



WELLINGTON WASHINGTON ANDRADE DE MELO JÚNIOR

**COMPORTAMENTO DINÂMICO DO CAFEIEIRO:
UM ESTUDO SOBRE AS PROPRIEDADES
FÍSICAS, MECÂNICAS E MODAIS DE RAMOS PLAGIOTRÓPICOS**

**LAVRAS - MG
2021**

WELLINGTON WASHINGTON ANDRADE DE MELO JÚNIOR

**COMPORTAMENTO DINÂMICO DO CAFEIEIRO:
UM ESTUDO SOBRE AS PROPRIEDADES
FÍSICAS, MECÂNICAS E MODAIS DE RAMOS PLAGIOTRÓPICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Instrumentação, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos
Orientador

Prof. Dr. Francisco Scinocca
Coorientador

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Coorientador

**LAVRAS - MG
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Melo Júnior, Wellington Washington Andrade de.

Comportamento dinâmico do cafeeiro: Um estudo sobre as propriedades físicas, mecânicas e modais de ramos plagiotrópicos / Wellington Washington Andrade de Melo Júnior. - 2020.

99 p. : il.

Orientador(a): Fábio Lúcio Santos.

Coorientador(a): Francisco Scinocca, Ricardo Rodrigues Magalhães.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Colheita mecanizada de café. 2. Análise modal experimental. 3. Análise via elementos finitos. I. Santos, Fábio Lúcio. II. Scinocca, Francisco. III. Magalhães, Ricardo Rodrigues. IV. Título.

WELLINGTON WASHINGTON ANDRADE DE MELO JÚNIOR

COMPORTAMENTO DINÂMICO DO CAFEIEIRO:

UM ESTUDO SOBRE AS PROPRIEDADES

FÍSICAS, MECÂNICAS E MODAIS DE RAMOS PLAGIOTRÓPICOS

DYNAMIC BEHAVIOR OF THE COFFEE PLANT:

A STUDY ON THE PHYSICAL, MECHANICAL AND MODAL PROPERTIES OF

PLAGIOTROPIC BRANCHES

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Instrumentação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de novembro de 2020.

Dr. Fábio Lúcio Santos UFLA

UFLA

Dr. Francisco Scinocca UFLA

UFLA

Dra. Flora Maria de Melo Villar UFV

UFV



Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos
Orientador

Prof. Dr. Francisco Scinocca
Coorientador

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Coorientador

**LAVRAS - MG
2021**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Engenharia (DEG) e Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos que me permitiu conduzir ativamente este projeto.

Ao Professor Fábio Lúcio Santos, pela orientação, pela paciência, pelos ensinamentos práticos e teóricos, e principalmente pela confiança depositada durante todo tempo.

Aos professores Francisco Scinocca e Ricardo Rodrigues Magalhães pela coorientação e apoio para realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do PPGEA/UFLA que contribuíram para este momento.

A toda minha família, em especial minha mãe Andréa Aparecida Ferreira Santos Melo, minhas irmãs Thalita Louise Ferreira Melo Amaro e Thaís Caroline Ferreira Melo, meu cunhado Rafael Neiva Amaro e meus queridos sobrinhos Pedro e Lucas pelo amor e apoio incondicional. Ao meu esposo Pablo Antunes da Rosa, pela ajuda, pelos conselhos, pela compreensão e pelo companheirismo em todos os momentos.

Aos amigos e colegas Daniel Soares, Jacqueline Cardoso, Marcelo Bahuti, Maria Teresa Rezende e Paula Rios pelo convívio, pelos momentos de descontração, pelo incentivo e por toda a ajuda, dentro e fora da universidade. Aos meus demais colegas e amigos por terem sempre me apoiado em todos os momentos.

Agradeço!

*“Tudo que está no plano da realidade já foi sonho um dia.”
(Leonardo da Vinci)*

RESUMO

Buscando a redução dos esforços físicos da colheita manual, aumento da capacidade operacional, assim como maior eficácia na derriça, a mecanização da operação de colheita tem sido cada vez mais utilizada no processo de produção do café. Objetivou-se, com o presente estudo, entender o comportamento dinâmico da planta cafeeira para auxiliar no desenvolvimento de máquinas e adequar parâmetros associados a este tipo de colheita. O trabalho baseou-se na determinação das propriedades físicas, mecânicas e modais do ramo plagiotrópicos da espécie *Coffea arabica* L., cultivar Catuaí Vermelho (IAC144). Foram considerados diferentes fatores: posição na planta (terço superior, terço médio e terço inferior), estádios de maturação (frutos verdes e frutos maduros) e cenários de estudo dos ramos (sem frutos e sem folhas, sem frutos e com folhas, com frutos e com folhas). Este trabalho consiste em três artigos. No primeiro artigo foram determinados, experimentalmente, massa, volume, massa específica e módulo de elasticidade de corpos de prova confeccionados a partir de ramos da planta cafeeira. Os corpos de prova do ramo apresentaram massa específica média igual a $0,945 \text{ g.cm}^{-3}$ com desvio padrão de $0,049 \text{ g.cm}^{-3}$. O módulo de elasticidade médio encontrado foi de 1,24 GPa com desvio padrão de 0,13 GPa. No segundo artigo foi realizada a análise modal experimental, por meio da Função Resposta e Frequência (FRF) obtida a partir da utilização de um sistema martelo de impacto e acelerômetro. Foram determinadas as frequências naturais médias, razões e coeficientes de amortecimento médios considerando os diferentes fatores. Para o ramo sem folhas e sem frutos, considerando a posição na planta, observou-se diferença significativa do terço superior em relação aos demais terços da planta para as três primeiras frequências naturais. O terço superior apresenta ao longo de sua extensão, material biológico mais jovem, em desenvolvimento e com novos brotos. A menor rigidez, devido características morfológicas de lenho jovem, e menor massa, podem influenciar nos valores de frequência natural média do ramo, o que pode explicar os valores obtidos. Para o ramo com frutos e sem folhas, de forma sintetizada, as frequências naturais médias foram aumentadas na medida em que evoluiu o estágio de maturação ou em direção ao topo na planta, no terço superior. No estudo do ramo com folhas e com frutos, observou-se, para as diferentes posições na planta, que não houve diferença significativa para as frequências naturais médias. Tal resultado pode ser considerado como um importante parâmetro de regulação de máquina, já que não seria necessária a utilização de diferentes frequências ao longo da planta para derriça. No terceiro artigo foram determinadas, por meio de análise via elementos finitos, as frequências naturais e modos de vibração de ramos plagiotrópicos. Os modelos propostos foram analisados estatisticamente por meio de análise de regressão linear e teste de correção. Os valores de frequências naturais experimentais e numéricas apresentaram correlação linear, indicando que os modelos propostos podem prever o comportamento dinâmico do cafeeiro quando submetido a vibrações mecânicas.

Palavras-chave: Colheita mecanizada de café. Vibrações mecânicas. Análise modal experimental. Análise via elementos finitos.

ABSTRACT

Seeking to reduce the physical efforts of manual harvesting, increased operational capacity, as well as greater effectiveness in detachment, the mechanization of the harvesting operation has been increasingly used in the coffee production process. The objective of this study was to understand the dynamic behavior of the coffee plant to assist in the development of machines and to adapt parameters associated with this type of harvest. The work was based on the determination of the physical, mechanical, and modal properties of the plagiotropic branch of the specie *Coffea arabica* L., cultivar Catuaí Vermelho (IAC144). Different factors were considered: position in the plant (upper third, middle third and lower third), maturation stages (green fruits and ripe fruits) and study scenarios of the branches (without fruits and without leaves, without fruits and with leaves, with fruits and leaves). This work consists of three articles. In the first article, the mass, volume, specific mass and modulus of elasticity of specimens made from branches of the coffee plant were experimentally determined. The specimens of the branch presented mean specific mass equal to 0.945 g.cm^{-3} with standard deviation of 0.049 g.cm^{-3} . The mean modulus of elasticity found was 1.24 GPa with a standard deviation of 0.13 GPa. In the second article, the experimental modal analysis was performed, using the Response and Frequency Function (FRF) obtained from the use of an impact hammer system and accelerometer. The mean natural frequencies, ratios and average damping coefficients were determined considering the different factors. For the leafless and fruitless branch, considering the position in the plant, a significant difference of the upper third was observed in relation to the other thirds of the plant for the first three natural frequencies. The upper third presents throughout its extension, younger biological material, in development and with new shoots. The lower stiffness, due to morphological characteristics of young wood, and lower mass, may influence the values of the average natural frequency of the branch, which may explain the values obtained. For the fruit-filled and leafless branch, in a synthesized way, the average natural frequencies were increased as the maturation stage evolved or towards the top of the plant in the upper third. In the study of the branch with leaves and fruits, it was observed, for the different positions in the plant, that there was no significant difference for the average natural frequencies. This result can be considered as an important machine regulation parameter, since it would not be necessary to use different frequencies throughout the plant for skid. In the third article, natural frequencies and modes of vibration of plagiotropic branches were determined by finite element analysis. The proposed models were statistically analyzed by linear regression analysis and correction test. The values of experimental and numerical natural frequencies showed linear correlation, indicating that the proposed models can predict the dynamic behavior of coffee when submitted to mechanical vibrations.

Keywords: Mechanized coffee harvest. Mechanical vibrations. Experimental modal analysis. Finite element analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo da arquitetura de um cafeeiro.	19
Figura 3.1 – Posição de coleta dos ramos na planta.	35
Figura 3.2 – Método de obtenção dos corpos de prova, PR1 e PR2, medidas em milímetros.	36
Figura 3.3 – Configuração experimental, corpo de prova fixado em duas garras para ensaio de tração.	37
Figura 3.4 – Massa específica média por posição na planta.	39
Figura 3.5 – Curva tensão vs. deformação dos corpos de prova em relação a posição na planta.	40
Figura 4.1 – Diagrama de execução do experimento.	51
Figura 4.2 – Configuração de coleta de dados. Instalação do acelerômetro no centro do comprimento do ramo (esquerda) e simulação com martelo de impacto (direita).	52
Figura 4.3 – Gráfico da magnitude do sinal em função da frequência. Detalhamento da obtenção da largura de baixa à 3 dB abaixo da frequência de ressonância.	54
Figura 4.4 – Função Reposta em Frequência. Coerência média e Magnitude (em dB) para cada posição na planta em função da frequência de amostragem (em Hz).	56
Figura 4.5 – Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, de acordo com a posição na planta, assim como os valores de coerência das frequências naturais médias, em Hz.	66
Figura 4.6 – Frequências naturais médias para cada posição na planta, de acordo com o estágio de maturação, em Hz.	67
Figura 5.1 – Posição de coleta dos ramos na planta.	80
Figura 5.2 – Imagens dos ramos retiradas com fundo de grade graduada (mm). (a) orientação horizontal (XY - vista de frente) (b) orientação vertical (XZ - vista superior). ..	81
Figura 5.3 – Análise de convergência de malha para o 3º modo de vibração. Frequência natural em Hz e tamanho de elemento em mm.	87
Figura 5.4 – Amostra discretizada do ramo da planta cafeeira.	88
Figura 5.5 – Exemplo de resultado obtido nas simulações: (a) primeira frequência natural (b) segunda frequência natural e (c) terceira frequência natural.	88
Figura 5.6 – Comparação entre frequências naturais médias, em Hz, experimentais e numéricas para cada terço da planta e frequência natural, assim como variação percentual entre frequências naturais numéricas e experimentais.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultados para a análise de variância referente à influência dos fatores posição na planta e posição no ramo sobre a massa específica dos ramos.	38
Tabela 3.2 – Estatística descritiva referentes a massa específica dos ramos sobre a posição na planta e posição ao longo do ramo.....	38
Tabela 3.3 – Resultados para a análise de variância referente à influência dos fatores posição na planta e posição no ramo sobre o módulo de elasticidade dos ramos.....	40
Tabela 3.4 – Desdobramento: Posição na planta dentro de cada nível de Posição no ramo. ...	41
Tabela 4.1 – Classificação dos sistemas de amortecimento.	55
Tabela 4.2 – Frequências naturais médias para cada terço da planta, em Hz.....	57
Tabela 4.3 – Razão de amortecimento média sobre as três primeiras frequências naturais para cada posição na planta, valor adimensional.....	57
Tabela 4.4 – Coeficiente de amortecimento médio das três primeiras frequências naturais para cada posição na planta, em $N.s.m^{-1}$	58
Tabela 4.5 – Resultados para a análise de variância referente à influência dos fatores de posição na planta (PP) e estágio de maturação (EM) dos frutos sobre a frequência natural média dos ramos para as três primeiras frequências naturais analisadas.	60
Tabela 4.6 – Primeira frequência natural média em relação a posição na planta, em Hz.	61
Tabela 4.7 – Desdobramentos da segunda frequência natural: posição na planta dentro do nível estágio de maturação (coluna) e estágio de maturação dentro do nível posição na planta (linha), em Hz.	61
Tabela 4.8 – Terceira frequência natural em relação a posição na planta, em Hz.	61
Tabela 4.9 – Resultado para a análise de variância referente à influência dos fatores de posição na planta e estágio de maturação dos frutos sobre a razão de amortecimento média dos ramos.	64
Tabela 4.10 – Desdobramentos da razão de amortecimento média na terceira frequência natural: posição na planta dentro do nível estágio de maturação (coluna) e estágio de maturação dentro do nível posição na planta (linha), valor adimensional.....	64
Tabela 4.11 – Resultado para a análise de variância referente à influência dos fatores de posição na planta e estágio de maturação dos frutos sobre o coeficiente de amortecimento dos ramos.	65
Tabela 4.12 – Desdobramentos da razão de amortecimento média na terceira frequência natural: posição na planta dentro do nível estágio de maturação (coluna) e estágio de maturação dentro do nível posição na planta (linha), em $N.s.m^{-1}$	66
Tabela 4.13 – Desdobramentos da segunda frequência natural: posição na planta dentro do nível estágio de maturação (coluna) e estágio de maturação dentro do nível posição na planta (linha), em Hz.	67
Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas das amostras do estudo: Módulo de elasticidade (E), em GPa, e massa específica (δ), em $g.cm^{-3}$	85
Tabela 5.2 – Frequências naturais médias para cada posição na planta, em Hz.	89

Tabela 5.3 – Equação de regressão linear, coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de correlação de Pearson (ρ) entre valores numéricos e experimentais para cada...91

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CP	Corpo de Prova
CV	Coeficiente de Variação
DIC	Delineamento Inteiramente Casualizado
EM	Estádio de Maturação
FRF	Funções de Resposta em Frequência
HPBW	<i>Half-Power Bandwidth</i>
IAC	Instituto Agrônomo de Campinas
ICO	<i>International Coffee Organization</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
NBR	Norma Brasileira
PP	Posição na Planta
PR	Posição no Ramo
UFV	Universidade Federal de Viçosa

LISTA DE SÍMBOLOS

E	módulo de elasticidade, GPa
m	massa, g
δ	massa específica, g.cm ⁻³
$\{F\}$	vetor força
$[m]$	matriz massa [g]
$[c]$	matriz amortecimento
$[k]$	matriz rigidez
$\{x\}$	vetor deslocamento
$\{\dot{x}\}$	vetor velocidade
$\{\ddot{x}\}$	vetor aceleração
$\{\varphi\}_i$	autovetor associado a i -ésima frequência natural
ω_i	i -ésima frequência natural, rad.s ⁻¹
t	tempo, s
ζ	razão de amortecimento, adimensional
ω_r	frequência de ressonância, Hz
ω_n	frequência natural, Hz
c	coeficiente de amortecimento, N.s.m ⁻¹
R^2	coeficiente de determinação
ρ	coeficiente de correlação de Pearson
*	significativo ao nível de 5% de probabilidade
ns	não significativo

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Disposição do trabalho.....	15
	REFERÊNCIAS	17
	CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Planta de café.....	18
2.2	Processo de colheita.....	20
2.3	Análise modal.....	22
2.3.1	Método de elementos finitos	23
2.3.2	Métodos numéricos aplicados à cafeicultura	24
	REFERÊNCIAS	27
	CAPÍTULO 3 - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DO RAMO DO CAFEIEIRO.....	32
1	INTRODUÇÃO	32
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44
	CAPÍTULO 4 - ANÁLISE MODAL DO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO-RAMO DO CAFEIEIRO	48
1	INTRODUÇÃO	48
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	51
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
3.1	Ramos sem frutos e sem folhas.....	56
3.2	Ramo desfolhado com frutos em diferentes estádios de maturação	59
3.3	Ramo completo, contendo folhas e frutos	66
4	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	73
	CAPÍTULO 5 - COMPORTAMENTO DINÂMICO DO RAMO DO CAFEIEIRA: UMA ANÁLISE A PARTIR DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	78
1	INTRODUÇÃO	78
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	80
2.1	Propriedades geométricas dos ramos	81
2.2	Propriedades mecânicas dos ramos utilizados nas simulações	81
2.3	Modelagem, análise de convergência e simulação	82
2.4	Autovalores e autovetores.....	83
2.5	Análise modal experimental	84
2.6	Validação dos modelos	85
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4	CONCLUSÕES	93
	REFERÊNCIAS	94
	CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES GERAIS.....	97

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O Brasil é líder em produção e exportação de café, além de ocupar a segunda posição como maior consumidor do produto no mundo. De acordo com o relatório da Organização Internacional do Café (ICO, 2020), a produção mundial da safra 2018/2019 foi de mais de 170 milhões de sacas de café (60 kg). Destaque para a produção brasileira estimada em cerca de 62 milhões de sacas beneficiadas para a safra de 2019/2020, de acordo com o Primeiro Levantamento de safra realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020).

O preço do café está diretamente associado à qualidade de seus parâmetros. E, para tal, é importante selecionar bem os frutos durante a colheita, pois os mesmos estão relacionados à qualidade do produto final. Nesse aspecto, a colheita pode ser considerada a operação mais cara relacionada à cadeia produtiva do café devido ao grande contingente trabalhista demandado. Assim, o modo de derriça afeta diretamente a qualidade final do café, além de ser considerado como um fator importante na redução dos custos da produção, já que está diretamente relacionado ao nível de mecanização empregado na execução de operações.

O método de colheita por vibração consiste em excitar a árvore por contato, sendo que os mecanismos das máquinas colhedoras são acionados por fonte de potência elétrica, pneumática, hidráulica ou mecânica. A colheita mecanizada de café é considerada eficiente quando há a máxima derriça de frutos no estágio de maturação desejado, baixos índices de recolheita, além de baixa desfolha e quebra de ramos. O desprendimento de frutos verdes é indesejável, tendo em vista que somente frutos maduros tem todas as características químicas necessárias para obter um café de boa qualidade.

No entanto, apesar dos grandes avanços no âmbito da colheita mecanizada, o panorama atual é de dificuldades técnicas, nas quais pesquisadores e engenheiros têm trabalhado para aumentar sua produtividade e eficiência. As principais dificuldades enfrentadas são as características arquitetônicas da planta e a não uniformidade dos frutos. A fim de melhorar o processo, faz-se necessário conhecer o comportamento dinâmico do sistema de colheita, destacam-se como os mais importantes parâmetros a serem estudados: frequências naturais, amplitudes e modos de vibração do sistema.

Desta forma, o uso de modelagem matemática associada a técnicas de simulação torna-se uma importante metodologia na realização de análises detalhadas da colheita de café. Em vista disso, o método dos elementos finitos (MEF) tem sido usado na simulação de diversos sistemas mecânicos e biológicos. Com o uso do MEF já é possível prever, via simulação

numérica e computacional, não apenas o comportamento mecânico das máquinas, mas também identificar tensões e a vibração dos ramos e pedúnculos do café durante o processo de colheita.

Na literatura é possível identificar diversos trabalhos que demonstraram a eficácia do uso do MEF para simulação do comportamento dinâmico do cafeeiro, no entanto, devido à complexidade na modelagem dos ramos, avanços nos modelos estabelecidos são extremamente necessários a fim de conferir maior confiabilidade, representatividade e aproximação com a realidade. Entretanto, ensaios experimentais são necessários para validação dos resultados obtidos numericamente. Ao se utilizar os resultados experimentais, os modelos numéricos podem ser corrigidos e aproximados à valores considerados como aceitáveis ou de referência, facilitando assim a predileção do comportamento das estruturas após sofrerem eventuais alterações.

A análise modal experimental define os parâmetros modais, como frequências naturais, amplitude e modos de vibração, por meio da aplicação de forças excitatórias conhecidas e análise da resposta da interação com a planta. Outra abordagem para estudo dos parâmetros modais refere-se a análise modal numérica. Entretanto, para tal caracterização dinâmica do sistema, é necessária a determinação das propriedades mecânicas e físicas como dimensões geométricas, módulo de elasticidade, massa específica e coeficiente de Poisson. Logo, as propriedades físico-mecânicas dos sistemas são de vital importância, pois são utilizados como parâmetros de entrada nas simulações computacionais, como por exemplo o método de elementos finitos.

Diante do exposto, objetivou-se nesse trabalho analisar o comportamento dinâmico de ramos do cafeeiro quando submetidos a vibrações forçadas. Buscou-se a determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas dos ramos plagiotrópicos da planta cafeeira; determinação de frequências naturais, coeficientes e razão de amortecimento para ramos em diferentes cenários; e análise modal de ramos da planta cafeeira via método de elementos finitos determinístico.

1.1 Disposição do trabalho

Este trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro e segundo compõem a introdução geral e referencial teórico, respectivamente. Os três capítulos subsequentes (de três a cinco) são compostos de artigos contendo introdução, material e métodos, resultados e discussão e conclusão.

No terceiro capítulo, é apresentada uma metodologia de determinação das propriedades físico-mecânicas do ramo plagiotrópico da planta, como módulo de elasticidade, massa, volume e massa específica. As variáveis foram analisadas de acordo posição de coleta dos corpos de prova na planta e ao longo do ramo.

No quarto capítulo é apresentada a análise modal experimental para ramos da planta cafeeira em diferentes cenários: ramo sem folhas e frutos, ramos sem folhas e com, e ramos com folhas e frutos. Foram avaliados fatores como estágio de maturação de frutos e posição de coleta do ramo ao longo da planta. Parâmetros como frequência natural, coeficiente e razão de amortecimento foram determinados por meio da função resposta em frequência, via martelo de impacto.

No quinto capítulo foram determinadas numericamente, por meio do método de elementos finitos, frequências naturais e modos de vibração de ramos plagiotrópicos da planta cafeeira. Os resultados simulados foram confrontados, amostra a amostra, com frequências naturais obtidas experimentalmente.

Finalmente, o sexto capítulo apresenta uma conclusão geral sobre os resultados obtidos em cada capítulo abordado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de café, v. 6 – Safra 2020, n. 1 - **Primeiro levantamento**, Brasília, p. 1-62, janeiro 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cafes>>. Acesso em: 05 mar. 2020.

ICO, International Coffee Organization. **Historical Data on the Global Coffee Trade**. London, 2020. Disponível em: <<http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2020.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), o Brasil é, atualmente, o maior produtor de café “*in natura*”, sendo responsável por cerca de 36% do mercado mundial. Segundo o Primeiro Levantamento da Safra de 2020 (CONAB, 2020), estima-se safra recorde de até 62 milhões de sacas beneficiadas (60 kg), onde 51,6% são produzidos em Minas Gerais, 25,0% em Espírito Santo, e 9,6% em São Paulo. Sobre essa safra é possível dizer ainda que 75,0% é composto pelo café arábica e 25,0% de café *conilon*. De forma predominante, o *Coffea arabica* L. é o mais produzido em Minas Gerais e o *Coffea canephora* no estado do Espírito Santo. Além disso, a produção mundial de café para a safra 2018/2019 foi de mais de 170 milhões de sacas de café de acordo com a Organização Internacional do Café (ICO, 2020).

Desde o século XIX, a cafeicultura está entre as atividades agrícolas que mais se destacam no Brasil, sendo o café responsável pela geração de renda em sua grande cadeia produtiva. A cadeia produtiva do café gera empregos em fazendas, armazéns, indústria de máquinas, implementos e equipamentos agrícolas, portos, além de estar presente em mercados de cosméticos e farmacêuticos.

O alto valor agregado devido à complexidade envolvendo a implantação da lavoura, operação de manejo, processo de colheita e pós-processamento, levam à necessidade de aumento da eficiência e produtividade dos processos visando redução de custos operacionais (CUNHA *et al.* 2016).

Desta forma, a colheita, considerada uma das etapas mais onerosas da cadeia produtiva do café, tem a mecanização como caminho para manutenção do agricultor na atividade. O custo operacional elevado, associado a mão de obra cada vez mais escassa, tem levado a necessidade do uso de colhedoras mecanizadas ou semi-mecanizadas a fim de garantir a viabilidade econômica da cafeicultura (SANTINATO *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2015; SILVA; SILVA; MAGALHÃES, 2014; ORTEGA; JESUS, 2011)

2.1 Planta de café

Segundo classificação botânica, a planta do café pertence à família botânica Rubiaceae, gênero *Coffea* (ROBBRECHT; PUFF, 1986). As diversas espécies do gênero *Coffea* variam de acordo com a origem, local de cultivo e região. Dentre as espécies, o café arábica (*Coffea*

arabica) e o café conilon ou robusta (*Coffea canephora*) são os mais conhecidos e importantes em termos econômicos (DAVIS *et al.*, 2006).

Davis *et al.* (2007) descrevem a planta cafeeira como de porte arbustivo ou arbóreo, de caule lenhoso, com brotos curtos, reto, quase cilíndrico e lignificado. A planta de *Coffea arabica* L., Figura 2.1, é considerada de ciclo perene, unicaule, apresentam dimorfismo de ramos (ortotrópicos e plagiotrópicos), gemas seriadas e cabeça-de-série, e sistema radicular axial lateral (CARVALHO, 2008; MATIELLO *et al.*, 2010). Os ramos laterais, que crescem a partir dos ramos ortotrópicos, são chamados de plagiotrópicos e se desenvolvem lateralmente numa inclinação que varia de 45 a 90° em relação ao eixo principal (GUIMARÃES; MENDES; BALIZA, 2010; REIS; CUNHA; CARVALHO, 2010). De forma majoritária, os ramos plagiotrópicos são aqueles considerados produtivos.

Figura 2.1 – Exemplo da arquitetura de um cafeeiro.



Fonte: Silva *et al.* (2014).

Fatores como clima (CARVALHO *et al.*, 2004), altitude (SEDIYAMA *et al.*, 2001), declividade (ZAMBOLIM, 2002), compactação do solo (PAIS *et al.*, 2011), fertilidade do solo (CORRÊA *et al.*, 2001), adensamento (PEREIRA *et al.*, 2011), doenças e pragas (SANTOS *et*

al., 2008; FERREIRA *et al.*, 2003), podas (THOMAZIELLO, 2013), utilização de sistemas de irrigação (GOMES; LIMA; CUSTÓDIO, 2007), entre outros, influenciam no crescimento, desenvolvimento e produção da planta cafeeira.

2.2 Processo de colheita

Segundo MATIELLO *et al.* (2010), desde a década de 70, a mecanização na colheita do café vem sendo utilizada no Brasil como alternativa na diminuição de custos operacionais. Estudos indicam reduções de custo na colheita em torno de 60% (LANNA; REIS, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2007; SANTINATO *et al.*, 2014, 2015).

A execução da colheita mecanizada deve ser realizada visando o máximo de eficiência, minimizando o repasse manual, a quebra e desfolha de ramos. Para isso, a vibração das hastes em frequências e amplitudes de vibração, assim como a velocidade de trabalho devem estar de acordo com a variedade da planta, porte, enfolhamento, produtividade, estágio de maturação dos frutos, clima, face de exposição e declividade.

Cunha *et al.* (2016) e Santinato *et al.* (2014) destacam a diminuição dos custos ao se substituir a mão de obra da colheita manual por colhedoras mecanizadas. A mecanização da cultura ocorre, principalmente, nas áreas mais planas do cerrado podendo ser implantada inclusive em lavouras irrigadas (ORTEGA; JESUS, 2011; CASSIA *et al.*, 2013; TAVARES *et al.*, 2016). Contudo, modelos de colhedoras estão sendo desenvolvidos também para regiões montanhosas, como estudado por Oliveira *et al.* (2014). Desta forma, o uso de derriçadoras portáteis para a colheita semi-mecanizada também se demonstra uma boa alternativa para a redução da demanda por mão de obra (MEJÍA; TASCÓN; URIBE, 2013).

A colheita mecanizada de café se destaca devido ao grande avanço tecnológico, que vem contribuindo para o aumento da produtividade e, por meio da colheita de frutos em estágio de maturação considerados ideais para derriça, influenciam diretamente na qualidade do produto. No entanto, problemas durante o plantio e desenvolvimento da cultura, manejo incorreto, assim como falhas em regulagens da colhedora, podem acarretar redução da eficiência da operação (CASSIA *et al.*, 2013; FERREIRA JÚNIOR *et al.*, 2016).

Durante a fase de colheita do café, a arquitetura da planta e a desuniformidade da maturação dos frutos se caracteriza como uma tarefa complexa. A colheita, então, pode ser descrita em etapas. A derriça ou catação é a primeira, seguida de varrição e recolhimento, terminando com a terceira, abanação dos frutos. Na fase inicial podem ser colhidos todos os frutos, ou somente os maduros de forma seletiva (SOUZA; QUEIROZ; RAFULL, 2006). No

entanto, a derrixa total dos frutos pode causar queda na qualidade da bebida, caso os frutos em diferentes estádios de maturação e as impurezas não sejam separados adequadamente na fase de pós-colheita ou mesmo de beneficiamento (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

De acordo com Santos *et al.* (2010), a partir da associação de fatores como frequência e amplitude de vibração, os frutos podem ser destacados por meio da energia vibracional. Logo, o conhecimento das propriedades físico-mecânicas do sistema fruto-pedúnculo, as frequências naturais e amplitudes de vibração, pode ser empregado na colheita total ou seletiva dos frutos. Segundo Guedes (2011), a realização de testes experimentais em laboratório para determinação das propriedades geométricas, mecânicas e dinâmicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo, podem auxiliar no desenvolvimento de projetos de máquinas utilizadas para colheita

Souza *et al.* (2005) explicam que o número de ciclos necessários para desprender um fruto é proporcional ao tempo de desprendimento, e que o estágio de maturação indica o tempo de aplicação do parâmetro vibracional visando uma colheita seletiva. Silva *et al.* (2010) comentam que há diferenças na força de desprendimento entre frutos verdes e cerejas, diferindo ao longo do período de maturação e até mesmo de cultivares. Essa diferença pode ser um parâmetro para o gerenciamento da colheita mecanizada, explicam os autores.

A força necessária para o desprendimento dos frutos, de acordo com Ferraz *et al.* (2012) e Silva *et al.* (2013), é um parâmetro que influencia e pode indicar o momento da colheita mecanizada. Os autores analisaram a força necessária para o desprendimento dos frutos em diferentes estádios de maturação, verdes e maduros, a partir de variações na frequência e amplitudes de vibração das hastes e velocidade operacional da colhedora de café. Nestes estudos os autores observaram que os frutos verdes apresentaram forças de desprendimento maiores que os frutos maduros, no entanto constataram que a força para desprender os frutos não depende somente dos ajustes nas colhedoras, mas também de fatores climáticos e nutricionais das plantas, por se tratar de material biológico que reage quando submetido a diferentes níveis de esforços externos (LI *et al.*, 2013).

Segundo Ferraz *et al.* (2012), características como diferentes tamanhos de planta, maturação irregular dos frutos ao longo dos ramos plagiotrópicos ou da planta, assim como o alto teor de umidade, dificultam a parametrização de máquinas colhedoras de café quando comparadas à colhedora de cereais.

O princípio de vibrações mecânicas também é utilizado para efetuar o desprendimento de frutos de outras culturas, como os de pinus e da oliveira. Castro-García, Blanco-Roldán e Gil-Ribes (2011) estudaram a frequência de resposta de árvores de pinus influenciada por um agitador de tronco. Os autores verificaram que, para diferentes estádios de maturação dos frutos,

fatores como grau, aceleração e tempo de vibração influenciaram na colheita seletiva, a exemplo do que ocorre também na cultura do café. No caso da oliveira, Sola-Guirado *et al.* (2014) analisaram a eficiência da colheita, porcentagem de frutos colhidos, ao comparar diversas formas de derriça: manual, derriçadora portátil, agitador de tronco e agitador de copa. Os autores concluíram que, apesar da maior porcentagem de frutos colhidos na forma manual, a mesma foi considerada como mais agressiva às árvores. Desta forma, o agitador de copa foi considerado a melhor opção para desprender frutos da oliveira por vibrações mecânicas.

Segundo Ferreira Júnior *et al.* (2016), estudos acerca da frequência e amplitudes de vibração, regulagem dos cilindros vibradores, das forças de desprendimento de frutos e das propriedades físico-mecânicas e geométricas do sistema fruto-pedúnculo são necessários a fim de se conhecer o comportamento dinâmico da planta e sua resposta aos componentes mecânicos responsáveis pela transmissão da vibração. Os autores ainda comentam que a parametrização correta de frequências e amplitudes de vibração das hastes das colhedoras podem induzir a uma melhor eficiência de colheita, com menos desfolha, diminuição com custo de repasse, possibilitando uma melhor colheita seletiva.

2.3 Análise modal

Segundo Ewins (1984), a análise modal é um conjunto de procedimentos que visa determinar, analítica e/ou experimentalmente, os parâmetros modais de uma estrutura, ou seja, frequências naturais, fatores de amortecimento e formas modais.

De forma analítica, a análise modal é realizada ao se elaborar um modelo matemático da estrutura a fim de resolver o problema de autovalor e autovetor associado e determinar os modos de vibração, os fatores de amortecimento e as frequências naturais da estrutura. A partir da superposição modal dos modos naturais de vibração do sistema podem ser calculadas as Funções de Resposta em Frequência (FRF).

Experimentalmente, como não se dispõe do modelo do sistema, uma força de magnitude conhecida é aplicada na estrutura e são medidas as vibrações resultantes em pontos representativos. Por meio do processamento dos sinais de excitação e resposta, consegue-se estimar as respectivas FRF. Com esse conjunto de FRFs, ao serem aplicados algoritmos de extração de parâmetros, podem ser identificadas as características modais da estrutura (RAO, 2008, EWINS, 1984).

Soluções por meio de análise modal podem ser empregadas em diversas áreas, como: no estudo do comportamento dinâmico de sistemas fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

submetido a vibrações mecânicas (COELHO *et al.*, 2016; FERREIRA JÚNIOR *et al.*, 2016); na análise de máquinas colhedoras de café (DA SILVA *et al.*, 2020); na determinação das propriedades modais do sistema fruto-ráquila da macaúba (GRUPIONI *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2018; VILLAR *et al.*, 2017); na análise de tensões na faca de corte de uma colhedora de forragem (GARCIA; QUEIROZ; DIAS, 1998); no estudo da colheita de citrus por agitador de tronco (SAVARY *et al.*, 2010), dentre outras diversas aplicações.

2.3.1 Método de elementos finitos

Uma forma de obter dados de forma precisa e em tempo hábil é usar ferramentas matemáticas para entender o comportamento de sistemas físicos reais. O uso de simulações numéricas ajuda a prever o comportamento de um sistema auxiliando na tomada de decisão ainda em fase de projeto, reduzindo assim tempo e custos (SILVA; SILVA; MAGALHÃES, 2014).

Simulações numéricas têm sido cada vez mais utilizadas na predição do comportamento mecânico de materiais metálicos, não metálicos e até mesmo biológicos (HUEBNER *et al.*, 2010; LI *et al.*, 2013). A análise numérica se tornou uma importante ferramenta atuante na limitação de soluções de problemas clássicos, anteriormente solucionados por métodos analíticos. Sistemas complexos, com detalhes geométricos e o estudo do comportamento tridimensional de distribuição de tensões mecânicas, podem ser analisados por meios numéricos.

Dentre os vários métodos numéricos existentes, destaca-se o método de elementos finitos (MEF), empregado na solução de diversos problemas de engenharia, como análise de tensões, transferência de calor, mecânica dos fluidos, vibrações mecânicas em estruturas, entre outras aplicações (SEGERLIND, 1984; REDDY, 1993; HUEBNER *et al.*, 2010). Segundo Zienkiewicz *et al.* (2013), o MEF pode ser definido como uma técnica de análise numérica empregada na obtenção de soluções aproximada de equações diferenciais que regem o comportamento de um sistema físico.

O MEF consiste na divisão de um corpo em uma malha de elementos, geração e solução de equações diferenciais que governam o fenômeno físico em estudo. Para modelos tridimensionais, a malha é formada por elementos com geometrias pré-definidas, geralmente tetraédricos ou hexaédricos, que são conectados por nós em um sistema de coordenadas tridimensional. A utilização de elementos finitos tridimensionais possibilita a representação dos sistemas físicos com um maior número de graus de liberdade, aumentando consideravelmente

os resultados obtidos na modelagem dos problemas de engenharia (HUEBNER *et al.*, 2010; ZIENKIEWICZ *et al.*, 2013).

A seleção do tamanho de elemento é de extrema importância em uma análise MEF (RAO, 2017). A densidade da malha é usada no controle da precisão do modelo, influenciando diretamente no resultado das simulações. O tempo de processamento do modelo deve ser levado em consideração para escolha da malha. A análise de convergência deve ser aquela que melhor representa o modelo com menor custo computacional (OWEN, 1998). Segundo Carvalho, Magalhães e Santos (2016), a partir da estrutura discretizada, pode-se calcular deslocamentos, deformações e tensões atuantes no modelo.

Uma importante aplicação do MEF é a otimização de projetos de máquinas, reduzindo custos adicionais com protótipos, ajudando na tomada de decisão baseadas em informações precisas, que evitam a necessidade de experimentos em campo. Logo, devido a sua versatilidade, e tendo em vista a possibilidade de solucionar problemas complexos, a técnica de elementos finitos tem se tornado uma das ferramentas mais utilizadas no projeto e análise de máquinas e estruturas.

2.3.2 Métodos numéricos aplicados à cafeicultura

Segundo Castro-García *et al.* (2008), estruturas arbóreas são dinâmicas e respondem à aplicação de vibrações mecânicas de forma complexa. A resposta aos esforços aplicados ao sistema é condicionada pelas propriedades modais, tais como, frequências naturais e modos de vibração, sendo definidas de acordo com a magnitude, ponto de aplicação e distribuição, e na relação entre massa, rigidez e amortecimento das partes constituintes.

Estudos de modelos matemáticos que representem a planta cafeeira vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de entender o comportamento do sistema durante a derriça por vibrações mecânicas.

Ciro (2001) realizou um teste de desprendimento de café com menos de 50% de frutos maduros com posterior determinação analítica das frequências naturais e modos de vibração do sistema caule-fruta. Já Santos *et al.* (2010) avaliaram amplitudes de vibração em diferentes ramos e variedades a fim de avaliar a eficiência de derriça. Ambos os estudos concluíram que o desprendimento do fruto está diretamente e positivamente relacionado com a frequência de vibração e amplitude. Além disso, o estágio de maturação influenciou a eficiência do descolamento apenas no final da época de colheita, indicando a influência do período de

seletividade de colheita. Um processo de colheita eficiente requer uma combinação apropriada de frequência de vibração, amplitude e tempo de exposição.

O sistema fruto-pedúnculo foi estudado por Santos *et al.* (2015) para determinação das frequências naturais e modos de vibração em diferentes graus de maturação. O sistema foi submetido a vibrações mecânicas para análise dos modos de vibração pendular, torcional e contra-fase. Os autores constataram que as frequências naturais diminuem à medida que o grau de maturação dos frutos aumenta. Além disso, o modo de vibração em contra-fase pode proporcionar, segundo os autores, melhor eficiência de derriça.

O método de digitalização, utilizando engenharia reversa para obtenção de um modelo representativo do sistema real, foi utilizado por Carvalho, Magalhães e Santos (2016). Os autores citam problemas estruturais durante a colheita mecanizada e semi-mecanizada, como desfolha excessiva e quebra de ramos como pontos de partida para estudos do comportamento mecânico da planta de café. Os resultados encontrados apresentaram valores consistentes quando comparados a testes experimentais de uma planta real sob carga estática, o que demonstrou o potencial do uso do método.

Coelho *et al.* (2016) determinaram, por meio do método de elementos finitos estocástico, as frequências naturais e os modos de vibração do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. No método utilizado pelos autores, verificou-se a variação das frequências naturais em função da variabilidade de variáveis aleatórias como módulo de elasticidade e a massa específica dos ramos, pedúnculo e frutos. Segundo os autores, as frequências naturais reduziram na medida em que se evolui o estágio de maturação dos frutos e pedúnculos ou se aumenta a massa total do sistema. Com o aumento do módulo de elasticidade ou a redução da massa específica, foi constatado o aumento proporcional nas frequências naturais do sistema.

Os parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café foram determinados por Villibor *et al.* (2016). Empregando vídeos digitais de alta velocidade, as frequências naturais e coeficiente de amortecimento foram determinadas por meio do processamento de imagem do deslocamento resultante do sistema submetido a um impulso. O método do decremento logarítmico foi empregado para determinação das propriedades modais. Os autores encontraram valores de frequência natural iguais a 11,62 e 13,29 Hz e coeficientes de amortecimento iguais a 0,029 e 0,0253 N.s.m^{-1} , para os estádios de maturação cereja e verde, respectivamente. Ainda segundo os autores, na primeira frequência natural, houve sobreposição de faixas de ressonância, o que dificulta a derriça mecânica seletiva do café entre diferentes estádios de maturação para esta faixa de frequência.

Tinoco (2017) utilizou dados experimentais de tamanho, volume e módulo de Young para analisar o comportamento de frutos de café arábica var. Colômbia durante o amadurecimento. Segundo o autor, os modelos propostos estão de acordo com os dados experimentais relatados pela literatura, o que aumenta o potencial de aplicação do modelo na avaliação da produtividade e, principalmente, um dos maiores gargalos atuais na colheita que é a identificação *in situ* da época de amadurecimento dos frutos. Ainda em outro estudo similar, Tinoco *et al.* (2014) realizaram simulações que consideraram modelos representativos em cada estágio de amadurecimento dos frutos. Os resultados indicam que os modos associados às frequências naturais em intervalos específicos facilitam a derriça, sendo diferentes para cada estágio de maturação. Os autores ainda complementam que o processo heurístico desenvolvido no estudo pode ser extrapolado para outras variedades de café.

Souza *et al.* (2018) avaliaram a interação entre uma haste colhedora e um ramo de café por meio de modelagem computacional via análise de elementos finitos. Os autores desenvolveram modelos tridimensionais a partir de um ramo plagiotrópico e uma haste cilíndrica de uma colhedora. Os modelos foram validados segundo ensaio experimental com acelerômetros. Segundo os autores, as acelerações obtidas nas simulações foram 3,14% maior do que as experimentais, e os deslocamentos simulados foram 23,2% menores que os valores experimentais.

O comportamento dinâmico do cafeeiro foi objeto de estudo de Velloso *et al.* (2020). Os autores desenvolveram modelos da planta cafeeira e, via análise de elementos finitos, obtiveram frequências naturais simuladas que foram validadas com frequências naturais obtidas experimentalmente. Os modelos propostos pelos autores representaram de forma expressiva os valores obtidos em laboratório.

Gomes *et al.* (2020) analisaram o sistema fruto-pedúnculo-ramo do café submetido a vibração mecânica e o impacto das hastes vibratórias no processo de desprendimento do fruto associado a esse sistema. Amostras de ramos de café contendo frutos verdes e maduros foram submetidas a diferentes frequências e amplitudes de vibração. Segundo os autores, a eficiência do desprendimento dos frutos aumentou à medida que o estágio de maturação progrediu de verde para maduro. Os autores concluíram que a vibração combinada com o impacto das hastes alcançou uma eficiência média de desprendimento de aproximadamente 90%.

REFERÊNCIAS

- CASSIA, M. T. *et al.* Quality of mechanized coffee harvesting in circular planting system. **Ciência Rural**, v. 43, n. 1, p. 28-34, 2013.
- CASTRO-GARCÍA, S. *et al.* Dynamic analysis of olive trees in intensive orchards under forced vibration. **Trees**, v. 22, n. 6, p. 795-802, 2008.
- CASTRO-GARCÍA, S.; BLANCO-ROLDÁN, G. L.; GIL-RIBES, J. A. Frequency response of pinus pinea l. for selective cone harvesting by vibration. **Trees**, v. 25, n. 5, p. 801-808, 2011.
- CARVALHO, C. H. S. de. **Cultivares de café – origem, características e recomendações**. Brasília: CBP&D/Café, Embrapa Café, 2008. 334 p.
- CARVALHO, E. A. ; MAGALHAES, R.R. ; SANTOS, F. L. Geometric modeling of a coffee Plant for displacents prediction. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 123, p. 57-63, 2016.
- CARVALHO, L. G. *et al.* Modelo de regressão para previsão de produtividade de cafeeiros no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p. 204-211, 2004.
- CIRO, H. 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.
- COELHO, A. L. d. F. *et al.* Dynamic behavior of the coffee fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2016.
- CORRÊA, J. B. *et al.* Avaliação da fertilidade do solo e do estado nutricional de cafeeiros do Sul de Minas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 6, p. 1279-1286, 2001.
- CUNHA, J. P. B. *et al.* Viabilidade técnica e econômica de diferentes sistemas de colheita do café. **Coffee Science**, v. 11, n. 3, p. 416-425, 2016.
- DA SILVA, C. A. *et al.* Análise experimental em um cilindro de varetas de uma colhedora de café para diagnóstico de falha. **ForScience**, v. 8, n. 2, 2020.
- DAVIS, A. P. *et al.* An annotated taxonomic conspectus of the genus Coffea (Rubiaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**, London, v. 152, n. 4, p. 465-512, 2006.
- DAVIS, A. P. *et al.* Searching for the relatives of Coffea (Rubiaceae, Ixoroideae): the circumscription and phylogeny of Coffeae based on plastid sequence data and morphology. **American Journal of Botany**, v. 94, n. 3, p. 313-329, 2007.
- EWINS, D. J. **Modal testing: theory and practice**. London: Research studies press Letchworth, 1984. v. 15.

FERRAZ, G. A. e. S. *et al.* Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 1, p. 76–89, 2012.

FERREIRA, A. J. *et al.* Bioecologia da broca-do-café *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera, Scolytydae), no agrossistema cafeeiro do cerrado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 2, p. 422-431, 2003.

FERREIRA JÚNIOR, L. G. *et al.* Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras. **Ciência Rural**, v. 46, n. 2, p. 273-278, 2016.

GARCIA, R. F.; QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P. Análise de tensões na faca de corte de uma colhedora de forragem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 2, p. 219-223, 1998.

GOMES, E. Q. *et al.* Effect of the impact of rigid rods on coffee fruit detachment efficiency by mechanical vibrations. **Coffee Science**, v.15, p.1-10, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.25186/v15i.1747>>. Acesso em: 22 out. 2020.

GOMES, N. M.; LIMA, L. A.; CUSTÓDIO, A. A. P. Crescimento vegetativo e produtividade do cafeeiro irrigado no Sul do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 564-570, 2007.

GRUPIONI, C. M. F. *et al.* Macaw palm supply chain: Evaluation of a semi-mechanized fruit harvesting system. **Industrial Crops and Products**, v. 151, p. 112444, 2020.

GUEDES, D.M. **Efeito da utilização de frequências de vibração na faixa de 35 a 55 Hz sobre a eficiência de derriça do café. 2011.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 52 p.

GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; BALIZA, D. P. **Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas.** Lavras: Editora UFLA, 2010. 215p.

HUEBNER, K. H. *et al.* **The finite element method for engineers.** Wiley-Interscience; 4^a ed., 2010.

LANNA, G.B.M.; REIS, P.R. Influência da mecanização da colheita na viabilidade cononômico-financeira da cafeicultura no sul de Minas Gerais. **Coffee Science**, v.7, n.2, p.110-121, 2012.

LI, Z. *et al.* Internal mechanical damage prediction in tomato compression using multiscale finite element models. **Journal of Food Engineering**, v. 116, n. 3, p. 639–647, 2013.

MATIELLO, J. B. *et al.* **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações.** Rio de Janeiro: Fundação Procafé, 2010. 546 p.

OLIVEIRA, E. *et al.* Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 827-831, 2007.

- OLIVEIRA, E. *et al.* The influence of the sticks vibration and the speed in the displacement of the harvester machine on mechanized coffee harvest process. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.3, p.714–721, 2017.
- OLIVEIRA, M. V. M. *et al.* Computer-aided design of a coffee-dragging device. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 35, n. 5, p. 2373-2382, 2014.
- OLIVEIRA, Z. R. C. R. *et al.* Mechanical properties of the rachis from macaw palm bunche. **Acta Scientiarum-Agronomy**, v. 40, p. 39504-395047, 2018.
- ORTEGA, A. C.; JESUS, C. M. Território café do Cerrado: Transformações na estrutura produtiva e seus impactos sobre o pessoal ocupado. **Revista Economia Sociologia Rural**, v. 49, n. 3, p. 771-800, 2011.
- OWEN, Steven J. A survey of unstructured mesh generation technology. **IMR**, v. 239, p. 267, 1998.
- MEJÍA, F. Á.; TASCÓN, C. E. O.; URIBE, J. R. S. Evaluation of mechanical beaters in coffee harvesting. **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, Medellín, v. 66, n. 1, p. 6919-6928, 2013.
- PAIS, P. S. M. *et al.* Compactação causada pelo manejo de plantas invasoras em Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1949-1958, 2011.
- PEREIRA, S. P. *et al.* Crescimento, produtividade e bienalidade do cafeeiro em função do espaçamento de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 2, p. 152-160, 2011.
- RAO, S. S.; Mechanical vibrations. São Paulo: Prentice Hall Upper Saddle River, 2008. v. 4.
- RAO, S. S. **The finite element method in engineering**. Butterworth-heinemann, 2017.
- REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method**. Second edition. Singapore. McGraw-Hill International Editions, 1993. 684p.
- REIS, P. R.; CUNHA, R. L. da; CARVALHO, G. R. **Café Arábica: do plantio à colheita**. Lavras: U. R. EPAMIG SM, 2010, v. 1. 896 p.
- ROBBRECHT, E.; PUFF, C. Survey of the Gardenieae and related tribes (Rubiaceae). **Botanische Jahrbucher fur Systematik, Pflanzengeschichte und Pflanzengeographie**, 1986.
- SANTINATO, F. *et al.* Análise quali-quantitativa da operação de colheita mecanizada de café em duas safras. **Coffee Science**, v. 9, n. 4, p. 495-505, 2014.
- SANTINATO, F. *et al.* Análise econômica da colheita mecanizada do café utilizando repetidas operações da colhedora. **Coffee Science**, v. 10, n. 3, p. 402–411, 2015.

- SANTOS, F. L. *et al.* Efeito da frequência e amplitude de vibração sobre a derrça de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi**, v. 14, n. 4, 2010.
- SANTOS, F. L. *et al.* Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum**. Technology, v. 37, n. 1, p. 11-17, 2015.
- SANTOS, F. S. *et al.* Adubação orgânica, nutrição e progresso de cercosporiose e ferrugem-do-cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 7, p. 783-791, jul. 2008.
- SAVARY, S. K. J. U. *et al.* Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 5, p. 1373-1381, 2010.
- SEDIYAMA, G. C. *et al.* Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 501-509, 2001.
- SEGERLIND, L. J. **Applied finite element analysis**. Second edition. New York. John Wiley & Sons, Inc., 1984. 427p.
- SILVA, E. P.; SILVA, F. M.; MAGALHÃES, R. R. Application of finite elements method for structural analysis in a coffee harvester. **Engineering**, v. 6, n. 1, p. 138-147, 2014.
- SILVA, F. C. da *et al.* Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiros ao longo do período de colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 468–474, 2010.
- SILVA, F. C. d. *et al.* Operational performance of mechanically harvested coffee and selectivity in accordance to force detachment of fruit. **Coffee Science**, v. 8, n. 1, p. 49–55, 2013.
- SILVA, F. C. *et al.* Efficiency of coffee mechanical and selective harvesting in different vibration during harvest time. **Coffee Science**, v. 10, p. 56-64, 2015.
- SILVA, M. R. L. *et al.* Doença emergente. **Cultivar Grandes Culturas**, Pelotas, v. 177, p. 22-25, fev. 2014.
- SOLA-GUIRADO, R. R. *et al.* Traditional olive tree response to oil olive harvesting technologies. **Biosystems engineering**, v. 118, p. 186–193, 2014.
- SOUZA, C. *et al.* Desenvolvimento de uma máquina vibradora para estudo do desprendimento de frutos do cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, Viçosa, v. 13, n. 1, p. 7-18, 2005.
- SOUZA, C. M. A. de; QUEIROZ, D. M. de; RAFULL, L. Z. L. Derrçadora portátil na colheita total e seletiva de frutos do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 11, p. 1637–1642, 2006.
- SOUZA, V. H. S. *et al.* Evaluation of the interaction between a harvester rod and a coffee branch based on finite element analysis. **Computers And Electronics In Agriculture**, v. 150, p. 476-483, 2018.

TAVARES, T. de O. *et al.* Operational performance of the mechanized picking of coffee in four soil slope. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 48, p. 4857-4863, 2016.

THOMAZIELLO, R. A. Uso da poda no cafeeiro: por que, quando e tipos utilizados. **Revista Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 1, n. 12, p. 33-36, 2013.

TINOCO, H. A. *et al.* Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of Coffea arabica L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 108, p. 17-27, 2014.

TINOCO, H. A. Modeling elastic and geometric properties of Coffea arabica L. var. Colombia fruits by an experimental-numerical approach. **International Journal of Fruit Science**, v. 17, n. 2, p. 159-174, 2017.

VELLOSO, N. S. *et al.* Modal properties of coffee plants via numerical simulation. **Computers And Electronics In Agriculture**, v. 175, p. 105552, 2020.

VILLAR, F. M. M. *et al.* Elasticity modulus and damping ratio of macaw palm rachillas. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, 2017.

VILLIBOR, G. P. *et al.* Determination of modal properties of the coffee fruit-stem system using high speed digital video and digital image processing. **Acta Scientiarum Technology**, v.38, n.1, p.41-48, 2016.

ZAMBOLIM, L. **Tecnologia de produção de café com qualidade**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 648 p.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals: Its Basis and Fundamentals. **Butterworth-Heinemann**, 733 p., 2013.

CAPÍTULO 3 - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DO RAMO DO CAFEIEIRO

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é líder mundial em produção e exportação de café, gerando renda, empregos e contribuindo significativamente para a economia do país. Adicionalmente, o país ocupa a segunda posição como maior consumidor do produto. Segundo a Organização Internacional do Café (ICO, 2020), a produção mundial para a safra 2018/2019 foi de mais de 170 milhões de sacas de café (60 kg por saca). A importância brasileira no cenário produtivo mundial pode ser comprovada no Primeiro Levantamento da Safra de 2020 realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020) com estimativa da produção, apresentando bialidade positiva, alcançando entre 57 milhões e 62 milhões de sacas beneficiadas.

Atribuem-se às boas práticas de gestão a adoção de novas tecnologias pelos produtores, o aumento da produtividade e a redução dos custos na atividade cafeeira. Além disso, Stocker *et al.* (2019) comentam que a qualidade dos produtos agrícolas tem mudado durante os últimos anos e tem forte influência na determinação de preços dos produtos, devido à alta exigência demandada pelos consumidores de café. De acordo com os autores, diferentes tipos de produto final, como exemplo, pó e cápsula, além de marca, selo de pureza e critérios qualitativos como sabor e aroma, são os que mais influenciam o consumidor em sua decisão de compra do café.

A qualidade do produto cafeeiro está altamente relacionada a vários fatores, sendo alguns deles: os tratos culturais, processo de colheita, pós-processamento e o beneficiamento (BOAVENTURA *et al.*, 2018; GUIMARÃES; CASTRO JÚNIOR; ANDRADE, 2016; PRIETO *et al.*, 2008). De acordo com Santos *et al.* (2010b), as perdas na qualidade podem variar de 10 a 20% quanto ao aspecto, 40% em relação à bebida e até 60% para café de bebida ruim.

O constante aprimoramento de equipamentos utilizados na colheita do café se mostra essencial a fim de reduzir os custos desta operação que é considerada a mais onerosa da cadeia produtiva da cultura (OLIVEIRA *et al.*, 2007b; SANTINATO *et al.*, 2014). Os autores Cunha *et al.* (2016) e Santinato *et al.* (2015) destacam a diminuição dos custos ao se substituir a mão de obra da colheita manual por colhedoras mecanizadas. De acordo com Oliveira *et al.* (2007a), a redução dos custos operacionais totais com a colheita mecanizada ultrapassa 60% se comparados à colheita manual. Além disso, os autores comentam que, com a utilização de

velocidade de avanço e número de passadas corretos, menores são os custos operacionais, com consequente aumento na eficiência de colheita.

A mecanização da cultura ocorre principalmente nas áreas mais planas do cerrado podendo ser implantada inclusive em lavouras irrigadas (ORTEGA; JESUS, 2011; CASSIA *et al.*, 2013; TAVARES *et al.*, 2016), contudo modelos de colhedoras estão sendo desenvolvidos também para regiões montanhosas, como estudado por Oliveira *et al.* (2014). Desta forma, o uso de derriçadores portáteis para a colheita semi-mecanizada também se demonstra uma boa alternativa para a redução da demanda por mão de obra (MEJÍA; TASCÓN; URIBE, 2013).

Durante a fase de colheita do café, a arquitetura da planta e a desuniformidade da maturação dos frutos influenciam diretamente no processo. A colheita pode ser descrita em etapas: derriça ou catação é a primeira, seguida de varrição e recolhimento, terminando com a terceira, abanação dos frutos. Na fase inicial, podem ser colhidos todos os frutos, ou somente os maduros de forma seletiva (SOUZA; QUEIROZ; RAFULL, 2006).

O fruto considerado no estágio maduro, também conhecido como “cereja”, é considerado o ponto ideal de colheita. O desprendimento de frutos verdes é indesejável, tendo em vista que somente frutos maduros têm todas as características químicas necessárias para obter um café de boa qualidade (OLIVEIRA *et al.*, 2017a, PRIETO *et al.*, 2014, ANGÉLICO *et al.*, 2011). Por isso, a importância da derriça seletiva e retirada adequada de impurezas na fase de pós-colheita ou mesmo de beneficiamento. Desta forma, a colheita mecanizada de café é considerada eficiente quando há a máxima derriça de frutos maduros, baixos índices de recolheita, além de baixa desfolha e quebra de ramos, conforme observado por Souza *et al.* (2005).

A força necessária para o desprendimento dos frutos é um parâmetro que influencia em uma colheita mecanizada eficiente. Os estudos de Silva *et al.* (2010) destacam que há diferenças na força de desprendimento entre frutos verdes e cerejas, ao longo do período de maturação e até mesmo entre cultivares. Ainda segundo os autores, foi observado um aumento na força de desprendimento de frutos verdes, quando comparados aos frutos cerejas, de: 20 a 35% para a cultivar Mundo Novo, 17 a 26% para Icatú e, de 27 a 34% para Catuaí. Já Li *et al.* (2013) constataram que a força para desprender os frutos não depende somente dos ajustes nas colhedoras, mas também de fatores climáticos e nutricionais das plantas que, por se tratar de material biológico, reage quando submetido a diferentes níveis de esforços externos.

O comportamento dinâmico do cafeeiro tem sido estudado por meio de experimentos laboratoriais, de campo, ou mesmo a partir de simulações computacionais empregando-se modelos matemáticos, com abordagens analíticas e numéricas (CIRO, 2001; ARISTZÁBAL;

OLIVEROS; ALVARES, 2003; SANTOS *et al.*, 2010a, 2010b). O método de elementos finitos, ferramenta computacional que permite a solução de um sistema de equações diferenciais, possibilita uma melhora significativa na modelagem de sistemas físicos. Este método foi utilizado por Carvalho, Magalhães e Santos (2016) para avaliar o comportamento mecânico de uma planta de café. Os resultados das simulações numéricas obtidos pelos autores, usando um modelo tridimensional de modelagem do cafeeiro, mostraram a viabilidade de prever deslocamentos dos ramos de café por meio de análises estáticas a partir do método de elementos finitos. Tinoco *et al.* (2014) e Santos *et al.* (2015) corroboram com o estudo e concluem que a modelagem matemática contribui de forma significativa no estudo da colheita seletiva e auxílio no desenvolvimento de máquinas e equipamentos agrícolas. No entanto, tal processo precisa ser mais bem estudado, como por exemplo a influência da vibração das hastes e a velocidade da colhedora no processo de colheita mecanizada do café (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

No entanto, para a realização do estudo de diferentes cenários são demandados, durante a simulação computacional, parâmetros de entrada referentes às propriedades físicas, mecânicas e geométricas do sistema estudado. De acordo com Guedes (2011), o conhecimento prévio das propriedades dinâmicas dos frutos e da planta é necessário para o aperfeiçoamento de máquinas destinadas à colheita do café. O autor acrescenta que testes laboratoriais experimentais podem auxiliar no desenvolvimento de projetos de máquinas e parâmetros de colheita mais eficaz. Em um estudo realizado por Wu *et al.* (2016), observou-se a variação de propriedades como módulo de elasticidade, massa específica e razão de Poisson em modelagem de sistemas mecânicos multicorpos. Ainda de acordo com os autores, as incertezas das propriedades do material podem ser explicadas por sua distribuição assimétrica no sistema.

Villibor *et al.* (2019) comentam a importância da identificação das propriedades físico-geométrica-mecânicas da planta cafeeira e análise das suas variações, visto que elas influenciam significativamente os resultados obtidos nas simulações computacionais. Já Coelho *et al.* (2016) observaram, a partir da análise da influência da variabilidade das propriedades mecânicas e empregando o método de elementos finitos estocástico, mudanças nas frequências naturais do sistema cafeeiro. Outros autores corroboram com tais resultados, identificando a grande variabilidade nas propriedades físicas do sistema ramo-pedúnculo-fruto e, com isso, alterações na resposta dinâmica (COELHO *et al.*, 2015; TINOCO *et al.*, 2014).

Com base nesse contexto, o presente capítulo foi desenvolvido com o objetivo de determinar, de forma experimental, as propriedades físico-mecânicas do ramo da planta do café,

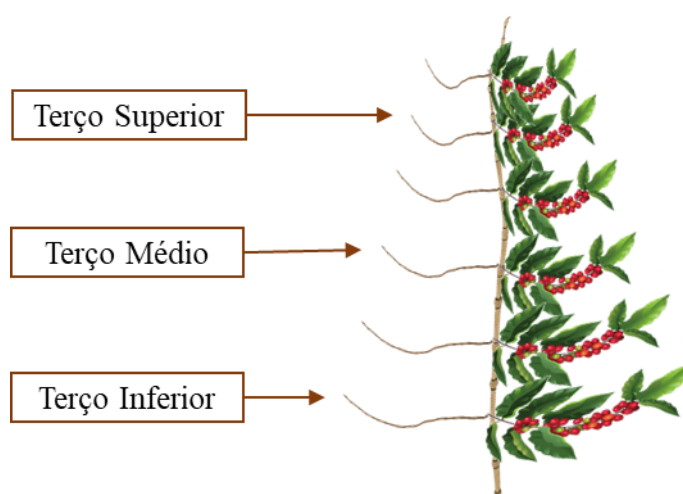
assim como avaliar os possíveis efeitos da interação entre a posição na planta e a posição dos corpos de prova obtidos ao longo do ramo sobre essas propriedades.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em lavoura experimental, nas dependências da Universidade Federal de Lavras, região sul do estado de Minas Gerais. Foram coletados os ramos plagiotrópicos de *Coffea arabica* L., cultivar Catuaí-vermelho (IAC 144), retirados de forma rente ao ramo ortotrópico com utilização de tesoura de poda. As plantas foram selecionadas de forma randômica, evitando retirar ramos, mesmo que em diferentes posições, ao longo de plantas já utilizadas. Para isso, as mesmas foram demarcadas. As amostras foram coletadas sempre pela manhã e os ensaios realizados durante o mesmo dia da coleta, no período maio/2019 a junho/2019. Os brotos que saem do ramo ortotrópico, que não são considerados plagiotrópicos, foram evitados neste estudo.

A fim de analisar a variação das propriedades físico-mecânicas na planta de café, foram coletados ramos em diferentes posições (ao longo do ramo ortotrópico): terço superior, médio e inferior, conforme apresentado na Figura 3.1. A escolha dos ramos deu-se de forma visual, analisando as características do tecido, já que diferentes partes apresentam maior ou menor desenvolvimento lenhoso. Foram coletadas 20 repetições para cada posição no cafeeiro.

Figura 3.1 – Posição de coleta dos ramos na planta.

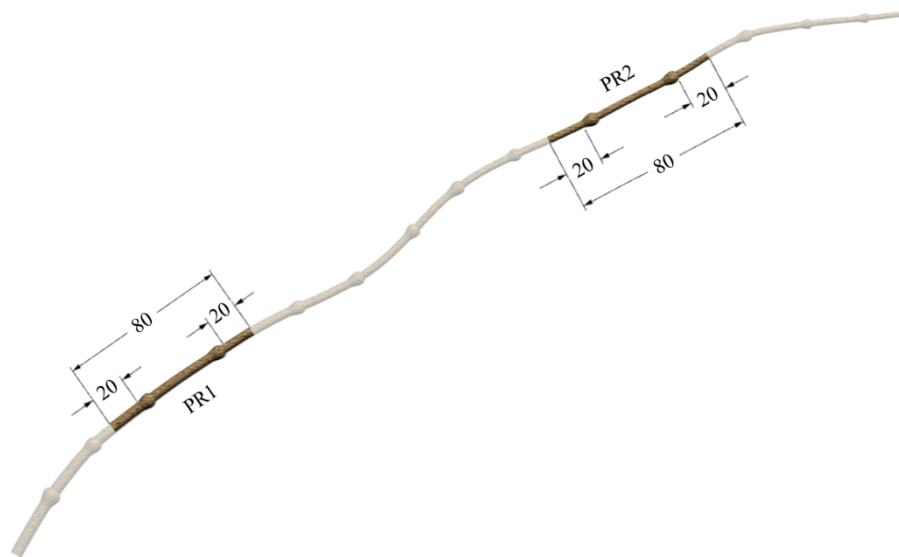


Fonte: Do autor (2020).

Em relação aos ramos coletados, considerou-se o tamanho suficiente para a confecção de dois corpos de prova (CP). Por possuírem dimensões menores daquelas mínimas para

confeção de CPs normatizados, optou-se por um ensaio de tração do tipo não padronizado, no entanto as normas regidas pela NBR 7190 (ABNT, 1997) foram adotadas como referência. Os CPs foram confeccionados de acordo com as dimensões apresentadas na Figura 3.2 e, posteriormente, identificados de acordo com sua posição no ramo: PR1 próximo ao corte realizado junto ao ramo ortotrópico; PR2 próximo à extremidade livre do ramo. Nos corpos de prova confeccionados foram consideradas, em suas extremidades, frações de 20 mm que foram empregadas para fixação dos corpos de prova junto as garras da máquina de ensaio universal.

Figura 3.2 – Método de obtenção dos corpos de prova, PR1 e PR2, medidas em milímetros.



Fonte: Do autor (2020).

Após confecção dos CPs, foram determinadas a massa, volume, massa específica e módulo de elasticidade dos corpos de prova coletados considerando sua posição na planta (PP) e posição ao longo do ramo (PR).

As massas dos corpos de prova foram determinadas utilizando uma balança digital semi-analítica, modelo AD500, fabricada por Marte Científica[®], com resolução de 0,001 g. O método de imersão foi utilizado para determinação do volume, com o auxílio de uma proveta de 10 mL com resolução de 0,1 mL. Já a massa específica dos ramos foi dada por meio da razão entre os valores experimentais de massa e volume.

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada em uma máquina de ensaios universal, modelo EMIC 23-20, fabricada pela Instron[®], equipada com célula de carga máxima de 20 kN. Na máquina, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração, paralelo às fibras, fixadas por garras nas extremidades e submetidas a carregamento na região central, conforme apresentado na Figura 3.3. Foi aplicada uma pré-carga de 2 N para tensionamento

prévio do CP e o ensaio foi realizado a uma taxa de deslocamento de $0,01 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ com duração de tempo correspondente à saída da linearidade, após tensão máxima.

Figura 3.3 – Configuração experimental, corpo de prova fixado em duas garras para ensaio de tração.



Fonte: Do autor (2020).

Os dados foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2×3 , com 20 repetições. Os fatores considerados na análise foram: duas posições ao longo do ramo (Figura 3.2) e três posições na planta (Figura 3.3). O efeito dos fatores estudados sobre o comportamento da massa específica e do módulo de elasticidade foi analisado por meio de teste Tukey, considerando-se um nível de significância de 5%. O software R (CORE TEAM, 2020) foi utilizado para a realização das análises estatísticas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os corpos de prova do ramo apresentaram massa específica média igual a $0,945 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ com desvio padrão de $0,049 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Para as médias das massas específicas, não foram observadas diferenças significativas para os fatores posição na planta (PP) e posição no ramo (PR) e, conseqüentemente, sua interação, de acordo com o teste F, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resultados para a análise de variância referente à influência dos fatores posição na planta e posição no ramo sobre a massa específica dos ramos.

Fonte da variação	GL	SQ	QM	F	F crítico	Pr>Fc
PP	2	0,002744	0,0013717	0,635349	3,075853	0,531616
PR	1	0,006640	0,0066398	3,075353	3,92433	0,082175
PP x PR	2	0,001939	0,0009696	0,449096	3,075853	0,639329
Resíduo	114	0,246132	0,0021590			
Total	119	0,257455				
CV = 4,88%						

Legenda: CV = Coeficiente de variação.

Fonte: Do autor (2020).

Os resultados da estatística descritiva para a massa específica dos ramos, considerando-se a posição na planta e posição ao longo do ramo, são apresentados de forma sintetizada na Tabela 3.2 e na Figura 3.4. De acordo com o critério de classificação proposto por Warrick e Nielsen (1980), os valores do coeficiente de variação (CV) para massa específica média revelaram-se como de baixa dispersão (<12%). Desta forma, o conjunto de dados pode ser considerado como razoavelmente homogêneo, validando a comparação entre os valores dessa variável-resposta.

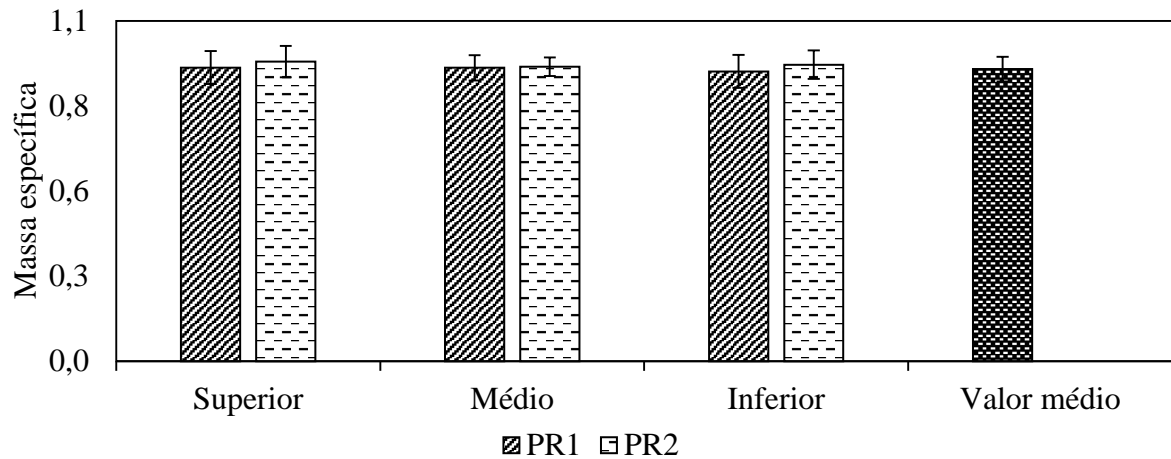
Tabela 3.2 – Estatística descritiva referentes a massa específica dos ramos em relação a posição na planta e posição ao longo do ramo.

	Superior		Médio		Inferior		Total
	PR1	PR2	PR1	PR2	PR1	PR2	
Média	0,950	0,969	0,949	0,952	0,937	0,959	0,942
Desvio padrão	0,053	0,051	0,041	0,030	0,053	0,046	0,049
Variância	0,003	0,003	0,002	0,00	0,003	0,002	0,002
CV	5,58%	5,26%	4,32%	3,15%	5,65%	4,79%	

Legenda: CV = Coeficiente de variação em relação à massa específica média total.

Fonte: Do autor (2020).

Figura 3.4 – Massa específica média por posição na planta.

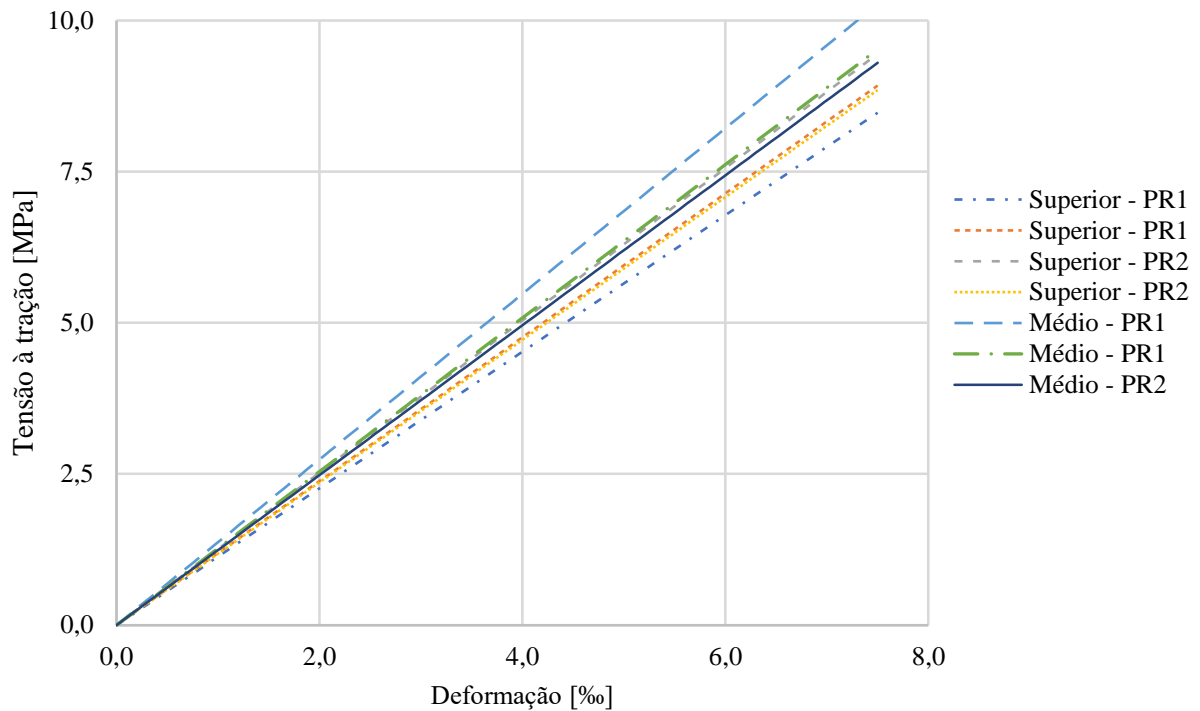


Fonte: Do autor (2020).

Os autores Coelho *et al.* (2015) e Filgueiras *et al.* (2000) determinaram a massa específica para o ramo e obtiveram valores iguais a 0,900 g.cm⁻³ e 0,978 g.cm⁻³, respectivamente. Os resultados encontrados por Coelho *et al.* (2015) para a variedade Catuaí Vermelho IAC 144, abaixo daquele encontrado nesse estudo, pode ser explicado pelo tipo de manejo do campo cafeeiro, diferença entre idade, além das condições climáticas adversas (ARISTZÁBAL; OLIVEROS; ALVARES, 2003; RODRÍGUEZ *et al.*, 2006). Adicionalmente, o estudo feito por Coelho *et al.* (2015) contemplou um número menor de amostras e utilizou de método randômico de coleta, o que pode ter influenciado na aquisição involuntária de ramos com mais ou menos parte lenhosa, devido à grande variabilidade existente na planta. Já Filgueiras *et al.* (2000) utilizou um outro cultivar em seu estudo, a UFV 22-37, com cafezal de idade média de 10 anos, utilizando “madeira verde” como corpo de prova.

O módulo de elasticidade médio encontrado foi de 1,24 GPa com desvio padrão de 0,13 GPa. A curva tensão vs. deformação para cada posição na planta e posição no ramo pode ser observada na Figura 3.5. Os valores encontrados correspondem à parte linear elástica do ensaio de tração.

Figura 3.5 – Curva tensão vs. deformação dos corpos de prova em relação a posição na planta.



Fonte: Do autor (2020)

Na Tabela 3.3 é possível observar os resultados para análise de variância considerando módulo de elasticidade para os fatores posição na planta e posição no ramo. Nota-se que a interação entre os fatores posição na planta (PP) e posição ao longo do ramo (PR) apresentou diferença significativa. Dessa forma, procedeu-se o desdobramento e a análise da influência dos fatores sobre o módulo de elasticidade do ramo (Tabela 3.4).

Tabela 3.3 – Resultados para a análise de variância referente à influência dos fatores posição na planta e posição no ramo sobre o módulo de elasticidade dos ramos.

Fonte da Variação	GL	SQ	QM	F	F crítico	Pr>Fc
PP	2	262378	131189	18,21409	3,168246	0,000001
PR	1	20873	20873	2,897932	4,019541	0,094444
PP x PR	2	73103	36552	5,074781	3,18246	0,009559
Resíduo	114	388942	7203			
Total	119	745296				

CV = 6,88%

Legenda: CV = Coeficiente de variação.

Fonte: Do autor (2020).

De forma análoga ao critério utilizado para massa específica (WARRICK; NIELSEN, 1980), o valor do coeficiente de variação encontrado para o módulo de elasticidade pode ser

considerado como de baixa dispersão em relação à média (<12%). Tal medida deve ser considerada, pois, quanto menor o valor do CV (%), mais os dados estão concentrados em torno da média, como um conjunto mais homogêneo.

Tabela 3.4 – Desdobramento: Posição na planta dentro de cada nível de Posição no ramo.

Posição na planta	Posição no ramo	
	PR1 [GPa]	PR2 [GPa]
Superior	1,13Aa	1,19Aa
Médio	1,26Ab	1,18Aa
Inferior	1,37Ac	1,27Ba

Legenda: Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna são estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2020).

O fator posição na planta, como esperado, apresentou diferenças significativas entre os níveis de posição no ramo. Os valores obtidos para CP1, com as médias apresentadas no desdobramento do efeito da interação fatorial na Tabela 4, foram significativos. Para o CP2 as médias encontradas foram estatisticamente iguais.

Os valores encontrados para os ramos são crescentes da parte superior da planta até a parte inferior, o que demonstra uma maior rigidez nesta fração da planta. De forma geral, os ramos inferiores apresentaram maior parte lenhosa e maior diâmetro, já os superiores apresentaram diâmetros menores e maior parte de ramo novo, com parte lenhosa menos desenvolvida. Latorraca *et al.* (2000) observaram que as propriedades de corpos lenhosos variam conforme o crescimento da árvore. Os autores explicam que, com o avanço da idade, há o consequente aumento de espessura da parede celular e a diminuição da largura das células.

Diversos estudos entre madeiras juvenis e adultas podem explicar a diferença do módulo de elasticidade aqui encontrados (EVANS; SENFT; GREEN, 2000; KRETSCHMANN; BENDTSEN, 1992; McALISTER; CLARK; SAUCIER, 1997; ROWELL, Roger; HAN; ROWELL, Jeffrey, 2000). A madeira juvenil é caracterizada, em geral, por sua menor densidade, paredes celulares mais finas e menor resistência. De forma análoga ao que acontece nas madeiras juvenis, o módulo de elasticidade é diretamente afetado por ramos contendo parte lenhosa menos desenvolvida.

Filgueiras *et al.* (2000) encontrou valores entre 1,79 GPa e 3,56 GPa para variedade Catuaí Vermelho UFV-2237. O autor utilizou o método de flexão com força aplicada, entre 0,431 N e 2,182 N, no centro do ramo para determinação do módulo de elasticidade, diferentemente do método de ensaio de tração realizado neste estudo. O método utilizado pelos

autores considerou o ramo com uma viga engastada em umas extremidades. A determinação do módulo de elasticidade por meio do ensaio de flexão leva em consideração a seção transversal do corpo de prova que, por ser assimétrico, apresenta diferentes diâmetros do começo ao fim do ramo. A utilização de único valor para todo o corpo de prova pode distanciar o valor encontrado do valor real. Além disso, o estudo realizado considerou todo o ramo como um único corpo de prova, diferentemente do ramo de tamanho padronizado. Realizado neste estudo. Tal diferenciação nos métodos empregados pode explicar a divergência dos valores encontrados neste estudo.

Coelho *et al.* (2015) encontraram 1,94 GPa com desvio padrão 0,62 GPa para Catuaí Vermelho IAC 144. Os autores utilizaram o ensaio mecânico de flexão como método de obtenção do módulo de elasticidade dos ramos. De forma distinta ao empregado neste estudo, os autores utilizaram amostras de 250 mm de comprimento, bi apoiadas nas extremidades, submetidas a carregamento na região central. A velocidade de ensaio foi de $1,0 \text{ mm s}^{-1}$ e os deslocamentos foram capturados através de uma câmera digital. O módulo de elasticidade foi determinado por meio do processamento de vídeo e análise do valor de flecha de deformação de 10 mm e a força de flexão correspondente. O método utilizado pelos autores e o utilizado neste estudo podem explicar a diferenciação nos valores encontrados de CV, de 31,96% e 10,48%, respectivamente. A utilização de máquina dedicada para o ensaio mostrou-se eficaz na obtenção de valores com baixo índice de dispersão.

O módulo de elasticidade médio para o ramo de Catuaí Vermelho determinado por Coelho *et al.* (2017) foi de 4,64 GPa. Os autores utilizaram um algoritmo que comparou as frequências naturais determinadas de forma experimental com as simuladas por meio do método de elementos finitos. As diferenças encontradas pelo autor e as determinadas neste estudo podem ser explicadas devido a sensibilidade do algoritmo utilizado na determinação do módulo de elasticidade.

Segundo Villibor *et al.* (2019), é de extrema importância identificar as propriedades de rigidez do sistema fruto-pedúnculo-ramo do café, em diferentes estádios de maturação, uma vez que se trata de um parâmetro que influencia na modelagem e resultado de simulações computacionais. Ainda segundo os autores, o caule do café e sua rigidez variam em relação à direção das fibras, o mesmo podendo ser observado para a madeira de ramos ortotrópicos e plagiotrópicos da planta. Coelho *et al.* (2015) afirmam que o teor de água do caule do café pode influenciar significativamente sua rigidez.

Demais estudos, como os realizados por Aristzábal, Oliveros e Alvares (2003) e Rodríguez *et al.* (2006) citam parâmetros climáticos, tratos culturais, idade do cafeeiro, localização, variedade, como influências na divergência do resultado obtido.

4 CONCLUSÃO

Quanto a determinação das propriedades físico-mecânicas do ramo plagiotrópico da planta cafeeira, pode-se concluir que:

- os corpos de prova do ramo apresentaram massa específica média igual a $0,945 \text{ g.cm}^{-3}$ com desvio padrão de $0,049 \text{ g.cm}^{-3}$.
- conforme posição na planta, não foram encontradas diferenças significativas entre as médias de massa específica média para os terços superior, médio e inferior, ao longo do ramo ortotrópico. Também não houve diferença significativa das médias de massa específica para os corpos de prova coletados a partir da parte mais extrema do ramo assim como na parte próxima ao ramo ortotrópico.
- o módulo de elasticidade médio encontrado foi de $1,24 \text{ GPa}$ com desvio padrão de $0,13 \text{ GPa}$.
- os valores encontrados para módulo de elasticidade médio são crescentes para os ramos da parte superior em direção à parte inferior da planta. A maior rigidez encontrada nesta fração da planta pode ser explicada pela presença de maior parte lenhosa e maior diâmetro, se comparados à ramos novos.

REFERÊNCIAS

- ANGÉLICO *et al.* Diferentes estádios de maturação e tempos de ensacamento sobre a qualidade do café. **Coffee Science**, v.06, n.1, p.1–10, 2011.
- ARISTZÁBAL, I. D.; OLIVEROS, T. C. E.; ALVARES, M. F. Mechanical harvest of coffee applying circular and multidirectional vibrations. **Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)**, v.46, p.205-209, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira, Rio de Janeiro, 1997.
- BOAVENTURA, P. S. M. *et al.* Value co-creation in the specialty coffee value chain: the third-wave coffee movement. **Revista de Administração de Empresas**, v. 58, n. 3, p. 254-266, 2018.
- CARVALHO, E. de A.; MAGALHÃES, R. R.; SANTOS, F. L. Geometric modeling of a coffee plant for displacements prediction. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.123, p. 57–63, 2016.
- CASSIA, M. T. *et al.* Quality of mechanized coffee harvesting in circular planting system. **Ciência Rural**, v. 43, n. 1, p. 28–34, 2013.
- CIRO, H. J. Coffee harvesting I: Determination of the natural frequencies of the fruit stem system in coffee tress. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 17, n. 4, p. 475-479, 2001.
- COELHO, A. L. de F. et al . Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.3, p. 286-292, 2015.
- COELHO, A. L. d. F. *et al.* Dynamic behavior of the coffee fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 1–10, 2016.
- COELHO, A. L. d. F. et al. Dynamic test for determining the elastic modulus of coffee fruit-stem-branch system. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, p. 579-586, 2017.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de café, v. 6– Safra 2020, n. 1 - **Primeiro levantamento**, Brasília, p. 1-62, janeiro 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em: 05 mar. 2020.
- CORE TEAM, R *et al.* R: **A language and environment for statistical computing**. 2020.
- CUNHA, J. P. B. *et al.* Viabilidade técnica e econômica de diferentes sistemas de colheita do café. **Coffee Science**, v. 11, n. 3, p. 416–425, 2016.
- EVANS II, J.W.; SENFT, J. F.; GREEN, D.W. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Products Journal**, v.50, n.7/8, p.75-87. 2000.

FERREIRA JUNIOR, L. G. *et al.* Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras. **Ciência Rural**, v. 46, n. 2, p. 273-278, 2016.

FILGUEIRAS, W. H.; QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P.; LUCIA, R. M. D. Propriedades mecânicas da madeira do café. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2000, Poços de Calda. **Anais do Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil – Resumos Expandidos**, Brasília – DF: EMBRAPA CAFÉ e MINASPLAN, 2000, v.2., p. 1081-1084.

GUEDES, D. M. **Efeito da utilização de frequências de vibração na faixa de 35 a 55 Hz sobre a eficiência de derriça do café**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

GUIMARÃES, E. R., CASTRO JÚNIOR, L. G., ANDRADE, H. C. C. A terceira onda do café em Minas Gerais. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 18, n. 3, p. 214-227, 2016.

ICO, International Coffee Organization. **Historical Data on the Global Coffee Trade**. London, 2020. Disponível em: <<http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2020.

KRETSCHMANN, D.E.; BENDTSEN, B.A. Ultimate tensile stress and modulus of elasticity of fast-grown plantation loblolly pine lumber. **Wood and Fiber Science**, v.24, n.2, p.189-203, 1992.

LATORRACA, J.V.; ALBUQUERQUE, C.E.C. **Efeito de rápido crescimento sobre as propriedades da madeira**. *Revista Floresta e Ambiente*, v.7, n.1, p.279-291, 2000.

LI, Z. *et al.* Internal mechanical damage prediction in tomato compression using multiscale finite element models. **Journal of Food Engineering**, v. 116, n. 3, p. 639–647, 2013.

McALISTER, R.; CLARK, A.; SAUCIER, J. Effect of initial spacing on mechanical properties of lumber sawn from unthinned slash pine at age 40. **Forest Products Journal**, v.47, n.7/8, p.107-9. 1997.

MEJÍA, F. Á.; TASCÓN, C. E. O.; URIBE, J. R. S. Evaluation of mechanical beaters in coffee harvesting. **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, v. 66, n. 1, p. 6919–6928, 2013.

OLIVEIRA, E. *et al.* Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.6, p.827-831, 2007a.

OLIVEIRA, E. *et al.* Influência da colheita mecanizada na produção cafeeira. **Ciência Rural**, v.37, n.5, p.1466-1470, 2007b.

OLIVEIRA, E. *et al.* The influence of the stick's vibration and the speed in the displacement of the harvester machine on mechanized coffee harvest process. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 3, p. 714–721, 2017.

- OLIVEIRA, M. V. M. de *et al.* Computer-aided design of a coffee-dragging device. **Ciências Agrárias**, Universidade Estadual de Londrina, v. 35, n. 5, p. 2373–2382, 2014.
- ORTEGA, A. C.; JESUS, C. M. Território café do cerrado: transformações na estrutura produtiva e seus impactos sobre o pessoal ocupado. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 49, n. 3, p. 771–800, 2011.
- PRIETO, M. *et al.* Concepto de calidad en la industria agroalimentaria. **Interciência**, v. 33, n. 4, p. 258–264, 2008.
- PRIETO, M. *et al.* Nutrição mineral do cafeeiro e qualidade da bebida. **Revista Ceres**, Viçosa, v.61, p.838-848, 2014.
- RODRÍGUEZ, A. M. *et al.* Determinación de propiedades físico-mecánicas de los frutos de café (*Coffea arabica* variedad Catuai) relacionadas con la cosecha mecanizada. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v.15, p.22-27, 2006.
- ROWELL, R.M.; HAN, J.S.; ROWELL, J.S. Characterization and factors effecting fiber properties. In: FROLLINI, E.; LEÃO, A.L.; MATTOSO, L.H.C. (Ed.). **Natural polymers and agrofibers composites: São Carlos: IQSC/USP**, p.115-33, 2000.
- SANTINATO, F. *et al.* Café de qualidade. **Cultivar Máquinas**, n.138, p.10-13, 2014.
- SANTINATO, F. *et al.* Análise econômica da colheita mecanizada do café utilizando repetidas operações da colhedora. **Coffee Science**, v. 10, n. 3, p. 402–411, 2015.
- SANTOS, F. L. *et al.* Analysis of the coffee harvesting process using an electromagnetic shaker. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 3, p. 373–378, 2010a.
- SANTOS, F. L. *et al.* Efeito da frequência e amplitude de vibração sobre a derriça de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Agriambi)**, v. 14, n. 4, p. 426-431, 2010b.
- SANTOS, F. L. *et al.* Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum. Technology**, v.37, n. 1, p. 11-17, 2015. Disponível em < <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i1.19814>>. Acesso em 21 out. 2020.
- SILVA, F. C. da *et al.* Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiros ao longo do período de colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 468–474, 2010.
- SOUZA, C. M. A. de *et al.* Desempenho de derriçadora portátil de frutos do cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.791-800, 2005.
- SOUZA, C. M. A; QUEIROZ, D. M. DE; RAFULL, L. Z. D. Derriçadora portátil na colheita total e seletiva de frutos do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1637-1642, 2006.
- STOCKER, F. *et al.* Multicriteria analysis in purchasing decision: study of coffee consumer behavior. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 9, p. 17018-17041, 2019.

TAVARES, T. de O. *et al.* Operational performance of the mechanized picking of coffee in four soil slope. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 48, p. 4857–4863, 2016.

TINOCO, H. A. *et al.* Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of *Coffea arabica* L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.108, p.17-27, 2014.

VILLIBOR, G. P. *et al.* Dynamic behavior of coffee fruit-stem system using modeling of flexible bodies. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 166, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105009>>. Acesso em: 31 mar. 2020.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). **Applications of soil physics**. New York: Academic, cap.2, p.319-344, 1980.

WU, J. *et al.* Dynamic computation of flexible multibody system with uncertain material properties. **Non-linear Dynamics**, v. 85, p. 1231–1254, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11071-016-2757-6>>. Acesso em: 31 mar. 2020.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE MODAL DO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO-RAMO DO CAFEIEIRO

1 INTRODUÇÃO

O café é um produto de destaque na economia nacional brasileira. O produto move, direta ou indiretamente, toda a cadeia de consumo contemplando o mercado de produtos agrícolas, transportes, logística e distribuição, gerando emprego nas fazendas, armazéns e indústrias de beneficiamento do produto, até chegar na mesa do consumidor final.

Nas últimas décadas ocorreram significativas mudanças na forma de produção e hábitos de consumo do produto, buscando por maior qualidade e meios sustentáveis de produção, que envolvam aspectos ambientais, econômicos e sociais (GUIMARÃES; CASTRO JÚNIOR; ANDRADE, 2016; PRIETO *et al.*, 2008; SPERS *et al.*, 2016). Com o aumento da demanda e busca por maior produtividade, fez-se necessária redução de custos operacionais no ciclo de produção do café. A colheita é considerada a etapa mais onerosa da cadeia produtiva, já que emprega grande quantidade de mão de obra. Atualmente, essa dependência da mão de obra, tornou-se um dos principais gargalos do cultivo do café no país, o que se torna mais crítico em regiões montanhosas com dificuldade de mecanização.

A atividade cafeeira tem se tornado cada vez mais mecanizada, nos tratos culturais e no pós-processamento/beneficiamento e, principalmente, no processo de colheita (BOAVENTURA *et al.*, 2018; GUIMARÃES; CASTRO JÚNIOR; ANDRADE, 2016; SILVA *et al.*, 2006), já que é um meio de reduzir custos e aumentar a capacidade do sistema de colheita (BARBOSA; SALVADOR; SILVA, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2007). Destacando-se as lavouras cafeeiras da região do cerrado brasileiro que favorecem a mecanização devido aos relevos mais planos e, com isso, o sistema de plantio uniforme (FERNANDES; SANTINATO F.; SANTINATO R., 2012; ORTEGA; JESUS, 2011; TAVARES *et al.*, 2016). Santinato *et al.* (2013) observaram que a mecanização permitiu reduzir em até 60% os custos totais de produção. Silva *et al.* (2013) observaram que as reduções de custos operacionais foram de 46% para colheita na planta e de 67% para manejo de planta e mecanização de solo, em relação à colheita manual.

A colheita mecanizada de frutos é realizada por vibrações mecânicas que, por meio de hastes engastadas em cilindros oscilantes, derriçam os frutos quando a aplicação de forças inerciais se torna maior do que as forças necessárias para seu desprendimento. Souza *et al.* (2005) explicam que o número de ciclos necessários para desprender um fruto é proporcional

ao tempo de desprendimento, e que o estágio de maturação indica o tempo de aplicação do parâmetro vibracional visando uma colheita seletiva.

O princípio de vibrações mecânicas também é utilizado para efetuar o desprendimento de frutos de outras culturas, como os de pinus e da oliveira. Castro-García, Blanco-Roldán e Gil-Ribes (2011) estudaram a frequência de resposta de árvores de pinus influenciada por um agitador de tronco. Os autores verificaram que, para diferentes estádios de maturação dos frutos, fatores como amplitude, aceleração e tempo de vibração influenciaram na colheita seletiva, a exemplo do que ocorre também na cultura do café. No caso da oliveira, Sola-Guirado *et al.* (2014) analisaram a eficiência da colheita, porcentagem de frutos colhidos, ao comparar diversas formas de derrça: manual, colhedora portátil, agitador de tronco e agitador de copa. Os autores concluíram que, apesar da maior porcentagem de frutos colhidos na forma manual, esse processo foi considerado mais agressivo às árvores. Desta forma, o agitador de copa foi considerado a melhor opção para desprender frutos da oliveira por vibrações mecânicas.

Uma forma de obter dados de forma precisa e em tempo hábil é usar ferramentas matemáticas e de simulação para se compreender o comportamento de sistemas físicos reais. O uso de simulações numéricas ajuda a prever o comportamento de um sistema auxiliando na tomada de decisão ainda em fase de projeto, reduzindo tempo e custos (SILVA; SILVA; MAGALHÃES, 2014). Segundo Ewins (1984), a análise modal é um conjunto de procedimentos que visa determinar, analítica e/ou experimentalmente, os parâmetros modais de uma estrutura, ou seja, frequências naturais, fatores de amortecimento e formas modais.

De forma analítica, a análise modal é realizada ao se elaborar um modelo matemático da estrutura a fim de resolver os problemas de autovalores e autovetores associados e, assim, determinar os modos de vibração, os fatores de amortecimento e as frequências naturais do sistema (EWINS, 1984; RAO, 2008). A partir da superposição modal dos modos naturais de vibração do sistema podem ser calculadas as Funções de Resposta em Frequência (FRF).

Experimentalmente, como não se dispõe do modelo do sistema, uma força de magnitude e frequência conhecida é aplicada na estrutura e são medidas as amplitudes de vibração resultantes em pontos representativos. Por meio do processamento dos sinais de excitação e resposta, consegue-se estimar as respectivas FRF. Com esse conjunto de FRFs, ao serem aplicados algoritmos de extração de parâmetros, podem ser identificadas as características modais da estrutura (EWINS, 1984; RAO, 2008).

O amortecimento é o processo responsável pela retirada de energia mecânica de um sistema dinâmico, em estado vibratório, e transmiti-la para outros mecanismos, principalmente, pela conversão em calor por forças dissipativas (DE SILVA, 2007). Pode ser classificado como:

amortecimento estrutural, interno e fluídico. As perdas de energia por atrito em juntas, parafusos e articulações semirrígidas estão associadas ao amortecimento estrutural. Já o interno está associado a efeitos termo elásticos causados por gradientes locais de temperatura e a defeitos relacionados à microestrutura do material. E por fim o fluídico, que ocorre por resistência ao arraste em meio fluídico, como exemplo, um pêndulo em movimento e sua energia térmica advinda da conversão da energia cinética através de sua dissipação no ar (COPPOLA; BRADT, 1973; GÉRADIN; RIXEN, 2014; THORBY, 2008).

Os métodos de como se determinar a razão de amortecimento do sistema são diversos e a escolha depende, principalmente, da frequência de vibração e a faixa de amortecimento (DE SILVA, 2007). Dentre as mais utilizadas está o decremento logarítmico e a largura de banda de meia potência. A determinação do amortecimento a partir do método do decremento logarítmico consiste no decréscimo da resposta acústica da estrutura após excitação (BOYCE; DIPRIMA, 2002; EWINS, 1984; RAO, 2008). Já o método de largura de banda de meia potência (*Half-Power Bandwidth* ou HPBW) tem como base a observação da resposta do sistema quando o mesmo atinge um ponto de máxima amplitude. Este valor extremo é chamado de frequência de ressonância e aproxima-se da frequência natural não-amortecida para sistemas com baixo amortecimento (MAIA; SILVA, 1997; LYON; De JONG, 1995).

Ciro (2001) determinou, de forma analítica, as frequências naturais de um sistema fruto-pedúnculo e concluiu que houve redução no valor da frequência na medida em que os frutos evoluem de estágio de maturação. Os estudos de Santos *et al.* (2010a, 2010b) concluíram que as frequências naturais tendem a diminuir na medida em que o estágio de maturação evolui de verde para cereja. Aristzábal, Oliveros e Alvares (2003) concluíram que a presença de folhas reduziu a frequência natural amortecida do cafeeiro. Outros autores corroboram com tais estudos, concluindo que a presença de frutos e folhas interferem na frequência natural do sistema (VILLIBOR *et al.*, 2016; COELHO *et al.*, 2016, TINOCO *et al.*, 2014). Desta forma, o comportamento do sistema cafeeiro, devido sua estrutura dos ramos contendo folhas e frutos, pode ser presumido como sistema sub-amortecido.

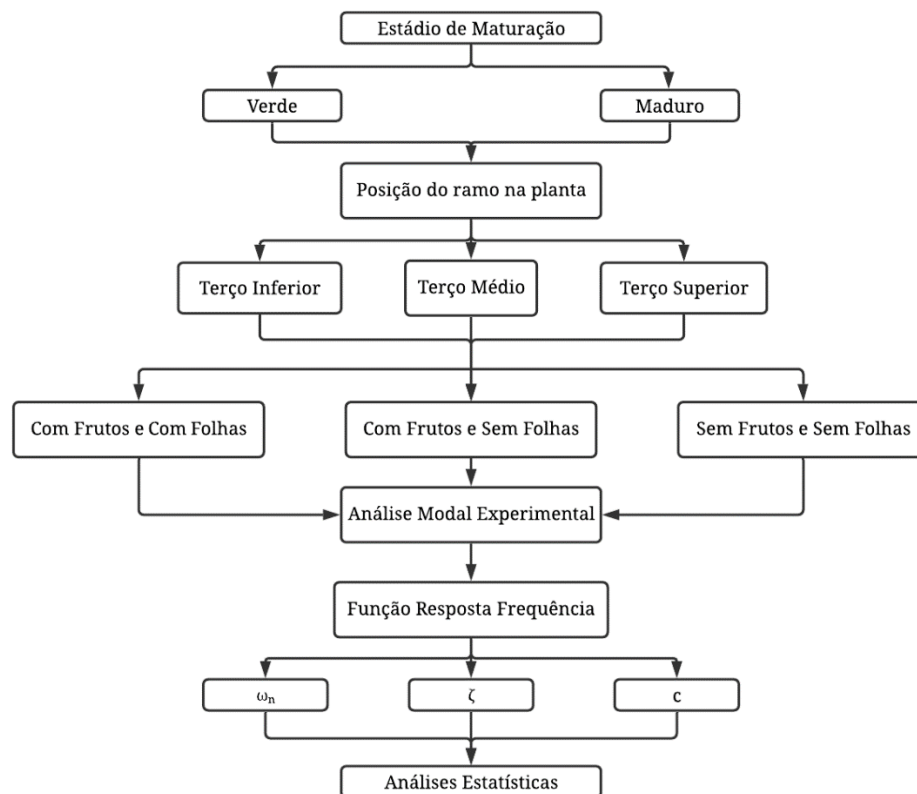
Desta forma, este capítulo teve como objetivo determinar e avaliar as características modais do sistema fruto-pedúnculo-ramo do café, tais como frequência natural, razão e coeficiente de amortecimento. Adicionalmente, avaliou-se a influência do estágio de maturação, configurações do ramo (com/sem folhas e frutos) e posição na planta em relação aos parâmetros modais do sistema.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, para a determinação dos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo-ramo, foram utilizadas amostras de ramos de café, Catuaí Vermelho, variedade IAC 144, retiradas de forma rente ao ramo ortotrópico central da planta, contendo frutos e folhas. Foram estudados ramos contendo frutos em diferentes estádios de maturação, inferido de forma visual, ou seja, ramos com frutos predominantemente verdes e ramos com frutos maduros. As amostras foram coletadas sempre pela manhã e os ensaios realizados durante o mesmo dia da coleta, no período maio/2019 a junho/2019.

De forma a representar melhor a arquitetura da planta, foram coletados ramos em diferentes posições no cafeeiro, sendo eles: terço inferior, médio e superior. A escolha dos ramos se deu de forma visual, evitando ramos com parte lenhosa muito ou pouco desenvolvida. Para cada terço da planta, foram realizados estudos em diferentes cenários (configurações do ramo), sendo eles: ramos contendo folhas e frutos, ramos contendo apenas frutos, e por último, ramos sem folhas e sem frutos. Foram realizadas oito repetições por tratamento, para cada estágio de maturação. A Figura 4.1 ilustra o diagrama de execução do experimento realizado.

Figura 4.1 – Diagrama de execução do experimento.



Fonte: Do Autor (2020).

A análise modal experimental foi desenvolvida em etapas, na ordem dos cenários de estudo, ou seja, inicialmente com ramos contendo frutos verdes e folhas e todo o desmembramento subsequente (retirada de folhas, excitação e obtenção da FRF; retirada de frutos, excitação e obtenção da FRF). Da mesma forma, foi realizado o procedimento para os ramos contendo frutos predominantemente maduros.

Nesta fase, os ramos foram instrumentados com acelerômetros de forma unidirecional, verticalmente, conforme apresentado na Figura 4.2. O acelerômetro utilizado foi o da marca PCB Piezotronics™, modelo PCB 352c33, afixados nos ramos com abraçadeiras plásticas. O martelo de impacto empregado tem as seguintes especificações: marca PCB Piezotronics™; modelo PCB 086C03 com sensor de força, ponteira "supersoft". Para coleta dos dados de aceleração advindos do acelerômetro e do martelo de impacto, foi utilizado um módulo de aquisição da marca National Instruments™, modelo NI cDAQ-9174. Os resultados foram processados no software LabView®, utilizando pacote Sound and Vibration.

Figura 4.2 – Configuração de coleta de dados. Instalação do acelerômetro no centro do comprimento do ramo (esquerda) e simulação com martelo de impacto (direita).



Fonte: Do Autor (2020).

O impacto para obtenção da FRF foi realizado na parte central do ramo, utilizando o critério de aceitação/rejeição baseado na coerência obtida em 5 impactos efetivos. A função Coerência refere-se a medida da relação entre a potência do sinal de resposta em relação à entrada. Pode ser interpretada também como sendo análoga ao coeficiente de correlação aplicado ao domínio da frequência, e como uma medida dos ruídos presentes nos sinais (RAO, 2008). Tal função pode ser utilizada na verificação da qualidade do sinal medido, sendo um valor real entre 0 e 1. Valores iguais ou próximos a 1 significam uma boa estimativa da FRF do

sistema mecânico estudado. De forma prática, os valores de coerência obtidos a cada impacto foram conferidos e, caso não estivessem acima de 0,8, ou 80%, eram rejeitados. Ressalta-se que entre cada impacto foi realizado com o ramo em estado de repouso.

Quando cargas externas são aplicadas no sistema, o mesmo pode ser expresso na forma matricial representado por equações diferenciais com múltiplos graus de liberdade, de acordo com o modelo da Equação 3.1.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{F\} \quad (3.1)$$

onde $\{F\}$ é o vetor de força, $[m]$ é a matriz de massa, $[c]$ é a matriz de amortecimento, $[k]$ é a matriz de rigidez, $\{x\}$ é o vetor de deslocamento, $\{\dot{x}\}$ é o vetor de velocidade e $\{\ddot{x}\}$ é o vetor aceleração.

Para modelos onde a vibração ocorre de forma livre e não amortecida, a Equação 3.1 pode ser simplificada por meio da Equação 3.2.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = \{0\} \quad (3.2)$$

Assumindo que as vibrações livres sejam harmônicas, pode-se reescrever o sistema conforme a Equação 3.3, a qual representa o deslocamento do sistema:

$$\{x\} = \{\varphi\}_i e^{i\omega_i t} = \{\varphi\}_i (\cos \omega_i t + i \sin \omega_i t) \quad (3.3)$$

onde, $\{\varphi\}_i$ representa o autovetor associado a i -ésima frequência natural do sistema, ω_i corresponde a frequência angular [em rad.s⁻¹] e t está associado ao tempo [s].

Os modos de vibração podem ser obtidos após operação de derivação da Equação 3.3 em relação ao tempo e substituindo na Equação 3.2. Desta forma, obtêm-se a Equação 3.4:

$$(-\omega^2[m] + [k])\{\varphi\}_i = \{0\} \quad (3.4)$$

A Equação 3.4 apresenta solução não trivial somente caso o determinante da matriz $(-\omega^2[m] + [k])$ seja igual a zero (BOYCE; DIPRIMA, 2002; ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2005). Existem, portanto, diversos métodos numéricos para determinação de todas as frequências naturais (autovalores) e modos de vibração (autovetores), dentro os mais usuais, o método Jacobi, método Jacobi Generalizado e método de redução de Guyan (BOYCE; DIPRIMA, 2002; ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013).

Os parâmetros obtidos neste estudo foram: Função Resposta de Frequência (ou Função Resposta de Impacto) e Coerência destas funções. A partir da variável FRF foram determinadas as frequências naturais, razão de amortecimento e coeficiente de amortecimento.

Os dados obtidos com a FRF foram tratados através da conversão da magnitude em decibéis (dB), utilização de filtro passa-alta (*High Pass*) que permitiu a passagem das

frequências de amplitudes altas com facilidade e atenuou a amplitude das frequências abaixo da amplitude de corte de 5 dB. Os dados tratados foram plotados e, assim, selecionados os picos representativos, com a utilização do *software* MATLAB®. A partir do terceiro pico, a curva tornou-se inconstante e sem picos proeminentes. Desta forma, foram selecionadas as três primeiras frequências naturais, correspondentes aos três primeiros picos.

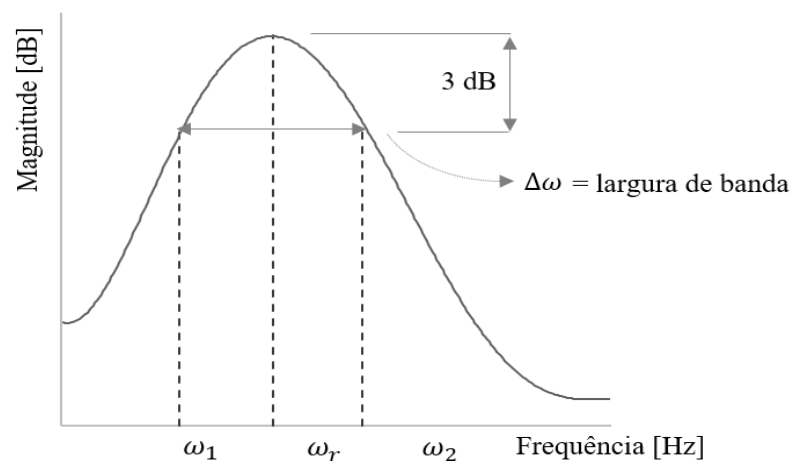
A adoção do intervalo de frequência natural de 0 a 90 Hz deve-se à eficiência na derriça dos frutos no estágio de maturação maduro, também conhecido como cereja. Diversos autores estudaram o comportamento do sistema fruto-pedúnculo-ramo e definiram como as primeiras frequências de ressonância àquelas condizentes ao desprendimento do fruto do café. (GOMES *et al.*, 2020a; SANTOS *et al.*, 2015; COELHO *et al.* 2016; TINOCO *et al.*, 2014).

O método de largura de banda de meia potência (RAO, 2008; MAIA; SILVA, 1997; LYON; De JONG, 1995) foi utilizado na determinação da razão de amortecimento (ζ). A partir da relação entre a largura da banda ($\Delta\omega$) a 3 dB, ou $20 \log \sqrt{2}$, abaixo de cada pico de ressonância (ω_r), que pode ser observada na Figura 4.3. A razão de amortecimento foi calculada pela Equação 3.5:

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_r} \quad (3.5)$$

onde os pontos ω_1 e ω_2 são chamados de pontos de meia potência.

Figura 4.3 – Gráfico da magnitude do sinal em função da frequência. Detalhamento da obtenção da largura de baixa à 3 dB abaixo da frequência de ressonância.



Fonte: Do Autor (2020).

Desta forma, classificou-se o comportamento do amortecimento (RAO, 2008) conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Classificação dos sistemas de amortecimento.

	$\zeta = 0$	Sistema não amortecido.
Para:	$0 < \zeta < 1$	Sistema sub-amortecido.
	$\zeta = 1$	Sistema criticamente amortecido
	$\zeta > 1$	Sistema superamortecido.

Fonte: RAO (2008).

Considerando um sistema harmônico, oscilatório, com um grau de liberdade e amortecimento viscoso, por meio da Equação 3.2, orto-normalizada pela massa, define-se a frequência natural, em Hz (Equação 3.6).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.6)$$

Com isso, obteve-se o coeficiente de amortecimento (c), em N.s.m⁻¹ (Equação 3.7).

$$c = 2 m \zeta \omega_n \quad (3.7)$$

Para o ramo sem frutos e desfolhado, cada uma das três primeiras frequências naturais foram analisadas por meio de teste Tukey, considerando-se um nível de significância de 95% de probabilidade. Foram analisados os parâmetros entre as posições da planta: frequência natural média, razão de amortecimento e coeficiente de amortecimento.

Já para o ramo com frutos e desfolhado, os mesmos parâmetros foram submetidos à análise de variância segundo delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3x2, com 8 repetições. Os fatores considerados na análise foram: três posições na planta (inferior, médio e superior) e dois estádios de maturação (com frutos verdes e com frutos maduros). A análise se repetiu para cada uma das três primeiras frequências naturais e aplicado teste de comparação de médias Tukey a 95% de probabilidade.

De forma análoga ao ramo com frutos e desfolhado, a análise estatística do ramo completo, com folhas e frutos, considerou os mesmos fatores (posição na planta e estágio de maturação), por análise de variância segundo DIC, em esquema fatorial 3x2, com oito repetições. Para os parâmetros analisados, quando significativos, foi aplicado o teste de Tukey (P<0.05).

O software R (CORE TEAM, 2020) foi utilizado para a realização das análises estatísticas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

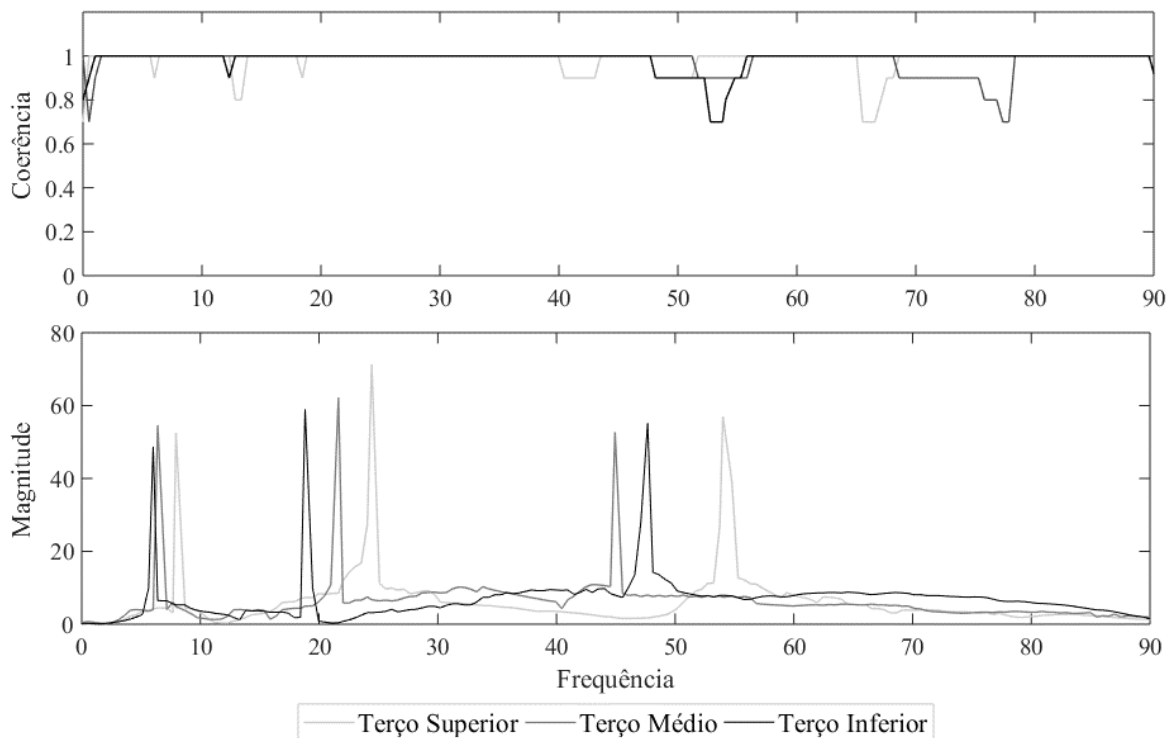
Nesta seção são apresentados os resultados das análises realizadas, dispostos da seguinte forma: ramo sem frutos e sem folhas; ramo sem folhas e com frutos em diferentes estádios de maturação; e ramo completo, com frutos e folhas.

3.1 Ramos sem frutos e sem folhas

Por meio da Função Resposta em Frequência (FRF) foi possível obter as frequências naturais para os tratamentos estudados. Com isso, as análises estatísticas definiram os valores médios de cada tratamento.

As frequências naturais, razão de amortecimento e coeficiente de amortecimento, em valores médios, do ramo de café sem frutos e sem folhas foram obtidas a partir da análise modal experimental. Na Figura 4.4 são apresentadas, para o cenário de ramos sem frutos e sem folhas, as frequências naturais e coerência médias obtidas para cada posição ao longo da planta.

Figura 4.4 – Função Resposta em Frequência. Coerência média e Magnitude (em dB) para cada posição na planta em função da frequência de amostragem (em Hz).



Fonte: Do autor (2020).

Na Tabela 2 são apresentadas as três primeiras frequências naturais (ω_{n1} , ω_{n2} e ω_{n3}), em valores médios, para cada posição na planta.

Tabela 4.2 – Frequências naturais médias para cada terço da planta, em Hz.

Posição na planta	Frequência natural média (Hz)		
	ω_{n1}	ω_{n2}	ω_{n3}
Superior	7,94a	24,43a	54,02a
Médio	6,40b	21,63b	44,93b
Inferior	6,02b	18,82b	47,68b

Legenda: Médias seguidas de mesma letra na coluna não se diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2020).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.2, o terço superior apresentou diferença significativa em relação aos demais terços da planta para as três primeiras frequências naturais.

Coelho *et al.* (2017) analisaram amostras do ramo de plantas de café arábica Catuaí Vermelho, utilizando um sistema composto por um gerador de sinais, um amplificador e uma máquina vibradora eletromagnética. A partir desse método, os autores obtiveram valores mínimo, médio e máximo de frequência natural, em Hz, para o ramo iguais a 14,57, 16,83 e 19,45, respectivamente.

Para razão de amortecimento média (ζ), não foram observadas diferenças significativas entre os terços para as duas primeiras frequências naturais (Tabela 4.3). No entanto, o terço superior, na terceira frequência natural, apresentou diferença significativa entre os demais.

Tabela 4.3 – Razão de amortecimento média sobre as três primeiras frequências naturais para cada posição na planta, valor adimensional.

Posição na planta	Razão de amortecimento média		
	ζ_1	ζ_2	ζ_3
Superior	0,091a	0,076a	0,125a
Médio	0,074a	0,066a	0,058b
Inferior	0,121a	0,068a	0,071b

Legenda: Médias seguidas de mesma letra na coluna não se diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2020).

Coelho *et al.* (2015) obtiveram, para o ramo, valor de razão de amortecimento médio igual a 0,02 e desvio padrão 0,01. Os autores coletaram amostras aleatoriamente ao longo da planta e utilizaram o método de decremento logarítmico para obtenção dos valores, o que pode explicar a diferença entre os valores encontrados.

As características de amortecimento de ramos de café sem folhas, utilizando vídeos de alta velocidade, foram determinadas por Queiroz *et al.* (2010). Os valores médios obtidos pelos autores foram de 0,031 e 0,024 para as variedades Catuaí Vermelho e Mundo Novo, respectivamente.

No estudo de Aristzábal, Oliveros e Alvares (1999), os autores encontraram, para diferentes variedades, a razão de amortecimento da árvore de café sem folhas e frutos. Os valores obtidos foram iguais a 0,100, 0,060 e 0,040 para as variedades Colômbia Amarillo, Colômbia Rojo e Caturra Rojo, respectivamente. Em outro estudo, os autores Aristzábal, Oliveros e Alvares (2003) encontraram valores entre 0,04 e 0,10 para a razão de amortecimento tronco-ramo do cafeeiro, utilizando também o método de decremento logarítmico.

Apesar das diferenças encontradas, os valores para razão de amortecimento médio obtidos por Coelho *et al.* (2015), Queiroz *et al.* (2010) e Aristzábal, Oliveros e Alvares (2003) corroboram com os encontrados no presente trabalho, estando abaixo de 1,0, o que caracteriza o ramo da planta cafeeira como um sistema sub-amortecido, de acordo com a Tabela 4.1.

De forma similar, somente o coeficiente de amortecimento médio da terceira frequência natural apresentou diferença significativa entre os terços, como é possível observar na Tabela 4.4. Ressaltando-se ainda que os terços superiores e inferiores puderam ser considerados estatisticamente iguais entre si, assim como o terço médio e inferior.

Tabela 4.4 – Coeficiente de amortecimento médio das três primeiras frequências naturais para cada posição na planta, em N.s.m⁻¹.

Posição na planta	Coeficiente de amortecimento médio		
	c_1	c_2	c_3
Superior	0,048a	0,137a	0,439a
Médio	0,039a	0,118a	0,209b
Inferior	0,058a	0,102a	0,281ab

Legenda: Médias seguidas de mesma letra na coluna não se diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2020).

O terço superior apresenta ao longo de sua extensão, material biológico mais jovem, em desenvolvimento e com novos brotos. Ramos médios tendem a se assemelhar, fisicamente, com ramos inferiores, ou seja, apresentando maior parte lenhosa em seu corpo.

Vidaurre *et al.* (2011) comentam que a densidade, a espessura da parede celular, o conteúdo de celulose, a resistência e a rigidez encontrados para a madeira juvenil apresentam valores inferiores em relação à madeira adulta.

Braz *et al.* (2014), no estudo da madeira do eucalipto, concluíram que a região de plantio, tipo de manejo, idade, taxa de crescimento e presença de madeira juvenil, podem variar as propriedades da madeira. Ensaio físico-mecânicos da madeira de eucalipto realizado por Torres *et al.* (2016) apresentam valores de resistência (MOR) e rigidez (MOE) a compressão paralela às fibras inferiores no lenho jovem do que aqueles encontrados para madeira adulta.

De acordo com Sette Junior *et al.* (2012), as exigências fisiológicas e mecânicas resultantes do processo de desenvolvimento das árvores promovem o aumento da densidade do lenho, por meio do aumento da espessura da parede das fibras e redução do número de vasos. Já os teores de celulose e lignina, constituintes químicos da madeira, estão atrelados às características mecânicas da madeira (VALE; DIAS; SANTANA, 2010). À medida que o lenho adulto é formado, o teor de lignina tende a diminuir, implicando na redução da resistência mecânica da madeira (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 2005).

No entanto, amostras de terço superior da planta cafeeira apresentam diâmetros mais singelos do que àquelas na parte média ou inferior da planta, além de possuírem menor comprimento e massa. A menor rigidez, devido características morfológicas de lenho jovem, e menor massa, podem influenciar nos valores de frequência natural média do ramo. Tais fatores podem explicar os valores obtidos para o terço superior apresentar diferença significativa com médias superiores em relação às demais posições na planta.

3.2 Ramo desfolhado com frutos em diferentes estádios de maturação

A fim de analisar os efeitos da interação entre a posição na planta (PP) e o estádio de maturação (EM), foi realizada a análise estatística, em esquema fatorial, das seguintes variáveis resposta: frequência natural, razão de amortecimento e coeficiente de amortecimento, em valores médios.

Na Tabela 4.5 estão dispostos os resultados referentes ao estudo das interações em relação à frequência natural média dos ramos.

Tabela 4.5 – Resultados para a análise de variância referente à influência dos fatores de posição na planta (PP) e estágio de maturação (EM) dos frutos sobre a frequência natural média dos ramos para as três primeiras frequências naturais analisadas.

	Fonte da variação	GL	SO	QM	F	F	Pr>Fc
1ª Frequência Natural	PP	2	18,3	9,16	3,66	3,2199	0,0344*
	EM	1	4,9	4,92	1,96	4,0726	0,1686 ^{ns}
	PP x EM	2	2,9	1,49	0,59	3,2199	0,5560 ^{ns}
	Resíduo	42	105,2	2,50			
	Total	47	131,4				
	CV = 28,42%						
2ª Frequência Natural	PP	2	251,9	125,94	9,26	3,2199	0,0005*
	EM	1	440,5	440,49	32,38	4,0726	0,0000*
	PP x EM	2	184,6	92,31	6,78	3,2199	0,0028*
	Resíduo	114	571,4	13,60			
	Total	119	1448,4				
	CV = 19,54%						
3ª Frequência Natural	PP	2	656,7	328,37	5,19	3,2199	0,0097*
	EM	1	1966,1	1966,08	31,07	4,0726	0,0000*
	PP x EM	2	332,9	166,45	2,63	3,2199	0,0839 ^{ns}
	Resíduo	42	2657,8	63,28			
	Total	47	5613,5				
	CV = 18,11%						

Legenda: * - significativo ao nível de 5% de probabilidade. ^{ns} – não significativo.

Fonte: Do autor (2020).

Para a primeira frequência natural, nota-se que a interação PP x EM apresentou-se como não significativa, a um nível de significância igual a 5%. No entanto, em relação a posição na planta, as frequências naturais médias foram significativamente diferentes, conforme apresentado na Tabela 4.6. Considerando o fator estágio de maturação dos frutos, as médias podem ser consideradas estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$), com valores iguais a 5,25 Hz e 5,88 Hz, para frutos verdes e maduros, respectivamente.

Tabela 4.6 – Primeira frequência natural média em relação a posição na planta, em Hz.

	Posição na planta		
	Superior	Médio	Inferior
ω_{n1}	6,37a	5,47ab	4,86b

Legenda: Médias seguidas de mesma letra na linha não se diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2020).

A segunda frequência natural apresentou interação significativa entre os fatores estudados. Dessa forma, procedeu-se o desdobramento e a análise da influência dos fatores sobre a frequência natural média (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Desdobramentos da segunda frequência natural: posição na planta dentro do nível estágio de maturação (coluna) e estágio de maturação dentro do nível posição na planta (linha), em Hz.

Posição na planta	Estádio de maturação	
	Verde	Maduro
Superior	16,77Aa	25,54Ba
Médio	15,30Aa	24,19Ba
Inferior	15,49Aa	16,00Ab

Legenda: Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna são estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2020).

Ainda de acordo com a análise, a terceira frequência natural apresentou interação não significativa entre os fatores analisados (PP x EM). O fator estágio de maturação apresentou diferença significativa nas frequências naturais médias do ramo para frutos verdes e maduros, com valores iguais a 37,52 Hz e 50,32 Hz, respectivamente. Para a posição na planta, nota-se que o terço médio apresentou diferença significativa entre os demais, de acordo com a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Terceira frequência natural em relação a posição na planta, em Hz.

Frequência Natural	Posição na planta		
	Superior	Médio	Inferior
ω_{n3}	43,46a	39,65b	48,67a

Legenda: Médias seguidas de mesma letra na linha não se diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2020).

Diversos autores estudaram a interação entre estágio de maturação de frutos e a frequência natural do sistema fruto-pedúnculo. A critério de comparação, não foram encontradas na literatura, obras similares, contendo o sistemas ramo-pedúnculo-frutos, mas sem folhas. Desta forma, alguns valores apresentados a seguir, são aqueles encontrados pelos autores para o sistema fruto-pedúnculo em diferentes estádios de maturação.

Santos *et al.* (2015) estudaram as variedades Catuaí Vermelho e Mundo Novo, determinando as cinco primeiras frequências naturais de cada variedade em diferentes estádios de maturação. Para a variedade Catuaí Vermelho, a mesma analisada neste estudo, os autores encontraram valores de frequência natural iguais a (em Hz): 23,20, 23,30 e 57,70 para frutos verdes e 19,90, 19,90 e 50,40 para frutos maduros. O método de modelagem tridimensional com simulação via elementos finitos foi utilizado para determinação das frequências naturais. Ressalta-se que os resultados encontrados pelos autores são somente para o sistema fruto-pedúnculo.

As frequências naturais médias do sistema fruto-pedúnculo, nos estádios de maturação verde e maduro, foram estudadas por Coelho *et al.* (2017). Os autores encontraram, para o estágio de maturação verde, valor mínimo igual a 14,87 Hz, médio igual a 18,64 e máximo de 23,71 Hz. Para frutos maduros, os valores mínimo, médio e máximo, obtidos foram iguais a: 14,11, 17,38 e 20,59 Hz, respectivamente.

O método de elementos finitos também foi utilizado por Filgueiras (2000) para obtenção das frequências do sistema fruto-pedúnculo. Para o primeiro modo de vibração, o autor obteve valores iguais a de 6,65 e 2,68 Hz para frutos nos estádios verde e maduro, respectivamente. O segundo modo de vibração, os valores encontrados foram de 85,05 Hz para frutos verdes e 24,65 Hz para frutos maduros.

De forma generalizada, existiu a tendência de o sistema de fruto-pedúnculo no estágio de maturação maduro apresentar maiores frequências naturais médias em relação ao estágio de maturação verde. Santos *et al.* (2010a) relacionaram o número de frutos por pedúnculo com o efeito da frequência de vibração para cafés da variedade Mundo Novo. Segundo os autores, pedúnculos com maior número de frutos tendem a apresentar maior média na eficiência de derriça.

Rodríguez *et al.* (2006) explicam que a massa e o volume do fruto aumentaram à medida da evolução do estágio de maturação do fruto. A divisão e alongamento das células de frutos em desenvolvimento ocasionam o aumento de massa e volume (CASTRO; MARRACCINI, 2006). Já Coelho *et al.* (2015) verificaram que a taxa de aumento do volume do fruto foi superior à taxa de aumento da massa, o que ocasionou a redução da massa específica do fruto.

O fornecimento de nutrientes, a fim de promover o desenvolvimento do fruto, exige maior ligação do sistema fruto-pedúnculo-ramo no estágio de maturação verde (Coelho *et al.*, 2015). No entanto, o módulo de elasticidade do pedúnculo e a força de desprendimento do fruto reduzem à medida da evolução do estágio de maturação. De acordo com Trevisan (2012), isto deve-se pela degradação da parede celular que torna o pedúnculo frágil, facilitando o seu rompimento.

Além disso, as diferenças encontradas entre os resultados obtidos por outros autores podem ser explicadas pelas variações de geometria, propriedades físicas e mecânicas do sistema, idade, características de solo, clima e manejo da planta (ARISTIZÁBAL; OLIVEROS; ALVARES, 2003; RODRÍGUEZ *et al.*, 2006). Os métodos aplicados para obtenção das frequências naturais também podem variar em função de parâmetros da modelagem do sistema, como número e tipo dos elementos empregados na discretização, algoritmo de solução do modelo, entre outros.

De forma similar ao realizado para as frequências naturais médias do ramo, o parâmetro razão de amortecimento média (ζ) foi estudado para as três primeiras frequências naturais. A interação foi não significativa para a primeira frequência natural. O fator posição na planta apresentou médias estatisticamente iguais com valores equivalentes a 0,099, 0,180 e 0,133, respectivamente, para ramo na posição superior, médio e inferior da planta. Já para o estágio de maturação não houve diferença significativa para as médias, com valores iguais a 0,163 para ramos com frutos verdes e 0,112 para ramos com frutos maduros.

A razão de amortecimento média sobre a segunda frequência natural apresentou interação (PP x EM) não significativa. Posição na planta e estágio de maturação também apresentaram médias estatisticamente iguais dentro de cada fator. Os valores encontrados foram iguais a 0,190, 0,166 e 0,133 para a posição superior, médio e inferior na planta, respectivamente. Para o estágio de maturação obteve-se razão de amortecimento de 0,138 para ramos com frutos verdes e 0,188 para ramos com frutos maduros.

A terceira frequência natural apresentou interação significativa entre os fatores estudados (

Tabela 4.9). O desdobramento para análise da influência dos fatores sobre a razão de amortecimento média é apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 – Resultado para a análise de variância referente à influência dos fatores de posição na planta e estágio de maturação dos frutos sobre a razão de amortecimento média dos ramos.

Fonte da variação	GL	SO	QM	F	F crítico	Pr>Fc
PP	2	0,00567	0,002836	0,5018	3,2199	0,6090 ^{ns}
EM	1	0,07843	0,078435	13,8787	4,0726	0,0006*
PP x EM	2	0,04153	0,020764	3,6741	3,2199	0,0338*
Resíduo	42	0,23736	0,005651			
Total	47	0,36300				
CV = 40,12%						

Legenda: * - significativo ao nível de 5% de probabilidade. ^{ns} – não significativo.

Fonte: Do autor (2020).

Nota-se que somente houve diferença significativa do estágio de maturação dentro do nível ramo inferior da posição na planta.

Tabela 4.10 – Desdobramentos da razão de amortecimento média na terceira frequência natural: posição na planta dentro do nível estágio de maturação (coluna) e estágio de maturação dentro do nível posição na planta (linha), valor adimensional.

Posição na planta	Estádio de maturação	
	Verde	Maduro
Superior	0,214Aa	0,191Aa
Médio	0,210Aa	0,152Aa
Inferior	0,258Aa	0,097Ba

Legenda: Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna são estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2020).

Coelho *et al.* (2015) obtiveram valores iguais a 0,150 e 0,090 para a razão de amortecimento do sistema pedúnculo-fruto, nos estádios de maturação verde e cereja, respectivamente. Ainda segundo os autores, houve tendência de diminuição da razão de amortecimento à medida que o estágio de maturação dos frutos passou de verde para maduro, o que pode ser corroborado com os valores encontrados neste estudo para primeira e segunda frequências encontradas. Tal argumento indica a maior propensão de frutos verdes ao amortecimento da excitação a eles imposta.

A análise da interação entre posição na planta e estágio de maturação sobre o coeficiente de amortecimento médio (c) para a primeira frequência natural foi não significativa. O fator posição na planta apresentou valores estatisticamente iguais, em $N.s.m^{-1}$, iguais a 0,211, 0,396 e 0,218 para o terço superior, médio e inferior, respectivamente. Os valores encontrados para ramos com frutos verdes foram iguais a 0,376 $N.s.m^{-1}$ e 0,174 para ramos com frutos maduros. Tais valores não apresentaram diferenças significativas.

Para a segunda frequência natural, de forma similar à primeira, a interação entre fatores (PP x EM) foi não significativa. O fator posição na planta apresentaram médias estatisticamente iguais entre si, com valores, em $N.s.m^{-1}$, de 1,275 para o terço superior, 0,803 para o terço médio e 1,123 para a parte inferior da planta. O fator estágio de maturação não apresentou diferença significativa entre níveis, com valores iguais a 0,980 $N.s.m^{-1}$ para o ramo com frutos verdes e 1,154 $N.s.m^{-1}$ para o ramo com frutos maduros.

Diferentemente dos demais, o coeficiente de amortecimento médio na terceira frequência natural apresentou interação significativa entre os fatores analisados, como descrito na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultado para a análise de variância referente à influência dos fatores de posição na planta e estágio de maturação dos frutos sobre o coeficiente de amortecimento dos ramos.

Fonte da variação	GL	SQ	QM	F	F crítico	Pr>Fc
PP	2	5,100	2,550	1,1634	3,2199	0,3223*
EM	1	48,719	48,719	22,2264	4,0726	0,0000*
PP x EM	2	25,573	12,786	5,8332	3,2199	0,0058*
Resíduo	42	92,062	2,192			
Total	47	171,455				
CV = 51,64%						

Legenda: * - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2020).

Na Tabela 4.12 são apresentadas as médias de acordo com os desdobramentos das interações. Destaca-se o ramo na posição inferior apresentando valores bem inferiores no estágio de maturação maduro quando comparado ao verde.

Tabela 4.12 – Desdobramentos da razão de amortecimento média na terceira frequência natural: posição na planta dentro do nível estágio de maturação (coluna) e estágio de maturação dentro do nível posição na planta (linha), em $N.s.m^{-1}$.

Posição na planta	Estádio de maturação	
	Verde	Maduro
Superior	3,455Aa	2,200Aa
Médio	2,855Aa	2,123Aa
Inferior	5,313Ab	1,256Ba

Legenda: Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna são estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

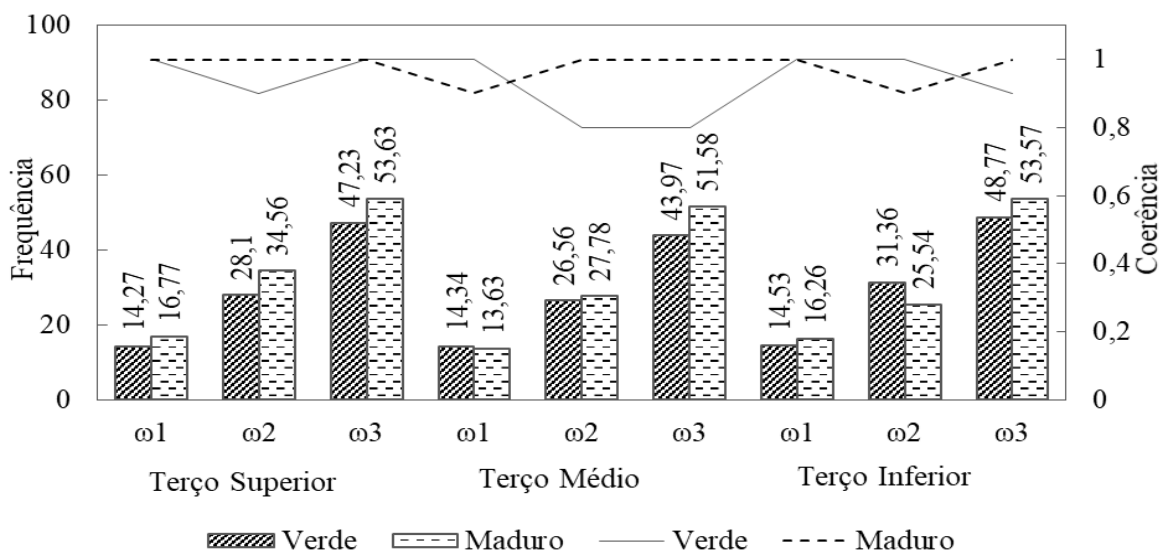
Fonte: Do autor (2020).

3.3 Ramo completo, contendo folhas e frutos

O ramo contendo folhas e frutos, da forma como foi coletado da planta, é alvo de estudo desta seção. A possível interação entre a posição na planta e o estágio de maturação nos frutos (PP x EM) foi analisada para as três primeiras frequências naturais.

Na Figura 4.5 são apresentadas, de acordo com cada posição na planta e para as três as primeiras frequências naturais, as frequências naturais médias para cada estágio de maturação. São apresentados também os valores de coerência correspondentes a cada frequência natural média.

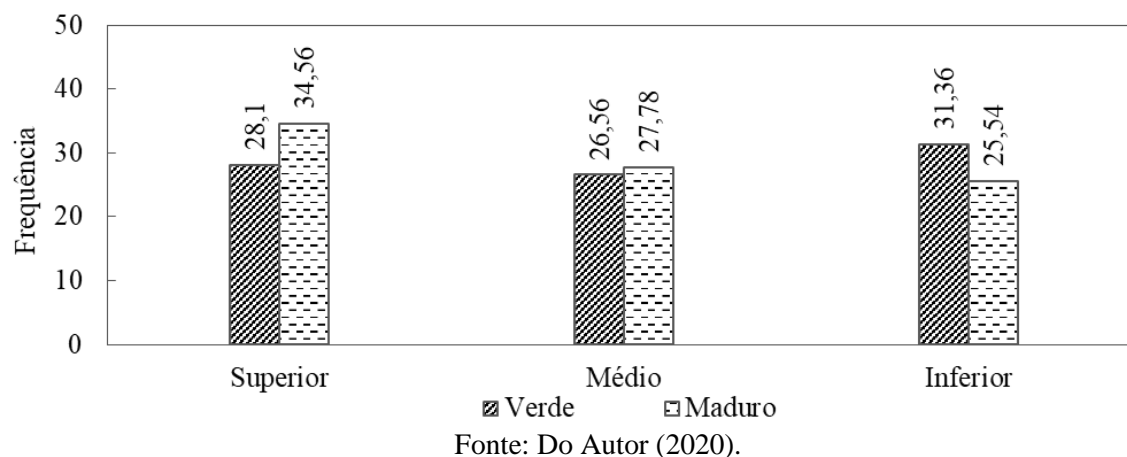
Figura 4.5 – Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, de acordo com a posição na planta, assim como os valores de coerência das frequências naturais médias, em Hz.



Fonte: Do Autor (2020).

Os valores de frequências naturais médias para cada posição na planta, de acordo com o estágio de maturação, são apresentados na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Frequências naturais médias para cada posição na planta, de acordo com o estágio de maturação, em Hz.



Para a primeira frequência natural, a interação apresentou-se como não significativa sobre as frequências naturais médias dos ramos. De acordo com o teste, as médias do fator posição na planta foram estatisticamente iguais, com valores de 15,52, 13,98 e 15,39 Hz para os níveis superior, médio e inferior, respectivamente. Ainda de acordo com a análise, as médias do fator estágio de maturação foram não significativas com valores iguais a 14,38 Hz para ramos com frutos verdes e 15,55 Hz para ramos com frutos maduros.

A interação entre posição na planta e estágio de maturação foi significativa para a segunda frequência natural. Os desdobramentos das interações estão apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Desdobramentos da segunda frequência natural: posição na planta dentro do nível estágio de maturação (coluna) e estágio de maturação dentro do nível posição na planta (linha), em Hz.

Posição na planta	Estádio de maturação	
	Verde	Maduro
Superior	28,10Aa	34,56Ba
Médio	26,56Aa	27,78Ab
Inferior	31,36Aa	25,54Bb

Legenda: Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna são estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2020).

A terceira frequência natural apresentou interação não significativa entre os fatores PP x EM. Para a posição na planta, o teste obteve médias de frequência natural do ramo estatisticamente iguais com valores 50,43, 47,78 e 51,17 Hz para as posições superior, médio e inferior, respectivamente. Já o fator estágio de maturação apresentou diferenças significativas entre os níveis com valores iguais a 46,66 Hz para frutos verdes e 52,93 Hz para ramos com frutos no estágio maduro.

Santos *et al.* (2010a), ao estudarem diferentes níveis de vibração para a variedade Mundo Novo, encontraram a frequência de 26,67 Hz como àquela que apresentou maior média de eficiência de derriça para frutos com grau de maturação cereja e passas. Para esta mesma frequência, frutos abaixo do estágio de maturação maduro, tenderam a ter uma menor eficiência na derriça. Além disso, os autores concluíram que pedúnculos com maior número de frutos tenderam a apresentar maior eficiência na derriça, possibilitando a seletividade na colheita de frutos do café.

Ferreira Júnior *et al.* (2020) instrumentaram ramos plagiotrópicos ao longo da planta (ramos mais curtos na parte superior e ramos maiores na parte inferior) contendo folhas e frutos. Os autores encontraram, entre as frequências de 20 e 30 Hz, uma concentração de energia nas frequências de 25 e 26 Hz. Tais frequências são próximas àquelas encontradas por Santos *et al.* (2010a) de 26,67 Hz para frutos cereja e passas. Os valores também demonstraram ser próximos àqueles encontrados neste estudo para a segunda frequência natural, principalmente, para a posição média e inferior da planta em ramos com frutos maduros.

Os estudos de Coelho *et al.* (2015) indicam que o pedúnculo apresenta menor rigidez no estágio de maturação mais avançado, o que pode favorecer a colheita seletiva a partir da combinação adequada dos fatores frequência e amplitude de vibração. Rodrigues e Ono (2001) relacionaram a redução da rigidez com a degradação das paredes celulares dos pedúnculos por atividade enzimática.

Ainda em seu estudo, Coelho *et al.* (2015), assim como Santos *et al.* (2010a, 2010b), analisaram o efeito da amplitude de vibração sobre a eficiência de derriça. Os autores concordam que, com o aumento da amplitude de um sistema que vibra a uma frequência fixa, a aceleração do sistema também tende a aumentar. Consequentemente, maiores acelerações garantem maior desprendimento dos frutos de café perante o aumento da energia imposta ao sistema.

Do ponto de vista da força de desprendimento dos frutos do cafeeiro, Ferraz *et al.* (2014) e Silva *et al.* (2010, 2013) citam que este parâmetro pode indicar o momento de se iniciar a

colheita mecaniza e seletiva do café, principalmente para frutos no em estágio avançado de maturação.

A análise da interação entre posição na planta e estágio de maturação sobre a razão de amortecimento média (ζ) para a primeira frequência natural também se mostrou não significativa. De acordo com o teste, o fator posição na planta não apresentou diferenças significativas, com médias iguais a 0,324, 0,281 e 0,328 para os terços superior, médio e inferior, respectivamente. As médias do fator estágio de maturação foram consideradas estatisticamente iguais com valores de 0,337 para frutos verdes e 0,286 para frutos maduros.

A segunda frequência natural também apresentou interação não significativa para a razão de amortecimento média. Ambos os fatores, posição na planta e estágio de maturação, apresentaram médias entre níveis estatisticamente iguais. Para os terços superior, médio e inferior os valores foram iguais a 0,248, 0,268 e 0,288, respectivamente. Frutos verdes apresentaram razão de amortecimento média igual a 0,249 e frutos maduros igual a 0,287.

Para razão de amortecimento média sobre a terceira frequência natural, a interação também foi não significativa. Os valores de razão de amortecimento médio obtidos para o fator posição na planta foram de 0,263, 0,301 e 0,284 para os terços superior, médio e inferior, respectivamente. O estágio de maturação apresentou médias estatisticamente iguais com valores de 0,309 e 0,256 para frutos verdes e maduros, respectivamente.

Em seu estudo, Aristzábal, Oliveros e Alvares (2003), utilizando método de decremento logaritmo, obtiveram valores entre 0,08 e 0,10, para o sistema tronco-ramo-folhas. Em relação ao sistema sem folhas, também estudado pelos autores, os valores indicam que as folhas favorecem o amortecimento de excitações provocadas na planta.

O último parâmetro analisado foi o coeficiente de amortecimento médio (c). Para a primeira frequência natural, a interação entre posição na planta e estágio de maturação foi não significativa. As médias obtidas para o fator posição na planta foram iguais a 2,648, 2,001 e 2,371 N.s.m⁻¹ para os terços superior, médio e inferior, respectivamente. O fator estágio de maturação apresentou diferença significativa entre os níveis com valores iguais a 2,949 e 1,731, respectivamente para frutos verdes e maduros.

O coeficiente de amortecimento médio para a segunda frequência natural apresentou interação não significativa entre os fatores analisados PP x EM. De acordo com a análise, o fator posição na planta obteve médias estatisticamente iguais com valores para o ramo superior igual a 3,660 N.s.m⁻¹, ramo médio igual a 3,647 N.s.m⁻¹ e ramo inferior igual a 4,118 N.s.m⁻¹. As médias apresentadas no fator estágio de maturação foram não significativas, com valores

iguais a $4,354 \text{ N.s.m}^{-1}$ e $3,262 \text{ N.s.m}^{-1}$, para ramos com frutos verdes e frutos maduros, respectivamente.

Para a terceira frequência natural, a interação também se apresentou como não significativa. O fator posição na planta apresentou médias estatisticamente iguais, com valores $5,905$, $7,455$ e $7,611 \text{ N.s.m}^{-1}$ para os terços superior, médio e inferior, respectivamente. Para o fator estágio de maturação, as médias foram significativas, com valores iguais a $8,684 \text{ N.s.m}^{-1}$ para ramos com frutos verdes e $5,296 \text{ N.s.m}^{-1}$ para ramos com frutos maduros.

Nota-se que tanto na primeira quanto na terceira frequência natural, o fator estágio de maturação obteve médias diferentes a 5% de significância, com ramos contendo frutos verdes apresentando coeficiente de amortecimento superiores aos maduros.

Gomes *et al.* (2020b) estudaram frações do ramo do café a fim de obter o comportamento do sistema fruto-pedúnculo-ramo. De acordo com os autores, a transmissibilidade média obtida do ramo para os frutos maduros foi maior do que para os frutos verdes. Ainda segundo os autores, o avanço no estágio de maturação do fruto não muda a rigidez do ramo. Logo, ramos contendo mais frutos, ou com maior massa, sofrem maior deflexão. Isto implica em acelerações maiores e, conseqüentemente, maior transmissibilidade da energia vibratória imposta ao sistema, tornando a colheita mais eficiente. Segundo Santos *et al.* (2015), ramos que contém frutos no estágio de maturação mais desenvolvido transmitem a excitação inicial aplicada com menor perda de energia, facilitando o desprendimento de frutos.

Pezzi e Caprara (2009) avaliaram as interações entre planta-máquina para a cultura da uva. De acordo com os autores, a regulagem da frequência e amplitude de vibração das hastes de derriça da colhedora influenciam diretamente no rendimento e qualidade das uvas colhidas. O estudo ainda conclui que a presença de folhas favorece o amortecimento de vibração, assim como modifica a resposta da frequência.

Castro-García, Blanco-Roldán e Gil-Ribes (2011) analisaram a resposta-frequência da árvore de *Pinus Pinea L.* para colheita seletiva de pinha por meio de um agitador de tronco. De acordo com os autores, alterações morfológicas no talo e no peso total do fruto amplificam a transmissibilidade e aumentam a aceleração, proporcionando condições favoráveis à derriça das frutas.

O efeito das folhas e frutos na resposta dinâmica do ramo cítrico foi estudado por Castro-García *et al.* (2020). Para os autores, o aumento da frequência de vibração diminuiu a transmissibilidade de aceleração ao longo do ramo. A presença de frutos no ramo diminuiu ligeiramente os valores de transmissibilidade de aceleração, permanecendo inalterados os valores encontrados para frequência natural. Já para a presença de folhas, observou-se a redução

da primeira frequência natural e o aumento drástico da razão de amortecimento do ramo. Ainda segundo os autores, a aplicação de diferentes valores de amplitude de vibração para diferentes partes da árvore se mostrou um resultado eficaz, corroborando com aqueles obtidos por Pu *et al.* (2018).

Os resultados obtidos neste estudo, com valores não significativos entre diferentes posições do ramo na planta, podem ser considerados importantes parâmetros de regulagem das colhedoras. Diferentes estudos analisaram a interação entre comprimento e ângulos de haste, velocidade de operação, força de desprendimento, frequência e amplitudes de vibração (FERREIRA JUNIOR *et al.*, 2015, 2020; GOMES *et al.*, 2020a, 2020b; SANTINATO *et al.*, 2013, 2015; SANTOS *et al.*, 2010a; SILVA, F. C. *et al.*, 2010, 2013). No entanto, não foram encontrados na literatura estudos que correlacionem parâmetros de regulagem de máquina com a posição do ramo na planta.

De acordo com Ferreira Júnior *et al.* (2015), o ajuste adequado de frequência e amplitude de vibração das hastes das colhedoras impactam na eficiência de derriça do café, reduzem custos de repasse, diminuem a desfolha de plantas, favorecem a colheita seletiva e, conseqüentemente, reduzem custos. Por isso, destaca-se a importância de estudos realizados para otimização de máquina e implementos, principalmente àquelas que utilizam vibrações mecânicas e tem interação entre ramos plagiotrópicos e hastes rígidas.

4 CONCLUSÃO

Quanto a análise modal do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro, obtidas por meio de função resposta em frequência, com utilização de martelo de impacto, pode-se concluir que:

- para o ramo sem frutos e sem folhas, a análise da posição ao longo da planta apresentou o terço superior com valores de frequências natural superior as demais frações da planta. O padrão de valores obtidos na parte superior da planta se repetiu para as três primeiras frequências naturais. O coeficiente de amortecimento médio apresentou valores aumentados na parte superior da planta, para a terceira frequência natural, o que indica a influência da rigidez e massa inferiores em brotos novos e em desenvolvimento.

- para o ramo sem e folhas e com frutos em diferentes estádios de maturação, diversos cenários foram estudados. Dentre os resultados obtidos, é possível verificar que ramos contendo frutos no estágio maduro apresentaram, de forma geral, frequências naturais médias maiores em relação a ramos com frutos verdes.

- para o ramo completo, contendo folhas e frutos, não foram encontradas diferenças significativas entre as médias de frequências naturais ao longo da planta e para diferentes estádios de maturação, na primeira frequência natural. O padrão se repetiu para a segunda e terceira frequências naturais, com exceção à diferença na frequência natural média encontrada para ramos com frutos maduros no terço médio. Este comportamento pode ser considerado um importante parâmetro de regulação de máquinas colhedoras, visto que não houve diferenciação entre valores médios de frequência natural ao longo da planta.

REFERÊNCIAS

- ARISTZÁBAL, I. D.; OLIVEROS, T. C. E.; ALVARES, M. F. Propiedades físico-mecánicas del árbol de café y su relación con la mecanización de la cosecha. **Cenicafé**, v.50, n.4, p. 313-326, 1999.
- ARISTZÁBAL, I. D.; OLIVEROS, T. C. E.; ALVARES, M. F. Mechanical harvest of coffee applying circular and multidirectional vibrations. **Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)**, v.46, p.205-209, 2003.
- BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N.; SILVA, F. M. Desempenho operacional de derradeiras mecânicas portáteis, em diferentes condições de lavouras cafeeiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 129-132, 2005.
- BOAVENTURA, P. S. M. *et al.* Value co-creation in the specialty coffee value chain: the third-wave coffee movement. **Revista de Administração de Empresas**, v. 58, n. 3, p. 254-266, 2018.
- BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. **Equações diferenciais elementares e problemas de valores de contorno**. Rio de Janeiro: Editora LTC, v.7, 2002.
- BRAZ, R.L. *et al.* Caracterização Anatômica, Física e Química da Madeira de Clones de Eucalyptus Cultivados em Áreas Sujeitas à Ação de Ventos. **Revista Ciência da Madeira**, v.5, n.2, p.127-137, 2014. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v05n02a07>>. Acesso em 21 out. 2020.
- CASTRO-GARCÍA, S. *et al.* The contribution of fruit and leaves to the dynamic response of secondary branches of orange trees. **Biosystems Engineering**, 193, pp. 149-156, 2020. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.019>>. Acesso em 21 out. 2020.
- CASTRO-GARCÍA, S.; BLANCO-ROLDÁN, G. L.; GIL-RIBES, J. A. Frequency response of pinus pinea l. for selective cone harvesting by vibration. **Trees**, v. 25, n. 5, p. 801–808, 2011.
- CASTRO, R. D.; MARRACCINI, P. Cytology, biochemistry and molecular changes during coffee fruit development. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, p.175-199, 2006. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202006000100013>>. Acesso em 21 out. 2020.
- CIRO, H. J. Coffee harvesting. 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.
- COELHO, A. L. de F. *et al.* Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto- pedúnculo-ramo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.19, n.3, p.286-292, março 2015. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p286-292>>. Acesso em 21 out. 2020.

COELHO, A. L. d. F. *et al.* Dynamic behaviour of the coffee fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 1–10, 2016.

COELHO, A. L. d. F. *et al.* Dynamic test for determining the elastic modulus of coffee fruit-stem-branch system. **Acta Scientiarum. Technology**, v.39, p.579-586, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i5.30101>>. Acesso em 21 out. 2020.

COPPOLA, J. A.; BRADT, R. C. Thermal-shock damage in SiC. **Journal of the American Ceramic Society**, v.56, n.4, p.214-218, 1973.

CORE TEAM, R. *et al.* R: **A language and environment for statistical computing**. 2020.

DE SILVA, Clarence W. (Ed.). **Vibration damping, control, and design**. CRC Press, 2007.

EWINS, D. J. **Modal testing: theory and practice**. London. Research studies press, Letchworth, v.15, 1984.

FERNANDES, A. L. T.; SANTINATO, F.; SANTINATO, R. Utilização da subsolagem na redução da compactação do solo para produção de café cultivado no cerrado mineiro. **Enciclopédia Bioesfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 1648-1656, 2012.

FERRAZ, G. A. *et al.* Spatial variability of the detachment force of coffee fruit. **Engenharia Agrícola**, v.34, n.6, p.1210-1223, 2014.

FERREIRA JÚNIOR, L. G. *et al.* Dynamic behavior of coffee tree branches during mechanical harvest. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.173, p. 105415, 2020.

FERREIRA JÚNIOR, L. G. *et al.* Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastas derriçadoras. **Ciência Rural**, v. 46, n. 2, p. 273-278, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20141679>>. Acesso em: 22 out. 2020.

FILGUEIRAS, W. H. *et al.* Modelagem da planta de café por elementos finitos para estudos de colheita por vibração. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2000, Poços de Calda. **Anais do Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil – Resumos Expandidos**, Brasília – DF: EMBRAPA CAFÉ e MINASPLAN, 2000, v.2, p. 1095-1098.

GÉRADIN, M.; RIXEN, D. J. **Mechanical vibrations: theory and application to structural dynamics**. John Wiley & Sons, 2014.

GOMES, E. Q. *et al.* Effect of the impact of rigid rods on coffee fruit detachment efficiency by mechanical vibrations. **Coffee Science**, v.15, p.1-10, 2020a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.25186/v15i.1747>>. Acesso em: 22 out. 2020.

GOMES, E.Q. *et al.* Transmissibility of coffee fruit-peduncle-branch systems submitted to vibration induced by impact. **Dyna**, v. 87, n. 214, p. 61-65, 2020b. Universidad Nacional de Colombia. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v87n214.85186>>. Acesso em: 22 out. 2020.

GUIMARÃES, E. R.; CASTRO JÚNIOR, L. G. DE; ANDRADE, H. C. C. de. A terceira onda do café em Minas Gerais. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v.18, p.214-227, 2016.

LYON, R., De JONG R. **Theory and Application of Statistical Energy Analysis**. 2ª Ed. Butterworth-Heinemann. USA, 1995.

MAIA, N. M. M., SILVA, J. M. M. **Theoretical and experimental modal analysis**. New York: John Wiley. 1997.

OLIVEIRA, E. *et al.* Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 827-831, 2007.

ORTEGA, A. C.; JESUS, C. M. Território café do cerrado: transformações na estrutura produtiva e seus impactos sobre o pessoal ocupado. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 49, n. 3, p. 771–800, 2011.

PEZZY, F.; CAPRARA, C. Mechanical grape harvesting: investigation of the transmission of vibrations, **Biosystems Engineering**, 103(3). pp. 281-286, 2009. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.002>>. Acesso em 21 out. 2020.

PU, Y. *et al.* Design and evaluation of a two-section canopy shaker with variable frequency for mechanical harvesting of citrus. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, n. 5, p. 77-87, 2018.

QUEIROZ, D. M. *et al.* **Determination of the damping coefficient of coffee branches using image processing techniques**. In: XVII World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR), 2010, Quebec, Proceedings... Quebec, 2010, p.1-10.

RAO, S. S. **Mechanical vibrations**. São Paulo: Prentice Hall Upper Saddle River, v.4, 2008.

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

RODRÍGUEZ, A. M. *et al.* Determinación de propiedades físico-mecánicas de los frutos de café (*Coffea arabica* variedade Catuai) relacionadas con la cosecha mecanizada. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v.15, p.22-27, 2006.

SANTINATO, F. *et al.* Colheita mecanizada do café em lavouras de primeira safra. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 12, p. 1215-1219, dez. 2015. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1215-1219>>. Acesso em 21 out. 2020.

SANTINATO, F. *et al.* Comparação entre o custo da colheita manual e mecanizada de uma a seis passadas da colhedora. In: **Congresso Brasileiro De Pesquisas Cafeeiras**, 39, 2013, Poços de Caldas. Resumos Expandidos... Poços de Caldas: MAPA/PROCAFÉ, 2013. p. 195-198.

SANTOS, F. L. *et al.* Efeito da frequência e amplitude de vibração sobre a derrça de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.425-431, 2010a.

SANTOS, F. L. *et al.* Analysis of the coffee harvesting process using an electromagnetic shaker. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, n.3, p. 373-378, 2010b.

SANTOS, F. L. *et al.* Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum. Technology**, v.37, n. 1, p. 11-17, 2015. Disponível em < <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i1.19814>>. Acesso em 21 out. 2020.

SETTE JUNIOR, C. R. *et al.* Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v.36, n.6, p.1183-1190, 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622012000600019>>. Acesso em: 22 out. 2020.

SILVA, E. P. da; SILVA, F. M. da; MAGALHÃES, R. R. Application of finite elements method for structural analysis in a coffee harvester. **Engineering**, v. 6, n. 3, p. 138, 2014.

SILVA, F. C. *et al.* Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiros ao longo do período de colheita. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.2, p.468-474, 2010.

SILVA, F. C. *et al.* Desempenho operacional da colheita mecanizada e seletiva do café em função da força de desprendimento dos frutos. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 53-60, 2013.

SILVA, F. M. *et al.* Avaliação da colheita mecanizada do café com o uso do ethephon. **Coffee Science**, Lavras, v.1, n.1, p.1-6, 2006.

SOLA-GUIRADO, R. R. *et al.* Traditional olive tree response to oil olive harvesting technologies. **Biosystems engineering**, v. 118, p. 186–193, 2014.

SOUZA, C. *et al.* Desenvolvimento de uma máquina vibradora para estudo do desprendimento de frutos do cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, Viçosa, v. 13, n. 1, p. 7–18, 2005.

SPERS, E. E. *et al.* Possibilidades de Diferenciação na Produção de Café e o Comportamento do Consumidor. **Cadernos Universidade do Café, PENSA**, v.8, p.4-52, 2016.

TAVARES, T. de O. *et al.* Operational performance of the mechanized picking of coffee in four soil slope. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 48, p. 4857–4863, 2016.

THORBY, D. **Structural dynamics and vibration in practice: an engineering handbook**. Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd., Oxford, Inglaterra 420p. 2008.

TINOCO, H. A. *et al.* Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of *Coffea arabica* L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.108, p.17-27, 2014.

TORRES, P. M. de A. *et al.* Caracterização Físico-Mecânica da Madeira Jovem de *Eucalyptus camaldulensis* para Aplicação na Arquitetura Rural. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.23, n.1, p.109-117, 2016.
Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.016012>>. Acesso em: 22 out. 2020.

TREVISAN, M. J. **Efeito da aplicação de 1-metilciclopropeno e etileno na fisiologia e no amadurecimento de mamões "Golden"**. 2012. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características do eucalipto. **Revista da Madeira**, Curitiba, n.92, p.82-88, 2005.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.

VIDAURRE, G. B. *et al.* Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011.

VILLIBOR, G. P. *et al.* Determination of modal properties of the coffee fruit-stem system using high speed digital video and digital image processing. **Acta Scientiarum Technology**, v.38, n.1, p.41-48, 2016.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. **Butterworth-Heinemann**, v.132, p.1987–1993, 2013.

CAPÍTULO 5 - COMPORTAMENTO DINÂMICO DO RAMO DA PLANTA CAFEIEIRA: UMA ANÁLISE A PARTIR DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

1 INTRODUÇÃO

O uso de modelagem matemática associada a técnicas de simulação computacional são ferramentas importantes na realização de análises detalhadas da colheita de café. O método dos elementos finitos (MEF) tem sido usado na simulação de diversos sistemas mecânicos e biológicos. Com o uso do MEF já é possível prever, via simulação numérica e computacional, não apenas o comportamento mecânico das máquinas, mas também identificar as tensões e a vibração dos ramos e pedúnculos do café durante o processo de colheita.

O MEF pode ser aplicado, na engenharia agrícola, na análise estrutural de máquinas agrícolas (SILVA; SILVA; MAGALHÃES, 2014; MAGALHÃES *et al.*, 2006) e implementos (OLIVEIRA *et al.*, 2014), além de campos como processamento de produtos agrícolas e mecânica do solo (FADAI *et al.*, 2019; SACHAK-PATWA; FADAI; VAN GORDER, 2019; VELLOSO *et al.*, 2018). Carvalho, Magalhães e Santos (2016) utilizaram o MEF para avaliar o comportamento mecânico de uma planta de café, obtendo resultados de simulações numéricas por meio de um modelo tridimensional de modelagem do cafeeiro que mostraram a viabilidade de prever deslocamentos dos ramos de café a partir de análises estáticas por elementos finitos.

Por meio de modelos com maior refinamento, é possível gerar uma melhoria significativa na modelagem de sistemas físicos, o que é possível pelo uso de um maior número de graus de liberdade (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013; HUEBNER *et al.*, 2010). Segundo Marques *et al.* (2015), o MEF pode ser utilizado para resolver problemas físicos a partir de modelos matemáticos por meio de simulações com grau significativo de confiabilidade. Entretanto, ensaios experimentais são necessários para validação dos resultados obtidos numericamente. Ao se utilizar os resultados experimentais, os modelos numéricos podem ser aprimorados e atualizados, considerando-se valores de referência, permitindo prever o comportamento dinâmico dos sistemas físicos.

A modelagem matemática de sistemas com múltiplos graus de liberdade requer a aplicação de leis fundamentais para determinação das equações que regem seu comportamento (SEGERLING, 1984). Com o avanço de novas tecnologias e aumento da capacidade computacional, sistemas sujeitos à vibrações mecânicas podem ser analisados usando modelagem matemática para representar os aspectos importantes do sistema físico real sem estes se tornem excessivamente complexos (MARQUES *et al.*, 2015). O método de elementos

finitos destaca-se dentre os demais métodos numéricos existentes uma vez que permite a solução de problemas com geometrias complexas, materiais heterogêneos e diferentes propriedades em um mesmo domínio.

Simulações numéricas via análise por elementos finitos para tensões e deslocamentos são usualmente realizadas por meio de *softwares* comerciais que utilizam pacotes numéricos para resolução dos problemas. Para execução da análise por elementos finitos é necessário gerar o modelo discretizado da geometria do sistema estudado (KNIGHT, 1993). Segundo Savary *et al.* (2010), o processo de discretização consiste na subdivisão do modelo geométrico tridimensional em pequenos volumes que consistem em elementos e nós. Logo, o método de elementos finitos pode ser empregado na determinação das propriedades modais de um sistema, permitindo o cálculo de suas frequências naturais e modos de vibração, a partir da formulação e solução de problemas de autovalores e autovetores. Os autovalores correspondem às frequências naturais do sistema, enquanto os autovetores referem-se aos modos de vibração do sistema, sendo associados à cada frequência natural (RAO, 2008).

Entretanto, para a aplicação do método de elementos finitos, é necessário obter as propriedades físico-mecânicas dos materiais envolvidos no sistema. A fim de realizar simulações numéricas do comportamento dinâmico do cafeeiro, Velloso *et al.* (2020), Carvalho, Magalhães e Santos (2016) e Coelho *et al.* (2016) determinaram os parâmetros de entrada do sistema, como: módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, coeficiente de Poisson e massa específica. Villar *et al.* (2017) e Velloso *et al.* (2017) caracterizaram as propriedades físicas dos frutos e ráquias da macaúba e concluíram que tais fatores influenciam diretamente nos resultados das simulações, já que estão relacionados com a rigidez e a massa dos sistemas.

As principais máquinas utilizadas na agricultura envolvem vibrações mecânicas, destacando as máquinas derriçadoras empregadas na colheita mecanizada de café (TINOCO *et al.*, 2014; COELHO *et al.*, 2016). Tal processo precisa ser melhor estudado, como por exemplo a influência da vibração das hastes e a velocidade da colhedora no processo de colheita mecanizada do café (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Modelos representativos têm se mostrado eficazes na tomada de decisão em relação ao manejo e processo de colheita do café (SOUZA *et al.*, 2018; COELHO *et al.*, 2016). Segundo Velloso *et al.* (2020), as simulações podem eliminar a necessidade de experimentos de campos e têm se tornado cada dia mais precisas.

As frequências naturais, modos de vibração e amplitudes de vibração foram objeto de estudo, por meio de métodos numéricos/computacionais, para avaliação do comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro (SANTOS *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2015; CARVALHO *et al.*, 2016; CIRO, 2001; TINOCO, 2017; TINOCO *et al.*, 2014; SOUZA

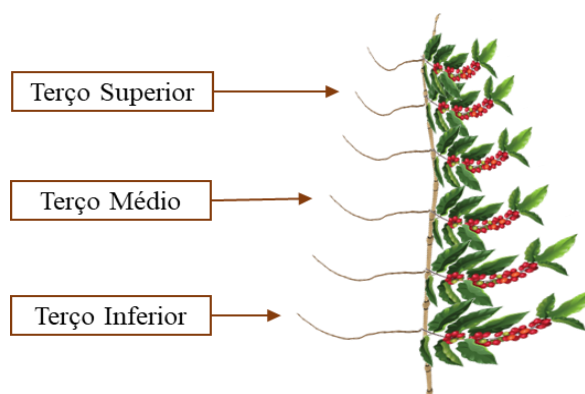
et al, 2018; COELHO *et al.*, 2016). Os resultados dos modelos numéricos propostos indicam que os modos de vibração associados às frequências naturais em intervalos específicos favorecem a derriça do café, considerando os seus diferentes estádios de maturação. Os resultados encontrados são consistentes quando comparados a análises experimentais utilizando plantas reais, o que demonstra o potencial do uso dos métodos. No entanto, devido à complexidade na modelagem dos ramos, avanços nos modelos estabelecidos são extremamente necessários a fim de conferir maior confiabilidade, representatividade e aproximação com a realidade.

Desta forma, o presente capítulo tem como objetivo desenvolver modelos tridimensionais de elementos finitos de ramos plagiotrópicos de café arábica variedade Catuaí Vermelho em diferentes posições ao longo do ramo ortotrópico da planta, considerando modelos de alta fidelidade. Adicionalmente, por meio de simulações computacionais, considerando dados experimentais referentes as propriedades físico-mecânicas dos ramos, foram determinadas as suas frequências naturais e modos de vibração. Os resultados obtidos foram validados a partir do uso de dados experimentais determinados por meio de técnicas de análise modal experimental.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas 15 amostras de ramos plagiotrópicos da variedade Catuaí Vermelho IAC 144, sem folhas e frutos, sendo 5 para cada tratamento. A partir da posição do ramo plagiotrópico, em relação ao ramo ortotrópico da planta, foram definidos os tratamentos: terço superior, terço médio e terço inferior (Figura 5.1).

Figura 5.1 – Posição de coleta dos ramos na planta

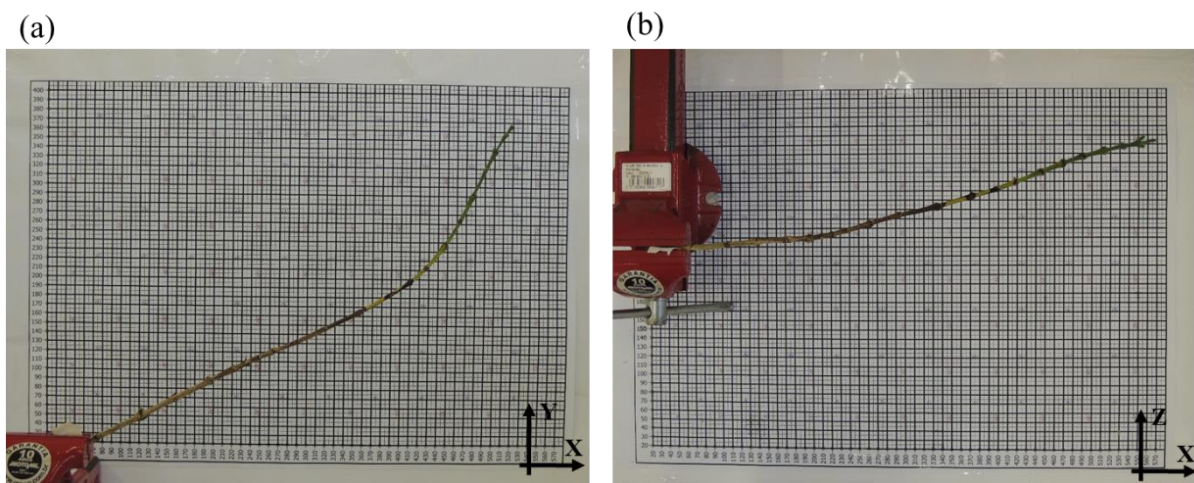


Fonte: Do autor (2020).

2.1 Propriedades geométricas dos ramos

A primeira etapa deste trabalho envolveu a obtenção das propriedades geométricas dos ramos por meio de duas imagens, retiradas com uso de câmera profissional, uma vertical e outra horizontal, contemplando as três coordenadas (XYZ) necessárias para modelagem posterior. Conforme apresentado na Figura 5.2, duas grades graduadas (mm), posicionadas de forma perpendicular uma à outra, foram utilizadas como fundo para as imagens.

Figura 5.2 – Imagens dos ramos retiradas com fundo de grade graduada (mm). (a) orientação horizontal (XY - vista de frente) (b) orientação vertical (XZ - vista superior).



Fonte: Do Autor (2020).

De forma padronizada, foram extraídas as coordenadas e diâmetros dos pontos representativos do ramo: anterior e posterior ao nó, e sobre o nó. As coordenadas tridimensionais dos ramos foram coletadas, uma a uma, por meio do uso do *software open source* ImageJ (RUEDEN *et al.*, 2017).

2.2 Propriedades mecânicas dos ramos utilizados nas simulações

A determinação experimental das propriedades mecânicas ocorreu em etapa posterior à coleta das propriedades geométricas, por se tratar de ensaios destrutivos. A partir das quinze amostras de ramos plagiotrópicos coletadas ao longo da planta, correspondentes aos tratamentos (superior, médio e inferior na planta) foram confeccionados corpos de prova para determinação das propriedades mecânicas. A partir de cada amostra foram coletados dois corpos de prova, um mais próximo do corte realizado junto ao ramo ortotrópico e outro próximo a extremidade livre do ramo.

A massa dos corpos de prova foi determinada utilizando-se uma balança digital semi-analítica, modelo AD500, fabricada por Marte Científica®, com resolução de 0,001 g. Para determinação do volume dos corpos de prova foi utilizado o método de imersão por meio de uma proveta de 10 mL. A massa específica de cada amostra foi dada pela razão entre os valores experimentais de massa e volume.

O módulo de elasticidade foi determinado utilizando máquina de ensaios universal, modelo EMIC 23-20, fabricada pela Instron®, equipada com célula de carga máxima de 20 kN. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração, paralelo às fibras, fixadas por garras nas extremidades e submetidos à carregamento na região central. Uma pré-carga de 2 N foi aplicada para tensionamento prévio do corpo de prova, com ensaio realizada a uma taxa de deformação de $0,01 \text{ m.min}^{-1}$ com duração de tempo correspondente à saída da linearidade, após tensão máxima.

Velloso *et al.* (2020) obtiveram, para variedade Catuaí Vermelho (IAC 144), a partir de ensaios de compressão para o tronco e tração para ramos, coeficiente de Poisson igual a 0,09 e 0,25, respectivamente. Carvalho, Magalhães e Santos (2016) determinaram o coeficiente de Poisson obtido a partir de amostras de tronco de Catuaí Vermelho (IAC 144). Utilizando imagens antes e depois de ensaios de compressão, os autores definiram o coeficiente de Poisson médio de 0,37 com desvio padrão de 0,1.

Dada a dificuldade na determinação correta do coeficiente de Poisson e os diferentes resultados disponíveis na literatura para essa propriedade, optou-se por considerar o valor desta propriedade mecânica igual a 0,30. Destaca-se que, para efeito de simulação neste estudo, o material das amostras foi considerado como homogêneo e isotrópico.

Os valores determinados de módulo de elasticidade e massa específica foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento inteiramente casualizado (DIC), considerando as diferentes posições na planta (Figura 5.1), para cada frequência natural avaliada. As médias foram analisadas por meio de teste Tukey, ao nível de significância de 5%.

2.3 Modelagem, análise de convergência e simulação

A partir dos pontos coletados, os ramos foram modelados no ambiente CAD do *software* Siemens NX® Versão 9.0. A união dos círculos modelados foi realizada empregando-se superfícies parametrizadas com restrição de continuidade G2 (curvatura). As condições de contorno do sistema consistiram na restrição da base do modelo em seis graus de liberdade, representando a fixação do ramo plagiotrópico junto ao ramo ortotrópico na planta.

Considerando uma geometria tetraédrica de 10 nós para os elementos, as malhas foram analisadas na terceira frequência natural, para verificar a convergência dos resultados em relação às simulações numéricas. Foram avaliados diferentes elementos de tamanhos entre 3 e 13 mm, com intervalo de 2 mm. Os resultados foram comparados até que convergissem de forma satisfatória.

Após a discretização dos modelos, a simulação foi realizada no ambiente de simulação do *software* Siemens NX[®] Versão 9.0, utilizando os parâmetros de entrada: módulo de elasticidade, massa específica e coeficiente de Poisson. O algoritmo de Block Lanczos foi usado para solução dos problemas dos autovalores e autovetores do sistema, resultando, respectivamente, nas frequências naturais e modos de vibração dos sistemas.

2.4 Autovalores e autovetores

Ao aplicar forças externas ao sistema, este pode ser modelado na forma matricial representado por equações diferenciais com múltiplos graus de liberdade, de acordo com o modelo da Equação 5.1.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{F\} \quad (5.1)$$

onde $\{F\}$ é o vetor de força, $[m]$ é a matriz de massa, $[c]$ é a matriz de amortecimento, $[k]$ é a matriz de rigidez, $\{x\}$ é o vetor de deslocamento, $\{\dot{x}\}$ é o vetor de velocidade e $\{\ddot{x}\}$ é o vetor aceleração.

Para vibração livre e não amortecida, a Equação 5.1 pode ser simplificada, resultando na Equação 5.2.

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{11} \\ \ddot{x}_{21} \\ \vdots \\ \ddot{x}_{n1} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{11} \\ x_{21} \\ \vdots \\ x_{n1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.2)$$

A Equação 5.2 representa a condição de vibração natural de um sistema. O estado de vibração natural pode ser denominado como modos naturais ou modos de vibração, e as frequências de vibração como frequências naturais do sistema. Assumindo que as vibrações livres sejam harmônicas, os autovalores e autovetores podem ser obtidos, reescrevendo o sistema conforme a Equação 5.3, a qual representa o deslocamento do sistema.

$$\{x\} = \{\varphi\}_i e^{i\omega_i t} = \{\varphi\}_i (\cos \omega_i t + i \sin \omega_i t) \quad (5.3)$$

em que, $\{\varphi\}_i$ representa o autovetor associado a i -ésima frequência natural do sistema, ω_i corresponde a frequência angular (em rad.s^{-1}) e t está associado ao tempo (s).

As frequências naturais e os modos de vibração podem ser obtidos, por meio da solução do problema de autovalores e autovetores, após operação de derivação da Equação 5.3 em relação ao tempo e substituindo na Equação 5.2.

Desta forma, obtêm-se a Equação 5.4, reconhecida como um problema de autovalor (HUEBNER *et al.*, 2010).

$$(-\omega^2[m] + [k])\{\varphi\}_i = \{0\} \quad (5.4)$$

A Equação 5.4 apresenta solução não trivial somente caso o determinante da matriz $(-\omega^2[m] + [k])$ seja igual a zero (BOYCE; DIPRIMA, 2002; ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2005).

2.5 Análise modal experimental

A determinação experimental das frequências naturais das amostras foi realizada por meio da Função Resposta em Frequência (FRF), via ensaio de impacto. Os ramos foram instrumentados com acelerômetros de forma unidirecional, verticalmente, afixados com abraçadeiras plásticas. O martelo de impacto utilizado tem como especificações: modelo PCB 086C03, fabricado por PCB Piezotronics™, com ponteira “supersoft” e sensor de força. Por meio de um módulo de aquisição, modelo NI cDAQ-9174, fabricado por National Instruments™, foram coletados os dados de aceleração e do martelo de impacto, utilizando o pacote *Sound and Vibration* do software LabView®.

Os ramos foram engastados em uma morsa e o impacto para obtenção da FRF foi realizado em sua parte central, utilizando o critério de aceitação/rejeição baseado na coerência obtida em 5 impactos efetivos. Os valores de coerência, caso não estivessem acima de 0,8, eram rejeitados.

Os dados de magnitude obtidos com a FRF foram convertidos em decibéis (dB) e, posteriormente, filtrados (*High Pass Filter*), o que permitiu a passagem das frequências de amplitudes altas com facilidade, atenuando a amplitude das frequências abaixo da amplitude de corte de 5 dB. Os gráficos foram plotados, sendo constatado que, a partir do terceiro pico, a curva tornou-se inconstante e sem picos proeminentes. Desta forma, foram selecionadas as três primeiras frequências naturais, correspondentes aos três primeiros picos.

2.6 Validação dos modelos

Foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento inteiramente casualizado (DIC), os valores de frequência natural experimental de cada uma das três primeiras frequências naturais. Considerando o fator posição na planta, as frequências naturais experimentais foram analisadas por meio de teste Tukey, ao nível de significância de 5%. O estudo das médias de frequência natural obtidas ao longo da planta implicou nas seguintes validações de modelos propostos.

Para cada amostra, foram comparadas as frequências naturais obtidas nas simulações numéricas, correspondentes aos três primeiros modos de vibração, com os valores de frequência naturais determinadas experimentalmente. A validação dos modelos propostos se deu por meio de regressão linear e teste de correlação.

A partir da regressão linear, foram analisados os valores de coeficiente angular da curva ajustada e o coeficiente de determinação (R^2). O teste de correlação de Pearson e o p-valor, ao nível de significância de 10%, avaliaram a correlação entre valores numéricos e experimentais. O software R (CORE TEAM, 2020) foi utilizado para a realização das análises estatísticas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 5.1 são apresentados os valores de propriedades físico-mecânicas, obtidos por meio da média entre os dois corpos de prova confeccionados a partir de cada unidade experimental. Os valores de módulo de elasticidade e massa específica encontrados foram utilizados na correlação entre dados experimentais e simulados, amostra a amostra, respectivamente.

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas das amostras do estudo: Módulo de elasticidade (E), em GPa, e massa específica (ρ), em g.cm^{-3} (continua).

Amostras	E	ρ
Am_sup1	1,25	1,007
Am_sup2	0,70	0,933
Am_sup3	1,13	0,921
Am_sup4	1,08	0,926
Am_sup5	0,70	0,922

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas das amostras do estudo: Módulo de elasticidade (E), em GPa, e massa específica (ρ), em g.cm⁻³ (conclusão).

Amostras	E	ρ
Am_med1	1,40	0,917
Am_med2	0,73	0,972
Am_med3	1,26	0,962
Am_med4	1,11	0,998
Am_med5	1,19	0,914
Am_inf1	1,15	0,890
Am_inf2	1,22	0,937
Am_inf3	1,01	0,960
Am_inf4	1,12	0,964
Am_inf5	1,56	0,945

Fonte: Do Autor (2020).

Para o terço superior, a massa específica média encontrada foi de 0,941 g.cm⁻³ com desvio padrão de 0,037 g.cm⁻³ e módulo de elasticidade médio de 0,97 GPa com desvio padrão de 0,25 GPa. O terço médio apresentou massa específica média de 0,953 g.cm⁻³ com desvio padrão de 0,036 g.cm⁻³ e módulo de elasticidade médio igual a 1,14 GPa com desvio padrão de 0,25 GPa. Por fim, para o terço inferior, foram obtidos valores de massa específica média igual a 0,939 g.cm⁻³ com desvio padrão de 0,030 g.cm⁻³ e módulo de elasticidade médio igual a 1,21 GPa com desvio padrão de 0,21 GPa. As médias encontradas para as diferentes posições na planta, tanto para a massa específica quanto para o módulo de elasticidade, não apresentaram diferenças significativas entre si, por meio de teste Tukey ao nível de significância de 5%. O número reduzido de amostras pode explicar o alto desvio padrão para as médias encontradas.

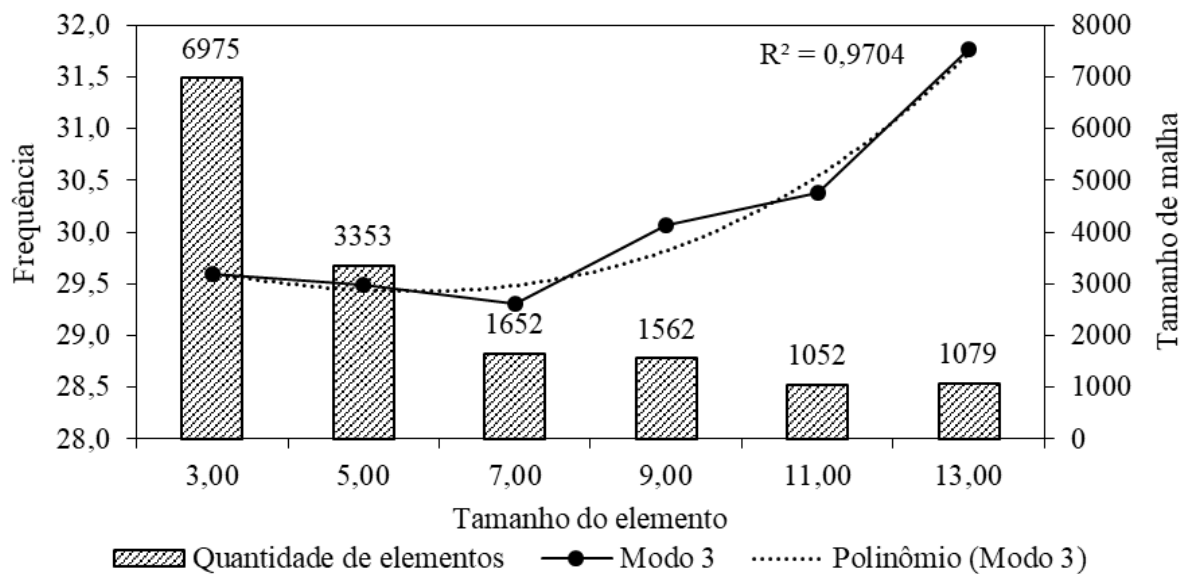
Coelho *et al.* (2015) determinaram massa específica média igual a 0,900 g.cm⁻³ e módulo de elasticidade médio igual a 1,94 GPa com desvio padrão 0,62 GPa para ramos de Catuaí Vermelho IAC 144. Fatores como variedade, idade, condições climáticas e tipos de manejo (ARISTIZÁBAL; OLIVEROS; ALVARES, 2003; RODRÍGUEZ *et al.*, 2006), além de diferentes métodos de obtenção das propriedades, podem explicar a diferença entre valores obtidos pelos autores e os encontrados neste estudo. Já Filgueiras (2000) encontrou massa específica média de 0,978 g.cm⁻³ e módulo de elasticidade médio com faixa entre 1,79 GPa e 3,56 GPa para variedade Catuaí Vermelho UFV-2237. O método de flexão utilizado pelo autor

e a variedade adotada, diferentemente daquela empregada neste estudo, podem explicar a divergência entre os valores encontrados.

A análise de convergência, considerando o terceiro modo de vibração, apresentou resultados a partir de tamanho de elemento abaixo de 5 mm (Figura 5.3). A curva polinomial de grau 3 apresentou coeficiente de determinação de 97,04%.

Para o elemento de tamanho igual a 5 mm, obteve-se frequência igual a 29,49 Hz com malha contendo 3353 elementos. O refinamento de tamanho igual a 3 mm apresentou frequência de 29,60 Hz, o que corresponde a um aumento de 0,37%, para um acréscimo do tamanho de malha superior a 108%. O aumento do tamanho de malha impacta diretamente no custo computacional requerido para simulação, por isso, optou-se pelo tamanho de elemento igual a 5 mm.

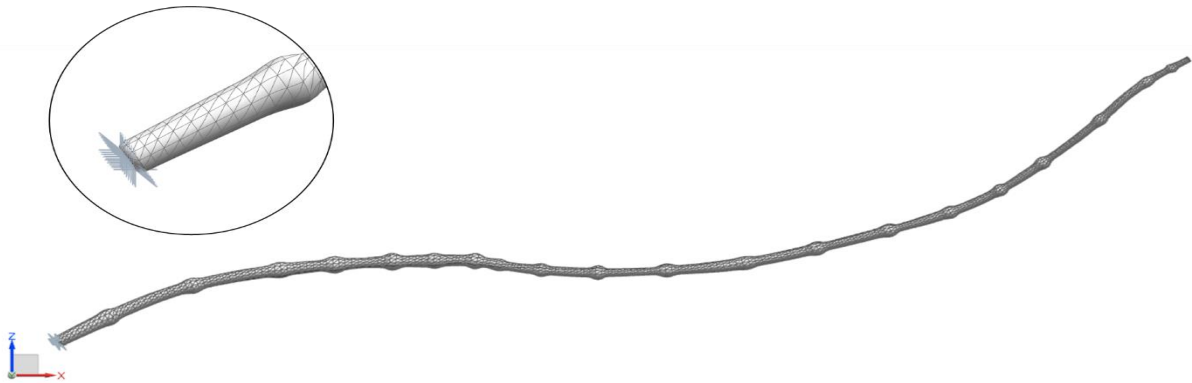
Figura 5.3 – Análise de convergência de malha para o 3º modo de vibração. Frequência natural em Hz e tamanho de elemento em mm.



Fonte: Do Autor (2020).

Detalhes da discretização de uma amostra são apresentados na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Amostra discretizada do ramo da planta cafeeira.



Fonte: Do Autor (2020).

Após as simulações, foram observados grupos de modos de vibração com valores de frequências muito próximas, relacionadas a modos de flexão para vibração lateral. Segundo Velloso *et al.* (2020), a obtenção de modos de vibração em diferentes direções para uma mesma frequência é esperada para um sistema em vibração livre. Assim, foram considerados os valores de frequência correspondente ao modo de vibração lateral no plano ao qual foi realizada a análise modal experimental via martelo de impacto. Na Figura 5.5 é apresentado um exemplo do resultado obtido nas simulações.

Figura 5.5 – Exemplo de resultado obtido nas simulações: (a) primeira frequência natural (b) segunda frequência natural e (c) terceira frequência natural.



Fonte: Do Autor (2020).

As frequências naturais obtidas experimentalmente foram submetidas a análise de variância com médias apresentadas na Tabela 5.2. Não foram encontradas diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, em diferentes posições na planta, para nenhuma das frequências naturais estudadas (ω_{n1} , ω_{n2} e ω_{n3}).

Tabela 5.2 – Frequências naturais médias para cada posição na planta, em Hz.

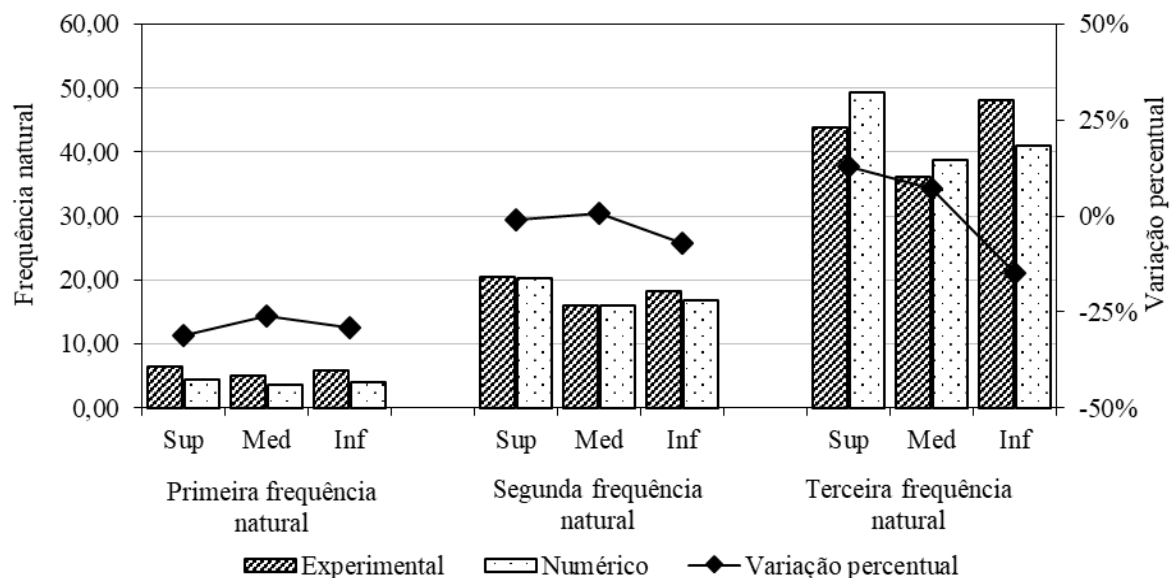
Posição na planta	Frequência natural média (Hz)		
	ω_{n1}	ω_{n2}	ω_{n3}
Superior	6,45	20,48	43,73
Médio	4,92	15,98	36,15
Inferior	5,72	18,12	48,13

Fonte: Do autor (2020).

Dado que as frequências naturais determinadas de forma experimental não apresentaram diferença significativa entre as posições na planta, foram determinadas, para primeira, segunda e terceira frequência natural, as frequências naturais médias e variação percentual entre os valores numéricos e experimentais, conforme apresentado na Tabela 5.2.

A primeira frequência natural apresentou maior variação percentual entre frequência natural numérica e experimental. Foram encontrados valores iguais a -31%, -26% e -29%, respectivamente para terço superior, terço médio e terço inferior. Já a segunda frequência apresentou melhor ajuste entre os modelos, já que se obteve -1% para terço superior, 1% para terço médio e -7% para terço inferior. Para a terceira frequência, observou-se os valores de 13%, 7% e -15% para terço superior, médio e inferior, respectivamente.

Figura 5.6 – Comparação entre frequências naturais médias, em Hz, experimentais e numéricas para cada terço da planta e frequência natural, assim como variação percentual entre frequências naturais numéricas e experimentais.



Legenda: Sup: Terço superior; Med: Terço médio; Inf: Terço inferior.

Fonte: Do Autor (2020).

A alta variabilidade das propriedades físico-mecânicas adotadas como parâmetros de entrada nas simulações pode explicar a divergência entre os resultados experimentais e numéricos, o qual foi mais pronunciado para primeira frequência natural, conforme apresentado na Figura 5.6. Além disso, a discrepância entre os resultados pode estar relacionada à imprecisão de métodos utilizados na determinação das propriedades mecânicas, uma vez que são considerados sistemas de fisiologia complexa, em fase de desenvolvimento e com topologia diversas dentro de um mesmo campo amostral (COELHO *et al.*, 2015; HERRERA; TORRES; TASCÓN, 2012; TINOCO *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2015).

Para a primeira frequência natural, obteve-se um valor médio de frequência obtida experimentalmente igual a 5,70 Hz e numericamente igual a 4,04 Hz, o que corresponde a uma variação percentual média de 29%. Os valores determinados numericamente foram, em média, inferiores ao experimentais. A segunda frequência natural apresentou valor médio experimental de 18,19 Hz e numérico de 17,73 Hz. A variação percentual média para a segunda frequência natural foi igual a 3%, com valores numéricos abaixo dos obtidos experimentalmente. Os valores observados para a terceira frequência natural tiveram média de 42,67 Hz e 43,03 Hz, obtidos de forma experimental e numérica, respectivamente. A variação percentual média foi de 1% apresentando valor numérico maior do que o obtido experimentalmente.

No estudo das frequências naturais de ramos plagiotrópicos da variedade Catuaí Vermelho, Coelho *et al.* (2017) encontraram valores iguais a 14,57, 16,83 e 19,45 Hz, para valores mínimo, médio e máximo, respectivamente. A faixa de frequências naturais encontrada pelos autores corresponde aos valores obtidos para a segunda frequência determinadas neste estudo.

Santos *et al.* (2010), ao estudarem, de forma experimental e em laboratório, o efeito da frequência e amplitude de vibração sobre a derriça de frutos de café, observaram que a frequência de 26,67 Hz tendeu a apresentar maior média de eficiência de derriça para os frutos no estágio maduro. Além disso, os autores concluíram que, para esta frequência, os frutos que estão em estádios anteriores ao maduro ou cereja tenderam a apresentar menor eficiência de derriça. Desta forma, é possível relacionar os valores encontrados na segunda frequência natural deste estudo com uma melhor eficiência de colheita.

Coelho *et al.* (2017) também avaliaram, por meio do método de elementos finitos, a influência do módulo de elasticidade na frequência natural simulada. Por meio de um algoritmo, o aumento ou a diminuição do valor do módulo de elasticidade foi comparado com o desvio percentual entre frequência experimental e simulada. A geometria e propriedades físico-mecânicas do modelo utilizado pelos autores foram as determinadas por Coelho *et al.* (2015),

com as seguintes especificações: diâmetro de 5,06 mm, massa específica de $0,90 \text{ g.cm}^{-3}$ e coeficiente de Poisson de 0,34. Para melhor representação e aproximação do sistema real, o método utilizado pelo autor pode ser empregado para avaliação da influência das propriedades físico-mecânicas em modelos simulados.

Desta forma, a fim de avaliar a relação entre os valores de frequência natural extraídos de forma numérica com os obtidos experimentalmente, foram realizadas análises de regressão linear e teste de correlação de Pearson, conforme apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Equação de regressão linear, coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de correlação de Pearson (ρ) entre valores numéricos e experimentais para cada amostra.

Amostra	Equação de regressão linear	R^2	ρ	p-valor
Am_sup1	$f(x) = 0,8822x + 3,6327$	1,00	1,00	0,0311
Am_sup2	$f(x) = 0,7553x + 4,6894$	0,99	0,99	0,0698
Am_sup3	$f(x) = 0,6352x + 4,8608$	0,97	0,99	0,0698
Am_sup4	$f(x) = 1,0227x + 1,0077$	1,00	1,00	0,0270
Am_sup5	$f(x) = 0,8519x + 1,9673$	0,99	1,00	0,0606
Am_med1	$f(x) = 0,8975x + 1,6655$	1,00	1,00	0,0062
Am_med2	$f(x) = 0,8078x + 4,4529$	0,93	0,97	0,1657
Am_med3	$f(x) = 0,8776x + 0,1561$	0,99	1,00	0,0621
Am_med4	$f(x) = 0,9262x + 2,3278$	1,00	1,00	0,0090
Am_med5	$f(x) = 0,9178x - 0,1765$	0,99	0,99	0,0745
Am_inf1	$f(x) = 1,2339x + 2,8352$	1,00	1,00	0,0069
Am_inf2	$f(x) = 1,2411x - 1,0381$	0,99	1,00	0,0632
Am_inf3	$f(x) = 0,819x + 2,1078$	1,00	1,00	0,0163
Am_inf4	$f(x) = 0,9632x - 0,8722$	0,97	0,99	0,1084
Am_inf5	$f(x) = 1,6956x - 2,7144$	1,00	1,00	0,0361

Fonte: Do Autor (2020).

Por meio da análise de regressão foi possível avaliar se o modelo proposto numericamente descreve de forma fiel o sistema real, com os dados obtidos experimentalmente. O ajuste das retas propostas aos modelos, apresentaram pouca dispersão com valores de R^2 superiores a 0,99 em doze das quinze amostras. Os resultados comprovam que os modelos geométricos se aproximam de maneira ótima da topologia do ramo. Além disso, as análises dos

coeficientes angulares das equações de regressão linear permitiram avaliar a relação entre variável dependente e variável independente visto que, valores de m próximos a 1 (um), indicam maior associação entre as variáveis.

Os resultados encontrados para o teste de correlação de Pearson (ρ) foram próximos ou iguais a um para todas as amostras analisadas, o que representa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis. Para um nível de significância de 10% foi possível concluir que, para todas as amostras, exceto a Am_med2 e Am_inf4, existe uma relação significativa entre as variáveis numéricas e experimentais.

De forma análoga, Velloso *et al.* (2020) determinaram experimental e numericamente as frequências naturais da planta cafeeira, cultivar Catuaí Vermelho (IAC 144). Para a obtenção experimental das frequências naturais, os autores utilizaram um sistema de vibração livre de forma que as amostras não tocassem o solo. Por meio de função resposta em frequência, acelerômetros instalados ao longo da planta detectaram maior incidência de picos de frequência natural entre 10 Hz e 30 Hz. Já a determinação das frequências naturais e modos de vibração se deu por meio de geração de modelos representativos e simulação via método de elementos finitos. Os parâmetros de entrada na simulação utilizados pelos autores foram àqueles determinados experimentalmente, amostra a amostra. Por meio de análises de regressão linear e testes de correlação, os autores encontraram associação entre dados experimentais e simulados, validando os modelos propostos.

Considerando-se o método de elementos finitos determinístico, a alta variabilidade e complexidade encontrada na obtenção das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema cafeeiro, influenciam diretamente nos resultados simulados (SANTOS *et al.*, 2015; TINOCO *et al.*, 2014). A fim de verificar a interferência dos valores de módulo de elasticidade e massa específica nos resultados das simulações dos modelos propostos, Coelho *et al.* (2016) utilizaram o método de elementos finitos estocástico para estudo do sistema fruto-pedúnculo-ramo. Os autores concluíram que as frequências naturais aumentaram na medida em que se elevou o módulo de elasticidade ou se reduziu a massa específica dos frutos, pedúnculos e ramos.

Além disso, a simplificação nas propriedades mecânicas dos materiais, considerando-os como material homogêneo e isotrópico, foi considerada como fator predominante nas diferenças encontradas no estudo de Carvalho *et al.* (2016). Os autores ainda observaram que os ramos com diferentes tamanhos ao longo da planta de café apresentam diferentes padrões de rigidez mecânica. Segundo Rao (2008), diferenças entre massa específica e rigidez do sistema afetam o modo de vibração do sistema.

Assim sendo, de forma a analisar como as propriedades físico-mecânicas afetam os resultados das simulações, métodos estocásticos podem ser empregados, em que dados de entrada são selecionados por valores aleatórios, obtendo assim, um conjunto de resultados para um dado parâmetro (REH *et al.*, 2006; NIEMEYER; WILKE; SCHMIDT, 2012).

4 CONCLUSÕES

Quanto ao estudo do comportamento dinâmico de ramos do cafeeiro por meio do método de elementos finitos, conclui-se que:

- para a primeira frequência natural, as frequências naturais simuladas a partir do método de elementos finitos apresentaram um desvio de -31%, -26% e -29%, respectivamente para os terços superior, médio e inferior ao longo da planta. A alta variabilidade das propriedades físico-mecânicas utilizadas como parâmetros de entradas nas simulações pode explicar os altos desvios encontrados para a primeira frequência natural.

- a segunda frequência natural apresentou melhor ajuste entre os modelos, apresentando variação percentual igual a -1%, 1% -7% para os terços superior, médio e inferior, respectivamente

- para a terceira frequência, observou-se variação percentual com valores iguais a 13%, 7% e -15% para os terços superior, médio e inferior, respectivamente.

- Ajustes de regressão linear apresentaram coeficiente de determinação acima de 0,99 em doze das quinze amostras. Além disso, testes de correlação indicam que existe uma relação significativa entre as variáveis numéricas e experimentais.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, E. A.; MAGALHÃES, R. R.; SANTOS, F. L. Geometric modeling of a coffee plant for displacements prediction. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.123, p.57-63, 2016. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.008>>. Acesso em 21 out. 2020.
- CIRO, H. 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.
- COELHO, A. L. F. *et al.* Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema frutopedúnculo-ramo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 3, p. 286-292, 2015.
- COELHO, A. L. d. F. *et al.* Dynamic behavior of the coffee fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 1–10, 2016.
- COELHO, A. L. d. F. *et al.* Dynamic test for determining the elastic modulus of coffee fruit-stem-branch system. **Acta Scientiarum. Technology**, v.39, p.579-586, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i5.30101>>. Acesso em 21 out. 2020.
- FADAI, N. T.; PLEASE, C. P.; VAN GORDER, R. A. Modelling structural deformations in a roasting coffee bean. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 110, p. 123-130, 2019.
- HERRERA, J. J. C., TORRES, I. D. A.; TASCÓN, C. E. O. Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del fruto de café (*Coffea Arabica* l. var. Colombia) durante su desarrollo y maduración. **Dyna**, v. 79, n. 173, p. 116-124. 2012
- KNIGHT, C. E. **The finite element method in mechanical design**. PWS Publishing Co., 1992.
- HUEBNER, K. H. *et al.* **The finite element method for engineers**. Wiley-Interscience; 4^a ed., 2010.
- MAGALHÃES, A. C. *et al.* Modelagem de máquina pneumática recolhadora de frutos de café em terreiro usando análise por elementos finitos. **Engenharia Agrícola**, v. 6, n. 2, p. 483–492, 2006.
- MOAVENI S. **Análise de elementos finitos: Teoria e aplicação com ANSYS**. Terceira edição. New Jersey, EUA. Prentice Hall. 2007; 880 p.
- NIEMEYER, F.; WILKE, H.J.; SCHMIDT, H. Geometry strongly influences the response of numerical models of the lumbar spine—a probabilistic finite element analysis. **Journal of Biomechanics**, v. 45, n. 8, p. 1414-1423, 2012.
- NOURAIN, J. *et al.* Firmness evaluation of melon using its vibration characteristic and finite element analysis. **Journal of Zhejiang University. Science. B**, v. 6, n. 6, p. 483, 2005.

- OLIVEIRA, E. D. *et al.* The influence of the sticks vibration and the speed in the displacement of the harvester machine on mechanized coffee harvest process. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.3, p.714–721, 2017.
- RAO, S. S. **Mechanical vibrations**. São Paulo: Prentice Hall Upper Saddle River, v.4, 2008.
- REH, S.; BELEY, J.; MUKHERJEE, S.; KHOR, E. H. Probabilistic finite element analysis using ANSYS. **Structural Safety**. v.28, n.1-2, p.17-43, 2006.
- RUEDEN, C. T. *et al.* ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. **Bmc Bioinformatics**, v. 18, n. 1, p. 1-1, 29, 2017.
- SACHAK-PATWA, R.; FADAI, N.; VAN GORDER, R. A. A homogenization approach for the roasting of an array of coffee beans. **SIAM Journal on Applied Mathematics**, v. 79, n. 4, p. 1550-1580, 2019.
- SANTOS, F. L. *et al.* Efeito da frequência e amplitude de vibração sobre a derriça de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi**, v. 14, n. 4, 2010.
- SANTOS, F. L. *et al.* Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum. Technology**, v.37, n. 1, p. 11-17, 2015. Disponível em <<https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i1.19814>>. Acesso em 21 out. 2020.
- SAVARY, S. K. J. U. *et al.* Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 5, p. 1373-1381, 2010.
- SILVA, E. P. da; SILVA, F. M. da; MAGALHÃES, R. R. Application of finite elements method for structural analysis in a coffee harvester. **Engineering**, v. 6, n. 3, p. 138, 2014.
- SOUZA, V. H. S. *et al.* Evaluation of the interaction between a harvester rod and a coffee branch based on finite element analysis. **Computers And Electronics In Agriculture**, v. 150, p. 476-483, 2018. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.020>>. Acesso em 21 out. 2020.
- TINOCO, H. A. *et al.* Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of *Coffea arabica* L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 108, p. 17-27, 2014. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2014.06.011>>. Acesso em 21 out. 2020.
- TINOCO, H. A. Modeling elastic and geometric properties of *Coffea arabica* L. var. Colombia fruits by an experimental-numerical approach. **International Journal of Fruit Science**, v. 17, n. 2, p. 159-174, 2017. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1080/15538362.2016.1270249>>. Acesso em 21 out. 2020.
- VELLOSO, N. S. *et al.* Mechanical properties of the macaw palm fruit-rachilla system. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 2, p. 218–225, 2017.

VELLOSO, N. S. *et al.* Modal properties of coffee plants via numerical simulation. **Computers and Electronics In Agriculture**, v. 175, p. 105552, 2020. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2020.105552>>. Acesso em 21 out. 2020.

VELLOSO, N. S. *et al.* The Finite Element Method Applied to Agricultural Engineering: A review. **Current Agriculture Research Journal**, v. 6, n. 3, p. 286-299, 2018.

VILLAR, F. M. d. M. *et al.* Elasticity modulus and damping ratio of macaw palm rachillas. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, p. 1–6, 2017.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals: Its Basis and Fundamentals. **Butterworth-Heinemann**, 733 p., 2013.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. Excetuando-se o primeiro e segundo capítulo, que compõem a introdução geral e referencial teórico, este estudo pode ser dividido em três partes.

A primeira parte do trabalho teve como base a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos ramos plagiotrópicos da planta cafeeira como: massa, volume, massa específica e módulo de elasticidade.

A partir de corpos de prova coletados em duas partes do ramo, uma próxima à extremidade e outra próxima ao corte do ramo ortotrópico, foram analisadas as médias de massa específica e módulo de elasticidade.

Os corpos de prova do ramo apresentaram massa específica média igual a $0,945 \text{ g.cm}^{-3}$ com desvio padrão de $0,049 \text{ g.cm}^{-3}$. Para a posição na planta, não foram encontradas diferenças significativas entre as médias de massa específica média para os terços superior, médio e inferior, ao longo do ramo ortotrópico. Também não houve diferença significativa das médias de massa específica para os corpos de prova coletados a partir da parte mais extrema do ramo, assim como na parte próxima ao ramo ortotrópico.

O módulo de elasticidade médio encontrado foi de $1,24 \text{ GPa}$ com desvio padrão de $0,13 \text{ GPa}$. Os valores encontrados são crescentes para os ramos da parte superior em direção à parte inferior da planta. A maior rigidez encontrada nesta fração da planta pode ser explicada pela presença de maior parte lenhosa e maior diâmetro, se comparados à ramos novos.

Na segunda parte foram determinados os parâmetros modais do sistema em diferentes cenários de estudo: ramo sem folhas e sem frutos, ramos sem folhas e com frutos, e ramos com folhas e frutos. As frequências naturais, coeficientes e razão de amortecimento, obtidas por meio de função resposta em frequência, com utilização de martelo de impacto, foram analisadas para diferentes posições ao longo da planta (terço superior, terzo médio e terzo inferior), assim como para diferentes estádios de maturação.

Para o ramo sem frutos e sem folhas, a análise da posição ao longo da planta apresentou o terzo superior com valores de frequências natural superior as demais frações da planta. O padrão de valores obtidos na parte superior da planta se repetiu para as três primeiras frequências naturais. O coeficiente de amortecimento médio apresentou valores aumentados na parte superior da planta, para a terceira frequência natural, o que indica a influência da rigidez e massa inferiores em brotos novos e em desenvolvimento.

Para o ramo sem e folhas e com frutos em diferentes estádios de maturação, diversos cenários foram estudados. Dentre os resultados obtidos, é possível verificar que ramos contendo frutos no estágio maduro apresentaram, de forma geral, frequências naturais médias maiores em relação a ramos com frutos verdes.

Para o ramo completo, contendo folhas e frutos, não foram encontradas diferenças significativas entre as médias de frequências naturais ao longo da planta e para diferentes estádios de maturação, na primeira frequência natural. O padrão se repetiu para a segunda e terceira frequências naturais, com exceção à diferença na frequência natural média encontrada para ramos com frutos maduros no terço médio. Este comportamento pode ser considerado um importante parâmetro de regulação de máquina colhedoras, visto que não houve diferenciação entre valores médios de frequência natural ao longo da planta.

A terceira e última parte deste estudo baseou-se no desenvolvimento e implementação do método de elementos finitos para modelos discretizados do ramo plagiotrópico do cafeeiro.

As propriedades geométricas, físicas e mecânicas de cada amostra foram determinadas experimentalmente e empregadas como parâmetros de entrada para simulação do comportamento dinâmico do sistema.

Análises de regressão linear e testes de correlação foram utilizadas para validar os resultados obtidos nas simulações com resultados determinados de forma experimental por meio de função resposta em frequência. Foram analisadas as posições ao longo do ramo para as três primeiras frequências naturais correspondentes aos modos de vibração laterais no plano ao qual foi realizada a análise modal experimental via martelo de impacto.

Para a primeira frequência natural, as frequências naturais simuladas a partir do método de elementos finitos apresentaram um desvio de -31%, -26% e -29%, respectivamente, para terço superior, terço médio e terço inferior ao longo da planta. A alta variabilidade das propriedades físico-mecânicas utilizadas como parâmetros de entradas nas simulações pode explicar os altos desvios encontrados para a primeira frequência natural.

A segunda frequência natural apresentou melhor ajuste entre os modelos, apresentando variação percentual de -1%, 1% -7% para os terços superior, médio e inferior, respectivamente.

Para a terceira frequência, observou-se variação percentual de 13%, 7% e -15% para terços superior, médio e inferior, respectivamente.

Ajustes de regressão linear apresentaram coeficiente de determinação acima de 0,99 em doze das quinze amostras. Além disso, testes de correlação indicam que existe uma relação significativa entre as variáveis numéricas e experimentais.