

NARA SILVEIRA VELLOSO

**PROPRIEDADES FÍSICAS E COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA
FRUTO-RÁQUILA DA MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

V441p
2016 Velloso, Nara Silveira, 1989-
Propriedades físicas e comportamento dinâmico do sistema fruto-
ráquila da macaúba (*Acrocomia aculeata*) / Nara Silveira Velloso. -
Viçosa, MG, 2016.
xi, 56f. : il. (algumas color.) : 29 cm.

Orientador: Fábio Lúcio Santos.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Macaúba - Propriedades mecânicas. 2. Macaúba - Propriedades
físicas. 3. *Acrocomia aculeata*. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 633.85

NARA SILVEIRA VELLOSO

**PROPRIEDADES FÍSICAS E COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA
FRUTO-RÁQUILA DA MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 20 de julho de 2016.

Joseph Kalil Khoury Junior

Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Coorientador)

Fábio Lúcio Santos
(Orientador)

Aos meus pais, Helenice e Antônio.
Aos meus irmãos Sidney e Sérgio.
Aos meus sobrinhos Lara, Felipe e
José Augusto. Aos meus amigos e
familiares.

DEDICO

“We are the champions.”
(Queen)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sabedoria e pelo dom da vida.

Agradeço também aos meus pais Helenice e Antônio por sempre me educarem no caminho do bem, por não medirem esforços para me ajudar, por sempre apoiarem minhas decisões e confiarem em mim. Eu amo vocês.

Agradeço também aos meus irmãos Sidney e Sérgio por todo apoio distante ou perto.

Aos meus avós, Antônia (*in memoriam*) e Edgard por sempre ajudarem minha mãe na minha educação e pelos ensinamentos transmitidos.

Agradeço aos meus familiares e amigos por sempre apoiarem e torcerem por mim.

Aos meus sobrinhos Lara, Felipe e José Augusto por todo carinho e momentos de felicidade.

A minha tia Neyde Racine que mesmo distante está sempre me incentivando e apoiando.

Agradeço aos colegas do laboratório de mecanização agrícola e do departamento de engenharia agrícola pelo convívio, troca de experiências acadêmicas e auxílio em trabalhos.

Aos amigos Nínive, Amélia, Emanuel, Túlio, Jéssica, Leandro, Remo, Rafaella e Roberta pela amizade e companheirismo.

Aos amigos que auxiliaram na execução do projeto Flora, Jéssica, Zenil e Ely.

Agradeço aos professores do DEA pelo conhecimento e experiência transmitidos.

Ao meu orientador Professor Fábio Lúcio, agradeço pela orientação, ensinamentos e amizade. Eu não poderia ter tido melhor orientador em todo o universo.

Aos coorientadores Sárvio e Francisco, agradeço os aconselhamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de realizar o mestrado.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
CAPÍTULO I: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba	4
Resumo.....	5
Abstract	6
1.Introdução	7
2.Material e Métodos.....	10
•Propriedades geométricas	13
•Massa do sistema fruto-ráquila	13
•Volume do sistema fruto-ráquila.....	14
•Massa específica do sistema fruto-ráquila	14
•Módulo de Elasticidade da ráquila	14
•Coeficiente de Poisson da ráquila.....	14
•Razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila.....	15
•Análise Estatística.....	16
3.Resultados e Discussão.....	16
•Propriedades geométricas	16
•Massa, volume e massa específica do sistema fruto-ráquila	18
•Módulo de Elasticidade e coeficiente de Poisson da ráquila.....	20
•Razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila.....	23
4.Conclusões.....	24
5.Referências Bibliográficas	25
CAPÍTULO II: Comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba	29

Resumo	30
Abstract	31
1.Introdução	32
2.Material e Métodos	35
•Modelagem matemática do sistema fruto-ráquila.....	37
•Determinação das frequências naturais e modos de vibração.....	39
•Validação do Modelo em Elementos Finitos	40
•Análise de Tensões de um Sistema.....	41
•Análise de Sensibilidade	44
•Análise Estatística.....	44
3.Resultados e Discussão	44
•Frequências naturais e modos de vibração	44
•Tensões do sistema	47
•Análise de sensibilidade.....	49
4.Conclusões	51
5.Referências Bibliográficas	52
CONCLUSÕES GERAIS	55

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba

Tabela 1: Valores médios dos diâmetros para a ráquila e fruto, nos estádios de maturação verde e maduro.....	17
Tabela 2: Estatística descritiva para os diâmetros médios das ráquillas e dos frutos, no estádio de maturação verde considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35)	17
Tabela 3: Estatística descritiva para os diâmetros médios das ráquillas e dos frutos no estádio de maturação maduro considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35).....	17
Tabela 4: Valores médios de Massa, Volume e Massa Específica para a ráquila e fruto, nos estádios de maturação verde e maduro	18
Tabela 5: Estatística descritiva para as massas, os volumes e as massas específicas das ráquillas e dos frutos no estádio de maturação verde considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35).....	19
Tabela 6: Estatística descritiva para as massas, os volumes e as massas específicas das ráquillas e dos frutos no estádio de maturação maduro considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35).....	19
Tabela 7: Valores médios do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson para a ráquila; e Coeficiente de Amortecimento e Razão de Amortecimento para o sistema fruto-ráquila, nos estádios de maturação verde e maduro	20
Tabela 8: Estatística descritiva para as médias do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para as ráquillas, e coeficiente de amortecimento e razão de amortecimento para o sistema fruto-ráquila no estádio de maturação verde considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35).....	22
Tabela 9: Estatística descritiva para as médias do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para as ráquillas, e coeficiente de amortecimento e razão de amortecimento para o sistema fruto-ráquila no estádio de maturação maduro considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35).....	22

CAPÍTULO II: Comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba

Tabela 10: Valores para os parâmetros utilizados na determinação da força aplicada ao modelo.....	44
Tabela 11: Valores médios de frequências naturais encontrados no Ensaio de Vibração e na Simulação dos modelos para cada acesso em cada estádio de maturação	46

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba

Figura 1: Amostras de ráquias cortadas dos cachos de macaúba e utilizadas nos ensaios de tração.....	11
Figura 2: Amostras de ráquias com um fruto cortadas dos cachos de macaúba e utilizadas nos ensaios de vibração	11
Figura 3: Engaste de uma amostra de ráquila (A) entre as duas garras (B) da máquina de ensaios universal utilizadas para o ensaio de tração com distância livre entre garras de cinco centímetros	12
Figura 4: Amostra de ráquila com um fruto (A) engastada em uma das extremidades em um ensaio de vibração utilizando um vibrador eletromagnético (B) e acelerômetros de alta sensibilidade para medir a aceleração do corpo de prova (C1) e controlar o ensaio (C2)	13
Figura 5: Desenho esquemático do fruto da macaúba, considerando como esferóide tri axial. Em que a, b e c são a maior, a intermediária e a menor dimensão característica do fruto, respectivamente.....	13
Figura 6: Curva Tensão – Deformação Específica e sua Tangente, obtidas experimentalmente para a ráquila nos estádios de maturação verde (A) e maduro (B).....	21
Figura 7: Curva de decremento logarítmico obtida experimentalmente para o sistema fruto-ráquila nos estádios de maturação verde (A) e maduro (B).....	24

CAPÍTULO II: Comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba

Figura 8: Amostras de ráquias com um fruto cortadas dos cachos de macaúba e utilizadas nos ensaios de vibração	36
Figura 9: Amostra de ráquila com um fruto (A) engastada em uma das extremidades em um ensaio de vibração utilizando um vibrador eletromagnético (B) e acelerômetros de alta sensibilidade para medir a aceleração do corpo de prova (C1) e controlar o ensaio (C2)	37
Figura 10: Modelo do sistema fruto-ráquila da macaúba com a malha utilizada e as condições de contorno (engastamento).....	37
Figura 11: Comparação das 1 ^a , 6 ^a e 8 ^a frequências naturais do sistema fruto-ráquila simulado empregando dois refinamentos de malhas utilizadas em elementos finitos	38
Figura 12: Dados de amplitude no domínio do tempo (A) e no domínio da frequência – Espectro de Frequência após a Transformada Rápida de Fourier(B).....	41
Figura 13: Modelo do sistema fruto-ráquila da macaúba com a malha utilizada e as condições de contorno (engastamento) sob o carregamento de uma força harmônica	43
Figura 14: Valores de frequências naturais experimentais e simuladas com desvios padrão para os diferentes acessos nos diferentes estádios de maturação	45

Figura 15: Modo de vibrar pendular – oitavo modo de vibração	46
Figura 16: Representação da distribuição da tensão de von Mises ao longo do modelo do sistema fruto-ráquila da macaúba, em que MN representa o valor mínimo e MX representa o valor máximo	47
Figura 17: Detalhe do ponto de concentração das maiores tensões de von Mises no modelo do sistema fruto-ráquila da macaúba, em que MN representa o valor mínimo e MX representa o valor máximo.....	48
Figura 18: Representação dos deslocamentos totais ao longo do modelo do sistema fruto-ráquila da macaúba, em que MN representa o valor mínimo e MX representa o valor máximo	49
Figura 19: Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando o coeficiente de poisson	49
Figura 20: Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando o módulo de elasticidade.....	50
Figura 21: Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando a massa específica.....	50

RESUMO

VELLOSO, Nara Silveira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2016. **Propriedades físicas e comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. Orientador: Fábio Lúcio Santos. Coorientadores: Domingos Sárvio Magalhães Valente e Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

A palmeira nativa macaúba tem ampla extensão territorial e é fonte de matéria prima para produção de biodiesel, no entanto sua produção ainda é extrativista. Para melhorar a qualidade dos frutos e a eficiência na colheita, faz-se necessário estudar diferentes opções para a colheita. Uma das alternativas é o uso de máquinas que utilizam o princípio de vibrações mecânicas. Esse trabalho foi desenvolvido com a finalidade de determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba e modelar seu comportamento dinâmico. Foram utilizadas dez amostras de quatro acessos diferentes nos estádios de maturação verde e maduro. As propriedades geométricas foram determinadas através de medições diretas nos corpos de prova. Ensaios de tração e vibração foram realizados para determinar propriedades físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba. O comportamento dinâmico do sistema foi simulado a partir de uma análise modal pelo método de elementos finitos e validado em função dos deslocamentos reais observados durante os ensaios de vibração laboratoriais. As massas específicas do sistema tendem a aumentar conforme evolui a maturação dos frutos. O Módulo de Elasticidade obtido para a ráquila ficou entre 1,86 MPa e 3,80 MPa, para o estágio de maturação verde e 1,22 MPa e 3,20 MPa para o estágio de maturação maduro. O coeficiente de Poisson para a ráquila ficou entre 0,2 e 0,52 para o estágio de maturação verde e entre 0,16 e 0,52 para o estágio de maturação maduro. A razão de amortecimento encontrada ficou entre 0,01 e 0,11 para o estágio de maturação verde e entre 0,04 e 0,10 para o estágio de maturação maduro. O sistema fruto-ráquila foi caracterizado como subamortecido. Os valores médios encontrados para as frequências naturais nos ensaios de vibração foram de 20,09 Hz para o estágio de maturação verde e 19,86 Hz para o estágio de maturação maduro. Os valores médios de frequências naturais extraídas nas simulações foram de 23,61 Hz e 21,65 Hz para os estádios de maturação verde e maduro, respectivamente. Os valores das frequências naturais foram menores para o

estádio de maturação maduro que para o estágio de maturação verde. O modo de vibração extraído foi o oitavo modo. As tensões de von Mises ficaram concentradas na ligação entre a ráquila e o fruto.

ABSTRACT

VELLOSO, Nara Silveira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2016. **Physical properties and dynamic behavior of fruit-rachilla macaúba system (*Acrocomia aculeata*)**. Advisor: Fábio Lúcio Santos. Co-Advisors: Domingos Sárvio Magalhães Valente and Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

The native palm macaúba has wide territorial extension and the source of raw material for biodiesel production, but production is still extractive. To improve fruit quality and efficiency in the collection, it is necessary to study different options for harvest. One alternative is the use of machines that use the principle of mechanical vibrations. This work was developed with the purpose of determining the geometric, mechanical and physical properties of the fruit-rachilla macaúba system model and its dynamic behavior. Ten samples of four different accesses in the green and ripe maturation stages were used. The geometric properties were determined through direct measurements on test specimens. Testing of traction and vibration were conducted to determine physical and mechanical properties of the fruit-rachilla macaúba system. The dynamic behavior of the system was simulated from a modal analysis by finite element method and validated on actual displacements observed during laboratory vibration tests. The specific mass of the system tend to increase as evolves the ripening of fruits. The elastic modulus was obtained to rachilla between 1.86 MPa and 3.80 MPa for the green stage of maturation and 1.22 MPa and 3.20 MPa for the mature stage. The Poisson's ratio for rachilla was between 0.2 and 0.52 to the green maturity stage and between 0.16 and 0.52 to the ripe stage. The found damping ratio was between 0.01 and 0.11 for the green maturity stage and between 0.04 and 0.10 to the ripe stage. The fruit-rachilla system was characterized as underdamped. The average values for the natural frequencies in the vibration tests were 20.09 Hz for the green maturity stage and 19.86 Hz for the ripe stage. The average values of natural frequencies extracted in the simulations were 23.61 Hz and 21.65 Hz for the green and ripe maturation stages, respectively. The values of the natural frequencies were lower for the ripe stage than for the green maturity stage. The extracted vibration mode was the eighth mode. Tensions von Mises were concentrated on the link between rachilla and fruit.

INTRODUÇÃO GERAL

Com uma produção anual estimada em quatro bilhões de litros, atualmente o Brasil é considerado um dos maiores mercados mundiais de biodiesel (ANAP, 2015). Várias matérias primas como microalgas, soja, pinhão-manso e oiticica estão sendo usadas para a produção do biodiesel (Ferrari et al., 2005; Teixeira e Morales, 2006; Tominaga, 2007; Melo et al., 2009).

A macaúba é uma matéria prima que apresenta alta produtividade de óleo vegetal destinado a produção de biodiesel, cerca de 4.500 litros de óleo por ha/ano (Roscoe et al., 2007). Minas Gerais é um dos principais estados de ocorrência dessa espécie. No estado, seu óleo é usado principalmente para obtenção de óleo da polpa e da amêndoa para produção de biodiesel e produtos de higiene, limpeza, cosmético e alimentício (Ciconini et al., 2013).

A exploração da macaúba tem como base o extrativismo, consistindo na coleta dos frutos caídos das palmeiras. A colheita pode ser direta nos cachos após o corte destes por meio de foices, no entanto este tipo de atividade pode ser prejudicial aos produtores já que a palmeira apresenta espinhos ao longo dos troncos e nas folhas.

Para melhorar a qualidade dos frutos e a eficiência na colheita, faz-se necessário estudar diferentes opções para a colheita. Uma das alternativas é o uso de máquinas que utilizam o princípio de vibrações mecânicas.

O conhecimento das propriedades geométricas, físicas e mecânicas dos produtos agrícolas é essencial ao desenvolvimento de mecanismos para colheita por vibrações. As propriedades geométricas, físicas e mecânicas são características específicas de cada material e podem ser influenciadas pelo ambiente durante sua formação e amadurecimento. O uso de determinado mecanismo em interação com um produto agrícola só pode ser feito mediante previsão de como irá reagir o produto.

A modelagem matemática tem a finalidade de representar os aspectos importantes de um sistema físico real de forma a obter as equações que regem esse sistema sem, no entanto, torná-lo muito complexo, possibilitando compreender as variações no comportamento de determinados problemas físicos. Dentre os métodos numéricos empregados na análise de sistemas dinâmicos, destaca-se o método de elementos finitos. Segerlind (1984) define o

método dos elementos finitos como um procedimento numérico para obter as soluções de equações que regem alguns problemas encontrados em variadas áreas da engenharia.

O comportamento dinâmico do sistema diz respeito as suas propriedades dinâmicas que incluem as frequências naturais e os modos de vibração, que por sua vez dependem da massa, da rigidez e do tipo de amortecimento do sistema, e determinam o comportamento de vibração estrutural. A análise modal computacional de um sistema mecânico depende de uma série de propriedades mecânicas, as quais são empregadas como parâmetros de entrada da análise (Rao, 1995). Este tipo de análise nos permite entender como uma estrutura vibra, correlacionar e atualizar modelos de simulação e acelerar cálculos estruturais e de manutenção.

Considerando a importância da cultura e a precariedade atualmente encontrada em sua cadeia produtiva, especialmente a colheita, esse trabalho foi desenvolvido com a finalidade de determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba e modelar seu comportamento dinâmico. Os resultados obtidos poderão servir de base à elaboração de projetos de máquinas que usem o princípio de vibrações mecânicas para a colheita dos frutos.

Disposição do trabalho

Este trabalho é composto por introdução geral, dois capítulos e conclusão geral.

No primeiro capítulo, é apresentada a parte do trabalho referente à determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba. Os resultados obtidos foram posteriormente utilizados na modelagem por método de elementos finitos para determinação das frequências naturais, modos de vibração e tensões geradas.

No segundo capítulo, é feito um estudo acerca do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba. Foram determinadas as frequências naturais e os modos de vibração empregando o método de elementos finitos. Foram determinadas as tensões de von Mises no sistema quando excitado em uma faixa de frequência de 15 a 25 Hz. E por último foi

apresentada uma análise de sensibilidade alterando o coeficiente de Poisson, o módulo de elasticidade e a massa específica do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ciconini, G; Favaro, S.P.; Roscoe, R.; Miranda, C.H.B.; Tapeti, C.F.; Miyahira, M.A.M.; Bbearari, L.; Galvani, F.; Borsato, A.V.; Colnago, L.A.; Naka, M.H. Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Industrial Crops and Products (Print)**, v. 45, p. 208-214, 2013.

Ferrari, R. A.; Oliveira, V. da S.; Scabio, A. Biodiesel de soja – taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físicoquímica e consumo em gerador de energia. **Quím. Nova**, v. 28, p. 19-23, 2005.

Melo, James C., Teixeira, J. C.; Brito, J. Z.; Pacheco, J. G.A.; Stragevitch, L. Produção de biodiesel de óleo de oiticica. **XI Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel N/NE**, 2009.

Produção Nacional de Biodiesel Puro – B100. **Agência Nacional do Petróleo**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?dw=8740>. Acessado em: maio 2016.

Rao, S. S. **Mechanical Vibrations**. Third edition. New York, EUA. Addison-Wesley Publishing Company, 1995. 912p.

Roscoe, R.; Richetti, A. Maranhão, E. Análise de viabilidade técnica de oleaginosas para produção de biodiesel no Mato Grosso do Sul. **Revista Política Agrícola**, v. 16, p. 48-59, 2007.

Seegerlind, L. J. **Applied Finite Element Analysis**. Second edition. New York, EUA. John Wiley e Sons, Inc, 1984. 411p.

Teixeira, C. M. & Morales, M. E. Microalga como matéria-prima para a produção de biodiesel. **Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel: artigos técnicos científicos**. Vol. 1, p. 91 – 96, 2006.

Tominaga, N. **Cultivo de pinhão-mansão para produção de biodiesel**. Centro de Produções Técnicas. Viçosa, MG, 2007.

Capítulo I: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba

Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba

RESUMO

A palmeira nativa macaúba (*Acrocomia aculeata*), presente principalmente no cerrado e pantanal brasileiros, vem sendo uma alternativa para produção de biodiesel por causa de sua adaptabilidade, rusticidade e alta produção de óleo vegetal. Contudo, sua exploração ainda é extrativista e há grandes dificuldades em sua colheita. Este trabalho teve como objetivo determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba que servirão de suporte aos projetos de máquinas para colheita por vibrações mecânicas. Foram utilizadas dez amostras de quatro acessos diferentes nos estádios de maturação verde e maduro. As propriedades geométricas foram determinadas através de medições diretas nos corpos de prova. Ensaios de tração e vibração foram realizados para determinar propriedades físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba. As massas específicas do sistema tendem a aumentar conforme evolui a maturação dos frutos. O Módulo de Elasticidade obtido para a ráquila ficou entre 1,86 MPa e 3,80 MPa, para o estágio de maturação verde e 1,22 MPa e 3,20 MPa para o estágio de maturação maduro. O coeficiente de Poisson para a ráquila ficou entre 0,2 e 0,52 para o estágio de maturação verde e entre 0,16 e 0,52 para o estágio de maturação maduro. A razão de amortecimento encontrada ficou entre 0,01 e 0,11 para o estágio de maturação verde e entre 0,04 e 0,10 para o estágio de maturação maduro. O sistema fruto-ráquila foi caracterizado como subamortecido.

Palavras-chave: palmeira, biodiesel, razão de amortecimento, coeficiente de Poisson.

Geometric, physical and mechanical properties of system fruit-rachilla of macaúba

ABSTRACT

The native palm macaúba (*Acrocomia aculeata*), present mainly in the cerrado and Brazilian Pantanal, has been an alternative for biodiesel production because of its adaptability, hardiness and high production of vegetable oil. However its operation is still extractive and there are great difficulties in your harvest. This study aimed to determine the physical, geometric and mechanical properties of the fruit-rachilla macaúba system that will support the projects of machines for harvesting by mechanical vibration. Ten samples of four different accesses in the green and ripe maturation stages were used. The geometric properties were determined through direct measurements on test specimens. Testing of traction and vibration were conducted to determine physical and mechanical properties of the fruit-rachilla macaúba system. The specific mass of the system tend to increase as evolves the ripening of fruits. The elastic modulus was obtained to rachilla between 1.86 MPa and 3.80 MPa for the green stage of maturation and 1.22 MPa and 3.20 MPa for the mature stage. The Poisson's ratio for rachilla was between 0.2 and 0.52 to the green maturity stage and between 0.16 and 0.52 to the ripe stage. The found damping ratio was between 0.01 and 0.11 for the green maturity stage and between 0.04 and 0.10 to the ripe stage. The fruit-rachilla system was characterized as underdamped.

Key words: palm, biodiesel, reason damping, Poisson's ratio.

1. Introdução

Estima-se atualmente que a produção de biodiesel no Brasil esteja próxima de quatro bilhões de litros anuais (ANP, 2015). As razões para a utilização de combustíveis advindos de fontes renováveis são muitas, dentre elas diminuir a dependência do petróleo; minimizar a emissão veicular com alto potencial poluente, principalmente nos grandes centros urbanos; e controlar a concentração de gases causadores do efeito estufa na atmosfera. Desta forma, os biocombustíveis, ao longo dos anos, vem se inserindo neste quadro, com a responsabilidade de ajudar a reduzir a emissão dos gases de efeito estufa e substituir parcialmente o petróleo, aumentando assim sua vida útil (Leite e Leal, 2007).

Um dos incentivos que alavancou o uso do biodiesel no Brasil foi a constatação que sua produção e consumo começaram a aumentar em países da Europa, principalmente na Alemanha. Outro incentivo vem de um problema muito comum no país, o qual tem relação direta com a valorização da agricultura familiar e sua inclusão na sociedade (Leite e Leal, 2007). O Programa Nacional de Produção de Biodiesel (PNPD), que foi lançado em 6 de dezembro de 2004 e regulamentado pela Lei nº 11.097 de 2005, estabeleceu a obrigatoriedade do uso de 2% de biodiesel misturado ao diesel proveniente do petróleo (B2) a partir de 2008, valor esse que foi aumentado para 5% (B5) a partir de 2010, e reajustado para 7% (B7) em 2014. A fim de favorecer o pequeno produtor, o valor de impostos são cobrados diferentemente em função da origem da matéria-prima, sendo que para os pequenos produtores do Norte e Nordeste são dados os maiores descontos (PNPD, 2004).

O Brasil, sendo um país com características edafoclimáticas favoráveis à silvicultura e à produção vegetal, possui grande número de matérias primas para a produção de biodiesel como microalgas, soja, pinhão-manso, oiticica (Teixeira e Morales, 2006; Ferrari et al., 2005; Tominaga, 2007; Melo et al., 2009). Recentemente, uma espécie nativa que vem se destacando como uma cultura promissora à extração de matéria prima para a produção de biodiesel é a macaúba (*Acrocomia aculeata*) (Carvalho et al., 2011). A macaúba tem ampla distribuição nos biomas Cerrado e Pantanal, concentrando-se nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Piauí e Ceará (Lorenzi

et al., 2011; Ciconini et al., 2013). Minas Gerais é um dos principais estados de ocorrência dessa espécie, possuindo, inclusive, uma lei de incentivo ao cultivo, à extração, à comercialização, ao consumo e à transformação da macaúba e das demais palmeiras oleaginosas (Lei nº 19.485, de 13 de Janeiro de 2011 e o Decreto nº 45.940 de 2012) o Pró-macaúba (Carvalho et al., 2011).

A macaúba apresenta características como rusticidade, significativa adaptabilidade em diferentes regiões, possibilidade de cultivo em consórcio com outras espécies em sistemas agrossilvopastoris, elevada produtividade de óleo (cerca de 5000 kg por hectare) e geração de co-produtos sem toxinas e com diversas aplicações na agricultura e indústria (Henderson et al., 1995; Pimentel et al., 2011; Ferrari e Azevedo Filho, 2012).

O fruto é a parte mais importante dessa palmeira, possuindo alto potencial produtivo, já que todo ele pode ser aproveitado: casca, mesocarpo, endocarpo e amêndoa (Carvalho et al., 2011). O óleo utilizado com a finalidade de produção de biodiesel é extraído, principalmente, da polpa (mesocarpo). Além da utilização para produção do biodiesel, as partes constituintes do fruto podem ser utilizadas nas indústrias de cosméticos, alimentícia e farmacêutica.

Em toda a planta da macaúba encontram-se espinhos escuros e pontiagudos. As folhas são verdes escuras, pinadas, apresentando de quatro a cinco metros de comprimento e recobertas de espinhos. As inflorescências são amareladas e agrupadas em cachos, protegidas por uma espata. A floração ocorre entre setembro e fevereiro. Os frutos são esféricos e também dispostos em cachos. O epicarpo (casca) apresenta coloração verde no estágio inicial e marrom-amarelada quando maduro. O mesocarpo (polpa) é comestível, fibroso, de sabor adocicado, de coloração amarela ou esbranquiçada. Os frutos apresentam amêndoas oleaginosas, comestíveis, envolvidas pelo endocarpo, que é fortemente ligado à polpa e possui coloração escura. A frutificação ocorre durante todo o ano, e o amadurecimento dos frutos ocorre, principalmente, de setembro à fevereiro. As variações ocorridas nas características da espécie são advindas da diferença entre as regiões de ocorrência da planta (Scariot et al., 1991; Ciconini et al., 2013).

A exploração da macaúba tem como base o extrativismo. Muito tem-se pesquisado sobre a domesticação da espécie para estabelecer uma produção em larga escala, porém fatores como a sazonalidade, a alta heterogeneidade e

a falta de informação sobre a cultura dificultam esse avanço para obtenção de uma produção em escala industrial (Clement et al., 2005; Ciconini et al., 2013). A dormência das sementes da espécie também apresenta um entrave à sua produção em larga escala, porém técnicas para germinação in vitro como escarificação das sementes e tratamentos térmicos e químicos estão sendo desenvolvidos com a finalidade de acelerar a germinação das sementes (Azevedo Filho et al., 2012; Nobre et al., 2014; Rubio Neto et al., 2014).

Os frutos podem ser colhidos usando-se foices para o corte dos cachos ou podem ser coletados diretamente no chão após sua queda (Carvalho et al., 2011). Para melhorar a qualidade dos frutos e a eficiência na colheita, faz-se necessário estudar diferentes opções para a colheita. Uma das alternativas é o uso de máquinas que utilizam o princípio de vibrações mecânicas.

O princípio de vibrações mecânicas tem sido aplicado à diversas culturas, como azeitonas (Dias et al., 2004), pistache (Polat et al., 2007), café (Santos et al., 2009) e pinhão manso (Veronesi et al., 2012). Vários fatores como forma, tamanho, estrutura, estágio de maturação, frequência, amplitude, tempo de vibração, dentre outros, influenciam na colheita por vibrações (Srivastava et al., 1996; Coelho et al., 2015). Um grande número de informações referentes à cultura da macaúba necessitam de investigações, envolvendo caracterização física, mecânica e modal, técnicas de propagação e domesticação, metodologias para colheita, extração e composição do óleo.

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos produtos agrícolas é essencial ao desenvolvimento de mecanismos de colheita e pós-colheita. Estas propriedades referem-se ao comportamento do produto em diversas situações e em níveis de solicitação. O uso de determinado mecanismo em interação com o produto agrícola só pode ser feito quando se pode prever o que vai acontecer quando o produto for solicitado por fatores do cotidiano de trabalho, tais como aquecimento, resfriamento, tração, torção, corte, cisalhamento, dentre outros.

As propriedades geométricas, físicas e mecânicas são características específicas de cada produto podendo ser influenciadas pelo ambiente durante sua formação e amadurecimento. As propriedades mecânicas são aquelas que surgem quando o produto é submetido a um esforço de natureza mecânica,

avaliando a capacidade do produto em transmitir ou resistir aos esforços que lhe são aplicados (Silva e Correa, 2008).

Propriedades geométricas, físicas e mecânicas já foram estudadas para o sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro, para colmos inteiros de bambus da espécie *Guadua angustifolia*, para frutos de pinhão-manso, para feijão carioquinha, arroz comercial, milho, amendoim, urucum, café, acerola, caju, mangaba, uva, seriguela e umbu (Coelho et al., 2015; Ghavami e Marinho, 2005; Siqueira et al., 2012; Ribeiro et al., 2002). Para o sistema fruto-ráquila da macaúba já foram determinadas propriedades para o estágio de maturação verde e em diferentes acessos (Villar, 2016). No entanto, pouco ainda se sabe sobre as propriedades geométricas, físicas e mecânicas da macaúba em diferentes estádios de maturação. O conhecimento dessas propriedades servirá de base ao projeto de máquinas desenvolvidas para realizar a derriça dos frutos da macaúba por vibrações mecânicas, que poderá auxiliar, inclusive, no desenvolvimento do processo de colheita seletiva.

Desta forma, objetivou-se com esse trabalho determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba para diferentes acessos nos estádios de maturação verde e maduro.

2. Material e Métodos

Para realizar a pesquisa foram utilizados cachos de macaúbas coletados no Banco de Germoplasma (BAG) da Universidade Federal de Viçosa – UFV, localizado na fazenda experimental em Araponga, Minas Gerais. Os cachos verdes foram coletados em Setembro de 2015 e os maduros em Dezembro de 2015, sendo as palmeiras provenientes dos seguintes acessos: Abaeté, MG (BD27); Pitangui/ Martinho Campos, MG (BD40); Prudente de Moraes/ Matozinhos, MG (BGP29) e Mirandópolis, SP (BGP35). No entanto, para realizar os ensaios de tração para determinação do coeficiente de Poisson no estágio de maturação verde foram usadas amostras dos seguintes acessos: São João Del Rey/ Lavras, MG (BGP53); Três Marias, MG (BGP31); Ibiá/ Araxá, MG (BGP12); e Belo Horizonte, MG (BGP13), conforme disponibilidade no laboratório.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecanização Agrícola, do Departamento de Engenharia Agrícola, da UFV.

Os cachos foram coletados sempre pela manhã e os ensaios realizados em até 24 horas após as coletas, sendo selecionados de forma aleatória em palmeiras também escolhidas aleatoriamente, conforme a disponibilidade no BAG. As amostras usadas para os ensaios de tração foram compostas somente pelas ráquilas cortadas diretamente dos cachos (Figura 1) e as amostras usadas para os ensaios de vibração foram compostas da ráquila com um fruto, também cortadas diretamente dos cachos (Figura 2). Para cada ensaio foram utilizadas dez amostras de cada acesso.



Figura 1: Amostras de ráquilas cortadas dos cachos de macaúba e utilizadas nos ensaios de tração.



Figura 2: Amostras de ráquilas com um fruto cortadas dos cachos de macaúba e utilizadas nos ensaios de vibração.

No ensaio de tração para os diferentes estádios de maturação as ráquilas foram padronizadas com o comprimento de 12 cm. Nos ensaios de

vibração, para cachos com frutos verdes, foram utilizadas amostras com o comprimento de 15 cm para os acessos BD27 e BGP35 e 13 cm para os acessos BD40 e BGP29, enquanto nos ensaios de vibração para cachos maduros os comprimentos foram de 12 cm para o acesso BD40; 13 cm para os acessos BD27 e BGP29; e 15 cm para o acesso BGP35. Esta diferença nos comprimentos utilizados é devida a heterogeneidade do desenvolvimento dos cachos. Nos ensaios de tração, as amostras foram engastadas nas duas extremidades deixando cinco cm livre no terço médio (Figura 3) e nos ensaios de vibração as amostras foram engastadas por dois cm na extremidade oposta dos frutos (Figura 4).

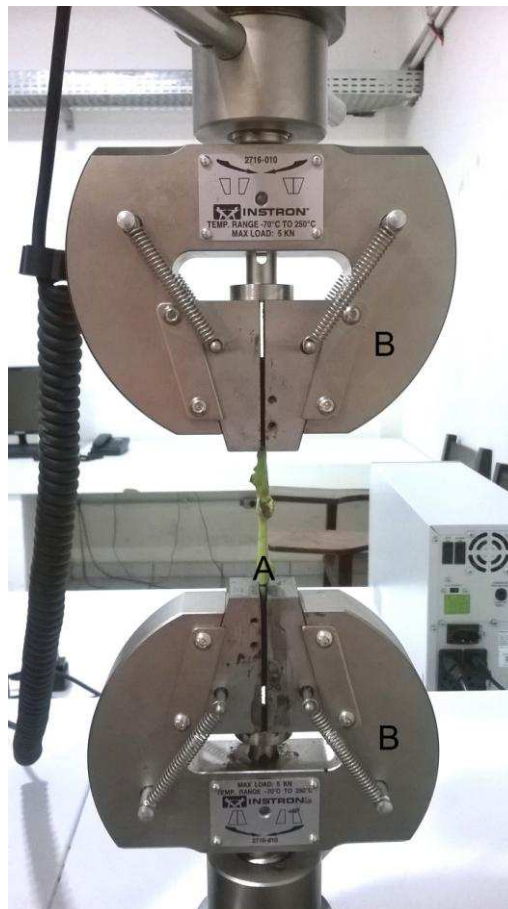


Figura 3: Engaste de uma amostra de ráquila (A) entre as duas garras (B) da máquina de ensaios universal utilizadas para o ensaio de tração com distância livre entre garras de cinco centímetros.

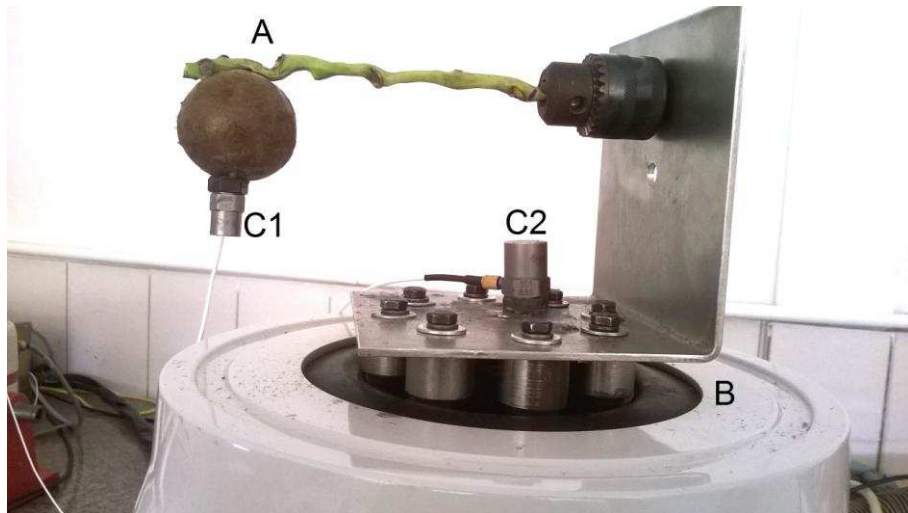


Figura 4: Amostra de ráquila com um fruto (A) engastada em uma das extremidades em um ensaio de vibração utilizando um vibrador eletromagnético (B) e acelerômetros de alta sensibilidade para medir a aceleração do corpo de prova (C1) e controlar o ensaio (C2).

- **Propriedades geométricas**

As dimensões dos diâmetros das ráquilas e frutos foram determinadas por meio de paquímetro digital, marca Mitutoyo, modelo 500-784, com precisão de 0,02 mm. Para medir os diâmetros foram cortadas dos cachos as porções médias das ráquilas com comprimento aproximado de 15 cm, em seguida os diâmetros foram medidos no terço inferior, médio e superior das amostras e tirada as médias. Nos frutos foram medidas suas dimensões características (Figura5). O diâmetro médio dos frutos foi assumido como a média dessas três dimensões.

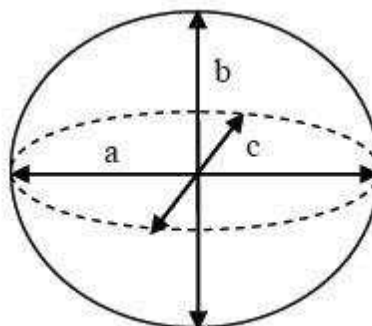


Figura 5: Desenho esquemático do fruto da macaúba, considerando como esferóide tri axial. Em que a, b e c são a maior, a intermediária e a menor dimensão característica do fruto, respectivamente. Fonte: Mohsenin, 1978.

- **Massa do sistema fruto-ráquila**

Para a determinação da massa de cada estrutura dos sistemas fruto-

ráquila amostrados, em cada estágio de maturação, foi empregada uma balança de precisão digital com exatidão de 0,001 g.

- **Volume do sistema fruto-ráquila**

O volume de cada estrutura que compõe o sistema fruto-ráquila foi assumido como o volume deslocado determinado por meio da utilização de uma proveta graduada com graduação mínima de 0,1 mL, na qual os frutos e as ráquias foram imersos em água.

- **Massa específica do sistema fruto-ráquila**

A massa específica de cada estrutura que compõe o sistema fruto-ráquila foi determinada a partir da razão entre a massa e o volume.

- **Módulo de Elasticidade da ráquila**

Para a determinação do Módulo de Elasticidade da ráquila foi empregado uma máquina de ensaio universal da marca Instron, modelo 3365, com capacidade de carga de 5 kN, na qual os corpos de prova, compostos por amostras das ráquias, foram submetidos a uma pré-carga de 2 N seguida por deformações de velocidade constante de 3 mm/min. Uma rotina foi criada no software Bluehill3 para controlar os ensaios. Os corpos de prova tiveram suas geometrias consideradas como cilíndricas com áreas constantes.

Durante os ensaios de tração, os corpos de prova foram tracionados até a sua ruptura e foram extraídos os valores de tensão e deformação específica. A partir desses dados, foram gerados os gráficos de tensão-deformação e calculados os valores do módulo de elasticidade, em sua zona elástica, para cada amostra por meio do método da tangente (Garcia et al., 2012).

- **Coeficiente de Poisson da ráquila**

Para a determinação do coeficiente de Poisson foi empregado uma máquina de ensaio universal da marca Instron, modelo 3365, com capacidade de carga de 5 kN, na qual os corpos de prova, compostos por amostras das ráquias, foram submetidos a uma pré-carga de 2 N seguida por uma deformação de 2 mm em velocidade constante de 3 mm/min. Uma rotina foi criada no software Bluehill3 para controlar os ensaios. Dessa forma, após a deformação longitudinal pré-estabelecida dos corpos de prova foram medidas as deformações ocorridas longitudinal e transversalmente.

As medições das deformações longitudinais foram realizadas de forma direta com auxílio de um paquímetro digital, marca Mitutoyo, modelo 500-784,

com precisão de 0,02 mm. As deformações transversais também foram medidas de forma direta com auxílio de um micrômetro externo, marca Mitutoyo com capacidade de 0-25 mm, graduação de 0,01 mm e exatidão de $\pm 0,002$ mm. Cada ensaio foi realizado até o corpo de prova atingir a deformação longitudinal de aproximadamente 2mm. As deformações transversais foram medidas em três pontos de cada amostra e a deformação longitudinal foi medida na distância entre garras da máquina de ensaios universal.

As variações geométricas longitudinais e transversais ao esforço de tração aplicado aos corpos de prova permitiram a determinação do coeficiente considerando o material utilizado (ráquila) como isotrópico (Equação 1).

$$\nu = -\frac{(\varepsilon_T)}{(\varepsilon_L)} \quad (1)$$

Em que,

ν = coeficiente de Poisson;

ε_T = deformação transversal, mm;

ε_L = deformação longitudinal, mm.

- **Razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila**

Para a determinação da razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila, foi empregado o método do decremento logarítmico, conforme proposto por Rao (1995). Esse método depende da determinação do logaritmo natural da relação entre duas amplitudes sucessivas quaisquer medidas em uma mesma direção (Equação 2).

$$\zeta = \frac{(x_{i+1} - x_i)}{\sqrt{(2\pi)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2}} \quad (2)$$

Em que,

ζ = razão de amortecimento do sistema;

x_i = amplitude de deslocamento no tempo i, mm;

x_{i+1} = amplitude de deslocamento sucessiva a x_i , mm.

As amplitudes foram medidas por meio de acelerômetros de alta sensibilidade (100,7 mv/g(Eu)), marca PCB piezotronics, modelo 352C33. Uma rotina foi elaborada para aquisição dos dados de aceleração no software LabView (National Instruments, 1998). Essa rotina gerenciou um sistema de aquisição de dados marca National Instruments, modelo NI cDAQ-9174, com

quatro canais, que foi utilizado para leitura das medições dos acelerômetros com uma taxa de amostragem de 400 Hz.

Para promover a vibração dos corpos de prova foi empregado um sistema de vibração marca LDS (Ling Dynamic Systems) composto por um sistema de controle de vibração modelo LDS COMET USB, um amplificador modelo PA 1000 L conectado a uma fonte de campo de alimentação modelo FPS 10 L e um vibrador eletromagnético modelo V555, M6-CE. O deslocamento inicial do sistema fruto-ráquila foi realizado a partir de um impulso de onda semi-senoidal gerado a 100% da amplitude de aceleração (cinco vezes a aceleração da gravidade).

As amostras foram fixadas ao vibrador eletromagnético por um aparato criado especificamente para estes ensaios. Os acelerômetros foram fixados na vertical, diretamente nos frutos (Figura 4).

- **Análise Estatística**

Os dados referentes às propriedades geométricas, físicas e mecânicas foram submetidos à análise de variância segundo delineamento inteiramente casualizado.

Para análise da influência do estágio de maturação foi utilizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade, considerando dois tratamentos: estágio de maturação verde e estágio de maturação maduro, e 40 repetições. Os tratamentos foram compostos por um cacho proveniente de cada acesso com 10 repetições em cada cacho.

Para análise da influência dos acessos os dados foram submetidos à análise de estatística descritiva utilizando as médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação – CV.

Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa computacional Assistat, versão 6.2 (Silva e Azevedo, 2002).

3. Resultados e Discussão

- **Propriedades geométricas**

Os diâmetros médios das ráquias e dos frutos não apresentaram modificação na medida em que se evoluiu a maturação do cacho (Tabela 1).

Tabela 1: Valores médios dos diâmetros para a ráquila e fruto, nos estádios de maturação verde e maduro

Estádio de Maturação	Diâmetro Médio (mm)	
	Ráquila	Fruto
Verde	3,74a	41,14a
Maduro	3,74a	40,99a

As médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ao considerar os desvios padrão observados as ráquulas apresentaram diâmetros na faixa de 3,26 a 4,22 mm para o estágio de maturação verde e na faixa de 3,15 a 4,33 mm para o estágio de maturação maduro. E os frutos apresentaram diâmetros na faixa de 38,32 a 43,96 mm para o estágio de maturação verde e na faixa de 39,42 a 42,56 mm para o estágio de maturação maduro (Tabelas 2 e 3). Sabe-se que mudanças nos parâmetros geométricos do sistema podem alterar sua rigidez e, conseqüentemente, a resposta ao comportamento dinâmico do sistema. Portanto, as diferenças geométricas dos frutos e das ráquulas podem influenciar diretamente no processo de colheita por vibrações mecânicas.

Tabela 2: Estatística descritiva para os diâmetros médios das ráquulas e dos frutos, no estágio de maturação verde considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35)

	Diâmetro Médio	
	Ráquila	Fruto
Média (mm)	3,74	41,14
Desvio Padrão (mm)	0,48	2,82
CV (%)	12,94	6,85

CV – coeficiente de variação.

Tabela 3: Estatística descritiva para os diâmetros médios das ráquulas e dos frutos no estágio de maturação maduro considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35)

	Diâmetro Médio	
	Ráquila	Fruto
Média (mm)	3,74	40,99
Desvio Padrão (mm)	0,59	1,57
CV (%)	15,99	3,83

CV – coeficiente de variação.

Os CV encontrados para as ráquillas e para os frutos foram de 12,94 e 6,85 %, respectivamente para o estágio de maturação verde e 15,99 e 3,83 %, respectivamente para o estágio de maturação maduro (Tabelas 2 e 3). Para produtos agrícolas valores de coeficiente de variação abaixo de 10% são considerados baixos, valores entre 10% e 20% são considerados médios, valores entre 20% e 30% são considerados altos e valores maiores que 30% são considerados muito altos (Pimentel Gomes, 1987). Os frutos apresentaram baixos CV entre os acessos para ambos estádios de maturação.

Os valores encontrados no estágio de maturação verde neste trabalho são próximos aos valores encontrados em estudo com ráquillas de macaúba no mesmo estágio de maturação por Villar (2016).

- **Massa, volume e massa específica do sistema fruto-ráquila**

As massas e os volumes das ráquillas e dos frutos não modificaram com a evolução na maturação dos cachos (Tabela 4). Comportamento contrário ao observado para o sistema fruto-pedúnculo do cafeeiro, em que Coelho et al. (2015) verificaram que tanto a massa quanto o volume dos frutos aumentaram conforme evoluiu a maturação da planta de café.

As massas específicas das ráquillas e dos frutos aumentaram conforme a maturação do cacho evoluiu (Tabela 4). Esse comportamento é também observado em outros produtos agrícolas como a cevada, o milho, o sorgo e o trigo que ao diminuir o teor de água, processo que acontece na evolução da maturação, aumentaram suas massas específicas (Brooker et al., 1974; Franceschini et al., 1996).

Tabela 4: Valores médios de Massa, Volume e Massa Específica para a ráquila e fruto, nos estádios de maturação verde e maduro

Estádio de Maturação	Ráquila			Fruto		
	Massa (g)	Volume (cm ³)	ρ (g.cm ⁻³)	Massa (g)	Volume (cm ³)	ρ (g.cm ⁻³)
Verde	2,40a	4,32a	0,54a	40,36a	36,89a	1,10a
Maduro	2,85a	4,57a	0,61b	41,19a	34,72a	1,19b

ρ – massa específica. As médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ao considerar os desvios padrão obtidos as ráquilas apresentaram massas específicas na faixa de 0,43 a 0,67 g.cm⁻³ para o estágio de maturação verde e na faixa de 0,45 a 0,77 g para o estágio de maturação maduro, englobando todos os acessos. E os frutos apresentaram massas específicas na faixa de 0,99 a 1,21 g.cm⁻³ para o estágio de maturação verde e na faixa de 1,12 a 1,26 g.cm⁻³ para o estágio de maturação maduro, englobando todos os acessos (Tabelas 5 e 6)

Tabela 5: Estatística descritiva para as massas, os volumes e as massas específicas das ráquilas e dos frutos no estágio de maturação verde considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35)

	Ráquila			Fruto		
	M_r (g)	V_r (cm³)	ρ_r (g.cm⁻³)	M_f (g)	V_f (cm³)	ρ_f (g.cm⁻³)
M (mm)	2,40	4,32	0,55	40,36	36,89	1,10
S (mm)	0,86	0,83	0,12	7,97	7,52	0,11
CV (%)	35,94	19,26	21,56	19,76	20,40	9,82

M_r - massa média da ráquila; V_r - volume médio da ráquila; ρ_r - massa específica média da ráquila; M_f - massa média do fruto; V_f - volume médio do fruto; ρ_f - massa específica média do fruto; M - média aritmética; S - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Tabela 6: Estatística descritiva para as massas, os volumes e as massas específicas das ráquilas e dos frutos no estágio de maturação maduro considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35)

	Ráquila			Fruto		
	M_r (g)	V_r (cm³)	ρ_r (g.cm⁻³)	M_f (g)	V_f (cm³)	ρ_f (g.cm⁻³)
M (mm)	2,85	4,57	0,61	41,19	34,72	1,19
S (mm)	1,19	1,14	0,16	4,54	4,23	0,07
CV (%)	41,75	24,99	26,02	11,02	12,18	6,36

M_r - massa média da ráquila; V_r - volume médio da ráquila; ρ_r - massa específica média da ráquila; M_f - massa média do fruto; V_f - volume médio do fruto; ρ_f - massa específica média do fruto; M - média aritmética; S - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Os valores de CV observados demonstram que as variações ocorridas nas ráquilas entre os acessos foram de altas a muito altas, já os frutos apresentaram variações baixas a médias. O mesmo comportamento foi

observado para ráquias e frutos no estágio de maturação verde por Villar (2016), em que os frutos apresentaram baixo CV enquanto as ráquias apresentaram CV alto.

A alta heterogeneidade apresentada pela cultura pode auxiliar na determinação de faixas de frequências operacionais das máquinas em um processo de derriça seletiva dos frutos, pois as frequências naturais de um sistema são determinadas a partir da relação entre sua rigidez e sua massa (Rao, 1995). Portanto, alterações nas massas de um sistema alteram diretamente suas frequências naturais.

- **Módulo de Elasticidade e coeficiente de Poisson da ráquila**

O módulo de elasticidade da ráquila diminuiu na medida em que evoluiu o estágio de maturação do cacho (Tabela 7). Essa redução é considerada consequência da evolução na maturação dos frutos que causa um aumento de fragilidade na ráquila para que haja os seus desprendimentos.

Tabela 7: Valores médios do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson para a ráquila; e Coeficiente de Amortecimento e Razão de Amortecimento para o sistema fruto-ráquila, nos estádios de maturação verde e maduro

Estádio de Maturação	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coeficiente de Amortecimento (Ns.m⁻¹)	Razão de Amortecimento	Coeficiente de Poisson
Verde	2,83a	0,81a	0,07a	0,36a
Maduro	2,15b	0,92a	0,09a	0,34a

As médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O módulo de elasticidade foi determinado pelo método da tangente na fração da curva tensão – deformação específica em que se encontra a zona elástica (Figura 6).

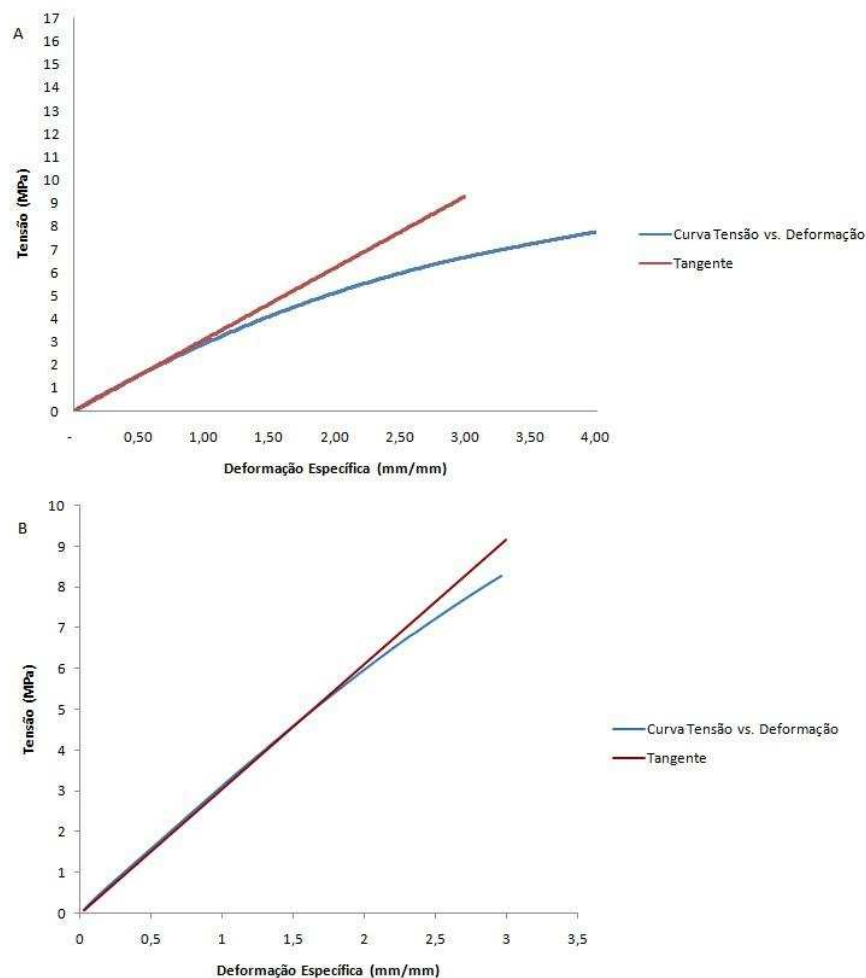


Figura 6: Curva Tensão – Deformação Específica e sua Tangente, obtidas experimentalmente para a ráquila da macaúba nos estádios de maturação verde (A) e maduro (B).

Considerando os desvios padrão obtidos pode-se estabelecer uma faixa de valores para o módulo de elasticidade, que compreende todos os acessos, entre 1,86 e 3,80 MPa para o estágio de maturação verde e entre 1,12 e 3,20 MPa para o estágio de maturação maduro (Tabelas 8 e 9). Os valores para o módulo de elasticidade encontrados estão abaixo de valores encontrados para algumas fibras naturais como a fibra de piaçava (6,2 GPa), a fibra de côco (3 a 6 GPa) e a fibra de sisal (9,4 a 22 GPa) (D’Almeida et al., 2006). Valores do Módulo de Elasticidade para a madeira ficam entre 0,9 GPa e 1,6 GPa (Garcia et al. 2012). Além de tratar-se de plantas com fibras de características diferentes, esses valores podem mudar conforme variam os parâmetros do ensaio, como a velocidade da tração e a deformação específica empregada (Coelho et al., 2015).

Tabela 8: Estatística descritiva para as médias do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para as ráquilas, e coeficiente de amortecimento e razão de amortecimento para o sistema fruto-ráquila no estágio de maturação verde considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35)

	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coeficiente de Amortecimento (Ns.m⁻¹)	Razão de Amortecimento	Coeficiente de Poisson
Média	2,83	0,66	0,06	0,36
S	0,97	0,57	0,05	0,16
CV (%)	34,21	86,01	75,16	43,27

S – desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

Tabela 9: Estatística descritiva para as médias do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para as ráquilas, e coeficiente de amortecimento e razão de amortecimento para o sistema fruto-ráquila no estágio de maturação maduro considerando a média geral de todos os acessos (BD27, BD40, BGP29 e BGP35)

	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coeficiente de Amortecimento (Ns.m⁻¹)	Razão de Amortecimento	Coeficiente de Poisson
Média	2,16	0,64	0,07	0,34
S	1,04	0,35	0,03	0,18
CV (%)	48,07	54,47	50,75	51,90

S – desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

Os valores de CV obtidos para o módulo de elasticidade foram 34,21% e 48,07% para os estádios de maturação verde e maduro, respectivamente (Tabelas 8 e 9). Os valores de CV indicam que há alta variação entre os acessos estudados. Comportamento semelhante foi observado por Villar (2016) ao estudar o sistema fruto-ráquila da macaúba no estágio de maturação verde. Markley (1956) afirma que há grande variação genética na cultura da macaúba, existindo inclusive variações dentro da mesma população. A maturação dos frutos também não é de forma sincronizada o que atenua essas diferenças.

Não foram encontradas diferenças significativas para o coeficiente de Poisson nos estádios de maturação estudados (Tabela 7). Como o sistema foi considerado isotrópico os valores para o coeficiente de Poisson considerados deveriam ficar entre zero e 0,50 (Callister, 2007). Com isso os valores obtidos

que estavam fora desta faixa foram descartados sendo utilizados então 30 valores para o estágio de maturação verde e 25 para o estágio de maturação maduro.

Ao considerar os desvios padrão obtidos, pode-se estabelecer uma faixa de valores para o coeficiente de Poisson, englobando todos os acessos, entre 0,2 e 0,52 para o estágio de maturação verde e entre 0,16 e 0,52 para o estágio de maturação maduro. Para ambos estádios os valores de CV foram considerados muito altos, sendo 43,27% no estágio verde e 51,90% no estágio maduro.

Valores do coeficiente de Poisson para materiais sólidos ficam entre 0,25 e 0,33 (Garcia et al., 2012). O valor do coeficiente de Poisson está associado à força de desprendimento dos frutos, desta forma a variação deste parâmetro pode gerar alterações nas frequências naturais do sistema.

- **Razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila**

A razão de amortecimento e o coeficiente de amortecimento não apresentaram diferenças significativas para a influência do estágio de maturação (Tabela 7). Entretanto, o sistema fruto-ráquila apresentou tendência em aumentar os valores da razão de amortecimento na medida em que evoluiu a maturação dos cachos, o que indica que no estágio de maturação maduro o sistema apresentou maior capacidade de amortecimento quando submetido à excitação.

O cálculo da razão de amortecimento e do coeficiente de amortecimento foi realizado através da relação entre duas amplitudes sucessivas quaisquer retiradas das curvas de decremento logarítmico (Figura 7). Os valores obtidos para a razão de amortecimento e para o coeficiente de amortecimento foram as médias de 32 ensaios válidos para o estágio de maturação verde e 23 ensaios válidos para o estágio de maturação maduro.

Uma faixa para os valores da razão de amortecimento pode ser estabelecida englobando todos os acessos, ao considerar os desvios padrão obtidos, entre 0,01 e 0,11 no estágio de maturação verde e entre 0,04 e 0,10 no estágio de maturação maduro. O mesmo pode ser feito para o coeficiente de amortecimento, ficando no estágio verde entre 0,09 e 1,23 Ns.m^{-1} e no estágio maduro entre 0,29 e 0,99 Ns.m^{-1} . Nota-se que os valores de CV para a razão

de amortecimento e coeficiente de amortecimento foram muito altos: 75,16% e 86,01%, respectivamente para o estágio verde e 50,75% e 54,47%, respectivamente para o estágio maduro (Tabelas 8 e 9). O mesmo comportamento foi observado por Villar (2016) ao estudar o sistema fruto-ráquila da macaúba no estágio de maturação verde.

Os valores observados para a razão de amortecimento foram menores que um caracterizando o sistema fruto-ráquila como subamortecido (Rao, 1995).

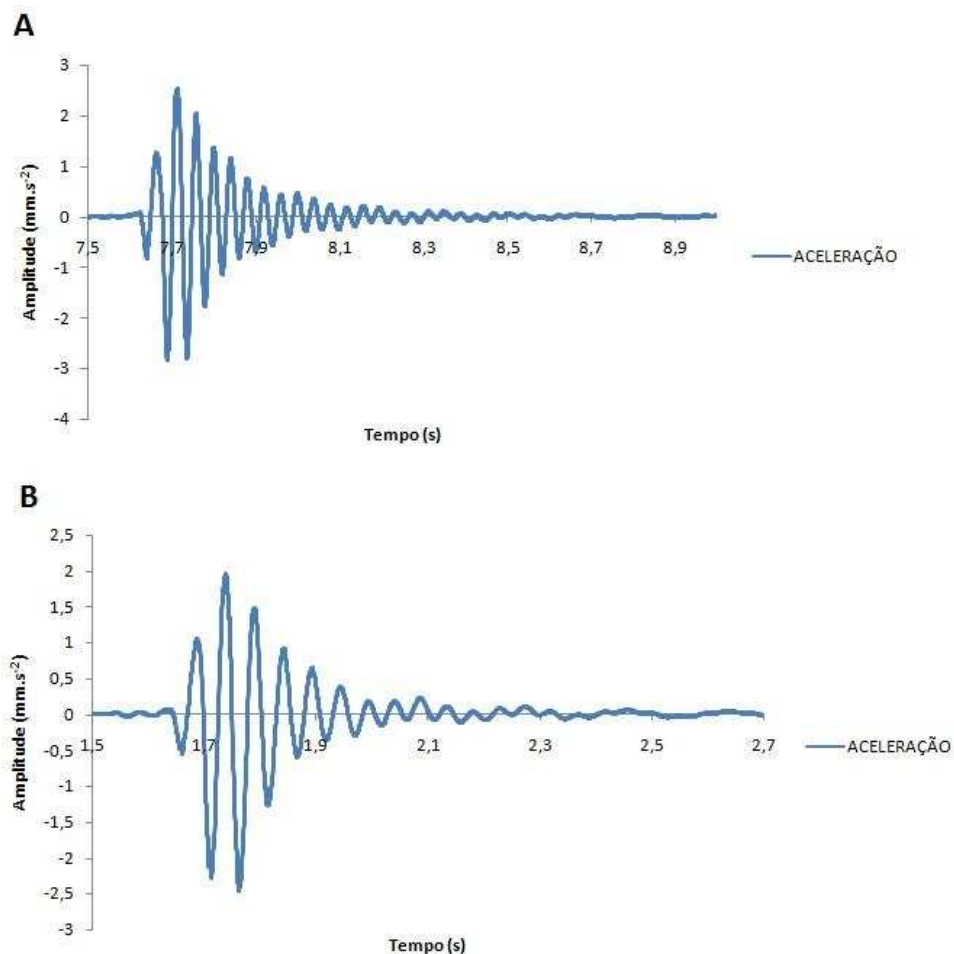


Figura 7: Amplitude da aceleração em função do tempo para o sistema fruto-ráquila da macaúba nos estádios de maturação verde (A) e maduro (B).

4. Conclusões

- As massas específicas do sistema tendem a aumentar conforme evolui a maturação dos frutos.
- O Módulo de Elasticidade obtido para a ráquila ficou entre 1,86 MPa e 3,80 MPa, para o estágio de maturação verde e 1,22 MPa e 3,20 MPa

para o estágio de maturação maduro.

- O coeficiente de Poisson para a ráquila ficou entre 0,2 e 0,52 para o estágio de maturação verde e entre 0,16 e 0,52 para o estágio de maturação maduro.
- A razão de amortecimento encontrada ficou entre 0,01 e 0,11 para o estágio de maturação verde e entre 0,04 e 0,10 para o estágio de maturação maduro.
- O sistema fruto-ráquila foi caracterizado como subamortecido.

5. Referências Bibliográficas

Azevedo Filho, J. A.; Colombo, C. A.; Berton, L. H. C. Macaúba: Palmeira nativa como opção bioenergética. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 9, n. 2, 2012.

Botelho, F. M.; Correa, P. C.; Botelho, S. de C. C.; Vargas-Elías, G. A.; Almeida, M. D. S. D.; Oliveira, G. H. H. de. Propriedades físicas de frutos de café robusta durante a secagem: determinação e modelagem. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 65-75, 2016.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel**, 2004. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel>. Acessado em: maio 2015.

Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, E. W.; Hall, C. W. **Drying cereal grains and their products**. Westport, Connecticut, The AVI Publishing Company, 265 p. 1974.

CALLISTER Jr., W.D. **Materials Science and Engineering**. 7º ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2007.

Carvalho, K. J.; Souza, A. L.; Machado, C. C. **Ecologia, Manejo, Silvicultura e Tecnologia da Macaúba**. UFV. Viçosa, MG. 2011. 25p. Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/d_b_b_15592.pdf. Acessado em: março 2016.

Ciconini, G; Favaro, S.P.; Roscoe, R.; Miranda, C.H.B.; Tapeti, C.F.; Miyahira, M.A.M.; Bbearari, L.; Galvani, F.; Borsato, A.V.; Colnago, L.A.; Naka, M.H. Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Industrial Crops and Products (Print)**, v. 45, p. 208-214, 2013.

Clement, C. R.; Lleras Pérez, E.; Leeuwen, J. O potencial das palmeiras tropicais no Brasil: acertos e fracassos das últimas décadas. **Agrociencia**. Motevideu, v.9, n.1/2, p.67-71, 2005.

Coelho, A. L. de F.; Santos, F.L.; Pinto, F. A. C., Queiroz, D. M de. Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema

fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)**, v. 19, p. 286-292, 2015.

D’Almeida, J. R. M.; Aquino, R. C. M. P.; Monteiro, S. N. Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 37, n. 9, p. 1473-1479, 2006.

Dias, A.; Peça, J.; Santos, L.; Pinheiro, A.; Morais, N. e Pereira, A.G. The influence of mechanical pruning on olive production and shaker efficiency. **Proceedings of the 5th International Symposium on Olive Growing** (in press), 2004, Izmir, Turkiye.

Ferrari, R. A.; Azevedo Filho, J. A. Macauba as promising substrate for crude oil and biodiesel production. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. B, n. 2, p. 1119-1126, 2012.

Ferrari, R. A.; Oliveira, V. da S.; Scabio, A. Biodiesel de soja – taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físicoquímica e consumo em gerador de energia. **Quím. Nova**, v. 28, p. 19-23, 2005.

Franceschini, A. S.; Côrrea, P. C.; Ramos, M. G. Determinação de algumas propriedades físicas do milho híbrido BR-201. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v. 21, nº 1 e 2, p. 22-27, 1996.

Garcia, A.; Spim, J. A.; Santos, C. A. dos. **Ensaio dos Materiais**. Segunda Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365 p.

Ghavami, K.; Marinho, A. B. Propriedades Físicas e Mecânicas do Colmo Inteiro do Bambu da Espécie *Guadua angustifolia*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande -PB, v. 9, n.1, p. 107-114, 2005.

Goneli, A. L. D.; Corrêa, P.C.; Magalhães, F. E. de A.; Baptestini, F. M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**. Maringá, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.

Henderson, A.; Galeano, G.; Bernal, R. Field guide to the palms of the Americas, **Princeton University**, p.166 – 167, 1995.

Leite, R.C.C.; Leal, M. R. L. V. O Biocombustível no Brasil. **Novos Estudos – CEBRAP**. n. 78, p. 15 – 21, Julho, 2007.

Lorenzi, G. M. A. C.; Pimentel, L. D.; Paula, S. R.; Negrelle, R. R. B.; Paes, J. M. V. Prospecção da cadeia produtiva dos frutos da palmeira macaúba no estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário - EPAMIG**. Belo Horizonte, v.32, n.265, p.41-51, 2011.

Markley, K. S. Mobocayá or Paraguay coco palm: an important source of oil. **Economic Botany**, New York, v. 10, n. 1, p. 3-32, 1956.

Melo, James C., Teixeira, J. C.; Brito, J. Z.; Pacheco, J. G.A.; Stragevitch, L. Produção de biodiesel de óleo de oiticica. **XI Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel N/NE**, 2009.

Mohsenin, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. 2. ed. New York, Gordon & Breach Sci. Pub. Inc., 1978, 742 p.

National Instruments. **LabVIEW Graphical Programming for Instrumentation**, Austin, TX, Versão 5.0, 1998.

Nobre, D. A. C.; Trogello, E.; Borghetti, R. A.; David, A. M. S de S. Macaúba: palmeira de extração sustentável para biocombustível. **Colloquium Agrariae**. V. 10, n. 2, p. 92-105, 2014.

Pimentel, L. D.; Bruckner, C. H.; Martinez, H. E. P.; Teixeira, C. M.; Motoike, S. Y.; Pedroso Neto, J. C. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo de macaúba: 1º aproximação. **Informe Agropecuário - EPAMIG**, v.32, n.265, p.20-30, nov/dez. Belo horizonte, MG. 2011.

Polat, R.; Gezer, I.; Guner, M.; Dursun, E.; Erdogan, D.; Bilim, H. C. Mechanical harvesting of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.1131-1135, 2007.

Produção Nacional de Biodiesel Puro – B100. **Agência Nacional do Petróleo**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?dw=8740>. Acessado em: maio 2016.

Rao, S. S. **Mechanical Vibrations**. Third edition. New York, EUA. Addison-Wesley Publishing Company, 1995. 912p.

Ribeiro V. S.; Sobral, M. C.; Almeida, M. M.; Silva, G. F. Propriedades físicas de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.1, p.1-6, 2002.

Rubio Neto, A.; Silva, F. G.; Sales, J. de F.; Reis, E. F. dos; Silva, L. Q.; Campos, R. C. Dormancy breaking in macaw palm [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Loddiges ex Mart.] seeds. **Acta Scientiarum. Agronomy**. V. 36, n. 1, p. 43-50, 2014.

Santos, F. L.; Queiroz, D. M.; Santos, N. T. ; Pinto, F. A. C. Avaliação da eficiência de derricha dos frutos do cafeeiro cultivar Catuaí Vermelho por vibrações mecânicas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 11, p. 24-29, 2009.

Santos, F. L.; Queiroz, D. M.; Valente, D. S. M. ; Coelho, A. L. F. . Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum**. v. 37, p. 11-17, 2015.

Scariot, A. O.; Lleras, E.; Hay, J. D. Reproductive biology of the palm *Acrocomia aculeata* in Central Brasil. **Biotropica**, v.23, n.1, p.12-22, 1991.

Silva, F. de A. S. e. & Azevedo, C. A. V. de. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4,n.1, p71-78,2002. URL <http://www.assistat.com/>.

Silva, J. S. & P. C. Corrêa. **Estrutura, composição e propriedades dos grãos. Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. 2ª. ed. Viçosa:[sn], Cap, v. 2, 2008.

Siqueira, V. C.; Resende, O.; Chaves, T. H. Propriedades físicas dos frutos de pinhão-mansão durante a secagem. **Global Science and Technology**. v. 05, p.83 – 92, Rio Verde, 2012.

Srivastava, A. K.; Goering, C. E.; Rohrbach, R. P. **Engineering principles of agricultural machines**. Michigan: ASAE. 1996. 601p.

Teixeira, C. M. & Morales, M. E. Microalga como matéria-prima para a produção de biodiesel. **Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel: artigos técnicos científicos**. Vol. 1, p. 91 – 96, 2006.

Tominaga, N. **Cultivo de pinhão-mansão para produção de biodiesel**. Centro de Produções Técnicas. Viçosa, MG, 2007.

Veronesi, C. O.; Souza, C.M.; Serra, A.P.; Rafull, L. Z.; Silva, C. J.; Ros, V.V. Viabilidade econômica do processo mecanizado de colheita e beneficiamento de sementes de pinhão manso em diferentes estádios de maturação. **Semina. Ciências Agrárias (Impresso)**, v. 33, p. 2047-2056, 2012.

Villar, F. M. de M. **Propriedades físicas, geométricas, mecânicas e modais do sistema fruto-ráquila da macaúba**. Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa. 2016. 87 p. Tese de doutorado.

Capítulo II: Comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba

Comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba

RESUMO

A macaúba é uma palmeira de ampla distribuição geográfica. No Brasil sua principal incidência é no Cerrado e no Pantanal. Em Minas Gerais, o principal uso da macaúba é para obtenção de óleo da polpa e da amêndoa para biodiesel, higiene e limpeza, cosmético e alimentício. Neste trabalho objetivou-se analisar o comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba submetido às vibrações mecânicas. Os modelos tridimensionais foram elaborados no programa computacional SolidWorks, versão 2012. O software Ansys Mechanical APDL, versão 14.5, foi utilizado para determinar e simular o comportamento dinâmico dos sistemas. O modelo tridimensional desenvolvido e implementado foi validado em função dos deslocamentos reais observados durante os ensaios de vibração laboratoriais. Os valores médios encontrados para as frequências naturais nos ensaios de vibração foram de 20,09 Hz para o estágio de maturação verde e 19,86 Hz para o estágio de maturação maduro. Os valores médios de frequências naturais extraídas nas simulações foram de 23,61 Hz e 21,65 Hz para os estádios de maturação verde e maduro, respectivamente. Os valores das frequências naturais foram menores para o estágio de maturação maduro que para o estágio de maturação verde. O modo de vibração extraído foi o oitavo modo. As tensões de von Mises ficaram concentradas na ligação entre a ráquila e o fruto.

Palavras-chave: Método dos elementos finitos, palmeira, frequências naturais, von Mises.

Dynamic behavior of the fruit system - rachilla macaúba

ABSTRACT

The macaúba is a palm tree widely distributed. In Brazil, its main focus is in the Cerrado and the Pantanal. In Minas Gerais the main use of macaúba is to obtain oil from the pulp and almond for biodiesel, hygiene and cleaning, cosmetic and food. This work aimed to analyze the dynamic behavior of fruit - rachilla system subjected to mechanical vibrations. Three-dimensional models were made from the computer program SolidWorks, version 2012. The Ansys Mechanical APDL software, version 14.5, was used to simulate the dynamic behavior of systems. The developed and implemented three-dimensional model was validated on actual displacements observed during laboratory vibration tests. The average values for the natural frequencies in the vibration tests were 20.09 Hz for the green maturity stage and 19.86 Hz for the ripe stage. The average values of natural frequencies extracted in the simulations were 23.61 Hz and 21.65 Hz for the green and ripe maturation stages, respectively. The values of the natural frequencies were lower for the ripe stage than for the green maturity stage. The extracted vibration mode is the third mode. Tensions von Mises were concentrated on the link between rachilla and fruit.

Key words: Finite element method, palm, natural frequencies, von Mises.

1. Introdução

A macaúba é uma palmeira de ampla distribuição geográfica, estendendo-se por toda América tropical e subtropical com exceção do Equador e Peru (Hederson et al., 1995). No Brasil, sua principal incidência é no Cerrado e no Pantanal, existindo cerca de 11,5 milhões de hectares da cultura nativos, com densidade aproximada de 200 plantas por hectare (Ciconini et al., 2013).

As plantas da espécie são robustas, seu tronco apresenta diâmetros de 20 cm a 40 cm e podem chegar a 20 m de altura. As folhas são verdes escuras, pinadas, apresentando de quatro a cinco metros de comprimento e recobertas de espinhos. As inflorescências são amareladas e agrupadas em cachos, protegidas por uma espata. A floração ocorre entre setembro e fevereiro. Os frutos são esféricos e também dispostos em cachos. A frutificação ocorre durante todo o ano e o amadurecimento dos frutos ocorre, principalmente, de setembro a fevereiro. As variações ocorridas nas características da espécie são provenientes da diferença entre as regiões de ocorrência da planta (Scariot et al., 1991; Ciconini et al., 2013).

Em Minas Gerais, o principal uso da macaúba é para obtenção de óleo da polpa e da amêndoa para produção de biodiesel e produtos de higiene, limpeza, cosmético e alimentício. No estado de Mato Grosso do Sul, a macaúba é processada para obtenção de farinha e de polpa para sucos e sorvetes. De acordo com estimativas propostas por Roscoe et al. (2007), essa oleaginosa pode produzir cerca de 4.500 litros de óleo por ha/ano, porém esta produção pode apresentar grandes variações dada ao material genético e a densidade de palmeiras na área, bem como a fertilidade do solo, inclusive podendo ocorrer essa variação entre plantas de uma mesma região (Ciconini et al., 2013).

A exploração da macaúba tem como base o extrativismo, consistindo na coleta dos cocos caídos das palmeiras. Cada planta de macaúba produz, geralmente, de 3 a 4 cachos. O ponto de colheita é determinado quando os frutos começam a se desprender dos cachos, o que indica que todo o cacho já possui maturidade suficiente para o processamento. Os frutos podem ser

colhidos empregando-se foices para o corte dos cachos ou podem ser coletados diretamente no chão (Carvalho et al., 2011).

Para melhorar a qualidade dos frutos e a eficiência na colheita, torna-se necessário estudar diferentes opções para a colheita. Uma das alternativas é o uso de máquinas que utilizam o princípio de vibrações mecânicas. O princípio de vibrações mecânicas tem sido aplicado às diversas culturas, como azeitonas (Dias et al. 2004), café (Santos et al., 2009) e pinhão manso (Ros, 2010).

A vibração de um sistema baseia-se em transferir sua energia cinética para energia potencial, e a energia potencial para a energia cinética. O sistema vibratório é um sistema dinâmico em que suas variáveis de entrada e saída dependem do tempo. Esses sistemas são, em sua maioria, complexos, tornando impossível considerar todos os detalhes em uma análise matemática. Dessa forma, faz-se necessário simplificar os modelos utilizados considerando apenas as principais características. Assim, a análise de um sistema vibratório pode ser feita a partir de modelagem matemática, a qual consiste na obtenção de equações governantes, solução das equações e interpretação dos resultados (Rao, 1995).

A modelagem matemática tem a finalidade de representar os aspectos importantes de um sistema físico real de forma a obter as equações que regem esse sistema sem, no entanto, torná-lo muito complexo. A partir de um modelo, derivam-se as equações que descrevem a vibração do sistema. As soluções dessas equações resultarão nas respostas do sistema vibratório fornecendo os deslocamentos, velocidades e acelerações das várias partes do sistema. Vários são os métodos utilizados para determinar as resoluções das derivadas: métodos padronizados, métodos que utilizam transformadas de Laplace, métodos matriciais e métodos numéricos (Rao, 1995).

Dentre os métodos numéricos empregados na análise de sistemas dinâmicos, destaca-se o método de elementos finito que é comumente usado para análise de problemas multi-físicos e viabiliza sua aplicação à solução de modelos matemáticos de sistemas físicos por meio de simulações com grande grau de confiabilidade (Santos et al., 2015).

Seeger (1984) define o método de elementos finitos (MEF) como um procedimento numérico para obter as soluções de equações que regem alguns

problemas encontrados em variadas áreas da engenharia. A larga utilização do MEF deve-se ao fato de poder ser aplicado, além dos problemas clássicos da mecânica estrutural elástico-linear, também para problemas tais como mecânicas dos fluidos, eletromagnetismo, transferência de calor, campo elétrico, acústica dentre outros (Caporrino, 2007). O MEF tem sido utilizado em vários tipos de análises, em diversas áreas da engenharia, tais como análise de escoamentos turbulentos (Petry, 2002), estudo de levitação magnética (Costa, 2005; Valle et al., 2012), análise térmica e econômica da produção de cimento (Paula, 2009) e modelagem do comportamento dinâmico de produtos agrícolas como o café e a macaúba (Coelho et al. 2016; Villar, 2016).

A análise modal estuda as propriedades dinâmicas de sistemas mecânicos (que variam com o decorrer do tempo) que estão submetidas a um tipo de excitação por vibrações. As propriedades dinâmicas incluem as frequências naturais e os modos de vibração, que por sua vez dependem da massa, da rigidez e do tipo de amortecimento do sistema, e determinam o comportamento de vibração estrutural. Essa análise nos permite entender como uma estrutura vibra, correlacionar e atualizar modelos de simulação e acelerar cálculos estruturais e de manutenção (Rao, 1995).

Na análise modal a resposta estrutural é medida em locais bem definidos enquanto o sistema sofre uma excitação externa com valores de frequências conhecidos. As frequências ressonantes aparecerão como pico de frequências nas respostas de vibração (Rao, 1995). A análise modal de sistemas mecânicos pode ser feita experimentalmente ou a partir de modelos matemáticos (computacional). A análise computacional baseia-se na resolução de problemas de autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração), sendo método de elementos finitos comumente empregado para a abordagem de problemas de domínio geométrico complexo.

A análise modal computacional de um sistema mecânico depende de uma série de propriedades mecânicas, as quais são empregadas como parâmetros de entrada da análise. Essas propriedades mecânicas são: Coeficiente de Poisson, Módulo de Elasticidade e Massa Específica. O Coeficiente de Poisson mede a relação da deformação perpendicular e longitudinal na direção em que se aplica uma força uniaxial e é determinado pelo quociente das deformações ocorridas no corpo de prova. O Módulo de

Elasticidade fornece uma indicação da rigidez do material e pode ser diretamente medido na curva tensão-deformação, adquirida a partir de um ensaio de tração. A Massa Específica é uma característica própria de cada material e é medida pelo quociente da massa pelo volume do corpo de prova (Garcia et al., 2012).

A validação dos resultados advindos de simulações computacionais é realizada com base no contraste das respostas dos modelos matemáticos a dados experimentais. Assim, pode-se obter um modelo que possibilite o estudo de sistemas mecânicos. Contudo, os modelos podem ser sensíveis a variação de determinadas propriedades, fazendo-se necessário o estudo da variação da resposta do modelo em relação à variação dos parâmetros de entrada. Tal estudo caracteriza a análise de sensibilidade do modelo.

Na análise de sensibilidade são feitas estimativas positivas e negativas sobre um grupo de variáveis que podem influenciar na resposta de retorno. Desta forma, devem-se identificar as variáveis críticas do projeto e fazer flutuar uma variável de cada vez, mantendo os outros parâmetros constantes e observando a variação que ocorre na resposta. A importância deste tipo de análise está em poder prever o comportamento de um sistema como todo variando suas partes (Helfert, 1997).

Objetivou-se nesse trabalho determinar as propriedades modais, frequências naturais e modos de vibração do sistema fruto-ráquila da macaúba; analisar o comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila submetido à vibrações mecânicas; e validar os modelos desenvolvidos a partir de ensaios de vibração para os estádios de maturação verde e maduro e para quatro acessos diferentes.

2. Material e Métodos

Para realizar a pesquisa foram utilizados cachos de macaúba coletados no Banco de Germoplasma (BAG) da Universidade Federal de Viçosa – UFV, localizado na fazenda experimental em Araponga, Minas Gerais. Os cachos verdes foram coletados em Setembro de 2015 e os maduros em Dezembro de 2015, sendo as palmeiras provenientes dos seguintes acessos: Abaeté, MG (BD27); Pitangui/ Martinho Campos, MG (BD40); Prudente de Moraes/

Matozinhos, MG (BGP29) e Mirandópolis, SP (BGP35). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecanização Agrícola, do Departamento de Engenharia Agrícola, da UFV.

Os cachos foram coletados sempre pela manhã e os ensaios realizados em até 24 horas após as coletas. Sua coleta foi realizada de forma aleatória em palmeiras também escolhidas aleatoriamente, conforme a disponibilidade no BAG. As amostras usadas para o ensaio de vibração foram compostas da ráquila com um fruto cortadas diretamente dos cachos (Figura 8). Para cada ensaio foram utilizadas dez amostras de cada acesso.



Figura 8: Amostras de ráquilas com um fruto cortadas dos cachos de macaúba e utilizadas nos ensaios de vibração.

Nos ensaios de vibração para cachos com frutos verdes foram utilizados corpos de prova com o comprimento de 15 cm para os acessos BD27 e BGP35 e 13 cm para os acessos BD40 e BGP29, enquanto nos ensaios de vibração para cachos maduros os comprimentos foram de 12 cm para o acesso BD40; 13 cm para os acessos BD27 e BGP29; e 15 cm para o acesso BGP35. Esta diferença nos comprimentos utilizados é devida a heterogeneidade do desenvolvimento dos cachos. Os corpos de prova foram engastadas por 2 cm na extremidade oposta dos frutos e os acelerômetros foram afixados diretamente nos frutos no sentido da vibração (Figura 9). Os acelerômetros utilizados são uniaxiais, por esse motivo os corpos de prova foram feitos apenas com um fruto. A presença de mais frutos poderia influenciar no sentido da vibração, além de criar um peso extra na ráquila, o que prejudicaria o ensaio.

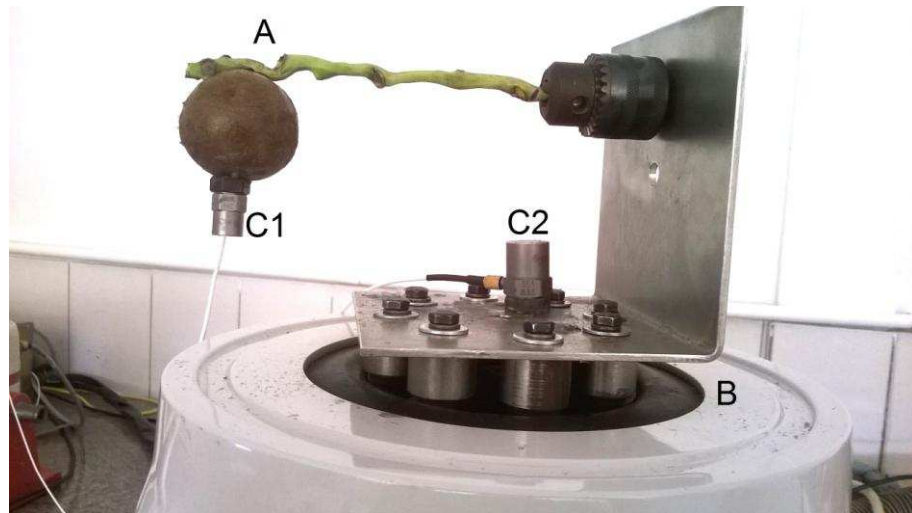


Figura 9: Amostra de ráquila com um fruto (A) engastada em uma das extremidades em um ensaio de vibração utilizando um vibrador eletromagnético (B) e acelerômetros de alta sensibilidade para medir a aceleração do corpo de prova (C1) e controlar o ensaio (C2).

- **Modelagem matemática do sistema fruto-ráquila**

As propriedades geométricas e físicas do sistema foram utilizadas como parâmetros de entrada para a modelagem e simulação computacional do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila. Os modelos tridimensionais foram elaborados a partir do programa computacional SolidWorks, versão 2012, em que as características geométricas foram empregadas para elaboração dos modelos virtuais dos sistemas. Para simplificar as simulações, o modelo utilizado foi constituído por uma haste cilíndrica engastada em uma das extremidades. Um esferóide com três diâmetros distintos foi utilizado para representar o fruto e anexado a um quarto da extremidade livre. Para anexar o esferóide à haste foi utilizada uma estrutura cônica (Figura 10).

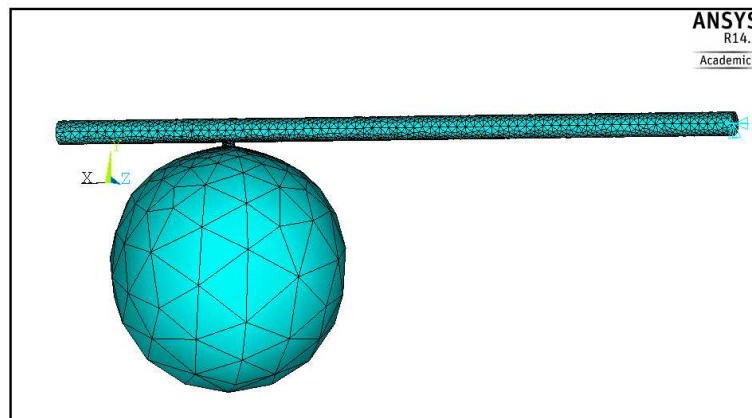


Figura 10: Modelo do sistema fruto-ráquila da macaúba com a malha utilizada e as condições de contorno (engastamento).

O software Ansys Mechanical APDL, versão 14.5, foi usado para realizar a análise por elementos finitos e para determinar e simular o comportamento dinâmico dos sistemas. Tal plataforma permitiu a discretização dos sistemas (a partir da geração de malhas não estruturadas para domínios tridimensionais, a partir de elementos tetraédricos), equacionamento e solução, bem como a posterior análise dos resultados numéricos (a partir de gráficos, diagramas e animações).

A escolha da malha a ser utilizada foi feita a partir de uma pré-simulação, onde se levou em consideração o número de elementos, sendo possível escolher uma malha que permitiu representar o sistema físico real com menor custo computacional (Figura 11).

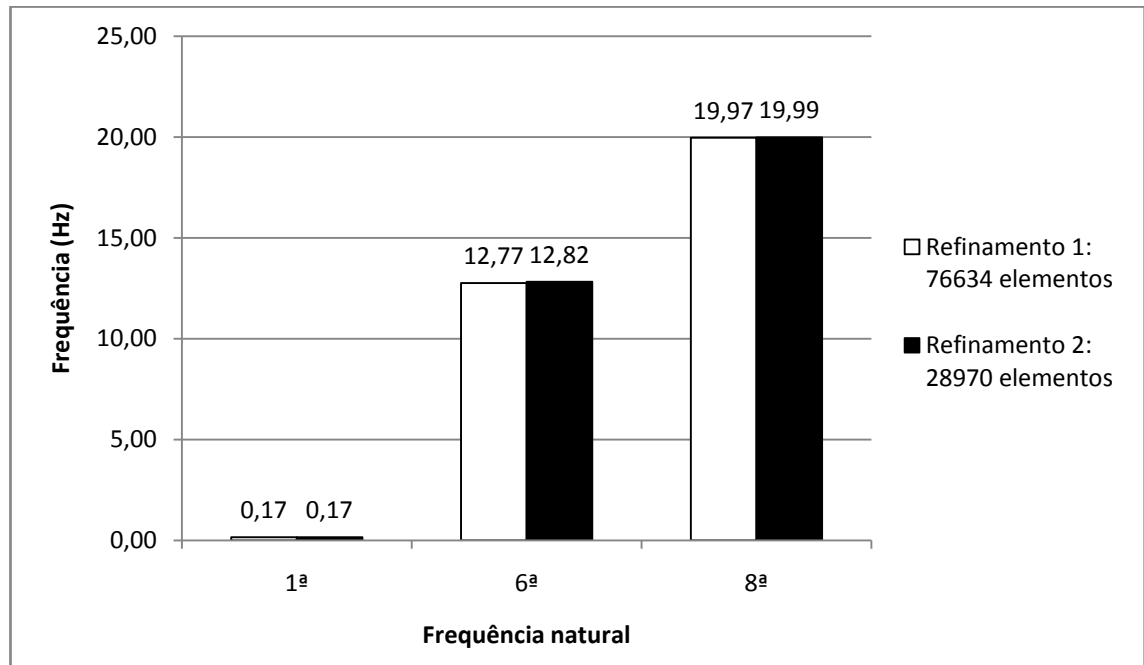


Figura 11: Comparação das 1ª, 6ª e 8ª frequências naturais do sistema frutô-ráquila simulado empregando dois refinamentos de malhas utilizadas em elementos finitos.

Os refinamentos 1 e 2 resultaram em uma geometria discretizada composta por 76634 e 28970 elementos tetraédricos e um tempo de processamento total de 29,412 e 9,533 segundos, respectivamente. As diferenças percentuais para a primeira, sexta e oitava frequências naturais, empregando o refinamento 2 em comparação ao refinamento 1, foram de 0,04; 0,43 e 0,11 %, respectivamente, com uma diminuição de 108,53 % no tempo de processamento. Desta forma, empregou-se elementos com dimensões referentes ao refinamento 2.

Para as simulações foram usados elementos tetraédricos de dez nós. Este elemento é caracterizado por funções de interpolação quadráticas, o que faz com que o elemento represente melhor as arestas e reduza o custo operacional. Os modelos foram considerados estruturais, lineares, elásticos e isotrópicos nas simulações.

Logo, a partir dos modelos foi possível estudar a resposta dinâmica dos sistemas fruto-ráquila da macaúba quando submetidos a vibrações mecânicas, considerando diferentes cenários.

- **Determinação das frequências naturais e modos de vibração**

As propriedades modais do sistema fruto-ráquila foram obtidas com base nos modelos desenvolvidos. As frequências naturais do sistema fruto-ráquila (autovalores), bem como os respectivos modos de vibração (autovetores) foram obtidos a partir da formulação e solução dos problemas de autovalor e autovetor.

Para modelar a vibração livre não amortecida foram considerados sistemas com múltiplos graus de liberdade, representados por sistemas de equações diferenciais, que podem ser expressos na forma matricial (Equação 3).

$$[M].\{\ddot{v}\} + [K].\{v\} = \{0\} \quad (3)$$

Em que,

[M] = matriz de massa, kg;

{ \ddot{v} } = vetor aceleração, m/s²;

[K] = matriz de rigidez, N/m;

{v} = vetor deslocamento, m.

A determinação dos autovalores foi obtida assumindo que as vibrações livres sejam harmônicas (Equação 4).

$$\{v\} = \{\varphi_i\}. \cos(\omega_i. t) \quad (4)$$

Em que,

{ φ_i } = representa o autovetor associado a i-ésima frequência natural do sistema;

ω_i = frequência angular, rad/s;

t = tempo, s.

A Equação 4 foi derivada com relação ao tempo e substituída em (3), obtendo-se a Equação 5, a qual possibilitou a determinação das frequências

naturais (autovalores) e modos de vibração (autovetores).

$$(-\omega^2 \cdot [M] + [K]) \cdot \{\varphi_i\} = \{0\} \quad (5)$$

Dessa maneira, igualando-se o determinante da matriz $(-\omega^2 [M] + [K])$ a zero, pôde-se obter as frequências naturais do sistema (Zienkiewicz et al., 2005; Boyce e DiPrima, 2002; Reddy, 1993; Hoffman, 1992).

O cálculo dos autovalores e autovetores foi feito pelo método numérico de Block Lanczos, o qual é aplicável a diversos problemas de engenharia, quando se tem a combinação de elementos sólidos, permitindo a extração de um número elevado de modos de vibração, com uma taxa de convergência rápida e relativa necessidade de memória.

O algoritmo de Block Lanczos é uma variação clássica do algoritmo de Lanczos, em que as recursões do modelo são desenvolvidas utilizando um bloco de vetores ao invés de um vetor simples. Este método emprega uma estratégia automatizada de troca combinada com a checagem de seqüência de Sturm, para extrair o número de autovalores requisitados (ANSYS Inc., 1996).

- **Validação do Modelo em Elementos Finitos**

O modelo tridimensional desenvolvido e implementado foi validado em função dos deslocamentos reais observados durante os ensaios de vibração laboratoriais. Para promover a vibração dos corpos de prova foi empregado um sistema de vibração marca LDS (Ling Dynamic Systems) composto por um sistema de controle de vibração modelo LDS COMET USB, um amplificador modelo PA 1000 L conectado a uma fonte de campo de alimentação modelo FPS 10 L e um vibrador eletromagnético modelo V555, M6-CE.

Nesses ensaios os corpos de prova foram submetidos à uma varredura de frequências na faixa de 10 Hz a 40 Hz, taxa de varredura de 1,5 oitavas/min. deslocamento de 1mm de pico a pico e duração de 90 segundos, permitindo que as amostras passassem pelas suas frequências ressonantes. As amplitudes foram medidas por meio de acelerômetros de alta sensibilidade (100,7 mv/g(Eu)), marca PCB piezotronics, modelo 352C33.

Uma rotina foi elaborada para aquisição dos dados de aceleração no software LabView (National Instruments, 1998). Esta rotina gerenciou um sistema de aquisição de dados marca National Instruments, modelo NI cDAQ-9174, com quatro canais, que foi utilizado para leitura das medições dos acelerômetros com uma taxa de amostragem de 400 Hz.

Os resultados foram processados no software MATLAB®, versão R2009b, onde foi elaborada uma rotina para passar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform– FFT). Desta forma, com base nos espectros de frequência foi possível determinar as frequências naturais experimentais e compará-las aos valores obtidos a partir da simulação. As frequências naturais experimentais foram identificadas nos espectros de frequência a partir da acentuada variação na amplitude de vibração em uma determinada frequência de excitação (Figura 12).

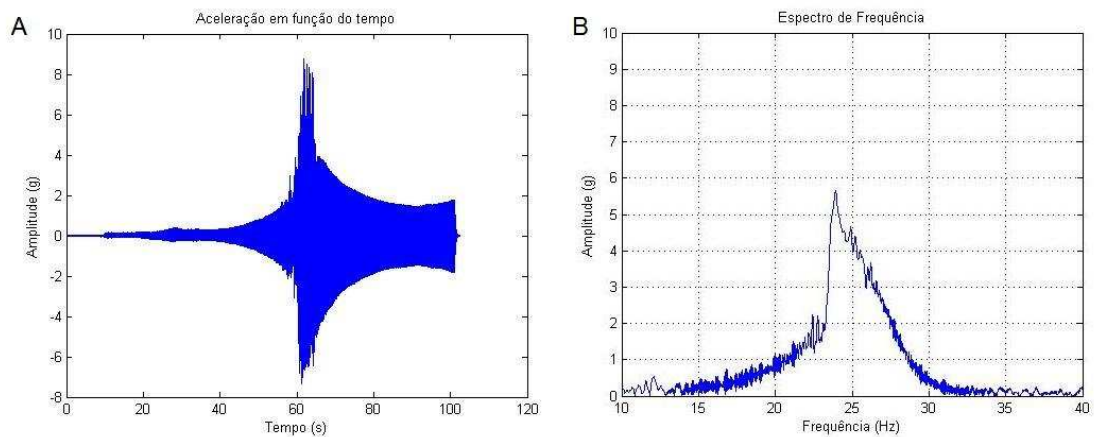


Figura 12: Dados de amplitude no domínio do tempo (A) e no domínio da frequência – Espectro de Frequência após a Transformada Rápida de Fourier(B).

- **Análise de Tensões de um Sistema**

Segundo Rao (1995), quando forças externas atuam em sistemas de um ou múltiplos graus de liberdade, este sistema encontra-se sob o regime de vibrações forçadas. Desta forma, para o estudo do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila sob a ação de forças externas, foi realizada uma análise para a determinação da resposta do mesmo ao longo do tempo, por meio da integração numérica das equações diferenciais do sistema fruto-ráquila.

A Equação 6 representa a equação de movimento para um elemento genérico (e).

$$[M].\{\ddot{v}\}^{(e)} + [C].\{\dot{v}\}^{(e)} + [K].v^{(e)} = \{F(t)\}^{(e)} \quad (6)$$

Em que,

$\{v\}^{(e)}$ = vetor deslocamento composto por $u^{(x,y,z)}$, $s^{(x,y,z)}$ e $w^{(x,y,z)}$;

$\{\ddot{v}\}^{(e)}$ e $\{\dot{v}\}^{(e)}$ = vetor aceleração e velocidade;

$\{C\}^{(e)}$ = matriz de amortecimento para o elemento (e);

$\{F(t)\}^{(e)}$ = vetor força agindo sobre o elemento (e).

Para resolver a Equação 6 foi utilizada integração numérica em relação ao tempo possibilitando a resolução do sistema de equações diferenciais acopladas. Para tal foi empregado o método de Newmark.

Com base no modelo matemático o procedimento de colheita dos frutos foi analisado a partir do cálculo das tensões normais e tensões de cisalhamento, aos quais os sistemas fruto-ráquila encontram-se submetidos durante o processo de vibrações forçadas. A realização da análise de tensões possibilitou uma melhor compreensão dos aspectos físicos que regem a dinâmica do sistema quando submetido a vibrações mecânicas.

A partir da obtenção dos deslocamentos nodais foram calculadas as tensões normais e de cisalhamento, ao qual o sistema fruto-ráquila encontra-se sujeito, considerando a Teoria da Elasticidade Linear, conforme a Equação 7.

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy} \cdot \sigma_{zz} \cdot \sigma_{xy} \cdot \sigma_{xz} \cdot \sigma_{yz}\} \quad (7)$$

Em que,

σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} = tensões normais, MPa;

σ_{xy} , σ_{xz} e σ_{yz} = tensões de cisalhamento, MPa.

O vetor de deformações elásticas $\{\varepsilon\}$, representado pela Equação 8, foi obtido empregando-se os deslocamentos nodais calculados pelo modelo matemático em elementos finitos (Huebner et al., 2001).

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_{xx} \cdot \varepsilon_{yy} \cdot \varepsilon_{zz} \cdot \varepsilon_{xy} \cdot \varepsilon_{xz} \cdot \varepsilon_{yz}\} \quad (8)$$

Em que,

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial s}{\partial y} \quad \text{e} \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z};$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial s}{\partial x}, \quad \varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{e} \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\partial s}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y};$$

Para determinar as tensões em que o sistema foi submetido foi empregada a Equação 9, a qual utiliza a lei generalizada de Hooke e considera o sistema como isotrópico.

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} \quad (9)$$

Em que,

[D] = matriz módulo, composta por informações referentes ao módulo de elasticidade e ao coeficiente de Poisson do sistema.

A tensão de von Mises, resultante de todas as tensões normais e

cisalhamento que agem em um ponto do corpo, será calculada a partir de da Equação 10.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}{2}} \quad (10)$$

Em que,

σ_{VM} = tensão de von Mises, MPa.

Para proceder à análise de distribuição de tensões foram feitas análises harmônicas para o estágio de maturação verde e maduro. Os modelos foram submetidos a uma carga pontual acima do fruto (Figura 13) nos valores de 3,85 N e 1,47 N para os estádios de maturação verde e maduro, respectivamente.

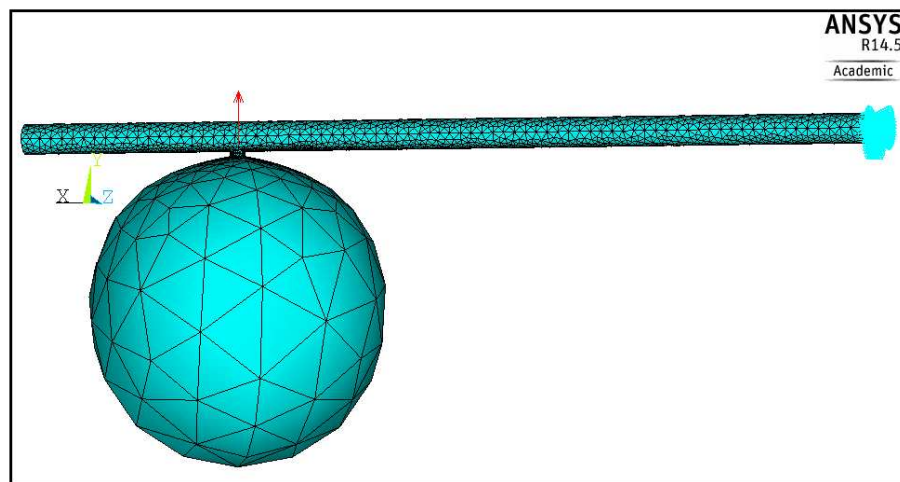


Figura 13: Modelo do sistema fruto-ráquila da macaúba com a malha utilizada e as condições de contorno (engastamento) sob o carregamento de uma força harmônica.

As análises harmônicas foram realizadas a partir de uma varredura de frequências indo de 15 Hz a 25 Hz. Este intervalo foi subdividido em 20 partes. A resposta do sistema segundo a tensão de von Mises foi determinada na frequência de 20 Hz, que foi a frequência média encontrada nos ensaios de vibração.

A força harmônica aplicada foi determinado a partir da Equação 11.

$$F = F_o \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (11)$$

Em que,

F = força harmônica aplicada, N;

F_o = amplitude da força harmônica, N;

ω = aceleração angular, Hz;

t = tempo, s.

Os parâmetros utilizados na determinação da amplitude da força harmônica aplicada foram a massa total do sistema, calculada a partir da soma das massas médias dos frutos e das ráquias, e a aceleração crítica, que corresponde a maior aceleração encontrada no ponto de ressonância, nos ensaios de vibração, para cada estágio de maturação. Os valores estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10: Valores para os parâmetros utilizados na determinação da força aplicada ao modelo

	Verde	Maduro
Massa média do fruto (g)	36,89	34,72
Massa média da ráquia (g)	2,40	2,85
Aceleração crítica (m.s⁻¹)	98,10	39,24

- **Análise de Sensibilidade**

Na análise de sensibilidade, os parâmetros de entrada foram variados em mais e menos 30% do seu valor. Os parâmetros foram variados um a um e foram verificados os valores de frequências naturais extraídos pela simulação. Primeiro foi variado o Coeficiente de Poisson, depois o Módulo de Elasticidade e por fim a Massa Específica. O valor de 30% foi obtido a partir do espectro de frequência de forma a gerar diferenças que ultrapassassem a região de ressonância do sistema fruto-ráquia da macaúba.

- **Análise Estatística**

Os dados referentes às frequências naturais nos estádios de maturação verde e maduro e nas diferentes acessos foram submetidos à análise de variância segundo delineamento inteiramente casualizado. Para análise da diferença entre dados experimentais e simulados foi utilizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa computacional Assistat, versão 6.2 (Silva e Azevedo, 2002).

3. Resultados e Discussão

- **Frequências naturais e modos de vibração**

Os valores médios encontrados para as frequências naturais nos

ensaios de vibração foram de 20,09 Hz para o estágio de maturação verde e 19,86 Hz para o estágio de maturação maduro, com desvio padrão de 1,92 Hz; e na simulação dos modelos foi de 23,61 Hz e 21,65 Hz, para os estádios verde e maduro, respectivamente, com desvio padrão de 2,84 Hz (Figura 14).

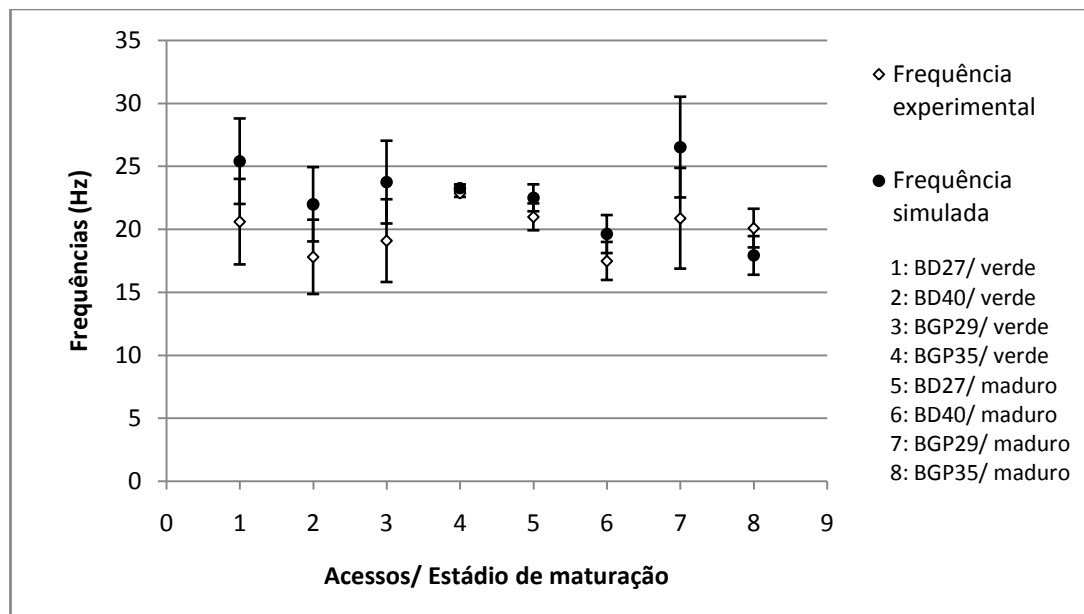


Figura 14: Valores de frequências naturais experimentais e simuladas com desvios padrão para os diferentes acessos nos diferentes estádios de maturação.

O coeficiente de variação entre os valores médios encontrados no ensaio de vibração e na simulação dos modelos foi de 11,11%. Valores de coeficiente de variação podem indicar a precisão do experimento, sendo que para valores abaixo de 10% é considerado uma precisão alta, para valores entre 10% e 20% considera-se uma precisão mediana, para valores entre 20% e 30% considera-se uma precisão baixa e valores maiores que 30% considera-se uma precisão muito baixa (Pimentel Gomes, 1987). Assim sendo, a precisão da simulação em relação aos resultados obtidos no ensaio de vibração é considerada média.

Um modelo matemático raramente oferece uma representação exata dos fenômenos reais. Em regra geral, os modelos são simplificados afim de tornar sua simulação viável. Características das simulações, como discretização do modelo e algoritmo de solução, também podem interferir nos resultados.

O modo de vibração extraído nas simulações foi o modo pendular referente ao oitavo modo de vibrar (Figura 15).

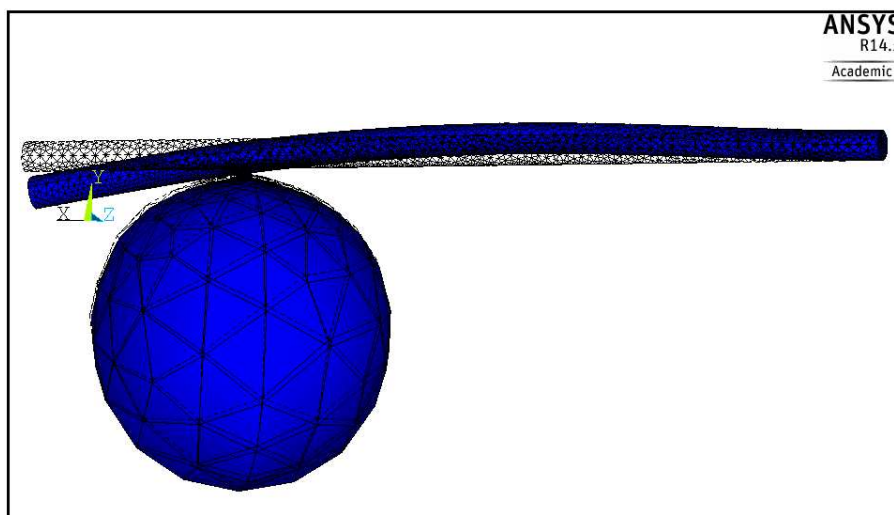


Figura 15: Modo de vibrar pendular – oitavo modo de vibração.

Os valores de frequências naturais médias para todos os acessos estão apresentados na Tabela 11, onde é possível observar que em alguns casos foram encontradas diferenças significativas a nível de 5% pelo teste de Tukey.

Tabela 11: Valores médios de frequências naturais encontrados no Ensaio de Vibração e na Simulação dos modelos para cada acesso em cada estágio de maturação

	Frequência (Hz)							
	Verde				Maduro			
	BGP35	BD40	BD27	BGP29	BGP35	BD40	BD27	BGP29
Experimental	22,86a	17,81a	20,61a	19,10a	20,10a	17,49a	20,99a	20,88a
Simulado	23,28a	21,99b	25,41b	23,75b	17,93a	19,62a	22,50a	26,53b

As médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observou-se que houve uma tendência nos valores de frequência natural diminuírem conforme evoluía o estágio de maturação do cacho. Poucos são os estudos para materiais biológicos. Entretanto, em termos comparativos o mesmo comportamento foi observado por Santos et al. (2015) para o sistema fruto-pedúnculo do ramo da planta de café, onde os valores de frequências naturais ficaram entre 19,90 Hz e 297,30 Hz para a variedade Catuaí Vermelho e 20,60 Hz e 302,20 Hz para a variedade Mundo Novo, ambos em diferentes estádios de maturação e em diferentes modos de vibrar; e por Coelho et al. (2016) ao modelar o sistema fruto-pedúnculo e ramo do cafeeiro pela técnica

de elementos finitos estocástica chegando aos valores de frequências fundamentais na faixa de 14,00 Hz a 21,30 Hz.

Villar (2016) encontrou valores médios para frequências naturais no estádio de maturação verde de 29,37 Hz e 28,13 Hz para ensaios experimentais e simulações, respectivamente.

A variação no valor das frequências naturais para os diferentes estádios de maturação auxilia no desenvolvimento do processo de colheita seletiva. Máquinas que usam o princípio de vibrações mecânicas podem ser ajustadas em diferentes vibrações afim de derriçarem apenas frutos na maturação desejada.

- **Tensões do sistema**

Os valores da tensão de von Mises simulada para o estádio de maturação verde foram de 22,97 MPa a mínima e $0,96 \cdot 10^7$ MPa a máxima, e para o estádio de maturação maduro de 69,97 MPa a mínima e $0,35 \cdot 10^8$ MPa a máxima (Figura 16).

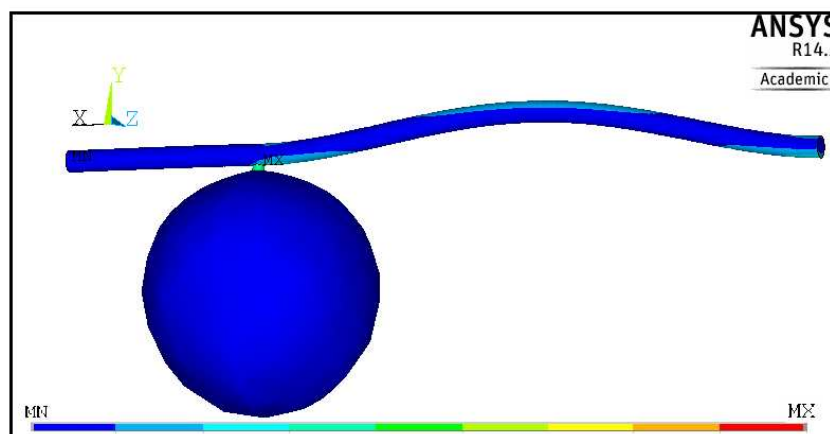


Figura 16: Representação da distribuição da tensão de von Mises ao longo do modelo do sistema fruto-ráquila da macaúba, em que MN representa o valor mínimo e MX representa o valor máximo.

Nota-se que as tensões concentraram-se na ligação entre a ráquila e o fruto, região onde ocorre uma alta concentração de tensão natural da estrutura e amplificada devido ao ponto de aplicação da carga e a pequena área da estrutura (Figuras 17). Este resultado já era esperado, visto que esta situação precipitaria o desprendimento do fruto em um processo de colheita por vibrações.

Os concentradores de tensões são descontinuidades ou variações na seção transversal ao longo de uma estrutura que criam picos de tensões

localizadas. Os problemas de fadiga em estruturas geralmente são consequência de concentradores de tensões. A fadiga é uma falha mecânica, causada, principalmente, pela aplicação de cargas que variam no tempo, levando ao crescimento progressivo da trinca até o rompimento do corpo através de um processo cumulativo e localizado (Pilkey, 1997; Niu, 2000; Hibbeler, 2000).

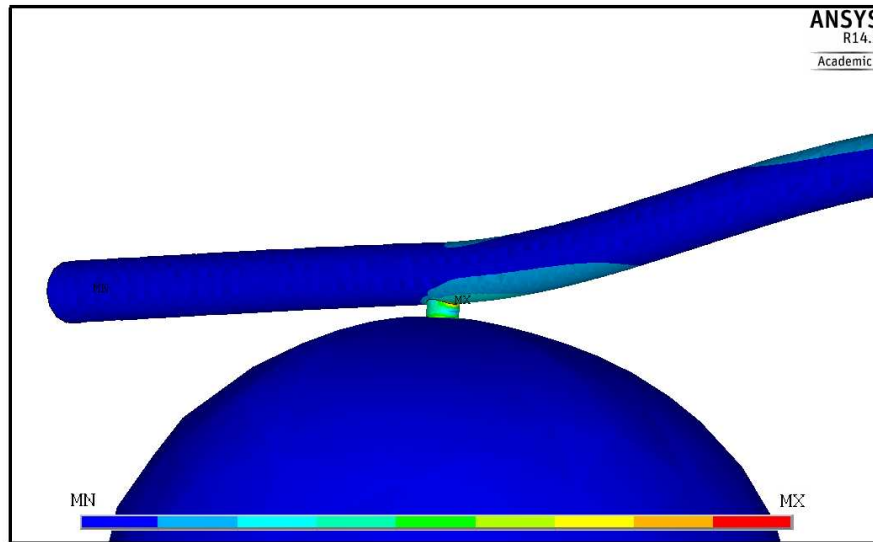


Figura 17: Detalhe do ponto de concentração das maiores tensões de von Mises no modelo do sistema fruto-ráquila da macaúba, em que MN representa o valor mínimo e MX representa o valor máximo.

A partir da distribuição das tensões de von Mises é possível verificar que os valores de força previamente calculados a partir dos ensaios de vibrações durante o tempo de 90 segundos e usados nas simulações poderiam induzir a colheita dos frutos de macaúba do cacho, inclusive no processo de colheita seletiva, já que foram forças distintas para os diferentes estádios de maturação.

Os deslocamentos máximos foram observados para o mesmo ponto de aplicação da força, acima do fruto, os valores encontrados foram de 0,04 m e 0,80 m nos estádios de maturação verde e maduro, respectivamente (Figura 18).

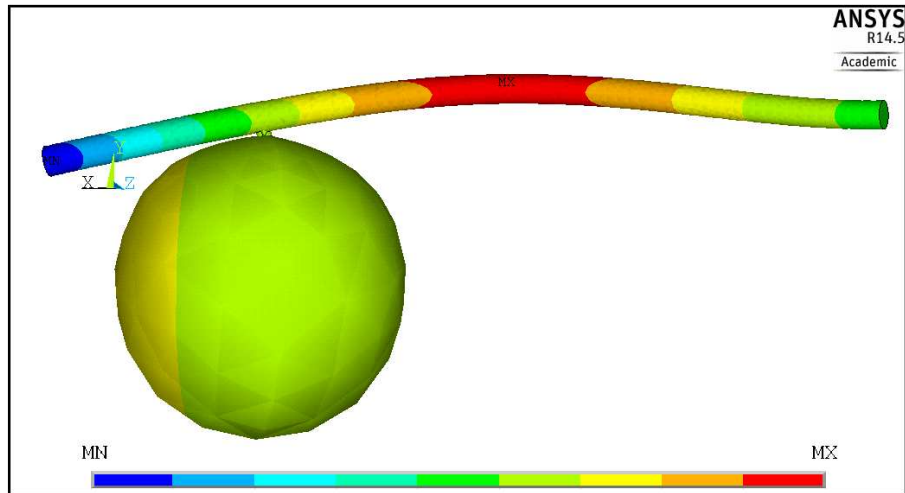


Figura 18: Representação dos deslocamentos totais ao longo do modelo do sistema fruto-ráquila da macaúba, em que MN representa o valor mínimo e MX representa o valor máximo.

Vale ressaltar que a obtenção da tensão de von Mises é parte importante da simulação, pois para avaliar o início do escoamento plástico de um material é necessário relacionar os diversos estados de tensão e deformação aos esforços externos aplicados.

- **Análise de sensibilidade**

Na análise de sensibilidade foram variados o Coeficiente de Poisson (Figura 19), o Módulo de Elasticidade (Figura 20) e a Massa Específica (Figura 21) do sistema fruto-ráquila da macaúba. Os parâmetros foram variados em mais e menos 30% e foram analisados individualmente variando um a um.

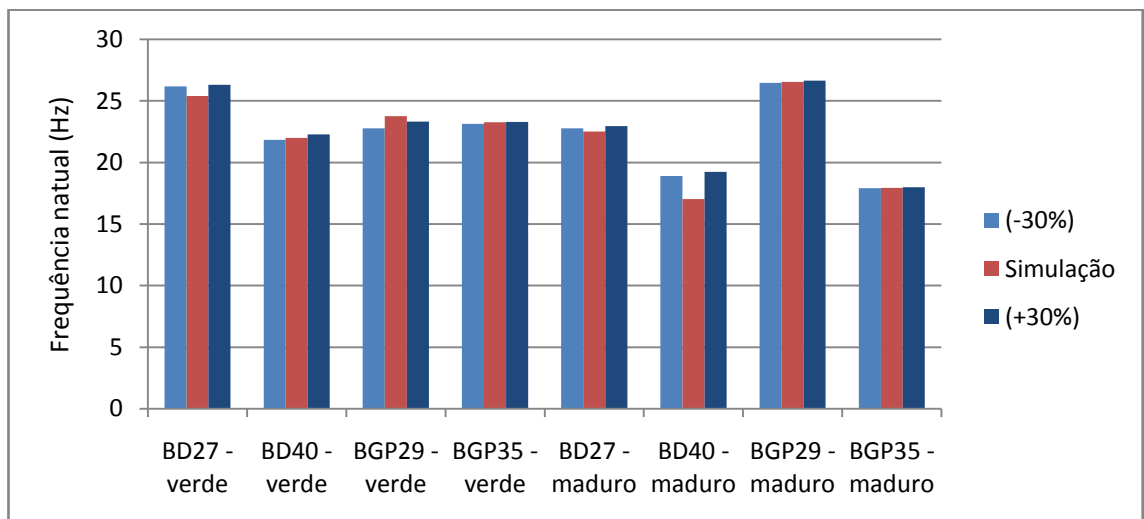


Figura 19: Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando o coeficiente de poisson.

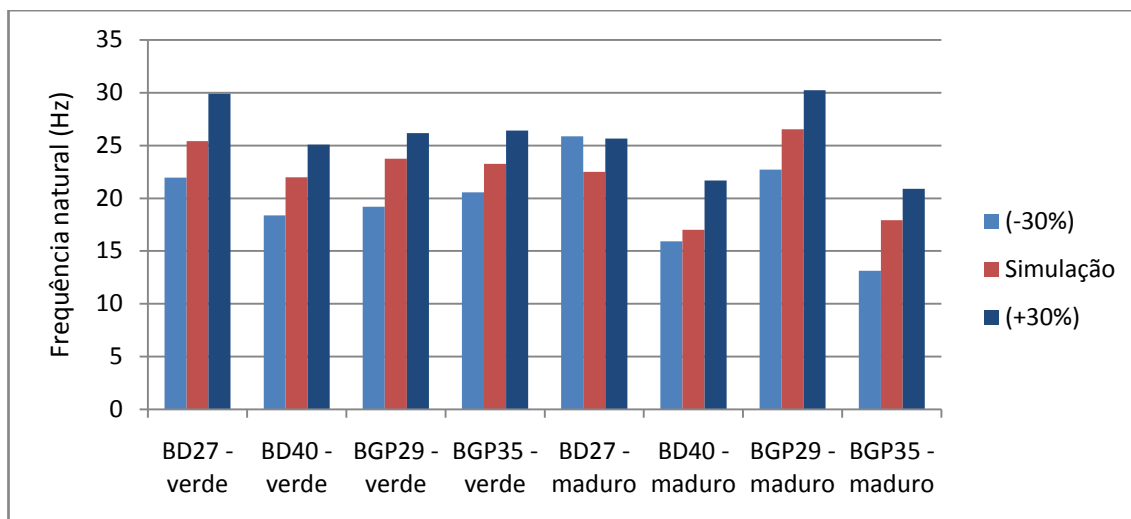


Figura 20: Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando o módulo de elasticidade.

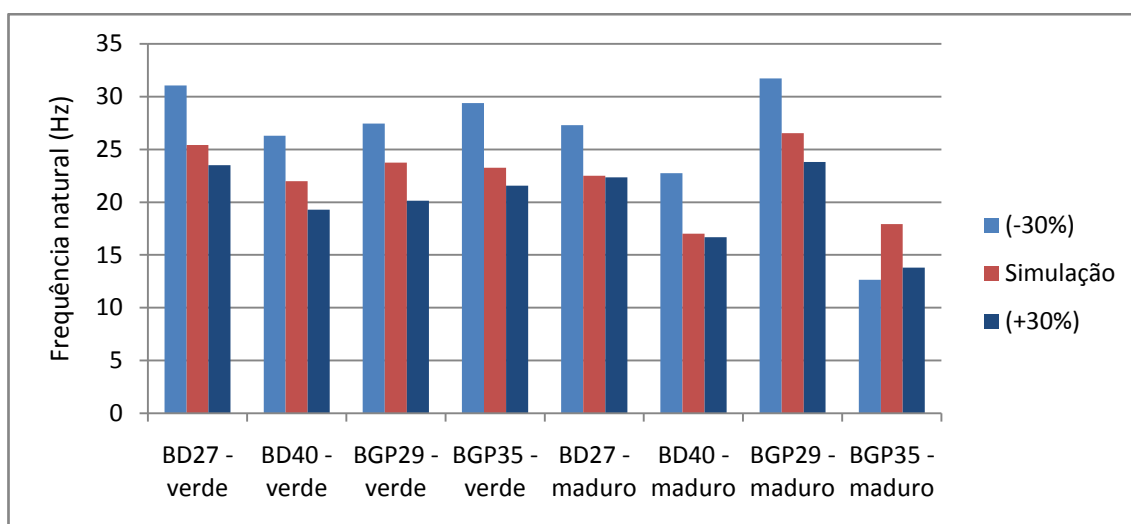


Figura 21: Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando a massa específica.

Ao variar o coeficiente de Poisson foi observado que os valores das frequências naturais extraídas quase não modificaram. Este resultado era esperado, visto que os valores para essa propriedades são muito baixos e seria necessária uma grande variação para que houvessem influências nos resultados finais.

Porém, de forma geral, o aumento nos valores do coeficiente de Poisson geraram aumentos nas frequência naturais extraídas e a diminuição nos valores do Coeficiente de Poisson geraram diminuições nos valores da frequências naturais extraídas. Este comportamento indica que com o aumento do coeficiente de Poisson a resistência à queda dos frutos aumenta, fazendo

com que seja necessário maiores frequências para o desprendimento do fruto. O mesmo comportamento foi observado em ensaios com argamassas fortes onde pôde-se notar que o aumento do Coeficiente de Poisson com o aumento da tensão confinante aparentam ter um comportamento linear (Mohamad et al., 2009).

O aumento no Módulo de Elasticidade resultou em aumento nas frequências naturais extraídas e a diminuição no Módulo de Elasticidade gerou diminuição nas frequências naturais extraídas. Como o Módulo de Elasticidade é a propriedade que mede a rigidez do material os resultados obtidos na análise de sensibilidade condizem com o esperado. Quanto maior a rigidez menos maleável é o material e, conseqüentemente, maiores as frequências ressonantes associadas ao sistema.

As frequências naturais são determinadas a partir da relação entre a rigidez e a massa do sistema, portanto as variações nas frequências naturais são inversamente proporcionais às variações de massas do sistema (Rao, 1995). A análise de sensibilidade da massa específica do sistema ilustrou este comportamento, ao aumentar a massa específica diminuíram os valores das frequências naturais extraídas e ao diminuir a massa específica aumentaram os valores das frequências naturais extraídas. O mesmo comportamento para a análise de sensibilidade de ambos parâmetros foi observado por Villar (2016) para ensaios do sistema fruto-ráquila da macaúba no estágio de maturação verde em variações de mais e menos 20%.

4. Conclusões

➤ Os valores das frequências naturais foram menores para o estágio de maturação maduro que para o estágio de maturação verde tanto nos ensaios de vibração quanto nas simulações.

➤ Os valores médios encontrados para as frequências naturais nos ensaios de vibração foram de 20,09 Hz para o estágio de maturação verde e 19,86 Hz para o estágio de maturação maduro.

➤ Os valores médios de frequências naturais extraídas nas simulações foram de 23,61 Hz e 21,65 Hz para os estágios de maturação verde e maduro, respectivamente.

- O modo de vibração extraído foi o oitavo modo, que apresenta comportamento pendular.
- As tensões de von Mises máximas extraídas para os estádios de maturação verde e maduro ficaram concentradas na ligação entre a ráquila e o fruto.

5. Referências Bibliográficas

ANSYS Inc., **ANSYS Theory Reference**, Houston, PA, 1996.

Boyce, W. E; DiPrima, R. C. **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno**. Editora LTC, sétima edição. Rio de Janeiro, RJ, 2002. 416p.

Caporrino, C. F. **Confinamento dado por lajes e vigas melhorando a resistência do pilar que as cruza**. São Paulo, SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2007. 124p. Dissertação de Mestrado.

Carvalho, K. J.; Souza, A. L.; Machado, C. C. **Ecologia, Manejo, Silvicultura e Tecnologia da Macaúba**. UFV. Viçosa, MG. 2011. 25p. Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/d_b_b_15592.pdf. Acessado em: março 2016.

Castricini, A.; Coelho, E. F.; Rodrigue, M. G. V.; Coutinho, R. C. Caracterização pós-colheita de frutos de bananeira 'BRS PLATINA' de primeiro ciclo sob regulação de déficit de irrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 4, p. 1013-1021. 2012.

Celho, A. L. de F.; Santos, F. L.; Queiroz, D. M. de; Pinto, F. de A. de C. Dynamic behavior of the coffee fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 1-10. 2016.

Ciconini, G.; Favaro, S.P.; Roscoe, R.; Miranda, C.H.B.; Tapeti, C.F.; Miyahira, M.A.M.; Bearari, L.; Galvani, F.; Borsato, A.V.; Colnago, L.A.; Naka, M.H. Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Industrial Crops and Products (Print)**, v. 45, p. 208-214, 2013.

Costa, G. C. **Estudo da Levitação Magnética e Determinação da Corrente Crítica de Blocos Supercondutores de Alta Tc pelo Método dos Elementos Finitos**. Rio de Janeiro, RJ. UFRJ. 2005. 128p. Tese de Doutorado.

Dias, A.; Peça, J.; Santos, L.; Pinheiro, A.; Morais, N. e Pereira, A.G. The influence of mechanical pruning on olive production and shaker efficiency. **Proceedings of the 5th International Symposium on Olive Growing** (in press), 2004, Izmir, Turkiye.

Garcia, A.; Spim, J. A.; Santos, C. A. dos. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. 365 p.

Helfert, E. A. **Técnicas de Análise Financeira – Um guia prático para medir o desempenho dos negócios**. 9º ed. Porto Alegre: Bookman, 1997, p.148.

Henderson, A.; Galeano, G.; Bernal, R. Field guide to the palms of the Americas, **Princeton University**, p.166 – 167, 1995.

Hibbeles, R. C. **Resistência dos Materiais**. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
Hoffman, J. D. **Numerical Methods for Engineers and Scientists**. McGraw-Hill, Inc., 1992. 801p.

Huebner, K. H.; Dewhirst, D. L.; Smith, D. E.; Byron, T. G. **The finite element method for engineers**. Fourth edition. New York, EUA. John Wiley e Sons, Inc., 2001. 720p.

MathWorks, T. **Matlab r2009b**. Natick, MA. 2009.

Mohamad, G.; Neto, A. B. da S. S.; Pelisser F.; Lourenço, P. B.; Roman, H. R. Caracterização mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural – previsão e modo de ruptura. **Revista Matéria**, v. 14, n. 2, p. 824-844. 2009.

National Instruments. **LabVIEW Graphical Programming for Instrumentation**, Austin, TX, Versão 5.0, 1998.

Niu, M. C. Y. **Composite Airframe Structures: Practical Design Information and Data**. 3.ed.: Hong Kong Conmilit Press Limited, 2000.

Paula, L. G. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-processamento de Misturas de Resíduos**. UNIFEI. Itajubá, MG. 2009. 179p. Dissertação de Mestrado.

Petry, A. P. **Análise Numérica de Escoamento Turbulentos Tridimensionais Empregando o Método de Elementos Finitos e Simulações de Grandes Escalas**. Porto Alegre, RS. UFRGS. 2002. 149p. Tese de Doutorado.

Pilkey, W. D. **Peterson's Stress Concentration Factors**. 2a ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

Pimentel Gomes, F. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária**. 217 Piracicaba: Potafos: 1987. 3. ed., 162p.

Rao, S. S. **Mechanical Vibrations**. Third edition. New York, EUA. Addison-Wesley Publishing Company, 1995. 912p.

Reddy, J. N. **An introduction to the finite element method**. Second edition. Singapore. McGraw-Hill International Editions, 1993. 684p.

Ros, V. V. **Viabilidade técnica do uso de derriçadora portátil na colheita de frutos de Pinhão Manso (*Jatropha Curcas L.*)**. UFGD. Dourados, MS. 2010. 59p. Dissertação de Mestrado.

Roscoe, R.; Richetti, A. Maranhão, E. Análise de viabilidade técnica de oleaginosas para produção de biodiesel no Mato Grosso do Sul. **Revista Política Agrícola**, v. 16, p. 48-59, 2007.

Santos, F. L.; Queiroz, D. M.; Santos, N. T.; Pinto, F. A. C. Avaliação da eficiência de derriça dos frutos do cafeeiro cultivar Catuaí Vermelho por vibrações mecânicas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 11, p. 24-29, 2009.

Santos, F. L.; Queiroz, D. M.; Valente, D. S. M. ; Coelho, A. L. F. . Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum**. v. 37, p. 11-17, 2015.

Scariot, A. O.; Lleras, E.; Hay, J. D. Reproductive biology of the palm *Acromonia aculeata* in Central Brasil. **Biotropica**, v.23, n.1, p.12-22, 1991.

Seegerlind, L. J. **Applied Finite Element Analysis**. Second edition. New York, EUA. John Wiley e Sons, Inc, 1984. 411p.

Silva, C. da S.; Silva, F. M. da; Scalco, M. S.; Sales, R. S. Correlação da força de desprendimento dos frutos em cafeeiros sob diferentes condições nutricionais. **Coffee Science**, v. 11, n. 2, p. 169-179. 2016.

Silva, F. da S.; Silva, F. M. da; Alves, M. de C.; Ferras, G. A. e S. F.; Sales, R. S. Efficiency of coffee mechanical and selective harvesting in different vibration during harvest time. **Coffee Science**, v. 10, n. 1, p. 56-64, 2015.

Silva, F. de A. S. e. & Azevedo, C. A. V. de. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.1, p. 71-78,2002. URL <http://www.assistat.com/>.

Systemes, Dassault. **SolidWorks 2012**. Concord, MA, 2012.

Valle, R.; Neves, F.; Andrade Jr., R. e Stephan, R. M. Eletromagnetic Levitation of a Disc. **IEEE Transactions on education**, v.55, n.2, p.248-254, 2012.

Villar, F. M. de M. **Propriedades físicas, geométricas, mecânicas e modais do sistema fruto-ráquila da macaúba**. Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa. 2016. 87 p. Tese de doutorado.

Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.; Zhu, J. Z. **The finite element method: its basis and fundamentals**. Sixth edition. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 733p.

CONCLUSÕES GERAIS

Objetivou-se neste trabalho determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba e modelar seu comportamento dinâmico.

Para a determinação das propriedades geométricas foram feitas medições diretas nas ráquilas e nos frutos utilizados e para a determinação das propriedades físicas e mecânicas foram realizados ensaios de tração e de vibração. As propriedades determinadas foram utilizadas como dados de entrada para as simulações do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila, onde foram extraídas as frequências naturais, os modos de vibração e as tensões em que o sistema estava submetido.

Os modelos tridimensionais foram elaborados no programa computacional SolidWorks, versão 2012. O software Ansys Mechanical APDL, versão 14.5, foi utilizado para determinar e simular o comportamento dinâmico dos sistemas a partir do método de Elementos Finitos. O modelo tridimensional desenvolvido e implementado foi validado em função dos deslocamentos reais observados durante os ensaios de vibração laboratoriais.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- As massas específicas do sistema tendem a aumentar conforme evolui a maturação dos frutos.
- O Módulo de Elasticidade obtido para a ráquila ficou entre 1,86 MPa e 3,80 MPa, para o estágio de maturação verde e 1,22 MPa e 3,20 MPa para o estágio de maturação maduro.
- O coeficiente de Poisson para a ráquila ficou entre 0,2 e 0,52 para o estágio de maturação verde e entre 0,16 e 0,52 para o estágio de maturação maduro.
- A razão de amortecimento encontrada ficou entre 0,01 e 0,11 para o estágio de maturação verde e entre 0,04 e 0,10 para o estágio de maturação maduro.
- O sistema fruto-ráquila foi caracterizado como subamortecido.
- Os valores das frequências naturais foram menores para o estágio de maturação maduro que para o estágio de maturação verde tanto nos ensaios de vibração quanto nas simulações.

- Os valores médios encontrados para as frequências naturais nos ensaios de vibração foram de 20,09 Hz para o estágio de maturação verde e 19,86 Hz para o estágio de maturação maduro.
- Os valores médios de frequências naturais extraídas nas simulações foram de 23,61 Hz e 21,65 Hz para os estágios de maturação verde e maduro, respectivamente.
- O modo de vibração extraído foi o oitavo modo, que apresenta comportamento pendular.
- As tensões de von Mises máximas extraídas para os estágios de maturação verde e maduro ficaram concentradas na ligação entre a ráquila e o fruto.