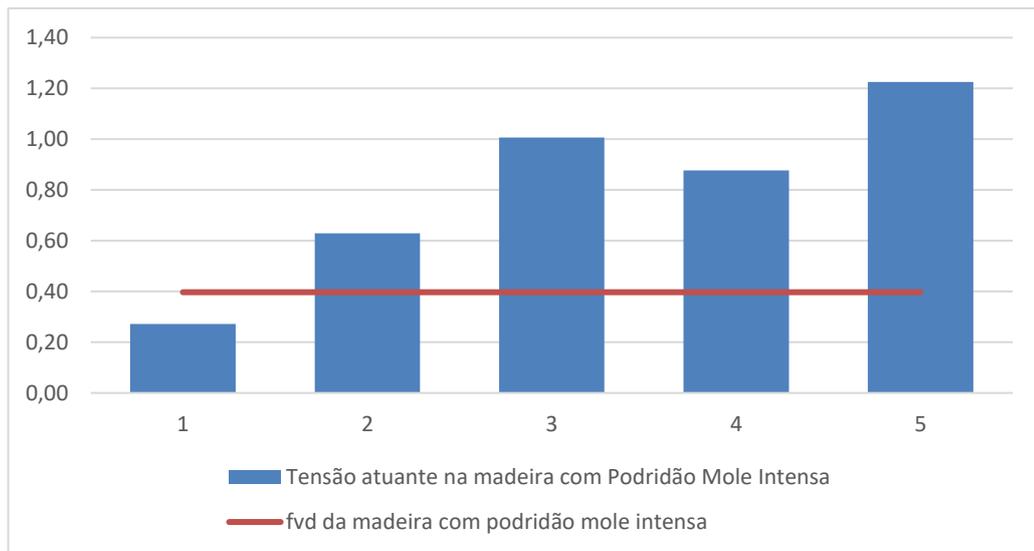


Figura 13. Tensões de cisalhamento atuantes na região de defeito simulado e resistência ao cisalhamento da madeira com ataque de podridão mole intensa considerando cinco situações simuladas com variação de posição e o de raio do defeito (Rdefeito) em relação ao raio do fuste (RFuste)

Legenda: 1= Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{fuste}}$; 2 = Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{fuste}}$; 3 = Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{2}{3} R_{\text{fuste}}$; 4 = Defeito deslocado em X com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{fuste}}$ e 5 = Defeito deslocado em X com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{fuste}}$

Para a podridão mole intensa, o deslocamento da área de defeito é responsável por aumento da tensão atuante na região (Figura 14) e, como consequência, do surgimento de condições de risco.

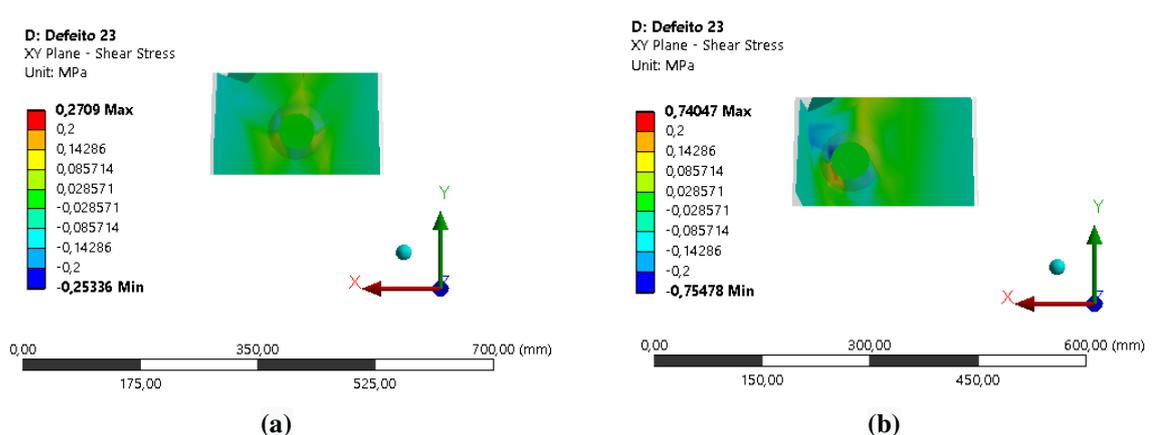


Figura 14. Tensões de cisalhamento atuantes no fuste com podridão mole intensa (a) centralizado e (b) deslocado.

A perda de resistência de 92,5% em madeira com ataque de podridão branca intensa (Brazolin, 2009) se mostra crítica no indivíduo simulado na situação 3 (defeito centralizado e deterioração com 2/3 do raio do fuste) e nas situações 4 e 5 (defeito deslocado e com 1/3 e 2/3 do raio do

fuste), nas quais os fatores de segurança são de 0,16; 0,19 e 0,18, respectivamente e, portanto, inferiores a 0,33 (Figura 15). Assim, pode-se concluir que defeitos não centralizados apresentam maiores riscos para a árvore do que os centralizados.

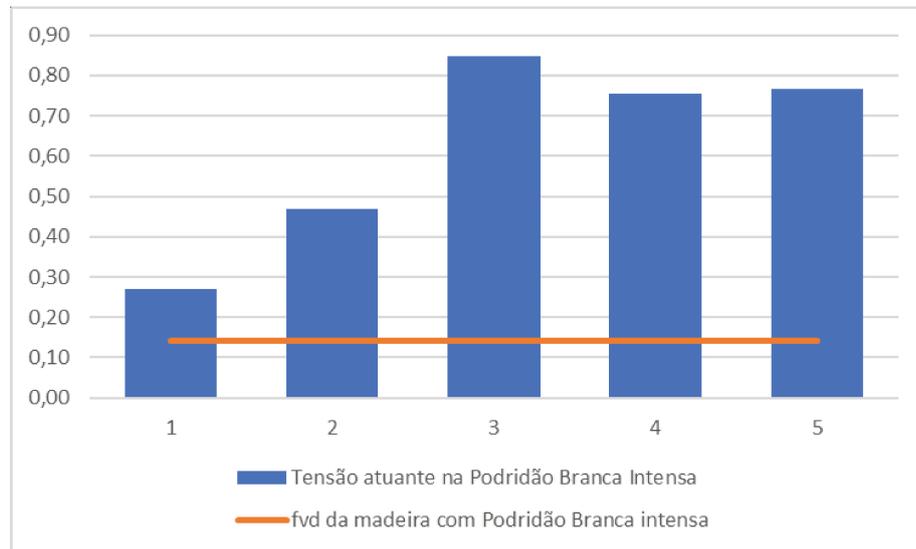


Figura 15. Tensões de cisalhamento atuantes na região de defeito de podridão mole intensa simulada e resistência ao cisalhamento da madeira simuladas em cinco condições variando a posição e o de raio do defeito (Rdefeito) em relação ao raio do fuste (RFuste).

Legenda: 1= Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{fuste}}$; 2 = Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{fuste}}$; 3 = Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{2}{3} R_{\text{fuste}}$; 4 = Defeito deslocado em X com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{fuste}}$ e 5 = Defeito deslocado em X com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{fuste}}$

Para o caso de árvores ocadas Brazolin (2009) apresenta quatro categorias, em ordem crescente de risco, concluindo que na Categoria 1 estariam as árvores sadias; na Categoria 2 árvores cujo oco ocupa menos de 1/3 do raio do tronco (11% de deterioração interna); Categoria 3 árvores nas quais o oco está entre 1/3 e 2/3 do diâmetro do tronco (entre 11% e 44% de deterioração interna) e Categoria 4, de maior risco, árvores cujo oco ocupe mais de 2/3 do tronco (maior que 44% de deterioração interna). Resultados da literatura também concluem que cavidades com dimensões a partir de 70% do raio do fuste da árvore são consideradas de risco (Mattheck *et al.*, 2006; Mattheck e Breoler, 1997; Mattheck *et al.*, 1993; Smiley e Fraedrich, 1992; Wagener 1963).

Para a condição simulada de oco centrado, com raio de 1/3 do raio do fuste, houve um aumento de 20% na tensão de cisalhamento, mas esse aumento se eleva para 441% quando esse oco centralizado passa a ter raio 2/3 do raio do fuste (Figura 16). Na região onde esse oco foi simulado (DAP), mesmo com o aumento considerável da tensão de cisalhamento atuante, o

fator de segurança ainda seria de 3,15 indicando não haver risco para a árvore. No entanto, caso essa região ocada fosse na zona crítica (maior tensão de cisalhamento), o risco aumentaria muito quando comparados com as outras dimensões de oco centrados, o que explica as conclusões apresentadas na literatura. Para os ocos não centrados verifica-se maior aumento das tensões de cisalhamento (Figura 16), mesmo quando esses ocos possuem dimensões iguais às dos ocos (condições 1 e 4 e condições 2 e 5 na Figura 16).

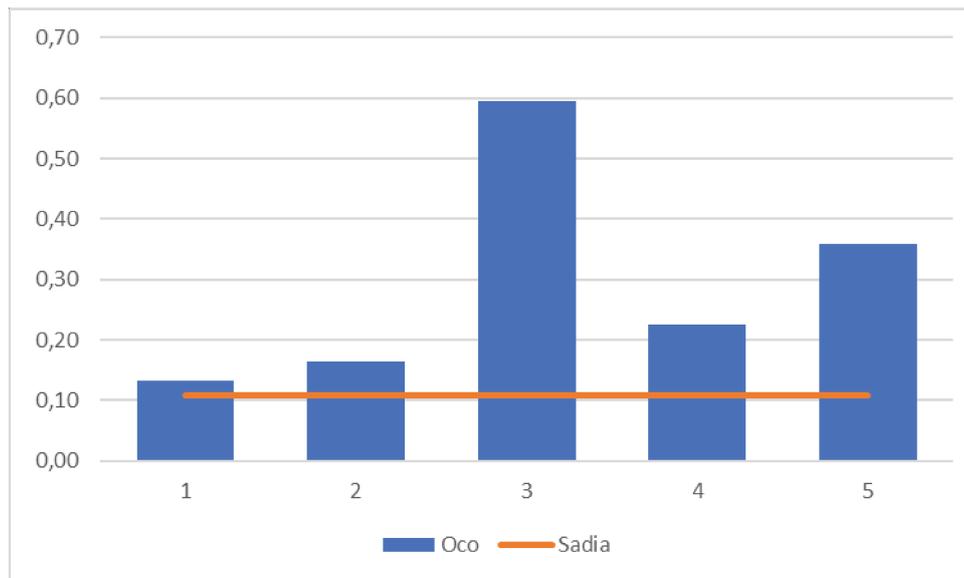


Figura 16. Tensões de cisalhamento atuantes na região de defeito simulado considerando a árvore sadia e com a presença de ocos de diferentes dimensões e localização em relação a eixo X simuladas em cinco condições variando a posição e o de raio do defeito (R_{defeito}) em relação ao raio do fuste (R_{Fuste}).

Legenda: 1= Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{Fuste}}$; 2 = Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{Fuste}}$; 3 = Defeito centralizado com $R_{\text{defeito}} = \frac{2}{3} R_{\text{Fuste}}$; 4 = Defeito deslocado em X com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{3} R_{\text{Fuste}}$ e 5 = Defeito deslocado em X com $R_{\text{defeito}} = \frac{1}{2} R_{\text{Fuste}}$

Conclusões

O Modelo proposto é adequado para simular árvores com diferentes características dendrológicas e permite: a utilização de parâmetros elásticos que levam em conta a ortotropia da madeira; a inserção de diferentes parâmetros elásticos para a raiz, fuste e galhos; a inserção de zonas com biodeterioração ou tigmomorfogênese e a inserção de parâmetros relacionados ao solo.

Considerando as limitações existentes para modelar uma estrutura de tão grande complexidade como é o caso da árvore, o modelo proposto permite obter valores coerentes de deslocamentos

horizontais e de tensões normais e de cisalhamento, tanto na condição sã quanto com presença de biodeteriorações em diferentes níveis, dimensões e posições.

Referências Bibliográficas

Brazolin, S., 2009. Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, *Tipuana tipu* (Benth) o *Kuntze*, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP. Dissertation. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP.

Brudi, E., Van Wassenae, P., 2002 Trees and statics: Non- destructive failure analysis. In: E.T. Smiley, and K.D. Coder (Eds.). *Tree Structure and Mechanics Conference Pro-ceedings: How Trees Stand Up and Fall Down*, International Society of Arboriculture, Champaign, Illinois, pp 53-69.

Detter, A.; Brudi, E.; Bischoff, F., 2005. Statics Integrated Methods: Results from pulling tests in the past decades. In: *La visión del Árbol: actas del 9º Congreso de Arboricultura*. Barcelona, 103-112.

Detter, A. *et al.*, 2014. Determining strength limits for standing tree stems from bending tests.

Dupuy, L.; Fourcaud, T.; Stokes, A., 2005. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant and Soil*, 278, 119-134.

Gaffrey, D.; Kniemayer, O., 2002. The elasto-mechanical behaviour of Douglas fir, its sensitivity to tree-specific properties, wind and snow loads, and implications for stability – a simulation study. *Journal of Forest Science* 48(2), 49-69.

Hale, S. E. et al., 2012. Wind loading of trees: influence of tree size and competition. *European Journal of Forest Research*, 131(1), 203-217.

James, K., 2003. Dynamic loading of trees. *Journal of Arboriculture*, 29(3), 165-171.

James, K. R., 2014 A study of branch dynamics on an open grown tree. *Arboriculture & Urban Forestry* 40(3), 125–34

James, K. R. et al., 2014. Tree Biomechanics Literature Review: Dynamics. *Arboriculture & Urban Forestry*, 40 (1), 1-15.

James, K.; Ades, P. K.; Haritos, N., 2006. Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany*, 93(10), 1522-30.

- Linhares, C., 2019. Caracterização metodológica para o cálculo do coeficiente de arrasto em árvores urbanas. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola/Unicamp. Campinas.
- Martínez, P. C.; Díaz, M. I. I., 2016. El riesgo del Arbolado Urbano - Contexto, concepto y evaluación. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, Espanha:
- Mattheck, C.; Bethge, K.; Schäfer, J., 1993, Safety factors in trees. *Journal of Theoretical Biology*, 165, 185-189.
- Mattheck, C.; Bethge, K.; Tesari, I. 2006. Shear effects on failure of hollow trees. *Trees*, 20, 329-333.
- Mattheck, C., Breloer, H., 1997. The body language of trees: a handbook for failure analysis. Stationery Office Books, London.
- Miller, L. A., 2005. Structural dynamics and resonance in plants with nonlinear stiffness. *Journal of Theoretical Biology*, 234, 511-524.
- Milne, R.; Blackburn, P., 1989. The elasticity and vertical distribution of stress within stems of *Picea sitchensis*. *Tree Physiology*, 5, 195-205.
- Niklas, K. J., 1992. *Plant Biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. The University of Chicago press book. Chicago.
- Niklas, K. J., 1994. Interspecific allometries of critical buckling height and actual plant height. *American Journal of Botany*, 81, 1275-1279.
- Niklas, K. J.; Spatz, H.-C., 2000. Wind-induced stresses in cherry trees: evidence against the hypothesis of constant stress levels. *Trees*, 14, 230-237.
- Peltola, H.; Kellomäki, S., 1993. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica*, 27 (2), 99-111.
- Rahardjo, H. et al., 2014. Understanding the stability of Samanea saman trees through tree pulling, analytical calculations and numerical models. *Urban Forestry & Urban Greening* 13, 355-364.
- Rahardjo, H. et al., 2009. Tree stability in an improved soil to withstand wind loading. *Urban Forestry & Urban Greening* 8, 237-247.

- Ruy, M. 2020. Modelagem do comportamento biomecânico de árvores. PhD Theses. Faculdade de Engenharia Agrícola/Unicamp, Campinas.
- Sellier, D.; Fourcaud, T. 2009. Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds. *American Journal of Botany*, 96(5), 885-896.
- Sinn, G.; Wessolly, L., 1989. A contribution to the proper assessment of the strength and stability of trees. *Arboricultural Journal* 13, 45-65.
- Smilley, E. T., Fraedrich, B. R., 1992. Determining strength loss from decay. *Arboricult J*, 18 (4), 201-204.
- Spatz, H.-C.; Bruechert, F., 2000. Basic biomechanics of self-supporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree. *Forest Ecology and Management*, 135, 33-44.
- Tateno, M., 1991- Increase in lodging safety factor og thigmomorphometrically dwarfed shoots of mulberry tree. *Physiologia Plantarum*, 81, 239-243.
- Tateno, M.; Bae, K., 1990. Comparison of lodging safety factor of untreated and succinic acid 2,2-dimethylhydrazide-treated shoots of mulberry tree. *Plant Physiology*, 92, 12-16.
- Tesari, I.; Mattheck, C., 2003. Das Schubspannungs maximum am Stammfuss und der Einfluss von Wurzelarchitektur und Bodeneigenschaften. *Proceedings of the 9th VTA-Spezialseminar "Messen und Beurteilen am Baum"*.
- UNE-EN 14081 Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section. Madrid. 2005.
- UNE - EN 338 Madera estructural. Clases resistentes. Madrid, 2017.
- Wagener, W. W., 1963. Judging Hazards from Native Trees in California Recreational Areas: a guide for professional foresters. Berkeley.
- Wessolly, L.; Erb, M., 1998. *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*.

5. Discussão Geral

Para que seja possível entender de forma mais adequada esse item, sem a necessidade de se recorrer à leitura dos artigos, foi necessário acrescentar, às discussões dos resultados, alguns aspectos do delineamento.

Considerando o objetivo geral da pesquisa, de utilizar conceitos de biomecânica para propor modelo estrutural que descreva, de forma aproximada, o comportamento de árvores, considerando características e relações dendrométricas e adaptações biológicas mais comuns em espécies de arborização urbana, foram propostos três objetivos específicos.

Para que os objetivos específicos fossem alcançados, inicialmente o desenvolvimento da pesquisa visou caracterizar a morfologia externa e arquitetura médias, bem como as adaptações morfológicas (Tigmomorfogênese) mais comuns em algumas espécies da arborização urbana. Assim, nessa primeira etapa de caracterização as espécies *Handroanthus pentaphylla* (Ipê Rosa), *Cenostigma pluviosum* (Sibipiruna), *Tipuana tipu* (Tipuana), *Schinus molle* (Aroeira salsa), *Caesalpinia férrea* (Pau ferro) e *Schinus Terenbithifolius* (Aroeira pimenteira) foram adotadas. A adoção dessas espécies se deu, principalmente, em função de trabalho realizado no Estado de São Paulo, em 183 prefeituras de municípios (Leão *et al.* 2016). A caracterização geral da árvore consistiu na determinação de valores médios de altura total da árvore (H), altura da primeira bifurcação (h), diâmetros na base (DAS), na altura do peito (DAP) e na primeira bifurcação (DAB), conicidade (C), relação entre altura de copa e altura total (R), área de copa e relação entre altura total e diâmetro na altura do peito (λ). A caracterização dos galhos, considerando três níveis de bifurcação, gerou dados médios de ângulo de bifurcação, índice de conicidade, diâmetro médio e volume. Além dos valores da caracterização e da respectiva variabilidade, avaliou-se, estatisticamente, a diferenciação desses parâmetros entre as diferentes espécies.

Para a altura total (H) a análise de comparação de médias das diferentes espécies indica haver cinco diferentes grupos com alturas estatisticamente diferenciadas, com 95% de nível de confiança. A altura total da árvore é considerada, na literatura, como parâmetro importante em análises de risco de queda, por sua ligação direta com a estabilidade. Considerando as faixas de alturas obtidas para as espécies estudadas (5,3 m a 11,7 m) e conclusões da literatura, esse fator (H) não é crítico em termos de estabilidade para nenhuma das espécies estudadas.

Os diâmetros na base (DAS) e na altura do peito (DAP) das diferentes espécies se diferenciaram estatisticamente em quatro grupos. O DAP é importante para o cálculo da

esbeltez (λ), que é dada pela relação entre altura total e esse diâmetro. Segundo a literatura a esbeltez é um dos parâmetros mais importantes em análises de risco de queda de árvores e, considerando os valores obtidos na caracterização (13,1 a 23,4) as espécies estudadas seriam classificadas como muito estáveis.

A dimensão da copa tem influência na força do vento, porque árvores com grandes copas irão absorver mais a pressão do vento, gerando maior força de arraste no tronco, sendo, portanto, parâmetro importante em análises biomecânicas visando risco de queda. A área de copa apresentou grandes variações entre as espécies estudadas nessa pesquisa (de 23,8 m² a 119,8 m²), mas como a variabilidade dentro da própria espécie também foi elevada, estatisticamente as espécies foram divididas em quatro grupos. Segundo a literatura, em análises de risco de queda a relação entre a altura da copa e a altura total da árvore é mais importante do que a dimensão da copa propriamente dita. Para as espécies estudadas nessa pesquisa essa relação variou de 0,65 a 0,86 estando em geral, segundo a literatura, em uma classe intermediária de risco, exceto a Tipuana, que se enquadra em uma classe de risco acima.

A conicidade dos galhos é um parâmetro importante para a definição da arquitetura da árvore, permitindo modelagem mais aproximada do comportamento real da árvore em estudos de biomecânica, em substituição aos modelos tubulares. Entre espécies, considerando a média geral das três bifurcações, apenas a *Handroanthus pentaphylla* se diferenciou das demais, apresentando o menor valor médio (0,011). O volume dos galhos pode ser utilizado para o cálculo do peso, que é informação importante para análises biomecânicas. Entre as espécies o volume foi estatisticamente diferenciado em três grupos, sendo a Tipuana a que apresentou o maior volume. Considerando cada espécie de forma isolada, diferente do resultado obtido para a conicidade e o ângulo, que não apresentaram diferenças estatísticas, em geral o volume se diferenciou estatisticamente nos diferentes níveis de bifurcações. Essa diferenciação ocorreu em consequência da diferenciação dos diâmetros que, para todas as espécies foram decrescentes dos galhos situados na proximidade do tronco para os mais distantes. Nas diferentes espécies o ângulo médio da bifurcação variou de 63,2° a 82,2°.

Considerando as árvores de todas as espécies (120) as rachaduras longitudinais (33%) e a inclusão de casca (31%) foram os mecanismos de compensação mais comuns. O deslocamento da copa (17%), o aumento localizado do diâmetro (13%) e as dobras na superfície (10%) aparecem em proporções intermediárias. Em menor proporção foram os encurvamentos (4%), os calos na superfície (3%) e os abscessos no fuste (1%).

Após a inferências de parâmetros dendrométricos das espécies adotadas, a pesquisa avançou com o objetivo de avaliar o efeito dos parâmetros dendrométricos, destacados na literatura como de maior importância em análises de risco de queda de árvores - altura, esbeltez e conicidade do tronco. Para isso foram realizadas simulações, aplicando o Método dos Elementos Finitos (MEF) com utilização de modelo 3D e análise linear estática. A árvore simulada foi considerada totalmente íntegra (sem deteriorações ou tigmomorfogênese) e o modelo arquitetônico foi baseado em características médias de espécies de árvores comuns na arborização urbana do Estado de São Paulo e estudadas na primeira parte da pesquisa. Para as análises foram simulados três cenários, o primeiro fixando a esbeltez e a conicidade e variando a altura; o segundo fixando a altura e a conicidade e variando a esbeltez e o terceiro fixando a altura e a esbeltez e variando a conicidade. Tendo em vista que o vento é, segundo a literatura, a carga mais importante a ser suportada pelas árvores e a maior responsável pelas quedas, buscou-se determinar níveis de carga de vento correspondentes a intervalo de velocidade básica de vento englobados em norma nacional. Para isso, com base em áreas frontais de copa, estabelecidas na primeira etapa da pesquisa, foram calculadas, de forma iterativa, cargas de vento simuladas que permitiram o cálculo de pressões de vento e, com elas, de velocidades básicas. As cargas simuladas de vento foram de 5 kN, 10 kN e 15 kN, as quais permitiram simular ventos de velocidades básicas de 4,6 m/s a 60,8 m/s. Essas forças foram então aplicadas no centro de gravidade da copa para as simulações utilizando o MEF.

Os dados de conicidade e de volume de galhos, determinados na primeira etapa da pesquisa, juntamente com dados de densidade obtidos no grupo de pesquisa, foram utilizados para inferir o peso dos galhos. Também foram inferidos, por meio da literatura, o peso das folhas. A carga referente ao peso dos galhos e das folhas foi utilizada para calcular os momentos aplicados no fuste do modelo simplificado adotado nessa etapa da pesquisa. Nesse modelo simplificado o fuste (sem copa e galhos) foi criado assumindo-se que a árvore seja composta de uma série de (i) elementos cilíndricos diferindo em diâmetro (d_i) ao longo do comprimento (l_i) de cada elemento (maior na base e menor no topo). No modelo computacional o engastamento do fuste no solo foi considerado rígido, tendo sido considerada, também, uma caixa de solo na qual a raiz, adotada com forma cilíndrica e dimensão equivalente a copa, foi inserida. Os parâmetros médios das propriedades da madeira, considerada ortotrópica, foram obtidos de pesquisas anteriores do grupo. A simulação foi então utilizada para calcular deslocamentos e tensões normais e de cisalhamento ao longo do fuste.

Os deslocamentos máximos foram mais afetados pela variação de altura do que pelas variações de esbeltez e de conicidade para todos os níveis de cargas de vento simuladas. O nível de carregamento afeta o comportamento de variação do deslocamento com a esbeltez. A conicidade, nos níveis de carga simulados, não afeta o deslocamento máximo do tronco. Em todos os cenários, condições e níveis de carregamento, como era de se esperar em função das condições impostas ao modelo, os deslocamentos máximos foram no topo da árvore. Os deslocamentos máximos foram sempre superiores aos admissíveis em estruturas de madeira. No entanto, segundo a literatura, os limites estabelecidos em normas de cálculo estrutural não se adequam a plantas, que durante todo seu crescimento experimentam situações de deformações elevadas em função, principalmente, da exposição ao vento, e possuem capacidade adaptativa.

Para as tensões normais e de cisalhamento máximas a influência da esbeltez é a mais significativa, enquanto a conicidade é o fator com menor influência.

Os parâmetros dendrométricos afetam não somente os valores das tensões, mas também o posicionamento das tensões máximas, tanto normais quanto de cisalhamento. Essas tensões máximas se deslocam da base (onde são esperados os maiores momentos devidos as cargas de vento) para seções mais elevadas do tronco. No cenário 1 (variação de altura e esbeltez e conicidade fixas) as árvores mais baixas tiveram maiores alterações da posição do que as mais altas. No cenário 2 (variação de esbeltez e altura e conicidade fixas) a variação do valor de esbeltez no qual o ponto de tensão máxima começa a se deslocar da base em função do nível de carga de vento simulada. No cenário 3 (variação de conicidade e altura e esbeltez fixas) a variação da posição da carga máxima também dependeu do nível de carga de vento simulada. De forma geral, a posição das tensões máximas que não ocorreram na base variou de cerca de 25% a 73% da altura da árvore, valores próximos aos obtidos na literatura.

Considerados valores de resistência de cálculo para a madeira saturada, e a capacidade de árvores para suportarem cargas de serviço muito superiores às suportadas por estruturas de madeira em geral, as árvores suportariam todos os níveis de carga de vento simuladas, nas condições dos cenários 1 e 3. Já para o cenário 2 foi possível verificar condições limites de esbeltez acima dos quais se poderia considerar que a árvore estivesse em risco.

A última etapa da pesquisa teve como objetivo avaliar modelos com diferentes níveis de complexidade e eleger o mais adequado para se empregar em uma avaliação de risco de queda. Foram desenvolvidos 5 modelos e, para validar e adotar um deles, os resultados de

deslocamentos horizontais, obtidos com a utilização de cada um foi comparado com ensaios de tração realizados em campo em indivíduo com as mesmas características. Também foram analisadas a ordem de grandeza das tensões normais e de cisalhamento obtidas, de forma a verificar se tais magnitudes eram compatíveis com dados da literatura. Os modelos foram simulados considerando dois tipos de copa (monopodial e simpodial) e características dendrométricas obtidas durante a pesquisa e utilizadas nos dois artigos anteriores.

O Modelo adotado, além de considerar o torrão inserido no solo, permite simular o encurvamento (colo) do fuste na região de encontro com a raiz. Tal mecanismo é importante para simular, de forma mais adequada, a distribuição das tensões entre as partes da árvore. Em relação ao deslocamento horizontal, esse modelo foi o que apresentou resultados mais compatíveis com os obtidos em ensaio de tração de campo. Para a arquitetura monopodial, o modelo apresentou diferença média de deslocamento de 39%, mas considerando as cargas de magnitudes superiores (mais críticas em relação a risco de queda), a diferença caiu para 15%. Para o modelo considerando a copa simpodial a diferença se mostra menor, sendo de 26% considerando a média de todos os índices de carga e de 6% para o valor máximo da carga aplicada.

O modelo adotado foi então utilizado para simular, para a mesma espécie ensaiada em campo, árvore sujeita a carga de vento de 10 m/s, considerado valor normal para o qual não é esperada a queda de árvores sadias. Considerando dados da literatura, árvores são capazes de suportar níveis elevados de carga sem romper, de forma que índices de segurança convencionais, que consideram valores mínimos de um para relação entre resistência e a tensão atuante, não são adequados. Para árvores a literatura indica que as tensões atuantes podem ser de 3 a 5 vezes a resistência de cálculo utilizadas em estruturas de madeira, as quais são baseadas em ensaios de corpos de prova ou peças estruturais. Assim, utilizando esse conceito nas verificações de tensões simuladas, verificou-se que a árvore da espécie simulada suportaria o vento de velocidade de 10 m/s.

O modelo adotado permitiu, também, simular a presença de zonas deterioradas por fungos e a presença de zonas ocadas. As simulações mostraram que é possível verificar tipos e níveis de deterioração para os quais a árvore começa a ter risco de queda. O modelo também permite simular deteriorações com posição e dimensões diferenciadas, tendo sido possível verificar que as deteriorações centradas oferecem menor risco do que as excêntricas, e que o nível de risco é dependente da relação entre o raio da deterioração e o raio do tronco.

6. Conclusões Gerais

Em relação às características médias de dendrometria, de arquitetura e de tigmomorfogênese das espécies estudadas, concluímos que:

- A altura média das espécies variou entre 5,4 m e 11,9 m; a esbeltez (relação entre altura e diâmetro na altura do peito) de 18,7 a 26,5 e a relação entre altura de copa e altura da árvore entre 0,51 e 0,87. Considerando dados da literatura esses valores não colocam essas espécies dentre as críticas em termos de estabilidade. A Tipuana é a espécie que se classifica com os maiores índices de instabilidade quando se consideram a altura e relação entre altura de copa e a altura total e a Aroeira salsa quando se considera a esbeltez.
- A conicidade do tronco e dos galhos é um parâmetro que pode afetar a modelização de árvores. No caso do tronco a conicidade apresentou grande variação dentro das espécies, com coeficientes de variação variando de 44% a 69% e entre espécies, com conicidades variando de 0,05 a 0,19 e diferenças estatísticas. No caso dos galhos a conicidade dentro de uma mesma espécie não variou entre níveis de ramificações e, entre espécies só houve diferenciação para uma delas, com conicidade muito pequena (0,010).
- Em relação ao ângulo da bifurcação, não houve variação estatística nos diferentes níveis, mas sim entre as espécies e os valores médios variaram de 63,2° a 82,2°. Esse resultado também é importante na modelização de árvores em análises biomecânicas.
- Por fim, para os mecanismos de compensação obtidos em todas as espécies verificou-se que as rachaduras longitudinais (33%) e a inclusão de casca (31%) foram os mecanismos de compensação mais comuns. O deslocamento da copa (17%), o aumento localizado do diâmetro (13%) e as dobras na superfície (10%) aparecem em proporções intermediárias. Em menor proporção foram os encurvamentos (4%), os calos na superfície (3%) e os abscessos no fuste (1%).

- As variações nos parâmetros dendrométricos apresentam influência no comportamento das árvores simuladas com diferentes níveis de carga de vento simuladas. A altura das árvores apresenta maior influência nos deslocamentos enquanto a esbeltez maior influência nas tensões normais e de cisalhamento. A excentricidade é o fator que tem menor influência nos deslocamentos e nas tensões normais e de cisalhamento. Além dos valores, os fatores

dendrométricos e os níveis de tensão afetam a posição das tensões normais máximas, que se deslocam da base da árvore para pontos mais elevados do tronco, mostrando que a composição entre os momentos gerados pela carga de vento e pelas cargas gravitacionais (tronco e galhos) varia com os deslocamentos sofridos pela árvore, sendo afetadas também pela variação das dimensões ao longo do tronco.

- Considerando as limitações existentes para modelar uma estrutura de tão grande complexidade como é o caso da árvore, o modelo proposto permite obter valores coerentes de deslocamentos verticais e de tensões normais e de cisalhamento, tanto na condição sã quanto com presença de biodeteriorações em diferentes níveis, dimensões e posições.

Em relação ao modelo proposto destacamos as seguintes características:

- Permite introduzir parâmetros elásticos da madeira considerando sua condição ortotrópica, fazendo com que o comportamento do material seja mais próximo da realidade;
- Permite introduzir diferentes parâmetros elásticos para a madeira do fuste, dos galhos e da raiz, aproximando, assim, o comportamento simulado ao real;
- Permite introduzir características do solo onde a árvore está plantada, permitindo diferenciar essa condição fundamental para análises de risco de queda;
- Permite considerar suavização da região entre o fuste e a raiz, simulando o colo da árvore e, assim, fazendo com que as distribuições de tensões sejam mais próximas da realidade;
- Permite introduzir defeitos (deteriorações e ocos) e condições decorrentes de adaptações promovidas pelas árvores, facilitando, quando comparado com ensaios de campo, avaliações da influência desses parâmetros no risco de queda.

7. Referências Bibliográficas

- ABNT NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro. 1988.
- ABNT NBR 7190 - Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro. 1997.
- Albers J, Hayes E. 2003. How to detect assess and correct hazard trees in recreational areas. Minnesota Department of Natural Resources, St. Paul, MN.
- Ancelin, P., Courbaud, B., Fourcaud, T., 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest Ecology and Management*, 203, 101-121.
- Brazolin S. 2009. Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, *Tipuana tipu* (Benth) o Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP. Dissertation. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP.
- Brüchert, F., Gardiner, B., 2006. The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce (*Picea sitchensis*, Pinaceae). *American Journal of Botany*, 93(10), 1512-21.
- Brudi E, Van Wassenae P. 2002. Trees and statics: Non- destructive failure analysis. In: E.T. Smiley, and K.D. Coder (Eds.). *Tree Structure and Mechanics Conference Pro-ceedings: How Trees Stand Up and Fall Down*, International Society of Arboriculture, Champaign, Illinois, pp 53-69.
- Coder K. 2007. Storm wind loads on trees. Warnell School of Forest and Natural Resources, University of Georgia. <https://urbanforestrysouth.org/resources/library/citations/storm-wind-loads-on-trees>. Accessed 14 April 2020
- Cullen S. 2002. Trees and wind: wind scales and speeds. *Journal of Arboriculture* 28:237-242.
- Detter, A.; Brudi, E.; Bischoff, F., 2005. Statics Integrated Methods: Results from pulling tests in the past decades. In: *La visión del Árbol: actas del 9º Congreso de Arboricultura*. Barcelona, 103-112.
- Detter, A. *et al.*, 2014. Determining strength limits for standing tree stems from bending tests.
- Dupuy, L.; Fourcaud, T.; Stokes, A., 2005. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant and Soil*, 278, 119-134.

- Garcia, G. H. L. 2018. Propriedade da madeira de galhos de espécies utilizadas na arborização urbana. Dissertation, Faculdade de Engenharia Agrícola/Unicamp, Campinas.
- Gardiner, B. A. 1995. The interactions of wind and tree movement in forest canopies. In: *Wind and Trees*. Cambridge University Press, New York, pp. 41-59.
- Gaffrey, D.; Kniemayer, O., 2002. The elasto-mechanical behaviour of Douglas fir, its sensitivity to tree-specific properties, wind and snow loads, and implications for stability – a simulation study. *Journal of Forest Science* 48(2), 49-69.
- Hale, S. E. et al., 2012. Wind loading of trees: influence of tree size and competition. *European Journal of Forest Research*, 131(1), 203-217.
- Horáček, P. 2003. Introduction to tree statics & static assessment. Presentation. In: *Proc. Workshop, Westonbirt*, p. 69.
- James, K., 2003. Dynamic loading of trees. *Journal of Arboriculture*, 29(3), 165-171.
- James, K. R., 2014 A study of branch dynamics on an open grown tree. *Arboriculture & Urban Forestry* 40(3), 125–34
- James, K. R. et al., 2014. Tree Biomechanics Literature Review: Dynamics. *Arboriculture & Urban Forestry*, 40 (1), 1-15.
- James K, Ades PK, Haritos N. 2006. Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany* 93(10):1522-1530.
- Kane B. 2008. Tree failure following a windstorm in Brewster, Massachusetts, USA. *Urban Forestry & Urban Greening* 7:15-23.
- Kontogianni A, Tsitsoni T, Goudelis G. 2011. An index based on silvicultural knowledge for tree stability assessment and improved ecological function in urban ecosystems. *Ecological Engineering* 37:914-919.
- Leão MM et al. 2016. Avaliação do estado da arte da arborização urbana no estado de São Paulo. In: 20 Congresso brasileiro de arborização urbana, Belo Horizonte, MG, Brazil.
- Linhares, C., 2019. Caracterização metodológica para o cálculo do coeficiente de arrasto em árvores urbanas. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola/Unicamp. Campinas.
- Mamada, S., Kawamura, Y., Yashiro, M., Taniguchi, T., 1984. The strength of plantation sugi trees. *Journal of Japosene Wood Research Society*, 30, 443-466.

- (2015) Manual Técnico de arborização urbana. Secretaria Municipal Do Verde E Do Meio Ambiente, São Paulo.
- Martínez, P. C.; Díaz, M. I. I., 2016. El riesgo del Arbolado Urbano - Contexto, concepto y evaluación. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, Espanha.
- Mattheck, C.; Bethge, K.; Schäfer, J., 1993, Safety factors in trees. *Journal of Theoretical Biology*, 165, 185-189.
- Mattheck, C.; Bethge, K.; Tesari, I. 2006. Shear effects on failure of hollow trees. *Trees*, 20, 329-333.
- Mattheck C, Breloer H. 1997. The body language of trees: a handbook for failure analysis. Stationery Office Books, London.
- Miller, L. A., 2005. Structural dynamics and resonance in plants with nonlinear stiffness. *Journal of Theoretical Biology*, 234, 511-524.
- Milne, R.; Blackburn, P., 1989. The elasticity and vertical distribution of stress within stems of *Picea sitchensis*. *Tree Physiology*, 5, 195-205.
- Minamino R; Tateno M. 2014. Tree Branching: Leonardo da Vinci's Rule versus Biomechanical Models. *Plos ONE* 9(4): e93535. Doi: 10.1371/journal.pone.0093535
- Moore JR; Maguire DA. 2004. Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. *Trees* 18:195-203. Doi: 10.1007/s00468-003-0295-6
- Niklas, K. J., 1992. *Plant Biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. The University of Chicago press book. Chicago.
- Niklas, K. J., 1994. Interspecific allometries of critical buckling height and actual plant height. *American Journal of Botany*, 81, 1275-1279.
- Niklas, K. J., 2000. Computing factors of safety against wind-induced tree stem damage. *Journal of Experimental Botany*, 51 (345), 797-806.
- Niklas, K. J.; Spatz, H.-C., 2000. Wind-induced stresses in cherry trees: evidence against the hypothesis of constant stress levels. *Trees*, 14, 230-237.
- Peltola, H.; Kellomäki, S., 1993. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica*, 27 (2), 99-111.

- Peltola H et al. 2000. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 135:143-153.
- Petty, J. A., Swain, C., 1985. Factors Influencing Stem Breakage of Conifers in High Winds. *Forestry*, 58(1), 75-101.
- Pokorny J et al. 2003. Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation. USDA Forest Service Northeastern Area State and Private Forestry: Technical Bulletin. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/11070>. Accessed 14 April 2020
- Popa I. 2000. The analysis of tree stability at the wind action by uniform couples. *Bucovina Forestieră* 9(1-2):21-29.
- Rahardjo, H. et al., 2014. Understanding the stability of Samanea saman trees through tree pulling, analytical calculations and numerical models. *Urban Forestry & Urban Greening* 13, 355-364.
- Rahardjo, H. et al., 2009. Tree stability in na improved soil to withstand wind loading. *Urban Forestry & Urban Greening* 8, 237-247.
- Sánchez-Blanco M, Artajo M, Septién Arceredillo A. 2013. Defectos y anomalías del arbolado viario de Madrid: Guía de reconocimiento y diagnóstico. Área de gobierno de medio ambiente y movilidad, Madrid.
- Sani, L. et al., 2012. Preliminary experiments and verification of controlled pulling tests for tree stability assessments in Mediterranean urban areas. *Biosystems engineering* 112, 218-226.
- Sellier, D.; Fourcaud, T. 2009. Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds. *American Journal of Botany*, 96(5), 885-896.
- Silva, J. A. A., 1979. *Princípios básicos de dendrometria*. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, pp. 191.
- Sinn, G.; Wessolly, L., 1989. A contribution to the proper assessment of the strength and stability of trees. *Arboricultural Journal* 13, 45-65.
- Sinclair W; Lyon HH. 2005. *Diseases of trees and shrubs*. Comstock Publishing Associates, New York.
- Smilley, E. T., Fraedrich, B. R., 1992. Determining strength loss from decay. *Arboricult J*, 18 (4), 201-204.

Spatz, H.-C.; Bruechert, F., 2000. Basic biomechanics of self-supporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree. *Forest Ecology and Management*, 135, 33-44.

Sterken, P. 2005. *A Guide For. Tree-Stability Analysis*.

Tateno, M., 1991. Increase in lodging safety factor og thigmomorphometrically dwarfed shoots of mulberry tree. *Physiologia Plantarum*, 81, 239-243.

Tateno, M.; Bae, K., 1990. Comparison of lodging safety factor of untreated and succinic acid 2,2-dimethylhydrazide-treated shoots of mulberry tree. *Plant Physiology*, 92, 12-16.

Tesari, I.; Mattheck, C., 2003. Das Schubspannungs maximum am Stammfuss und der Einfluss von Wurzelarchitektur und Bodeneigenschaften. *Proceedings of the 9th VTA-Spezialseminar "Messen und Beurteilen am Baum"*.

Timoshenko, S. P., 1956. *Theory os elastic stability*. McGraw-Hill, New York.

UNE-EN 14081 Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section. Madrid. 2005.

UNE - EN 338 Madera estructural. Clases resistentes. Madrid, 2017.

UNE-EN 384 Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Madrid, 2017.

Wagener, W. W., 1963. *Judging Hazards from Native Trees in California Recreational Areas: a guide for professional foresters*. Berkeley.

Wessolly, L.; Erb, M., 1998. *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*.

Yeatts FR. 2012. Tree shape and branch structure: mathematical models. *Mathematical and Computational. Forestry&Natural-Resource Sciences* 4(1): 2-15.