

FLORA MARIA DE MELO VILLAR

**PROPRIEDADES FÍSICAS, GEOMÉTRICAS, MECÂNICAS E MODAIS DO
SISTEMA FRUTO-RÁQUILA DA MACAÚBA**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

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

T

V719p
2016

Villar, Flora Maria de Melo, 1986-
Propriedades físicas, geométricas, mecânicas e modais do
sistema fruto-ráquila da macaúba / Flora Maria de Melo Villar. –
Viçosa, MG, 2016.
xi, 74f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Macaúba. 2. Macaúba - Tecnologia pós-colheita.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

CDD 22. ed. 633.851

FLORA MARIA DE MELO VILLAR


**PROPRIEDADES FÍSICAS, GEOMÉTRICAS, MECÂNICAS E MODAIS DO
SISTEMA FRUTO-RÁQUILA DA MACAÚBA**

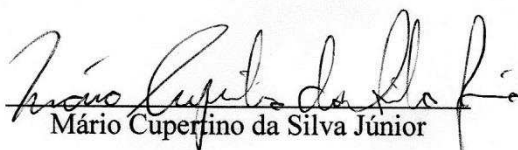
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 28 de janeiro de 2016.


Domingos Sávio Magalhães Valente


Joseph Kalil Khoury Junior


Fábio Lúcio Santos
(Coorientador)


Mário Cupertino da Silva Júnior


Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Orientador)

À minha querida avó Isaura Butignol Villar (*in memoriam*).

Aos meus pais, Roberta e Milton.

DEDICO

“A teoria é assassinada mais cedo ou mais tarde pela experiência.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmãos e avós pelo amor e confiança.

Ao Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto pela orientação, confiança e amizade.

Ao Prof. Fábio Lúcio Santos pela dedicação, disposição, amizade e coorientação.

Ao Prof. Haroldo Carlos Fernandes pela amizade e confiança.

Aos professores Domingos Sárvio Magalhães Valente e Daniel Marçal de Queiroz, pela disponibilidade e colaboração com o trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Departamento de Fitotecnia e ao Prof. Sergio Yoshimitsu Motoike por ceder área para coleta de matéria-prima para experimentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Nerilson Terra Santos pela prontidão e auxílio ao longo da realização do trabalho.

Aos estagiários Érica, Juliano e Helizane pela colaboração em algumas etapas do desenvolvimento do trabalho, além de outros colegas que puderam contribuir de alguma forma.

Aos colegas do laboratório de Pós-Graduação em Mecanização Agrícola, em especial à Gracielly, Denis, Marconi, Juliana, Christiam, Robson, Larissa, Remo, Paulo, Anderson Candido, Anderson Costa, Thiago, Diego, Gustavo e Nara pela amizade e paciência ao longo desses anos.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade, pelo conhecimento que adquiri nesse período, pelas inúmeras experiências e amizades. Geice, Joseph Kalil, Ricardo Capúcio, Rodrigo, Cristiano e aos demais colegas, agradeço.

Aos alunos que se tornaram amigos.

Às minhas lindas amigas Raisa, Nila, Thaís, Carol, Bianca, Daniele, Gracielly, Geice, Emília e Rainá por compartilharem momentos inesquecíveis durante esses anos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola que participaram de alguma forma na realização deste trabalho.

À minha gatinha fofa linda, Maria Amélia, por me proporcionar tanta paz e alegria e um amor genuíno.

A todos que estiveram presentes nos momentos difíceis e que de alguma forma colaboraram com a realização deste trabalho, agradeço imensamente.

BIOGRAFIA

FLORA MARIA DE MELO VILLAR, filha de Milton Villar Júnior e Roberta Alli de Melo Villar, nasceu no dia 23 de janeiro de 1986 em São José dos Campos, SP.

Em julho de 2010, concluiu o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa.

Em julho de 2010 iniciou o curso Mestrado em Engenharia Agrícola, defendendo a dissertação em julho de 2012.

Em agosto de 2012 iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, submetendo-se à defesa em janeiro de 2016.

Em março de 2013 foi contratada como professora substituta no curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Viçosa, encerrando as atividades em março de 2015.

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1. Introdução geral	1
2. Disposição do trabalho.....	5
3. Referências.....	6
CAPÍTULO 2 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FRUTOS E RÁQUILAS DA MACAÚBA.....	8
1. Introdução.....	8
2. Objetivos.....	10
3. Material e métodos.....	11
Propriedades físicas dos frutos e ráquilas – geometria, massa, massa específica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, razão de amortecimento e coeficiente de amortecimento	13
4. Resultados.....	22
5. Discussão	31
6. Conclusão.....	36
7. Referências.....	37
CAPÍTULO 3 – PROPRIEDADES MODAIS DO SISTEMA FRUTO-RÁQUILA DA MACAÚBA	40
1. Introdução.....	40
2. Objetivos.....	42
3. Material e métodos.....	43
Propriedades modais	43
4. Resultados.....	58
5. Discussão	67
6. Conclusão.....	70
7. Referências.....	71
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES GERAIS.....	73

RESUMO

VILLAR, Flora Maria de Melo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2016. **Propriedades físicas, geométricas, mecânicas e modais do sistema fruto-ráquila da macaúba.** Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Coorientadores: Fábio Lúcio Santos, José Antônio Saraiva Grossi e Daniel Marçal de Queiroz.

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma cultura emergente, considerada promissora para produção de biodiesel, e está em processo de domesticação para produção em larga escala. O princípio de vibração mecânica é uma opção para destacar os frutos do cacho e, para projetar máquinas de colheita e/ou processamento, o estudo do comportamento dinâmico é o conhecimento básico necessário para o desenvolvimento deste tipo de equipamento. Tendo em vista a necessidade de gerar novas tecnologias para o processo de produção intensiva da macaúba, foram determinadas propriedades geométricas, físicas, mecânicas e modais do sistema fruto-ráquila. Os cachos utilizados foram coletados no Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da Universidade Federal de Viçosa. As propriedades mecânicas, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, foram determinadas para as ráquulas a partir do teste de tração em máquina universal de ensaio. As razões de amortecimento e coeficientes de amortecimento foram determinadas por meio de teste de impulso e decremento logarítmico. A análise do comportamento dinâmico, a fim de estimar as frequências fundamentais e modos de vibração por meio de simulação, foi realizada utilizando o método de elementos finitos determinístico. Foi realizada análise de sensibilidade para identificar os parâmetros que mais influenciaram na estimativa das frequências fundamentais. As propriedades modais foram também determinadas experimentalmente por testes de varredura. Para os testes de vibração, foi utilizado um sistema de vibração da LDS (Ling Dynamic Systems), modelo V555, composto por um gerador de sinais, um amplificador e um vibrador eletromagnético. Foi realizada a validação do modelo matemático utilizado na simulação com os valores obtidos experimentalmente e, para comparação, foi utilizado o desvio relativo percentual. Os desvios relativos percentuais entre os valores experimentais e simulados foram utilizados para validar o modelo. Os módulos de elasticidade variaram de 2,22 MPa a 3,17 MPa para os acessos estudados e o coeficiente de

Poisson médio foi de 0,37. Os sistemas fruto-ráquila estudados apresentaram razões de amortecimento médias inferiores a um, portanto, são sistemas subamortecidos. O modo de vibração correspondente às frequências fundamentais determinadas foi o modo pendular. As frequências fundamentais determinadas experimentalmente variaram, na média, de 26,21 a 33,45 Hz e, as frequências fundamentais determinadas por meio de simulação variaram, na média de 20,46 a 34,84 Hz. O desvio relativo percentual médio considerando todos os acessos foi de 8,46 %. Os parâmetros que mais influenciaram na estimativa das frequências fundamentais foram a densidade e o módulo de elasticidade.

ABSTRACT

VILLAR, Flora Maria de Melo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2016. **Physical, geometrical, mechanical and modal properties of fruit rachilla system of macaw palm.** Advisor: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-advisor: Fábio Lúcio Santos, José Antônio Saraiva Grossi and Daniel Marçal de Queiroz.

The macaw palm (*Acrocomia aculeata*) is an emerging crop, considered promising for biodiesel production and is in the process of domestication for large-scale production. The mechanical vibration is an option to detach the fruits from the bunch, and in order to design harvesting and/or processing machines, the study of the dynamic behavior is the basic knowledge necessary for the development of this type of equipment. Regarding that there is the necessity to generate new technologies for intensive production of macaw fruits, this study determined the geometrical, physical, mechanical and modal properties of the fruit- rachilla system. The macaw bunches used in this research were collected in the Active de Germplasm Bank (BAG) of Universidade Federal de Viçosa. The mechanical properties, modulus of elasticity and Poisson's ratio were determined for the rachillas from the tensile test by using a Universal Testing Machine. The damping ratios were determined by impulse test and logarithmic decrement. The analysis of the dynamic behavior in order to measure the fundamental frequencies and vibration mode by simulation was performed using the deterministic finite element method. The parameters which most influence the fundamental frequencies estimation were determined based on model sensitivity testing. The modal properties were also experimentally determined by scanning method on vibration test. For the vibration tests, a LDS vibration system (Ling Dynamic Systems,) V555 model, with a signal generator, an amplifier and an electromagnetic vibrator was used. The percentage deviations between the simulated and experimental values were used to validate the model. The modulus of elasticity range from 2.22 MPa to 3.17 MPa and the average Poisson's ratio was 0.37. The macaw fruit-rachilla systems showed damping ratio below one. The vibration mode related to the determined fundamental frequencies was the pendulum mode. The fundamental frequency experimentally determined varied from 26.21 to 33,45 Hz on average, and the fundamental frequency determined by simulation varied from 20.46 to 34.84 Hz on average. The average percentage relative deviation considering all

plant accession was 8.46%. The parameters that most influence the measure of the fundamental frequencies are the density and models of elasticity. The macaw fruit-rachilla system is considered underdamped, and the mathematical models responded as expected when measuring modal properties.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1. Introdução geral

Nos últimos anos, o mundo tem experimentado uma significativa e crescente demanda por óleos vegetais, alavancado principalmente pelo aumento de consumo para fins alimentares e pelo surgimento de novas aplicações industriais, destacando-se a transformação em biodiesel (ROSILLO-CALLE et al., 2009). As previsões são que essa demanda cresça até o ano de 2020 na ordem de 2,2% ao ano (CLUFF & JONES, 2011), cabendo principalmente aos países tropicais o suprimento dessa demanda, tendo em vista a limitação da expansão de áreas agrícolas nos países de clima temperado.

O Brasil está entre os maiores produtores e consumidores de biodiesel do mundo. Em 2014 foi o segundo maior consumidor e produtor de biodiesel, atrás somente dos Estados Unidos. Em 2015 a produção de biodiesel em outubro, de acordo com dados da ANP, foi de 355 mil m³. No acumulado do ano atingiu 3.299 mil m³, correspondendo a um acréscimo de 19.7% em relação ao mesmo período de 2014 (BRASIL, 2015).

O aumento na produção do biodiesel nos últimos anos se deve, em grande parte, à criação de programas governamentais que estimulam a produção e a utilização do biocombustível. O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) criado em 2004, por exemplo, aumentou significativamente a demanda para produção de óleo vegetal, não só impactando diretamente na produção de culturas exploradas de forma intensiva, como o dendê, mas também a exploração extrativista, como o babaçu (GARCEZ, 2008). A expansão do cultivo de oleaginosas, como a soja, para fins bioenergéticos, tem sido duramente questionada pela comunidade internacional, tendo em vista a utilização destas culturas para fins alimentares. Para suprir a demanda para fins bioenergéticos, o desenvolvimento de tecnologias apropriadas para o cultivo e manejo das culturas tipicamente é fundamental para que se obtenha uma produção em escala industrial.

A gordura bovina e o óleo de soja representam 23,32% e 69,96% das matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel, respectivamente. Outras fontes

podem ser utilizadas na produção de biodiesel como óleo de algodão, gordura de porco e outros materiais graxos (ANP, 2015). Dentre as diversas culturas inseridas, consideradas emergentes, a macaúba (*Acrocomia aculeata*) é considerada uma cultura promissora como matéria-prima na indústria alimentícia, indústria siderúrgica e produção de carvão vegetal (CONCEIÇÃO et al., 2010). É também considerada promissora para produção de biodiesel, devido à alta produtividade de óleo, rusticidade, ampla adaptabilidade em diferentes regiões, possibilidade de cultivo em sistemas agrossilvipastoris, produção de óleos e coprodutos sem toxinas (PIMENTEL et al., 2011).

Um dos principais desafios do setor agroenergético brasileiro atualmente se refere à geração de conhecimento e tecnologia que contribuam para a produção sustentável de matéria-prima visando à produção de biocombustível (LORENZI et al., 2011). Desde novembro de 2014, o óleo diesel comercializado no Brasil contém 7% de biodiesel. A utilização compulsória dos biocombustíveis como o diesel mineral vem gerando uma constante expansão na produção de biodiesel no Brasil.

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa de florestas tropicais, encontrada com grande abundância no cerrado brasileiro (HENDERSON et al., 1995; LORENZI, 2006) se concentrando de maneira expressiva em Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Piauí, Tocantins e Ceará (LORENZI et al., 2011). Com ampla distribuição geográfica, ocorre em todo o Trópico Americano, do México a Argentina, Bolívia, Paraguai, Antilhas, exceto Equador e Peru. Preferencialmente, em regiões com estação chuvosa bem definida e de baixas altitudes. Esta planta destaca-se principalmente pelo grande potencial para a produção de óleo e pela possibilidade de ser utilizada em consórcio com outras espécies em sistemas agrossilvipastoris (HENDERSON et al., 1995; VIANA et al., 2011).

Apesar das vantagens em relação a outras culturas, a macaúba apresenta algumas características que dificultam sua implementação em um sistema de produção em larga escala, tais como sazonalidade e maturação irregular dos frutos. Devido à variabilidade de maturação dos frutos, na colheita de macaúba, obtêm-se frutos maduros, semimaduros e verdes. O maior percentual de frutos semimaduros e verdes pode resultar na diminuição da qualidade e quantidade de óleo extraído (CLEMENT et al., 2005). Desta forma, a inserção de novas técnicas nas fases de

colheita e processamento do fruto criariam novas estratégias para o beneficiamento e extração do óleo com agregação de valor e renda para o produtor rural.

Para o processamento dos frutos da macaúba, existem máquinas comerciais que foram adaptadas para o despulpamento, o rompimento do endocarpo e extração do óleo do mesocarpo e amêndoa. No entanto, essas adaptações não foram avaliadas para processos específicos para macaúba, além do que ainda não existem máquinas que permitam o processamento individualizado dos componentes dos frutos.

A distribuição espacial da macaúba em diversas regiões do Brasil certamente proporciona características exclusivas a cada acesso da planta, devido à variabilidade edafoclimática. Sabe-se que populações nativas são heterogêneas e apresentam problemas como a sazonalidade (MOTTA, 2002). O dimensionamento das máquinas de colheita e processamento deve levar em consideração esta heterogeneidade nas características do fruto. A determinação de parâmetros técnicos das máquinas e propriedades dos frutos possibilitaria inovações e aperfeiçoamento no sistema, com geração de estratégias para o processamento dos diferentes componentes do fruto.

Atualmente, a colheita é realizada pela coleta dos frutos maduros que caem no chão, em sistemas, na sua grande maioria, extrativistas. No entanto, com o processo de domesticação em andamento desta planta, inicia o surgimento de grandes áreas implantadas especificamente para uma exploração mais intensiva. A demanda natural de uma exploração intensiva será o surgimento de sistemas de colheita que permitirá uma melhor programação desta atividade. Uma das opções de colheita, é o corte do cacho com os frutos.

Desta maneira, o destacamento dos frutos da ráquila é parte do processamento pós-colheita. Estudos de análise dos esforços mecânicos necessários ao destacamento dos frutos da ráquila são necessários para o desenvolvimento de máquinas para estas atividades. Outra opção, para o destacamento destes frutos na usina de processamento, é utilizar o princípio de vibração mecânica. Neste caso, a determinação das propriedades modais, frequências naturais e modos de vibração, do sistema fruto-ráquila é o conhecimento básico necessário para o desenvolvimento deste tipo de equipamento, semelhante ao realizado, por exemplo, para os frutos de café (SANTOS et al., 2010a; SANTOS et al., 2010b).

Uma pesquisa realizada no início dos anos 2000 apontou que o processo de desenvolvimento de máquinas para o setor agrícola era realizado de maneira informal

e com inexistência do planejamento do produto nas indústrias de pequeno porte no Brasil (ROMANO et al., 2001). Ou seja, as máquinas eram desenvolvidas no processo de “tentativa e erro”. Este tipo de procedimento, provavelmente, ainda predomina nas indústrias de pequeno porte no Brasil, principalmente aquelas que visam ofertar produtos para um mercado novo, como este de processamento dos frutos da macaúba visando à obtenção de uma matéria-prima de qualidade para produção de biocombustível.

Tendo em vista que a macaúba é uma cultura rústica e pouco explorada, existe a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias para torná-la comercialmente rentável aos produtores agrícolas. Por isso, existe a necessidade de desenvolvimento de processos e máquinas para colheita e beneficiamento do fruto. Dessa forma, visando a obtenção de matéria-prima de qualidade na produção de biodiesel pretende-se criar uma base de conhecimento do sistema fruto-ráquila e simular a vibração do sistema para determinação das frequências naturais e modos de vibração.

2. Disposição do trabalho

Este trabalho foi dividido em quatro capítulos. O primeiro composto por uma introdução geral e apresentação dos tópicos abordados nos capítulos seguintes.

No capítulo 2 foram determinadas as propriedades físicas, massa, densidade, diâmetro, dimensões características e volume, dos frutos e das ráquias da macaúba. Também foram determinadas as propriedades mecânicas, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das ráquias, e razão de amortecimento e coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila, a fim de gerar uma base de conhecimento para auxiliar a posterior determinação das frequências fundamentais de cada palmeira a partir da simulação do sistema fruto-ráquila.

No capítulo 3 foi realizado o estudo do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila por meio de testes experimentais por vibrações mecânicas, bem como, a modelagem e simulação do sistema solucionado a partir do método de elementos finitos. Nos testes de vibrações mecânicas foi realizada varredura das frequências a fim de identificar a frequência fundamental do sistema. Na simulação do sistema foram estimadas as frequências fundamentais de cada sistema fruto-ráquila e seus respectivos modos de vibração. Os parâmetros utilizados como entrada na simulação, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade, foram submetidos à análise de sensibilidade para verificar qual parâmetro possui maior influência no modelo. As propriedades físicas necessárias para a simulação do sistema foram determinadas para cada sistema fruto-ráquila de cada palmeira, com exceção do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, determinados no Capítulo 2.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho.

3. Referências

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Biodiesel-Introdução** - 2014. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=73292&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1443030040981>> Acesso em 23 de setembro de 2015.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis . **Biodiesel-Boletim mensal do biodiesel** - novembro de 2015. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=78672&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1452253301567>> Acesso em 8 de janeiro de 2016.

AMBROZIM, A. R. P.; KURI, S. E.; MONTEIRO, M. R. Corrosão metálica associada ao uso de combustíveis minerais e biocombustíveis. *Química Nova*, v.32, p.1910-1916, 2009.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Combustíveis Renováveis** - novembro de 2015. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/publicacoes/boletim-mensal-de-combustiveis-renovaveis?_20_displayStyle=descriptive&p_p_id=20>. Acesso em janeiro de 2016.

CLUFF, M.; JONES, W. 2011. *Agricultural Outlook 2011-2020*. OECD-FAO. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/newsroom/docs/Outlookflyer.pdf>. Acesso em: 23 de setembro de 2015.

CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. DA. Macaúba é potencial fonte alternativa para produção de biodiesel. **Agrolink**, Dezembro, 2010.

CLEMENT, C. R.; LLERAS P. E.; LEEUWEN, J. O potencial das palmeiras tropicais no Brasil: acertos e fracassos das últimas décadas. **Agrociência**, v.9, n.1/2, p.67-71, 2005.

GARCEZ, C.A G. Uma análise da política pública do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). **Dissertação**. Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal de Brasília. Brasília/DF. 2008. 171p.

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

LORENZI, G. M. A. C. *Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd. ex Mart. - Areaceae: Bases para o Extrativismo Sustentável*. Curitiba, PR. UFPR. 2006. 156p. Tese (Doutorado em Fitotecnia e Fitossanitarismo), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LORENZI, G.M.A.C.; PIMENTEL, L. D.; PAULA, S. R.; NEGRELLE, R. R. B.; PAES, J. M. V. Prospecção da cadeia produtiva dos frutos da palmeira macaúba no estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário - EPAMIG**. Belo horizonte, nov/dez. ,2011. p.41-51 v.32, n.265.

MOTTA, P. E. F.; NILTON, C.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; GOMES, J. B. V. Ocorrência de macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v. 37, p. 1023-1031, 2002.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MARTINEZ, H. E. P.; TEIXEIRA, C. M.; MOTOIKE, S. Y.; PEDROSO NETO, J. C. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo de macaúba: 1º aproximação. **Informe Agropecuário-EPAMIG**. V.32, n.265, p.20-30, nov/dez. Belo horizonte, 2011.

ROMANO, L. N.; BACK, N.; OGLIARI, A. Indústria brasileira de máquinas agrícolas: estudos preliminares do processo de desenvolvimento de produto. **XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA**, 2001.

ROSILLO-CALLE F.; PELKMANS L.; WALTER A. 2009. A global overview of vegetable oils, with reference to biodiesel. IEA Bioenergy Task 40, 89p. Disponível em: <http://fic.nfi.or.th/food/upload/pdf/2_1349.pdf> Acesso em: 29 de julho de 2015.

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

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** (Online), v. 32, p. 373-378, 2010.

VIANA, M.C.M.; SILVA, E. A.; QUEIROZ, D. S.; PAES, J. M. V.; SATO, A. Y.; MOTOIKE, S. Y. Cultivo de Macaúba em Sistemas Agrossilvipastoris. **Informe Agropecuário-EPAMIG**. v. 32, n. 265, p.70-80, nov/dez. Belo horizonte, 2011.

CAPÍTULO 2 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FRUTOS E RÁQUILAS DA MACAÚBA

1. Introdução

Presente em todo o território brasileiro, a macaúba (*Acrocomia aculeata*) é mais frequentemente encontrada em São Paulo, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Tocantins, Ceará e Piauí (EMBRAPA, 2014). É uma palmeira rústica, que pode atingir de 10 a 15 metros de altura, seu estipe varia de 20 a 30 cm de diâmetro, e possui acúleos com até 10 cm de comprimento ao longo do estipe, folhas, parte do cacho e inflorescência (MOTA et al., 2011). Seus frutos são do tipo drupa com epicarpo de cor verde na fase inicial de desenvolvimento e atinge a cor amarela ou castanha quando maduro (PIMENTEL et al., 2011). O mesocarpo (polpa) tem aspecto fibroso e é rico em óleo, bem como a amêndoa. Cada fruto pode apresentar de uma a três amêndoas, dependendo de sua localização geográfica, e esta é envolta pelo endocarpo, uma casca rígida de cor preta que protege a semente oleaginosa.

As palmeiras começam a produzir frutos por volta de cinco anos após o plantio, podendo produzi-los até os 100 anos. Cada planta de macaúba produz, geralmente, 3 a 4 cachos por ano. A frutificação da macaúba na Zona da Mata Mineira ocorre de outubro a abril, dependendo da altitude em que ocorre, e podem ser extraídos dois tipos distintos de óleo do fruto da macaúba, da polpa e amêndoa (ENTABAN, 2009). O mesocarpo apresenta o maior teor de óleo podendo chegar a 70%, e a amêndoa apresenta teor de óleo variando entre 46 % e 58%. (HIANE et al., 2005; DZISIAK, 2004).

A macaúba apresenta alta produtividade, com potencial de produzir até oito toneladas de óleo por hectare, por isso, tem sido indicada como matéria-prima para a indústria de biodiesel. Pode também ter fins alimentares e cosméticos, praticamente não deixando resíduos inaproveitados (EMBRAPA, 2014).

Devido à dificuldade de acesso aos cachos, os frutos são colhidos utilizando-se foice para o aparo dos cachos, através do uso de redes envolvendo os cachos para interceptação dos frutos durante a queda, ou através de colheita manual no chão. Para o destacamento destes frutos na usina de processamento, uma opção seria o uso de

máquinas que utilizem o princípio de vibrações mecânicas. No entanto, não existem no mercado máquinas para este fim. O estudo do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila nortearia o desenvolvimento dessas máquinas.

Para o estudo do comportamento dinâmico de um corpo, é necessário conhecer algumas de suas propriedades físicas, geométricas e mecânicas. Dentre as propriedades mecânicas, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson são de fundamental importância. O módulo de elasticidade pode ser definido como a constante de proporcionalidade entre a tensão e a deformação no regime elástico e, está relacionado à rigidez de um material. Assim, quanto maior for o módulo de elasticidade, menor será a deformação elástica resultante devido à aplicação de tensão.

Quando definimos o módulo de elasticidade consideramos apenas a deformação longitudinal que o material sofre, porém, quando submetido à tração, este sofre também uma deformação transversal que é proporcional à deformação longitudinal. A razão entre as deformações transversal e longitudinal é chamada de coeficiente de Poisson. O coeficiente de Poisson não pode ser maior que 0,5 e, teoricamente, para materiais isotrópicos, o coeficiente de Poisson deve ser igual a 0,25. (CALLISTER, 2007). Para os materiais biológicos, são encontrados coeficientes de Poisson médio igual a 0,26 para o bambu (GHAVAMI & MARINHO, 2005), de 0,32 a 0,35 para o café, para os estádios de maturação maduro e verde, respectivamente (RODRIGUEZ et al., 2006) e, para o caule de milho 0,23 (NIKLAS, 1992).

Materiais biológicos quando sujeitos a uma tensão sofrem deformação com dependência do fator tempo, o que caracteriza um comportamento viscoelástico. Materiais viscoelásticos, diferente dos materiais elásticos, não apresentam constantes de proporcionalidade e sim funções do tempo (LAURENTI, 1997). Na prática, existem poucos materiais elasticamente isotrópicos, porém, muitos materiais são considerados isotrópicos para o propósito de análises de deformação elástica, como ocorre para os materiais biológicos. Alguns fatores que afetam as constantes elásticas são a temperatura, composição das fases constituintes do material e porosidade (SUTERIO, 1998).

Tendo em vista a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias para tornar a macaúba comercialmente rentável aos produtores agrícolas, devemos

investir no desenvolvimento de processos e máquinas para colheita e beneficiamento do fruto levando em consideração a heterogeneidade presente nas características das diferentes procedências (acesso) dessa palmeira.

2. Objetivos

Determinar as propriedades físicas da macaúba, listadas a seguir, a fim de gerar uma base de conhecimento necessária para o estudo do comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila:

- geometria, massa e massa específica dos frutos e ráquilas;
- módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das ráquilas e,
- razão de amortecimento e coeficiente de amortecimento dos sistemas fruto-ráquila.

3. Material e métodos

Os frutos e ráquias utilizados foram coletados no Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da UFV, e em sua bordadura, localizado na Fazenda Experimental de Araponga, iniciado em 2008. A Fazenda Experimental está localizada na cidade de Araponga, Minas Gerais, a 20° 40' de latitude Sul e 42° 31' de longitude Oeste. Sua altitude média é de 1300 m, variando de 600 m a 2000 m. O clima, segundo a classificação de Koopen, é do tipo tropical de altitude (Cwa), com chuvas durante o verão e temperatura média anual em torno de 19 °C, com variações médias entre 12 e 26 °C.

O BAG macaúba possui mais de 700 plantas, provenientes de seis estados brasileiros, com mais de 100 acessos (MANFIO et al., 2011). No total, foram utilizados quatro acessos distintos, sendo esses identificados por BD 27 (palmeira provinda da região de Abaeté/ MG), BD 40 (palmeira provinda da região de Pitangui – Martinho Campos/ MG), BGP 29 (palmeira provinda da região de Prudente de Moraes – Matozinhos/ MG) e BGP 35 (palmeira provinda da região de Mirandópolis/ SP). A designação BD é para as plantas de bordadura e BGP para as plantas do BAG.

As determinações das propriedades do fruto e ráquila da macaúba foram realizadas para cachos com frutos verdes. Foram cortados dois cachos de cada palmeira (Figura 2.1) na data de 30/09/2015. As medições foram realizadas dentro de 24 h após a coleta no laboratório de mecanização agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

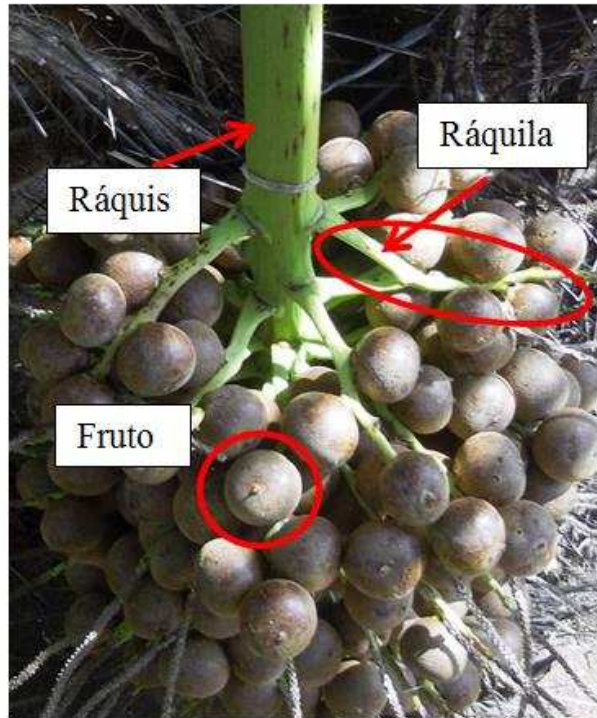


Figura 2.1: Cacho de macaúba. Fonte: Acervo pessoal.

Na Tabela 2.1 são apresentados os números de frutos e ráquilas utilizados de cada acesso para determinação das propriedades geométricas, massa e massa específica.

Tabela 2.1: Quantidade de frutos e ráquilas utilizada para determinação das propriedades geométricas e físicas de cada acesso

	BD27	BD 40	BGP 29	BGP 35
Frutos	30	25	34	29
Ráquilas	10	10	10	10

BD 27 - palmeira da região de Abaeté/ MG; BGP 29 - palmeira da região de Prudente de Moraes - Matozinhos/ MG, BGP 35 – palmeira da região de Mirandópolis/ SP e BGP 40 - palmeira da região de Pitangui – Martinho Campos/ MG.

O módulo de elasticidade foi determinado com as mesmas ráquilas da Tabela 2.1. As ráquilas foram padronizadas com 12 cm da porção intermediária de seu comprimento.

Para a determinação do coeficiente de Poisson, foram utilizados acessos diferentes, sendo eles, BGP12 (provinda da região de Ibiá/ Araxá – MG), BGP13 (provinda da região de Sítio Paraíso/ Belo Horizonte – MG), BGP31 (provinda da

região de Três Marias – MG) e BGP53 (provinda da região de São João Del Rei/ Lavras – MG) com frutos verdes. Foram utilizadas dez ráquias de cada acesso para compor os corpos de provas que foram padronizados da mesma forma que no teste de tração, com ráquias de 12 cm de comprimento e a coleta dos cachos foi realizada no fim de novembro.

Os acessos utilizados para determinar o coeficiente de Poisson foram diferentes, pois, a metodologia empregada para os acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35 não foi adequada e os acessos tiveram que ser descartados.

Para determinação das razões de amortecimento e coeficiente de amortecimento, foram utilizadas dez ráquias diferentes das utilizadas na determinação do módulo de elasticidade. Porém, foram utilizados os mesmos acessos e, com comprimento padronizado de 15 cm para os acessos BD27 e BGP 35 e, 13 cm para os acessos BD 40 e BGP 29. O comprimento das ráquias teve padrões diferentes devido à limitação do tamanho real das ráquias nos diferentes acessos.

Propriedades físicas dos frutos e ráquias – geometria, massa, massa específica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, razão de amortecimento e coeficiente de amortecimento

A determinação das dimensões características médias dos frutos (Figura 2.2) e do diâmetro médio das ráquias foi efetuada com paquímetro digital Mitutoyo com resolução de 0,01 mm.

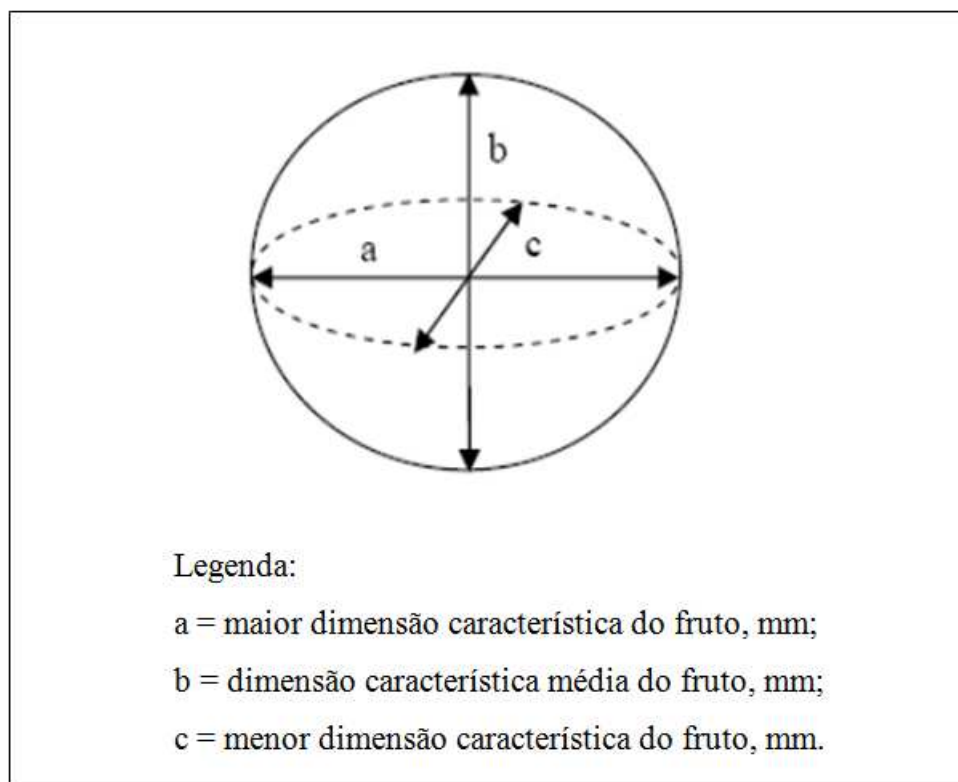


Figura 2.2: Desenho esquemático do fruto de macaúba com suas dimensões características.

Nos frutos foram medidos três diâmetros, a, b e c, correspondentes à maior dimensão característica, dimensão intermediária e menor dimensão, respectivamente. O diâmetro das ráquilas foi obtido a partir da média de três diâmetros medidos ao longo da ráquila, um na porção intermediária e dois próximos às extremidades.

O volume médio das ráquilas foi determinado por meio de deslocamento de coluna d'água utilizando duas provetas graduadas de 100 ml cada. A primeira proveta foi completada com água até a marca de 100 ml e, na segunda proveta, as ráquilas foram colocadas juntamente com a água da primeira proveta até completar novamente o volume de 100 ml. O volume de água restante na primeira proveta representa o volume correspondente às ráquilas. Foi realizado um teste para cada ráquila a fim de determinar o volume médio das ráquilas por acesso.

A estimativa do volume dos frutos foi realizada a partir das dimensões características por meio da Equação 2.1 (MOHSENIN, 1986).

$$V = \frac{\pi(abc)}{6} 10^{-3} \quad (2.1)$$

em que,

V = volume dos frutos, cm³;

a, b ,c = dimensões características, mm.

Para a determinação da massa média dos frutos e ráquilas, foi utilizada uma balança de precisão digital com exatidão de 0,001 g. A massa das ráquilas e frutos foi obtida individualmente e, posteriormente, definiu-se uma média para cada acesso. A massa específica dos frutos foi obtida a partir da razão entre a massa e o volume dos frutos. A massa específica das ráquilas foi determinada a partir da razão entre massa e o volume das ráquilas.

As propriedades mecânicas determinadas neste estudo foram o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, razão de amortecimento e coeficiente de amortecimento médio. Os materiais utilizados foram considerados elasticamente isotrópicos nos testes.

Para determinação do módulo de elasticidade, as ráquilas foram submetidas ao teste de tração realizado em uma máquina de ensaio universal INSTRON, modelo 3365, com capacidade de carga de 5 kN. O software utilizado para a aquisição dos dados gerados foi o Bluehill3. As ráquilas foram fixadas entre as garras da máquina de ensaio (Figura 2.3a) e foram submetidos a uma pré-carga de 2N, sendo que, os 5 cm intermediários compunham o corpo de teste propriamente dito. Em seguida, os testes foram iniciados com velocidade de 3 mm/min até que houvesse sua ruptura. A escolha da velocidade de avanço do teste foi feita com base na norma da ASABE para compressão, em que, para a maioria dos materiais vegetais, o ensaio é realizado com velocidades que variam de 2,5 a 30 mm/min.

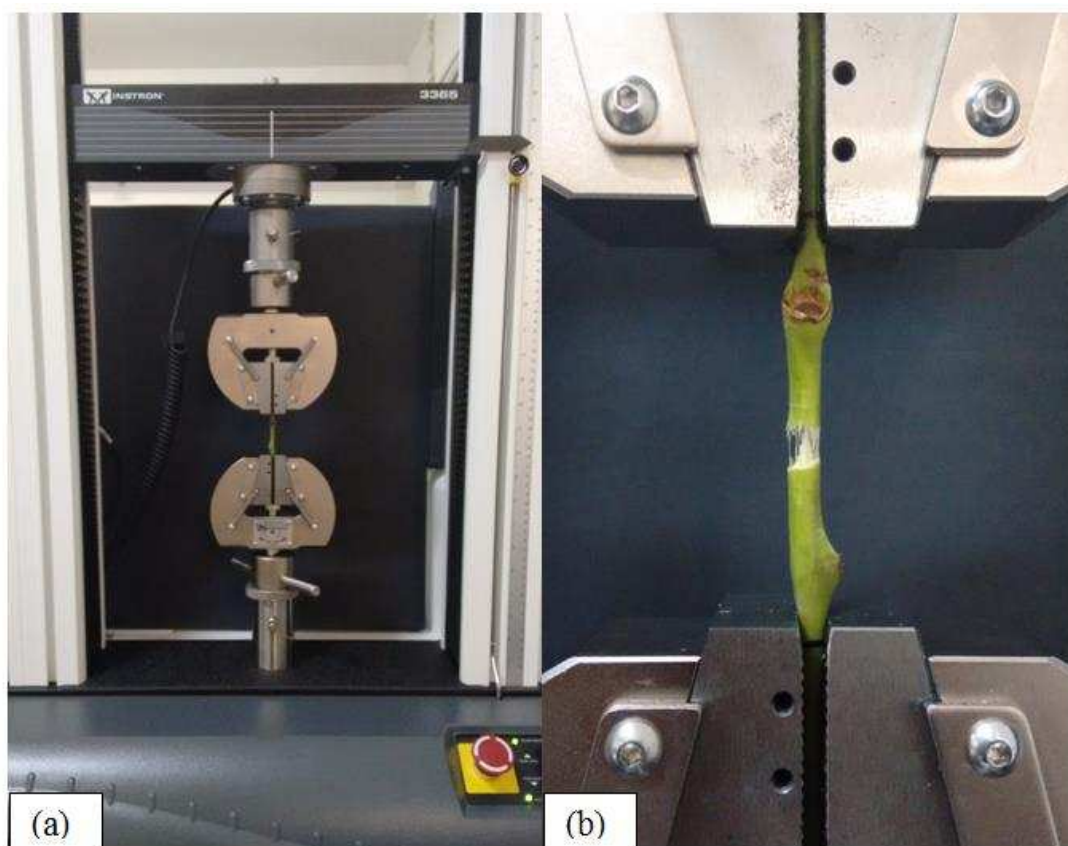


Figura 2.3: (a) Corpo de prova fixado entre as garras; (b) corpo de prova após ruptura.

As informações do teste foram agrupadas em gráficos tensão *versus* deformação específica e, com auxílio do software EXCEL, foi gerado o módulo de elasticidade médio para cada acesso por meio do método da tangente. Como padrão para determinação do módulo de elasticidade, foi utilizado o mesmo intervalo de região elástica com deformação específica de 0 a 3 mm/mm nos cálculos para cada acesso.

Para a determinação do coeficiente de Poisson, as ráquilas foram fixadas entre as garras e submetidas a uma pequena deformação. As ráquilas foram submetidos a uma pré-carga de 2 N e, logo em seguida, os testes foram iniciados com velocidade de 3 mm/min até que a garra superior atingisse deslocamento de 2 mm.

Para determinar a deformação específica transversal foi utilizado um micrômetro externo Mitutoyo com capacidade de 0-25 mm, graduação de 0,01 mm e exatidão de $\pm 0,002$ mm e, para deformação específica longitudinal, foi utilizado paquímetro digital Mitutoyo com resolução de 0,01 mm . A deformação específica

longitudinal foi determinada a partir da distância entre as garras antes do início do teste (logo após a pré-carga) e após o término do teste. Para determinar a deformação específica transversal foi realizada a média de três medições em porções diferentes da ráquila antes do início do teste (logo após a pré-carga) e após o término do teste.

O coeficiente de Poisson foi calculado a partir da razão entre as deformações específicas transversal e longitudinal dos corpos de prova (Equação 2.2).

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (2.2)$$

em que,

ν – coeficiente de Poisson, adimensional;

ε_x – deformação específica transversal, adimensional;

ε_y – deformação específica longitudinal, adimensional.

Para a determinação da razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila, foi empregado o método do decremento logarítmico, conforme Equação 2.3, proposto por RAO (2008).

$$\delta = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.3)$$

em que,

δ = decremento logarítmico;

ζ = razão de amortecimento do sistema;

x_i = amplitude do sinal no tempo i ;

x_{i+1} = amplitude do sinal sucessiva a x_i .

A resposta teórica esperada para um sistema subamortecido, após exposição a um impulso, é apresentada na Figura 2.4.

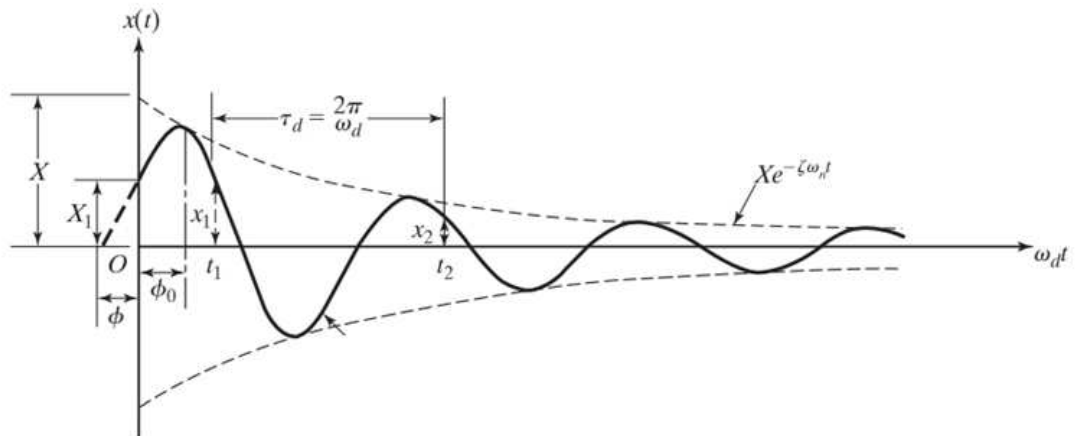


Figura 2.4: Resposta teórica de decaimento de um sistema subamortecido (RAO, 2008). As variáveis X_i representam a amplitude de deslocamento; t , o tempo; x_i a posição em determinado instante t_i ; ζ a razão de amortecimento; ω , frequência de vibração; τ , o período de vibração e, ϕ o ângulo de fase.

O método do decremento logarítmico foi realizado por meio de teste de vibração com um impulso gerado a 100% da amplitude de aceleração, sendo esta de 5 vezes a aceleração da gravidade (g_r). Para promover a excitação do sistema frutotáquila, foi empregado um sistema de instrumentação da LDS (*Ling Dynamic Systems*), composto por um gerador de sinais COMET_{USB} da marca Dactron, um amplificador PA 1000L e um vibrador eletromagnético modelo V-555 fabricados pela LDS (Figura 2.5).

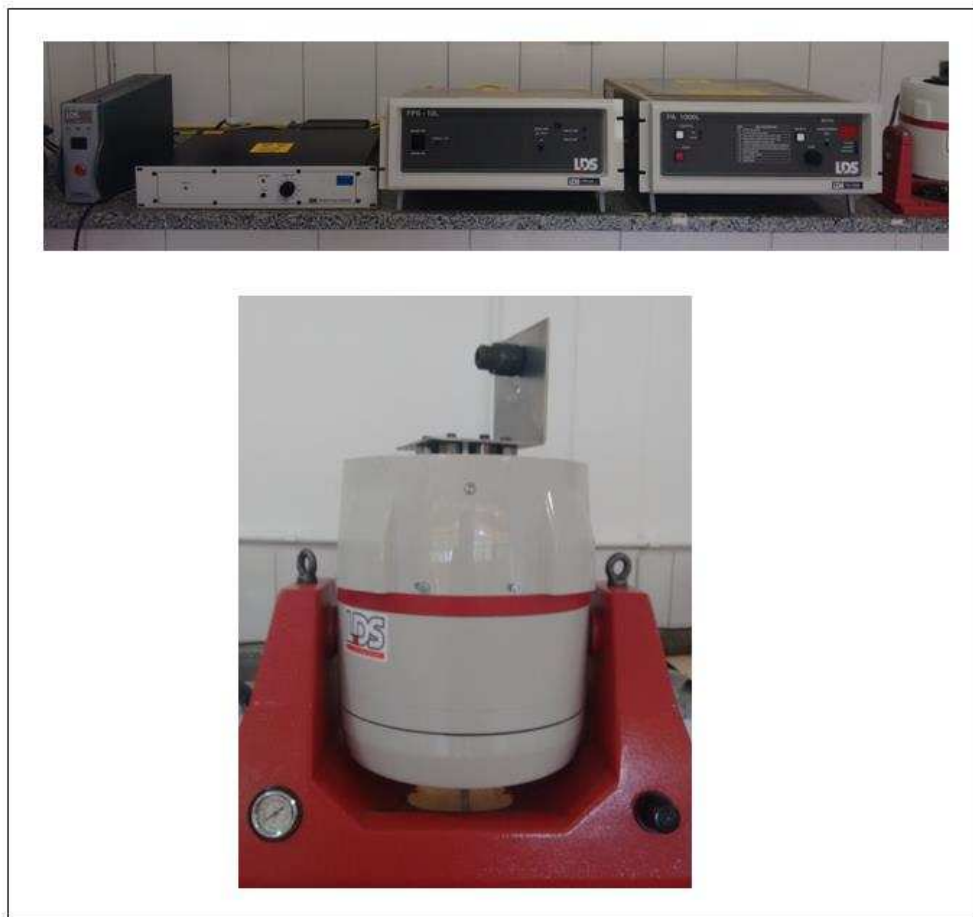


Figura 2.5: instrumentação da LDS (Ling Dynamic Systems), composto por um gerador de sinais COMETUSB da marca Dactron, um amplificador PA 1000L e um vibrador eletromagnético modelo V-555.

O sistema fruto-ráquila foi engastado a um suporte fixado à base móvel do vibrador, sendo que, depois de engastadas, as ráquias ficaram com 13 cm de comprimento nos acessos BD 27 e BGP 35 e, 11 cm de comprimento nos acessos BD 40 e BGP 29. Foi utilizado um cenário em que o fruto estava preso à ráquila entre a porção intermediária e a extremidade oposta ao engaste.

Para aquisição dos dados, foram utilizados um acelerômetro piezelétrico LW174002 com sensibilidade de $100,7 \text{ mVg}_r^{-1}$ e um módulo de aquisição NI cDAQ-9234 da National Instruments. A massa do acelerômetro não deve ser superior a um décimo da massa total do sistema, nesse caso, o acelerômetro utilizado apresenta baixa massa e alta sensibilidade, não modificando significativamente a dinâmica do sistema fruto-ráquila (MARK & TORBEN, 1987). O acelerômetro foi fixado ao fruto verticalmente para medir a aceleração do sistema na direção vertical (Figura 2.6).



Figura 2.6: sistema fruto-ráquila engastado ao suporte fixado à base móvel do vibrador eletromagnético com acelerômetro fixado verticalmente ao fruto.

Os dados gerados foram processados no software EXCEL para extrair da forma gráfica duas amplitudes sucessivas (X_i e X_{i+1}) para o cálculo da razão de amortecimento média (ζ) de cada acesso, conforme Equação 2.3.

Após obtenção da razão de amortecimento foi determinado o coeficiente de amortecimento (Equação 2.4).

$$\delta = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} = \zeta \omega_n \tau_d = \omega_n \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi}{\omega_d} \cdot \frac{c}{2m} \quad (2.4)$$

em que,

δ = decremento logarítmico, adimensional;

ζ = razão de amortecimento do sistema, adimensional;

x_i = amplitude do sinal no tempo i ;

x_{i+1} = amplitude do sinal sucessiva a x_i .

ω_n = frequência natural, rads^{-1} ;

τ_d = período amortecido, s;

ω_n = frequência natural amortecida, rads^{-1} ;

m = massa, kg;

c = coeficiente de amortecimento, Nsm^{-1} .

Os dados referentes às propriedades físicas foram submetidos à análise de estatística descritiva com o auxílio do programa computacional Assistat.

4. Resultados

Os dados referentes à geometria dos frutos e ráquias, massa e massa específica são apresentados nas Tabelas 2.2 a 2.7, bem como a estatística descritiva.

Tabela 2.2: Estatística descritiva das dimensões características dos frutos e ráquias dos acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

BD 27				
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d(mm)
Média	39,59	38,80	38,42	3,73
Desvio padrão	1,51	1,36	1,34	0,16
CV (%)	3,81	3,50	3,49	4,40
BD 40				
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d(mm)
Média	44,13	43,71	38,86	3,29
Desvio padrão	1,45	1,34	1,40	0,31
CV (%)	3,29	3,06	3,60	9,50
BGP 29				
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d(mm)
Média	47,41	47,11	46,07	3,61
Desvio padrão	1,52	1,50	1,49	0,18
CV (%)	3,20	3,18	3,24	5,07
BGP 35				
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d(mm)
Média	41,55	41,29	39,86	4,34
Desvio padrão	1,35	1,39	1,67	0,46
CV (%)	3,24	3,36	4,19	10,50

a-maior dimensão do fruto; b- dimensão intermediária do fruto; c- menor dimensão do fruto; d- diâmetro médio das ráquias; CV-coeficiente de variação; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Tabela 2.3: Estatística descritiva das dimensões características dos frutos e ráquias considerando a média geral de todos os acessos (BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35)

	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d(mm)
Média	43,29	42,85	41,07	3,74
Desvio padrão	3,38	3,48	3,55	0,48
CV (%)	7,80	8,13	8,64	12,94

a-maior dimensão do fruto; b- dimensão intermediária do fruto; c- menor dimensão do fruto; d- diâmetro médio das ráquias; CV-coeficiente de variação.

Tabela 2.4: Estatística descritiva da massa, volume e massa específica das ráquilas dos acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

BD 27			
	m_r (g)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)
Média	2,63	4,30	0,63
Desvio padrão	0,18	0,90	0,10
CV (%)	6,90	20,93	15,90
BD 40			
	m_r (g)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)
Média	1,44	3,15	0,47
Desvio padrão	0,19	0,55	0,07
CV (%)	13,19	17,46	16,07
BGP 29			
	m_r (g)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)
Média	2,21	3,60	0,62
Desvio padrão	0,21	0,44	0,08
CV (%)	9,73	12,11	12,13
BGP 35			
	m_r (g)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)
Média	3,02	3,55	0,88
Desvio padrão	0,57	0,82	0,21
CV (%)	18,87	23,10	23,65

m_r – massa média das ráquilas; V_r – volume médio das ráquilas; ρ_r – massa específica média das ráquilas; CV-coeficiente de variação; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Tabela 2.5: Estatística descritiva da massa, volume e massa específica das ráquilas considerando a média geral de todos os acessos

	m_r (g)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)
Média	2,32	3,65	0,65
Desvio padrão	0,67	0,82	0,20
CV (%)	28,92	22,34	30,11

m_r – massa média das ráquilas; V_r – volume médio das ráquilas; ρ_r – massa específica média das ráquilas; CV-coeficiente de variação.

Tabela 2.6: Estatística descritiva da massa, volume e massa específica dos frutos dos acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

BD 27			
	m_f (g)	V_f (cm ³)	ρ_f (gcm ⁻³)
Média	32,44	3,10	1,05
Desvio padrão	3,16	0,31	0,03
CV (%)	9,75	10,15	2,46
BD 40			
	m_f (g)	V_f (cm ³)	ρ_f (gcm ⁻³)
Média	45,24	3,93	1,15
Desvio padrão	4,29	0,35	0,03
CV (%)	9,49	8,91	2,73
BGP 29			
	m_f (g)	V_f (cm ³)	ρ_f (gcm ⁻³)
Média	58,09	5,40	1,08
Desvio padrão	5,22	0,49	0,01
CV (%)	8,98	9,02	0,90
BGP 35			
	m_f (g)	V_f (cm ³)	ρ_f (gcm ⁻³)
Média	39,91	3,59	1,12
Desvio padrão	3,61	0,37	0,16
CV (%)	9,05	10,20	14,41

m_f – massa média dos frutos; V_f – volume médio dos frutos; ρ_f – massa específica média dos frutos; CV-coeficiente de variação; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Tabela 2.7: Estatística descritiva da massa, volume e massa específica dos frutos considerando a média geral de todos os acessos

	m_f (g)	V_f (cm ³)	ρ_f (gcm ⁻³)
Média	44,38	4,06	1,10
Desvio padrão	10,63	0,98	0,09
CV (%)	23,95	24,17	8,35

m_f – massa média dos frutos; V_f – volume médio dos frutos; ρ_f – massa específica média dos frutos; CV- coeficiente de variação.

Na Figura 2.7 é apresentada uma das curvas curva tensão *versus* deformação gerada a partir dos testes de tração para determinação do módulo de elasticidade, em que está apresentada a região elástica até 3 mm/mm.

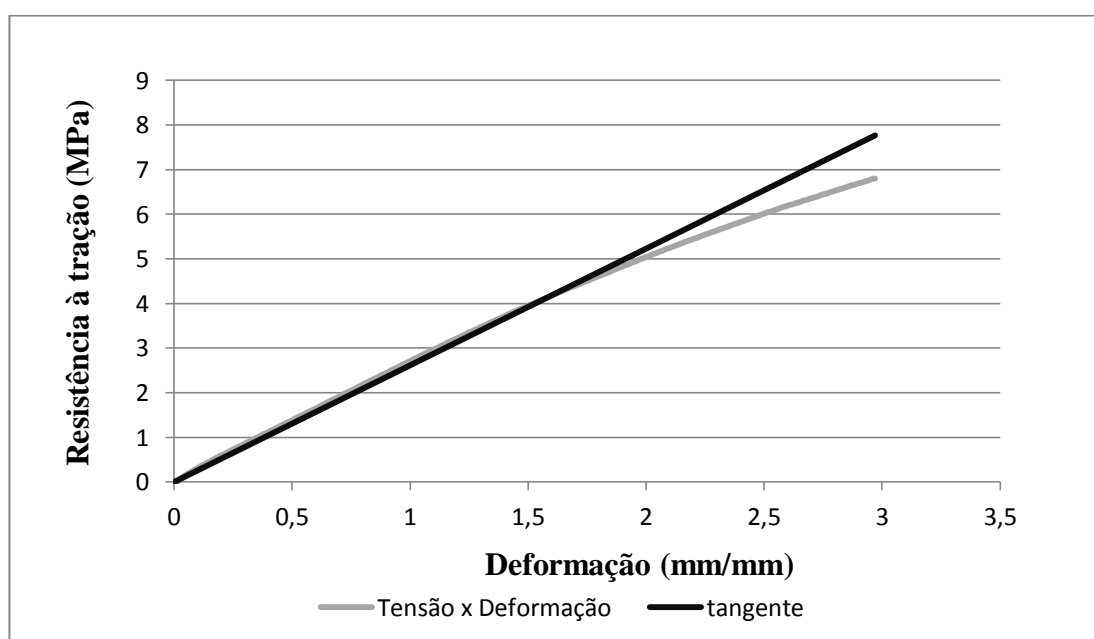


Figura 2.7: curva tensão versus deformação para um dos sistemas fruto-ráquila na região elástica para deformação até 3 mm/mm e, curva tangente correspondente ao módulo de elasticidade.

Tabela 2.8: Estatística descritiva do módulo de elasticidade dos acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

	E (MPa)			
	BD 27	BD 40	BGP 29	BGP 35
Média	2,95	3,02	3,17	2,22
Desvio padrão	0,52	0,98	0,85	0,89
CV (%)	17,73	32,42	26,88	40,33

E – Módulo de Elasticidade; CV – coeficiente de variação; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Para o coeficiente de Poisson (ν), do total de 40 ráquilas testadas nos quatro acessos, apenas seis foram consideradas para o cálculo da média. Os valores descartados não ficaram entre zero e 0,50 como estabelecido para materiais isotrópicos (CALLISTER, 2007) e variaram de -0,62 a 7,51. Na Tabela 2.9, é apresentada a estatística descritiva considerando os seis coeficientes de Poisson obtidos e a média geral do módulo de elasticidade (E).

Tabela 2.9: Estatística descritiva do coeficiente de Poisson, utilizando os a média dos acessos BGP 12, BGP 13, BGP 31 e BGP 53, e módulo de elasticidade considerando a média geral de todos os acessos

	ν	E (MPa)
Média	0,37	2,84
Desvio padrão	0,07	0,91
CV (%)	18,21	32,00

ν – coeficiente de Poisson (adimensional); E – módulo de elasticidade; CV – coeficiente de variação.

Na Figura 2.8 é apresentada uma das curvas de decremento obtida após o impulso. A razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila, determinada através do decremento logarítmico obtido pelo teste de impulso, está apresentada na Tabela 2.10 para cada acesso.

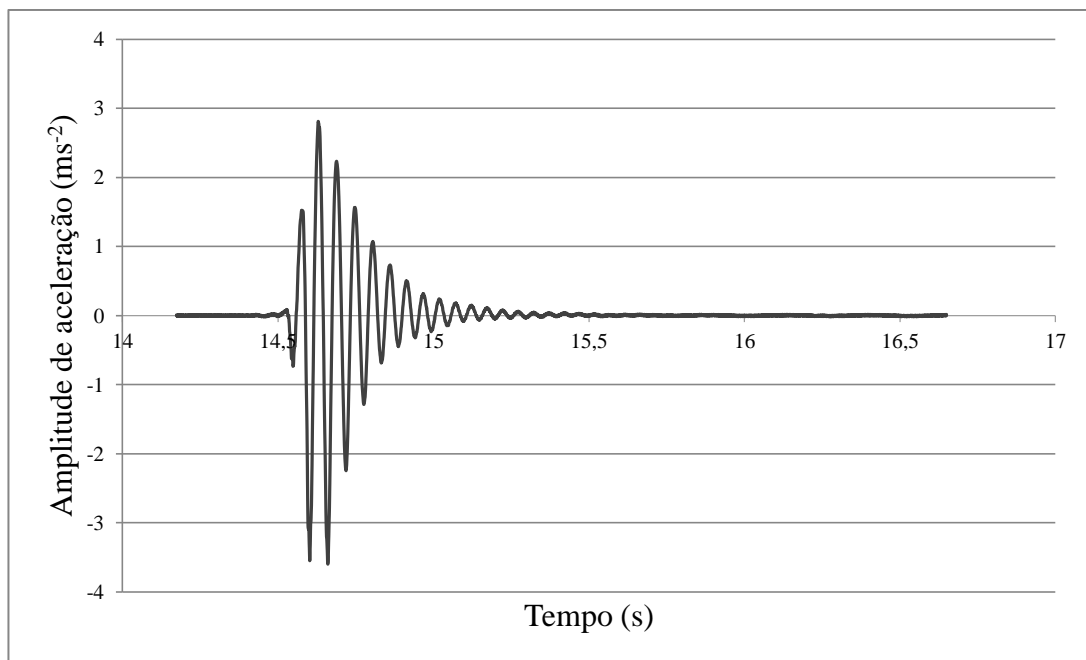


Figura 2.8: curva de decremento obtida experimentalmente para o sistema fruto-ráquila.

Tabela 2.10: razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila (FR) para os acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

Razão de amortecimento - ζ (adimensional)				
	BD 27	BD 40	BGP 29	BGP 35
FR 1	0,01	0,12	0,08	0,04
FR 2	-	0,05	0,06	0,23
FR 3	-	0,08	0,08	-
FR 4	0,02	0,11	0,09	0,06
FR 5	0,06	-	0,06	0,04
FR 6	0,05	0,10	0,02	0,05
FR 7	0,03	0,07	0,07	0,03
FR 8	0,07	-	0,02	0,06
FR 9	0,10	-	0,07	-
FR 10	0,01	0,05	0,05	0,08
Média	0,04	0,08	0,06	0,07

FR – sistema fruto-ráquila; ζ – razão de amortecimento; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Tabela 2.11: Estatística descritiva da razão de amortecimento do sistema fruto-ráquila (FR) para os acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

Razão de amortecimento – ζ (adimensional)				
	BD 27	BD 40	BGP 29	BGP 35
Média	0,04	0,08	0,06	0,07
Desvio-padrão	0,03	0,03	0,02	0,06
CV (%)	68,51	31,41	38,00	82,46

FR – sistema fruto-ráquila; ζ – razão de amortecimento; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Devido a algum erro de medição, algumas curvas de resposta ao impulso não foram satisfatórias para produzir o decremento e assim determinar as amplitudes para determinação da razão e coeficiente de amortecimento. Os coeficientes de amortecimento obtidos a partir das razões de amortecimento são apresentados na Tabela 2.12 e a estatística descritiva é apresentada na Tabela 2.13.

Tabela 2.12: coeficientes de amortecimento dos sistemas fruto-ráquila (FR) para os acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

Coefficiente de amortecimento – c (N.s/m)				
	BD 27	BD 40	BGP 29	BGP 35
FR 1	0,12	1,59	0,80	0,24
FR 2	-	0,29	0,76	3,20
FR 3	-	0,78	1,09	-
FR 4	0,33	0,81	1,29	0,62
FR 5	0,50	-	0,93	0,49
FR 6	0,32	1,09	0,41	0,58
FR 7	0,23	0,58	0,85	0,39
FR 8	0,56	-	0,27	0,71
FR 9	0,43	-	0,94	-
FR 10	0,08	0,56	0,50	1,86
Média	0,32	0,81	0,78	1,01

FR – sistema fruto-ráquila; c – coeficiente de amortecimento; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Tabela 2.13: Estatística descritiva dos coeficientes de amortecimento dos sistemas fruto-ráquila (FR) para os acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

Coefficiente de amortecimento – c (N.s/m)				
	BD 27	BD 40	BGP 29	BGP 35
Média	0,32	0,81	0,78	1,01
Desvio-padrão	0,16	0,39	0,30	0,95
CV (%)	50,18	48,09	37,95	93,77

FR – sistema fruto-ráquila; c – coeficiente de amortecimento; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

5. Discussão

As dimensões características dos frutos apresentaram maior variação entre acessos do que dentro de um mesmo acesso. O acesso BGP 29 foi o que apresentou frutos com maiores dimensões enquanto o acesso BD 27 apresentou frutos menores (Tabela 2.2). De acordo com Pimentel Gomes (1987), valores de coeficiente de variação até 10% são considerados baixos para produtos agrícolas, entre 10 e 20% médios, de 20 a 30% altos e, muito altos quando acima de 30%. Dentro do mesmo acesso, as dimensões características dos frutos apresentaram baixo coeficiente de variação, sendo o maior CV (4,19 %) encontrado para a dimensão característica 'c' do acesso BGP 35.

Em estudo com frutos de macaúba das regiões de Matozinhos e Brasília de Minas, Brandão et al. (2014) determinaram diâmetros externos longitudinal e equatorial entre 33,80 e 35,65 mm e, entre 33,75 e 36,35 mm, respectivamente. Sanjinez-argondonã & Chuba (2011) encontraram, para frutos coletados em Dourados-MS e Presidente Epitácio-SP, valores entre 33,39 e 34,68 mm e, entre 33,14 e 31,65 mm, para diâmetros externos longitudinal e equatorial, respectivamente. As diferenças dos valores encontrados pelos autores para o presente trabalho, possivelmente, é devido às diferentes origens de cada acesso.

Se considerarmos o desvio padrão, é possível estabelecer uma faixa em que as dimensões características dos frutos se sobrepõem, sendo esta de 41,10 a 45,89 mm para a maior dimensão, de 40,16 a 45,61 mm para a dimensão intermediária e, de 39,76 a 44,58 mm para a menor dimensão. Esta faixa poderia ser utilizada para caracterizar de forma geral as dimensões dos frutos.

Ao analisar a média geral das dimensões características dos frutos percebemos maior variação entre os acessos uma vez que o CV praticamente dobrou, porém, ainda pode ser considerado baixo. Há muita variação genética entre os acessos, devido à localidade geográfica de origem de cada planta. Algumas palmeiras do BAG Macaúba provenientes dos estados de Minas Gerais e São Paulo foram caracterizadas morfológicamente em estudo realizado por Plata Rueda (2014). Foi visto que existe elevada divergência dentro das progênies estudadas e, as progênies do estado de São Paulo formam um grupo genético diferente das progênies de Minas Gerais. Manfio (2010) observou que o diâmetro do fruto, entre outras características,

são importantes no estudo de diversidade genética e, identificou variabilidade genética entre matrizes de macaúba dos estados de Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Pernambuco, Maranhão e Pará.

O diâmetro médio das ráquilas também apresentou baixo CV em todos os acessos, com exceção do acesso BGP 35, que apresentou CV de 10,50% (Tabela 2.2). Também para as ráquilas é possível estabelecer uma faixa de diâmetros com base no desvio padrão que compreende todos os acessos, sendo esta faixa de 3,57 a 3,88 mm.

Ao comparar o diâmetro médio das ráquilas de forma geral, o CV encontrado foi de 12,94 % (Tabela 2.2), considerado médio (PIMENTEL GOMES, 1987). Este valor de CV indica que entre os acessos há maior variação do diâmetro da ráquila do que dentro de um mesmo acesso. A geometria dos frutos e ráquilas é um parâmetro que influencia na rigidez do sistema e, conseqüentemente, em seu comportamento dinâmico. Quando a rigidez de um sistema é aumentada, a frequência natural também aumenta.

O volume das ráquilas apresentou CV variando entre 12,11% (BGP 29) e 23,10% (BGP 35) (Tabela 2.4), sendo considerados CV médios e altos, respectivamente. A análise de forma geral apresentou CV de 22,3% (Tabela 2.5) indicando a variação existente entre acessos distintos. Porém, se considerarmos o desvio padrão de cada acesso, encontramos uma faixa de volumes em que os valores se sobrepõem. Dessa forma, mesmo com a variação existente entre acessos encontrada, podemos delimitar uma faixa de volumes de 3,40 a 3,70 cm³ a qual todos os acessos se enquadram.

O volume dos frutos apresentou menor variação, se comparado com as ráquilas, dentro do mesmo acesso, estando o CV entre 8,91% (BD 40) e 10,20% (BGP 35) (Tabela 2.6). Porém, entre acessos distintos, o volume médio dos frutos apresentou maior variação, com CV de 24,17 % (Tabela 2.7). Da mesma forma que para o volume das ráquilas, podemos delimitar uma faixa, com base no desvio padrão de cada acesso, em que o volume dos frutos de todos os acessos se enquadra, sendo esta de 3,22 a 4,91 cm³.

A massa e massa específica dos frutos apresentaram baixo CV em todos os acessos (Tabela 2.6).

A massa dos frutos quando comparadas de forma geral, apresentou CV considerado alto (23,95 %) (Tabela 2.7) indicando maior variação dos frutos entre acessos distintos. Se considerarmos o desvio padrão para a média da massa dos frutos, a faixa em que todos os acessos se enquadram vai de 29,28 a 63,31 g. Com essa faixa é possível observar a grande variação de massa que os frutos apresentam de um acesso para outro. A massa é um fator importante que pode ter influência direta no comportamento dinâmico de um sistema, sendo inversamente proporcional a frequência natural.

A massa específica dos frutos variou, na média de 1,05 a 1,15 g cm^{-3} . Comparadas de forma geral, a massa específica se manteve com baixo CV (8,35%) ainda que tenha apresentado um aumento comparado aos acessos analisados de forma individual. A faixa de massa específica dos frutos em que todos os acessos se enquadram vai de 0,96 a 1,28 g cm^{-3} . Para frutos de macaúba, Carvalho (2010) determinou a massa específica durante o processo de secagem e encontrou valores variando de 0,916 a 0,689 g cm^{-3} , com maior e menor teor de água, respectivamente. Já para outros produtos agrícolas, como o girassol, Helmich et al. (2014) determinaram a massa específica de sementes de girassol durante o processo de secagem e obtiveram valores entre 0,64 g cm^{-3} , quando mais úmidas e, 0,62 g cm^{-3} quando mais secas.

Já a massa e massa específica das ráquilas apresentaram CV maiores, considerados médios e altos (Tabela 2.4), com destaque para o acesso BGP 35, que apresentou o maior CV tanto para massa quanto para massa específica, com valores de 18,87% (médio) e 23,65% (alto), respectivamente. A massa específica das ráquilas variou, na média, de 0,47 a 0,88 g cm^{-3} e, a massa das ráquilas variou de 1,44 a 3,02 g. Novamente, quando a comparação é realizada de forma geral o CV sofre um aumento (Tabela 2.5), neste caso, a massa apresentou CV de 28,92% e a massa específica de 30,11%. Estes valores de CV são considerados alto e muito alto, respectivamente (PIMENTEL GOMES, 1987).

Podemos estabelecer uma faixa de valores de massa das ráquilas que compreende todos os acessos, com base no desvio padrão, sendo esta de 1,63 a 2,45 g e, para massa específica das ráquilas de 0,54 a 0,70 g cm^{-3} .

A variação de massa e volume entre os acessos, para frutos e ráquilas, poderá influenciar no comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila, uma vez que as

frequências naturais são dependentes da distribuição de massa e da rigidez do sistema (VILLIBOR, 2012).

As ráquias são componentes do cacho de macaúba ainda pouco estudados, mas de fundamental importância para projetos de máquinas que utilizem o princípio de vibração para colher ou destacar os frutos dos cachos. Ciro (2001) determinou as propriedades mecânicas e geométricas do sistema fruto-pedúnculo do café, variedade Colômbia, em três estádios de maturação e analisou o comportamento dinâmico do sistema. O autor verificou que o comportamento dinâmico é altamente dependente das propriedades geométricas e mecânicas. Filgueiras (2001), após determinar as propriedades geométricas e mecânicas de uma planta de café e analisar seu comportamento dinâmico, verificou, por meio de análise de sensibilidade, grande influência no diâmetro dos galhos e troncos nas frequências naturais de vibração.

Tendo em vista que, nos estudos para o café, a geometria e propriedades mecânicas do sistema fruto-pedúnculo influenciaram em seu comportamento dinâmico, foi suposto que a variação na geometria dos frutos e ráquias também influencia diretamente no comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila. Isso deve ocorrer, pois, as frequências naturais variam de acordo com a rigidez do sistema, que por sua vez é determinada através de sua geometria, e da distribuição de massa no sistema.

Com relação às propriedades mecânicas das ráquias, o módulo de elasticidade apresentou CV maior que 10% para todos os acessos, chegando a 40,33% no acesso BGP 35, considerado muito alto, tanto dentro de um mesmo acesso quanto em acessos distintos. A grande variação desta propriedade pode estar relacionada com seu comportamento viscoelástico (LAURENTI, 1997), considerado como elástico e isotrópico nos testes, bem como à forma não regular das ráquias ao longo de seu comprimento. Para grãos de soja, Ribeiro et al. (2007) encontraram valores de módulo de elasticidade, analisando diferentes eixos, entre 10,2 e 23,1 MPa para grãos úmidos. Em trabalho com *Pinus elliotii* e *Eucalyptus grandis*, Stangerlin et al. (2008) encontraram módulos de elasticidade variando, na média, de 8,74 a 17,87 MPa e, de 13,11 a 16,94 MPa quando próximo da medula e da casca, respectivamente. Já em estudo com a madeira de plantas de café, em galhos com aproximadamente 5 mm de diâmetro, foi encontrado módulo de elasticidade médio de 3,56 GPa (FILGUEIRAS et al., 2000).

Porém, se considerarmos o desvio padrão encontrado para o módulo de elasticidade, podemos estabelecer uma faixa que compreende todos os acessos. Esta faixa, que varia de 3,11 a 3,47 MPa, pode facilitar a caracterização de um sistema a fim de diminuir a faixa de variação desta propriedade para a calibração, por exemplo, de uma máquina que utilize o princípio de vibrações mecânica, pois, a rigidez do sistema influencia em seu comportamento dinâmico. Quando a rigidez de um sistema é aumentada, a frequência natural também aumenta.

O coeficiente de Poisson foi generalizado para todos os acessos, sendo utilizada a média para caracterização do mesmo. Foi determinado um coeficiente de Poisson médio igual a 0,37. Para alguns materiais biológicos, como o bambu, o café e o caule de milho, foram encontrados coeficientes de Poisson médios iguais a 0,26 (GHAVAMI & MARINHO, 2005), 0,32 para frutos maduros e 0,35 para frutos verdes (RODRIGUEZ et al., 2006) e, 0,23 (NIKLAS, 1992), respectivamente.

As razões de amortecimento médias encontradas para o sistema fruto-ráquila, foram todas abaixo de um (Tabela 2.10), o que implica em um sistema subamortecido. Num sistema subamortecido a massa oscila (na frequência natural amortecida) com amplitudes que diminuem exponencialmente até que o movimento cesse. O coeficiente de amortecimento apresentou CV considerado muito alto e, médias entre 0,32 e 1,01 Nsm^{-1} . Ao analisarmos o desvio padrão, podemos estabelecer uma faixa de valores de coeficiente de amortecimento que compreende todos os acessos. A delimitação desta faixa, de 0,48 a 1,08 Nsm^{-1} , pode contribuir na caracterização do sistema fruto-ráquila para determinação de parâmetros de projeto de uma máquina que utilize o princípio de vibrações mecânicas para desprendimento dos frutos do cacho, uma vez que, o amortecimento em um sistema reduz a amplitude de saída quando expostos a vibração (ARISTIZÁBAL et al., 2003).

Nestes sistemas, quanto maior a razão de amortecimento, menor será a amplitude de vibração livre. Quanto menor a razão de amortecimento do sistema há uma tendência da frequência natural amortecida se aproximar da frequência natural não amortecida, o que ocorre nos sistemas fruto-ráquila estudados, uma vez que a razão de amortecimento média foi menor que 0,1 em todos os acessos (RAO, 2008).

6. Conclusão

- As dimensões características entre os acessos variaram de 39,59 mm a 47,41 mm para a maior dimensão característica; de 38,80 mm a 47,11 mm para a dimensão intermediária e, de 38,42 mm a 46,07 mm para a menor dimensão característica;
- O diâmetro médio das ráquias ficou entre 3,29 mm e 4,34 mm;
- A massa das ráquias variou de 1,44 g a 3,02 g;
- O volume das ráquias variou de 3,15 cm³ a 4,30 cm³;
- A massa específica das ráquias ficou entre 0,47 gcm⁻³ e 0,88 gcm⁻³;
- A massa dos frutos variou de 32,44 g a 58,09 g;
- O volume dos frutos variou de 3,10 cm³ a 5,40 cm³;
- A massa específica dos frutos variou de 1,05 gcm⁻³ a 1,15 gcm⁻³;
- O módulo de elasticidade variou de 2,22 MPa a 3,17 MPa;
- O coeficiente de Poisson determinado foi um valor médio para todos os acessos, correspondendo a 0,37.
- Os sistemas fruto-ráquila são subamortecidos para os diferentes acessos, pois, apresentaram razão de amortecimento inferior a um.
- O coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila variou de 0,32 a 1,01 Nsm⁻¹.

7. Referências

ARISTIZÁBAL T. I. D.; OLIVEROS T. C. E.; ALVAREZ M. F. Physical and mechanical properties of the coffee tree related to harvest mechanization. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 2, p. 197-204, 2003.

BRANDÃO, A. A.; NEVES, J. M. G.; SILVA, H. P.; CONTINHO, P. H.; AQUINO, C.F.; SANTOS, P. A.; BRANDÃO, D. S. Caracterização de frutos de macaúba em diferentes estádios de maturação, provenientes de duas regiões do Estado de Minas Gerais. **Global Science and Technology**, v. 7, n. 2, p. 15-23, 2014.

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

CARVALHO, F.B. **Influência da temperatura do ar de secagem e da utilização do ácido etilenodiaminotetracético na qualidade do óleo e caracterização do fruto de macaúba**. 2010. 104p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.

CIRO, H. J. Coffee harvesting I: Determination of the natural frequencies of the fruit stem system in coffee trees. **Applied Engineering in Agriculture**, v.17, n.4, p.475-479, 2001.

DZISIAK, D. **New oils reduce saturated and trans fats in processed foods**. *Cereal Foods World*, 49:331 – 333, 2004.

ENTABAN. **Plano de negócio: Projeto Florestal de cultivo da macaúba na Zona da Mata Mineira**. 2009.39 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Notícias – Produção Vegetal**. Dezembro, 2014. Disponível em: < www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2329636/macauaba-e-materia-prima-promissora-para-biodiesel >. Acesso em: Julho de 2015.

FILGUEIRAS, W. H. **Modelagem da planta de café por elementos finitos para estudos de colheita por vibração**. 2001. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2001.

FILGUEIRAS, W. H.; QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P.; DELLA LUCIA, R. M. Propriedades mecânicas da madeira do café. In.: **Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 2000. Disponível em: < http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb_anais/simposio1/Pos1.pdf >. Acesso em janeiro de 2016.

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

HIANE, P. A.; FILHO, M. M. R.; RAMOS, M. I. L.; MACEDO, L. R. **Bocaiúva. Acrocomia Aculeata (Jacq.) Lodd. Pulp and Kernel Oils: Characterization and Fatty Acid Composition**. *Food Technology*, 8: 256 – 259, 2005.

HELMICH, J. C.; CORADI, P. C.; FERNANDES, C. H. P. Caracterização das propriedades físicas de sementes de girassol após secagem. In.: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2014. Campo Grande-MS, 2014. Disponível em: < <http://www.sbea.org.br/conbea/2014/anais/R0071-1.pdf>>. Acesso em janeiro de 2016.

LAURENTI, R. **Estudo metodológico das geometrias de corpos vegetais para ensaios mecânicos**. 1997. 245 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração: máquinas agrícolas). Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 1997.

MANFIO, C. E. **Análise genética no melhoramento da macaúba**. 2010. 52f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.

MANFIO, C.E.; MOTOIKE, S.Y.; SANTOS, C.E.M.; PIMENTEL, L.D.; QUEIROZ, V.; SATO, A.Y. Repetibilidade em características biométricas do fruto de macaúba. **Ciência Rural** (UFSM. Impresso), 41:70-76, 2011.

MARK, S and TORBEN. R.L **Piezoeleric**, 1987, Accelerometer and Vibration Preamplifier Theory and Application Handbook, Bruel and Kjaer, Denmark.

MOHSEIN, N.N. **Physical Properties of Plant and Animal Materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986, 841 p.

MOTA, C. S.; CORRÊA, T. R.; GROSSI, J. A. S.; CASTRICINI, A.; RIBEIRO, A. DA SILVA. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.32, n. 265, p. 41-51, 2011.

NIKLAS, K. J. **Plant Biomechanics: an engineering approach to plant form and function**. Chicago & London: The University of Chicago Press: 1992. 607p.

PIMENTEL GOMES, F. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária**. Piracicaba: Potafos: 1987. 3. ed., 162p.

PIMENTEL, L. D.; DIAS, L. A. S.; PAES, J. M. V.; SATO, A. Y.; MOTOIKE, S. Y. Diversidade no gênero *Acrocomia* e proposta de subdivisão da espécie *Acrocomia aculeata*. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.32, n. 265, p. 81-87, 2011.

PLATA RUEDA, ROSA ANGELICA. **Avaliação de germoplasma para melhoramento e a conservação da macaúba**. 2014. 44f (Doutorado em Fitotecnia). Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. Quarta edição. São Paulo: Pearson – Prentice Hall, 2008, 424p.

RIBEIRO, D. M; CORRÊA, P. C.; FURTADO, B. F.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal -SP, v. 27, n. 2, p. 493-500, 2007.

RODRIGUEZ, A. M.; QUEIROZ, D. M.; ESPINOSA, B. G.; ZANDONADI, R. Determinación de propiedades físico-mecánicas de los frutos de café (*Coffea*

arábica variedade Catuai) relacionadas com la cosecha mecanizada. **Revista Ciências Agropecuárias**, v. 15, n. 3, p. 22-27, 2006.

SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; CHUBA, C. A. M. Caracterização biométrica, física e química de frutos da palmeira bocaiuva *Acrocomia aculeata* (Jacq) Lodd. **Revista Brasileira Fruticultura**, Jaboticabal - SP, v.33, n.3, p. 1023-1028, 2011.

STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; SANTINI, E. J.; DOMINGUES, J. M. X.; GATTO, D. A.; MELO, R. R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não-destrutivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife-PE, v. 3, n. 2, p. 145-150, 2008.

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

VILLIBOR, G. P. **Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de derriça de café**. 2012. 160f, Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração: Mecanização Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.

CAPÍTULO 3 – PROPRIEDADES MODAIS DO SISTEMA FRUTO-RÁQUILA DA MACAÚBA

1. Introdução

Nos últimos anos, o mundo tem experimentado uma significativa e crescente demanda por óleos vegetais, alavancado principalmente pelo aumento de consumo para fins alimentares e pelo surgimento de novas aplicações industriais, destacando-se a transformação em biodiesel (ROSILLO-CALLE et al., 2009). Um dos principais desafios do setor agroenergético brasileiro atualmente se refere à geração de conhecimento e tecnologia que contribuam para a produção sustentável de matéria-prima visando à produção de biocombustível (LORENZI et al., 2011).

A macaúba é uma cultura promissora como matéria-prima para produção de biodiesel, porém é ainda explorada de forma extrativista. Para tornar a macaúba comercialmente rentável aos produtores agrícolas e proporcionar uma exploração intensiva dessa cultura, faz-se necessário a inserção de novas tecnologias em seu processo produtivo. A colheita é uma etapa deste processo ainda pouco desenvolvida, realizada de forma manual. A inserção de novas tecnologias na colheita e processamento dos frutos se faz imprescindível neste caso, uma vez que, a qualidade do óleo pode ser afetada se o fruto não for colhido e processado na época e de maneira correta. Goulart (2014) observou que o índice de acidez e a estabilidade oxidativa do óleo de macaúba são afetados pela idade e pelo período de armazenamento dos frutos.

A distribuição espacial da macaúba em diversas regiões do Brasil proporciona características exclusivas a cada acesso da planta, devido à variabilidade edafoclimática. Sabe-se que populações nativas são heterogêneas e apresentam problemas como a sazonalidade (MOTTA, 2002). O dimensionamento das máquinas de colheita e processamento deve levar em consideração esta heterogeneidade nas características dos diferentes acessos dessa palmeira.

Devido à dificuldade de acesso aos cachos para uma colheita manual, os frutos são colhidos utilizando-se foice para o aparo dos cachos, por meio do uso de redes envolvendo os cachos para interceptação dos frutos durante a queda, ou através de colheita manual no chão. Para o destacamento destes frutos das ráquilas na usina

de processamento ou mesmo para o desenvolvimento de uma máquina de colheita, a vibração mecânica pode ser uma opção. Neste caso, a determinação das propriedades modais, frequências naturais e modos de vibração do sistema fruto-ráquila é o conhecimento básico necessário para o desenvolvimento deste tipo de equipamento, semelhante ao realizado, por exemplo, para os frutos de café (SANTOS et al., 2010a; SANTOS et al., 2010b).

Dentre as principais características dinâmicas do sistema fruto-ráquila, a frequência a que este é submetido tem influência sobre a eficiência do processo de destacamento dos frutos do cacho por vibração mecânica. Quando um corpo é excitado em uma de suas frequências naturais, ocorrem grandes deslocamentos, fenômeno conhecido como ressonância. Quando isso ocorre, os níveis de tensões no corpo também aumentam, possibilitando o destacamento dos frutos. Existe um modo de vibração associado a cada frequência natural. Os modos de vibração referem-se às configurações geométricas de deslocamento do sistema, assim, conhecendo os modos de vibração é possível selecionar a frequência de excitação que proporcionará maior eficiência no destacamento dos frutos (SANTOS et al., 2015).

O conhecimento das frequências naturais e seus modos de vibração são fundamentais para o sucesso do processo de destacamento dos frutos, porém, vários fatores podem influenciar nesse processo. A macaúba apresenta grande variedade entre plantas com origens distintas (acessos), o que gera frutos de tamanhos diferentes e maturação desuniforme. Para auxiliar no desenvolvimento de máquinas com a finalidade de desprendimento do fruto da ráquila, é possível desenvolver um modelo matemático do sistema (fruto-ráquila) visando conhecer seu comportamento dinâmico quando submetido a vibrações mecânicas.

Geralmente, a modelagem é representada por um sistema de equações diferenciais e são gerados modelos tridimensionais para determinar e simular o comportamento dinâmico do sistema de onde são obtidas suas propriedades modais. A modelagem matemática torna viável a solução de problemas em que a solução analítica se tornaria tediosa ou, até mesmo, impossível de ser realizada devido a complexidade e ao grande volume de informações.

Dessa forma, técnica numérica de elementos finitos é uma ferramenta bastante utilizada no auxílio à modelagem matemática de sistemas físicos, possibilitando rápidas análises e simulações de sistemas com elevado grau de

confiabilidade. No caso do café, a simulação matemática por meio do método de elementos finitos é aplicada para obter informações quanto aos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo (SANTOS et al., 2015). O método de elementos finitos pode ser utilizado para solucionar problemas de diversas áreas por meio da divisão, em elementos específicos, do corpo estudado gerando uma malha e um conjunto de equações que descrevem o comportamento das variáveis envolvidas (SILVA, 2013).

2. Objetivos

- Determinar a frequência fundamental dos sistemas fruto-ráquila e os respectivos modos de vibração por meio de modelagem e simulação;
- Determinar a frequência fundamental dos sistemas fruto-ráquila experimentalmente;
- Validar o modelo utilizado na simulação;
- Realizar análise de sensibilidade do modelo matemático utilizado na simulação.

3. Material e métodos

Os cachos utilizados para determinação das propriedades modais do sistema fruto-ráquila foram coletados no Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da UFV, e em sua bordadura. As determinações das propriedades dos frutos e ráquulas da macaúba foram realizadas para cachos com frutos verdes. Foram cortados dois cachos de cada palmeira na data de 30/09/2015. As medições foram realizadas dentro de 24 h após a coleta no laboratório de mecanização agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

O BAG macaúba possui mais de 700 plantas, provenientes de seis estados brasileiros, com mais de 100 procedências (MANFIO et al., 2011). No total foram utilizados quatro acessos distintos, sendo esses identificados por BD 27 (palmeira provinda da região de Abaeté/ MG), BD 40 (palmeira provinda da região de Pitangui – Martinho Campos/ MG), BGP 29 (palmeira provinda da região de Prudente de Moraes – Matozinhos/ MG) e BGP 35 (palmeira provinda da região de Mirandópolis/ SP). A designação BD é para as plantas de bordadura e BGP para as plantas do BAG.

Propriedades modais

Para determinação da frequência fundamental e modos de vibração, as propriedades mecânicas, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, determinadas no Capítulo 2 foram utilizadas como parâmetro de entrada para a modelagem e simulação computacional do sistema fruto-ráquila. As propriedades físicas e geométricas do sistema fruto-ráquila utilizadas nesta etapa foram determinadas, para cada componente do sistema, após o término do teste experimental de varredura (Tabelas 3.1 a 3.4). A estatística descritiva para estas propriedades é apresentada nas Tabelas 3.5 a 3.7.

Tabela 3.1: Propriedades físicas e geométricas das ráquilas e frutos utilizados no teste de varredura para o acesso BD 27

Propriedades					Propriedades						
RÁQUILAS	m_r (g)	d (mm)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)	FRUTOS	m_f (g)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	V_f (cm ³)	ρ_f (gcm ⁻³)
R1	2,04	3,26	4,5	0,45	F1	30,03	37,70	37,26	36,22	2,66	1,13
R2	2,29	3,79	4,0	0,57	F2	31,75	38,30	38,15	37,02	2,83	1,12
R3	2,19	3,55	4,5	0,49	F3	31,47	38,30	37,98	36,50	2,78	1,13
R4	1,92	3,85	3,5	0,55	F4	34,20	39,06	38,94	38,16	3,04	1,12
R5	2,21	3,46	3,5	0,63	F5	39,30	41,69	41,34	38,82	3,50	1,12
R6	2,25	3,59	3,0	0,75	F6	29,69	37,90	37,33	34,89	2,58	1,15
R7	1,94	3,59	4,0	0,49	F7	34,70	39,64	39,36	38,10	3,11	1,12
R8	1,69	3,24	4,0	0,42	F8	30,25	38,35	38,10	35,30	2,70	1,12
R9	2,22	4,00	4,0	0,56	F9	28,70	37,03	36,55	36,27	2,57	1,17
R10	1,87	3,73	3,5	0,53	F10	34,84	39,52	39,20	38,14	3,09	1,16

m_r – massa da ráquila; d – diâmetro médio da ráquila; V_r – volume da ráquila; ρ_r – massa específica da ráquila; R – ráquila; m_f – massa do fruto; a – maior dimensão característica do fruto; b – dimensão intermediária do fruto; c – menor dimensão característica do fruto; F – fruto; V_f – volume do fruto; ρ_f – massa específica do fruto.

Tabela 3.2: Propriedades físicas e geométricas das ráquilas e frutos utilizados no teste de varredura para o acesso BD 40

Propriedades					Propriedades						
RÁQUILAS	m_r (g)	d (mm)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)	FRUTOS	m_f (g)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	V_f (cm ³)	ρ_f (gcm ⁻³)
R1	1,96	3,77	4,00	0,49	F1	38,54	41,51	40,19	37,74	3,30	1,17
R2	1,40	3,59	3,50	0,40	F2	38,19	42,15	41,74	34,87	3,21	1,19
R3	1,60	3,32	4,00	0,40	F3	46,47	44,05	43,94	38,56	3,91	1,19
R4	1,57	3,57	4,00	0,39	F4	45,42	44,19	43,75	39,69	4,02	1,13
R5	1,43	3,64	3,50	0,41	F5	47,97	45,18	44,50	40,02	4,21	1,14
R6	1,33	3,15	3,50	0,38	F6	44,19	44,22	42,91	38,70	3,84	1,15
R7	1,56	3,63	4,50	0,35	F7	44,83	43,81	43,31	39,32	3,91	1,15
R8	1,59	3,89	4,00	0,40	F8	31,13	38,82	38,16	33,49	2,60	1,20
R9	1,54	3,68	4,50	0,34	F9	52,02	46,75	45,72	39,61	4,43	1,17
R10	2,13	3,93	4,00	0,53	F10	44,00	43,32	42,88	37,49	3,65	1,21

m_r – massa da ráquila; d – diâmetro médio da ráquila; V_r – volume da ráquila; ρ_r – massa específica da ráquila; R – ráquila; m_f – massa do fruto; a – maior dimensão característica do fruto; b – dimensão intermediária do fruto; c – menor dimensão característica do fruto; F – fruto; V_f – volume do fruto; ρ_f – massa específica do fruto.

Tabela 3.3: Propriedades físicas e geométricas das ráquilas e frutos utilizados no teste de varredura para o acesso BGP 29

Propriedades					Propriedades						
RÁQUILAS	m_r (g)	d (mm)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)	FRUTOS	m_f (g)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	V_f (cm ³)	ρ_f (gcm ⁻³)
R1	2,32	4,14	4,50	0,52	F1	48,29	44,68	44,49	44,47	4,63	1,04
R2	2,25	3,90	4,50	0,50	F2	49,71	45,16	44,98	44,61	4,74	1,05
R3	2,53	4,15	4,00	0,63	F3	47,91	44,60	44,15	44,13	4,55	1,05
R4	1,77	3,80	4,00	0,44	F4	46,52	44,26	44,23	42,99	4,41	1,06
R5	2,18	4,31	4,00	0,55	F5	58,14	47,30	47,23	47,21	5,52	1,05
R6	3,20	4,57	5,00	0,64	F6	51,48	45,64	45,44	43,98	4,78	1,08
R7	1,99	4,05	3,50	0,57	F7	45,39	43,80	43,68	43,09	4,32	1,05
R8	2,26	4,07	4,00	0,57	F8	44,29	43,60	43,42	41,94	4,16	1,07
R9	2,23	3,92	3,50	0,64	F9	55,32	46,75	46,65	46,57	5,32	1,04
R10	2,09	3,74	4,00	0,52	F10	41,99	42,40	42,17	41,33	3,87	1,09

m_r – massa da ráquila; d – diâmetro médio da ráquila; V_r – volume da ráquila; ρ_r – massa específica da ráquila; R – ráquila; m_f – massa do fruto; a – maior dimensão característica do fruto; b – dimensão intermediária do fruto; c – menor dimensão característica do fruto; F – fruto; V_f – volume do fruto; ρ_f – massa específica do fruto.

Tabela 3.4: Propriedades físicas e geométricas das ráquilas e frutos utilizados no teste de varredura para o acesso BGP 35

Propriedades					Propriedades						
RÁQUILAS	m_r (g)	d (mm)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)	FRUTOS	m_f (g)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	V_f cm ³	ρ_f (gcm ⁻³)
R1	3,59	4,57	6,00	0,60	F1	22,00	42,27	42,10	41,39	3,86	0,57
R2	4,45	5,02	6,00	0,74	F2	39,30	41,74	41,71	40,96	3,73	1,05
R3	3,90	5,41	5,00	0,78	F3	37,86	41,11	40,98	39,41	3,48	1,09
R4	3,30	4,51	6,00	0,55	F4	36,81	41,17	40,95	39,99	3,53	1,04
R5	3,56	4,03	5,00	0,71	F5	40,42	42,34	42,29	40,82	3,83	1,06
R6	3,09	4,21	5,00	0,62	F6	36,10	40,02	39,96	38,34	3,21	1,13
R7	2,41	4,10	3,50	0,69	F7	40,14	41,71	41,31	39,87	3,60	1,12
R8	4,11	4,79	6,00	0,69	F8	40,97	42,16	41,90	40,05	3,70	1,11
R9	4,86	5,56	6,50	0,75	F9	42,31	42,68	42,39	39,67	3,76	1,13
R10	3,12	4,70	5,00	0,62	F10	34,97	40,06	39,83	38,22	3,19	1,10

m_r – massa da ráquila; d – diâmetro médio da ráquila; V_r – volume da ráquila; ρ_r – massa específica da ráquila; R – ráquila; m_f – massa do fruto; a – maior dimensão característica do fruto; b – dimensão intermediária do fruto; c – menor dimensão característica do fruto; F – fruto; V_f – volume do fruto; ρ_f – massa específica do fruto.

Tabela 3.5: Estatística descritiva das dimensões características dos frutos e ráquias dos acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

BD 27				
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d(mm)
Média	38,75	38,42	36,94	3,61
Desvio padrão	1,24	1,29	1,26	0,23
CV (%)	3,21	3,36	3,41	6,46
BD 40				
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d(mm)
Média	43,40	42,71	37,95	3,62
Desvio padrão	2,06	2,08	2,06	0,23
CV (%)	4,74	4,87	5,43	6,24
BGP 29				
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d(mm)
Média	44,82	44,64	44,03	4,07
Desvio padrão	1,39	1,43	1,75	0,24
CV (%)	3,11	3,20	3,98	5,78
BGP 35				
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d(mm)
Média	41,53	41,34	39,87	4,69
Desvio padrão	0,88	0,87	0,99	0,50
CV (%)	2,12	2,09	2,48	10,57

a-maior dimensão do fruto; b- dimensão intermediária do fruto; c- menor dimensão do fruto; d- diâmetro médio das ráquias; CV-coeficiente de variação; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Tabela 3.6: Estatística descritiva da massa, volume e massa específica das ráquilas dos acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

BD 27			
	m_r (g)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)
Média	2,06	3,85	0,54
Desvio padrão	0,19	0,45	0,09
CV (%)	9,22	11,69	16,55
BD 40			
	m_r (g)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)
Média	1,61	3,95	0,41
Desvio padrão	0,24	0,35	0,06
CV (%)	14,65	8,86	13,59
BGP 29			
	m_r (g)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)
Média	2,28	4,10	0,56
Desvio padrão	0,36	0,44	0,06
CV (%)	15,83	10,63	11,21
BGP 35			
	m_r (g)	V_r (cm ³)	ρ_r (gcm ⁻³)
Média	3,64	5,40	0,68
Desvio padrão	0,68	0,83	0,07
CV (%)	18,72	15,38	10,46

m_r – massa média das ráquilas; V_r – volume médio das ráquilas; ρ_r – massa específica média das ráquilas; CV-coeficiente de variação; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Tabela 3.7: Estatística descritiva da massa, volume e massa específica dos frutos dos acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

BD 27			
	m_f (g)	V_f (cm³)	ρ_f (gcm⁻³)
Média	32,49	2,89	1,13
Desvio padrão	3,08	0,28	0,02
CV (%)	9,46	9,71	1,35
BD 40			
	m_f (g)	V_f(cm³)	ρ_f (gcm⁻³)
Média	43,28	3,71	1,17
Desvio padrão	5,59	0,51	0,03
CV (%)	12,93	13,79	2,15
BGP 29			
	m_f (g)	V_f (cm³)	ρ_f (gcm⁻³)
Média	48,90	4,63	1,06
Desvio padrão	4,71	0,47	0,01
CV (%)	9,64	10,25	1,31
BGP 35			
	m_f (g)	V_f (cm³)	ρ_f (gcm⁻³)
Média	37,09	3,59	1,04
Desvio padrão	5,49	0,23	0,16
CV (%)	14,80	6,30	15,28

m_f – massa média dos frutos; V_f – volume médio dos frutos; ρ_f – massa específica média dos frutos; CV – coeficiente de variação; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP

Os módulos de elasticidade utilizados para simulação são apresentados na Tabela 3.5. O coeficiente de Poisson médio utilizado foi 0,37.

Tabela 3.8: Módulo de elasticidade das ráquilas (R) para os acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35 com frutos verdes utilizados na simulação

Módulo de Elasticidade (MPa)				
RÁQUILAS	BD 27	BD 40	BGP 29	BGP 35
R1	2,15	3,35	2,34	3,73
R2	2,89	4,71	3,29	1,56
R3	2,59	1,36	3,94	2,12
R4	3,24	4,59	4,57	1,62
R5	3,10	2,85	4,39	1,38
R6	3,64	2,22	2,36	1,48
R7	3,40	2,62	3,48	3,09
R8	3,64	3,13	2,25	1,52
R9	2,72	2,26	2,72	1,93
R10	2,15	3,15	2,34	3,73
Média	2,95	3,02	3,17	2,22

R –ráquila; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Os valores obtidos para módulo de elasticidade foram submetidos à análise de estatística descritiva (Tabela 3.9).

Tabela 3.9: Estatística descritiva do módulo de elasticidade dos acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35

E (MPa)				
	BD 27	BD 40	BGP 29	BGP 35
Média	2,95	3,02	3,17	2,22
Desvio padrão	0,52	0,98	0,85	0,89
CV (%)	17,73	32,42	26,88	40,33

E – Módulo de Elasticidade; CV – coeficiente de variação; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

A frequência fundamental dos sistemas fruto-ráquila (autovalores), bem como os respectivos modos de vibração (autovetores), foi obtida a partir da formulação e solução dos problemas de autovalor e autovetor. Para a modelagem, foram considerados sistemas com múltiplos graus de liberdade, representado por um sistema de equações diferenciais, que pode ser expresso na forma matricial (Equação 3.1).

$$[M]\{\ddot{v}\} + [K]\{v\} = \{0\} \quad (3.1)$$

em que,

$[M]$ = matriz de massa, kg;

$\{\ddot{v}\}$ = vetor aceleração, ms^{-2} ;

$[K]$ = matriz de rigidez, Nm^{-1} ;

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

A determinação dos autovalores foi realizada considerando que as vibrações livres são harmônicas (Equação 3.2).

$$\{v\} = \{\varphi_i\}\cos(\omega_i t) \quad (3.2)$$

em que,

$\{\varphi_i\}$ = representa o modo de vibração associado a i -ésima frequência natural do sistema;

ω_i = frequência angular, rads^{-1} ;

t = tempo, s.

Derivando a Equação (3.2) em relação ao tempo e substituindo em (3.1), obtém-se a Equação (3.3), a qual possibilita a determinação das frequências naturais (autovalores) e modos de vibração (autovetores).

$$(-\omega^2[M] + [K])\{\varphi_i\} = \{0\} \quad (3.3)$$

Desta forma, igualando-se o determinante da matriz $(-\omega^2[M] + [K])$ à zero, obtemos as frequências naturais do sistema (ZIENKIEWICZ et al., 2005).

A análise do comportamento dinâmico foi realizada utilizando o método de elementos finitos determinístico. As etapas de discretização da geometria, modelagem do problema, solução e visualização dos resultados foram realizadas no software Ansys versão para Linux.

A partir das propriedades geométricas do sistema fruto-ráquila foram elaborados modelos tridimensionais no programa Autodesk Inventor 2015 (licença estudantil fornecida pela distribuidora do software). O modelo foi composto por uma ráquila considerada engastada em uma das extremidades, com comprimento padronizado para cada acesso, sendo 13 cm de comprimento para os acessos BD 27 e BGP 35 e, 11 cm de comprimento para os acessos BD40 e BGP 29, e um fruto preso a cada uma delas. Foi considerado um cenário para a simulação quanto à disposição do fruto, em que, o fruto estava preso à ráquila para os acessos BD 27 e BGP 35 a 9,75 cm do engaste e, para os acessos BD 40 e BGP 29 a 8,25 cm do engaste (Figura 3.1). No modelo geométrico foi utilizado um tronco de cone para fixar o fruto à ráquila com circunferência maior de 5 mm de diâmetro (fixada ao fruto), altura de 2,5 mm e circunferência menor com diâmetro de 2 mm (fixada á ráquila).

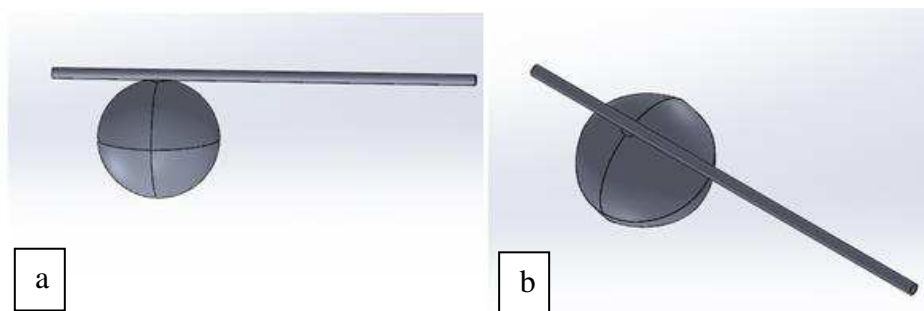


Figura 3.1: Modelo geométrico utilizado para simulação do sistema fruto-ráquila. Vista lateral (3.1a) e vista superior (3.1b)

Na etapa de discretização da geometria, foi realizado teste de convergência a fim de avaliar o tipo de malha e o tamanho médio dos elementos mais adequados. Foram escolhidos elementos tetraédricos de 10 nós, com tamanho médio dos elementos de 0,001m (Figura 3.2).

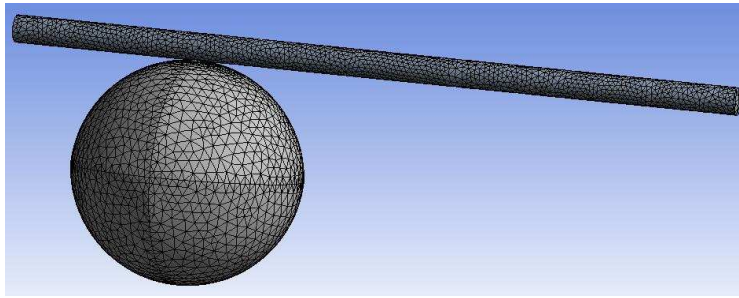


Figura 3.2: Modelo geométrico discretizado com elementos tetraédricos de 10 nós.

Na etapa de modelagem, foram utilizadas as informações referentes às propriedades mecânicas, físicas e geométricas, bem como foram definidas as condições de contorno e os parâmetros de solução. O sistema fruto-ráquila foi considerado engastado na extremidade oposta ao fruto na simulação. Na etapa de solução do modelo, foi utilizado o algoritmo Block Lanczos para determinação dos autovalores e autovetores. O algoritmo de Block Lanczos é uma variação clássica do algoritmo de Lanczos, em que as recursões do modelo são desenvolvidas utilizando um bloco de vetores ao invés de um vetor simples. Para extrair o número de autovalores requisitados, este método emprega uma estratégia automatizada de troca combinada com a checagem de sequência de Sturm (ANSYS, INC., 1996).

A frequência fundamental do sistema foi obtida experimentalmente. Foi realizado um teste de varredura com dez amostras do sistema fruto-ráquila para cada acesso. Para promover a excitação do sistema fruto-ráquila, foi empregado um sistema de instrumentação da LDS (*Ling Dynamic Systems*), composto por um gerador de sinais COMET_{USB} da marca Dactron, um amplificador PA 1000L e um vibrador eletromagnético modelo V-555 fabricados pela LDS (Figura 3.3).



Figura 3.3: instrumentação da LDS (Ling Dynamic Systems), composto por um gerador de sinais COMETUSB da marca Dactron, um amplificador PA 1000L e um vibrador eletromagnético modelo V-555.

O teste de varredura consistiu em aumentar progressivamente a frequência de 10 a 40 Hz com amplitude de deslocamento da base móvel de 0,5 mm pico a pico. O sistema foi excitado com uma aceleração de 15 vezes a aceleração da gravidade (g_r), com taxa de amostragem de 500 Hz. A frequência era aumentada progressivamente a 1,5 Oitavas/min. O sistema fruto-ráquila foi engastado a um suporte fixado à base móvel do vibrador de forma que o sistema engastado ficou com 13 cm de comprimento para os acessos BD 27 e BGP 35, e 11 cm de comprimento para os acessos BD 40 e BGP 29. Foi utilizado um cenário em que o fruto estava preso à ráquila entre a porção intermediária e a extremidade oposta ao engaste.

Para aquisição dos dados, foram utilizados um acelerômetro piezelétrico LW174002 com sensibilidade de $100,7 \text{ mVg}_r^{-1}$ e um módulo de aquisição NI cDAQ-9234 da National Instruments. A massa do acelerômetro não deve ser superior a um décimo da massa total do sistema, nesse caso, o acelerômetro utilizado apresenta baixa massa e alta sensibilidade, não modificando significativamente a dinâmica do sistema fruto-ráquila (MARK & TORBEN, 1987). O acelerômetro foi fixado ao fruto verticalmente no momento do teste para medir a aceleração do sistema na direção vertical.

Após a aquisição dos dados, foi realizado processamento a fim de transformar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência utilizando Transformada de Fourier. O espectro de frequências gerado apresentou ruídos e, para eliminar o sinal indesejado, foi utilizado um filtro de frequências. Após a transformação, foi possível observar, em cada teste, um pico na amplitude do sinal em determinada frequência correspondente. A essa frequência denominamos frequência de ressonância, em que a frequência de excitação do sistema se iguala a uma de suas frequências naturais.

Em posse dos resultados da simulação do sistema fruto-ráquila e dos dados obtidos experimentalmente, foi realizada a validação do modelo. A validação do modelo matemático foi representada por meio de gráficos onde foram plotados os valores simulados *versus* os valores obtidos experimentalmente para frequência fundamental. Nos gráficos foram traçadas retas com coeficiente angular igual a um e coeficiente linear igual a zero, ou seja, as retas representam os valores desejados para a resposta do modelo.

Para avaliar os modelos, foi utilizado o desvio relativo percentual, dado pela Equação (3.4).

$$DR (\%) = \frac{\hat{y}-y}{y} 100 \quad (3.4)$$

em que,

DR= desvio relativo percentual;

y = valores observados;

\hat{y} = valores estimados;

n = número de amostras.

Foi realizada análise de estatística descritiva das frequências fundamentais obtidas experimentalmente e dos valores simulados com auxílio do software computacional Assistat.

A fim de identificar quais parâmetros tiveram maior influência na determinação da frequência fundamental de cada sistema fruto-ráquila, foi realizada análise de sensibilidade para os três parâmetros utilizados como entrada. A análise foi realizada variando cada parâmetro, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e massa específica, em $\pm 20\%$. Foram determinadas as frequências fundamentais para cada condição simulada na análise de sensibilidade.

Os resultados foram submetidos ao teste t a 5% de significância para verificar se a variação ocorrida na resposta da frequência fundamental foi significativa. A diferença média entre os valores originalmente simulados e os gerados a partir da análise de sensibilidade foi calculada para identificar qual o parâmetro teve mais influência na estimativa da frequência fundamental.

4. Resultados

Os resultados apresentados na Tabela 3.10 são referentes à frequência fundamental de cada sistema fruto-ráquila, de cada acesso, determinadas experimentalmente pelo teste de varredura e os valores simulados matematicamente, bem como os respectivos desvios relativos percentuais. O espectro de frequência gerado nos testes é ilustrado na Figura 3.4

Os sistemas fruto-ráquila FR2 do acesso BD27 e FR6 e FR9 do acesso BGP 35 foram eliminados, pois, apresentaram frequência acima do limite máximo pré-definido de 40 Hz, caracterizando algum erro na condução do teste.

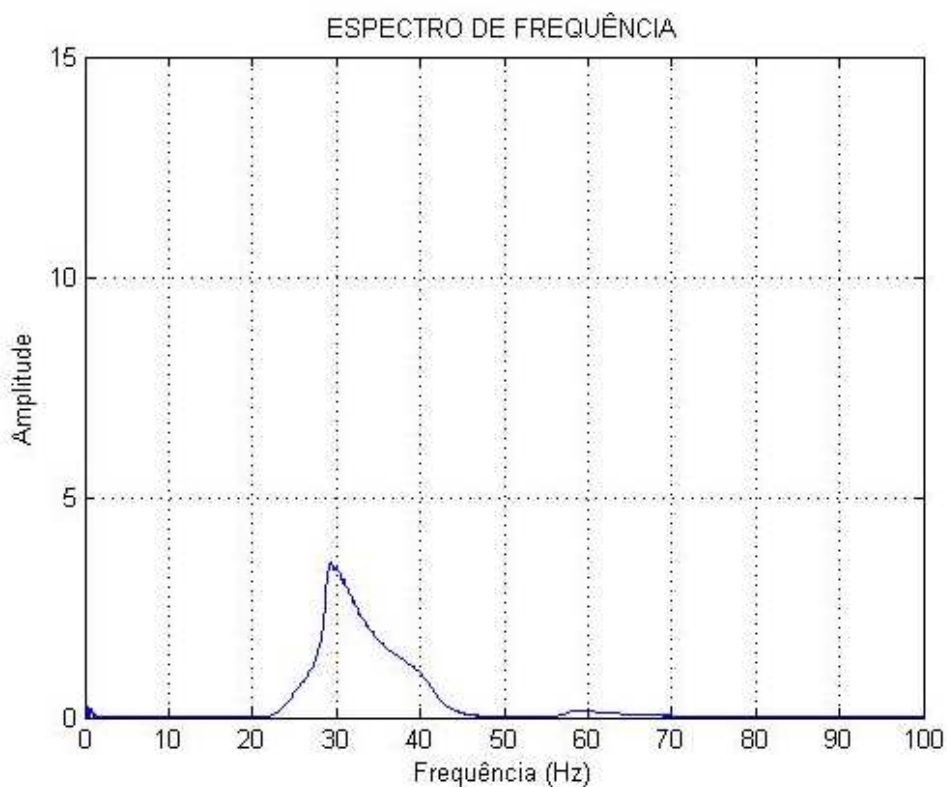


Figura 3.4: espectro de frequência para um sistema fruto-ráquila.

Tabela 3.10: Frequência fundamental determinada experimentalmente e valores simulados para cada sistema fruto-ráquila para os acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35 e, valores do desvio relativo percentual (DR)

	BD 27			BD 40			BGP 29			BGP 35		
	F.E. (Hz)	F.S.(Hz)	DR (%)	F.E. (Hz)	F.S. (Hz)	DR (%)	F.E.(Hz)	F.S. (Hz)	DR (%)	F.E. (Hz)	F.S. (Hz)	DR (%)
FR 1	32,39	19,31	-40,39	38,99	34,60	-11,27	28,12	30,41	8,16	28,59	27,76	-2,91
FR 2	-	-	-	17,77	44,02	147,70	29,57	34,58	16,96	39,43	16,93	-57,06
FR 3	39,87	21,71	-45,54	26,35	22,55	-14,43	32,89	35,35	7,49	39,42	20,32	-48,46
FR 4	37,96	23,94	-36,94	17,89	43,89	145,31	27,12	42,64	57,22	30,96	18,75	-39,43
FR 5	27,09	20,46	-24,47	25,64	34,37	34,05	31,66	40,90	29,19	34,91	14,16	-59,44
FR 6	27,01	20,97	-22,37	28,72	28,54	-0,64	38,01	23,83	-24,14	-	-	-
FR 7	29,05	25,00	-13,94	22,99	35,70	55,29	27,28	33,80	23,88	33,2	21,79	-34,38
FR 8	31,77	26,12	-17,79	29,96	38,13	27,27	31,02	27,36	-11,81	24,4	16,78	-31,23
FR 9	18,02	22,32	23,83	26,02	33,49	28,71	28,74	27,97	-2,68	-	-	-
FR10	31,44	19,35	-38,46	27,74	33,13	19,41	25,2	27,85	10,53	36,68	27,17	-25,92
Média	30,51	22,13	-24,01	26,21	34,84	43,14	29,96	32,97	11,48	33,45	20,46	-37,35

FR – sistema fruto-ráquila; F.E. - frequência natural obtida experimentalmente; F.S. - frequência natural obtida por simulação matemática; DR – desvio relativo percentual; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

O modo de vibração associado à frequência fundamental de cada sistema fruto-ráquila, obtido com a simulação, foi o modo pendular, conforme ilustrado na Figura 3.5.

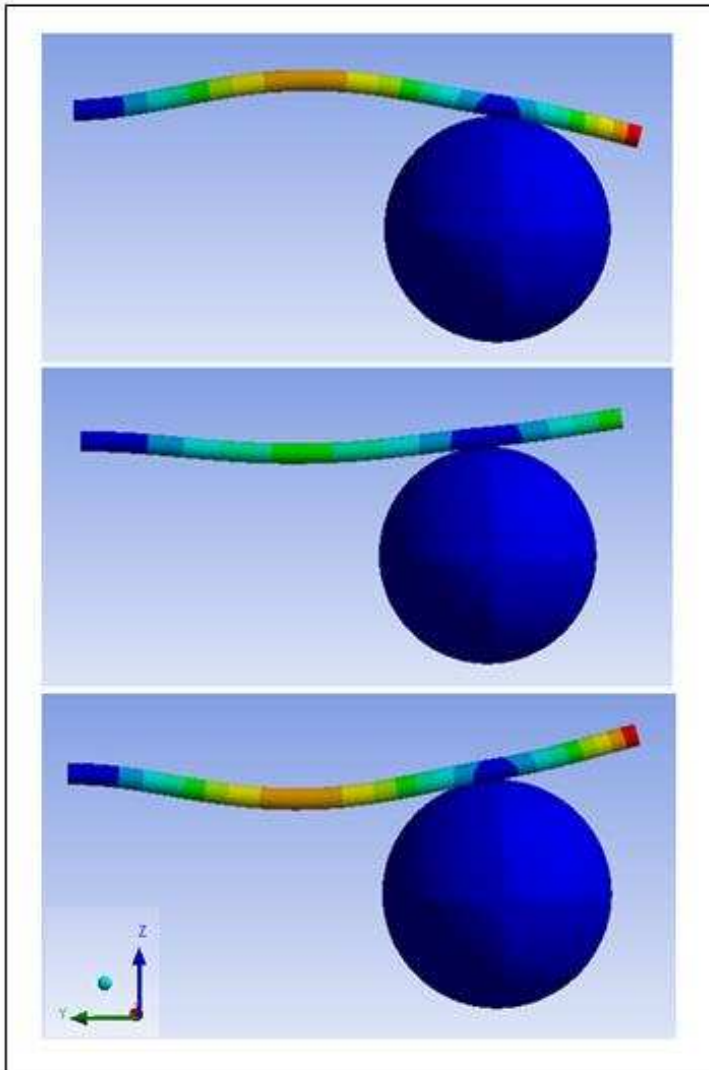


Figura 3.5: Modo de vibração pendular.

Na Tabela de 3.11 são apresentadas a estatística descritiva dos valores de frequência fundamental obtidos experimentalmente e simulados para cada acesso e, na Tabela 3.12 a estatística descritiva considerando a média geral de todos os acessos.

Tabela 3.11: Estatística descritiva da frequência fundamental obtida experimentalmente e valores simulados para os acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35, e o desvio relativo percentual médio (DRm)

Acessos	Frequência fundamental	Média	Desvio padrão	CV (%)	DR_m (%)
BD 27	Experimental (Hz)	30,51	6,07	19,09	- 24,01
	Simulada (Hz)	22,13	2,30	10,38	
BD 40	Experimental (Hz)	26,21	5,81	22,16	43,14
	Simulada (Hz)	34,84	6,11	17,54	
BGP 29	Experimental (Hz)	29,96	3,47	11,58	11,48
	Simulada (Hz)	32,97	5,21	15,81	
BGP 35	Experimental (Hz)	33,45	4,95	14,79	- 37,35
	Simulada (Hz)	20,46	4,59	22,45	

CV – coeficiente de variação; DRm – desvio relativo percentual médio; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 - acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Tabela 3.12: Estatística descritiva das frequências fundamentais obtidas experimentalmente e valores simulados considerando a média unificada dos acessos BD 27, BD 40, BGP 29 e BGP 35 e o desvio relativo percentual médio (DR_m)

Frequência fundamental – todos os acessos		
	Experimental (Hz)	Simulada (Hz)
Média	29,37	28,13
Desvio padrão	4,51	6,61
CV (%)	15,34	23,49
DR_m (%)	8,46	

CV – coeficiente de variação; DR – desvio relativo percentual médio; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Na Figura 3.6 está representada em forma gráfica a validação do modelo para prever a frequência fundamental dos acessos estudados, comparando-se valores observados experimentalmente e valores simulados.

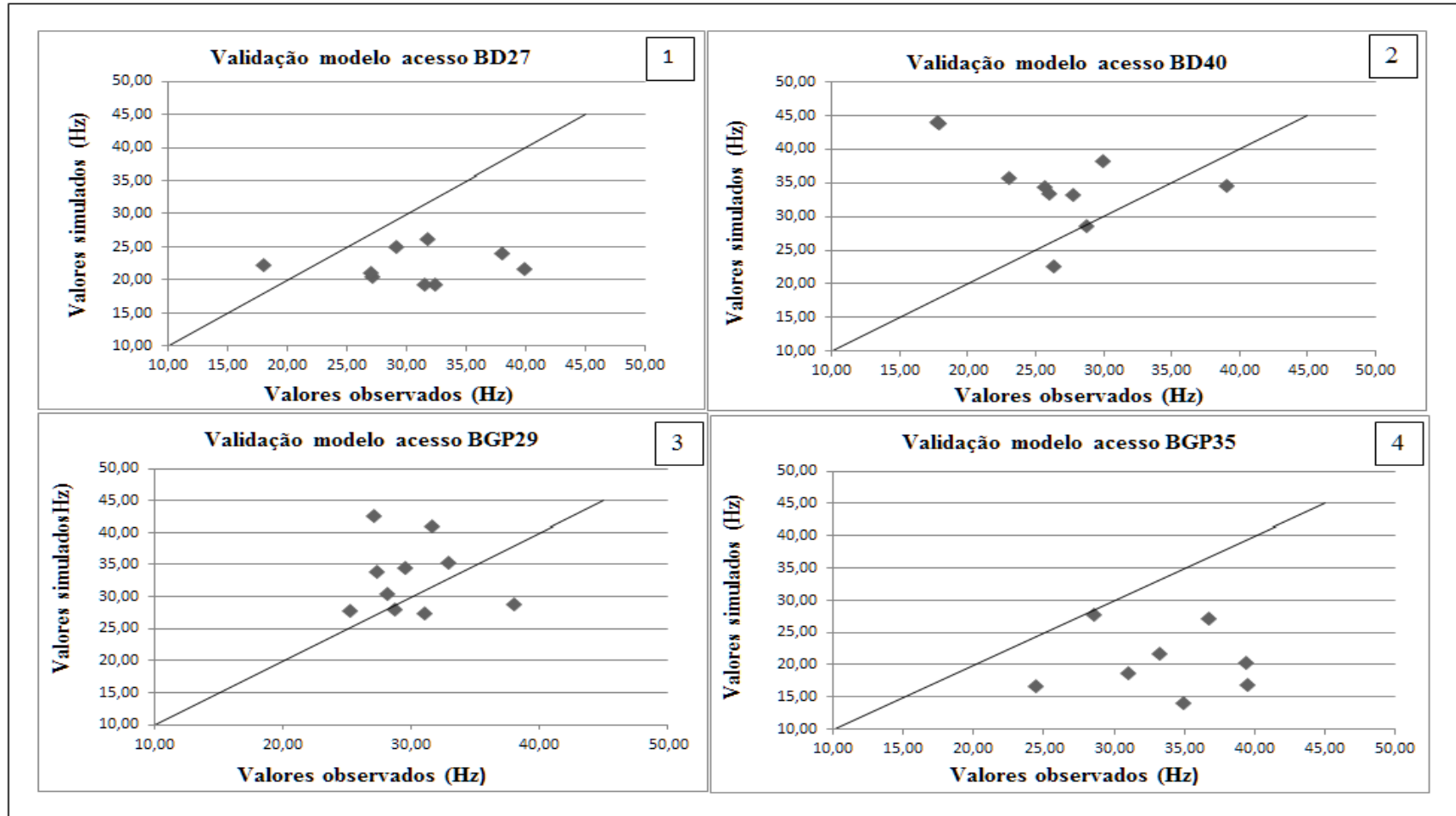


Figura 3.6: Gráficos da validação do modelo para prever frequência fundamental para os acessos BD 27 (1), BD 40 (2), BGP 29 (3) e BGP 35 (4).

Na Tabela 3.13 são apresentados os resultados obtidos na análise de sensibilidade, com a variação dos parâmetros massa específica (ρ), módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν) em $\pm 20\%$.

Tabela 3.13: Valores obtidos para frequência fundamental (Hz) após análise de sensibilidade variando-se em $\pm 20\%$ a massa específica (ρ), o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) para os acessos BD27, BD 40, BGP 29 e BGP35, bem como a diferença entre os valores originalmente simulados e os valores obtidos com a análise de sensibilidade

Frequência natural (Hz)			BD27	BD 40	BGP 29	BGP 35
	E (MPa)	- 20 %	19,81	31,19	29,52	18,32
		Diferença (Hz)/ (%)	-2,32/ (-10,49)	-3,65/ (-10,47)	-3,45/ (-10,47)	-2,14/ (-10,45)
	E (MPa)	+ 20 %	24,22	38,13	36,07	22,38
		Diferença (Hz)/ (%)	2,09/ (+9,44)	3,29/ (+9,44)	3,10/ (+9,40)	1,92/ (+9,40)
	ρ (gcm⁻³)	- 20 %	24,73	38,95	36,84	22,80
		Diferença (Hz)/ (%)	2,60/ (+11,72)	4,11/ (+11,80)	3,87/ (+11,73)	2,34/ (+11,47)
	ρ (gcm⁻³)	+ 20 %	20,52	31,82	30,12	18,74
		Diferença (Hz)/ (%)	-1,61/ (-7,47)	-3,02/ (-8,66)	-2,85/ (-8,65)	-1,72/ (-8,42)
	ν	- 20 %	21,95	34,51	32,63	20,28
Diferença (Hz)/ (%)		-0,18/ (-0,82)	-0,27/ (-0,94)	-0,28/ (-1,02)	-0,18/ (-0,87)	
ν	+ 20 %	22,39	35,33	33,46	20,72	
	Diferença (Hz)/ (%)	0,26/ (+1,18)	0,39/ (+1,39)	0,41/ (+1,49)	0,27/ (+1,31)	

ρ – massa específica; E – módulo de elasticidade; ν – coeficiente de Poisson; BD 27 – acesso provindo de Abaeté/ MG; BD 40 – acesso provindo de Pitangui-Martinho Campos/ MG; BGP 29 – acesso provindo de Prudente de Moraes-Matozinhos/ MG; BGP 35 – acesso provindo de Mirandópolis/ SP.

Todas as médias do teste de sensibilidade comparadas pelo teste t, a 5% de significância, foram diferentes das médias simuladas nas condições experimentais.

5. Discussão

Houve variação na determinação da frequência fundamental tanto no mesmo acesso quanto entre acessos, porém, o DR_m foi menor quando considerada a média geral de todos os acessos (Tabelas 3.7 e 3.8). Ao analisar o DR_m de cada acesso observamos que o modelo matemático proposto apresenta grande variação para estimar a frequência fundamental, com desvios relativos entre -37,35 e 43,14.

As frequências fundamentais obtidas por meio do teste de varredura variaram, na média, de 26,21 Hz a 33,45 Hz com CV considerados, por Pimentel Gomes (1987), de médio (entre 10% e 20%) a alto (de 20% a 30%) para produtos agrícolas. Porém, considerando o desvio padrão dos valores de frequência obtidos experimentalmente, podemos estabelecer uma faixa de frequências que compreende todos os acessos. Esta faixa, de 32,02 a 33,43 Hz, evidencia que a frequência necessária para o sistema fruto-ráquila entrar em ressonância deve ser próxima de 32 ou 33 Hz.

As frequências fundamentais obtidas por meio de simulação matemática variaram, na média, de 20,46 Hz a 34,84 Hz com CV também de médio a alto para produtos agrícolas. Porém, considerando o desvio padrão foi possível identificar uma faixa de frequências que compreende todos os acessos, de 24,43 a 28,83 Hz. Esta faixa é um pouco mais abrangente, possivelmente, devido a aproximações de geometria realizadas na simulação, além das propriedades mecânicas.

As propriedades mecânicas dos frutos utilizadas como parâmetros de entrada na simulação, foram as obtidas para as ráquias. Das propriedades do fruto, apenas a massa específica foi determinada para simulação. Já quanto às ráquias, o corpo de prova foi considerado cilíndrico e com diâmetro regular ao longo de seu comprimento na elaboração do modelo geométrico. Essas considerações podem ter influenciado na resposta do modelo, visto que, na prática, há variação de diâmetro e conformação ao longo da ráquila e, provavelmente, o fruto apresente propriedades mecânicas diferentes das ráquias.

A variação de massa e volume tem influência direta no comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila, uma vez que as frequências naturais são dependentes da distribuição de massa e da rigidez do sistema (VILLIBOR, 2012). Ciro (2001) verificou que o comportamento dinâmico é altamente dependente das

propriedades geométricas e mecânicas. Por meio de análise de sensibilidade, Filgueiras (2001), verificou grande influência no diâmetro dos galhos e troncos nas frequências naturais de vibração em plantas de café.

Santos (2008) ao realizar análise modal para o sistema fruto-pedúnculo de café por meio do método de elementos finitos comparou seus resultados com solução analítica a partir de um modelo de vigas e obteve desvio relativo médio máximo de 1,88%. No presente estudo, não foi realizada solução analítica e, sim, comparação com valores de frequência fundamental obtida experimentalmente o que gerou certa dificuldade para elaboração do modelo geométrico a ser utilizado na simulação. Os desvios relativos percentuais encontrados podem de certa forma, ser explicados pelas aproximações e considerações realizadas para viabilizar a simulação.

O modelo apresentou tendências diferentes, em função do acesso, em superestimar ou subestimar os valores de frequência fundamental (Figura 3.6). Para os acessos BD 27 e BGP 35, o modelo tendeu a subestimar os valores de frequência fundamental. Enquanto, para os acessos BD 40 e BGP 29, o modelo tendeu a superestimar os valores de frequência fundamental.

Na análise de sensibilidade, todos os parâmetros avaliados pelo teste t, em todas as condições, foram significativos, indicando que a variação dos parâmetros avaliados influencia na estimativa da frequência fundamental. Quando se diminuiu um dos parâmetros em 20% (Tabela 3.13), o que mais influenciou na frequência fundamental foi a massa específica, aumentando a frequência natural em até 11,80%, o que corresponde a um incremento de 4,11 Hz para o acesso BD 40. Já quando se aumenta um dos parâmetros em 20% (Tabela 3.13), o que mais influenciou foi o módulo de elasticidade, aumentando a frequência fundamental em até 9,44%, o que corresponde a um incremento de 3,29 Hz para o acesso BD 40. O parâmetro de menor influência na frequência fundamental foi o coeficiente de Poisson, com aumento em 1,49% quando se variou em + 20% e com diminuição da frequência em 1,02% quando se variou em - 20%.

O resultado obtido pela análise de sensibilidade foi como esperado, uma vez que, a frequência fundamental é diretamente proporcional à rigidez – determinada pela geometria e módulo de elasticidade – e inversamente proporcional à massa, relacionada com a massa específica (RAO, 2008). Portanto, quando houver aumento do módulo de elasticidade ou diminuição da massa específica, a frequência

fundamental resultante será maior, como ocorreu no caso analisado. O coeficiente de Poisson, assim como o módulo de elasticidade, refere-se à rigidez de um sistema, dessa forma, apresenta mesmo comportamento quando de sua variação, porém, de forma menos expressiva.

6. Conclusão

- A faixa de frequências identificadas por meio de teste experimental para estabelecer o fenômeno da ressonância, que compreende todos os quatro acessos, está entre 32,02 e 33,43 Hz;
- A faixa de frequências identificadas por meio da simulação matemática em que é possível obter o fenômeno da ressonância, que compreende todos os quatro acessos, está entre 24,43 e 28,83 Hz.
- Os parâmetros de maior influência na estimativa da frequência fundamental são a massa específica e o módulo de elasticidade;

7. Referências

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

CIRO, H. J. Coffee harvesting I: Determination of the natural frequencies of the fruit stem system in coffee trees. **Applied Engineering in Agriculture**, v.17, n.4, p.475-479, 2001.

FILGUEIRAS, W. H.; QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P.; DELLA LUCIA, R. M. Propriedades mecânicas da madeira do café. In.: **Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 2000. Disponível em: <http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb_anais/simposio1/Pos1.pdf>. Acesso em janeiro de 2016.

GOULART, S. M. **Amadurecimento pós-colheita de frutos de macaúba e qualidade do óleo para a produção de biodiesel**. 2014. 66p, Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2014.

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

MANFIO, C. E.; MOTOIKE, S. Y.; SANTOS, C. E. M.; PIMENTEL, L. D.; QUEIROZ, V.; SATO, A.Y. Repetibilidade em características biométricas do fruto de macaúba. **Ciência Rural** (UFSM. Impresso), 41:70-76, 2011.

MARK, S and TORBEN. R.L **Piezoeleric**, 1987, Accelerometer and Vibration Preamplifier Theory and Application Handbook, Bruel and Kjaer, Denmark.

MOTTA, P. E. F.; NILTON, C.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; GOMES, J. B. V. Ocorrência de macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v. 37, p. 1023-1031, 2002.

PIMENTEL GOMES, F. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária**. Piracicaba: Potafos: 1987. 3. ed., 162p.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. Quarta edição. São Paulo: Pearson – Prentice Hall, 2008, 424p.

ROSILLO-CALLE F.; PELKMANS L.; WALTER A. 2009. **A global overview of vegetable oils, with reference to biodiesel**. IEA Bioenergy Task 40, 89p. 2009.

SANTOS, F. L. **Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derriça**. 2008. 136p (Doutorado em Engenharia Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

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

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** (Online), v. 32, p. 373-378, 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**, Maringá, v. 37, n. 1, p. 11-17, 2015.

SILVA, E. P. **Elementos finitos como ferramenta auxiliar na análise estrutural estática de uma colhedora de café do tipo automotriz**. 2013. 143p, Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração: engenharia agrícola), Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2013.

VILLIBOR, G. P. **Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de derriça de café**. 2012. 160f, Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração: Mecanização Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **The finite element method: its basis and fundamentals**. 6th ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES GERAIS

A fim de gerar uma base de conhecimento do sistema fruto-ráquila foram determinados nesse trabalho a geometria, massa e massa específica dos frutos e ráquilas; módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das ráquilas; razão de amortecimento e coeficiente de amortecimento dos sistemas fruto-ráquila; e, simulação e modelagem dos sistemas fruto-ráquila para determinação da frequência fundamental e modos de vibração e validação experimental, bem como análise de sensibilidade para identificar os parâmetros de maior influência na determinação da frequência fundamental. As conclusões gerais do trabalho foram:

- As dimensões características entre os acessos variaram de 39,59 mm a 47,41 mm para a maior dimensão característica; de 38,80 mm a 47,11 mm para a dimensão intermediária e, de 38,42 mm a 46,07 mm para a menor dimensão característica;
- O diâmetro médio das ráquilas ficou entre 3,29 mm e 4,34 mm;
- A massa das ráquilas variou de 1,44 g a 3,02 g;
- O volume das ráquilas variou de 3,15 cm³ a 4,30 cm³;
- A massa específica das ráquilas ficou entre 0,47 gcm⁻³ e 0,88 gcm⁻³;
- A massa dos frutos variou de 32,44 g a 58,09 g;
- O volume dos frutos variou de 3,10 cm³ a 5,40 cm³;
- A massa específica dos frutos variou de 1,05 gcm⁻³ a 1,15 gcm⁻³;
- O módulo de elasticidade variou de 2,22 MPa a 3,17 MPa;
- O coeficiente de Poisson determinado foi um valor médio para todos os acessos, correspondendo a 0,37.
- Os sistemas fruto-ráquila são subamortecidos para os diferentes acessos, pois, apresentaram razão de amortecimento inferior a um.
- O coeficiente de amortecimento do sistema fruto-ráquila variou de 0,32 a 1,01 Nsm⁻¹.
- A faixa de frequências identificadas por meio de teste experimental para estabelecer o fenômeno da ressonância, que compreende todos os quatro acessos, está entre 32,02 e 33,43 Hz;

- A faixa de frequências identificadas por meio da simulação matemática em que é possível obter o fenômeno da ressonância, que compreende todos os quatro acessos, está entre 24,43 e 28,83 Hz.
- Os parâmetros de maior influência na estimativa de frequências fundamentais são a massa específica e o módulo de elasticidade.