

JÉSSICA PONTES RANGEL

**SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA FRUTO-
RÁQUILA DA PALMEIRA MACAÚBA**

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
2017

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

T

R196s Rangel, Jéssica Pontes, 1991-
2017 Simulação do comportamento dinâmico do sistema
fruto-ráquila da palmeira macaúba / Jéssica Pontes Rangel. –
Viçosa, MG, 2017.
xii, 75f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Palmeira oleaginosa. 2. Macaúba. 3. Biodiesel.
4. Mecanização agrícola. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 633.851

JÉSSICA PONTES RANGEL

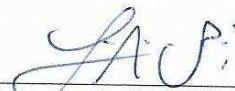
**SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA FRUTO-
RÁQUILA DA PALMEIRA MACAÚBA**

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*.

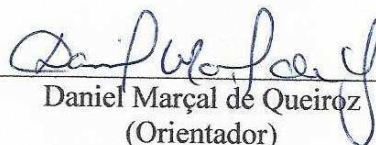
APROVADA: 21 de fevereiro de 2017.



Joseph Kalil Khoury Junior



Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Coorientador)



Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

*“Forever trusting who we are
And nothing else matters”
(Metallica)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo, sempre.

Agradeço aos meus pais Maria Inêz e Luíz Carlos, por nunca medirem esforços para que eu pudesse ter tudo o que eles não tiveram oportunidade. Amo muito vocês.

À minha tia Lúcia que sempre me incentivou a buscar os meus sonhos.

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

Agradeço aos colegas do laboratório de Mecanização Agrícola pelo convívio e troca de experiências acadêmicas, em especial a Cleonice, Nara, Ely, Gustavo, Ganso, André, Bruno, Adolfo, Flávio e Lucas.

Aos amigos da Engenharia Mecânica pela amizade, companheirismo e por continuarem me apoiando, todos esses anos.

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

Ao meu orientador Professor Daniel Marçal de Queiroz, agradeço pela orientação e ensinamentos.

Aos coorientadores Fábio Lúcio Santos, Domingos Sárvio Magalhães Valente, Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Murilo Aparecido Voltarelli agradeço os aconselhamentos.

Ao Departamento de Fitotecnia e ao Prof. Sergio Yoshimitsu Motoike por ceder a área para coleta de dados.

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

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
CAPÍTULO I: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba	6
Resumo	7
Abstract	8
1. Introdução	9
2. Material e Métodos	12
2.1. Dimensões médias	15
2.2. Massa e volume do sistema fruto ráquila.....	16
2.3. Massa específica	16
2.4. Módulo de elasticidade	17
2.5. Coeficiente de Poisson.....	17
2.6. Razão e coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila	18
2.7. Análise de dados	19
3. Resultados e Discussão	19
3.1. Dimensões médias	19
3.2. Massa e volume do sistema fruto ráquila.....	21
3.3. Massa específica	23
3.4. Módulo de elasticidade	24
3.5. Coeficiente de Poisson.....	25
3.6. Razão e coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila	25
4. Conclusões	28
5. Referências Bibliográficas	28
CAPÍTULO II: Estudo do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba.....	32

Resumo.....	33
Abstract	34
1. Introdução	35
2. Material e Métodos	38
2.1. Modelagem da geometria.....	38
2.2. Simulação estocástica	40
2.3. Validação do modelo	43
2.4. Análise de dados	44
3. Resultados e Discussão	44
4. Conclusões	48
5. Referências Bibliográficas	49
CAPÍTULO III: Determinação das tensões do sistema fruto-ráquila da macaúba e da força requerida para remover o fruto	53
Resumo.....	54
Abstract	55
1. Introdução	56
2. Material e Métodos	58
2.1. Análise de tensões.....	59
2.2. Validação do modelo	63
2.3. Força requerida para o desprendimento do fruto	65
2.4. Análise de dados	66
3. Resultados e Discussão	66
3.1. Análise de tensões.....	66
3.2. Força requerida para o desprendimento do fruto	69
4. Conclusões	71
5. Referências Bibliográficas	71
CONCLUSÕES GERAIS	74

LISTA DE TABELAS

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

Tabela 1: Valores médios dos diâmetros dos frutos da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos.....	20
Tabela 2: Valores médios dos diâmetros das ráquillas da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos.....	21
Tabela 3: Valores médios das massas dos frutos da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos.....	21
Tabela 4: Valores médios das massas das ráquillas da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos.....	22
Tabela 5: Valores médios dos volumes dos frutos e das ráquillas da macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.....	23
Tabela 6: Valores médios dos volumes dos frutos e das ráquillas da macaúba nos diferentes acessos BD27, BGP29, BGP35 e BD45.....	23
Tabela 7: Valores médios da massa específica dos frutos da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos.....	24
Tabela 8: Valores médios da massa específica das ráquillas da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos.....	24
Tabela 9: Valores médios do módulo de elasticidade das ráquillas da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos	25
Tabela 10: Valores médios do coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos	26

CAPÍTULO II: Estudo do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba

Tabela 11: Propriedades geométricas e físicas dos frutos para os diferentes acessos e estágio de maturação – verde e maduro	39
Tabela 12: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas das ráquillas para os diferentes acessos e estágio de maturação – verde e maduro	39
Tabela 13: Valores médios da frequência natural experimental e simulada, para os diferentes acessos e estádios de maturação, referente ao terceiro modo de vibração	45

CAPÍTULO III: Determinação das tensões do sistema fruto-ráquila da macaúba e da força requerida para remover o fruto

Tabela 14: Propriedades geométricas e físicas dos frutos para os diferentes acessos e estágio de maturação – verde e maduro	59
Tabela 15: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas das ráquillas para os diferentes acessos e estágio de maturação – verde e maduro	60
Tabela 16: Valores médios da frequência natural simulada, para os diferentes acessos e estádios de maturação, considerando o terceiro modo de vibrar	62

Tabela 17: Valores médios da frequência natural experimental e simulada, para os diferentes acessos e estádios de maturação, considerando o terceiro modo de vibrar ...	65
Tabela 18: Valores médios da força requerida para o desprendimento dos frutos da macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.....	69
Tabela 19: Valores médios da força requerida para o desprendimento dos frutos da macaúba da macaúba nos diferentes acessos BD27, BGP29, BGP35 e BD45.....	70
Tabela 20: Valores tensão calculados a partir dos valores de força requerida para o desprendimento dos frutos da macaúba da macaúba nos diferentes acessos BD27, BGP29, BGP35 e BD45.....	70

LISTA DE FIGURAS

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

Figura 1: Amostras do sistema fruto-ráquila da macaúba com um fruto, retirada dos cachos e utilizadas nos ensaios de vibração.....	13
Figura 2: Ráquila (A) engastada, entre as duas garras (B) da uma máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 3365, utilizada nos ensaios de tração	14
Figura 3: Amostra do sistema fruto-ráquila da macaúba (A) engastado na extremidade oposta ao fruto, para realização do ensaio de vibração utilizando um vibrador eletromagnético (B) e acelerômetros de alta sensibilidade responsáveis por mensurar a aceleração do sistema (C1) e controlar as especificações do ensaio (C2)	15
Figura 4: Figura 4: 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.....	16
Figura 5: Figura 5: Amplitude de aceleração de aceleração do movimento do sistema fruto-ráquila da macaúba no domínio do tempo para frutos verdes do acesso BGP29 – provindo de Prudentes de Moraes – Matozinhos/MG.....	27
Figura 6: Amplitude de aceleração de aceleração do movimento do sistema fruto-ráquila da macaúba no domínio do tempo para frutos maduros do acesso BGP29 – provindo de Prudentes de Moraes – Matozinhos/MG.....	27

CAPÍTULO II: Análise do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba

Figura 7: Geometria modelada para simulação do sistema fruto-ráquila da macaúba para o acesso BD45 – provindo de Unai/MG	40
Figura 8: Valores das frequências naturais de cinco modos de vibração do sistema fruto-ráquila da macaúba simulado, empregando três refinamentos de malha	41
Figura 9: Espectro de frequência para o sistema fruto-ráquila da macaúba no estágio de maturação verde do acesso BD27 – provindo de Abaeté/MG	45
Figura 10: Deslocamentos observados do acesso BD27, no segundo modo de vibração, nos diferentes estádios de maturação, verde e maduro	47
Figura 11: Modos de vibração, nos diferentes estádios de maturação, verde e maduro, respectivamente. De cima para baixo, da esquerda para direita: terceiro modo de	

vibração BD27, verde e maduro; segundo modo de vibração BGP29, verde e maduro; primeiro modo de vibração BGP35, verde e maduro; terceiro modo de vibração BD45, verde e maduro..... 48

CAPÍTULO III: Determinação das tensões do sistema fruto-ráquila da macaúba e determinação da força requerida para remover o fruto

Figura 12: Geometria modelada para simulação do sistema fruto-ráquila da macaúba para o acesso BD45 – provindo de Unai/MG 60

Figura 13: A esquerda são apresentados dados de amplitude de aceleração no domínio do tempo e, a direita são apresentados os mesmos dados no domínio da frequência. A frequência apresentada pertence a uma amostra no estágio de maturação verde do acesso BGP25 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG..... 64

Figura 14: Medições da força necessária para o destacamento do fruto da macaúba, realizadas com o auxílio da máquina de ensaio universal da marca Instron, modelo 3365 66

Figura 15: Detalhamento da região com os maiores valores de tensão de *von Mises* para o sistema fruto-ráquila da macaúba, nos diferentes estádios de maturação: verde e maduro; e nos diferentes acessos: BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG 68

RESUMO

RANGEL, Jéssica Pontes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017 **Simulação de comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da palmeira macaúba**. Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Domingos Sárvio Magalhães Valente, Fábio Lúcio Santos, Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Murilo Aparecido Voltarelli.

A necessidade de renovação das fontes energéticas mundiais, embasadas em fatores econômicos, ambientais ou mesmo sociais, tem promovido diversas pesquisas. Dentre estas, a busca por plantas oleaginosas aumentou no último século. A macaúba (*Acrocomia aculeata*), destaca-se por sua elevada produtividade e por ser uma fonte promissora de biodiesel. Entretanto, sua produção ainda é extrativista. Com a finalidade de aumentar a qualidade e a quantidade do que se é produzido, a mecanização agrícola surge com diversas alternativas, dentre elas, destaca-se o estudo da colheita pelo princípio de vibração mecânica. Logo, objetivou-se neste trabalho analisar o comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba quando submetido a vibrações mecânicas. O trabalho foi desenvolvido adotando-se amostras de macaúba, nos diferentes estádios de maturação e de diferentes acessos coletadas no Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da Universidade Federal de Viçosa: BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG. O presente trabalho foi dividido em três capítulos. No primeiro capítulo foram determinadas as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba. As massas específicas do sistema estudado tenderam a aumentar com o avanço da maturação. Os módulos de elasticidade das ráquillas no estádio de maturação verde foram superiores aos valores encontrados para o estádio de maturação maduro para os diferentes acessos. O coeficiente de Poisson para a ráquila não apresentou diferença significativa para nenhum dos fatores avaliados, estádio de maturação e acesso. Foram obtidos valores de razão de amortecimento para o sistema fruto-ráquila menores que um, caracterizando-o como um sistema subamortecido. No segundo capítulo determinaram-se as frequências naturais e os modos de vibração do sistema fruto-ráquila, para os diferentes acessos e estádios de maturação, adotando o método de elementos finitos estocástico, tratando os valores de massa específica e rigidez do sistema como aleatórios. As frequências naturais sofreram redução com o avanço do estádio de maturação, para os diferentes acessos. Os modos de vibração caracterizados

pelo deslocamento pendular apresentaram a mesma ordem considerando os diferentes acessos e estádios de maturação. No último capítulo foram determinadas as tensões impostas ao sistema fruto-ráquila, quando submetido a vibrações mecânicas, por meio de análise transiente, adotando os valores de frequências naturais e tempo de excitação de 10 s. Ainda, realizou-se um estudo sobre a força perpendicular requerida para o destacamento do fruto. As tensões de *von Mises* se concentraram na ligação entre o fruto e a ráquila. Os valores obtidos para a força perpendicular requerida para o destacamento do fruto não diferiu com relação ao estágio de maturação, porém entre os acessos houve diferença. Considerando as tensões requeridas para o destacamento do fruto e as tensões imposta pela vibração, na componente perpendicular a área de contato entre o fruto e a ráquila, percebe-se que o princípio de vibração mecânica possui características necessárias para efetivar o desprendimento dos frutos da macaúba.

ABSTRACT

RANGEL, Jéssica Pontes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2017. **Dynamic behavior simulation of the macaw palm rachilla fruit system.** Advisor: Daniel Marçal de Queiroz. Co-advisors: Domingos Sárvio Magalhães Valente, Fábio Lúcio Santos, Francisco de Assis de Carvalho Pinto and Murilo Aparecido Voltarelli.

The need for renewal of world energy sources, based on economic, environmental or even social factors, has promoted several researches. Among these, the search for oleaginous plants has increased in the last century. The macaw palm (*Acrocomia aculeata*) stands out for its high productivity and for being a promising source of biodiesel. However your production is still extractive. In order to increase the quality and quantity of what is produced, the agricultural mechanization comes with several alternatives, among them, the study of harvesting by the principle of mechanical vibration stands out. Therefore, the objective of this work was to analyze the dynamic behavior of the rachilla fruit system of the macaw when subjected to mechanical vibrations. The work was developed adopting samples of macaw bunches, in the different stages of maturation and of different accesses collected in the Active Germplasm Bank (BAG) da Universidade Federal de Viçosa: BD27 – acesso from Abaeté/MG; BGP29 – access from Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – access from Mirandópolis/SP; BD45 – acesso from Unaí/MG. The present work was divided in three articles. In the first article, the geometric, physical and mechanical properties of the rachilla-fruit system of macaw were determined. The specific masses of the studied system tended to increase with the advancement of maturation. The modulus of elasticity of rachilla at green maturation stage were higher than the values found for the mature maturity stage for the different accesses. The Poisson's of the rachilla did not present significant difference for any of the evaluated factors, stage of maturation and access. Damping ratio values were obtained for the rachilla fruit system smaller than one, characterizing like underdamped system. In the second article, the natural frequencies and vibration modes of the fruit-ripening system were determined for the different approaches and stages of maturation, adopting the stochastic finite element method, treating the values of specific mass and rigidity of the system as random. The natural frequencies were reduced with the maturation stage, for the different accesses. The vibration modes characterized by the pendular displacement presented the same order considering the different accesses and stages of maturation. In the last article, the tensions imposed to the rachilla fruit system, when submitted to

mechanical vibrations, were determined by means of transient analysis, adopting the values of natural frequencies and excitation time of 10 seconds. Also, a study was carried out on the perpendicular force required for the detachment of the fruit. The *Von Mises* tensions concentrated on the binding between the fruit and the rachilla. The values obtained for the perpendicular force required for the detachment of the fruit did not differ with respect to the maturation stage, but between the accesses there was difference. Considering the tensions required for the detachment of the fruit and the tensions imposed by the vibration, in the perpendicular component the area of contact between the fruit and the rachilla, it is perceived that the principle of mechanical vibration has characteristics necessary to effect the detachment of the fruits of the macaw

INTRODUÇÃO GERAL

O encarecimento das matrizes energéticas, a redução das ofertas de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, a elevação do preço dos combustíveis têm proporcionado a busca por diferentes fontes de energia. Entre tais fontes, destaca-se mundialmente o crescente interesse por biocombustíveis.

O Brasil, assim como Estados Unidos e países da Europa, aumentou significativamente a produção de biocombustíveis. A produção de biodiesel foi elevada, principalmente, pelo projeto de Lei 11.097, de 2005, que propõe um aumento nos incentivos de produção e regulamentação da utilização do biodiesel na matriz energética do país. Desde março de 2016, com a publicação da Lei 13.263, o percentual de adição obrigatória, em volume, de biodiesel ao óleo diesel aumentou para 8%. A Lei 13.263, ainda preconiza um aumento gradativo de 1% ao ano para os próximos dois anos.

O aumento expressivo da produção de biodiesel no Brasil nos últimos anos tem motivado a procura e aumentado a pesquisa por oleaginosas com elevada produtividade de óleo, afim de, atender a demanda produtiva do país. Neste contexto, a macaúba [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. exMart] tem ganhado destaque, graças ao seu alto potencial produtivo (EVARISTO, 2015).

A macaúba é uma palmeira oleífera, considerada a palmeira de maior disseminação no território brasileiro, com uma maior concentração nas regiões de cerrado (CICONINI, 2012). Possui uma produtividade de aproximadamente 5000 kg óleo.ha⁻¹ (FERRARI, 2005; TEIXEIRA e MORALES, 2005; TOLEDO, 2010; PIMENTEL *et al.*, 2011).

Além da elevada produtividade, o biodiesel proveniente da macaúba atende às especificações da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), que dizem respeito aos valores padrões de massa específica a 20 °C, viscosidade cinemática a 40 °C, teor máximo de água, ponto de fulgor mínimo e quanto às concentrações dos diferentes componentes químicos presentes no biodiesel (TOLÊDO, 2010). O óleo da macaúba, utilizado em diferentes produtos, é proveniente do mesocarpo da macaúba, sendo aproveitado pelas indústrias de combustíveis, cosmética e alimentícia. O coco, como um todo, possui ainda diferentes aproveitamentos, os farelos da polpa (mesocarpo) e da amêndoa (semente), por exemplo, podem ser utilizados na indústria alimentícia humana e animal e o endocarpo pode ser aproveitado na fabricação de carvão vegetal (MOTOIKE *et al.*, 2013).

Todavia, a maturação dos frutos da macaúba ocorre de maneira desuniforme. Por possuir um sistema de produção extrativista, a coleta dos frutos é realizada, geralmente, através do corte dos cachos ou pela coleta direta no chão dos frutos desprendidos naturalmente. Esse processo é responsável por diminuir o rendimento de óleo e a qualidade do óleo extraído.

Logo, no intuito de aumentar a produção e a qualidade dos produtos advindos da macaúba, se faz necessário à utilização de tecnologias que acompanhem a cultura desde a produção até a pós-colheita. Para melhorar a colheita dos frutos da macaúba, uma alternativa viável seria a utilização de sistemas mecanizados. Dentre tais sistemas, destacam-se as máquinas que utilizam o princípio de vibração mecânica, pela vasta utilização em diferentes culturas, como café, damasco, laranja, pistache, oliva e uva (ERDOGAN *et al.*, 2003; SANDERS, 2005; SESSIZ e OZCAN, 2006; SOUZA *et al.*, 2006; POLAT *et al.*, 2007; PEZZI e CAPRARA, 2009; COELHO 2014).

Segundo RAO (2008), vibração mecânica pode ser definida como um movimento periódico, ou seja, uma oscilação de uma partícula, um sistema de partículas ou um corpo em torno de uma posição de equilíbrio. Para geração e utilização de máquinas de colheita que utilizam o princípio de vibração mecânica, faz-se necessário o conhecimento das propriedades geométricas, físicas e modais do sistema a ser colhido, já que esse princípio estabelece associação entre fatores como frequência e amplitude de vibração, para transferência da energia vibracional para realização do desprendimento dos frutos (SANTOS *et al.*, 2010; GUEDES, 2011).

As variabilidades das propriedades físicas, geométricas e mecânicas de diversos materiais biológicos, fomentam a necessidade da utilização de ferramentas computacionais e de modelagem matemática, auxiliando nas tomadas de decisões das diversas etapas de um projeto de máquinas.

Dentre diversos métodos numéricos utilizados na resolução de problemas com alto grau de complexidade, destaca-se o Método de Elementos Finitos (MEF). A utilização deste método permite a formulação e análise de sistemas complexos de engenharia, de maneira automática, por intermédio da solução de equações aplicando programas computacionais (TAVARES, 1998).

A análise executada pelo Método de Elementos Finitos pode ser realizada de duas maneiras: determinística ou estocástica. A análise determinística utiliza um conjunto de parâmetros de entradas conhecidos, de valores constantes, resultando em um único conjunto de dados de saída (FISHMAN, 1973). A análise estocástica, no

entanto, utiliza uma ou mais variáveis aleatórias como entrada, resultando em saídas que serão também aleatórias. A análise estocástica se aproxima mais da realidade, realizando um processo de amostragem das variáveis aleatórias conseguindo, desta forma, reproduzir o mais fielmente possível a realidade (BERTHAUME *et al.*, 2012).

Contudo, por se tratar de uma cultura com elevado potencial de produção de biodiesel que necessita de um sistema de produção mais eficiente e que garanta a qualidade do que se é produzido, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas que promovam aplicações de técnicas mais assertivas nas etapas de cultivo da macaúba, principalmente no que diz respeito à colheita. Deste modo, objetivou-se nesse projeto determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas; modelar e analisar o comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba; determinar as forças requeridas para o desprendimento dos frutos.

Os resultados obtidos, neste trabalho, poderão servir de embasamento para projetistas de máquinas que utilizem o princípio de vibração mecânica para realização da colheita dos frutos.

Disposição do trabalho

Este trabalho é composto por três capítulos, além de introdução geral e conclusão geral.

O primeiro capítulo apresenta as propriedades geométricas, físicas e mecânicas, determinadas para os componentes do sistema fruto-ráquila da macaúba. Os resultados obtidos, neste trabalho, foram posteriormente utilizados na modelagem por elementos finitos, com o intuito de gerar informação sobre as frequências naturais e modos de vibração, além das tensões geradas.

No segundo capítulo, é realizado um estudo sobre o comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba. Nesse, são determinados as frequências naturais (autovalores) e modos de vibração (autovetores) do sistema fruto-ráquila da macaúba, empregando o método de elementos finitos estocástico.

No terceiro capítulo, são analisadas as tensões geradas no sistema fruto-ráquila da macaúba, quando excitado por vibrações mecânicas. As tensões de *von Mises* são determinadas para o sistema, quando este é excitado em uma faixa de frequência de 10 a 40 Hz.

Por fim, foram apresentadas uma visão geral do trabalho e uma conclusão geral sobre os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTHAUME, M. A.; DECHOW, P. C.; IRIARTE-DIAZ, J.; ROSS, C. F.; STRAIT, D. S.; WANG, Q.; GROSSE, I. R. Probabilistic finite element analysis of a craniofacial finite element model. **Journal of Theoretical Biology**, v. 300, n. 1, p. 242 – 253, 2012.

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.

COELHO, A. L. F. **Comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro submetido a vibrações mecânicas**. 2014. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2014.

ERDOGAN, D.; GUNER, M.; DURSUN, E.; GEZER, I. Mechanical Harvesting of Apricots. **Biosystems Engineering**, v.85, n. 1, p. 19-23, 2003.

EVARISTO, A. B. **Conservação pós-colheita e potencial bionergético de frutos de macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. 2015. 120 f. Tese de Doutorado – Curso de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2015.

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.

FISHMAN, G. S. **Concepts and Methods in Discrete Event Digital Simulation**. New York: Willey, 1973.

GUEDES, D. M. **Efeito da utilização de frequências de vibração na faixa de 35 a 55 Hz sobre a eficiência de derrça do café**. 2011. 52f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2011.

MOTOIKE, S. Y. *et al.* **A cultura da macaúba: implantação e manejo de cultivos racionais**. Viçosa, MG. Ed. UFV, 2013. p. 9.

PEZZI, F.; CAPRARA, C. Mechanical grape harvesting: investigation of the transmission of vibrations. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 3, p. 281-286, 2009.

PIMENTEL, L.; MANFIO, C.; MOTOIKE, S.; PAES, J.; BRUCKNER, C. Coeficientes técnicos e custos de produção do cultivo da macaúba. In. **Macaúba: potencial e sustentabilidade para o biodiesel**. Belo Horizonte. 32: 20-30p. 2011.

POLAT, R.; GEZER, I.; GUNER, M.; DURSON, E.; ERDOGAN, D.; BILIM, H. C. Mechanical harvesting of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 4, p. 1131-1135, 2007.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations. Fourth edition**. New York, EUA. Addison-Wesley Publishing Company, 2008. 464p.

SANDERS, K. F. Orange Harvesting Systems Review. **Biosystems Engineering**, v. 90, n. 2, p. 115-125, 2005.

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T. Analysis of the coffee harvesting process using an electromagnetic shaker. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 3, p. 373-378, 2010.

SESSIZ, A.; OZCAN, M. T. Olive removal with pneumatic branch shaker and abscission chemical. **Journal of Food Engineering**. V. 76, n.2, p. 148-153, 2006.

SOUZA, C. M. A.; QUEIROZ, D. M.; RAFULL, L. Z. D. Derrçadora portátil na colheita total e seletiva de frutos do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 11, p. 1637-1642, 2006.

TAVARES, J. M. R. S. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. 1998. 105f. Comunicação Interna – Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1998.

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.

TOLÊDO, D. de P. **Análise técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão-manso como alternativas de agregação de renda na cadeia produtiva de biodiesel**. 2010. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2010.

**Capítulo I: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema
fruto-ráquila da macaúba (*Acrocomia aculeata*)**

Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba (*Acrocomia aculeata*)

RESUMO

A exploração da cultura da macaúba (*Acrocomia aculeata*) está em ascensão, devido à grande aptidão que o Brasil apresenta para sua produção e por possuir uma elevada produtividade de óleo, fonte de matéria prima para a produção do biodiesel. Contudo, sua exploração ainda é extrativista, o que causa dificuldades nos processo de manejo e colheita. Objetivou-se determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba que poderão servir de embasamento teórico a projetistas dispostos a elaborarem máquinas para colheita dos frutos da macaúba utilizando o princípio de vibração mecânica. Foram utilizadas amostras de quatro acessos diferentes nos estádios de maturação verde e maduro. As repetições do experimento foram estabelecidas utilizando 20 amostras de quatro plantas diferentes para cada acesso, nos diferentes estádios de maturação. As dimensões dos frutos e das ráquillas foram determinadas por meio de medições diretas. As massas e os volumes foram mensurados com o auxílio de balança e proveta, respectivamente. O módulo de elasticidade da ráquila foi mensurado por intermédio de ensaios de tração. O coeficiente de Poisson da ráquila foi determinado pela relação entre as deformações longitudinais e transversais. O ensaio de vibração permitiu a determinação da razão de amortecimento, pelo método do decremento logarítmico. As massas específicas do sistema tenderam a aumentar conforme evolução da maturação dos frutos. Os valores de módulo de elasticidade no estágio de maturação verde foram superiores aos valores para o estágio de maturação maduro. Os valores dos coeficientes de Poisson das ráquillas não foram diferentes significativamente com relação a nenhum dos fatores estudados, estágio de maturação e acessos. A razão de amortecimento encontrada apresentou valores menores que um, caracterizando o sistema como subamortecido.

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

Geometric, physical and mechanical properties of the rachilla fruit system of macaw palm (*Acrocomia aculeata*).

ABSTRACT

The exploration of the macaw culture (*Acrocomia aculeata*) is on the rise due to the great capacity that Brazil presents for its production and because it has a high yield of oil, source of raw material for the production of biodiesel. However, its exploitation is still extractive, which causes difficulties in the management and harvesting process. The objective was to determine the geometric, physical and mechanical properties of the fruit rachilla system from macaw plant, which could serve as a theoretical basis for designers willing to elaborate machines for harvesting macaw fruits using the principle of mechanical vibration. Samples from four different accessions were used in the mature and green maturation stages. The replicates of the experiment were established using 20 samples from four different plants for each access, at different stages of maturation. The dimensions of macaw fruits and rachillas were determined by means of direct measurements. The masses and volumes were measured with the aid of scale and test tube, respectively. The modulus of elasticity of the rachilla was measured by means of traction tests. The Poisson's ratio of the rachilla was determined by the relation between the longitudinal and transverse deformations. The vibration test allowed the determination of the damping ratio by the logarithmic decrement method. The specific masses of the system tended to increase as the fruits matured. The modulus of elasticity values at the green maturation stage were higher than the values for mature maturation stage. The values of the Poisson's ratio of the rachillas were not significantly different in relation to none of the studied factors, stage of maturation and accesses. The damping ratio found presented values smaller than one, characterizing the system as underdamped.

Keywords: biodiesel, modulus of elasticity, damping ratio, Poisson ratio.

1. INTRODUÇÃO

A atual crise econômica teve como uma das consequências a redução no consumo anual de combustíveis. Segundo relatório da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2016), as vendas de combustíveis no mercado brasileiro em 2015 totalizaram 141,811 bilhões de litros, representando uma queda de 1,9% em relação a 2014. Isto também provocou uma redução na comercialização de 4,7% de óleo diesel B na comparação com o mesmo período (ANP, 2016).

Apesar da diminuição do consumo geral de combustíveis, o Brasil ainda importa aproximadamente 11 bilhões de litros/ano de diesel fóssil para abastecer o mercado nacional, isso porque o país não é autossuficiente na produção de diesel (ANP, 2016). O Brasil é um dos países que mais possui alternativas de fonte de energia, uma delas é que o país tem a capacidade de aumentar a produção de biodiesel dos atuais 4,2 bilhões de litros por ano para 10 bilhões de litros por ano, por meio de investimentos adequados, aliviando essa dependência da importação do diesel (ANP, 2016). As vantagens do biodiesel são várias, como, por exemplo, o fato de ser produzido a partir de fontes renováveis de energia, não provocar a necessidade de grandes modificações nos motores a diesel existentes e, emitir poluentes em quantidades e qualidades que causam muito menos danos à natureza (RAMOS *et al.*, 2003; BARNWAL e SHARMA, 2005; LAPINSKIENÉ *et al.*, 2006).

O biodiesel agrega melhorias sociais e ambientais, como fixação do homem nas áreas rurais, geração de emprego e de renda, e a minimização da emissão de gases que promovem mudanças climáticas. O governo brasileiro instituiu, em 2005, a Lei 11.097, que trata sobre a utilização do biodiesel na matriz energética do país, além de estimular uma reformulação das normas que regulamentam as atividades relacionadas ao biodiesel e a realização de leilões para aumento da oferta de combustível. A Lei 11.097 também instituiu a adição, de caráter facultativo, em um percentual de 2%, de mistura de biodiesel ao óleo diesel, durante o período de 2005 a 2007. Esse mesmo percentual passou a ser obrigatório entre os anos de 2008 e 2012 e, a partir de 2013, esse percentual foi obrigatório em um valor de 5%. Em meados de 2014, a adição de biodiesel ao diesel aumentou para 7%. Desde março de 2016, com a publicação da Lei 13.263, o percentual de adição obrigatória, em volume, de biodiesel ao óleo diesel aumentou para 8%.

A necessidade de fontes de combustível mais limpas foram responsáveis para o surgimento e o crescimento de diversas indústrias de produção de biodiesel ao redor do mundo (PRADO, 2015). No Brasil, entre 2008 e 2011, a eventual produção de biocombustível agregou mais de R\$ 12 bilhões ao Produto Interno Bruto (PIB) do país, e, no mesmo período, foi responsável por gerar 86.112 empregos, incluindo a agricultura familiar. Ainda, segundo o levantamento, no mesmo período, o biodiesel fez a balança comercial brasileira economizar R\$ 11,5 bilhões em importação de diesel mineral (APROBIO, 2012).

O Brasil possui diversas alternativas de óleos vegetais para produzir o biodiesel com grande potencial, como a soja, girassol, palma, tungue, amendoim, nabo forrageiro, mamona, microalgas, oiticica e pinhão manso (FERRARI *et al.*, 2005; CARAMORI *et al.*, 2006; TEIXEIRA e MORALES, 2006; TOMINAGA, 2007; MELO *et al.*, 2009). Outra espécie com grande incentivo para transplante em diversas regiões do país, a macaúba (*Acrocomia aculeata*) apresenta grande potencial de fornecimento e produção de óleo por hectare (produtividades variam de 1470 a 4968 kg óleo.ha⁻¹) (TOLÊDO, 2010).

Além da elevada produtividade, o biodiesel proveniente da macaúba atende às especificações da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), que dizem respeito a massa específica a 20 °C, viscosidade cinemática a 40 °C, teor máximo de água, ponto de fulgor mínimo e quanto aos diversos componentes químicos presentes no biodiesel (TOLÊDO, 2010). Esse óleo é proveniente do mesocarpo da macaúba, sendo aproveitado pelas indústrias de combustíveis, cosmética e alimentícia. E, além disso, pode ser ainda aproveitado os farelos da polpa (mesocarpo) e da amêndoa (semente) para serem utilizados na indústria alimentícia humana e animal, e o endocarpo pode ser aproveitado na fabricação de carvão vegetal (MOTOIKE *et al.*, 2013).

A maturação dos frutos entre os cachos da planta de macaúba ocorre de maneira desuniforme. O ponto de colheita é aquele no qual os frutos começam a se desprender do cacho, pois este é um indicativo de que todo o cacho está maduro o suficiente para ser processado. A maturação ocorre com maior frequência entre novembro e fevereiro. E para realização da coleta dos frutos, utiliza-se foice para aparar o cacho, enquanto uma rede envolve-o para evitar a queda dos frutos, ou então a colheita é feita manualmente no solo (CARVALHO *et al.*, 2011).

Acredita-se que o uso de máquinas utilizando o princípio de vibrações mecânicas seja um aprimoramento na colheita de frutos da macaúba. Já que, o princípio

de vibração mecânica é bastante difundido na construção de máquinas de colheita de outras culturas, como: café, laranja e uva (SANDERS, 2005; PEZZI & CAPRARA, 2009; SANTOS *et al.*, 2010).

Define-se vibrações mecânicas como um movimento periódico, ou seja, uma oscilação de uma partícula, um sistema de partículas ou um corpo em torno de uma posição de equilíbrio (RAO, 2008). A colheita por meio de vibrações mecânicas parte da associação de fatores como frequência e amplitude de vibração, transferindo a energia vibracional para realização do desprendimento dos frutos. Assim, com o conhecimento das propriedades modais do sistema, empregam-se frequências e amplitudes adequadas para a realização da colheita (SANTOS *et al.*, 2010). Mas, para a otimização de máquinas que realizam a colheita de frutos por vibração, necessita-se o conhecimento das propriedades mecânicas, geométricas e físicas dos frutos e da planta. Neste contexto, a realização de testes em laboratório, usando máquinas que avaliem o comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila, auxiliarão no dimensionamento e no projeto de máquinas para a colheita (GUEDES, 2011).

As propriedades geométricas, físicas e mecânicas são características intrínsecas de cada material, principalmente quando este é de origem biológica. Materiais biológicos, segundo proposto por SUTEIRO (1998) em seu estudo, podem ser considerados isotrópicos quando o propósito é análise de deformação elástica. Inúmeros fatores como: quantidade de luz, nutrientes, água e variabilidade acabam por alterar de maneira significativa os valores das propriedades encontrados em materiais biológicos.

Estudos para o conhecimento de propriedades geométricas, físicas e mecânicas de diversos sistemas já foram realizados. SANTOS (2008) estudou as propriedades dos frutos do café para simular e avaliar o comportamento dinâmico destes quando submetidos a derriça. VILLIBOR (2012) estudou os parâmetros do sistema fruto-pedúnculo do café para poder modelar este sistema no processo de derriça. COELHO (2014) estudou as propriedades características de cada elemento do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro, com o intuito de estimar o comportamento dinâmico deste sistema quando submetido a vibrações mecânicas. VILLAR (2016) e VELLOSO (2016) estudaram as propriedades geométricas, físicas e mecânicas da macaúba no estágio de maturação verde e tomando a influência dos diferentes estádios de maturação, respectivamente.

Considerando a variabilidade existente entre as plantas e a própria adaptação destas ao meio em que foram inseridas, faz-se necessário a avaliação de cultivares de

regiões diferentes. MOTA (2011) estudou as diferenças existentes entre os frutos da macaúba de quatro acessos diferentes de Minas Gerais submetidos a deficiência hídrica e, constatou a existência de diferenças significativas entre os frutos provindos de regiões diferentes.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar e avaliar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba, além de verificar as influências dos estádios de maturação e dos acessos sobre tais propriedades.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi executada utilizando amostras - cachos de macaúbas - coletadas no Banco de Germoplasma (BAG) pertencente à Universidade Federal de Viçosa, estabelecido em uma área experimental no município de Araponga – Minas Gerais. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, nos períodos entre setembro/2016 a janeiro/2017, período relacionado com o estágio de maturação dos frutos da macaúba – setembro: verdes; janeiro: maduros.

Os cachos coletados eram provenientes de palmeiras pertencentes a diferentes acessos. São eles: Abaeté, MG (BD27); Unaí, MG (BD45); Prudente de Moraes/Matozinhos, MG (BGP29) e Mirandópolis, SP (BGP35).

As amostras foram coletadas sempre pela manhã e os ensaios realizados durante o mesmo dia da coleta, sendo que os cachos foram selecionados de forma aleatória em palmeiras escolhidas conforme disponibilidade no Banco de Germoplasma.

No ensaio de tração, somente as ráquias foram utilizadas como amostras. Já, para o ensaio de vibrações, as amostras foram compostas do sistema fruto-ráquila, também retirados diretamente dos cachos (Figura 1). Todos os ensaios foram realizados com 20 amostras retiradas de maneira aleatória de quatro árvores diferentes do mesmo acesso - BD27, BGP29, BGP35 e BD45 – nos diferentes estádios de maturação verde e maduro. Houve a perda de uma repetição para o acesso BGP35. Cada árvore representa uma repetição para o delineamento estatístico.



Figura 1: Amostras do sistema fruto-ráquila da macaúba com um fruto, retirada dos cachos e utilizadas nos ensaios de vibração.

Tanto para o ensaio de tração quanto para o ensaio de vibrações, utilizou-se ráquias padronizadas com comprimentos de 15 cm, nos diferentes estádios de maturação e acessos. Para o ensaio de tração, as amostras – ráquias – foram engastadas nas duas extremidades da máquina de ensaio, deixando livre cinco cm no terço médio (Figura 2). Já, para os ensaios de vibração, as amostras – sistema fruto-ráquila - foram engastadas na extremidade oposta dos frutos (Figura 3).

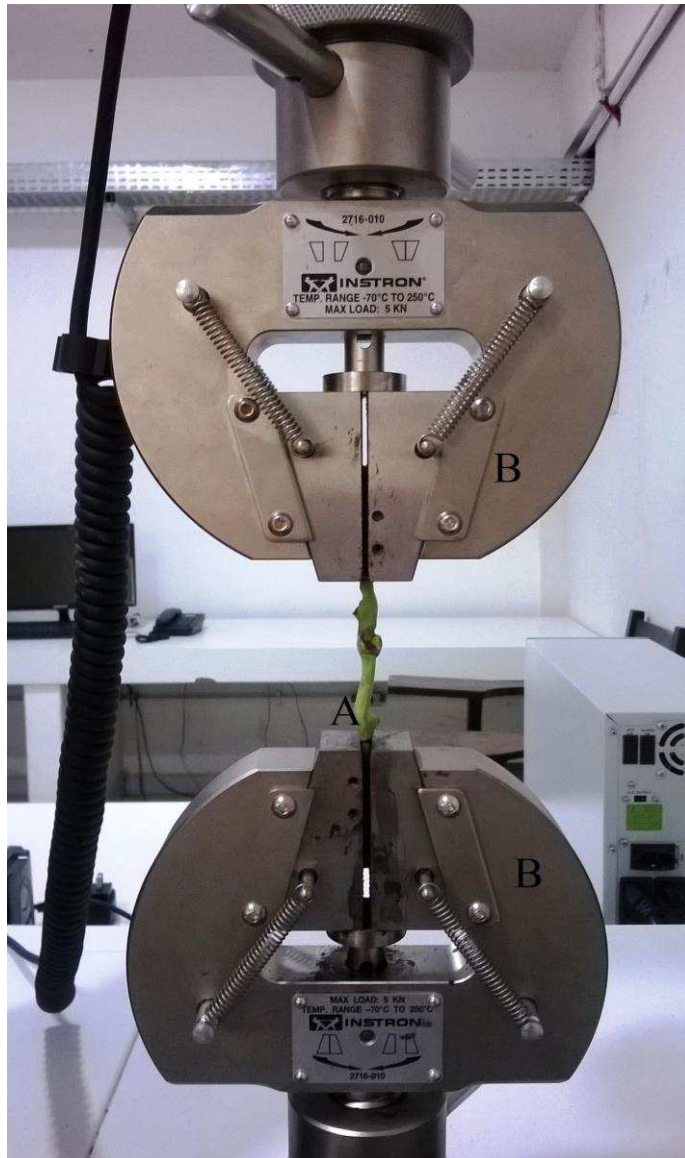


Figura 2: Ráquila (A) engastada, entre as duas garras (B) da uma máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 3365, utilizada nos ensaios de tração.



Figura 3: Amostra do sistema fruto-ráquila da macaúba (A) engastado na extremidade oposta ao fruto, para realização do ensaio de vibração utilizando um vibrador eletromagnético (B) e acelerômetros de alta sensibilidade responsáveis por mensurar a aceleração do sistema (C1) e controlar as especificações do ensaio (C2).

2.1. Dimensões médias

Os diâmetros das ráquillas foram determinados a partir de amostras retiradas dos cachos com aproximadamente 15 cm de comprimento, tomando-se então a medição dos diâmetros das amostras no terço inferior, médio e superior. Posteriormente, as médias foram calculadas para a estimativa de um diâmetro médio para ráquila.

O diâmetro médio dos frutos foi determinado com base nos valores médios medidos de três dimensões características dos frutos, apresentadas na (Figura 4).

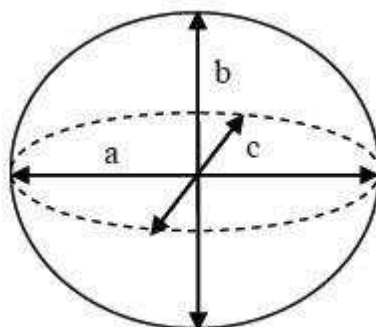


Figura 4: Desenho esquemático do fruto da macaúba, considerando como esferóide tri axial. Em que a, b e c são a maior, a intermediária e a menor dimensão característica do fruto, respectivamente. Fonte: Mohsenin, 1978.

Para cada estágio de maturação e acesso, as principais dimensões da ráquila e do fruto, foram determinadas por meio de paquímetro digital, marca Mitutoyo 500-784, com precisão de 0,02 mm.

2.2. Massa e volume do sistema fruto-ráquila

Para a determinação da massa média das amostras dos sistemas fruto-ráquila, considerando os dois estádios de maturação e os diferentes acessos, foi empregada uma balança de precisão digital com resolução de 0,001 g.

Já o volume médio das amostras dos frutos e das ráquila, em cada estágio de maturação, foram mensurados a partir do método de deslocamento de coluna d'água, utilizando-se uma proveta graduada de 10 mL, com precisão de 0,1 mL. Para os frutos e as ráquilas, as medições dos volumes foram realizadas imergindo cada amostra por vez em água.

2.3. Massa específica

A massa específica média foi determinada para as amostras dos frutos e das ráquilas tomando os valores de massa e volume médios obtidos experimentalmente segundo a Equação (1).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

em que,

ρ = massa específica, g.cm⁻³;

m = massa, g;

V = volume, cm³.

2.4. Módulo de elasticidade

Os módulos de elasticidade foram determinados por meio de ensaios de tração, utilizando uma máquina de ensaio universal da marca Instron, modelo 3365, com capacidade de carga de 5 kN. Os corpos de prova, ráquilas em diferentes estádios de maturação, foram submetidos a uma pré-carga de 2 N com deformações a velocidade constante de 3 mm.min⁻¹. A rotina que determinava e controlava os esforços e as deformações impostas às amostras foram criadas no software *Bluehill3, versão 3.61*, desenvolvido pela Instron. Os corpos de provas foram considerados como corpos com geometrias cilíndricas com áreas constantes.

O ensaio foi realizado, engastando os corpos de provas nas extremidades da máquina de ensaio, e posteriormente impondo a rotina às amostras até a ruptura. Com isso foi possível extrair os valores de cargas máximas e de ruptura, do módulo de elasticidade, e as deformações específicas – considerando o gráfico de tensão *versus* deformação na região de deformação elástica.

2.5. Coeficiente de Poisson

A determinação do coeficiente de Poisson da ráquila, nos diferentes estádios de maturação, foi realizada por meio de medições das variáveis geométricas longitudinais e transversais, considerando os corpos de prova de materiais isotrópicos, conforme a Equação (2) (CALLISTER, 2007).

$$\nu = \frac{-\Delta d}{\Delta l} \quad (2)$$

em que,

ν = coeficiente de Poisson, m.m⁻¹;

Δd = deformação transversal, m;

Δl = deformação longitudinal, m.

Os valores das medições das deformações longitudinais e transversais foram determinados a partir da aplicação da mesma rotina criada para a aquisição dos valores do módulo de elasticidade. Posteriormente a deformação longitudinal pré-estabelecida, 2 mm aproximadamente para todos os ensaios, dos corpos de provas - ráquilas com 15 cm de comprimento – foi possível realizar as medições das deformações ocorridas nas direções longitudinal e transversal.

A realização das medições, na direção longitudinal, se deu com o auxílio de um paquímetro digital, marca Mitutoyo, modelo 500-784, com precisão de 0,02 mm. Já, as medições na direção transversal foram realizadas tomando um micrômetro externo, marca Mitutoyo, com graduação de 0,01 mm e precisão de $\pm 0,002$ mm. Estas últimas medições foram realizadas tomando três pontos de cada amostra: considerando o terço inferior, médio e superior. As deformações longitudinais foram medidas levando-se em consideração a distância entre as garras da máquina de ensaios antes e depois à aplicação do ensaio.

2.6. Razão e coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila

Para se determinar a razão e o coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila, as amostras do sistema fruto-ráquila foram excitadas utilizando um sistema de vibração eletromagnético. Esse sistema foi produzido pela LDS (Ling Dynamic Systems) e era composto por um gerador de sinais COMET USB da marca Dactron, um amplificador LDS PA1000L conectado a uma fonte de campo de alimentação modelo FPS 10L e uma máquina vibradora eletromagnética, modelo V555, M6-CE (Figura 4). Utilizando um sistema de aquisição de dados, modelo NI cDAQ-9174, com 4 canais, foram armazenados os resultados das amplitudes das acelerações adquiridas com a utilização de acelerômetros de alta sensibilidade (100,7 mv/g(Eu)), marca PCB piezotronics, modelo 352C33. Elaborou-se uma rotina utilizando o software LabView (National Instruments, 1998) para eventual aquisição dos dados de aceleração, com uma taxa de aquisição de 500 Hz. A excitação do sistema deu-se, por uma função impulso de onda semi-senoidal.

Os dados de acelerações adquiridos foram utilizados para determinação do coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila. Utilizou-se o método do

decremento logarítmico, a partir da Equação (3) (RAO, 2008).

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{A_1}{A_{1+N}} \right) = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (3)$$

em que,

δ = decremento logarítmico;

N = número de ciclos usados para medição das amplitudes;

A_1 e A_{1+N} = amplitudes consecutivas;

ξ = razão de amortecimento do sistema.

2.7. Análise de dados

Os experimentos foram realizados seguindo um esquema fatorial, com dois fatores – estágio de maturação: verde e maduro; e acessos: BD27, BGP29, BGP35 e BD45 – em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) com quatro repetições.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, em caso de significância, as médias foram comparadas utilizando-se o teste Tukey adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

As análises estatísticas serão realizadas com o auxílio do programa computacional R (R Development CoreTeam 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dimensões médias

As dimensões dos frutos - diâmetro médio - apresentaram diferença significativa com relação à evolução do estágio de maturação verde para maduro, para os acessos BD27 e BGP29, aumento e redução, respectivamente, para os valores médios dos diâmetros dos frutos (Tabela 1). VELLOSO (2016), avaliando apenas os diferentes estágios de maturação não observou valores diferentes significativamente entre si.

Avaliando-se os acessos, percebe-se que ocorreram diferenças significativas entre os valores encontrados para as dimensões dos frutos, independente do estágio de

maturação (Tabela 1). O acesso BGP29, apresentou os maiores valores médios dos diâmetros dos frutos, no estágio de maturação verde, enquanto que o acesso provindo de Unai – BD45 – apresentou os menores valores médios das dimensões dos frutos, também, para o estágio de maturação verde. Para o estágio de maturação maduro, os acessos BD27 e BGP29 apresentaram diferença significativa em comparação com o acesso BD45. A diferença presente nos valores, identificada na análise, pode ser caracterizado por se tratar de acessos de diferentes regiões do país, o que propicia respostas diferentes a adaptabilidade com a região de Araponga.

Tabela 1: Valores médios dos diâmetros dos frutos da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos

Diâmetro Médio (mm)				
Estádio de Maturação	Acessos			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Verde	38,93bC	44,24aA	41,42aB	39,71aC
Maduro	41,96aA	43,13bA	41,50aAB	39,31aB

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra maiúscula, nas linhas e, as seguidas de, pelo menos, uma mesma letra minúscula, nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

Os diâmetros médios das ráquias, dos acessos BD27 e BGP35, apresentaram redução e aumento dos valores médios, respectivamente, com o avanço do estágio de maturação. Assim, como constatado nas dimensões dos frutos, os diâmetros médios das ráquias apresentaram diferenças significativas entre si quando comparando os diferentes acessos (Tabela 2).

Para o estágio de maturação maduro, apenas as ráquias provindas de Mirandópolis/SP – BGP35 – apresentaram valor médio diferente significativamente dos demais acessos estudados (Tabela 2).

Tabela 2: Valores médios dos diâmetros das ráquilas da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos

Estádio de Maturação	Diâmetro Médio (mm)			
	Acessos			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Verde	3,99aA	3,39aB	3,96bA	3,44aB
Maduro	3,60bB	3,59aB	4,48aA	3,36aB

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra maiúscula, nas linhas e, as seguidas de, pelo menos, uma mesma letra minúscula, nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

3.2 Massa e volume do sistema fruto-ráquila

Avaliando-se a interação dos fatores, os valores médios das massas dos frutos, dos acessos BD27 e BD45, aumentaram à medida que o estágio de maturação avançou do verde para o maduro. Os frutos do acesso BGP29 apresentaram os maiores valores de massa para ambos os estádios de maturação (Tabela 3). CICONINI (2012) observou valores de massa dos frutos da macaúba, predominantemente, no intervalo de 12,00 a 23,50 g, para estudo realizado com frutos das regiões de Campo Grande, Corumbá e Aquidauana, municípios pertencentes ao Mato Grosso do Sul. Tais valores mostraram-se inferiores a todos os estudados no presente trabalho, acessos provindos de municípios de Minas Gerais e São Paulo, evidenciando a importância da análise a respeito dos diferentes acessos.

Tabela 3: Valores médios das massas dos frutos da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos

Estádio de Maturação	Massas (g)			
	Acessos			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Verde	35,11bC	47,70aA	39,73aB	35,83bC
Maduro	41,22aB	47,42aA	39,25aC	38,41aC

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra maiúscula, nas linhas e, as seguidas de, pelo menos, uma mesma letra minúscula, nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

Analisando-se os resultados obtidos para os valores de massa das ráquilas, percebe-se que o acesso BGP35 apresentou valores maiores em comparação aos outros acessos, nos diferentes estádios de maturação (Tabela 4).

Os acessos BGP29 e BGP35 apresentaram aumento da massa média das ráquilas com o progresso da maturação. Entretanto, os acessos BD27 e BD45, mostraram tendência à redução dos valores médios das massas das ráquilas (Tabela 4).

Tabela 4: Valores médios das massas das ráquilas da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos

Estádio de Maturação	Massas (g)			
	Acessos			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Verde	2,93aB	2,93bB	3,67bA	2,28aC
Maduro	2,00bC	3,38aB	4,47aA	1,82bC

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra maiúscula, nas linhas e, as seguidas de, pelo menos, uma mesma letra minúscula, nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unaí/MG.

Os valores médios dos volumes dos frutos e das ráquilas não apresentaram diferença significativa para o estudo da interação dos fatores – diferentes acessos e estádios de maturação. Desta forma, fez-se o estudo dos fatores de maneira separada.

Considerando o avanço dos estádios de maturação, percebe-se um aumento nos valores de volume dos frutos e uma redução nos valores de volume das ráquilas (Tabela 5). No estudo realizado por VELLOSO (2016), os valores de massa e volume para os frutos e para as ráquilas não modificaram significativamente com o avanço da maturação dos cachos.

Tomando a análise apenas dos diferentes acessos, os valores dos volumes tanto para os frutos quanto para as ráquilas apresentaram valores diferentes significativamente (Tabela 6). Os valores dos volumes médios das ráquilas, para os acessos BGP29 e BGP35, não diferiram entre si estatisticamente, apresentando valores maiores que os demais acessos. Já, para os volumes dos frutos, o acesso BGP29 apresentou os maiores valores médios, com relação à avaliação dos outros acessos.

Tabela 5: Valores médios dos volumes dos frutos e das ráquias da macaúba nos estádios de maturação verde e maduro

Volume (cm³)		
Estádio de Maturação	Fruto	Ráquila
Verde	32,92b	5,31a
Maduro	35,07a	4,62b

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 6: Valores médios dos volumes dos frutos e das ráquias da macaúba nos diferentes acessos BD27, BGP29, BGP35 e BD45

Volume (cm³)		
Acessos	Fruto	Ráquila
BD27	31,84bc	4,04b
BGP29	38,65a	5,31a
BGP35	34,19b	6,00a
BD45	31,31c	4,51b

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

3.3 Massa específica

Avaliando-se a interação entre os fatores – estágio de maturação e acessos – percebe-se um aumento na massa específica do fruto do acesso BD27 e uma redução nos valores médios de massa específica do fruto do acesso BD45 com o avanço da maturação (Tabela 7). Os valores da massa específica dos frutos para os diferentes acessos no estágio de maturação verde, não diferiram entre si.

SOUZA (2014) encontrou uma queda nos valores de massa específica do óleo da amêndoa da macaúba com o avanço do estágio de maturação. VELLOSO (2016) constatou um aumento da massa específica do fruto da macaúba conforme a evolução do cacho.

Os valores, encontrados por FARIAS (2010), foram da ordem de 1,085 g.cm⁻³, referente aos municípios de Mirabela, Botumirim – norte de Minas Gerais – e, de 1,078 g.cm⁻³ para os municípios de Taquaraçu de Minas e região metropolitana de Belo Horizonte. Valores diferentes dos encontrados no presente estudo, o que reafirma a necessidade e a importância de estudos específicos sobre os diferentes acessos.

Tabela 7: Valores médios da massa específica dos frutos da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos

Massa específica ρ (g.cm ⁻³)				
Estádio de Maturação	Acessos			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Verde	1,17bA	1,17aA	1,18aA	1,21aA
Maduro	1,24aA	1,21aAB	1,14aC	1,17bBC

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra maiúscula, nas linhas e, as seguidas de, pelo menos, uma mesma letra minúscula, nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

O valor médio da massa específica das ráquulas do acesso BD45 apresentou o menor valor quando considerada a análise realizada para os diferentes acessos, considerando os dois estádios de maturação, verde e maduro (Tabela 8). Para os acessos BGP29 e BGP35, os valores médios da massa específica tenderam a aumentar com o avanço do estágio de maturação verde para o maduro.

Tabela 8: Valores médios da massa específica das ráquulas da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos

Massa específica ρ (g.cm ⁻³)				
Estádio de Maturação	Acessos			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Verde	0,60aA	0,54bB	0,64bA	0,47aC
Maduro	0,60aB	0,66aB	0,75aA	0,46aC

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra maiúscula, nas linhas e, as seguidas de, pelo menos, uma mesma letra minúscula, nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

3.4 Módulo de elasticidade

Pela análise fatorial, percebe-se a queda nos valores do módulo de elasticidade com a evolução da maturação nos acessos BD27, BGP29 e BGP35 (Tabela 9). Outras culturas, como a do café, também apresentam redução nos valores do módulo de elasticidade dos frutos e pedúnculos (COELHO *et al.*, 2015).

Percebe-se, ainda, que com relação às ráquias verdes, o módulo de elasticidade para o acesso BD45 difere estatisticamente das outras, apresentando os menores valores de módulo de elasticidade. Todavia, para as ráquias maduras, apenas a BGP29 diferiu dos outros acessos, apresentando valor estatisticamente maior que os demais (Tabela 9).

Tabela 9: Valores médios do módulo de elasticidade das ráquias da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos

Módulo de Elasticidade (MPa)				
Estádio de Maturação	Acessos			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Verde	296aA	319aA	315aA	194aB
Maduro	189bB	275bA	185bB	183aB

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra maiúscula, nas linhas e, as seguidas de, pelo menos, uma mesma letra minúscula, nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unaí/MG.

3.5 Coeficiente de Poisson

Não foram encontradas diferenças significativas na análise estatística dos valores de coeficientes de Poisson das ráquias estudadas. O valor médio encontrado, no presente estudo, foi de 0,37 com coeficiente de variação de 22,80%.

VILLAR (2016), também, encontrou valores médios do coeficiente de Poisson de 0,37, para cachos verdes de macaúba provindos de municípios diferentes do estado de Minas Gerais: Ibiá/ Araxá; Sítio Paraíso/ Belo Horizonte; Três Marias, e; São João Del Rei. VELLOSO (2016) encontrou valores médios do coeficiente de Poisson, na ordem de 0,36 e 0,34, ráquias verdes e maduras, respectivamente.

3.6 Razão e Coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila

Os valores de razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila da macaúba não diferiram entre si para os diferentes estádios de maturação e acessos. O valor médio encontrado, no presente estudo, foi de 0,08 com coeficiente de variação - CV(%) – de 54,22, caracterizando o sistema como subamortecido. VELLOSO (2016) também

observou que os valores de razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila da macaúba não diferiram com o avanço da maturação dos cachos.

Os valores de coeficiente de amortecimento encontrados apresentaram diferenças significativas, quanto ao estudo da interação dos fatores – acessos e estádios de maturação. Para o acesso BD27, observou-se o aumento dos valores médios de coeficiente de amortecimento do sistema com o avanço da maturação, diferentemente dos outros acessos, que não apresentaram valores significativamente diferentes. Além disso, observa-se ainda que os valores médios de coeficiente de amortecimento diferiram com relação aos acessos, apenas no estágio de maturação verde (Tabela 10).

Tabela 10: Valores médios do coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila da macaúba avaliando dois fatores: estádios de maturação e acessos

Coeficiente de amortecimento (Ns.m⁻¹)				
Estádio de Maturação	Acessos			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Verde	0,39bB	0,82aA	0,59aAB	0,56aB
Maduro	0,73aA	0,66aA	0,62aA	0,52aA

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra maiúscula, nas linhas e, as seguidas de, pelo menos, uma mesma letra minúscula, nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unaí/MG.

As figuras 5 e 6 apresentam as amplitudes de aceleração do movimento do sistema fruto-ráquila da macaúba no domínio do tempo para frutos verdes e maduros respectivamente.

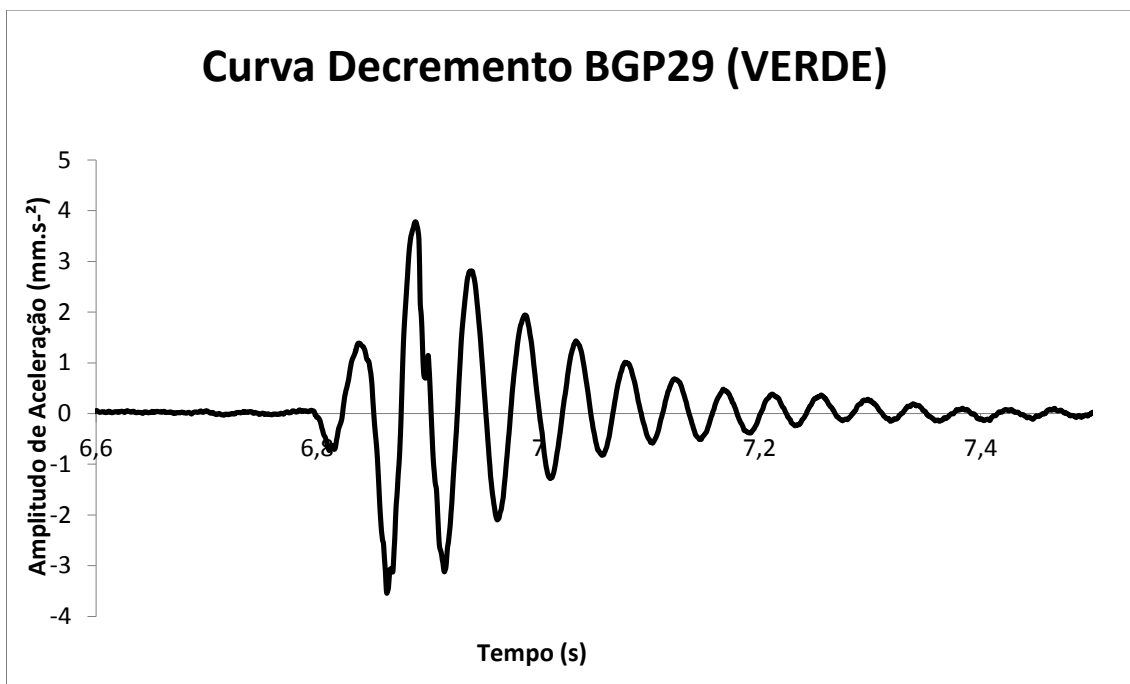


Figura 5: Amplitude de aceleração de aceleração do movimento do sistema fruto-ráquila da macaúba no domínio do tempo para frutos verdes do acesso BGP29 – provindo de Prudentes de Moraes – Matozinhos/MG.

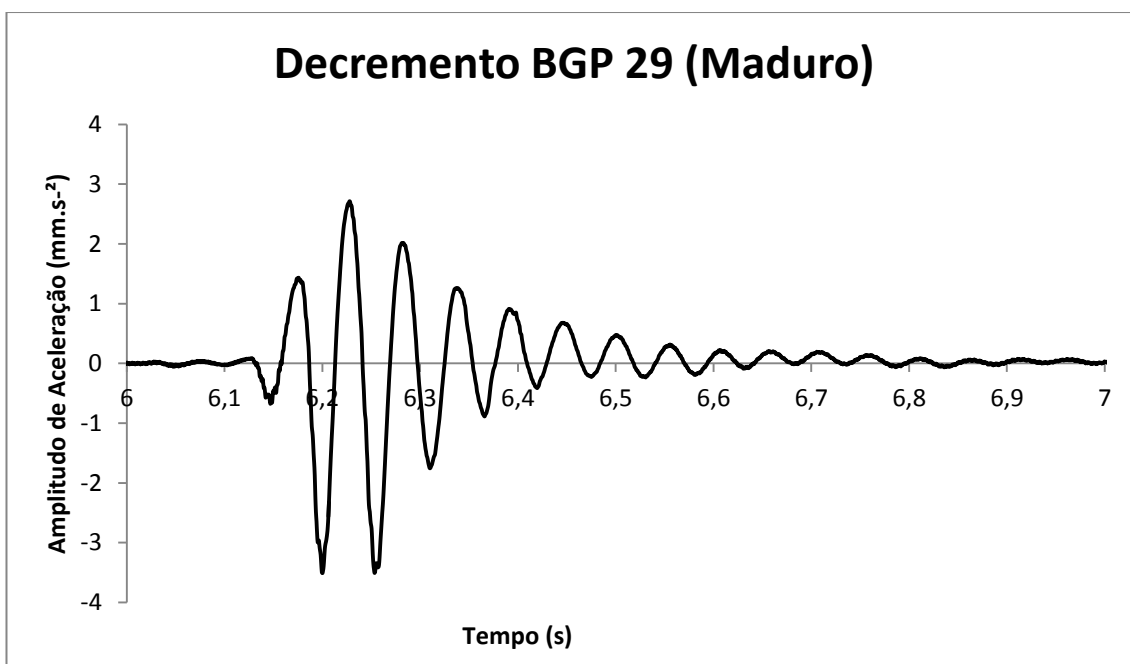


Figura 6: Amplitude de aceleração de aceleração do movimento do sistema fruto-ráquila da macaúba no domínio do tempo para frutos maduros do acesso BGP29 – provindo de Prudentes de Moraes – Matozinhos/MG.

Contudo, percebe-se a necessidade da análise dos diferentes fatores – estágio de maturação e acesso - de maneira separada e sua interação, já que os valores obtidos mostraram que a evolução da maturação e a região de origem de cada fruto promovem

alterações nos valores de resposta, o que permite uma maior adequabilidade para futuros projetos de máquinas.

4. CONCLUSÕES

- Os diâmetros médios dos frutos e das ráquias não diferiram com a evolução do estágio de maturação;
- A massa específica dos frutos e das ráquias apresentaram diferenças significativas, avaliando-se a interação entre os diferentes fatores: acesso e estágio de maturação;
- O Módulo de Elasticidade determinado para as ráquias apresentaram uma tendência de redução com o avanço da maturação, para a maioria dos acessos estudados;
- Os valores do coeficiente de Poisson para a ráquila não diferiram entre si na observação para os diferentes fatores;
- Os valores obtidos para a razão de amortecimento caracterizou o sistema fruto-ráquila da macaúba como subamortecido.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **XI Seminário de Avaliação do Mercado de Derivados do Petróleo e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2016.

APROBIO. **Impactos socioeconômicos da indústria de biodiesel no Brasil**. Estudo encomendado pela associação de produtores de biodiesel do Brasil – APROBIO. Relatório Final. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://aprobio.com.br/wp-content/uploads/2014/10/Aprobio-FIPE-RelatorioFinal-setembro-2012.pdf>.

BARNWAL, B.K.; SHARMA, M.P. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v.9, n.4, p.368-378, 2005.

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

CARAMORI, H. P.; JURANDIR, JUNIOR, Z.; ALFONSI, R. R.; OLIVEIRA, D.; MARIN, R. F.; ASSAD, D. E.; PINTO, S. H. **Zoneamento agroclimático das principais plantas oleaginosas do Brasil**. Anais ... In: Câmara, G. M. S. Agronegócio

de Plantas Oleaginosas: matérias primas para biodiesel. Piracicaba: ESALQ, 2006; p. 26-27.

CARVALHO, K. J.; SOUZA, A. L.; MACHADO, C. C. **Ecologia, Manejo, Silvicultura e Tecnologia da Macaúba**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2011. 25p.

CICONINI, G. **Caracterização de frutos e óleo de polpa de macaúba dos biomas do cerrado e pantanal do estado de Mato Grosso do Sul, Brasil**. 2012. 128f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Curso de Pós-graduação em Biotecnologia, Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande – MS, 2012.

COELHO, A. L. F. **Comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro submetido a vibrações mecânicas**. 2014. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2014.

COELHO, A. L. F.; SANTOS, F. L.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M. Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 286-292, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Matriz energética: cenários, oportunidades e desafios CNI**. Brasília: CNI, 2007. 82p.

FARIAS, T. M. **Biometria e processamento dos frutos da macaúba (*Acrocomia spp*) para a produção de óleos**. 2010. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2010.

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.

GUEDES, D. M. **Efeito da utilização de frequências de vibração na faixa de 35 a 55 Hz sobre a eficiência de derriza do café**. 2011. 52f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2011.

LAPINSKIENÉ, A. *et al.* Eco-toxicological studies of diesel and biodiesel fuels in aerated soil. **Environmental Pollution**, v.142, n.3, p.432-437, 2006.

MELO, J. 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.

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

MOTA, C. S. **Característica fotossintéticas da palmeira macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart.) submetidas a deficiência hídrica.** 2011. 74f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) – Curso de Pós-graduação em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2011.

MOTOIKE, S. Y. *et al.* **A cultura da macaúba: implantação e manejo de cultivos racionais.** Viçosa, MG. Ed. UFV, 2013. p. 9.

PRADO, J. N. do. **Estudo sobre o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). Uma análise sobre os municípios produtores de soja e as cooperativas de agricultura familiar.** 2015. 103f. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Economia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, 2015.

PEZZI, F.; CAPRARA, C. Mechanical grape harvesting: investigation of the transmission of vibrations. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 3, p. 281-286, 2009.

RAMOS, L. P. *et al.* **Biodiesel: Um projeto de sustentabilidade econômica e sócio ambiental para o Brasil.** Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento. Revista Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento, v. 3s, p. 28-37, 2003.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations. Fourth edition.** New York, EUA. Addison-Wesley Publishing Company, 2008. 464p.

SANDERS, K. F. Orange Harvesting Systems Review. **Biosystems Engineering**, v. 90, n. 2, p. 115-125, 2005.

SANTOS, F. L. **Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derrça.** 2008. 136f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2008.

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; RESENDE, R.C. Efeito da frequência e amplitude de vibração sobre a derrça de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 425-431, 2010.

SOUZA, G. K.; PEREIRA, N. C. **Avaliação sazonal da massa específica da amêndoa de macaúba (*Acrocomia totai*).** I Congresso Brasileiro de Macaúba – Consolidação da Cadeia Produtividade, 2013, Patos de Minas.

SUTEIRO, R. **Caracterização de constantes elásticas de materiais isotrópicos por holografia óptica eletrônica combinada ao método de ressonância mecânica.** 1998, 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Metrologia Científica e Industrial). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 1998.

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.

TOLÊDO, D. de P. **Análise técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão-manso como alternativas de agregação de renda na cadeia produtiva de biodiesel.** 2010. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2010.

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

VELLOSO, N. S. **Propriedades físicas e comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba (*Acrocomia Aculeata*).** 2016. 56f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2016.

VILLAR, F. M. M. **Propriedades físicas, geométricas, mecânicas e modais do sistema fruto-ráquila da macaúba.** 2016. 74f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2016.

VILLIBOR, G. P. **Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de derriça de café.** 2012. 160f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2012.

Capítulo II: Estudo do comportamento dinâmico do sistema frutó- ráquila da macaúba

Estudo do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba

RESUMO

A busca por fontes alternativas de energia alavancou o estudo sobre diversas culturas, dentre estas, a macaúba destaca-se pela ampla distribuição territorial em todo cenário nacional, além do grande potencial de fornecimento e produção de óleo por hectare. Entretanto, a macaúba é uma espécie, costumeiramente, relacionada ao sistema extrativista, o que propicia uma colheita com baixa eficiência. Assim sendo, neste trabalho objetivou-se analisar o comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba submetido às vibrações mecânicas, como fonte de conhecimento para posterior desenvolvimento de máquinas de colheita de macaúba. O sistema fruto-ráquila da macaúba foi modelado para os diferentes estádios de maturação e acessos. As frequências naturais e os modos de vibração foram determinados empregando-se o método de elementos finitos estocástico, adotando a massa específica e o módulo de elasticidade do sistema como variáveis aleatórias, obtendo assim um conjunto de dados a respeito das frequências naturais com base na variabilidade das propriedades do sistema. Concluiu-se com este trabalho que os valores das frequências naturais, simulada e experimental, sofreram redução com a evolução do estágio de maturação verde para o estágio de maturação maduro. Os modos de vibração extraídos, com características de deslocamento pendular foram coincidentes para os diferentes estádios.

Palavras-chave: método dos elementos finitos, frequências naturais, modos de vibração.

Study of the dynamic behavior of the rachilla fruit system of macaw palm

ABSTRACT

The search for alternative energy sources has boosted the study of several crops. Among them, macaw palm stands out for the wide territorial distribution in every national scenario, besides the great potential of supply and production of oil per hectare. However, macaw is a species, usually related to the extractive system, which provides a harvest with low efficiency. Thus, the objective of this work was to analyze the dynamic behavior of the rachilla fruit system of the macaw subjected to mechanical vibrations, as a source of knowledge for the later development of macaw harvesting machines. The rachilla fruit system was modeled for the different stages of maturation and accesses. Natural frequencies and vibrations modes were determined using the stochastic finite element method, adopting the specific mass and modulus of elasticity of the system as random variables, thus obtaining a set of data regarding natural frequencies based on variability Properties of the system. It was concluded with this work that the values of natural frequencies, simulated and experimental, were reduced with the evolution from the green maturation stage to the mature maturation stage. The vibration modes extracted, with pendulum displacement characteristics were coincident for the different stages.

Keywords: Finite element method, natural frequencies, modes of vibration.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o diesel importado pelo Brasil, em setembro de 2016, foi estimado em aproximadamente 4,842 milhões de barris. Isto equivale a uma alta de 47% quando comparado ao mesmo mês do ano passado. Assim, com base na crescente demanda e fundamentado em argumentos econômicos, como reduzir a dependência do diesel importado; argumentos ambientais, como auxiliar na diminuição das emissões de gases tóxicos na atmosfera; e argumentos sociais, pela oportunidade de crescimento de produção e capital para pequenos produtores, que o incentivo a pesquisa e a produção de biodiesel têm aumentado consideravelmente nos últimos anos no Brasil.

Deste modo, desde 2005, ano em que foi posto em execução o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) que auxilia e regulamenta o mercado de biocombustível no país, o Brasil tem aumentado, gradativamente, o percentual de biodiesel misturado ao diesel comercializado, em todo território nacional (LEITE *et al.*, 2013). Com esse incentivo do Governo brasileiro, diversas novas culturas, como a macaúba, foram estudadas e avaliadas melhor com o intuito de aumentar a produção de biodiesel no país.

A macaúba, *Acrocomia aculeata*, é considerada a palmeira de maior disseminação no território brasileiro, com uma maior concentração no cerrado (CICONINI, 2012; DURÃES, 2008). RAMOS (2007) elucida sobre o aproveitamento da macaúba por parte de algumas comunidades com distintos fins, tais como as folhas para nutrição animal, o endocarpo para produção de carvão vegetal, e a polpa e amêndoa dos frutos para produção de farinha. A macaúba possui ainda grande potencial no de fornecimento e produção de óleo por hectare (produtividades estimadas entre 1470 a 4968 kg óleo.ha⁻¹) (TOLÊDO, 2010).

A macaúba é uma espécie, costumeiramente, relacionada ao sistema extrativista, sendo muito aproveitada na agricultura familiar, já que é, em sua maioria, comercializada de maneira exordial, nas regiões brasileiras de sua produção (NUCCI, 2007). Com isso sua colheita, em grande parte, é feita através do corte direto dos cachos e extração dos frutos de maneira manual. Portanto, é visto que para aumentar os níveis de qualidade e quantidade dos produtos, advindos da macaúba, há necessidade de se pensar em artifícios para melhorar não somente a produção, mas também a colheita.

Com isto, facilitando-a para o produtor e, fazendo-a menos desgastante para os frutos, melhorando assim a característica final dos produtos advindos da macaúba.

Na colheita mecanizada o princípio de vibrações mecânicas é bastante difundido e empregado, sendo utilizado em diversas culturas como damasco, laranja, pistache, café, azeitona e uva. Tal princípio se baseia na transferência de energia vibracional para o fruto, com a finalidade de promover o seu destacamento (SRIVASTAVA *et al.*, 1996; ERDOGAN *et al.*, 2003; SANDERS, 2005; SESSIZ e OZCAN, 2006; SOUZA *et al.*, 2006; POLAT *et al.*, 2007; PEZZI e CAPRARA, 2009; SANTOS *et al.*, 2010). Segundo PARCHOMUNCHUK e COOKE (1971), o desprendimento se dá através de forças inerciais, resultantes do movimento dos frutos, que se tornaram maiores que as forças de tração necessárias para a remoção dos frutos.

Para se analisar o comportamento dinâmico de qualquer sistema, faz-se necessário conhecer as propriedades dinâmicas, tais como, as frequências naturais, o grau de amortecimento e os modos de vibração (SANTOS, 2009). Por conseguinte, para o desenvolvimento de máquinas de colheita por vibrações mecânicas, de acordo com ARISTZ *et al.* (2003), é de fundamental importância a determinação das frequências naturais do sistema, visto que, quando o conjunto é excitado em uma de duas frequências naturais, isto possibilita uma máxima resposta do sistema, o que acaba por promover o desprendimento do fruto.

Porém, existem diversos aspectos que podem influenciar de maneira significativa nos resultados da mecanização de diferentes culturas, assim como a da macaúba. SRIVASTAVA *et al.* (1996) destacam a ampla variabilidade existente entre as plantas de uma mesma cultura, a qual pode ser modelada por diferentes estruturas, tamanhos, formas e densidades.

Todavia, devido ao elevado número de fatores e à elevada dificuldade em se desenvolver sistemas para colheita, têm-se utilizado a simulação numérica concomitantemente a modelagem matemática como alternativa para melhor compreensão e análise do comportamento dinâmico de inúmeras culturas. Por isso, é fundamental o conhecimento e utilização de artifícios numéricos para o eventual desenvolvimento de sistemas de colheita (SANTOS, 2008).

Um dos métodos de simulação numérica mais utilizado na resolução de problemas com alto grau de complexidade é o Método de Elementos Finitos (MEF). Utilizando-se este método, obtém-se uma formulação que permite analisar automaticamente sistemas complexos ou irregulares (TAVARES, 1998).

A análise pelo Método de Elementos Finitos pode ser feita de duas maneiras: determinística ou estocástica. A análise determinística é aquela na qual se tem um conjunto de entradas conhecido, não envolvendo cada parte do problema a ser solucionado, do qual resultará um único conjunto de saídas (FISHMAN, 1973). A análise determinística pode ser empregada em diversas aplicações, como determinar as propriedades modais do sistema fruto-ráquila da macaúba (VILLAR, 2016; VELLOSO 2016); analisar a estabilidade de taludes por SANDOVAL (2012); e solucionar problemas de aterramento elétrico (SILVA, 2006).

A análise estocástica se baseia no conceito de possuir uma ou mais variáveis aleatórias como entrada, resultando em saídas que são também aleatórias. A análise estocástica se aproxima mais da realidade, pois ao se realizar um processo de amostragem das variáveis aleatórias, consegue-se reproduzir, o mais fielmente possível, a realidade (FISHMAN, 1973). A aleatorização dos valores é efetuada tomando-se modelos que descrevam de maneira eficaz a distribuição de probabilidade dos parâmetros em questão (STEFANOU, 2009).

A técnica de análise estocástica foi utilizada, por exemplo, para analisar o comportamento dinâmico de sistemas fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro submetido a vibrações mecânicas (COELHO, 2014); para avaliar a influência dos componentes de fechamento que não fazem parte da estrutura principal, nos modos de vibrações de passarelas (SANTOS, 2009); para estimar os parâmetros modais de uma estrutura tipo treliça e identificar modos de vibração próximos (FREITAS, 2008); para analisar o comportamento das tensões e deformações com a variabilidade dos valores das propriedades do material para próteses craniofaciais utilizando o crânio de um *Macaca fascicularis* (BERTHAUME *et al.*, 2012); e para simular a carga de ruptura de uma placa fina de aço (NOGUEIRA e REAL, 2012).

Desse modo, como a macaúba se mostra como uma cultura que poderá ser explorada de maneira mecanizada e com forte potencial na produção de biodiesel é visto a necessidade de prover conhecimento para ser aplicado nas etapas de cultivo, principalmente no que diz respeito à colheita. Assim, objetivou-se nesse projeto a determinação de um conjunto de conhecimentos voltados à modelagem do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba - frequências naturais (autovalores) e modos de vibração (autovetores) - que poderão servir de auxílio aos projetistas de máquinas que utilizem vibrações mecânicas para realização da colheita dos frutos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. As plantas utilizadas, como referência para este estudo, foram providas do Banco de Germoplasma (BAG) pertencente à Universidade Federal de Viçosa, estabelecido em uma área experimental no município de Araponga – Minas Gerais.

A metodologia empregada neste trabalho foi baseada nos métodos utilizados por COELHO (2014), para a análise do comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro.

2.1. Modelagem da geometria

A modelação dos sistemas fruto-ráquila da macaúba foi realizada com o propósito de se obter informações sobre as frequências naturais (autovalores) e os respectivos modos de vibração (autovetores) pelo método de elementos finitos estocástico. Os modelos analisados tomaram como especificidade os diferentes estádios de maturação – verde e maduro - e acessos.

Os cachos coletados, com as características que foram utilizadas no ensaio, eram provenientes de palmeiras pertencentes a diferentes acessos. São eles: Abaeté, MG (BD27); Unaí, MG (BD45); Prudente de Moraes/ Matozinhos, MG (BGP29) e Mirandópolis, SP (BGP35).

Os valores das propriedades geométricas, físicas e mecânicas, obtidos experimentalmente, serviram de base para geração das geometrias do sistema (Tabelas 11 e 12). A geometria foi elaborada com o auxílio do *software* CAD-3D *SolidWorks* 2011 (Figura 7).

Tabela 11: Propriedades geométricas e físicas dos frutos para os diferentes acessos e estágio de maturação – verde e maduro

Características Fruto						
Acesso	Estádio de Maturação					
	Verde			Maduro		
	Diâmetro Médio (mm)	Massa Específica (g.cm⁻³)		Diâmetro Médio (mm)	Massa Específica (g.cm⁻³)	
Média		Desvio Padrão	Média		Desvio Padrão	
BD27	38,93	1,17	0,03	41,96	1,24	0,09
BGP29	44,24	1,17	0,08	43,13	1,21	0,10
BGP35	41,42	1,18	0,16	41,50	1,14	0,12
BD45	39,71	1,21	0,04	39,31	1,17	0,10

BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

Tabela 12: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas das ráquias para os diferentes acessos e estágio de maturação – verde e maduro

Características – Ráquila							
Acessos	Estádio de Maturação	Diâmetro Médio (mm)	Massa Específica (g.cm⁻³)		Módulo de Elasticidade (MPa)		Coefficiente de Poisson
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
			BD27	Verde	3,99	0,60	
	Maduro	3,60	0,60	0,14	189	0,83	0,41
BGP29	Verde	3,39	0,54	0,10	319	0,85	0,50
	Maduro	3,59	0,66	0,17	275	0,82	0,45
BGP35	Verde	3,96	0,64	0,13	315	0,89	0,39
	Maduro	4,48	0,75	0,13	185	0,89	0,36
BD45	Verde	3,44	0,47	0,07	194	0,88	0,38
	Maduro	3,36	0,46	0,12	183	0,92	0,33

BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

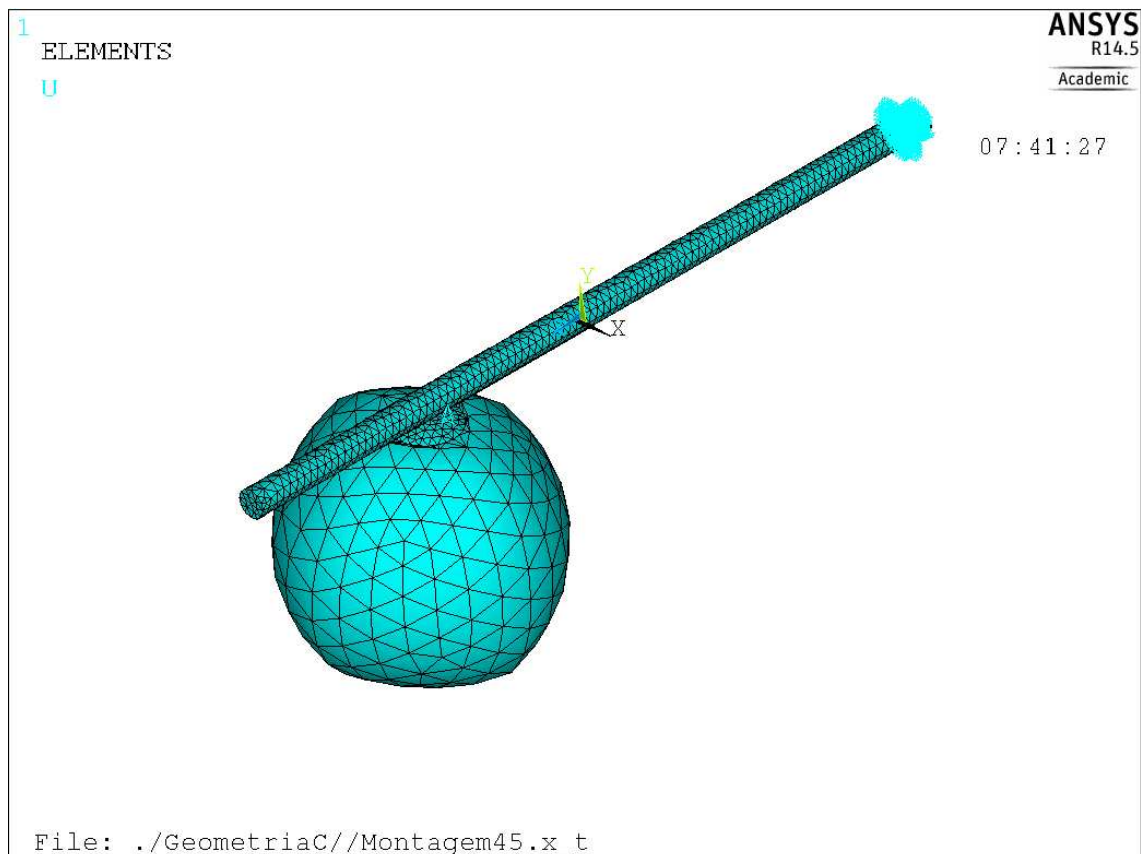


Figura 7: Geometria modelada para simulação do sistema fruto-ráquila da macaúba para o acesso BD45 – provindo de Unaí/MG.

2.2. Simulação Estocástica

Das etapas que foram elaboradas pelo programa computacional *Ansys Mechanical APDL*, versão 14.5, destacam-se as etapas de discretização das geometrias, estabelecimento das propriedades geométricas, físicas e mecânicas e das condições de contorno, solução e visualização dos resultados. Todas as simulações foram realizadas em uma estação de trabalho com processador Intel® Xeon 3,5 GHz, possuindo sistema operacional Linux centos 6.3.

A discretização das geometrias se deu a partir da utilização de elementos tetraédricos com dez nós. A definição da malha utilizada foi feita por meio de testes de refinamento de malha, elaborada a partir de uma pré-simulação, que considerou a avaliação da qualidade dos resultados com relação ao tempo gasto para o processamento dos dados, culminando assim na melhor escolha entre a qualidade do processamento computacional e em um menor custo operacional. O teste de refinamento foi realizado com o sistema no estágio de maturação verde e acesso BD 27 (Figura 8).

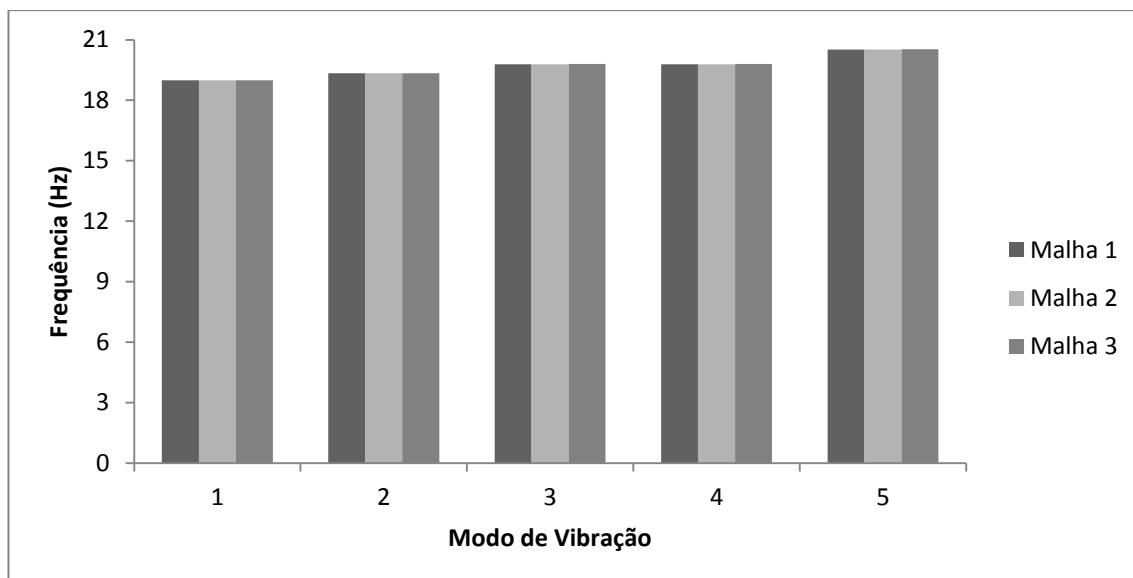


Figura 8: Valores das frequências naturais de cinco modos de vibração do sistema fruturáquila da macaúba simulado, empregando três refinamentos de malha.

Os refinamentos resultaram em geometrias discretizadas compostas por 27046, 71890 e 102260 elementos tetraédricos. As diferenças percentuais para os cinco modos de vibrações apresentados, tomando o refinamento 2 em comparação com o refinamento 1, foram de 0,03; 0,01; 0,05; 0,07 e 0,02 %, respectivamente, com um aumento de 27,07% no tempo de processamento. Já, com relação entre as diferenças entre o refinamento 3 e o refinamento 2, pode-se observar 0,04; 0,01; 0,07; 0,02 e 0,07 % com um aumento no tempo de processamento de 137,92 %.

Dessarte, neste trabalho empregou-se elementos dimensionados a partir do refinamento 1, já que o refinamento das malhas não variou significativamente as frequências naturais simuladas, porém reduziu consideravelmente o tempo e, conseqüentemente, o gasto com processamento.

Para a utilização do método de elementos finitos estocástico, os parâmetros, módulo de elasticidade e massa específica da ráquila e do fruto, comportam-se como variáveis aleatórias. Conquanto, os parâmetros dimensionais, assim como a razão de Poisson, tiveram o comportamento de valores constantes, em todos os modelos.

As variáveis aleatórias foram constituídas por oito conjuntos, possuindo cada, cinquenta valores para o módulo de elasticidade e para a massa específica. Os agrupamentos de valores foram determinados com base nos valores médios e os respectivos desvios padrões de cada parâmetro (Tabela 20 e 21). A elaboração desses agrupamentos aconteceu por meio de uma operação que é capaz de gerar números aleatórios, utilizando a Equação (4).

$$V_i = V_0 + s(2N_i - 1) \quad (4)$$

em que,

V_i = i-ésimo valor aleatório;

V_0 = valor médio do parâmetro;

s = desvio padrão do parâmetro;

N_i = i-ésimo número aleatório, com valores entre 0 e 1, determinado a partir do algoritmo proposto PRESS *et al.* (1992).

Todo conjunto de valores correspondente ao módulo de elasticidade foi relacionado ao conjunto de valores de massa específica, gerando assim, uma iteração com 2500 modelos diferentes. A determinação dos parâmetros de entrada para cada modelo foi gerada por meio de um algoritmo elaborado em linguagem FORTRAN 90 e compilado por meio de um compilador g95.

Todos os sistemas elaborados, neste trabalho, foram modelados com diversos graus de liberdade e sujeitos à vibração livre não amortecida. A Equação (5) (RAO, 2008), apresentada na forma matricial, descreve a dinâmica dos sistemas avaliados.

$$[M]\{\ddot{v}\} + [K]\{v\} = \{0\} \quad (5)$$

em que,

$[M]$ = matriz inercial, kg;

$\{\ddot{v}\}$ = vetor aceleração, $m.s^{-2}$;

$[K]$ = matriz rigidez, $N.m^{-1}$;

$\{v\}$ = vetor deslocamento, m.

O algoritmo selecionado no *ANSYS Mechanical APDL*, para a solução de comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila, foi o método numérico de Block Lanczos, com o intuito de solucionar problemas de autovalores e autovetores, fornecendo assim os valores das frequências naturais e modos de vibração, respectivamente.

O método de Monte Carlo foi utilizado com o intuito de solucionar o modelo

estocástico. Dessa forma, a partir dos resultados gerados, foi possível determinar as características modais do sistema fruto-ráquila da macaúba, tomando os diferentes estádios de maturação e acessos.

2.3. Validação do Modelo

A validação do modelo tridimensional elaborado e implementado, feito com o intuito de reproduzir um sistema real contínuo, se deu com a observação das respostas reais analisadas em ensaios laboratoriais tomando como base a determinação do desvio padrão existente entre a frequência natural experimental e a simulada, apresentada pela Equação (6).

$$Desv = 100 \frac{|f_{exp} - f_{mef}|}{f_{exp}} \quad (6)$$

em que,

$Desv$ = desvio, %;

f_{exp} = frequência natural média obtida experimentalmente, Hz;

f_{mef} = frequência natural obtida pelo método de elementos finitos, Hz.

Um sistema de vibração da LDS (Ling Dynamic Systems) composto por um gerador de sinais, um amplificador e um vibrador eletromagnético permitiu a excitação vibracional do sistema real. Os corpos de prova foram submetidos a uma varredura de frequências na faixa de 10 Hz a 40 Hz, taxa de varredura de 2 oitavas/min, deslocamento de 1 mm de pico a pico e duração de 90 segundos. As variações de amplitudes foram determinadas por meio de acelerômetros de alta sensibilidade (100,7 mv/g(Eu)). Para aquisição dos dados de aceleração foi elaborada uma rotina no software LabView (National Instruments, 1998), com taxa de amostragem de 500 Hz. Tal rotina foi responsável por comandar o sistema de aquisição de dados, modelo NI cDAQ-9174, com 4 canais, que foi utilizado como receptor dos sinais dos acelerômetros.

Por fim, todos os resultados foram processados no software MATLAB[®], com o intuito de passar todos os dados obtidos no domínio do tempo para o domínio da frequência utilizando a Transformada Rápida de Fourier – FFT, possibilitando assim a

comparação entre os picos obtidos experimentalmente e os picos resultantes da simulação.

Os ensaios foram realizados com 20 amostras retiradas de maneira aleatória de quatro árvores diferentes do mesmo acesso - BD27, BGP29 e BD45 – e, de três árvores diferentes – BGP35 - nos diferentes estádios de maturação verde e maduro. Cada árvore representa uma repetição para o delineamento estatístico.

2.4. Análise

Determinou-se a frequência natural média simulada do sistema fruto-ráquila da macaúba para cada cenário diferente – acesso e estágio de maturação – além de, os respectivos desvios padrão.

Os modos de vibração, para cada cenário, foram analisados a partir de sua deflexão modal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As frequências experimentais foram adquiridas a partir do espectro de frequência gerado com a Transformada Rápida de Fourier – FFT (Figura 9).

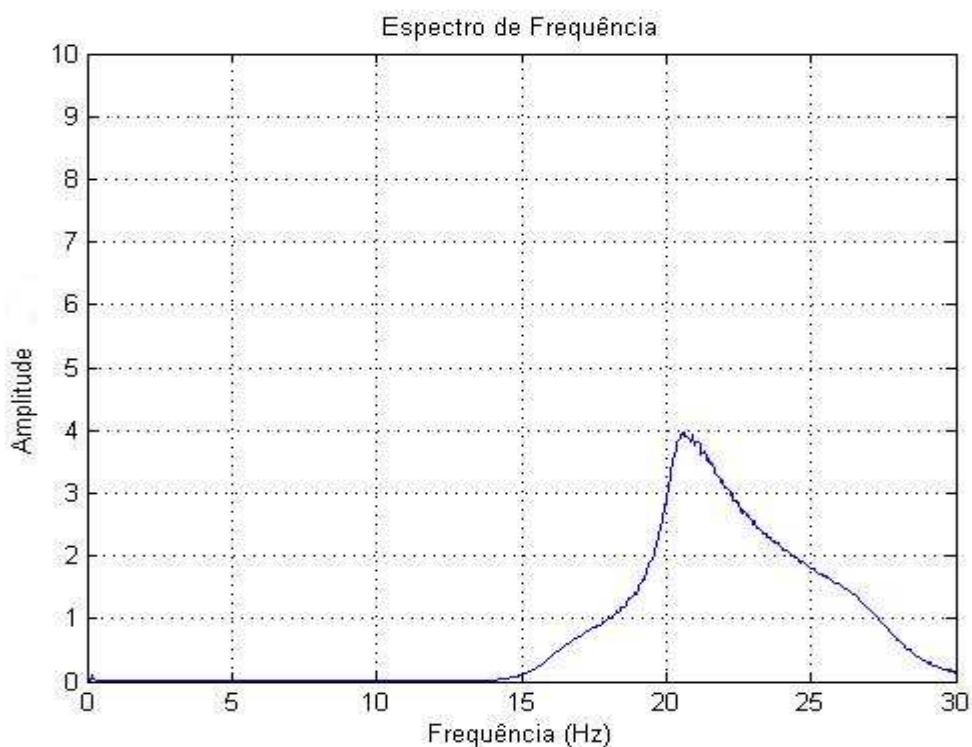


Figura 9: Espectro de frequência para o sistema fruto-ráquila da macaúba no estágio de maturação verde do acesso BD27 – provindo de Abaeté/MG.

Os valores médios das frequências naturais experimentais e simuladas, para os diferentes acessos e estádios de maturação são apresentados a seguir (Tabela 13).

Tabela 13: Valores médios da frequência natural experimental e simulada, para os diferentes acessos e estádios de maturação, considerando o terceiro modo de vibrar

	Frequência (Hz)							
	Verde				Maduro			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Experimental	21,56	24,34	28,15	29,96	18,02	19,17	19,38	28,31
Simulado	23,08	23,89	29,69	27,52	17,91	19,95	20,74	26,33
Desvio (%)	7,05	1,84	5,47	8,14	0,61	4,06	7,02	6,99

BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

As frequências naturais obtidas, tanto experimentalmente quanto simuladas, tiveram tendência reduzirem com a evolução do estágio de maturação de verde para maduro (Tabela 13). Tal comportamento, também foi observado por VELLOSO (2016). Resultados similares foram verificados para outras culturas, como a do café (SANTOS, 2008; COELHO, 2014).

Os dados experimentais obtidos, utilizados como parâmetros de entrada na modelagem e simulação do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba, apresentaram um aumento da massa específica do sistema e uma redução nos valores do módulo de elasticidade com a evolução da maturação.

Mecanicamente, o fato da massa de um sistema qualquer aumentar e, a rigidez do mesmo diminuir, implica na redução dos valores de frequência natural do sistema analisado. VILLIBOR (2012), avaliando o comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo do café, verificou que a variação da massa e do volume dos componentes estudados, influenciava diretamente na resposta, posto que, as frequências naturais de qualquer sistema, são vinculadas aos valores de massa e rigidez.

Analisando a fisiologia da planta, a redução da firmeza durante o amadurecimento, segundo RODRIGUEZ & ONO (2001), é atribuída à perda da integridade da parede celular. A deterioração das moléculas poliméricas constituintes da parede celular geram diversas alterações na parede celular do material biológico, levando-o a perda de rigidez (TUCKER, 1993).

A diferença entre os valores das frequências naturais, para os diferentes acessos, é esclarecida devida a própria heterogeneidade da cultura estudada. A macaúba é uma espécie ainda pouco estudada.

Avaliando os valores de desvio padrão, encontrados pelo Método de Elementos Finitos estocástico, percebe-se que o valor médio do desvio para todos os cenários estudados foi de 5,15%. VELLOSO (2016) e VILLAR (2016), utilizando análise determinística, encontraram valores de desvio médio na ordem de 18,32% e 28,99%, respectivamente. Dessa forma, pode-se aferir que o método estocástico, apresenta-se, de fato, mais eficiente com relação a aproximação dos resultados experimentais aos valores dos resultados simulados.

Os modos de vibração não diferiram com relação aos estádios de maturação, como exemplificado na Figura 10 – representado pelo acesso BD27. Contudo, percebe-se uma mudança nos valores do deslocamento. Isto ocorre devido à queda nos valores da rigidez do sistema.

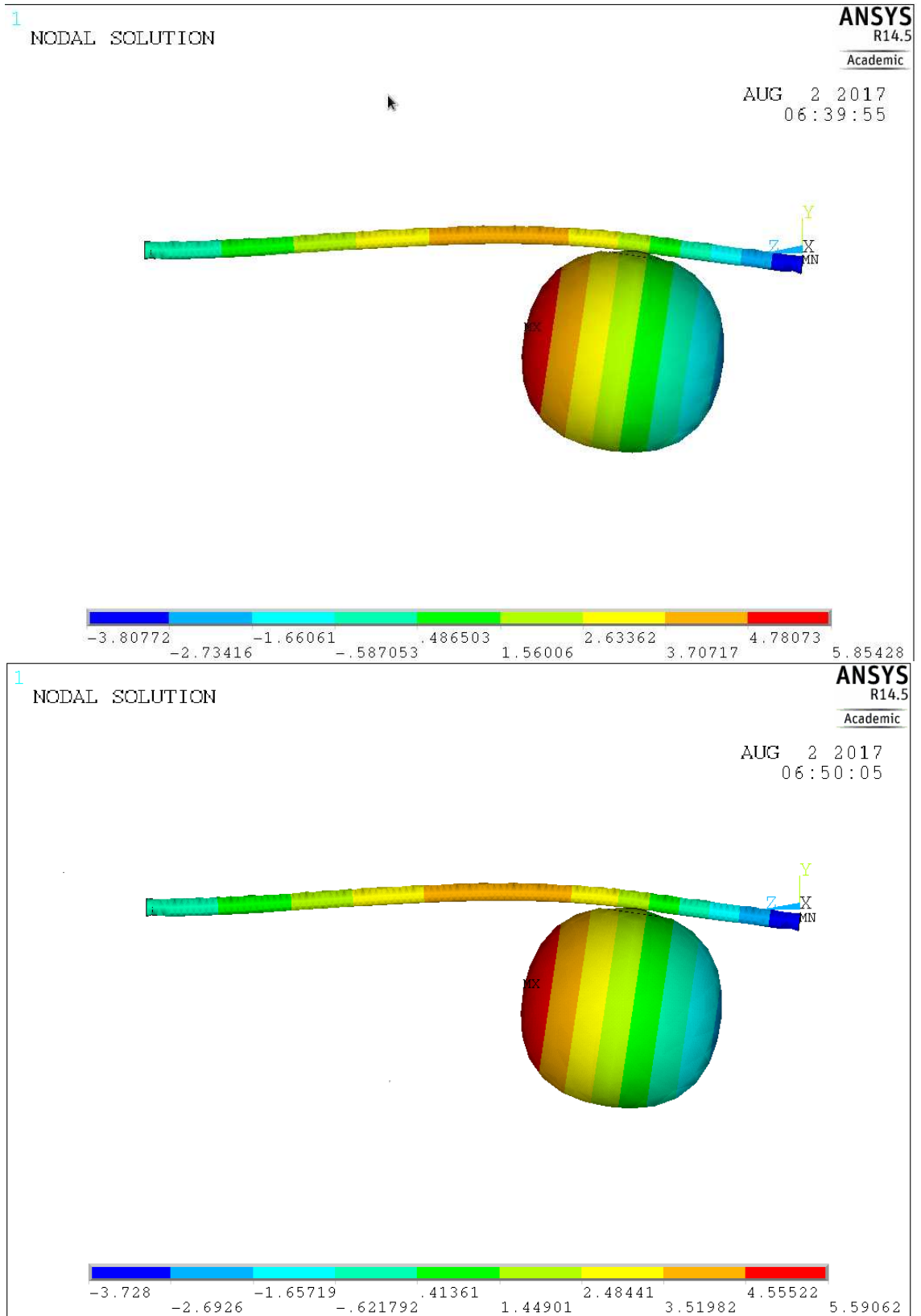


Figura 10: Deslocamentos observados do acesso BD27, no quinto modo de vibração, nos diferentes estádios de maturação, verde e maduro, respectivamente.

O modo de vibração tido como pendular não variou entre os acessos e nem entre os diferente estádios de maturação, sendo o quinto modo de vibração (Figura 11).

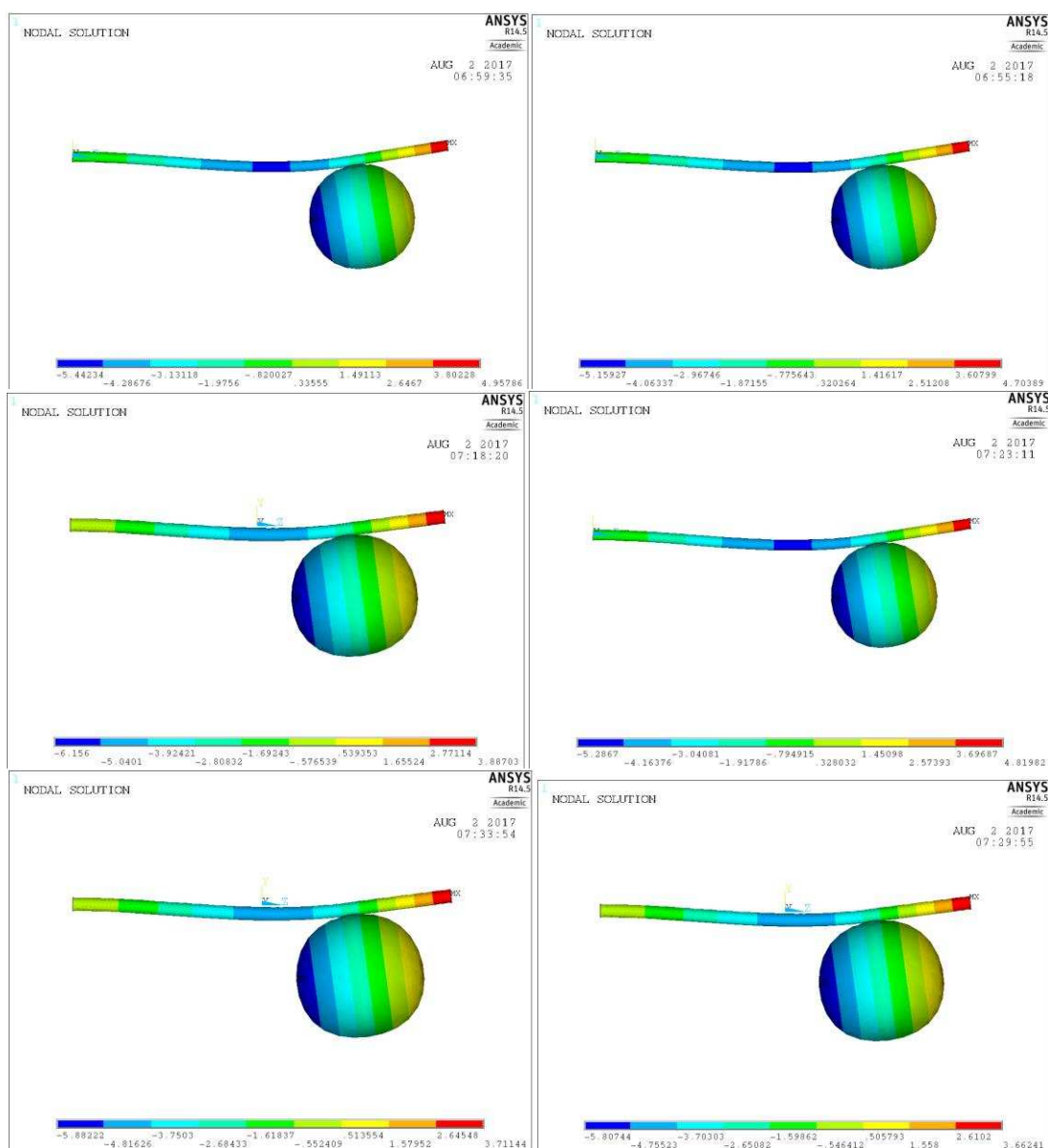


Figura 11: Modos de vibração, nos diferentes estádios de maturação, verde e maduro, respectivamente. De cima para baixo, da esquerda para direita: BGP29, verde e maduro; BGP35, verde e maduro; BD45, verde e maduro.

A diferença nas respostas de frequências natural fomentam a necessidade e importância da utilização do método de elementos finitos estocástico, para a modelagem e avaliação do comportamento dinâmico de diversos sistemas. Mostrando-se uma ferramenta eficiente para o desenvolvimento de novos projetos.

4. CONCLUSÕES

- As frequências naturais dos sistemas fruto-ráquila da macaúba, para os diferentes acessos, apresentaram um comportamento de redução na medida em que o estágio de maturação evolui do verde para o maduro;
- Os valores médios encontrados para as frequências naturais nos ensaios de vibração foram de 26,02 Hz para o estágio de maturação verde e 21,22 Hz para o estágio de maturação maduro;
- Os valores médios encontrados para as frequências naturais, referente ao terceiro modo de vibração, na simulação pelo método de elementos finitos estocástico foram de 26,05 Hz para o estágio de maturação verde e 21,23 Hz para o estágio de maturação maduro;
- Os modos de vibração caracterizados pelo deslocamento com comportamento pendular não apresentaram diferenças entre os acessos e os diferentes estádios de maturação.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Relatórios mensais de importação e exportação autorizados**. 2016.

ARISTZ, I. D.; OLIVEROS, T. C. E.; ALVARES, M. F. Mechanical harvest of coffee applying and multidirectional vibrations. **ASAE**. V.46, p. 205-209, 2003.

BERTHAUME, M. A.; DECHOW, P. C.; IRIARTE-DIAZ, J.; ROSS, C. F.; STRAIT, D. S.; WANG, Q.; GROSSE, I. R. Probabilistic finite element analysis of a craniofacial finite element model. **Journal of Theoretical Biology**, v. 300, n. 1, p. 242 – 253, 2012.

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.

CICONINI, G. **Caracterização de frutos e óleo de polpa de macaúba dos biomas Cerrado e Pantanal do estado de Mato Grosso do Sul, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia). Universidade Católica Dom Bosco, 128p., 2012.

COELHO, A. L. F. **Comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro submetido a vibrações mecânicas**. 2014. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2014.

DURÃES, F. O. M.; **Potenciais e oportunidades para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva para a macaúba**. Workshop sobre a macaúba, Apresentação,

Secretaria Estadual de Agricultura pecuária e abastecimento de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ERDOGAN, D.; GUNER, M.; DURSUN, E.; GEZER, I. Mechanical Harvesting of Apricots. **Biosystems Engineering**, v.85, n. 1, p. 19-23, 2003.

FISHMAN, G. S. **Concepts and Methods in Discrete Event Digital Simulation**. New York: Willey, 1973.

FREITAS, T. C. **Identificação de Parâmetros Modais Utilizando Apenas as Respostas da Estrutura – Identificação Estocástica de Subespaço e Decomposição no Domínio da Frequência**. USP. Ilha Solteira, SP. 2008. 133p. Dissertação de Mestrado.

HOFFMAN, J. D. **Numerical Methods for Engineers and Scientists**. McGraw-Hill, Inc., 1992. 801p.

LEITE, J. G. D. B.; BIJMAN, J.; GILLER, K.; SLINGERLAND, M. Biodiesel policy for Family farms in Brazil: One-size-fits-all? **Environmental Science & Policy**, v. 27, mar. 2013, p. 195-205.

NOGUEIRA, N. N.; REAL, M. V. Confiabilidade de Placas Finas de Aço sob Flambagem. **ENGEVISTA**, v. 14, n. 2, p. 230 – 242, 2012.

NUCCI, S. M. **Desenvolvimento, caracterização e análise da utilidade de marcadores microsatélites em genética de população de macaúba**. 2007. 90p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas - SP, 2007.

PARCHOMCHUK, P.; COOKE, J. R. Vibratory harvesting: an experimental analysis of fruit-stem dynamics. **Transactions of the ASAE**, v.15, n.4, p.598-603, 1971.

PEZZI, F.; CAPRARA, C. Mechanical grape harvesting: investigation of the transmission of vibrations. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 3, p. 281-286, 2009.

POLAT,R.; GEZER, I.; GUNER, M.; DURSON, E.; ERDOGAN, D.; BILIM, H. C. Mechanical harvesting of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 4, p. 1131-1135, 2007.

PRESS, W. H.; VETTERLING, W. T.; TEUKOLSKY, S. A.; FLANNERY, B. P. **Numerical recipes in FORTRAN: the art of scientific computing**. Second edition. Cambridge University Press, 1992. 936p.

RAMOS, M. I. L. Bocaiuva (*Acrocomia aculeata* (Jacq) Lodd) improved vitamin A status in rats. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 22, p. 3186 – 3190, 2007.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations. Fourth edition**. New York, EUA. Addison-Wesley Publishing Company, 2008. 464p.

RODRIGUEZ, J. D.; ONO, E. O. Na hora certa. **Cultivar: Grandes Culturas**, v.30, n.1, p. 32-34, 2001.

SANDERS, K. F. Orange Harvesting Systems Review. **Biosystems Engineering**, v. 90, n. 2, p. 115-125, 2005.

SANDOVAL, M. A. P. **Análise determinística e probabilística da estabilidade de taludes**. 2012, 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro – RJ, 2012.

SANTOS, F. L. **Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derrça**. 2008. 136f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2008.

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T. Analysis of the coffee harvesting process using an electromagnetic shaker. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 3, p. 373-378, 2010.

SANTOS, I. C. **Atualização do modelo numérico em elementos finitos de uma passarela de pedestres com base em dados experimentais**. 2009. 121f. Dissertação de Mestrado, Publicação E. DM 010A/ 09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2009.

SESSIZ, A.; OZCAN, M. T. Olive removal with pneumatic branch shaker and abscission chemical. **Journal of Food Engineering**. V. 76, n. 2, p. 148-153, 2006.

SILVA, V. C. **Método de elementos finitos aplicado à solução de problemas de aterramento elétrico**. 2006. 78f. Tese (Título de Professora Livre Docente) – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2006.

SOUZA, C. M. A.; QUEIROZ, D. M.; RAFULL, L. Z. D. Derrçadora portátil na colheita total e seletiva de frutos do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 11, p. 1637-1642, 2006.

SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P. Engineering principles of agricultural machines. **Michigan: ASAE**. 1996, 601p.

STEFANOOU, G. The stochastic finite element method: Past, presente and future. **Computer Methods Applied Mechanics and Engineering**. v. 198, n.9-12, p. 1031-1051, 2009.

TAVARES, J. M. R. S. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. 1998. 105f. Comunicação Interna – Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1998.

TOLÊDO, D. de P. **Análise técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão- manso como alternativas de agregação de renda na cadeia produtiva de biodiesel.** 2010. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2010.

TUCKER, G. A. Introduction. In: SEYMOUR, G. B.; TAYLOR, J. E.; TUCKER, G. A. **Biochemistry of fruit ripening.** London: Chapman & Hall, 1993. cap.1, p. 2-51.

VELLOSO, N. S. **Propriedades físicas e comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba (*Acrocomia Aculeata*).** 2016. 56f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2016.

VILLAR, F. M. M. **Propriedades físicas, geométricas, mecânicas e modais do sistema fruto-ráquila da macaúba.** 2016. 74f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2016.

VILLIBOR, G. P. **Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de derriça de café.** 2012. 160f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2012.

**Capítulo III: Determinação das tensões do sistema fruto-ráquila da
macaúba e da força requerida para remover o fruto**

Determinação das tensões do sistema fruto-ráquila da macaúba e da força requerida para remover o fruto

RESUMO

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma cultura considerada promissora para a produção de biodiesel, porém, ainda, encontra-se em processo de domesticação. Com a finalidade de prover recursos para a otimização da produção e colheita da macaúba, princípios como o de colheita por vibração mecânica tem sido estudado. Contudo, para o desenvolvimento de máquinas de colheita eficientes, faz-se necessário o conhecimento a cerca das tensões geradas sobre o sistema a ser derriçado. Deste modo, objetivou-se neste trabalho determinar as tensões geradas no sistema fruto-ráquila da macaúba quando excitada por vibração mecânica, bem como, a força necessária para remover o fruto. As tensões de *von Mises* foram determinadas a partir do efeito de vibração imposto ao sistema, por meio de uma análise transiente, com frequências referentes aos valores de frequência natural e tempo total de excitação de 10s. Já as forças requeridas para remover o fruto, foram determinadas utilizando-se uma máquina de ensaio universal. As tensões máximas ficaram concentradas na região de ligação do fruto com a ráquila. As tensões de *von Mises* foram superiores no estágio de maturação verde, que pode ser explicado devido à maiores frequências de vibração aplicadas neste estágio de maturação. A força requerida para remover o fruto não apresentou diferença significativa quanto ao estágio de maturação. Além disso, as tensões advindas dos valores da força de remoção indicam, quando comparadas às tensões imposta pela análise transiente, que o princípio de vibração tende a ser mais eficiente para a colheita dos frutos da macaúba.

Palavras-chave: biodiesel, tensões de *von Mises*, frequências naturais.

Determination of the tensions of the rachilla fruit system of macaw palm and the force required to remove the fruit

ABSTRACT

The macaw palm (*Acrocomia aculeata*) is a crop considered promising for the production of biodiesel, but still, it is in the process of domestication. In order to provide resources for the optimization of production and harvesting of macaw palm, principles such as harvesting by mechanical vibration have been studied. However, for the development of efficient harvesting machines, it is necessary to know about the tensions generated on the system to be melted. In fact, the objective of this study was to determine the tensions generated in the rachilla fruit system of macaw when excited by mechanical vibration, as well as, the force necessary to remove the fruit. The von Mises tensions were determined from the vibration effect imposed on the system by means of a transient analysis, with frequencies referring to the natural frequency values and the total excitation time of 10 seconds. Already the forces required to remove the fruit, were determined using a universal testing machine. The maximum stresses were concentrated in the fruit binding region with the rachilla. The von Mises tensions were higher at the green maturation stage, which can be explained by the higher vibration frequencies applied at this maturation stage. In addition, the tensions arising from the removal force values indicate, when compared to the tensions imposed by the transient analysis that the vibration principle tends to be more efficient for harvesting macaw fruits.

Keywords: biodiesel, *Von Mises* tensions, natural frequencies.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por biocombustíveis vem acontecendo devido à constante elevação do preço de combustíveis fósseis, além do encarecimento das matrizes energéticas de diversas nações (TÁVORA, 2011). O Brasil tem acompanhado a tendência mundial, aumentando expressivamente sua produção de biodiesel nos últimos anos (EPE, 2013). Esse crescimento na produção tem promovido uma busca por fontes renováveis, mais especificamente por oleaginosas com altos índices de produtividade de óleo, afim de, satisfazer a progressiva demanda por óleos vegetais que garantam a sustentabilidade da cadeia produtiva (EVARISTO, 2015).

Neste cenário, é que a macaúba [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart], planta oleaginosa, tem ganhado bastante destaque, graças ao seu elevado potencial de produtividade de aproximadamente $5000 \text{ kg óleo.ha}^{-1}$ (HENDERSON *et al.*, 1995; TEIXEIRA, 2005; TOLEDO, 2010; PIMENTEL *et al.*, 2011; FERRARI e AZEVEDO, 2012) e ainda, por possuir uma ampla distribuição no território brasileiro, concentrando-se nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Piauí, Ceará, Pará e Paraná (LORENZI *et al.*, 2011; PIMENTEL *et al.*, 2011; CICONINI *et al.*, 2013).

A grande importância socioeconômica possuída pela cultura da macaúba se deve ao fato de que a maior parte da produção e comercialização é feita por produtores familiares (MANFIO *et al.*, 2012). A exploração dos frutos da macaúba tem sido realizada de modo extrativista, isto é responsável por conferir, em sua maioria, baixa produtividade e má qualidade dos produtos advindos dos frutos (PIRES, 2013).

No intuito de aperfeiçoar as condições de exploração de diversas culturas - como a da macaúba - melhoramento da qualidade e da quantidade de frutos, é que se faz necessário à utilização de técnicas de manejo e, conseqüentemente, de estudos sobre a utilização da mecanização agrícola para a realização das etapas de cultivo, colheita e pós-colheita (LORENZI, 2006).

A etapa de colheita de diversas culturas é caracterizada como a etapa mais onerosa do processo de cultivo como um todo, isso ocorre devido à elevada necessidade de mão de obra para o seu cumprimento. A colheita da macaúba também passa por algumas restrições com relação a sua eficiência e tempo gasto no processo. Além de ser comum encontrar cachos em uma mesma planta com frutos verdes, maduros e flores abertas. Contudo, como acontece com a cultura do dendê (*Elaeis guineensis*), o acúmulo

de óleo ocorre já na fase final da maturação dos frutos (MONTROYA, 2013). Atualmente a colheita dos frutos da macaúba é realizada por meio do corte do cacho, feito por foice, ou ainda, pela coleta dos frutos manualmente no solo (CARVALHO *et al.*, 2011).

Uma alternativa, bastante difundida, utilizada para colheita de diversas culturas como a do café, damasco, tomate, oliva e uva, é a de colheita por vibrações mecânicas. Nesta, a energia cinética é transmitida para a planta, promovendo o rompimento da estrutura vegetativa responsável por conectar o fruto à planta (ERDOGAN *et al.*, 2003; SESSIZ e OZCAN, 2006; PEZZI e CAPRAVA, 2009; SANTOS *et al.*, 2010; CUNHA *et al.*, 2014).

A derriça, dos diferentes cultivares utilizando vibrações mecânicas, é influenciada por fatores relacionados à máquina e pela própria planta. Desta forma, para se aplicar algum sistema mecanizado utilizando o princípio de vibrações mecânicas, na colheita da macaúba, se faz necessário o conhecimento das propriedades mecânicas das partes constituintes da cultura, tais como as do sistema fruto-ráquila.

Dentre os parâmetros mecânicos, necessários ao entendimento da resposta dinâmica do sistema fruto-ráquila da macaúba, destaca-se a determinação da força e, conseqüentemente, das tensões requeridas para remover o fruto (SANTOS, 2008). VILLIBOR (2012) elucida sobre o estudo da força axial para o desprendimento dos frutos do café aplicando o princípio de vibração mecânica. COELHO (2014) descreve a importância do estudo sobre as tensões aplicadas ao sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro, quando submetido a vibrações. Tais parâmetros são utilizados, por ambos, como critério de dimensionamento de equipamentos para colheita de café com desempenho melhorado.

Dentre as ferramentas disponíveis para o estudo das forças e tensões atuantes de um sistema, destaca-se o processo de modelagem matemática, que utiliza um sistema de equações capazes de descrever o comportamento dinâmico de diversos sistemas físicos. Para a solução dos modelos de simulação matemática, destaca-se a aplicação do método de elementos finitos, que se fundamenta num processo de discretização do sistema modelado e na geração e solução automática de um sistema de equações que governam o comportamento físico estudado (TAPLAK e PARLAK, 2012).

O método de elementos finitos é aplicado em diferentes sistemas para diversas análises específicas de forças e tensões. SANTOS (2008) e COELHO (2014), utilizando o método de elementos finitos, determinaram as tensões de *von Mises* elaboradas no

sistema fruto-pedúnculo e fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro, respectivamente, quando submetidas à vibrações mecânicas.

VELLOSO (2016) também empregando o método de elementos finitos, analisou a distribuição de tensões no sistema fruto-ráquila da macaúba tomando análises de harmônicas para o estágio de maturação verde e maduro. Os modelos estudados foram submetidos à cargas pontuais acima do fruto. A autora constatou que as tensões nos diferentes estádios de maturação concentraram-se na ligação entre a ráquila e o fruto.

REIS *et al.* (2015) quantificaram a força necessária para o destacamento dos frutos de pedúnculo do tomate industrial em diferentes estádios de maturação e avaliar diferentes metodologias que fossem capazes de quantificar essa força em campo e em laboratório. Os autores concluíram que os tomates maduros exigiram maiores forças para promover o desprendimento do fruto.

Ainda avaliando a força necessária para o desprendimento de frutos, SILVA *et al.* (2010) avaliaram as forças necessárias para o destacamento dos frutos do cafeeiro ao longo do período de colheita e, concluiu que as forças necessárias para o desprendimento do fruto do café foram menores com o avanço do estágio de maturação dos frutos.

Contudo, estudos que avaliam as tensões da macaúba no processo de colheita por vibrações mecânicas para diferentes acessos e estádios de maturação, são necessários. Desta forma, objetivou-se no presente estudo analisar as tensões geradas nos diferentes cenários para o sistema fruto-ráquila da macaúba, tomando-se o método de elementos finitos. Adicionalmente, avaliou-se os valores encontrados experimentalmente necessários para efetuar o destacamento dos frutos da macaúba.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. As plantas utilizadas, como referência para este estudo, foram providas do Banco de Germoplasma (BAG) pertencente à Universidade Federal de Viçosa, estabelecido em uma área experimental no município de Araponga – Minas Gerais.

Os cachos coletados, com as características que foram utilizadas no ensaio, eram provenientes de palmeiras pertencentes a diferentes acessos. São eles: Abaeté, MG

(BD27); Unai, MG (BD45); Prudente de Moraes/ Matozinhos, MG (BGP29) e Mirandópolis, SP (BGP35).

2.1. Análise de tensões

Para determinar os valores das tensões durante as excitações, empregando o método de elementos finitos, modelou-se o sistema fruto-ráquila da macaúba, em diferentes modos – estádios de maturação e acessos.

As características geométricas, físicas e mecânicas, do sistema fruto-ráquila da macaúba, obtidas experimentalmente (Tabelas 14 e 15), foram utilizadas para geração das geometrias do sistema. A geometria foi elaborada com o auxílio do *software* CAD-3D *SolidWorks* 2011 (Figura 12).

Tabela 14: Propriedades geométricas e físicas dos frutos para os diferentes acessos e estágio de maturação – verde e maduro

Características Fruto						
Acesso	Estádio de Maturação					
	Verde			Maduro		
	Diâmetro Médio (mm)	Massa Específica (g.cm⁻³)		Diâmetro Médio (mm)	Massa Específica (g.cm⁻³)	
		Média	Desvio Padrão		Média	Desvio Padrão
BD27	38,93	1,17	0,03	41,96	1,24	0,09
BGP29	44,24	1,17	0,08	43,13	1,20	0,10
BGP35	41,42	1,18	0,16	41,50	1,14	0,12
BD45	39,71	1,21	0,04	39,31	1,17	0,10

BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

Tabela 15: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas das ráquilas para os diferentes acessos e estágio de maturação – verde e maduro

Características – Ráquila							
Acessos	Estádio de Maturação	Diâmetro Médio (mm)	Massa Específica (g.cm^{-3})		Módulo de Elasticidade (MPa)		Coeficiente de Poisson
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
BD27	Verde	3,99	0,60	0,10	296	0,52	0,36
	Maduro	3,60	0,60	0,14	189	0,83	0,41
BGP29	Verde	3,39	0,54	0,10	319	0,85	0,50
	Maduro	3,59	0,66	0,17	275	0,82	0,45
BGP35	Verde	3,96	0,64	0,13	315	0,89	0,39
	Maduro	4,48	0,75	0,13	185	0,89	0,36
BD45	Verde	3,44	0,47	0,07	194	0,88	0,38
	Maduro	3,36	0,46	0,12	183	0,92	0,33

BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

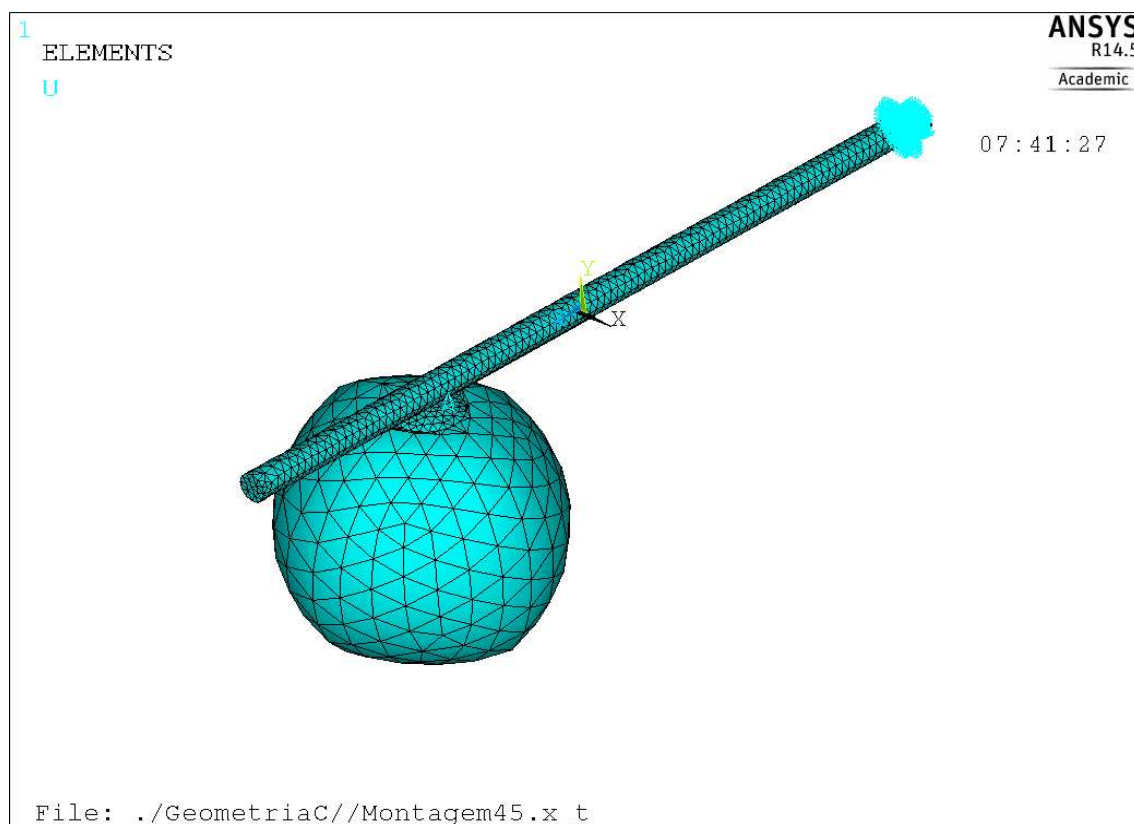


Figura 12: Geometria modelada para simulação do sistema fruto-ráquila da macaúba para o acesso BD45 – provindo de Unai/MG.

Partindo-se de uma geometria padrão, ajustada para o sistema, foi elaborada pelo programa computacional *Ansys Mechanical APDL*, versão 14.5, uma rotina com as etapas de discretização das geometrias, definição das propriedades físicas e mecânicas e, das condições de contorno, bem como a apresentação da solução e posterior visualização dos resultados. Todas as simulações foram realizadas em uma estação de trabalho com processador Intel® Xeon 3,5 GHz, possuindo sistema operacional Linux centos 6.3.

O sistema fruto-ráquila foi modelado considerando que suas respectivas partes constituintes são compostas por materiais isotrópicos. Os valores dos parâmetros de módulo de elasticidade, massa específica e coeficiente de Poisson foram estabelecidos com base em experimentos realizados.

Com o intuito de simular o processo de colheita por vibrações mecânicas, os sistemas fruto-ráquila da macaúba, para os diferentes acessos e estádios de maturação, foram submetidos a ações de forças variáveis ao longo do tempo, para a realização da análise transiente dos sistemas estudados (Equação 7).

$$F = m\omega^2 A \sin(\omega t) \quad (7)$$

em que,

F = força variável ao longo do tempo, N;

m = massa do sistema, kg;

ω = frequência de vibração aplicada, rad.s^{-1} ;

A = amplitude de vibração aplicada, m;

t = intervalo de tempo para simulação, s.

As análises foram feitas, considerando-se um intervalo de tempo de 10 s.

As frequências de vibração adotadas, para a análise de tensão, foram as frequências naturais referentes ao oitavo modo de vibração de cada sistema avaliado (Tabela 16), estabelecida por análise modal feita no software *Ansys Mechanical APDL*.

Tabela 16: Valores médios da frequência natural simulada, para os diferentes acessos e estádios de maturação, considerando o terceiro modo de vibrar

	Frequência (Hz)							
	Verde				Maduro			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Simulado	23,08	23,89	29,69	27,52	17,91	19,95	20,74	26,33

BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unaí/MG.

Como os materiais constituintes do sistema foram caracterizados como homogêneos e isotrópicos, pode-se determinar o vetor de tensões, apresentado na Equação (8), em função do vetor de deformação, Equação (9). (SEGERLIND, 1984; HUEBNER *et al.*, 2001; ZIENKIEWICZ, *et al.*, 2005).

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{xx}\sigma_{yy}\sigma_{zz}\tau_{xy}\tau_{xz}\tau_{yz}\} \quad (8)$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz}\varepsilon_{xy}\varepsilon_{xz}\varepsilon_{yz}\} \quad (9)$$

em que,

$\{\sigma\}$ = vetor tensão, MPa;

$\{\varepsilon\}$ = vetor deformação, mm.mm⁻¹;

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

τ_{xy} , τ_{xz} e τ_{yz} = tensões cisalhantes, MPa;

ε_{xx} , ε_{yy} e ε_{zz} = deformações normais, mm.mm⁻¹;

ε_{xy} , ε_{xz} e ε_{yz} = deformações cisalhantes, mm.mm⁻¹.

Pela lei de *Hooke*, Equação (10), foi possível calcular o vetor de tensões, para o sistema.

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (10)$$

em que,

$[D]$ = matriz que relaciona as propriedades mecânicas do material, MPa.

A tensão de von *Mises* resultante, foi calculada utilizando a Equação (11):

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}{2}} \quad (11)$$

em que,

σ_{VM} = tensão de von *Mises*, MPa.

Foram determinadas, para cada acesso e estágio de maturação, as tensões de von *Mises* máximas, que correspondem ao pico de tensão durante o período de excitação.

2.2. Validação do modelo

A validação do modelo tridimensional elaborado, feito com o intuito de reproduzir um sistema real contínuo, se deu com a observação das respostas reais analisadas em ensaios laboratoriais, tomando como base a determinação do desvio padrão existente entre a frequência natural experimental e a simulada, apresentada pela Equação (12).

$$Desv = 100 \frac{|f_{exp} - f_{mef}|}{f_{exp}} \quad (12)$$

em que,

$Desv$ = desvio, %;

f_{exp} = frequência natural média obtida experimentalmente, Hz;

f_{mef} = frequência natural obtida pelo método de elementos finitos, Hz.

Um sistema de vibração da LDS (Ling Dynamic Systems) composto por um gerador de sinais, um amplificador e um vibrador eletromagnético permitiu a excitação vibracional do sistema real. Os corpos de prova foram submetidos a uma varredura de frequências na faixa de 10 Hz a 40 Hz, taxa de varredura de 2 oitavas/min, deslocamento de 1 mm de pico a pico e duração de 90 segundos. As variações de amplitudes foram determinadas por meio de acelerômetros de alta sensibilidade (100,7

mv/g(Eu)). Para aquisição dos dados de aceleração foi elaborada uma rotina no software LabView (National Instruments, 1998). Tal rotina foi responsável por comandar o sistema de aquisição de dados, modelo NI cDAQ-9174, com 4 canais, que foi utilizado como receptor dos sinais dos acelerômetros.

Os resultados foram processados no software MATLAB® com o intuito de modificar os dados no domínio do tempo para o domínio da frequência utilizando a Transformada Rápida de Fourier – FFT, possibilitando assim a comparação entre os valores das frequências naturais obtidas experimentalmente e os valores resultantes da simulação.

Os ensaios foram realizados com 20 amostras retiradas de maneira aleatória de quatro árvores diferentes do mesmo acesso - BD27, BGP29 e BD45 – e, de três árvores diferentes – BGP35 - nos diferentes estádios de maturação verde e maduro. Cada árvore representa uma repetição para o delineamento estatístico.

As frequências naturais simuladas, consideradas como resposta, foram as que obtiveram o modo de vibração pendular, compatível com o deslocamento verificado experimentalmente. Considerando, os diferentes acessos – BD27, BGP29, BGP35 e BD45 – e, estádios de maturação – verde e maduro. Para as frequências naturais experimentais, foram consideradas as frequências com os maiores valores de deslocamento (Figura 13).

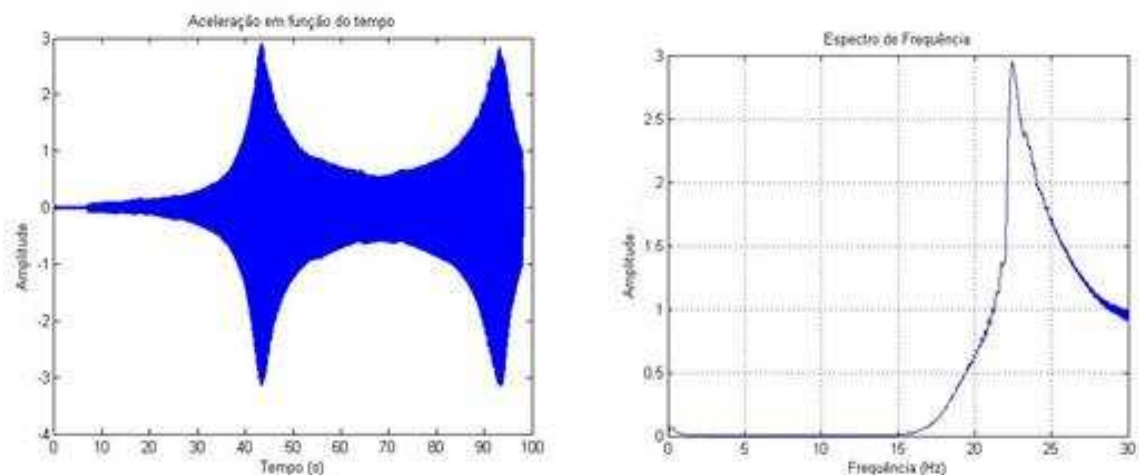


Figura 13: A esquerda, são apresentados dados de amplitude de aceleração no domínio do tempo e, a direita são apresentados os mesmos dados no domínio da frequência. A frequência apresentada pertence a uma amostra no estágio de maturação verde do acesso BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG.

As frequências naturais obtidas, tanto experimentalmente quanto simuladas, são apresentadas na tabela seguinte (Tabela 17).

Tabela 17: Valores médios da frequência natural experimental e simulada, para os diferentes acessos e estádios de maturação, considerando o terceiro modo de vibrar

	Frequência (Hz)							
	Verde				Maduro			
	BD27	BGP29	BGP35	BD45	BD27	BGP29	BGP35	BD45
Experimental	21,56	24,34	28,15	29,96	18,02	19,17	19,38	28,31
Simulado	23,08	23,89	29,69	27,52	17,91	19,95	20,74	26,33
Desvio (%)	7,05	1,84	5,47	8,14	0,61	4,06	7,02	6,99

BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

2.3. Força requerida para o desprendimento do fruto

As determinações da força, necessária para o destacamento do fruto, foram realizadas com o auxílio da máquina de ensaio universal da marca Instron, modelo 3365, com capacidade de carga de 5 kN. Os corpos de prova, ráquias em diferentes estádios de maturação, foram submetidos a uma pré-carga de 2 N com deformações a velocidade constante de 3 mm.min⁻¹. A rotina que determina e controla os esforços e as deformações impostas às amostras foram criadas no software *Bluehill3, versão 3.61*, desenvolvido pela Instron.

O ensaio foi realizado engastando as ráquias nas extremidades de um suporte, fazendo com que o deslocamento fosse realizado apenas sobre a região de engaste do fruto a ráquila (Figura 14). Com isso foi possível extrair os valores das forças perpendiculares à região de ligação do fruto à ráquila necessárias para o desprendimento do fruto.



Figura 14: Medições da força necessária para o destacamento do fruto da macaúba, realizadas com o auxílio da máquina de ensaio universal da marca Instron, modelo 3365.

2.4. Análise dos dados

Os experimentos foram realizados seguindo um esquema fatorial, com dois fatores – estágio de maturação: verde e maduro; e acessos: BD27, BGP29, BGP35 e BD45 – em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) com quatro repetições.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, em caso de significância, as médias foram comparadas utilizando-se o teste Tukey adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

As análises estatísticas serão realizadas com o auxílio do programa computacional R (R Development CoreTeam 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de tensões

As frequências, utilizadas na análise de tensão, corresponderam às frequências naturais dos sistemas, que são dependentes das propriedades geométricas, físicas e mecânicas.

As maiores tensões foram observadas na região de ligação do fruto a ráquila, para os deslocamentos caracterizados como pendulares (Figura 15). Isso pode ser explicado, por essa região se tratar de uma região concentradora de tensão. Biologicamente, devido à degradação natural das paredes celulares, esta região é a responsável pelo desprendimento do fruto.

Os valores de tensões de *von Mises* encontrados na simulação dos diversos sistemas, mostraram-se superiores nos estádios de maturação verde quando comparado aos valores no estágio de maturação maduro, em todos os diferentes acessos estudados.

As tensões de *von Mises* máximas variaram para o acesso BD27 de 16,8 MPa no estágio de maturação verde para 2,76 MPa no estágio de maturação maduro. Já para o acesso BGP29, os valores das tensões foram de 7,61 MPa para os frutos verdes e de 3,19 MPa para os frutos maduros. O acesso BGP35, apresentou os maiores valores nos dois estádios de maturação, 24,4 MPa para o verde e 10 MPa para frutos maduros. Por fim, o acesso BD45 apresentou valores de 11,6 MPa para o estágio de maturação verde e 1,95 MPa para o estágio de maturação maduro.

Explica-se essa condição, pelo fato de o sistema no estágio de maturação verde, apresentar valores mais elevados de frequências naturais de excitação, o que provoca uma maior quantidade de energia cinética imposta ao sistema.

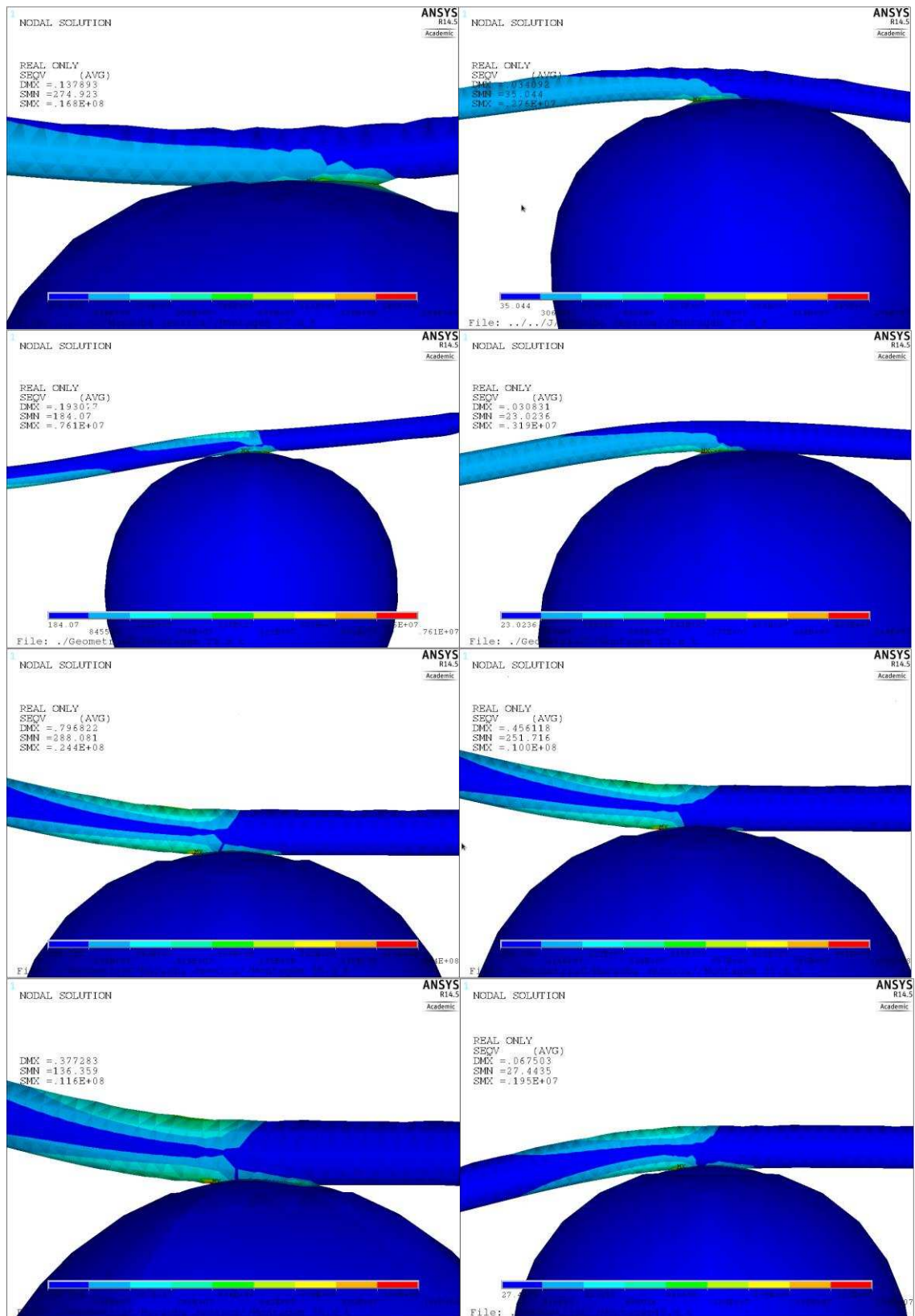


Figura 15: Detalhamento da região com os maiores valores de tensão de *von Mises* para o sistema fruto-ráquila da macaúba, nos diferentes estádios de maturação: verde e maduro; e nos diferentes acessos: BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unaí/MG.

3.2 Força requerida para o desprendimento do fruto

As forças, perpendiculares a região de união entre o fruto e a ráquila, necessárias para o desprendimento do fruto, não diferiram entre si, quando avaliadas em esquema fatorial, dois fatores: estágio de maturação e aceso. Avaliando-se apenas o fator estágio de maturação, as forças requeridas para o desprendimento não diferiram entre si (Tabela 18).

Tabela 18: Valores médios da força requerida para o desprendimento dos frutos da macaúba nos estádios de maturação verde e maduro

Força requerida para o desprendimento do fruto (N)	
Estádio de Maturação	Força
Verde	57,24a
Maduro	50,77a

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Contudo, quando se avalia os diferentes acessos, percebe-se que os valores diferiram. O acesso BGP35 – provindo de Mirandópolis, São Paulo – apresentou o maior valor médio para a força requerida para o desprendimento do fruto. Esse fato pode ser explicado, pelo fato do bioma presente na região de Mirandópolis ser o mesmo bioma do BAG, Mata Atlântica, proporcionando assim, uma maior adaptabilidade da planta a região e, conseqüentemente, proporcionando uma redução mais lenta da parede celular da planta, gerando uma maior força de desprendimento. Além disso, a heterogeneidade presente na cultura é capaz de propiciar diferenças significativas entre plantas de regiões diferentes do país (Tabela 19).

Tabela 19: Valores médios da força requerida para o desprendimento dos frutos da macaúba da macaúba nos diferentes acessos BD27, BGP29, BGP35 e BD45

Força requerida para o desprendimento do fruto (N)	
Acessos	Força
BD27	45,33b
BGP29	59,97ab
BGP35	67,71a
BD45	48,03b

As médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem estatisticamente ente si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

Considerando que a região de ligação entre o fruto e a ráquila da macaúba possui diâmetro médio igual a cinco milímetros, pode-se inferir valores de tensão advindos dos resultados obtidos para a força requerida e, compará-los com os valores de tensão média na direção da componente y submetido ao carregamento transiente, descrito anteriormente (Tabela 20).

Tabela 20: Valores tensão normal a região de união entre o fruto e a ráquila calculados a partir dos valores de força requerida para o desprendimento dos frutos da macaúba da macaúba nos diferentes acessos BD27, BGP29, BGP35 e BD45

Tensão normal (MPa)		
Acessos	Calculada	Simulada
BD27	2,31	4,98
BGP29	3,05	3,59
BGP35	3,45	5,43
BD45	2,45	3,53

BD27 – acesso provindo de Abaeté/MG; BGP29 – acesso provindo de Prudente de Moraes – Matozinhos/MG; BGP35 – acesso provindo de Mirandópolis/SP; BD45 – acesso provindo de Unai/MG.

Comparando as tensões provocadas no sistema pelo efeito de vibração com as tensões calculadas, percebe-se que tais efeitos seriam suficientes para promover o desprendimento do fruto da ráquila, visto que, os valores obtidos na simulação das tensões foram maiores que os valores de tensões calculadas, considerando a força requerida para o desprendimento do fruto obtida experimentalmente. Fomentando desta forma a aplicação do princípio de vibrações mecânicas

4. CONCLUSÕES

- As máximas tensões de *von Mises* se mostraram superiores para o estágio de maturação verde, devido aos valores de frequências naturais se serem superiores nessa condição;
- As tensões de *von Mises* máximas ocorreram na região de ligação entre o fruto e a ráquila;
- A força requerida para o destacamento do fruto não diferiu para os diferentes estádios de maturação, verde e maduro, porém apresentou valores diferentes significativamente, quando se analisando o acesso.
- As tensões provocadas no sistema pelo efeito de vibração seriam suficientes para promover o desprendimento do fruto da ráquila.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, K. J.; SOUZA, A. L.; MACHADO, C. C. **Ecologia, Manejo, Silvicultura e Tecnologia da Macaúba**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2011. 25p.

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.

COELHO, A. L. F. **Comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro submetido a vibrações mecânicas**. 2014. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2014.

CUNHA, J. P. B.; MACHADO, T. A.; SANTOS, F. L.; COELHO, L. M. Perdas na colheita de tomate industrial em função da regulagem da colhedora. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 4, p. 363-369, 2014.

ERDOGAN, D.; GUNER, M.; DURSUN, E.; GEZER, I. Mechanical Harvesting of Apricots. **Biosystems Engineering**, v.85, n. 1, p. 19-28, 2003.

EVARISTO, A. B. **Conservação pós-colheita e potencial bionergético de frutos de macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. 2015. 120 f. Tese de Doutorado – Curso de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2015.

FERRARI, R. A.; AZEVEDO FILHO, J. A. Macauba as promising substrate for crude oil and biosiesel production. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. B, n. 2, p. 1119 -1126, 2012.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. Field guide palms of the Americas, **Princeton University**, p. 166- 167, 1995.

HUEBNER, K. H.; DEWHIRST, D. L.; SMITH, D. E.; BYRON, T. G. **The finite elemento method for engineers**. Fourth edition. New York, EUA. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 720p.

LORENZI, G. M. A. C. **Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd. ex Mart. - Areaceae: bases para o extrativismo sustentável**. 2006. 156 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2006.

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.

MANFIO, C. E.; MOTOIKE, S. Y.; RESENDE, M. D. V.; SANTOS, C. E. M.; SATO, A. Y. Avaliação de progênies de macaúba na fase juvenil e estimativas de parâmetros genéticos e diversidade genética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 69, p. 63-68, 2012.

MONTOYA, S. G. **Caracterização do desenvolvimento do fruto da palmeira macaúba**. 2013, 51 f. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Viçosa (UFV), de Pós Graduação em Fitotecnia – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2013.

PEZZI, F.; CAPRAVA, C. Mechanical grape harvesting: investigation of the transmission of vibrations. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 3, p. 281-286, 2009.

PIMENTEL, L.; MANFIO, C.; MOTOIKE, S.; PAES, J.; BRUCKNER, C. Coeficientes técnicos e custos de produção do cultivo da macaúba. In. **Macaúba: potencial e sustentabilidade para o biodiesel**. Belo Horizonte. 32: 20-30p. 2011.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MARTINEZ, H. E. P.; TEIXEIRA, C. M.; MOTOIKE, S. Y.; PEDROSONETO, 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.

PIRES, T. P.; DOS SANTOS SOUZA, E.; KUKI, K. N.; MOTOIKE, S. Y. Ecophysiological traits of the macaw palm: a contribution towards the domestication of a novel oil crop. **Industrial Crops and Products**, v. 44, p. 200-210, 2013.

REIS, E. F.; HOLTZ, V.; COUTO, R. F.; VASCONCELOS, L. H. C.; CAMPOS, A. J. Força requerida para o desprendimento de frutos de tomate industrial em diferentes estádios de maturação. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 2, p. 293-301, mar/abr. Jaboticabal, SP. 2015.

SANTOS, F. L. **Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derriça**. 2008. 136f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) –

Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2008.

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; RESENDE, R. C. Efeito da frequência e amplitude de vibração sobre a derriça de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.4, p. 425-431, 2010.

SEGERLIND, L. J. **Applied finite elemento analysis**. Second edition. New York, EUA. John Wiley & Sons, Inc., 1984, 427p.

SESSIZ, A.; OZCAN, M. T. Olive removal with pneumatic branch shaker and abscission chemical. **Journal of Food Engineering**. V. 76, n.2, p. 148-153, 2006.

SLVA, F. C.; SILVA, F. M.; ALVES, M. C.; BARROS, M.M.; SALES, R. S. Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiros ao longo do período de colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 468-474, mar./abr., Lavras - MG, 2010.

TAPLAK, H.; PARLAK, M. Evaluation of gas turbine rotor dynamics analysis using the finite elemento method. **Measurement**, v.45, n. 5, p. 1089-1097, 2012.

TÁVORA, F. L. **História e economia dos biocombustíveis no Brasil**. Brasília: Centros de Estudos e Consultoria do Senado, 2011.

TEIXEIRA, L.C. Potencialidades de oleaginosas para produção de biodiesel. **Revista Informe Agropecuário**, v.26, n.229. p.18- 27, 2005.

TOLÊDO, D. de P. **Análise técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão- manso como alternativas de agregação de renda na cadeia produtiva de biodiesel**. 2010. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2010.

VELLOSO, N. S. **Propriedades físicas e comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba (*Acrocomia Aculeata*)**. 2016. 56f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2016.

VILLIBOR, G. P. **Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de derriça de café**. 2012. 160f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2012.

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, bem como, modelar e analisar seu comportamento dinâmico, além de determinar as tensões geradas no sistema quando submetido a vibrações mecânicas.

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

- Os diâmetros médios dos frutos e das ráquilas não diferiram com a evolução do estágio de maturação;
- A massa específica dos frutos e das ráquilas apresentaram diferenças significativas, avaliando-se a interação entre os diferentes fatores: acesso e estágio de maturação;
- O Módulo de Elasticidade determinado para as ráquilas apresentaram uma redução com o avanço da maturação;
- Os valores do coeficiente de Poisson para a ráquila não diferiram entre si na observação para os diferentes fatores;
- Os valores obtidos para a razão de amortecimento caracterizou o sistema fruto-ráquila da macaúba como subamortecido.
- As frequências naturais dos sistemas fruto-ráquila da macaúba, para os diferentes acessos, apresentaram um comportamento de redução na medida em que o estágio de maturação evolui do verde para o maduro;
- Os valores médios encontrados para as frequências naturais nos ensaios de vibração foram de 26,02 Hz para o estágio de maturação verde e 21,22 Hz para o estágio de maturação maduro;
- Os valores médios encontrados para as frequências naturais na simulação pelo método de elementos finitos estocástico foram de 26,05 Hz para o estágio de maturação verde e 21,23 Hz para o estágio de maturação maduro;
- Os modos de vibração caracterizados pelo deslocamento com comportamento pendular não apresentaram diferenças para os diferentes acessos e estágios de maturação estudados;
- As máximas tensões de *von Mises* se mostraram superiores para o estágio de maturação verde, devido aos valores de frequências naturais serem superiores nessa condição;

- As tensões de *von Mises* máximas foram na ligação entre o fruto e a ráquila, a qual é uma região de concentração de tensão;
- A força requerida para o destacamento do fruto não diferiu para os diferentes estádios de maturação, verde e maduro, porém apresentou valores diferentes significativamente, quando se analisando o acesso;
- As tensões provocadas no sistema pelo efeito de vibração seriam suficientes para promover o desprendimento do fruto.