



CRIAÇÃO DE UM MODELO COMPUTACIONAL DE UM EXEMPLAR DE ÁRVORE URBANA DA ESPÉCIE *CAESALPINIA PLUVIOSA*

Palavras-Chave: METODO DOS ELEMENTOS FINITOS-1, ARBORIZAÇÃO URBANA-2, BIOMECÂNICA DE ÁRVORE-3

Autores(as):

LIVIA FELIPE ARAÚJO, FEAGRI – UNICAMP

Professor orientador WILLIAM MARTINS VICENTE, FEAGRI – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A análise do risco de quedas de árvores é imprescindível na composição e implantação da arborização urbana. A compreensão e avaliação desses riscos são cruciais para mitigar os perigos associados às quedas de árvores, uma vez que, com as adversidades das mudanças climáticas, a recorrência de acidentes à população e aos elementos urbanos cresce cada vez mais. Com o avanço da tecnologia computacional, técnicas e metodologias de análise têm sido desenvolvidas e aprimoradas para identificar árvores em potencial estado de instabilidade, a fim de adotar medidas preventivas adequadas. Assim, cientistas vêm estudando formas de utilizar modelos numéricos que possam ser empregados como ferramentas eficientes para estimar a distribuição de deformações e 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). Desta forma, o presente projeto foi elaborado com o intuito de propor um modelo computacional de um exemplar de árvore urbana da espécie *Caesalpinia pluviosa*, com o auxílio do software Ansys Mechanical APDL. O modelo implica na comparação com um modelo real e na compreensão, de forma aproximada, o comportamento de diferentes partes da árvore (raiz, galho e fuste) diante da aplicação de cargas gravitacionais e de vento.



Figura 1 - Sibipiruna (*Cenostigma pluviosum*).

METODOLOGIA:

O projeto instituiu a criação de um modelo numérico computacional por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) no software Ansys Mechanical APDL, que represente de forma realista o comportamento mecânico de uma árvore urbana de um exemplar da espécie *Caesalpinia pluviosa*,

popularmente conhecida como Sibipiruna, com o qual foi realizado análise linear estática do comportamento de um indivíduo arbóreo.

É imprescindível ressaltar que ao longo do desenvolvimento da pesquisa, a árvore inicialmente escolhida como modelo para a confecção do modelo computacional foi substituída por outra para simplificação da criação do modelo computacional. A nova árvore selecionada apresentava uma estrutura mais robusta e oferecia maior facilidade de acesso, fatores cruciais para viabilizar a realização dos ensaios e a coleta de dados de maneira mais precisa e eficiente. Essa decisão foi tomada com o objetivo de assegurar a qualidade e a relevância dos resultados obtidos, bem como o alcance das finalidades estabelecidas na investigação do comportamento estrutural das árvores frente às forças externas. O exemplar está localizado dentro do Ciclo Básico da Unicamp/Campinas. Para uma simulação do comportamento mecânico de uma estrutura foi necessário considerar três aspectos fundamentais: a geometria da estrutura (no caso a árvore elegida para ser simulada), as propriedades mecânicas do material (madeira) e as cargas atuantes (gravidade e vento). As características geométricas do exemplar foram obtidas anteriormente em projetos do Grupo de Pesquisas do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LabEND) da Faculdade de Engenharia Agrícola (Feagri/Unicamp) que estão apresentados na Tabela 1.

Espécie	Sibipiruna - <i>Cenostigma pluviosum</i>
DAP	40,74 cm
Circunferência	128 cm
Raiz exposta	sim
Condição de contorno	gramado
Altura total (intervalo - m)	17,60
Inclinação (valor em graus)	15°
Diâmetro da copa (intervalo - m)	15,00
Dimensão do canteiro	-
Localização	Lat: 22,816802° S; Lon: 47,068724° W

Tabela 1 - Parâmetros geométricos do exemplar de Sibipiruna (*Caesalpinia pluviosa*) considerado no modelo, com base nos estudos do LabEND.

Considerou-se a madeira do modelo como ortotrópica e os valores também foram obtidos em projetos anteriores do grupo de pesquisas e estão apresentados na Tabela 2. Em um mesmo modelo também é possível utilizar diferentes materiais com diferentes propriedades mecânicas. Portanto, para cada parte da árvore (raiz, fuste e galhos) foi utilizado propriedades mecânicas diferentes. Nos modelos foram utilizados três módulos de elasticidade - longitudinal (EL), radial (ER) e tangencial (ET), três módulos de cisalhamento nos planos (GRT, GLT e GLR) e três coeficientes de Poisson (valores máximos) nos planos (ν_{LR} , ν_{LT} e ν_{RT}).

SIBIPIRUNA			
Densidade	1274	1199	692
	Raiz	Fuste	Galho
E_L [Mpa]	18518	12730	8564
E_R [Mpa]	1851	1829	950
E_T [Mpa]	1065	1095	431
G_{RT} [Mpa]	523	431	261
G_{LT} [Mpa]	1183	991	506
G_{LR} [Mpa]	1805	1451	803
ν_{LR}	0,49	0,50	0,67
ν_{LT}	0,74	0,72	0,67
ν_{RT}	0,65	0,67	0,71

Tabela 2 - Parâmetros elásticos da madeira do fuste, galhos e raiz da árvore da espécie Sibipiruna (*Cenostigma pluviosum*) na condição saturada.

De forma geral, como as árvores possuem estruturas de grandes dimensões e geometria complexa, além de sustentar consideráveis deformações, os métodos simplificados normalmente aplicados em estruturas convencionais acabam sendo inadequados para uma análise mais detalhada e precisa. Diante desses desafios, os pesquisadores têm se empenhado em buscar métodos apropriados para descrever o comportamento das árvores diante de cargas de vento e gravitacionais, buscando estimar com precisão a distribuição de tensões em seus fustes, galhos e sistema radicular.

No intuito de desenvolver um modelo computacional capaz de prever o comportamento da espécie Sibipiruna frente as principais forças atuantes com a qual as árvores são submetidas, como as cargas gravitacionais e as variações de velocidade com que o vento alcança, o projeto pretende realizar ensaios com a aplicação de forças mecânicas que corroborem para identificar em quais regiões da árvore estão localizadas as maiores forças de tensão, assim como, os pontos de deformação e a capacidade de ancoragem da raiz frente as adversidades geradas na simulação computacional, como uma forma de acordar a disposição das tensões referente aos fustes, galhos e o sistema radicular da Sibipiruna.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O projeto em questão ainda está em fase de desenvolvimento. Contudo, o modelo computacional proposto demonstra um grande potencial de contribuição, uma vez que, o intuito é aprimorar a compreensão sobre os riscos de quedas de árvores e desenvolver estratégias eficazes de manejo e preservação, visando a redução dos acidentes e danos associados. Nesse contexto, estudos relevantes foram conduzidos por pesquisadores pioneiros, como Wessolly e Erb (1998), Mattheck et al. (2006) e Gaffrey e Kniemeyer (2002). As contribuições valiosas desses pesquisadores impulsionaram significativamente o avanço nessa área do conhecimento. Através da análise dos dados gerados com o progresso do projeto, é esperado que seja possível identificar padrões e correlações que possam indicar a probabilidade de queda em determinadas condições. É importante ressaltar que a pesquisa demanda tempo e um conjunto abrangente de dados para produzir resultados confiáveis e aplicáveis. Incumbido do desenvolvimento em curso do estudo, foi projetado um modelo computacional que visa aprofundar a análise das forças e tensões presentes em situações reais que afetam as árvores.

Representado nas figuras seguintes, esse modelo está sendo aprimorado para viabilizar simulações que caracterizem de forma precisa as propriedades de quedas de árvores por meio do software Ansys Mechanical APDL. Com tal aprimoramento, almeja-se alcançar uma maior compreensão do comportamento dessas estruturas frente às forças incidentes, possibilitando assim a implementação de medidas preventivas e mitigatórias mais eficazes. Assim, tornou-se necessário a elaboração de uma malha que representasse adequadamente a geometria do corpo em termos de nós e elementos, viabilizando a condução da análise estrutural por meio do método dos elementos finitos.

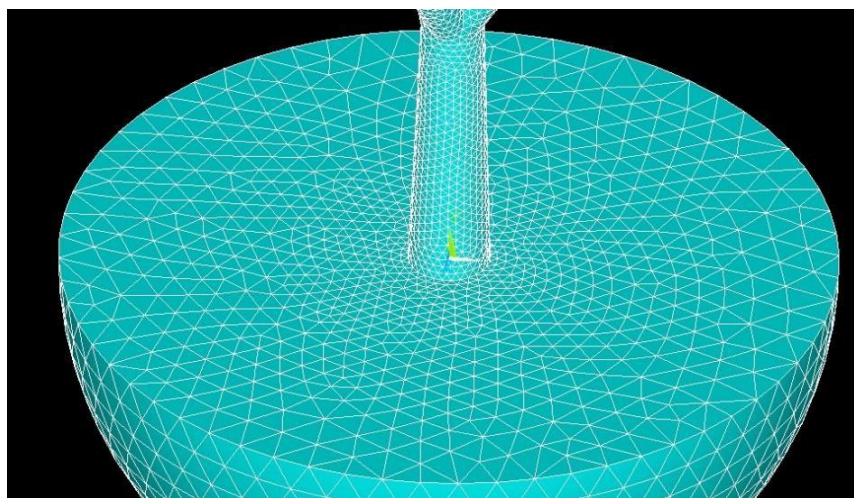


Figura 2 - Detalhes da malha de elementos finitos do solo.

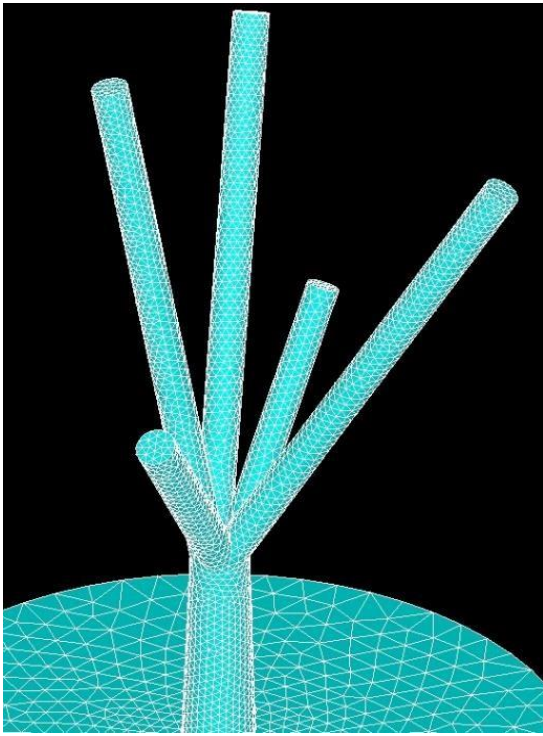


Figura 3 - Detalhes da malha de elementos finitos do fuste e galhos.

Ao iniciar o processo de modelagem no Ansys Mechanical APDL, é essencial considerar a seleção adequada dos elementos finitos. A opção por esse elemento garante uma representação mais precisa do comportamento mecânico do solo, fuste e galhos sob diferentes condições de carregamento.

Considerando os pontos da estrutura com maior concentração de esforços, optou-se por realizar um refinamento da malha nestas áreas críticas da árvore. Os pontos de interesse incluem o encontro da base do fuste com o solo, Figura 2, e a região de contato entre o fuste e os galhos, Figura 3. O objetivo é capturar com precisão os efeitos locais das interações estruturais nesses locais críticos, onde os esforços são mais intensos. Esse refinamento adicional garantirá uma análise sensível e confiável desses pontos, permitindo uma compreensão mais completa do comportamento da árvore sob diferentes condições de carga. Essa abordagem analítica aprimorada é fundamental para embasar decisões precisas em projetos e análises estruturais referente ao risco de quedas de árvores em áreas urbanas.

Após a meticulosa finalização do processo de geração da malha, tornou-se possível realizar uma análise abrangente dos esforços que incidem na árvore em estudo. Nesse contexto, considerando a aplicação de uma carga de vento, distribuída de maneira uniforme entre os cinco galhos, foram obtidos resultados de grande relevância relacionados aos deslocamentos horizontais, esforços normais, tanto de tração quanto de compressão e cisalhamento. Os achados dessa análise abrangente foram criteriosamente registrados e são apresentados na Figura 4, a qual ilustra os valores específicos dos deslocamentos horizontais ao longo do eixo X.

De acordo, a conformidade com os parâmetros de modelagem adotados, que preveem a árvore como uma estrutura engastada na base e livre no topo, os deslocamentos horizontais de maior magnitude foram observados precisamente no ponto mais alto dos galhos. Tais resultados corroboram a acurácia e a solidez da análise conduzida pelo método dos elementos finitos, permitindo, assim, uma compreensão aprofundada do comportamento estrutural da árvore sob a ação das cargas especificadas.

Em seguida, foi realizado o carregamento no modelo computacional por meio das tensões de Von Mises, Figura 5. As tensões de Von Mises são um importante critério de falha utilizado para determinar a capacidade de um material suportar as forças aplicadas sem ultrapassar seu limite de escoamento. No caso das árvores urbanas, essas tensões surgem devido a diversas fontes de carregamento, tais como ventos, cargas de neve, chuvas intensas e até mesmo intervenções humanas, como podas inadequadas. No caso deste projeto, as forças atuantes estão sendo representadas pela ação do vento sobre a árvore.

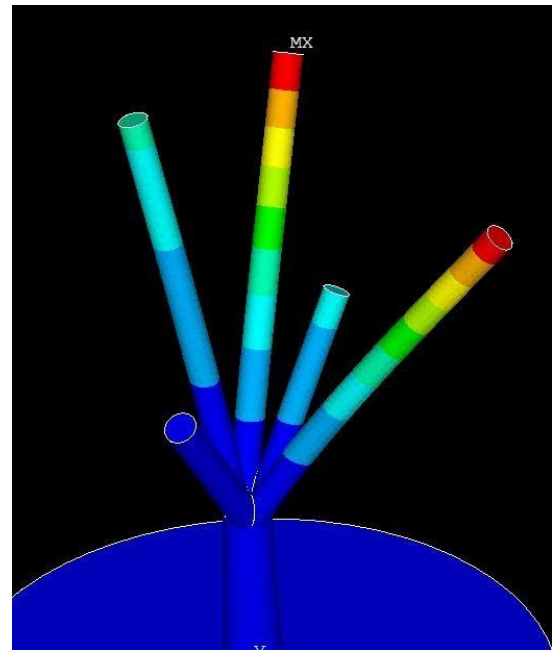


Figura 4 - Deslocamentos devido ao peso próprio e carregamentos simulando carregamentos de vento.

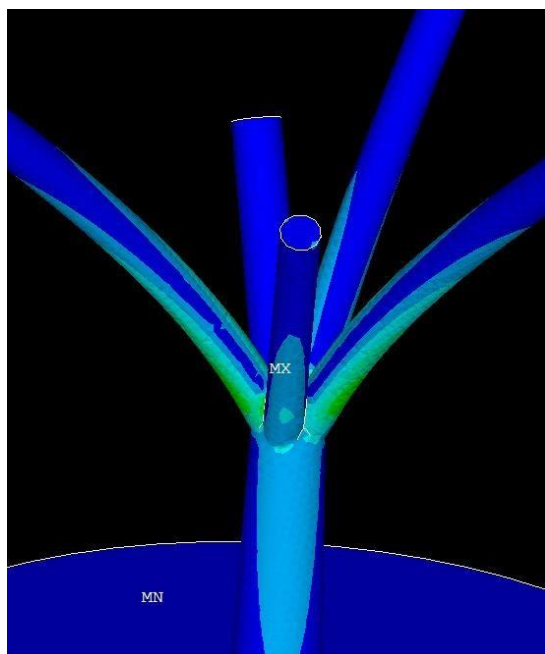


Figura 5 - Tensões de von Mises devido ao carregamento no modelo computacional de um exemplar de árvore urbana.

O estudo demonstrou que as tensões críticas estão localizadas nos pontos de conexão do fuste com o solo e do fuste com os galhos, o que caracteriza pontos com maiores chances de sofrerem falhas, ruptura, quebra, ou até mesmo ocasionar o que seria a queda da árvore.

É de extrema relevância prosseguir com pesquisas contínuas mesmo que demandem tempo, dedicação e paciência, visando aprimorar a compreensão desses fenômenos complexos e a precisão dos modelos empregados, mesmo com os obstáculos e dificuldades da criação de um modelo que busque se assemelhar à uma árvore real. A contínua investigação científica proporcionará um entendimento aprofundado do comportamento estrutural das árvores, fortalecendo, assim, a segurança e a gestão adequada desses elementos tão fundamentais no meio urbano. Nesse sentido, a sinergia entre a ciência e a prática contribuirá para a preservação das árvores, bem como sua integração harmoniosa nas áreas urbanas, promovendo uma convivência sustentável entre a natureza e a sociedade. A valorização e o aprimoramento do conhecimento sobre as árvores são essenciais para garantir sua proteção e perpetuação, além de

maximizar os benefícios que proporcionam às gerações presentes e futuras.

CONCLUSÕES:

O modelo computacional proposto inicialmente demonstrou ser condizente para simular árvores com diferentes características dendrológicas, além de proporcionar a utilização de parâmetros elásticos que levam em conta a ortotropia da madeira e a inserção de diferentes parâmetros elásticos para a raiz, fuste e galhos. Apesar das limitações inerentes à modelagem de uma estrutura complexa como a de uma árvore, o modelo proposto se mostrou capaz de representar o comportamento estrutural e poderá ser usado para prever deslocamentos horizontais, tensões normais e de cisalhamento. O modelo computacional proposto deverá ainda ser aprimorado, com a consideração de uma geometria mais complexa e mais próxima do modelo real, além de um refinamento da malha de elementos finitos utilizada, o que possibilitará resultados cada vez mais precisos e realistas.

BIBLIOGRAFIA

- Martínez, P. C.; Díaz, M. I. I., 2016. El riesgo del Arbolado Urbano - Contexto, concepto y evaluación. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, Espanha.
- Milne, R.; Blackburn, P., 1989. The elasticity and vertical distribution of stress within stems of *Picea sitchensis*. *Tree Physiology*, 5, 195-205.
- Ruy, M. 2020. Modelagem do comportamento biomecânico de árvores. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Agrícola/Unicamp, Campinas.
- Timoshenko, S. P., 1956. *Theory of elastic stability*. McGraw-Hill, New York.
- Wessolly, L.; Erb, M., 1998. *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*.