

ZENIL RICARDO CUNHA RODRIGUES DE OLIVEIRA

**PROPRIEDADES FÍSICAS DA RÁQUIS DA MACAÚBA VISANDO O
PROJETO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

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

T

O48p
2016

Oliveira, Zenil Ricardo Cunha Rodrigues de, 1987-
Propriedades físicas da ráquis da macaúba visando o projeto
de máquinas agrícolas / Zenil Ricardo Cunha Rodrigues de
Oliveira. – Viçosa, MG, 2016.
xi, 62f : il. (algumas color.) ; 29 cm.

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

1. Macaúba - Tecnologia pós-colheita. 2. Macaúba -
Propriedades físicas. 3. Macaúba - Propriedades mecânicas. 4.
Acrocomia aculeata. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

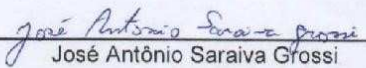
CDD. 22 ed. 633.851

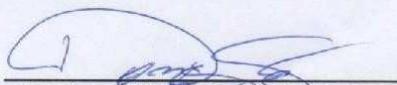
ZENIL RICARDO CUNHA RODRIGUES DE OLIVEIRA

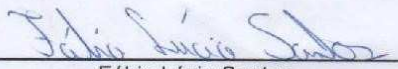
PROPRIEDADES FÍSICAS DA RÁQUIS DA MACAÚBA VISANDO O
PROJETO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS

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

APROVADA: 20 de julho de 2016.


José Antônio Saraiva Grossi


Domingos Sárvio Magalhães Valente
(Coorientador)


Fábio Lúcio Santos
(Orientador)

Aos meus pais, Geraldo e Madalena.
Aos meus irmãos Geraldo, Luciana,
José Renato e José Roberto. Aos
meus sobrinhos e meus amigos, em
especial Maria, Bruno, Freitas,
Thomás e Mayron.

DEDICO

“Ainda que eu falasse as línguas dos
homens e dos anjos, e não tivesse
amor, seria como o metal que soa ou
como o sino que tine”

1 Coríntios 13:1

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo.

A todos os famílias em especial meus pai e mãe, Geraldo e Madalena.

Agradeço os meus irmãos Geraldo, Luciana, José Renato e José Roberto. Agradeço meus sobrinhos Geraldo, Jordânia, Mychelli, Davi, Pedro, Maria Eduarda, Victor Hugo, Gustavo e Yasmine.

Agradeço meus amigos Maria Belico, Bruno Torto, Thomás Valente, Doris e Mayron Marcel.

Agradeço a todos os companheiros de caminhada Nara, Ely, Jéssica, Lauana, Paulo Eduardo, Patrícia, Daniel, Lucas Henrique, Fernanda Heleno e Luís Vitere.

Agradeço o pessoal do armazenamento Moises, José Geraldo, Edson Miranda e senhor Carlos Antônio.

Agradeço o pessoal da mecanização Gil, Marcelão, Remo, Gregory, Gustavo, Ganso, Christian, Marconi, Édilus, Bruno, Dinha, Conceição e Nina.

Agradeço em muito o professor mais Darth Vader de todos, Fábio Lúcio por todas as conversas, ensinamentos e amizade.

Agradeço aos professores Sárvio e Francisco pelos ensinamentos.

Agradeço a professora Lêda pelos conselhos.

Agradeço a todas as pessoas e órgãos de fomento que contribuíram com este trabalho e que eu possa nem ter a noção.

Obrigado mesmo.

BIOGRAFIA

ZENIL RICARDO CUNHA RODRIGUES DE OLIVEIRA, filho de Geraldo Rodrigues de Oliveira e Maria Madalena Cunha Rodrigues de Oliveira, nasceu no Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, em 15 de maio de 1987.

Em 2003 iniciou o Ensino Médio pela Escola Estadual “Senador Levindo Coelho”, em Ubá, Minas Gerais, transferindo-se em 2005 para o Colégio de Aplicação Coluni, concluindo neste mesmo ano.

Em março de 2008, iniciou o curso de Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, concluindo em março de 2014.

Em julho de 2014 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado, área de concentração em Armazenamento e Secagem, pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Em julho de 2016, submeteu-se aos exames de defesa da dissertação, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
CAPÍTULO I: Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas da ráquis do cacho de macaúba	6
Resumo	7
Abstract	8
1.Introdução	9
2.Material e Métodos	11
2.1. Teor de água	11
2.2. Dimensões	12
2.3. Massa e volume	13
2.4. Massa específica.....	14
2.5. Coeficiente de Poisson.....	14
2.6. Ensaio de cisalhamento	15
2.7. Ensaio de compressão.....	18
2.8. Análise estatística	19
3.Resultados e Discussão	19
3.1. Teor de água	19
3.2. Dimensões	20
3.2.1. Comprimento	20
3.2.2. Diâmetro	21
3.3. Massa e volume	25
3.4. Massa específica.....	27
3.5. Coeficiente de Poisson.....	29
3.6. Ensaio de cisalhamento	30
3.7. Ensaio de compressão.....	32

3.7.1. Módulo de elasticidade	32
3.7.2. Resistência à compressão	33
3.7.2. Resiliência.....	35
4.Conclusões.....	36
5.Referências Bibliográficas	36
CAPÍTULO II: Transmissibilidade de vibração e varredura de frequência na ráquis visando subsidiar o projeto de máquinas de colheita frutos e pós- colheita de cachos da macaúba	40
Resumo.....	41
Abstract	42
1.Introdução	43
2.Material e Métodos.....	45
2.1. Ensaio de transmissibilidade	45
2.2. Ensaio de varredura de frequência	48
2.3. Análise estatística	50
3.Resultados e Discussão.....	50
3.1. Ensaio de transmissibilidade	50
3.2. Ensaio de varredura de frequência	53
4.Conclusões.....	58
5.Referências Bibliográficas	58
CONCLUSÕES GERAIS	61

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I: Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas da ráquis do cacho de macaúba

Tabela 1: Teor médio de água % b.u da ráquis nos estádios de maturação verde e maduro.....	20
Tabela 2: Comprimento da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.....	21
Tabela 3: Comprimento da ráquis de macaúba para os acessos.....	21
Tabela 4: Diâmetro médio da ráquis de macaúba nos eixos em X e em Y, nos estádios de maturação verde e maduro.....	22
Tabela 5: Diâmetros médios da ráquis de macaúba para os estádios de maturação verde e maduro.....	22
Tabela 6: Diâmetros médios nos eixos em X e em Y, da ráquis de macaúba para os acessos.....	23
Tabela 7: Diâmetros no eixo X e no eixo Y da ráquis de macaúba para o terço superior, médio e inferior.....	23
Tabela 8: Circularidade média referente aos estádios de maturação verde e maduro.....	24
Tabela 9: Circularidade média referente aos acessos.....	24
Tabela 10: Circularidade média referente aos terços da ráquis de macaúba ...	25
Tabela 11: Valores médios de massa e volume para a ráquis nos estádios de maturação verde e maduro.....	25
Tabela 12: Valores médios de massa e volume para a ráquis de macaúba para os acessos.....	26
Tabela 13: Valores médios de massa e volume para a ráquis nos terços.....	27
Tabela 14: Valores médios de massa específica para a ráquis nos estádios de maturação verde e maduro.....	27
Tabela 15: Valores médios de massa específica para a ráquis nos acessos ...	28
Tabela 16: Valores médios de massa específica para a ráquis nos terços.....	29
Tabela 17: Coeficiente de Poisson da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.....	29
Tabela 18: Coeficiente de Poisson da ráquis de macaúba nos acessos.....	29
Tabela 19: Tensão de cisalhamento da ráquis de macaúba com lâminas sem concentrador de tensão e com concentrador de tensão com chanfro a 45°.....	30
Tabela 20: Tensão de cisalhamento da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.....	31
Tabela 21: Ensaio de cisalhamento da ráquis de macaúba para os acessos...	32
Tabela 22: Módulo de elasticidade da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.....	33
Tabela 23: Módulo de elasticidade da ráquis de macaúba para os acessos....	33
Tabela 24: Resistência à compressão da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.....	34
Tabela 25: Resistência à compressão da ráquis de macaúba para os acessos.....	34
Tabela 26: Resiliência da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.....	35
Tabela 27: Resiliência da ráquis de macaúba para os acessos.....	35

**CAPÍTULO II: Transmissibilidade de vibração e varredura de frequência na
ráquis visando subsidiar o projeto de máquinas de colheita frutos e pós-
colheita de cachos da macaúba**

Tabela 1: Transmissibilidade da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.....	51
Tabela 2: Transmissibilidade média da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro	52
Tabela 3: Frequências naturais da ráquis de macaúba para os estádios de maturação verde e maduro, nos pontos monitorados.....	54
Tabela 4: Valor de magnitude média dos picos em RMS	57

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I: Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas da ráquis do cacho de macaúba

Figura 1: Cadinhos contendo amostras picadas de ráquis de macaúba com volume de 1 cm ³	12
Figura 2: Imagem de uma amostra da ráquis de macaúba particionada nos terços superior (A); médio (B) e inferior (C).	12
Figura 3: Medidas de forma equidistante do terço da ráquis (A) e secção transversal de cada terço nos eixo X e Y (B).	13
Figura 4: Imagens dos corpos de provas de 1,5 cm de altura utilizados para medir a massa e o volume. Terço superior (A), médio (B) e inferior (C).	14
Figura 5: Corpos de provas utilizados para determinar o coeficiente de Poisson	15
Figura 6: Corpos de provas confeccionados para o ensaio de cisalhamento	16
Figura 7: Configuração utilizada para o teste de cisalhamento.....	16
Figura 8: Aparato desenvolvido para o ensaio de cisalhamento (A), lâmina utilizada para o ensaio (B), sem concentrador de tensão (C) e com concentrador de tensão, chanfro a 45° (D).....	17
Figura 9: Corpos de provas confeccionados para o ensaio de módulo de elasticidade	18
Figura 10: Equipamento para o ensaio de compressão da ráquis de macaúba	19

CAPÍTULO II: Transmissibilidade de vibração e varredura de frequência na ráquis visando subsidiar o projeto de máquinas de colheita de frutos e pós-colheita de cachos da macaúba

Figura 1: Equipamentos utilizados para o ensaio de vibrações mecânicas; vibrador eletromagnético (A), gerador de sinais (B), amplificador (C), fonte de alimentação (D).....	46
Figura 2: Plano de avaliação da transmissibilidade (A) e pontos de medição ao longo da ráquis de macaúba (B).	46
Figura 3: Aparato confeccionado para a realização do ensaio de vibração (A) e ráquis de macaúba engastada para a realização do ensaio (B).....	47
Figura 4: Corpos de provas confeccionados para o ensaio de módulo de elasticidade	49
Figura 5: Equipamento para ensaio de compressão da ráquis de macaúba	50
Figura 6: Módulo de elasticidade da ráquis de macaúba para os estádios de maturação verde e maduro	55
Figura 7: Espectrogramas de frequência naturais no estádio de maturação verde sendo BGP 12 (A), BGP 13 (B), BGP 31 (C) e BGP 53 (D).....	56
Figura 8: Espectrogramas de frequência naturais no estádio de maturação maduro sendo BGP 12 (A), BGP 13 (B), BGP 31 (C) e BGP 53 (D).....	57

RESUMO

OLIVEIRA, Zenil Ricardo Cunha Rodrigues de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2016. **Propriedades físicas da ráquis da macaúba visando o projeto de máquinas agrícolas.** Orientador: Fábio Lúcio Santos. Coorientadores: Domingos Sárvio Magalhães Valente e Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

A macaúba é uma palmeira de grande dispersão geográfica e alta produtividade de óleo, cerca de $6000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, ao qual pode ser destinado à produção de biodiesel. Entretanto, a colheita dos cachos é onerosa devido à falta de equipamentos adequados. Com a finalidade de melhorar tanto a qualidade dos frutos e a eficiência na colheita, uma alternativa é empregar o uso de máquinas que utilizam o princípio de vibrações mecânicas. Esse trabalho foi desenvolvido com a finalidade de determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas da ráquis do cacho de macaúba. Foram utilizados quatro diferentes acessos nos estádios de maturação verde e maduro. As propriedades geométricas foram determinadas por meio de medições diretas nos corpos de prova. Ensaios de compressão e vibração foram realizados para determinar propriedades físicas e mecânicas da ráquis de macaúba. As massas específicas da ráquis tendem a diminuir do terço superior para o inferior. O Módulo de Elasticidade obtido para a ráquis de macaúba para o estágio de maturação verde foi 51,97 MPa, e para o estágio de maturação maduro foi de 37,93 MPa. O coeficiente de Poisson para a ráquis de macaúba foi de 0,29 e 0,31 para os estádios de maturação verde e maduro, respectivamente. A transmissibilidade média encontrada foi de 0,39. Os valores encontrados para as frequências naturais nos ensaios de vibração foram de 22,65 e 45,25 Hz para os estádios de maturação verde e maduro, respectivamente.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Zenil Ricardo Cunha Rodrigues de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2016. **Physical properties of the macaw palm's rachis targeting the design of agricultural machine.** Advisor: Fábio Lúcio Santos. Co-Advisors: Domingos Sárvio Magalhães Valente and Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

The macaw is a palm with geographical dispersion wide and high oil, about 6000 kg per hectare per year, which can be used to produce biodiesel. However, the harvest macaw palm is costly due to lack of proper equipment. In order to improve both fruit quality and efficiency in the harvest, an alternative is to employ the use of machines using the principle of mechanical vibrations. This work was developed with the purpose of determining the geometric properties, physical and mechanical of the macaw palm's rachis. Four different accesses were used in the green and ripe maturation stages. The geometric properties were determined through direct measurements on test specimens. Compression and vibration tests were conducted to determine physical and mechanical properties of the macaw palm's rachis. The specific mass of the macaw palm's rachis tend to decrease of the upper third to the lower third. The elastic modulus obtained for the rachis of macaw palm for green maturity stage was 51.97 MPa, and the ripe stage was 37.93 MPa. The Poisson's ratio for the macaw palm's rachis was 0.29 and 0.31 for green and ripe stages of maturation, respectively. The average transmissibility found was 0.39. The values for the natural frequencies in the vibration tests were 22.65 and 45.25 Hz for the green and ripe maturation stages, respectively.

INTRODUÇÃO GERAL

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palma oleaginosa, nativa da América tropical ocorrendo com grande dispersão geográfica, desde a América Central até o extremo sul do continente Americano (Motoike et al., 2013). No Brasil é encontrada em praticamente todas as regiões do país, destacando-se pela rusticidade (Berton, 2013) e robustez, além de ter uma grande capacidade de se adaptar a diferentes variações climáticas suportando desde o frio intenso do extremo sul da Argentina, até regiões semiáridas como o nordeste brasileiro (Soares et al., 2011; Lopes et al., 2013).

Quando adulta, a palmeira apresenta porte arbóreo elevado, na faixa de 10 a 15 m altura, além de uma grande quantidade de espinhos em seu tronco (Montoya et al., 2015). Os frutos maduros da planta são globosos e levemente achatados de coloração marrom-amarelada, com diâmetro variando de 3 a 6 cm. O óleo da palma de macaúba é extraído de duas partes do fruto, da amêndoa e da polpa, constituindo-se numa promissora fonte de óleo vegetal para a indústria de combustíveis (Navarro-Días et al., 2014), cosmética (Silva et al., 2009) e alimentícia (Siqueira, 2012). O óleo oriundo da amêndoa representa cerca de 15% do óleo retirado da planta, possui utilidades nobres para a indústria farmacêutica, alimentícia e cosmética. Enquanto, o óleo retirado da polpa, cerca de 85%, é de grande potencial para a fabricação de biodiesel (Nobre et al., 2014). Além do óleo, os frutos da macaúba geram coprodutos de grande valor agregado. Existe, ainda, a possibilidade de o endocarpo ser usado na fabricação de carvão vegetal (Motoike et al., 2013; Nobre et al., 2014).

Tendo em vista, a grande capacidade de adaptação, a macaúba detém uma grande produtividade, cerca de 6000 kg de óleo ao ano por hectare (Michelin et al., 2015), haja vista, que nos últimos anos tem-se aumentado a busca por fontes alternativas aos combustíveis fósseis, sendo uma dessas fontes o biodiesel. Este é um combustível produzido a partir de óleo vegetal ou de gordura animal, o qual detém propriedades similares aos combustíveis de petróleo (Aguieiras et al., 2014). Tendo em vista, a alta produtividade do óleo

extraído da macaúba é de se esperar que esta palma seja uma fonte promissora biocombustível (Iha et al., 2014).

Entretanto, com o porte arbóreo elevado, a colheita do fruto de macaúba é bastante onerosa. Atualmente, é explorada de forma extrativista coletando-se os frutos que caem no chão ou cortando-se os cachos maduros por meio de foices adaptadas à altura da planta. Porém, em ambas as formas de colheita, o fruto entra em contato com solo, podendo sofrer danos mecânicos devido à queda e, ação de microrganismos, provocando a degradação da polpa gerando óleo de qualidade inferior (Ciconini et al., 2013). Com a finalidade de melhorar, ou seja, produzir em escalas industriais deve-se empregar uma colheita mecanizada com métodos mais sofisticados como a vibração mecânica. Algumas culturas agrícolas já utilizam tal tecnologia destacando-se entre estas culturas o café (Coelho et al., 2015; Silva et al., 2015) e azeitona (Dias et al., 2007).

O princípio com base em vibrações mecânicas depende do conhecimento de parâmetros como frequência, amplitude e tempo de vibração. A partir dos parâmetros de vibração, este tipo de colheita propicia uma melhor seleção dos frutos quando se tem o conhecimento a respeito do comportamento dinâmico da planta a ser colhida, como as frequências naturais e modos de vibração (Santos et al., 2010).

Além disso, paralelamente, com o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas será possível aperfeiçoar processos industriais e dimensionar adequadamente máquinas e equipamentos que serão utilizados nas operações de colheita e pós-colheita da macaúba. Desta forma, o trabalho de campo para o operador será mais seguro, além de, reduzir o contingente de mão de obra e, os custos de produção.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho determinar e avaliar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas da ráquis do cacho de macaúba, além de determinar e avaliar a transmissibilidade e a varredura de frequência da ráquis de macaúba, a fim de subsidiar projetos de máquinas de colheita e processamento dos cachos.

Disposição do trabalho

A disposição do trabalho consiste em dois capítulos, além da “*Introdução geral*” e “*Conclusão geral*”.

No primeiro capítulo, intitulado de “*Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas da ráquis do cacho de macaúba*”, é apresentada a parte do trabalho referente à determinação das propriedades geométricas e físicas da ráquis de macaúba. Determinou-se as seguintes propriedades: dimensões, massa, volume, massa específica, coeficiente de Poisson, tensão de cisalhamento, módulo de elasticidade, resistência à compressão e resiliência.

No segundo capítulo, intitulado de “*Transmissibilidade de vibração e varredura de frequência na ráquis visando subsidiar o projeto de máquinas de colheita frutos e pós-colheita de cachos da macaúba*”, foram analisadas a transmissibilidade e a varredura de frequência, no intervalo de 10 a 80 Hz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIEIRAS, E. C. G.; CAVALCANTI-OLIVEIRA, E. D.; CASTRO, A. M.; LANGONE, M. A. P.; FREIRE, D. M. G. Biodiesel production from *Acrocomia aculeata* acid oil by (enzyme/enzyme) hydroesterification process: Use of vegetable lipase and fermented solid as low-cost biocatalysts. **Fuel**, v. 135, n.1, p. 315–321, 2014.

BERTON, L. H. C. **Avaliação de populações naturais, estimativas de parâmetros genéticos e seleção de genótipos elite de macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. 2013. 154f. Tese de doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical. Instituto Agronômico. Campinas. 2013.

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**, v. 45, n.1, p. 208-214, 2013.

COELHO, A. L.; 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.1, p. 286-292, 2015.

DIAS, A. B.; PEÇA, J. O.; L., SANTOS, L.; PINHEIRO, A. A influência da poda mecânica na produção e na eficiência da colheita da azeitona por vibração. **Revista de Ciências Agrárias**, v.30, n.1, p.467- 475, 2007.

IHA, O. K.; ALVES, F. C. S. C.; SUAREZ, P. A. Z.; OLIVEIRA, M. B. F.; MENEGHETTI, S. M. P.; SANTOS, B. P. T.; SOLETTI, J. I. Physicochemical properties of *Syagrus coronata* and *Acrocomia aculeata* oils for biofuel production. **Industrial Crops and Products**, v. 62, n.1, p. 318–322, 2014.

LOPES, D. C.; NETO, A. J. S.; MENDES, A. A.; PEREIRA, D. T. V. Economic feasibility of biodiesel production from Macauba in Brazil. **Energy Economics** v.40, n.1, p. 819–824, 2013.

MICHELIN, S.; PENHA, F. M.; MELANIA M. SYCHOSKI, M. M.; SCHERER, R. P.; TREICHEL, H.; ALEXSANDRA VALERIO, A.; LUCCIO, M. D.; OLIVEIRA, D.; OLIVEIRA, J. V. Kinetics of ultrasound-assisted enzymatic biodiesel production from Macauba coconut oil. **Renewable Energy**, v. 76, n.1, p. 388-393, 2015.

MONTOYA, S. G.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N.; OLIVEIRA, C. M.; HONÓRIO, I. G. Registro da presença e danos causados por coleópteros em macaúba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 159-162, 2015.

MOTOIKE, S. Y.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L. D.; KUTI, K. N.; PAES, J. M. V.; DIAS, H. C. T.; SATO, A. Y. **A cultura da macaúba: implantação e manejo de cultivos racionais**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2013. 61p.

NAVARRO-DÍAS, H. J.; GONZALEZ, S. L.; IRIGARAY, B.; VIEITEZ, I.; JACHMANIÁN, I.; HENSE, H.; OLIVEIRA, J. V. Macauba oil as alternative feedstock for biodiesel: Characterization and ester conversion by the supercritical method. **Journals of Supercritical Fluids**; v.93, p.130-137, 2014.

NOBRE, D. A. C.; TROGELLO, E.; BORGHETTI, R. A.; DAVID, A. M. S. S. Macaúba: palmeira de extração sustentável para biocombustível. **Colloquium Agrariae**, v. 10, n.2, p.92-105, 2014.

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; RESENDE, R. C. Frequency and amplitude of vibration on coffee harvesting. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.4, p.426-431, 2010.

SILVA, B. P.; SILVA, G. M.; PARENTE, J. P. Chemical properties and adjuvant activity of a galacto glucomannan from *Acrocomia aculeata*. **Carbohydrate Polymers**; v. 75, n.1, p.380–384, 2009.

SILVA, F. C.; SILVA, F. M.; ALVES, M. C.; FERRAZ, G. A. S.; SALES, R. S. Efficiency of coffee mechanical and selective harvesting in different vibration during harvest time. **Coffee Science**, v. 10, n. 1, p. 56 - 64, 2015.

SIQUEIRA, P. B. **Caracterização bioquímica e compostos bioativos de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.)**, 2012. Tese de doutorado em Engenharia de Alimentos. Unicamp. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2012.

SOARES, J. D. R.; RODRIGUES, F. A.; PASQUAL, M.; NUNES, C. F.; ARAUJO, A. G. Germinação de embriões e crescimento inicial *in vitro* de

macaúba. **Ciência Rural**, v.41, n.5, p. 773-778, 2011.

**Capítulo I: Determinação das propriedades geométricas, físicas
e mecânicas da ráquis do cacho de macaúba**

Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas da ráquis do cacho de macaúba

RESUMO

O desenvolvimento de máquinas eficientes para a colheita e pós-colheita da macaúba exige estudo sobre o comportamento dinâmico da planta, ou seja, como esta vai responder a estímulos realizados pela interação máquina-planta. Métodos de implementação numérica, como o método de elementos finitos, podem ser empregados em projetos de máquinas a fim de estudar o comportamento dinâmico da planta. Como parâmetros de entrada para utilização do método de elementos finitos, devem ser informadas as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema em estudo. Objetivou-se neste trabalho determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas da ráquis de macaúba, nos estádios de maturação de frutos verdes com idade de 180 dias e maduros. O teor de água foi calculado através do método de estufa de $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 24h, as dimensões foram determinadas com o auxílio de trena e paquímetro, as massas e os volumes mensurados, empregando-se balança digital e proveta, respectivamente. O módulo de elasticidade da ráquis foi determinado por meio de ensaios mecânicos de compressão. Os coeficientes de Poisson foram determinados pelas deformações longitudinais e transversais de corpos de provas oriundos da ráquis. Concluiu-se que as dimensões, a massa, o volume e a massa específica da ráquis de macaúba apresentaram tendência de diminuir à medida que se passa do terço superior para os demais terços. Os módulos de elasticidade das ráquis no estádio de maturação verde foram superiores aos valores para o estádio maduro de maturação.

Palavras-chave: palmeira, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson.

Determination of geometric, physical and mechanical properties of rachis bunch of macaw palm

ABSTRACT

The development of efficient machines for harvesting and post-harvest of macaw palm requires study of the dynamic behavior of the plant, that is, as this will respond to stimuli performed by the harvester-plant interaction. Numerical implementation methods such as the finite element method can be used in machine design to study the dynamic behavior of the plant. As input parameters for using the finite element method, they should be informed geometrical, physical and mechanical system under study. The aim of this study was to determine the geometric, physical and mechanical properties of the rachis of macaw palm in maturation stages of unripe, with age of 180 days, and ripe fruit. The moisture content was calculated using the oven method of $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 24 hours, the dimensions were determined with the aid of tape and caliper rule, the mass and the measured volume, using a digital balance and cylinder, respectively. The modulus of elasticity's rachis was determined by means of mechanical compression tests. The Poisson's ratios were determined by the longitudinal and transverse deformation of bodies of evidence resulting from the rachis. It was concluded that the dimensions, mass, volume and density of the rachis of macaw palm tended to decrease as it passes the upper third for the other thirds. The modulus of elasticity's rachis on the green maturity stage were higher than the values for the mature stage of ripeness.

Key words: palm, modulus of elasticity, Poisson's ratio.

1. Introdução

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palma nativa da América tropical, ocorrente desde a América Central até o extremo sul do continente Americano (Motoike et al., 2013). No Brasil é considerada uma das palmeiras de maior dispersão, sendo encontrada em praticamente todas as regiões do país, destacando-se pela rusticidade (Berton, 2013) e robustez, tendo tolerância à seca e a baixas temperaturas.

A palmeira quando adulta apresenta porte arbóreo, entre 10 a 15 m de altura, e alta quantidade de espinhos em seu tronco (Montoya et al., 2015). Os frutos maduros são globosos levemente achatados de coloração marrom-amarelada, com um diâmetro variando de 3 a 6 cm. A composição do fruto, em peso, é de cerca de 20% de casca, 40% de polpa, 33% de endocarpo e 7% de amêndoa. Os óleos são extraídos de duas partes do fruto, da amêndoa e da polpa. O primeiro representa cerca de 15% do óleo retirado da planta, e possui utilizações nobres para indústria farmacêutica, de alimentos e de cosméticos. Enquanto, o óleo retirado do segundo, tem maior potencial para fabricação de biodiesel (Nobre et al., 2014).

Em relação à produtividade, constitui-se numa promissora fonte de óleo vegetal para a indústria de combustíveis (Navarro-Días et al., 2014), cosmética (Silva et al., 2009) e alimentícia (Siqueira, 2012). Além do óleo, o processamento dos frutos da macaúba gera coprodutos de grande valor agregado. Os farelos oriundos da polpa e da amêndoa podem ser utilizados na indústria alimentícia tanto humana quanto a animal. Existe, ainda, a possibilidade de o endocarpo ser usado na fabricação de carvão vegetal (Motoike et al., 2013; Nobre et al., 2014).

Diferentes princípios podem ser empregados para a realização da colheita mecanizada de um determinado produto agrícola. Destacando-se dentre estes o princípio do arranquio (Zerbato, 2013), impacto (Oliveira et al., 2007), corte (Silva et al., 2008) e vibração mecânica (Santos et al., 2010a). Em relação a cultura da macaúba, acredita-se que os princípios de corte e a vibração mecânica do cacho sejam promissores. O corte refere-se ao cisalhamento da seção transversal da ráquis do cacho, promovendo a

separação destes da planta para, posterior, destacamento dos frutos. Geralmente, para viabilizar esta operação, emprega-se uma foice ou faca malasiana. Culturas como o dendê e a macaúba, são colhidos desta forma (Motoike et al., 2013). O princípio com base em vibrações mecânicas depende do conhecimento de parâmetros como frequência, amplitude e tempo de vibração. É empregado em diferentes culturas como café (Coelho, 2014) e azeitona (Dias et al., 2007). A partir dos parâmetros de vibração, este tipo de colheita propicia uma melhor seleção dos frutos quando se tem o conhecimento a respeito do comportamento dinâmico da planta a ser colhida, como as frequências naturais e modos de vibração (Santos et al., 2010b).

Explorada de forma extrativista, atualmente, a operação de colheita da macaúba é realizada coletando-se os frutos que caem no chão ou cortando-se os cachos maduros por meio de foices adaptadas à altura da planta. Em ambas as formas de colheita, o fruto entra em contato com solo, podendo sofrer danos mecânicos devido à queda e, ação de microrganismos, provocando a degradação da polpa gerando um óleo de qualidade inferior (Ciconini et al., 2013).

O indicativo do ponto de colheita do cacho é quando ocorre o desprendimento natural dos primeiros frutos. O período de safra pode variar de acordo com as alterações do clima em cada região. Em Minas Gerais, o pico da safra ocorre na segunda quinzena de novembro até o mês de janeiro, embora, a safra inicie-se em outubro estendendo-se até março.

Tendo em vista o potencial da macaúba como fonte de energia (Gonçalves et al., 2013), cresce a demanda por dados científicos que forneçam conhecimentos precisos a respeito da planta, frutos, composição de óleo, propriedades físicas e mecânicas. Com base nesses conhecimentos, pode-se fazer com que a exploração de extrativista passe para uma escala industrial, com um cultivo racional e sustentável.

Além disso, paralelamente, com o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas será possível aperfeiçoar processos industriais e dimensionar adequadamente máquinas e equipamentos que serão utilizados nas operações de colheita e pós-colheita da macaúba. Desta forma, o

trabalho de campo para o operador será mais seguro, além de, reduzir o contingente de mão de obra e, os custos de produção.

Nesse contexto, considerando o potencial da cultura, objetivou-se com este trabalho determinar e avaliar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas da ráquis do cacho de macaúba a fim de subsidiar projetos de máquinas de colheita e pós-processamento.

2. Material e Métodos

A pesquisa foi executada utilizando cachos de macaúba coletados no Banco de Germoplasma (BAG) da Universidade Federal de Viçosa – UFV, localizados na Fazenda Experimental em Araponga - MG. As amostras de ráquis de macaúba foram oriundas de quatro acessos: BGP 12 – Ibiá - Araxá; BGP 13 – Sítio Paraíso - Belo Horizonte; BGP 31 – Três Marias; BGP 53 – Lavras - São João Del Rey.

O trabalho foi realizado no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, no período nov/2015 a fev/2016. As amostras foram coletadas sempre pela manhã e os ensaios ocorridos durante o mesmo dia da coleta e também no dia posterior, a temperatura ambiente da sala de análise foi mantida a 20°C.

Foram determinadas, para as amostras em cada estágio de maturação, o teor de água, dimensões geométricas, massa, volume, massa específica, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e ensaio de cisalhamento. Foram considerados os estádios de maturação de frutos verdes com idade de 180 dias e maduros quando ocorre o desprendimento natural dos frutos.

2.1. Teor de água

Para obter o teor de água das amostras de ráquis foi empregado o método direto (Brasil, 2009) em estufa a 105°C ± 3°C por 24 horas. A princípio foram pesados os cadinhos utilizados vazios. Posteriormente, foram pesados os cadinhos com as amostras picadas de ráquis de macaúba com volume de 1 cm³ (Figura 1). Após 24 horas, estipuladas pelo método, empregando-se

três repetições, foram pesados os cadinhos com as amostras e anotados os resultados.



Figura 1: Cadinhos contendo amostras de ráquis de macaúba picadas com volume de 1 cm³.

2.2. Dimensões

Para cada estágio de maturação, a ráquis foi particionada em três partes (Figura 2): terço superior, médio e inferior. O comprimento médio de cada terço foi obtido realizando-se uma medida do comprimento do eixo longitudinal de uma extremidade até a outra, empregando como instrumento de medida uma trena de precisão de 1 mm.

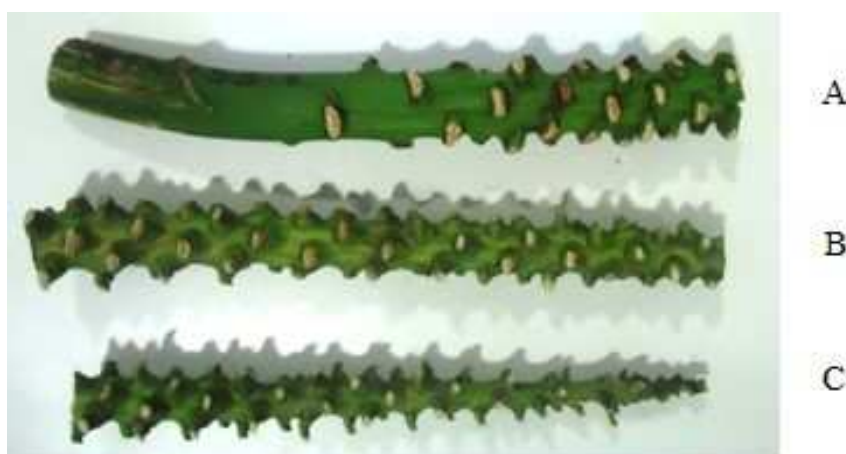


Figura 2: Imagem de uma amostra da ráquis de macaúba particionada nos terços superior (A); médio (B) e inferior (C).

O diâmetro médio de cada terço foi obtido realizando-se medidas do diâmetro em cinco seções transversais do terço ao longo da ráquis distribuídas de forma equidistante a partir das extremidades. Mediu-se o diâmetro nas seções transversais nos eixos em X e em Y (Figura 3). O instrumento utilizado

para medida foi paquímetro com resolução de 0,01mm.

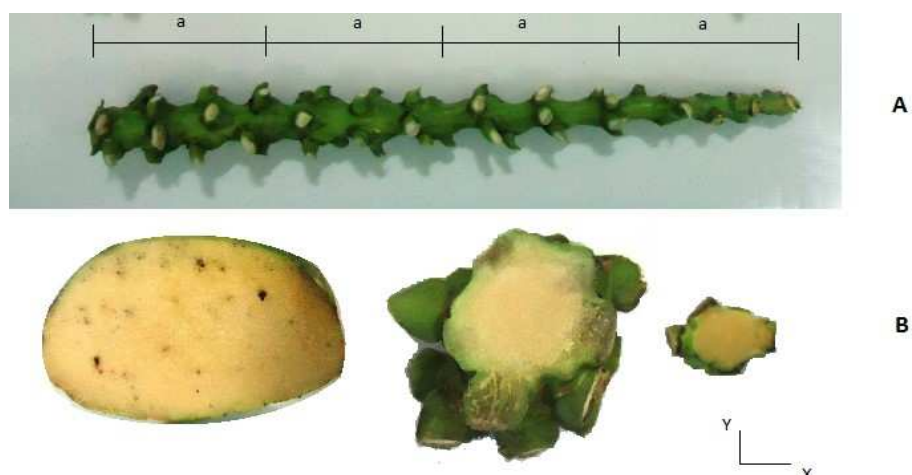


Figura 3: Medidas de forma equidistante do terço da ráquis (A) e secção transversal de cada terço nos eixo X e Y (B).

Com os diâmetros encontrados para os eixos equatoriais, calculou-se a circularidade da secção transversal da ráquis de macaúba com cinco repetições pela Equação 1.

$$C = \left(\frac{Y}{X} \right) 100 \quad (1)$$

em que,

C = circularidade (%);

Y = diâmetro do eixo Y, cm;

X = diâmetro do eixo X, cm.

2.3. Massa e volume

As massas médias (M) de cada terço da ráquis foram determinadas empregando cinco corpos de prova de altura de 1,5 cm (Figura 4) para cada estágio de maturação estudado, utilizando-se uma balança digital, com resolução de 0,0001 g.

O volume médio (V) dos corpos de prova, utilizados anteriormente para cada estágio de maturação, foi mensurado empregando-se uma proveta de 100 mL, com resolução de 1 mL. As medições dos volumes foram realizadas imergindo uma amostra da ráquis em água.

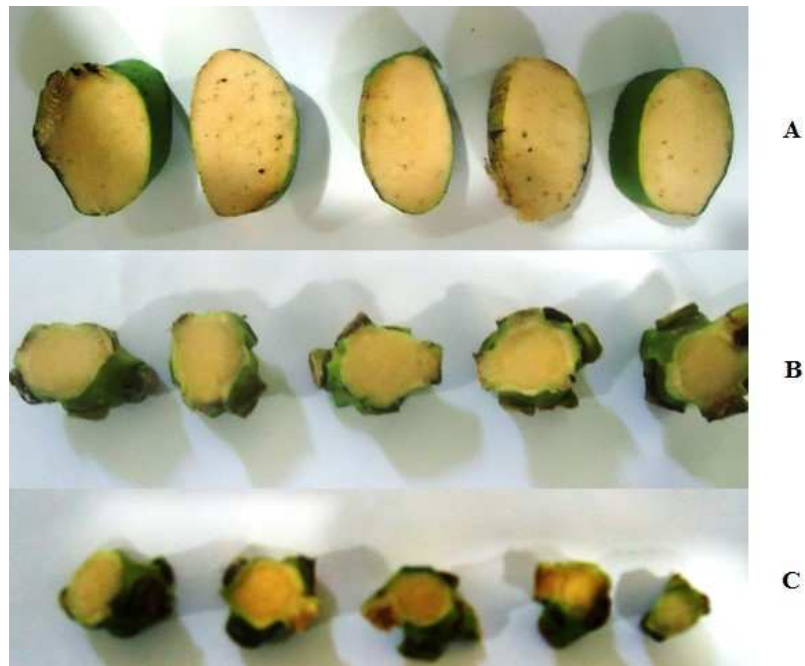


Figura 4: Imagens dos corpos de provas de 1,5 cm de altura utilizados para medir a massa e o volume. Terço superior (A), médio (B) e inferior (C).

2.4. Massa específica

A massa específica foi determinada para as amostras das ráquis por meio dos valores de massa e volume médios obtidos experimentalmente, segundo a Equação 2.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

em que,

ρ = massa específica, g cm⁻³;

M = massa média, g;

V = volume médio, cm³.

2.5. Coeficiente de Poisson

Os coeficientes de Poisson foram determinados, utilizando-se a máquina de ensaios universais *INSTRON 3360 Series Dual Column Table Frames*, empregando quatro corpos de provas (Figura 5) em cada estágio de maturação. Os corpos de provas foram confeccionados com o comprimento de 12,00 cm, largura de 2,50 cm e altura de 0,50 cm.

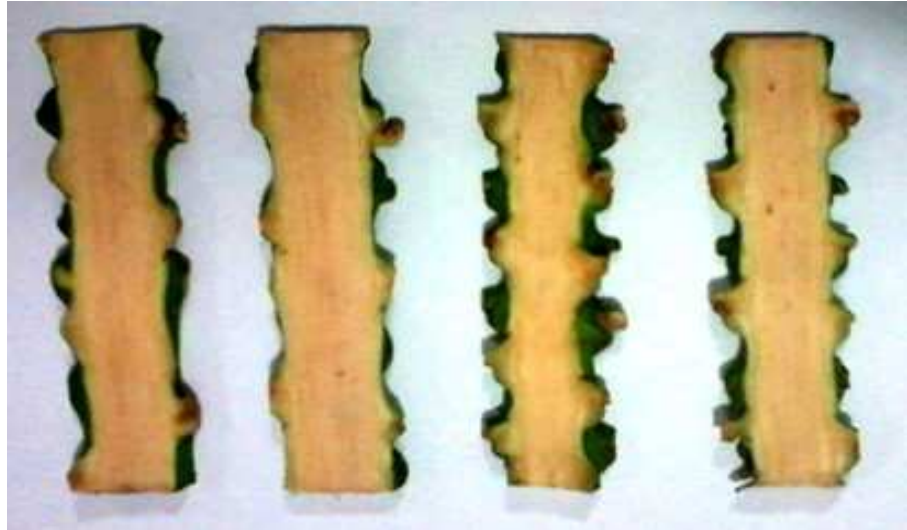


Figura 5: Corpos de provas utilizados para determinar o coeficiente de Poisson.

Os corpos de prova da ráquis foram fixados diretamente na máquina de ensaio universal por meio de garras do próprio equipamento, e tracionadas. O deslocamento empregado pelo sistema foi de 3,0 mm na direção vertical. Em seguida, mediu-se a deformação nos eixos X e Y, empregando o uso de paquímetro de resolução de 0,01mm.

O coeficiente de Poisson foi calculado pela Equação 3.

$$\mu = \frac{-\Delta d}{\Delta l} \quad (3)$$

em que,

μ = coeficiente de Poisson;

Δd = estricção específica transversal, mm mm⁻¹;

Δl = alongação específica longitudinal, mm mm⁻¹.

2.6. Ensaio de cisalhamento

O ensaio de cisalhamento foi feito empregando-se a máquina de ensaio universal *INSTRON 3360 Series Dual Column Table Frames* acoplada ao software *Bluehill 3*, configurada para a execução de uma rotina de compressão com velocidade de 15 mm/min. Para este ensaio foram confeccionados corpos de prova do terço superior da ráquis (Figura 6) com comprimento de 50 mm e secção transversal real da planta, com diâmetro médio de 25 mm.



Figura 6: Corpos de prova confeccionados para o ensaio de cisalhamento.

A realização dos testes de cisalhamento ocorreu em dois cenários. No primeiro, fixou-se uma lâmina sem concentrador de tensão à garra em posição superior da máquina, enquanto que na posição inferior, utilizou-se uma placa circular plana (Figura 7), com a finalidade de alocar sobre a parte fixa do aparato que serviu de suporte aos corpos de provas durante os ensaios.



Figura 7- Configuração utilizada para o teste de cisalhamento

Para o teste realizado no segundo cenário, fixou-se uma lâmina com concentrador de tensão, caracterizada por um chanfro à 45° em sua extremidade (Figura 8).

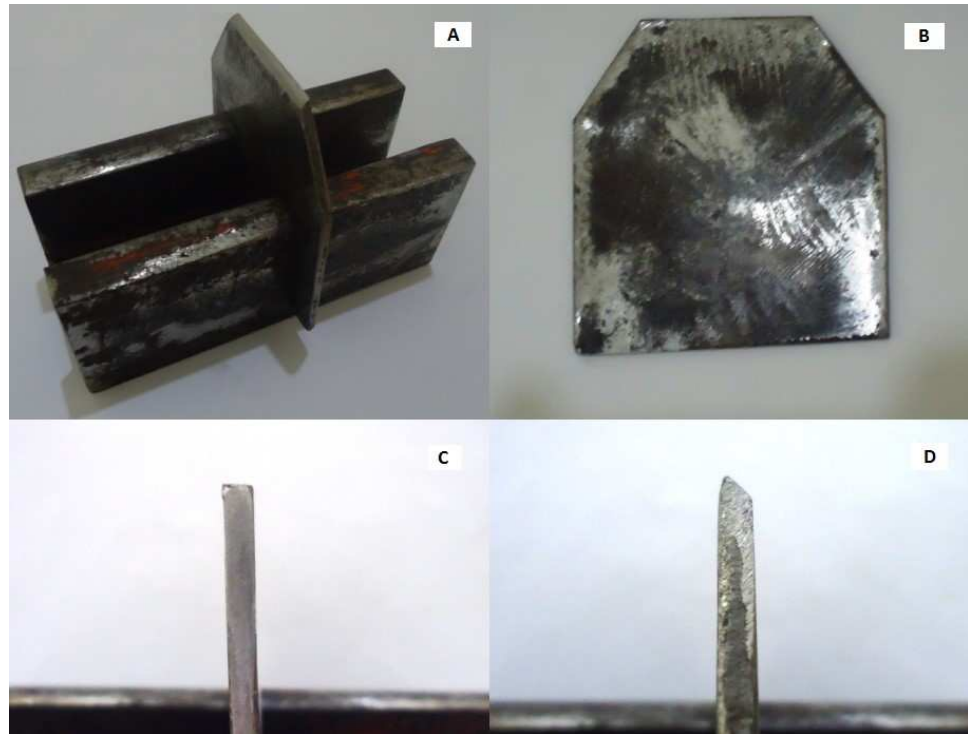


Figura 8: Aparato desenvolvido para o ensaio de cisalhamento (A), lâmina utilizada para o ensaio (B), sem concentrador de tensão (C) e com concentrador de tensão, chanfro a 45° (D).

Os corpos de prova foram inseridos na parte fixa do aparato. Ao se aplicar um movimento descendente da parte móvel da máquina de ensaios universais, com a lâmina para ensaios, gerou-se uma força cortante na secção transversal dos corpos de prova, em que no decorrer do ensaio, esta força foi elevada até a ruptura dos corpos de prova.

Tendo os parâmetros de força cortante e a área da secção transversal do corpo-de-prova, o cálculo da tensão de cisalhamento do material foi realizado a partir da Equação 4.

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (4)$$

em que,

τ = tensão de cisalhamento, MPa;

F = força cortante, N;

S = área da secção transversal do corpo de prova, mm².

2.7. Ensaio de compressão

A partir do ensaio de compressão, determinou-se o módulo de elasticidade da ráquis, empregando a máquina de ensaios universais *INSTRON 3360 Series Dual Column Table Frames*, utilizando-se cinco corpos de provas cilíndricos para todos os acessos. Estes corpos foram feitos a partir do terço inferior da ráquis com seção transversal circular de 20 mm de diâmetro e 15 mm de comprimento (Figura 9).

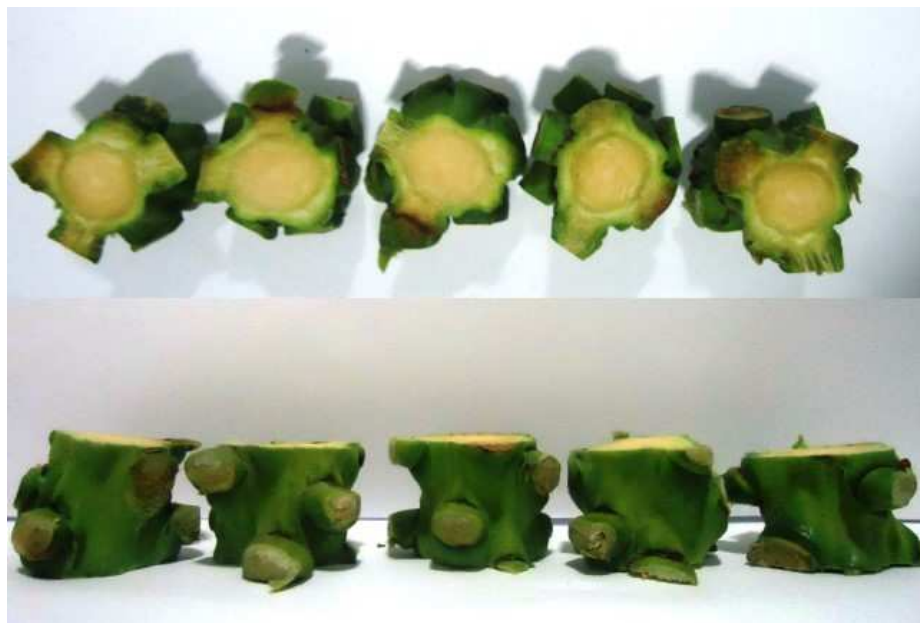


Figura 9: Corpos de provas confeccionados para o ensaio de módulo de elasticidade.

O ensaio ocorreu por meio de compressão, sendo as amostras colocadas entre duas placas circulares planas paralelas (Figura 10), submetidas a deformações constantes de pequena magnitude nas duas faces opostas do corpo-de-prova. A taxa de carregamento provida foi de 15,0 mm/min, monitorada através do software *Bluhill 3*, gerenciado pelo computador acoplado a máquina de ensaios universais. O módulo de elasticidade da ráquis foi calculado pelo método da tangente pelo próprio software, além da resistência à compressão.

Com base na curva de tensão - deformação, na zona elástica de cada acesso, foi possível determinar a propriedade de resiliência, através da área da curva onde o material de estudo apresenta característica elástica de deformação.



Figura 10: Equipamento para o ensaio de compressão da ráquis de macaúba.

2.8. Análise estatística

Os dados de dimensões, massa, volume, massa específica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, cisalhamento das amostras foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento inteiramente casualizado, com dois tratamentos (estádios de maturação dos frutos verdes e maduros). O efeito dos estádios de maturação sobre o comportamento das propriedades geométricas, físicas e mecânicas foi estudado por meio do teste de Tukey, ao nível de significância de 5%. As análises estatísticas foram feitas pelo software computacional *Assistat Statistic versão 7.7 beta, 2015*.

3. Resultados e Discussão

3.1. Teor de água

Analisando o teor médio de água das ráquis de macaúba para os acessos BGP 12, BGP 13 e BGP 53 não foram observadas diferenças significativas entre os estádios de maturação dos frutos verdes para maduros (Tabela 1). Entretanto, para o acesso BGP 31 é possível afirmar que ao passar do estágio de maturação verde para maduro, o teor médio de água apresentou

um ligeiro decréscimo.

Tabela 1: Teor médio de água % b.u da ráquis nos estádios de maturação verde e maduro.

Acessos	Teor médio de água (%bu)	
	Verde	Maduro
BGP 12	78,20 aA	80,55 aA
BGP 13	76,34 aA	78,10 abA
BGP 31	77,84 aA	72,31 bB
BGP 53	82,72 aA	81,30 aA

Letras minúsculas diferentes nas colunas indicam diferenças significativas, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas diferentes nas linhas indicam diferenças significativas, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quando se compara, em relação a um mesmo estágio de maturação, os teores de água, evidencia que não há diferença significativa para o estágio de maturação verde. Entretanto, para o estágio de maturação maduro, pode-se afirmar que o acesso BGP 31 apresenta menor teor de água do que os acessos BGP 12 e BGP 53.

Montoya (2013), ao analisar de frutos de macaúba, obteve resultados para o teor de água durante o seu crescimento. Embora, com a maturação fisiológica dos frutos, o teor de água apresentasse um decaimento, variando significativamente com o estágio de desenvolvimento. Entretanto, tal comportamento não ocorreu para a ráquis de macaúba, mantendo-se sem variação significativa do estágio de maturação verde para o maduro, o que era de se esperar, devido à necessidade de suprimento de água necessário para manter os frutos presentes nas ráquias.

3.2. Dimensões

3.2.1. Comprimento

Para as amostras analisadas, foram detectadas diferenças significativas apenas entre os estádios de maturação (Tabela 2).

Tabela 2: Comprimento da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de maturação	Comprimento (cm)
Verde	88,50 ± 14,50 a
Maduro	73,60 ± 14,50 b

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

Quanto ao estágio de maturação, nota-se diferença estatística, à medida que evoluiu o estágio de maturação dos frutos verdes para maduros, podendo inferir que o comprimento tende a apresentar um decréscimo.

Comportamento semelhante quanto à diminuição gradual do comprimento, no sentido da base para o topo, foi observado por Ghavami (2005) em bambus da espécie *Guadua angustifolia*. O mesmo comportamento ocorreu com o presente estudo para as ráquis de macaúba, em que o comprimento tendeu a diminuir com o avanço do estágio de maturação.

Para os acessos não foram detectadas diferenças significativas (Tabela 3).

Tabela 3: Comprimento da ráquis de macaúba para os acessos.

Acessos	Comprimento (cm)
BGP 12	91,85 ± 29,47 a
BGP 13	76,38 ± 29,47 a
BGP 31	70,85 ± 29,47 a
BGP 53	85,03 ± 29,47 a

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

3.2.2. Diâmetro

Tendo em vista, que os diâmetros foram medidos nos eixos em X e em Y, verifica-se que existe diferença estatística significativa entre os eixos, e que o eixo em X tende a ser maior do que o eixo em Y (Tabela 4).

Tabela 4: Diâmetro médio da ráquis de macaúba nos eixos em X e em Y, nos estádios de maturação verde e maduro.

Eixos	Diâmetro médio (cm)
X	2,52 ± 0,44 a
Y	2,03 ± 0,44 b

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

Os diâmetros foram analisados levando em conta a comparação entre os estádios de maturação verde e maduro (Tabela 5).

Tabela 5: Diâmetros médios da ráquis de macaúba para os estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de maturação	Diâmetro médio (cm)	
	X	Y
Verde	2,75 ± 0,34 a	2,16 ± 0,24 a
Maduro	2,31 ± 0,34 b	1,90 ± 0,24 b

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

Em relação ao estágio de maturação os diâmetros em ambos eixos, tendem a diminuir com o avanço do estágio de maturação de verde para maduro. Segundo Carlin et al., (2008), em estudo de cana de açúcar, verificou que a mudança do tamanho do diâmetro se dava devido ao alongamento celular. Para o diâmetro da ráquis de macaúba, acredita-se que ocorra um comportamento semelhante, resultando em alongamento celular proporcionado pelo peso do cacho.

Os diâmetros foram analisados levando em conta a comparação entre os acessos (Tabela 6).

Tabela 6: Diâmetros médios nos eixos em X e em Y, da ráquis de macaúba para os acessos.

Acessos	Diâmetro médio (cm)	
	X	Y
BGP 12	3,06 ± 0,62 a	2,60 ± 0,39 a
BGP 13	2,20 ± 0,62 b	1,80 ± 0,39 b
BGP 31	2,32 ± 0,62 b	1,82 ± 0,39 b
BGP 53	2,53 ± 0,62 ab	1,95 ± 0,39 b

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

Em relação aos acessos, para o diâmetro no eixo em X, o acesso BGP 12 apresentou maior valor do que os valores encontrados para os acessos BGP 13 e BGP 31. Entretanto, quanto ao acesso BGP 53 não houve diferença significativa para o diâmetro do eixo em X, destes dois acessos.

Quanto ao diâmetro no eixo em Y, o acesso BGP 12 foi maior do que o valor de diâmetro dos outros acessos. Os diâmetros do acesso BGP 12, em ambos os casos, apresentam-se maiores do que os outros acessos.

Analisando os diâmetros da ráquis de macaúba levando em conta a comparação entre os terços (Tabela 7).

Tabela 7: Diâmetros no eixo X e no eixo Y da ráquis de macaúba para o terço superior, médio e inferior.

Terços	Diâmetro médio (cm)	
	X	Y
Superior	3,40 ± 0,60 a	2,40 ± 0,52 a
Médio	2,64 ± 0,60 b	2,27 ± 0,52 a
Inferior	1,56 ± 0,60 c	1,44 ± 0,52 b

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

Analisando os terços da ráquis de macaúba, para o diâmetro no eixo em X, todos os terços apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si. Entretanto, o terço superior foi o que apresentou maior valor de diâmetro

médio equatorial, seguido pelo terço médio e inferior.

Em relação ao diâmetro médio do eixo em Y, tem-se que não existe diferença significativa entre os terços superiores e os médios, porém, há diferença estatística significativa entre estes dois terços com o terço inferior.

Nota-se que ambos os diâmetros tendem a ocorrer um decréscimo conforme o terço avança do superior para o inferior.

Desta forma, a análise da circularidade em comparação com o estágio de maturação (Tabela 8) e para os acessos (Tabela 9).

Tabela 8: Circularidade média referente aos estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de maturação	Circularidade (%)
Verde	81,63 ± 9,36 a
Maduro	84,21 ± 9,36 a

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

Tabela 9: Circularidade média referente aos acessos.

Acessos	Circularidade (%)
BGP 12	86,60 ± 18,47 a
BGP 13	82,90 ± 18,47 a
BGP 31	80,91 ± 18,47 a
BGP 53	81,30 ± 18,47 a

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

Em relação aos acessos e aos estádios de maturação não houveram diferenças estatísticas quanto aos valores encontrados de circularidade, ambos estádios na faixa de 80% de circularidade.

Em relação aos acessos, pode-se inferir que não houve diferença estatística entre os mesmos, embora, como reportado para os estádios de maturação a magnitude esteja na faixa de 80% de circularidade.

A circularidade para os terços da ráquis de macaúba (Tabela 10).

Tabela 10: Circularidade média referente aos terços da ráquis de macaúba.

Terços	Circularidade (%)
Superior	70,60 ± 7,56 b
Médio	85,96 ± 7,56 a
Inferior	92,20 ± 7,56 a

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

Em relação aos terços da ráquis de macaúba houve diferença significativa do terço superior com os demais. Entretanto, o terço médio não apresentou diferença significativa com o terço inferior, e ambos apresentaram a circularidade superior ao terço superior da ráquis.

A conformação desta circularidade implica que a secção transversal da ráquis de macaúba passou por uma transformação geométrica interessante, mudando a forma da secção transversal de elipse, durante o terço superior, para uma secção mais circular para os outros terços, sendo que no terço inferior a circularidade é de 92,20%, enquanto no terço superior é de 70,60%.

3.3. Massa e volume

Os resultados para as massas, volumes, para os estádios de maturação verde e maduro estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Valores médios de massa e volume para a ráquis nos estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de maturação	Massa (g)	Volume (cm³)
Verde	9,90 ± 3,90 a	10,65 ± 3,72a
Maduro	8,45 ± 3,90 a	9,68 ± 3,72 a

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

Embora, todos os parâmetros analisados tiveram um decréscimo em seus valores com a evolução do estádio de maturação de verde para maduro,

não foram observadas diferenças significativas para massa e volume.

Os resultados para as massas e volumes da ráquis de macaúba, foram analisados para os acessos (Tabela 12).

Tabela 12: Valores médios de massa e volume para a ráquis de macaúba para os acessos.

Acessos	Massa (g)	Volume (cm³)
BGP 12	13,14 ± 6,28 a	14,60 ± 5,83 a
BGP 13	6,35 ± 6,28 b	7,98 ± 5,83 b
BGP 31	7,00 ± 6,28 ab	8,13 ± 5,83 b
BGP 53	10,22 ± 6,28 ab	9,93 ± 5,83ab

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

Em relação aos acessos, para a massa, tem-se que o acesso BGP 12 difere significativamente do acesso BGP 13, possuindo um valor de massa média superior a este acesso. Entretanto, comparando-se o acesso BGP 12 com os acessos BGP 31 e BGP 53, não há diferença significativa entre os valores de massa.

Para os volumes, tem-se que o acesso BGP 12 possui um volume médio superior aos demais, diferindo significativamente dos acessos BGP 13 e BGP 31, os quais não diferem entre si. Entretanto, o acesso BGP 12, não difere estatisticamente do acesso BGP 53.

Os resultados para as massas e volumes foram analisados para os terços da ráquis de macaúba (Tabela 13).

Tabela 13: Valores médios de massa e volume para a ráquis nos terços.

Terços	Massa (g)	Volume (cm³)
Superior	12,41 ± 4,71	12,82 ± 4,70
Médio	9,50 ± 4,71 a 5,63 ± 4,71	10,70 ± 4,70
Inferior		7,00 ± 4,70

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

Quanto às massas dos terços superiores, médios e inferiores, pode-se afirmar que a massa média do terço superior é, cerca de três vezes maior do que o valor da massa média do terço inferior.

Quanto ao volume dos terços superiores, médios e inferiores, pode-se inferir que o volume dos terços da ráquis segue a tendência de ser maior no começo do cacho, justamente, onde ocorrerá o corte da colheita e apresenta maior concentração de peso.

3.4. Massa específica

Os resultados para as massas específicas da ráquis de macaúba foram analisados para os estádios de maturação verde e maduro (Tabela 14) e para os acessos (Tabela 15).

Tabela 14: Valores médios de massa específica para a ráquis nos estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de maturação	Massa específica (g/cm³)
Verde	0,91 ± 0,14 a
Maduro	0,82 ± 0,14 a

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

Tabela 15: Valores médios de massa específica para a ráquis nos acessos.

Acessos	Massa específica (g/cm³)
BGP 12	0,88 ± 0,25 ab
BGP 13	0,75 ± 0,25 b
BGP 31	0,83 ± 0,25 ab
BGP 53	1,01 ± 0,25 a

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

Em relação ao estágio de maturação, houve um decréscimo dos valores com a evolução do estágio verde para maduro, entretanto, não foram observadas diferenças significativas.

Quanto aos acessos, tem-se que o acesso BGP 53 difere significativamente do acesso BGP 13. Sendo que aquele acesso possui o valor médio de massa específica, de 1,01 g/cm³; enquanto, o acesso BGP 13, possui o valor médio de 0,75 g/cm³. Isto significa que para uma mesma quantidade de volume, o acesso BGP 53 apresentará maior quantidade de massa. Os acessos BGP 12 e BGP 31, não diferem dos demais acessos.

Os resultados para as massas específicas da ráquis de macaúba, foram analisados para os terços da ráquis de macaúba (Tabela 16).

Tabela 16: Valores médios de massa específica para a ráquis nos terços.

Terços	Massa específica (g/cm³)
Superior	0,98 ± 0,19 a
Médio	0,89 ± 0,19 ab
Inferior	0,74 ± 0,19 b

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

Em relação aos terços, tem-se que apenas os terços superiores e inferiores possuem uma diferença significativa entre si. Sendo que de maneira análoga ao volume dos terços da ráquis, a massa específica, também, segue a tendência de apresentar maior no começo do cacho. Desta forma, tem-se que o terço superior apresenta o maior massa específica, $0,98 \text{ g/cm}^3$, seguido pelo terço médio, $0,89 \text{ g/cm}^3$ e, por fim, pelo terço inferior, $0,74 \text{ g/cm}^3$.

3.5. Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson para os estádios de maturação e para os acessos estão apresentados nas Tabela 17 e 18, respectivamente

Tabela 17: Coeficiente de Poisson da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de maturação	Coeficiente de Poisson
Verde	$0,29 \pm 0,14 \text{ a}$
Maduro	$0,31 \pm 0,14 \text{ a}$

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

Tabela 18: Coeficiente de Poisson da ráquis de macaúba nos acessos.

Acessos	Coeficiente de Poisson
BGP 12	$0,32 \pm 0,27 \text{ a}$
BGP 13	$0,33 \pm 0,27 \text{ a}$
BGP 31	$0,35 \pm 0,27 \text{ a}$
BGP 53	$0,22 \pm 0,27 \text{ a}$

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

Não houve diferença estatística para o valor do coeficiente de Poisson em relação ao estágio de maturação e em relação aos acessos.

O coeficiente de Poisson no estágio de maturação maduro foi superior ao valor para o estágio verde, significando que, para uma determinada deformação longitudinal, as ráquis maduras de macaúba apresentam maior deformação na direção longitudinal quando comparadas às ráquis de macaúba

em estágio de maturação verde.

Embora, não haja diferença estatística para os resultados, o acesso BGP 31 foi o que obteve maior valor de coeficiente de Poisson, 0,35 e, o acesso BGP 53, o menor valor, 0,22. Significando que para a mesma deformação longitudinal o acesso BGP 31 irá deformar-se mais facilmente que os outros acessos nesta mesma direção.

Comparando os resultados obtidos com os materiais biológicos fibrosos trabalhados por Ghavani (2005), o qual encontrou valor médio de coeficiente de Poisson de 0,26 para bambus da espécie *Guadua angustifolia*, este valor encontra-se abaixo do valor encontrado para a ráquis de macaúba. Além disso, Coelho et al. (2015), em estudo da variedade de café Catuaí Vermelho, obteve coeficiente de Poisson de 0,35, para pedúnculo de café, nos estádios de maturação verde e cereja. Estes resultados são de magnitudes próximas aos obtidos no presente trabalho para a ráquis de macaúba.

3.6. Ensaio de cisalhamento

Os dois cenários considerados, sendo o primeiro com a lâmina de corte sem concentrador de tensão e o segundo cenário, com a lâmina de corte com concentrador de tensão com chanfro a 45° encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19: Tensão de cisalhamento da ráquis de macaúba com lâminas sem concentrador de tensão e com concentrador de tensão com chanfro a 45°.

Lâminas	Tensão de cisalhamento (MPa)
Sem concentrador	2,79 ± 0,54 a
Com concentrador	0,90 ± 0,54 b

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

Para as diferentes lâminas de corte, sem concentrador de tensão e, a outra, com chanfro à 45°, ocorreu diferença significativa para os resultados encontrados, obtendo a magnitude de 2,79 MPa para a sem concentrador de tensão e, 0,90 MPa para a lâmina com chanfro à 45°. Ou seja, com a lâmina concentrando tensão a força aplicada será menor, necessitando de uma força 3 vezes menor para a execução do corte da ráquis.

Na Tabela 20 são apresentados os resultados da comparação entre os estádios de maturação utilizados no ensaio, verde e maduro, para os dois cenários empregados no teste, sendo o primeiro com a lâmina de corte sem concentrador de tensão e o segundo, com a lâmina de corte com concentrador de tensão com chanfro a 45°.

Tabela 20: Tensão de cisalhamento da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de maturação	Tensão de cisalhamento (MPa)	
	Sem concentrador	Com concentrador
Verde	2,55 ± 0,64 a	0,37 ± 0,17 b
Maduro	3,02 ± 0,64 a	1,44 ± 0,17 a

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

Comparando os resultados de tensão de cisalhamento para a lâmina sem concentrador de tensão, tem-se que não houve diferença significativa quanto ao estágio de maturação. Entretanto, com concentrador de tensão com chanfro a 45°, houve diferença significativa com a evolução do estágio de maturação. Desta forma, com o decorrer do tempo, a magnitude de cisalhamento tende a aumentar, o que implica em maior força aplicada para que seja feito um mesmo corte. Em valores médios, tem-se que a magnitude aumentou cerca de 3,9 vezes, alcançando a magnitude de tensão de cisalhamento de 1,44 MPa, para o estágio de maturação maduro.

A tensão de cisalhamento para os acessos encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21: Ensaio de cisalhamento da ráquis de macaúba para os acessos.

Acessos	Tensão de cisalhamento (MPa)	
	Sem concentrador	Com concentrador
BGP 12	2,78 ± 1,62 a	0,86 ± 3,09 a
BGP 13	2,85 ± 1,62 a	0,92 ± 3,09 a
BGP 31	2,36 ± 1,62 a	0,96 ± 3,09 a
BGP 53	3,17 ± 1,62 a	0,87 ± 3,09 a

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

Em relação aos acessos, tem-se que os acessos não diferem estatisticamente entre si, tanto para o cisalhamento empregando-se lâmina sem concentrador de tensão quanto para a lâmina com chanfro a 45°.

Comparando os resultados obtidos de cisalhamento com os encontrados por Ghavani, (2005), que estudou o cisalhamento interlaminar na espécie de bambu *Guadua angustifolia*, encontrando o valor médio de tensão de cisalhamento igual a 2,02 MPa. Esta magnitude encontra-se muito próxima aos resultados obtidos, com lâmina de corte sem concentrador de tensão, para ráquis de macaúba, a qual também é um material biológico fibroso. Pode-se inferir que o resultado encontrado por Ghavani, (2005), encontra-se no intervalo entre os valores obtidos para as diferentes lâminas analisadas neste ensaio.

3.7. Ensaio de compressão

3.7.1. Módulo de elasticidade

Entre os valores de módulo de elasticidade, foram encontradas diferenças significativas quanto aos dois estádios de maturação (Tabela 22).

Tabela 22: Módulo de elasticidade da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de Maturação	Módulo de elasticidade (MPa)
Verde	51,97 ± 9,18 a
Maduro	37,93 ± 9,18 b

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

O módulo de elasticidade no estágio de maturação verde foi superior ao valor para o estágio maduro. O que significa que aplicando-se uma mesma tensão, verifica-se que há uma deformação elástica maior por parte da ráquis de macaúba em estágio de maturação maduro.

Em relação aos acessos não foram encontradas diferenças significativas para o módulo de elasticidade (Tabela 23).

Tabela 23: Módulo de elasticidade da ráquis de macaúba para os acessos.

Acessos	Módulo de elasticidade (MPa)
BGP 12	39,83 ± 18,23 a
BGP 13	39,40 ± 18,23 a
BGP 31	54,72 ± 18,23 a
BGP 53	45,85 ± 18,23 a

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

Lobão et al., (2004), submetendo a fibra da madeira de *Eucalyptus grandis*, com densidade média de 0,88 g/mL, à compressão, obteve como módulo de elasticidade o valor de 18342 MPa. Esta magnitude é cerca de 420 vezes maior do que o que foi reportado para a ráquis de macaúba, podendo inferir que a ráquis de macaúba possui rigidez muito inferior à madeira *E. grandis*.

3.7.2. Resistência à compressão

Entre os valores, de resistência à compressão, foi encontrada diferença

significativa para os estádios de maturação verde e maduro (Tabela 24).

Tabela 24: Resistência à compressão da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de maturação	Resistência à compressão (MPa)
Verde	6,81 ± 1,03 a
Maduro	3,34 ± 1,03 b

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

A resistência à compressão do estágio de maturação verde foi aproximadamente duas vezes superior ao valor para o estágio maduro. A resistência à compressão evidencia a dificuldade de comprimir um determinado corpo. No caso em estudo, tem-se que a ráquis de macaúba oriunda do estágio de maturação verde apresenta maior resistência à compressão do que a ráquis de macaúba pertencente ao estágio de maturação maduro.

Entre os valores, de resistência à compressão, não foram encontradas diferenças significativas para os acessos (Tabela 25).

Tabela 25: Resistência à compressão da ráquis de macaúba para os acessos.

Acessos	Resistência à compressão (MPa)
BGP 12	4,86 ± 2,88 a
BGP 13	4,54 ± 2,88 a
BGP 31	5,98 ± 2,88 a
BGP 53	4,93 ± 2,88 a

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

Comparando os resultados obtidos com os reportados por Magalhães et. al., (2004), para a resistência à compressão de canas-de-açúcar, o qual obteve um valor médio de 4,9 MPa, magnitude muito próxima a encontrada pelo presente trabalho, 5,10 MPa. A magnitude similar se deve ao fato da semelhança estrutural fibrosa, tanto da cana-de-açúcar quanto da ráquis de macaúba.

3.7.3. Resiliência

O resultado de resiliência, ou seja, a energia de deformação armazenada, para as ráquis de macaúba foram determinadas calculando-se a integral do comportamento elástico das curvas de tensão e deformação, geradas pelo ensaio de compressão.

Entre os valores médios de resiliência, não foram encontradas diferenças significativas para os estádios de maturação verde e maduro (Tabela 26).

Tabela 26: Resiliência da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de maturação	Resiliência (J m⁻³)
Verde	15,25 ± 8,74 a
Maduro	9,40 ± 8,74 a

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

É possível observar que o valor da resiliência tende a diminuir conforme o estágio de maturação evolua. O valor de resiliência maior significa a tendência em armazenar maiores quantidades de energia.

Entre os valores médios de resiliência para os acessos não foram encontradas diferenças significativas (Tabela 27).

Tabela 27: Resiliência da ráquis de macaúba para os acessos.

Acessos	Resiliência (J m⁻³)
BGP 12	14,01 ± 16,65 a
BGP 13	11,78 ± 16,65 a
BGP 31	16,72 ± 16,65 a
BGP 53	6,75 ± 16,65 a

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade.

4. Conclusões

Nas condições em que o trabalho foi conduzido pode-se concluir:

- i. O teor de água da ráquis de macaúba só apresentou diferença significativa entre os estádios de maturação para o acesso BGP 31.
- ii. O comprimento das ráquis de macaúba tendeu a diminuir com o avanço do estágio de maturação de verde para maduro. Em relação ao diâmetro durante o terço superior, tem-se que o diâmetro no eixo X é maior do que o diâmetro no eixo Y, e ligeiramente maior nos terços médio e inferior.
- iii. A massa e o volume da ráquis de macaúba seguiram a tendência de diminuir ao longo do comprimento da ráquis. O acesso BGP 12 apresenta tanto maior massa como maior volume.
- iv. A massa específica para a ráquis de macaúba segue a tendência de diminuir do terço superior para o terço inferior. O acesso BGP 53 apresenta maior valor de massa específica e, BGP 13 o menor.
- v. O coeficiente de Poisson foi de 0,29 para o estágio de maturação verde e de 0,31 para o estágio de maturação maduro.
- vi. Quanto ao ensaio de cisalhamento, a lâmina sem concentrador de tensão apresenta cerca de três vezes maior magnitude de tensão de cisalhamento do que a lâmina com concentrador de tensão com chanfro a 45°.
- vii. O módulo de elasticidade no estágio de maturação verde foi superior ao valor para o estágio maduro, 51,97 MPa e 37,93 MPa, respectivamente.
- viii. A resistência à compressão do estágio de maturação verde foi aproximadamente duas vezes superior ao valor para o estágio maduro.
- ix. A resiliência média encontrada foi de 12,32 J·m⁻³.

5. Referências Bibliográficas

Assistat Statistic versão 7.7 beta (2015). **Software Assistência estatística**. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, Brasil.

URL <http://www.assistat.com>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399p.

BERTON, L. H. C. **Avaliação de populações naturais, estimativas de parâmetros genéticos e seleção de genótipos elite de macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. 2013. 154f. Tese de doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical. Instituto Agronômico. Campinas. 2013.

CARLIN, S. D.; SILVA, M. A.; ROSSETTO, R. Parâmetros biométricos e produtividade da cana-de-açúcar após tombamento dos colmos. **Bragantia**, v.67, n.4, p. 845-853, 2008.

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**, v. 45, n.1, p. 208-214, 2013.

COELHO, A. L. DE 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.1, p. 286-292, 2015.

DIAS, A. B.; PEÇA, J. O.; L., SANTOS, L.; PINHEIRO, A. A influência da poda mecânica na produção e na eficiência da colheita da azeitona por vibração. **Revista de Ciências Agrárias**; v.30, n.1, p.467- 475, 2007.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.1, p.107-114, 2005.

GONÇALVES, D. B.; BATISTA, A. F.; RODRIGUES M. Q. R. B.; NOGUEIRA K.M.V.; SANTOS V. L. Ethanol production from macaúba (*Acrocomia aculeata*) presscake hemicellulosic hydrolysate by *Candida boidinii* UFMG14. **Bioresource Technology**; v.146, n.1, p.261–266, 2013.

MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A.; PAGNANO, N. B. Resistência à compressão e remoção de folhas da cana-de-açúcar visando à colheita mecânica. **Engenharia Agrícola**., v.24, n.1, p.177-184, 2004.

MENDENHALL, W.; SINCICH, T. **Statistics for engineering and the sciences**. New Jersey, EUA: Macmillan Publishing Company. Englewood Cliffs, 963p, 1992.

MONTOYA, S. G. **Caracterização do desenvolvimento do fruto da palmeira macaúba**. 2013. 51f. Dissertação de mestrado em Fitotecnia. UFV. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. Minas Gerais. 2013.

MONTOYA, S. G.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N.; OLIVEIRA, C. M.; HONÓRIO, I. G. Registro da presença e danos causados por coleópteros em macaúba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 159-162, 2015.

MOTOIKE, S. Y.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L. D.; KUTI, K. N.; PAES, J. M. V.; DIAS, H. C. T.; SATO, A. Y. **A cultura da macaúba: implantação e manejo de cultivos racionais** Viçosa, MG: Ed. UFV, 2013. 61p.

NAVARRO-DÍAS, H. J.; GONZALEZ, S. L.; IRIGARAY, B.; VIEITEZ, I.; JACHMANIÁN, I.; HENSE, H.; OLIVEIRA, J. V. Macauba oil as alternative feedstock for biodiesel: Characterization and ester conversion by the supercritical method. **Journal of Supercritical Fluids**; v.93, n.1, p.130-137, 2014.

NOBRE, D. A. C.; TROGELLO, E.; BORGHETTI, R. A.; DAVID, A. M. S. S. Macaúba: palmeira de extração sustentável para biocombustível. **Colloquium Agrariae**, v. 10, n.2, p.92-105, 2014.

OLIVEIRA, E.; SILVA, F. M.; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C. A. P. *Influência da colheita mecanizada na produção cafeeira*. **Ciência Rural**, v.37, n.5, p.1466-1470, 2007.

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; RESENDE, R. C. Frequency and amplitude of vibration on coffee harvesting. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.4, p.426-431, 2010a.

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, 2010b.

SILVA, B. P.; SILVA, G. M.; PARENTE, J. P. Chemical properties and adjuvant activity of a galacto glucomannan from *Acrocomia aculeata*. **Carbohydrate Polymers**; v. 75, n.1, p.380–384, 2009.

SILVA, M. A.; JERONIMO, E. M.; LÚCIO, A. D. Perfilamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**.; v. 43, n. 8, p.979-986, 2008.

SIQUEIRA, P. B. **Caracterização bioquímica e compostos bioativos de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.)** 2012. Tese de doutorado em Engenharia de Alimentos. Unicamp. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2012.

ZERBATO, C. **Desempenho de máquinas para a semeadura e o arranquio**

mecanizado na cultura do amendoim em Latossolo Vermelho. 2013. 71 f.
Dissertação de mestrado em Agronomia. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal. São Paulo. 2013.

CAPÍTULO II: Transmissibilidade de vibração e varredura de frequência na ráquis visando subsidiar o projeto de máquinas de colheita de frutos e pós-colheita de cachos da macaúba

Transmissibilidade de vibração e varredura de frequência na ráquis visando subsidiar o projeto de máquinas de colheita de frutos e pós-colheita de cachos da macaúba

RESUMO

O desenvolvimento de máquinas eficientes para a colheita e pós-colheita da macaúba exige estudo sobre o comportamento dinâmico da planta, ou seja, como esta vai responder aos estímulos realizados pela interação máquina-planta. Métodos de implementação numérica, como o método de elementos finitos, podem ser empregados em projetos de máquinas a fim de estudar o comportamento dinâmico da planta. Como parâmetros de entrada para utilização do método de elementos finitos, devem ser informadas as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema em estudo. Desta forma, é possível simular através de software adequado a dinâmica da planta obtendo resultados próximos aos da realidade. Objetivou-se neste trabalho analisar a transmissibilidade e a varredura de frequência por meio de vibrações mecânicas da ráquis de macaúba, nos estádios de maturação de frutos verde e maduro, para os quatro acessos. A transmissibilidade e a varredura foram determinadas, experimentalmente, com o auxílio de um aparelho vibracional. Concluiu-se que, em relação à transmissibilidade, não houve diferença estatística para o estágio de maturação, assim como para os acessos; quanto à varredura de frequência, as seguintes frequências, 22,65 e 45,25 Hz, são frequências naturais da ráquis de macaúba para os estádios de maturação verde e maduro.

Palavras-chave: transmissibilidade, frequência natural, palmeira.

Vibration transmissibility and frequency scanning the rachis to subsidize the project fruit harvesting machines and post-harvest bunches of macaw palm

ABSTRACT

The development of efficient machines for harvesting and post-harvest of macaw palm requires study of the dynamic behavior of the plant, that is, as this will respond to stimuli performed by the machine-plant interaction. Numerical implementation methods such as the finite element method can be used in machine design in order to study the dynamic behavior of the plant. As input parameters for using the finite element method, they should be informed geometrical, physical and mechanical system under study. Thus, it is possible to simulate through proper software the plant dynamics obtaining results close to reality. The objective of this study was to analyze the transmissibility and the frequency scanning through mechanical vibrations of the rachis of macaw palm in green and ripe fruit ripening stages, for four accesses. The transmissibility and the frequency scanning were determined experimentally with the aid of a vibrational device. It was concluded that in relation to the transmissibility there was no statistical difference between the maturity stages, as well as, for accesses; with the frequency scanning, the following frequencies, 22.65 and 45.25 Hz, are considered natural frequencies of the rachis of macaw palm for the green and ripe maturation stages.

Key words: Transmissibility, palm, natural frequencies.

1. Introdução

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palma oleaginosa nativa da América tropical, especificamente do cerrado brasileiro (Lopes et al., 2013), embora tenha uma grande dispersão geográfica, com povoamentos naturais em quase todo território nacional, as maiores concentrações estão nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (Berton, 2013), em outros países, também, encontra-se esta palma, como México, Argentina, Uruguai e Paraguai (Soares et al., 2011).

A importância desta cultura advém, primordialmente, da sua capacidade de se adaptar a diferentes variações climáticas, suportando desde o frio intenso do extremo sul da Argentina, até regiões semiáridas como o nordeste do Brasil (Soares et al., 2011; Lopes et al., 2013). Aliado a capacidade de adaptação, a macaúba detém uma grande produtividade, conseguindo produzir por hectare, cerca de 6000 kg de óleos por ano (Michelin et al., 2015).

Nos últimos anos, tem-se aumentado a busca por fontes alternativas aos combustíveis fósseis, sendo a cultura da macaúba, uma dessas potenciais fontes para produção de biodiesel. Este é um combustível produzido a partir de óleo vegetal ou de gordura animal, o qual detém propriedades similares aos combustíveis derivados do petróleo (Aguieiras et al., 2014). Tendo em vista, a alta produtividade do óleo extraído da macaúba, é de se esperar que esta palma seja uma fonte promissora de biocombustível (Iha et al., 2014).

Entretanto, com o porte arbóreo elevado, na faixa de 10 a 15m (Montoya et al., 2015), a colheita dos frutos de macaúba é bastante onerosa, ocorrendo de modo extrativista. Com a finalidade melhorar os processos produtivos associados a sua cadeia produtiva, ou seja, desenvolver processos que permitam produzir em escalas industriais, deve-se empregar uma colheita mecanizada com métodos mais sofisticados. Neste contexto, acredita-se que o princípio de vibrações mecânicas seja promissor para a concepção de máquinas destinadas a colheita e ao processamento de frutos da macaúba. Algumas culturas agrícolas já utilizam tal tecnologia, destacando-se o café (Santos et al., 2010; Coelho et al., 2015; Silva et al., 2015), azeitona (Dias et al., 2007) e tomate (Cunha et al. 2014).

Além disso, o estudo de vibrações é de suma importância devido à possibilidade de ocasionar fadigas em elementos estruturais e componentes de máquinas e desconforto em indivíduos comprometendo sua integridade física (Izumi et al., 2006; Pereira e Neves, 2006).

O princípio de vibrações mecânicas baseia-se na transferência de energia vibracional de uma fonte externa, uma máquina, para o sistema alvo. Visando a colheita da macaúba, a energia vibracional deverá ser transmitida por meio do cacho até o sistema fruto-ráquila, de forma similar à colheita de café por vibrações, na qual a energia é transmitida ao sistema fruto-pedúnculo, resultando no desprendimento dos frutos (Santos et al., 2010; Santos et al., 2015).

Com base no desenvolvimento de máquinas, as análises de vibrações mecânicas são cruciais para os projetos mecânicos. Estas análises são capazes de proporcionar a melhor escolha do material a ser empregado na construção (Pinho et al.; 2014), evidenciar locais propensos a falhas, além de garantir uma faixa de operacional na qual a máquina irá trabalhar com maior segurança (Ferreira Júnior et al., 2016). Dentre as análises de vibração mecânicas, destacam-se a transmissibilidade e a análise de varredura de frequência.

Durante a vibração mecânica, a transmissibilidade consiste na relação entre sinais de saída do sistema (resposta) pelo o sinal empregado na entrada (fonte de excitação). Desta forma, tem-se a percentagem de uma quantidade de energia vibracional que foi transmitida de um ponto a outro (Araújo, 2015). Além disso, a transmissibilidade é importante para a saúde de operadores de máquinas, uma vez o corpo humano comporta-se como uma sofisticada estrutura biomecânica capaz de reagir a vibrações do meio (Balbinot e Tamagna, 2002).

A varredura de frequência consiste em estimular um corpo de prova em um determinado intervalo de frequência, com o intuito de descobrir as frequências de ressonância, ou seja, as frequências naturais do corpo, as quais funcionam como um amplificador mecânico natural. A importância de se descobrir tais frequências, reside no fato de que elas podem causar fadiga em máquinas ou provocar lesões em operadores (Pereira e Neves, 2006), além de serem empregadas como referência de operação para máquinas de colheita

que empreguem esse princípio, visando o desprendimento dos frutos (Santos et al., 2015).

Com os conhecimentos adquiridos por meio de análises de vibrações mecânicas, especificamente a transmissibilidade e a análise de varredura de frequência, será possível aperfeiçoar processos industriais e dimensionar adequadamente máquinas e equipamentos, os quais serão utilizados nas operações de colheita e pós-processamento da macaúba, tornando o trabalho do campo mais eficiente e seguro para os colaboradores.

Nesse contexto, tendo em vista o potencial da cultura, objetivou-se determinar e avaliar a transmissibilidade e a varredura de frequência na ráquis da macaúba a fim de subsidiar projetos de máquinas de colheita de frutos e pós-processamento dos cachos.

2. Material e Métodos

A pesquisa foi executada utilizando cachos de macaúba coletados no Banco de Germoplasma (BAG) da Universidade Federal de Viçosa – UFV, localizados na Fazenda Experimental em Araponga - MG. As amostras de ráquis de macaúba foram oriundas de quatro acessos: BGP 12 – Ibiá - Araxá; BGP 13 – Sítio Paraíso - Belo Horizonte; BGP 31 – Três Marias; BGP 53 – Lavras - São João Del Rey.

O trabalho foi realizado no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, no período nov/2015 a fev/2016. As amostras foram coletadas sempre pela manhã e os ensaios ocorridos durante o mesmo dia da coleta.

Foram realizados, na ráquis do cacho da macaúba, ensaios de transmissibilidade de vibração e de varredura de frequências em estádios distintos de maturação associados aos frutos. Foram considerados os estádios de maturação de frutos verdes com idade de 180 dias e maduros quando ocorre o desprendimento natural dos frutos.

2.1. Ensaio de transmissibilidade

O ensaio de transmissibilidade foi feito empregando-se um sistema de vibração da Ling Dynamic Systems (LDS), o qual foi composto por um gerador

de sinais, um amplificador modelo PA 1000 L acoplado a uma fonte de campo de alimentação modelo FPS-10 L, um vibrador eletromagnético modelo V 555 M6-CE e um controlador Dactron modelo Comet USB (Figura 1), além de um aparato confeccionado com a finalidade de acoplar a amostra da ráquis ao vibrador eletromagnético.



Figura 1: Equipamentos utilizados para o ensaio de vibrações mecânicas; vibrador eletromagnético (A), gerador de sinais (B), amplificador (C), fonte de alimentação (D).

Durante a realização do ensaio foram monitorados três pontos distintos ao longo do comprimento da ráquis de macaúba, conforme a Figura 2.

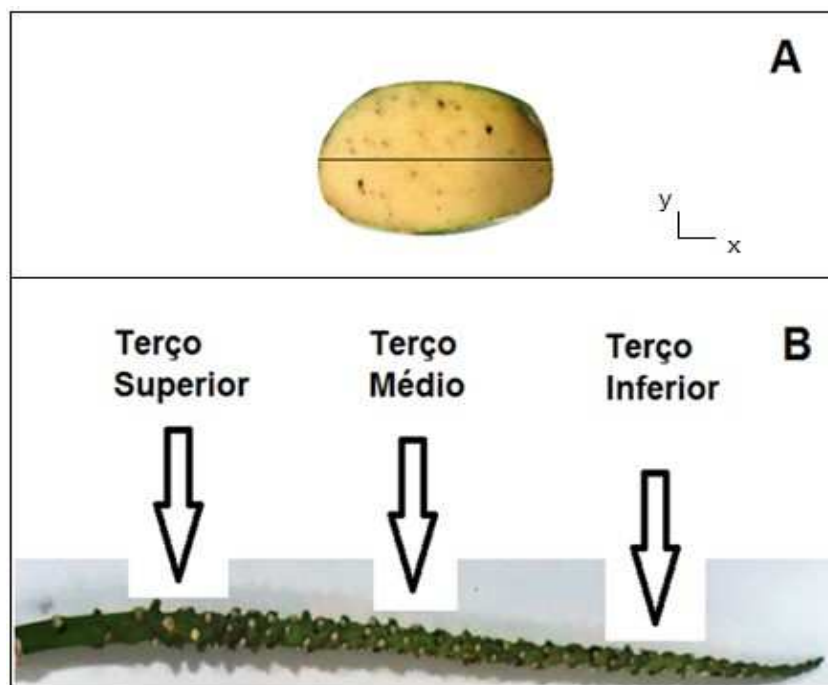


Figura 2: Plano de avaliação da transmissibilidade (A) e pontos de medição ao longo da ráquis de macaúba (B).

Em um primeiro momento, engastou-se a ráquis da macaúba ao aparato confeccionado para sua fixação à base móvel do vibrador eletromagnético, em seguida, foram fixados na vertical os transdutores piezoelétricos de aceleração de alta sensibilidade (100,7 mv/g(Eu)), ao longo da ráquis, sendo um em cada ponto médio de cada terço monitorado (frações da ráquis), tendo em vista que os acelerômetros foram colocados diretamente na ráquis e fixados com o auxílio de cera de fixação e fita adesiva (Figura 3).

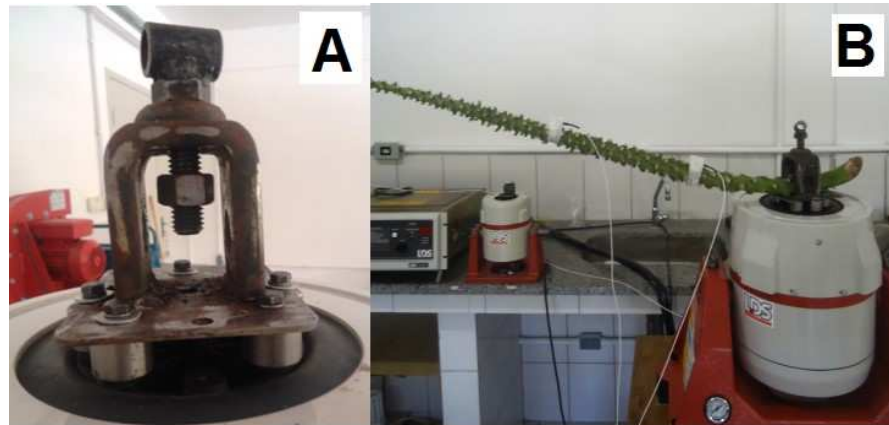


Figura 3: Aparato confeccionado para a realização do ensaio de vibração (A) e ráquis de macaúba engastada para a realização do ensaio (B).

A transmissibilidade da ráquis foi determinada a partir de um sinal senoidal com frequência de 10 Hz e amplitudes 0,25 mm, ambas constantes. A forma de avaliar a entrada de movimento e a resposta do sistema foi feita a partir do valor *RMS* (*root mean square*) do sistema. Assim, a transmissibilidade foi determinada para a ráquis de cachos com predominância de frutos nos estádios de maturação verde e maduro de diferentes acessos.

Para a medição dos sinais de aceleração advindos das três frações da ráquis, foi empregado um sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, composto por um chassi base e um módulo NI cDAQ-9174, com quatro canais. O sistema de aquisição esteve conectado a um computador, sendo gerenciado pelo software *LabView versão 5.0* (*National Instruments, 1998*). Posteriormente, os dados de aceleração em função do tempo foram submetidos à Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*) para a determinação dos espectros de frequência, realizada por meio do software *Matlab, versão 5.4*. A transmissibilidade da ráquis foi calculada por meio da Equação 1.

$$T = \frac{Y_p}{Y_e} \quad (1)$$

em que,

T = transmissibilidade;

Y_p = aceleração do ponto monitorado, m/s^2 ;

Y_e = aceleração de excitação, m/s^2 .

2.2. Ensaio de varredura de frequência

O ensaio de varredura de frequência procedeu-se de maneira análoga ao ensaio de transmissibilidade, com a ráquis de macaúba engastada ao aparato junto ao vibrador eletromagnético (Figura 3). Entretanto, a análise foi realizada a partir da aceleração do sistema a partir de um sinal senoidal no intervalo de frequência de 10 a 80 Hz e amplitude de 0,25 mm. Ao longo, da ráquis foram instalados três transdutores piezoelétricos de aceleração de alta sensibilidade (100,7 mv/g(Eu)), nos pontos de medição presentes na Figura 2 - B. Os acelerômetros foram colocados diretamente na ráquis e fixados com o auxílio de cera de fixação e fita adesiva. Foi monitorado o mesmo plano e os mesmos estádios de maturação.

Para a medição dos sinais de aceleração advindos dos três pontos de medição ráquis, foi empregado um sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, composto por um chassi base e um módulo NI cDAQ-9174, com quatro canais. O sistema de aquisição conectado ao computador, foi gerenciado pelo software *LabView versão 5.0 (National Instruments, 1998)*.

Posteriormente, os dados de aceleração em função do tempo foram submetidos à Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*) para a determinação dos espectros de frequência, realizada por meio do software *Matlab, versão 5.4*, e os gráficos de cascatas foram realizados empregando-se o software *Sigview, versão 2.8.0*.

Concomitante, com o ensaio de varredura, fez-se o ensaio de compressão da ráquis de macaúba para obter-se o módulo de elasticidade para os estádios de maturação verde e maduro. Objetivou-se com esse ensaio avaliar parâmetros associados à rigidez do sistemas e sua correlação com a alteração das frequências naturais. Para os ensaios de compressão, empregou-se a máquina de ensaios universais *INSTRON 3360 Series Dual*

Column Table Frames, utilizando-se 20 corpos de provas cilíndricos para cada estágio de maturação. Estes corpos foram feitos a partir do terço inferior da ráquis com seção transversal circular de 20 mm de diâmetro e 15 mm de comprimento (Figura 4).

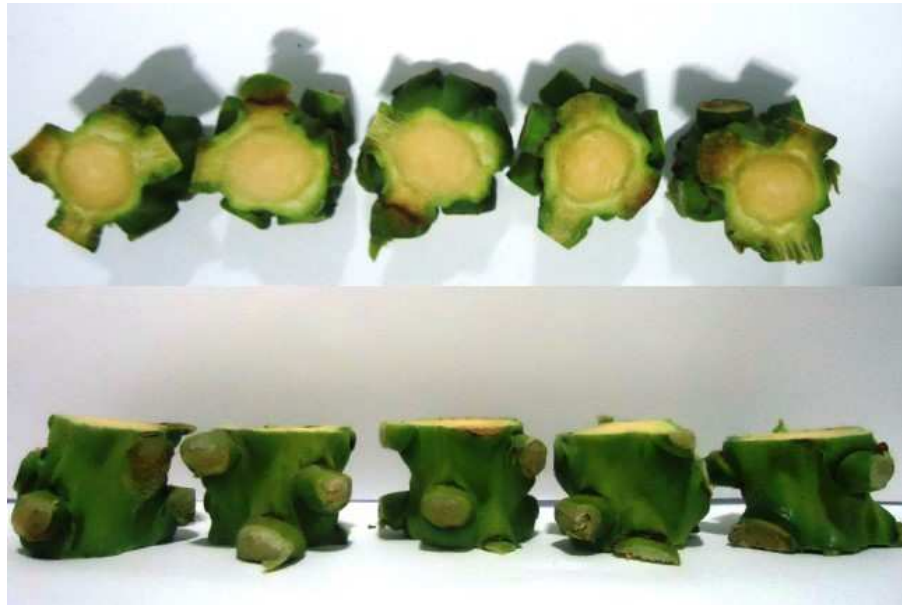


Figura 4: Corpos de provas confeccionados para o ensaio de módulo de elasticidade.

O ensaio ocorreu por meio de compressão, sendo as amostras colocadas entre duas placas circulares planas paralelas (Figura 5), submetidas a deformações constantes de pequena magnitude nas duas faces opostas do corpo-de-prova. A taxa de carregamento provida foi de 15,0 mm/min, monitorada através do software *Bluhill 3*, gerenciado pelo computador acoplado a máquina de ensaios universais. O módulo de elasticidade da ráquis foi calculado pelo próprio software.

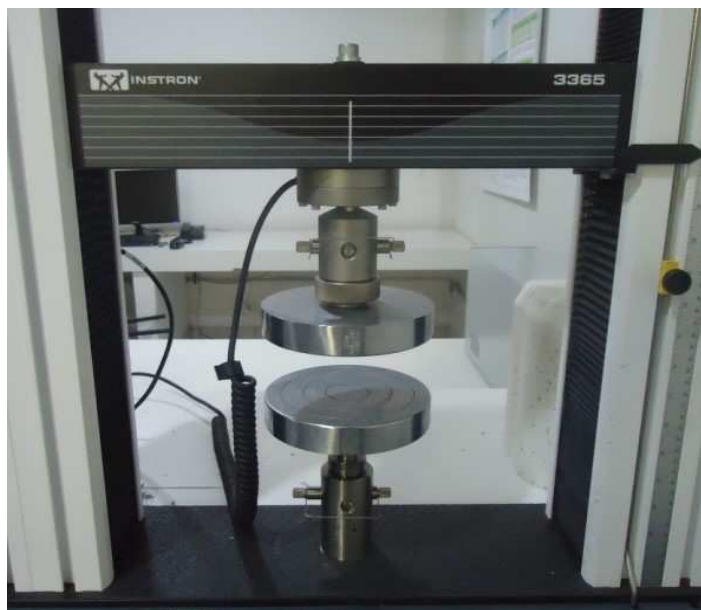


Figura 5: Equipamento para ensaio de compressão da ráquis de macaúba.

2.3. Análise estatística

Os dados referentes aos ensaios de transmissibilidade de vibração e de varredura das amostras de ráquis foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. O efeito dos estádios de maturação e acessos das plantas sobre o comportamento da transmissibilidade e varredura foi estudado por meio do teste de Tukey, ao nível de significância de 5%. As análises estatísticas foram feitas pelo software computacional *Assistat Statistic versão 7.7 beta, 2015*.

3. Resultados e Discussão

3.1. Ensaio de transmissibilidade

Durante o monitoramento do estágio de maturação verde e maduro, pode-se inferir que não houve diferença estatística para os resultados encontrados (Tabela 1).

Tabela 1: Transmissibilidade da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.

Estádio de Maturação	Transmissibilidade
Verde	0,32 ± 0,20
Maduro	0,46 ± 0,20

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

Embora, não haja diferença estatística, o resultado da transmissibilidade indica que para uma mesma energia vibracional aplicada nas condições propostas pelo ensaio, maior energia será transmitida à ráquis de macaúba durante o estágio de maturação maduro, cerca de 46% do valor inicial, enquanto, 35%, da energia inicial será transmitida para as ráquis no estágio de maturação verde.

Analisando a estatística descritiva para os resultados da transmissibilidade pertencentes aos estádios de maturação, tem-se que a média aritmética encontrada foi de 0,39 e, o desvio padrão da amostra foi de magnitude 0,20. O coeficiente de variação da amostra foi de 51,7%, ou seja, maior que 25,0%, evidenciando que a amostra apresenta-se pouco homogêneas para a transmissibilidade. Além disso, observou-se uma amostra trimodal, nos seguintes valores 0,24; 0,25 e 0,31.

Em relação aos acessos, não houve diferença estatística para a transmissibilidade (Tabela 2).

Tabela 2: Transmissibilidade média da ráquis de macaúba nos estádios de maturação verde e maduro.

Acessos	Transmissibilidade
BGP 12	0,50 ± 0,20
BGP 13	0,25 ± 0,20
BGP 31	0,46 ± 0,20
BGP 53	0,42 ± 0,20

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

Todavia, apesar de não haver diferença estatística, o resultado da transmissibilidade indica que para uma mesma energia vibracional aplicada nas condições propostas pelo ensaio, maior energia será transmitida às ráquis de macaúbas pertencentes ao acesso BGP 12, com 50% do valor inicial da energia; enquanto, o acesso BGP 13, detém o menor valor médio de transmissibilidade, cerca de 25%. Os acessos BGP 31 e BGP 53, detém valores intermediários, sendo 46 e 42%, respectivamente.

Analisando a estatística descritiva para os resultados de transmissibilidade pertencentes aos acessos, tem-se que a média aritmética encontrada foi de 0,39 e, o desvio padrão da amostra foi de magnitude 0,20. O coeficiente de variação da amostra foi de 51,7%, ou seja, maior que 25,0%, evidenciando que as amostras são pouco homogêneas para a transmissibilidade. Além disso, observou-se uma amostra trimodal, nos seguintes valores 0,24; 0,25 e 0,31. O menor valor observado para a transmissibilidade foi de 0,24, ocorrendo no estádio de maturação verde sendo presente nos acessos BGP 13 e BGP 53; enquanto, o maior valor para transmissibilidade foi de 0,83, ocorrendo no estádio de maturação maduro no acesso BGP 12.

Segundo Rao (2009), a transmissibilidade depende de fatores como a razão de frequências e a razão de amortecimento. Tendo em vista que estes parâmetros são semelhantes para os diferentes acessos, uma vez que o material biológico, ou seja, a ráquis de macaúba é similar entre si. Estas detêm

as mesmas conformações geométricas, sujeitas as mesmas condições climáticas, além de terem o mesmo tipo de manejo; sendo assim, é de se esperar que a magnitude da transmissibilidade seja próxima para os diferentes acessos. Fato que é comprovado pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, que não detectou diferença estatística significativa para a transmissibilidade.

Tendo em vista a rigidez do material, a transmissibilidade procede de maneira diferente em materiais biológicos e materiais metálicos, uma vez que, a rigidez tende a ser menor em materiais biológicos (Lajarin, 2012; Couto et al., 2002).

Sendo assim, para a estrutura molecular de um material metálico, espera-se que haja amortecimento da energia vibracional em menor magnitude quando se compara com os materiais biológicos; desta forma, a energia será transmitida com maior amplificação em materiais metálicos. O material biológico possui em sua composição, constituintes que podem funcionar como amortecedores da energia vibracional, como as membranas celulares, paredes celulares e fibras (Oliveira et al. 2006). Observou-se que para a ráquis de macaúba na frequência e amplitude de entrada, não houve amplificação da resposta de saída; entretanto, tal fenômeno pode ser observado em materiais não biológicos, acarretando em amplificações de baixa e alta frequência (Pinho et al., 2014).

3.2. Ensaio de varredura de frequência

A varredura de frequência da ráquis de macaúba realizada para o intervalo de 10 a 80 Hz obteve as frequências naturais por meio da Transformada Rápida de Fourier. Sendo assim, os resultados obtidos, para a varredura de frequência, podem ser expressos para os acessos através da Tabela 3, a qual evidencia as frequências naturais obtidas para a ráquis de macaúba para os diferentes estádios de maturação.

Tabela 3: Frequências naturais da ráquis de macaúba para os estádios de maturação verde e maduro, nos pontos monitorados.

Acessos	Frequência natural (Hz)	
	Verde	Maduro
BGP 12	22,66; 45,26 e 67,85	15,95; 22,68 e 45,27
BGP 13	22,65; 45,25 e 67,85	15,90; 22,66 e 45,27
BGP 31	22,67; 45,26 e 67,86	22,66; 45,27 e 67,87
BGP 53	16,00; 22,65 e 45,26	15,72; 22,66 e 45,27

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3, observa-se que para os acessos BGP 12 e BGP 13, ocorreu algo semelhante para as suas frequências naturais, uma vez que, com a evolução do estágio de maturação de verde para maduro, a primeira frequência natural mudou de magnitude, passando de 22,66 para 15,90 Hz. O acesso BGP 53, também apresentou um decréscimo de sua primeira frequência natural, passando de 16,00 para 15,72 Hz.

Conforme Rao (2009), a frequência natural é dependente da rigidez e massa do material, uma vez que com o avanço do estágio de maturação, houve a tendência de uma diminuição da rigidez da ráquis de macaúba para os diferentes estádios de maturação, uma vez que ocorreu um decréscimo do módulo de elasticidade com o avanço do estágio de maturação (Figura 6) implicando em menor rigidez do material, resultando, assim, em menores frequências naturais. Entretanto, o acesso BGP 53, manteve magnitudes de frequência naturais semelhantes para ambos os estádios de maturação.

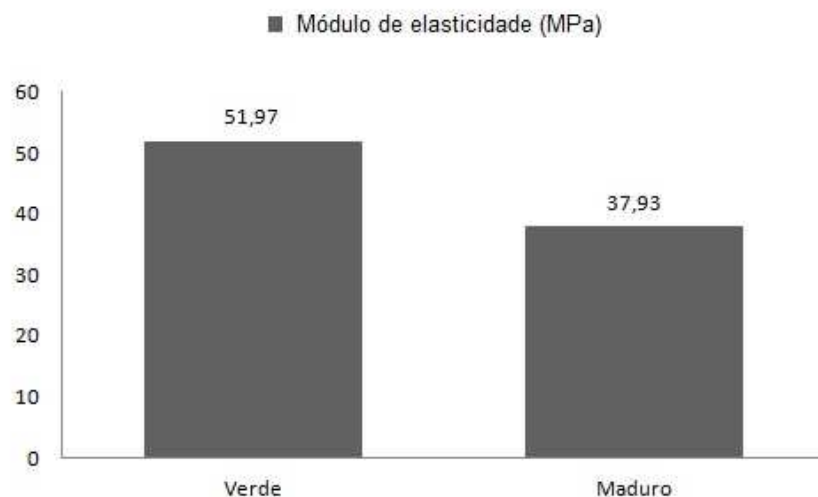


Figura 6: Módulo de elasticidade da ráquis de macaúba para os estádios de maturação verde e maduro.

Além disso, o resultado reportado pela Tabela 3 indica que a frequência natural tende a diminuir com a evolução do estágio de maturação, o que é interessante, pois desta forma se consegue separar os diferentes estádios de maturação; resultados semelhantes foram observado por Santos et al. (2010) em frutos de café, os autores conseguiram separar os diferentes estádios de maturação de café através de frequências naturais distintas. Por meio de vibrações mecânicas, assim como Pezzi e Caprara, (2009), obteve para a cultura de uva, observou-se para a ráquis de macaúba a amplificação da amplitude durante as frequências naturais.

Os resultados para análise de varredura podem ser apresentados graficamente por meio espectrograma de frequência, ao qual reporta o monitoramento em três pontos distintos da ráquis de macaúba nos diferentes estádios de maturação. Desta forma, têm-se os espectrogramas para os acessos BGP 12, BGP 13, BGP 31 e BGP 53, durante o estágio de maturação verde (Figura 7).

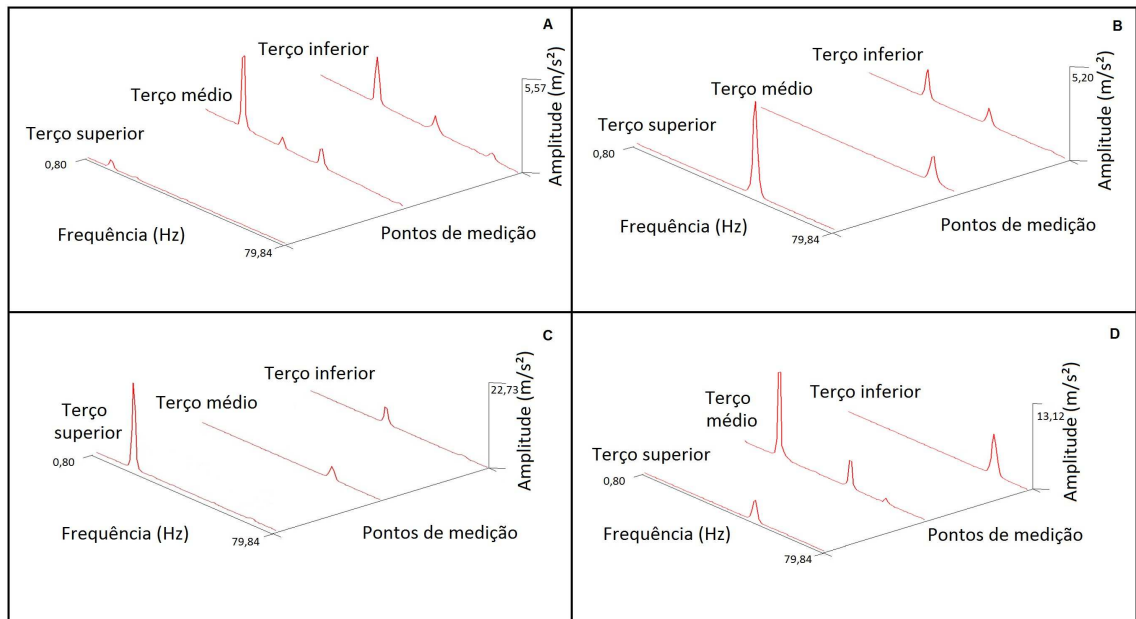


Figura 7: Espectrogramas de frequência naturais no estágio de maturação verde sendo BGP 12 (A), BGP 13 (B), BGP 31 (C) e BGP 53 (D).

A Figura 7 evidencia o espectro de frequências naturais para os acessos durante o estágio de maturação verde. Observam-se os três pontos de monitoração sendo o terço superior, o médio e, o inferior, representados em três espectros distintos.

Em relação a todos os acessos, notam-se a relação com a Tabela 3 de frequências naturais para o estágio de maturação verde. Sendo que as frequências naturais observadas, nem sempre ocorrem para um mesmo ponto de medição, mas para a ráquis como um todo.

Quanto à magnitude média dos picos dada pelo RMS destes acessos (Tabela 4) observa-se que o acesso BGP 31 apresenta maior valor, 110,64 e o acesso BGP 53, o menor valor, 10,08. O acesso BGP 12 e BGP 13 apresentam, 11,51 e 15,63 respectivamente, de magnitude média do pico dada em RMS.

Tabela 4: Valor de magnitude média dos picos em RMS.

Acessos	RMS	
	Verde	Maduro
BGP 12	11,51	26,64
BGP 13	15,63	9,89
BGP 31	110,64	14,43
BGP 53	10,08	11,70

Os resultados para análise de varredura para o estágio de maturação maduro podem, também, serem apresentados na forma de espectrograma de frequência. Desta forma, têm-se os espectrogramas para os acessos BGP 12, BGP 13, BGP 31 e BGP 53, durante o estágio de maturação maduro (Figura 8).

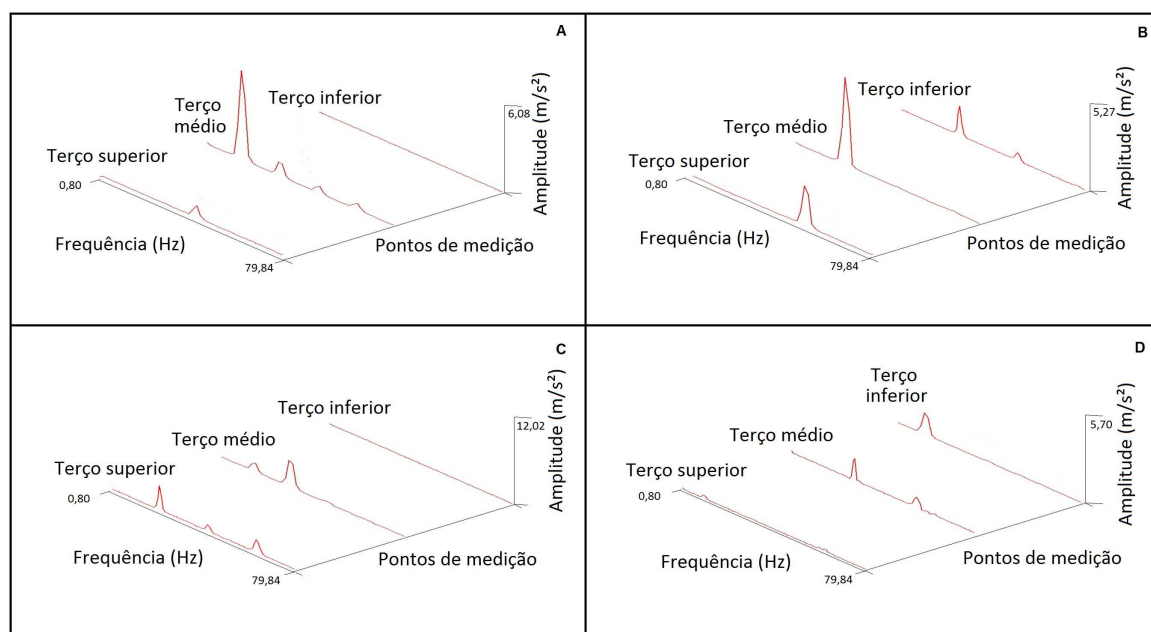


Figura 8: Espectrogramas de frequência naturais no estágio de maturação maduro sendo BGP 12 (A), BGP 13 (B), BGP 31 (C) e BGP 53 (D).

Em relação aos acessos do estágio de maturação maduro, notam-se a relação com a Tabela 3 de frequências naturais para a ráquis de macaúba. De maneira análoga ao que ocorreu com os espectrogramas para o estágio de maturação verde, as frequências naturais observadas, nem sempre ocorrem

para um mesmo ponto de medição, mas para a ráquis como um todo.

Quanto à magnitude média dos picos dada pelo RMS destes acessos (Tabela 4) observa-se que o acesso BGP 12 apresenta maior valor, 26,64, ou seja, aproximadamente duas vezes o valor da magnitude deste mesmo acesso durante o estágio de maturação verde, isto implica, que os valores médios de amplitude são maiores conforme a evolução do estágio de maturação para este acesso.

Desta forma, tendo em vista a amplificação da amplitude devido a ressonância das frequências naturais, será possível o desprendimento do fruto da macaúba, com princípio de vibrações análogos aos realizado para café, Santos et al., (2010), ou para pistache, Polat et al., (2007), ou seja, quando a energia vibracional transmitida for adequada entrando em ressonância com a frequência natural do produto agrícola. O acesso BGP 13 no estágio de maturação maduro apresenta a menor magnitude de RMS, com valor de 9,89. Os acessos BGP 31 e BGP 53 apresentam 14,43 e 11,70, respectivamente, de magnitude média do pico dada em RMS.

4. Conclusões

Nas condições em que o trabalho foi conduzido pode-se concluir:

- i. Para a transmissibilidade, não houve diferenças significativas para os acessos e para os estádios de maturação verde e maduro.
- ii. Houve diferença significativa para o estágio de maturação, verde e maduro, durante a varredura de frequência.
- iii. Pode-se considerar como frequência natural da ráquis de macaúba, independente do estágio de maturação, as frequências 22,65 e 45,25 Hz.

5. Referências Bibliográficas

AGUIEIRAS, E. C. G.; CAVALCANTI-OLIVEIRA, E. D.; CASTRO, A. M.; LANGONE, M. A. P.; FREIRE, D. M. G. Biodiesel production from *Acrocomia aculeata* acid oil by (enzyme/enzyme) hydroesterification process: Use of vegetable lipase and fermented solid as low-cost biocatalysts. **Fuel**, v. 135, n.1, p. 315–321, 2014.

ARAÚJO, I. D. G. **Análise modal operacional: métodos de identificação baseados em transmissibilidade**. 2015. 195 f. Tese de doutorado em

Engenharia de Estrutura. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2015.

Assistat Statistic versão 7.7 beta (2015). **Software Assistência estatística**. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, Brasil. URL <http://www.assistat.com>.

BALBINOT, A.; TAMAGNA, A. Avaliação da transmissibilidade da vibração em bancos de motoristas de ônibus urbanos: um enfoque no conforto e na saúde. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, v. 18, n. 1, p. 31-38, 2002.

BERTON, L. H. C. **Avaliação de populações naturais, estimativas de parâmetros genéticos e seleção de genótipos elite de macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. 2013. 154f. Tese de doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical. Instituto Agronômico. Campinas. 2013.

COUTO, S. M.; BATISTA, C. S.; PEIXOTO, A. B.; DEVILLA, I. A. Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.285-294, 2002.

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.

DIAS, A. B.; PEÇA, J. O.; SANTOS, L.; PINHEIRO, A. A influência da poda mecânica na produção e na eficiência da colheita da azeitona por vibração. **Revista de Ciências Agrárias**; v.30, n.1, p. 467- 475, 2007.

FERREIRA JÚNIOR, L. G.; FÁBIO MOREIRA DA SILVA, F. M.; FERREIRA, D. D.; SALES, R. S. Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras. **Ciência Rural**, v. 46, n. 2, p. 273- 278, 2016.

FIGUEIREDO, F. B.; CAMARINI, G. C.; ALTRAN, D. A.; CAMPOS, C. F. S. Computational analysis of natural frequencies and modes of vibration of a clamped-free beam. **Colloquium Exactarum**, v. 6, n.1, p.114 – 127, 2014.

IHA, O. K.; ALVES, F. C. S. C.; SUAREZ, P. A. Z.; OLIVEIRA, M. B. F.; MENEGHETTI, S. M. P.; SANTOS, B. P. T.; SOLETTI, J. I. Physicochemical properties of *Syagrus coronata* and *Acrocomia aculeata* oils for biofuel production. **Industrial Crops and Products**, v. 62, p. 318–322, 2014.

IZUMI, R.; MITRE, E. I.; DUARTE, M. L. M. Effect of whole body vibrations on hearing. **Revista CEFAC**, v. 8, n. 3, p. 386-392, 2006.

LAJARIN, S. F. **Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência**. 2012. 197f. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal Do Paraná. Curitiba. 2012.

LOPES, D. C.; NETO, A. J. S.; MENDES, A. A; PEREIRA, D. T. V. Economic feasibility of biodiesel production from Macauba in Brazil. **Energy Economics** v.40, p. 819–824, 2013.

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

MICHELIN, S.; PENHA, F. M.; MELANIA M. SYCHOSKI, M. M.; SCHERER, R. P.; TREICHEL, H.; ALEXSANDRA VALERIO, A.; LUCCIO, M. D.; OLIVEIRA, D.; OLIVEIRA, J. V. Kinetics of ultrasound-assisted enzymatic biodiesel production from Macauba coconut oil. **Renewable Energy**,v. 76, p. 388-393, 2015.

MONTOYA, S. G.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N.; OLIVEIRA, C. M.; HONÓRIO, I. G. Registro da presença e danos causados por coleopteros em macaúba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 82, p. 159-162, 2015.

OLIVEIRA, E.; VITAL, B. R.; PIMENTA, A. S.; LUCIA, R. M. D.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, A. C. O. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, v.30, n.2, p.311-318, 2006.

PEREIRA, C. C. G.; NEVES, F. A. Conforto humano e limites de percepção para vibrações verticais. **REM: Revista Escola Minas**, v. 59, n.3, p. 271-278, 2006.

PINHO, M. S.; SCHLOSSER, J. F.; FRANTZ, U. G.; RODRIGUES, F. A.; FERRER, P. S. Effectiveness of a tractor cab cushion on the mitigation of vibrations. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 3, p. 461-468, 2014.

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.; DURSUN, 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. **Vibrações Mecânicas**. 4° Edição. Pearson Prentice Hall. 2009.

SANTOS, F. L.; D. M.; F. A. C.; RESENDE, R. C. Frequency and amplitude of vibration on coffee harvesting.. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.4, p.426-431, 2010.

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.; COELHO, A. L. F. Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 37, n. 1, p. 11-17, 2015.

Sigview 32 version 2.8.0. Signal Analysis software. <www.sigview.com>

SILVA, F. C.; SILVA, F. M.; ALVES, M. C.; FERRAZ, G. A. S.; SALES, R. S. Efficiency of coffee mechanical and selective harvesting in different vibration during harvest time. **Coffee Science**, v. 10, n. 1, p. 56 - 64, 2015.

SOARES, J. D. R.; RODRIGUES, F. A.; PASQUAL, M.; NUNES, C. F.; ARAUJO, A. G. Germinação de embriões e crescimento inicial *in vitro* de macaúba. **Ciência Rural**, v.41, n.5, p. 773-778, 2011.

CONCLUSÕES GERAIS

Nas condições em que o trabalho foi conduzido pode-se concluir:

i. O teor de água da ráquis de macaúba só apresentou diferença significativa entre os estádios de maturação para o acesso BGP 31.

ii. O comprimento das ráquis de macaúba tendeu a diminuir com o avanço do estágio de maturação de verde para maduro. Em relação ao diâmetro durante o terço superior, tem-se que o diâmetro no eixo X é maior do que o diâmetro no eixo Y, e ligeiramente maior nos terços médio e inferior.

iii. A massa e o volume da ráquis de macaúba seguiram a tendência de diminuir ao longo do comprimento da ráquis. O acesso BGP 12 apresenta tanto maior massa como maior volume.

iv. A massa específica para a ráquis de macaúba segue a tendência de diminuir do terço superior para o terço inferior. O acesso BGP 53 apresenta maior valor de massa específica e, BGP 13 o menor.

v. O coeficiente de Poisson foi de 0,29 para o estágio de maturação verde e de 0,31 para o estágio de maturação maduro.

vi. Quanto ao ensaio de cisalhamento, a lâmina sem concentrador de tensão apresenta cerca de três vezes maior magnitude de tensão de cisalhamento do que a lâmina com concentrador de tensão com chanfro a 45°.

vii. O módulo de elasticidade no estágio de maturação verde foi superior ao valor para o estágio maduro, 51,97 MPa e 37,93 MPa, respectivamente.

viii. A resistência à compressão do estágio de maturação verde foi

aproximadamente duas vezes superior ao valor para o estágio maturo.

ix. A resiliência média encontrada foi de $12,32 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$.

x. Para a transmissibilidade, não houve diferenças significativas para os acessos e para os estádios de maturação verde e maduro.

xi. Houve diferença significativa para o estágio de maturação, verde e maduro, durante a varredura de frequência.

xii. Pode-se considerar como frequência natural da ráquis de macaúba, independente do estágio de maturação, as frequências 22,65 e 45,25 Hz.