



Modelagem computacional do comportamento biomecânico de árvores por elementos finitos

Diogo Lourenço Oliveira da Silva*, Monica Ruy, William Martins Vicente

Resumo

O desenvolvimento de modelos computacionais de árvores tem sido utilizado como ferramenta para análise do risco de queda. Devido as características físicas e a propriedades mecânicas das árvores, a criação de modelos computacionais representativos se torna bastante complexa. De acordo com os princípios da mecânica estrutural, para analisar a estabilidade de uma estrutura é necessário o conhecimento das cargas atuantes, das condições de contorno e as propriedades do material. O Grupo de pesquisa do Laboratório de Ensaio Não Destrutivos da Feagri desenvolve uma série de projetos que visa o estudo de cada um dos elementos fundamentais para análise da estabilidade de árvores (cargas atuantes, geometria, condições de contorno e propriedades do material). Assim, este projeto de Iniciação Científica teve como objetivo desenvolver um modelo computacional através do método dos elementos finitos para a análise estrutural de árvores considerando, além dos diferentes aspectos biomecânicos envolvidos, a influência da escolha do tipo de elemento e a discretização da malha utilizada na criação do modelo. Através do *software* comercial de simulação computacional Ansys Workbench Student 2020R1 foi desenvolvido uma série de modelos representativos de um exemplar de Mogno Africano, localizado na região de Campinas. Para determinar o modelo mais adequado, os resultados das simulações foram comparados com dados obtidos em ensaio de tração na árvore com as mesmas características. O modelo final adotado foi utilizado para o estudo da influência das características da malha e condições de contorno na análise estrutural.

Palavras Chave:

Queda de árvores, propriedades mecânicas de árvores, modelagem computacional

Objetivo

Visando contribuir para o estudo maior do risco de queda de árvores, o objetivo geral deste trabalho foi criar um modelo computacional através do método dos elementos finitos para a análise estrutural de árvores considerando os diferentes aspectos biomecânicos envolvidos. Além disso, foi analisada a influência da escolha do tipo de elemento bem como realizado um estudo da malha utilizada na criação do modelo de árvores por elementos finitos no software comercial Ansys.

Materiais e Métodos

Aplicando o Método dos Elementos Finitos (MEF) foram desenvolvidos uma série de modelos utilizando software comercial de simulações de engenharia Ansys Workbench, com o qual foi realizada análise linear estática do comportamento de um indivíduo arbóreo. A árvore simulada foi considerada totalmente íntegra e o modelo arquitetônico foi baseado em características geométricas (Tabela 1) de um exemplar da espécie *Khaya ivorensis* (Mogno Africano), localizado em ambiente rural do município de Campinas SP. Um exemplar com as mesmas características foi utilizado em estudo paralelo por outros integrantes do grupo de pesquisas do Laboratório de Ensaio Não Destrutivos (LabEND) da Faculdade de Engenharia Agrícola (Feagri/Unicamp).

Tabela 1. Parâmetros geométricos do Mogno Africano utilizada em estudo paralelo no LabEND.

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

Para ser possível desenvolver modelos que permitam prever o comportamento de árvores frente a cargas gravitacionais e de vento, é necessário compreender o comportamento das árvores frente a essas cargas e o mecanismo de ancoragem do sistema radicular. Além disso, árvores são estruturas de grandes dimensões, geometria complexa e, adicionalmente, suportam grandes deformações, fazendo com que métodos simplificados aplicados a estruturas convencionais não sejam adequados. Isso fez com que pesquisas fossem desenvolvidas na tentativa de se encontrar um método que permita descrever de forma apropriada as árvores sob efeito de cargas de vento e gravitacionais e, assim, estimar a distribuição de tensões nos troncos, galhos e sistema radicular (Wessolly e Erb 1998; Mattheck et al. 2006; Gaffrey e Kniemeyer 2002).

A madeira do fuste da árvore foi considerada como ortotrópica e os valores adotados nas simulações das propriedades mecânicas foram obtidos de pesquisas anteriores do grupo. 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 (vLR, vLT e vRT). Considerando a importância da composição modular das árvores (NIKLAS, 2000), com a evolução dos modelos, também foram utilizados resultados de propriedades físicas (densidade) e mecânicas de raízes e de galhos obtidas anteriormente no grupo de pesquisa.

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

Para validar os modelos, os valores de deslocamento, na direção paralela ao eixo de aplicação das cargas de ventos, obtidos em cada simulação, para cada uma das 5 cargas aplicadas, foram comparados aos resultados de deslocamento horizontal obtidos pelo ensaio de tração realizado no exemplar de Mogno africano. O modelo que apresentou melhor adequação de valores de deslocamento, quando comparado com o ensaio de campo, foi utilizado em estudo da influência das características da malha e condições de contorto na análise estrutural dos modelos.

Resultados e Discussão

Em relação ao parâmetro analisado (deslocamento horizontal), o modelo 4 apresentou as menores diferenças em relação ao ensaio de tração (Tabela 2), principalmente com força de 5090N, e assim foi adotado como o mais adequado para seguimento dos estudos da malha e condições de contorno.

Tabela 2. Valores de deslocamento horizontal (mm) obtidos em ensaio de tração e nos modelos desenvolvidos

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



A simulação dos esforços no *software* Ansys Workbench demanda a criação de uma malha que represente o corpo, em nós e elementos, de forma que a análise estrutural pelo método dos elementos finitos possa ser realizada.

A criação de geometrias mais complexas, como representativas de árvores, não é uma tarefa direta no *software* utilizado. Apesar de ter sido adotado um modelo com uma estrutura simplificada neste projeto, a geometria da árvore dificultou a criação de uma malha homogênea. Considerando o grande volume da raiz em relação as outras partes da árvore houve a necessidade da diminuição do número de elementos.

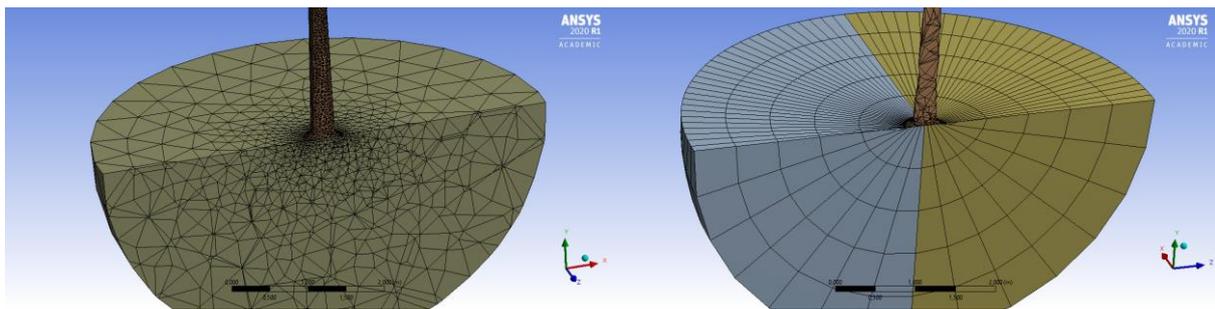


Figura 1. (a) Malha da região do torrão gerada automaticamente e (b) malha mapeada da mesma região

Levando em consideração que os pontos da estrutura onde há maior concentração de esforços tem a necessidade de uma análise mais detalhada, Se buscou um refinamento da malha nos pontos de contato da árvore, como no encontro da base do fuste com o solo (Figura 2. a) e na região de contato entre o fuste e os galhos (Figura 2.b)

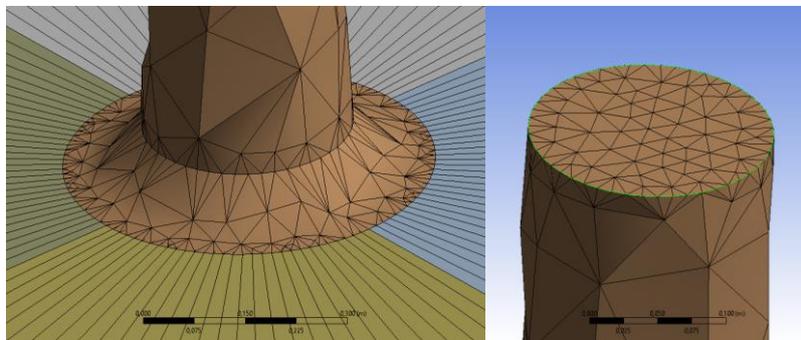


Figura 2. (a) Malha na base do fuste (b) malha no topo do fuste

Após o desenvolvimento da malha, foi possível analisar os esforços atuantes na árvore. Considerando uma carga de vento de 3448 kN, dividida nos quatro galhos, foram obtidos valores críticos e localização de deslocamentos horizontais, esforços normais (tração e compressão) e de cisalhamento.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos na simulação para deslocamentos horizontais no eixo X. Como esperado pelas condições do modelo (estrutura engastada na base e livre no topo), os maiores valores de deslocamento horizontal se deram no topo dos galhos.

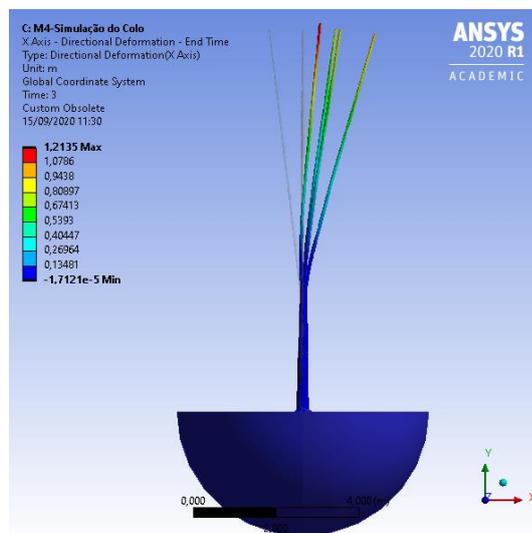


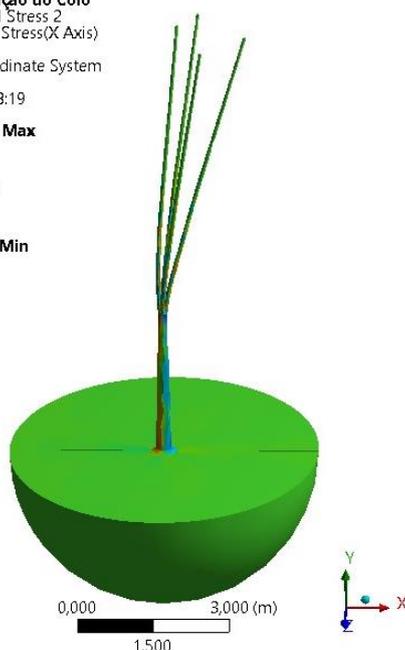
Figura 3. Deslocamento horizontal, em metros, no eixo X

Em estruturas de madeira o deslocamento máximo permitido para a condição engastada-livre, que é o caso da árvore, é dado pelo comprimento da peça (L)/100. Esse deslocamento máximo está baseado no conceito de Estado Limite de Utilização e tem como objetivo limitar danos aos elementos estruturais ou apenas questões estéticas visuais.

A Figura 4 representa os resultados obtidos para as tensões normais máximas negativas (de compressão) e positivas (tração). Análise dos resultados indicam tensões críticas nos pontos de conexão do fuste com o torrão e do fuste com os galhos, sendo que a máxima tensão normal positiva se encontra na face onde foi aplicada a carga de vento e a máxima tensão negativa se encontra na face contrária. Enquanto na figura 5, de forma similar, é apresentado as tensões máximas e mínimas nos pontos de conexão.

C: M4-Simulação do Colo
X Axis Normal Stress 2
Type: Normal Stress(X Axis)
Unit: Pa
Solution Coordinate System
Time: 3
27/09/2020 18:19

2,4994e7 Max
1,5e6
6,6667e5
-1,6667e5
-1e6
-1,5e6
-2,599e7 Min



C: M4-Simulação do Colo
Shear Stress 3
Type: Shear Stress(XY Component)
Unit: Pa
Solution Coordinate System
Time: 3
27/09/2020 18:31

9,9371e6 Max
5e5
2,5e5
0
-2,5e5
-5e5
-2,4376e6 Min

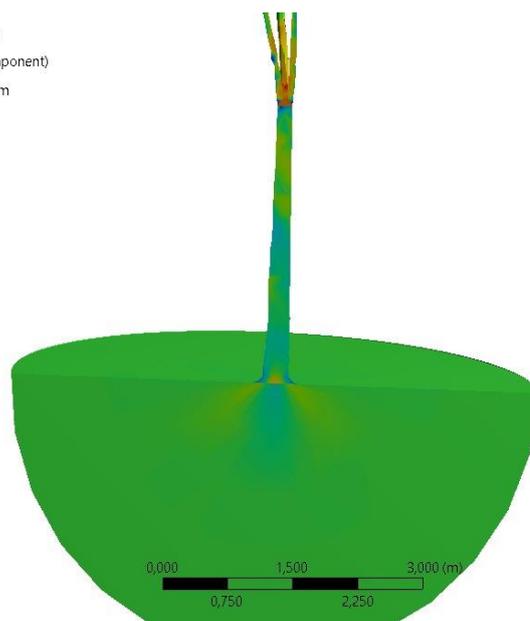


Figura 4. Tensões normais (positivas e negativas). Figura 5. Tensões máximas e mínimas

Em engenharia a avaliação da estrutura é feita utilizando um fator de segurança, que tipicamente é tomado como a relação entre a capacidade de carga e a carga atuante. Esse quociente deve ser maior ou igual a um para que a estrutura seja considerada confiável. No entanto, há grande número de publicações que indicam que as plantas são estruturas que possuem fatores de segurança muito superiores à um. Resultados da literatura



sugerem que os esforços nas árvores poderiam ser de 3 a 5 vezes superiores ao que se esperaria para uma estrutura, antes de se esperar uma ruptura.

A madeira utilizada na simulação (*Khaya ivorensi*) 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. Associando esses valores às condições de contorno onde a árvore analisada está plantada, calculou-se a resistência de cálculo na tração ($f_{t,d} = 5,9 \times 10^6$ Pa), na compressão ($f_{c,d} = 9,7 \times 10^6$ Pa) e no cisalhamento ($f_{v,d} = 1,9 \times 10^6$ Pa).

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.

Os resultados obtidos nesse projeto indicaram que para todos os esforços (normais – tração e compressão – e de cisalhamento) os fatores de segurança da árvore foram inferiores a 1,0: 0,24, 0,37 e 0,19, respectivamente. Considerando os resultados da literatura, essa árvore poderia não representar risco de queda para a velocidade de vento simulada (14 m/s).

Conclusão

O modelo proposto se mostrou 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; e, posteriormente, poderá ser utilizado para a inserção de zonas com biodeterioração ou tigmomorfogênese e 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.

É importante ressaltar que a simulação pode ser melhorada com a utilização do *software* completo, permitindo assim a utilização de mais elementos e nós na malha do corpo, fazendo com que os resultados sejam cada vez mais confiáveis.

Agradecimentos

Agradeço pela oportunidade e por toda a estrutura que a Unicamp sempre me proporcionou, além de minha família que sempre esteve presente em minhas conquistas. Agradeço também a minha coorientadora Monica Ruy e meu orientador William Martins Vicente que me deram todo o suporte e confiança ao longo do projeto.

Referências Bibliográficas

- 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.
- Mattheck, C.; Bethge, K.; Tesari, I. 2006. **Shear effects on failure of hollow trees.** Trees, 20, 329-333.
- Niklas, K. J., 2000. **Computing factors of safety against wind-induced tree stem damage.** Journal of Experimental Botany, 51 (345), 797-806.
- Wessolly, L.; Erb, M., 1998. **Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle.**