

GEICE PAULA VILLIBOR

**MODELAGEM DO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO NO PROCESSO DE
DERRIÇA DE CAFÉ**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

V751m
2012

Villibor, Geice Paula, 1983-

Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de
derrça de café / Geice Paula Villibor. – Viçosa, MG, 2012.
160f. : il. ; (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Máquinas agrícolas - Projetos e construções. 2. Café -
Colheita. 3. Processamento de imagens. 4. Café - Simulação
por computador. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

GEICE PAULA VILLIBOR

**MODELAGEM DO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO NO PROCESSO DE
DERRIÇA DE CAFÉ**

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

APROVADA: 19 de setembro de 2012.

Fábio Lúcio Santos

Ricardo Capúcio de Resende

Carlos Eduardo Silva Volpato

Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Coorientador)

Prof. Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

“Se, a princípio, a ideia não é absurda, então não há esperança para ela.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Daniel Marçal de Queiroz, pela orientação, pelos conselhos e pelas oportunidades, e principalmente pela confiança depositada durante todo tempo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade para realização do doutorado.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de estudos e financiamento concedido durante o período do curso mais solicitado.

Aos professores Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Márcio Aredes Martins, pela orientação e apoio para realização do trabalho. Aos professores Joseph Kalil Khoury Junior e Fábio Lúcio Santos pelos ensinamentos práticos e teóricos, e pelo estímulo e pela paciência em todos os momentos solicitados.

Aos Professores Ricardo Capúcio de Resende e Tetuo Hara pela amizade, conselhos e opiniões relevantes nos momentos certos. Ao amigo e colega Denis Medina Guedes pelo apoio e paciência durante toda coleta de dados e desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Ney e ao Fernando Antônio Pereira da Silva pela disponibilização da área experimental para coleta das amostras de café. Aos professores Haroldo Carlos Fernandes, Mauri Martins Teixeira e Luciano Baião Vieira e aos colegas do Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica.

A toda minha família, em especial meus pais Mauricio Villibor Filho e Dorotéia de Paula Villibor e meu irmão Jansen pela confiança e pela paciência, durante toda essa jornada. Ao Danilo Roberto Loureiro, pelos conselhos, pela ajuda, pelo apoio, pelo companheirismo em todos os momentos.

Ao Antônio Barros, à Gracielly e ao Flávio, em especial, pela ajuda e pelos conselhos concedidos ao desenvolvimento do trabalho. Aos meus amigos e colegas da Mecanização Agrícola Flora, Marconi, Daniel, Marcus Vinícius, Marcelo, Frederico, André, Rafael, Gustavo, Selma e Wagner pela amizade dentro e fora da instituição.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola que contribuíram para esse momento. Aos meus demais colegas e amigos por terem sempre me apoiado, e incentivado, em todos os momentos.

BIOGRAFIA

GEICE PAULA VILLIBOR, filha de Dorotéa de Paula Villibor e Mauricio Villibor Filho, nasceu no dia 15 de abril de 1983, na cidade de Bueno Brandão, Minas Gerais.

Iniciou o curso de Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, em abril de 2001, na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, concluindo-o em outubro de 2006.

Em outubro de 2006, ingressou no Programa de Pós-graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, na área de concentração em Mecanização Agrícola, submetendo-se à defesa da dissertação em julho de 2008.

Integrou-se ao Programa de Pós-graduação, em nível de doutorado, em Engenharia Agrícola, em agosto de 2008, na Universidade Federal de Viçosa, na área de concentração em Mecanização Agrícola, submetendo-se à defesa de tese em setembro de 2012.

Em agosto de 2010 foi contratada como professora assistente no curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Viçosa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	14
RESUMO	19
ABSTRACT	21
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL.....	23
1.1. Introdução	23
1.2. Objetivos	25
1.3. Justificativa	26
1.4. Disposição do trabalho.....	27
1.5. Referências Bibliográficas	28
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA.....	30
2.1. Derrixa dos frutos do café	30
2.2. Propriedades mecânicas da planta de café importantes ao processo de derrixa por vibração.....	36
2.2.1. Força axial de desprendimento dos frutos de café.....	36
2.2.2. Parâmetros modais da planta de café e transmissibilidade de vibração	38
2.2.3. Medição de vibração em sistemas mecânicos e biológicos.....	41
2.3. Utilização de vídeos de alta velocidade para a determinação de propriedades mecânicas e transmissibilidade de vibração de sistemas mecânicos e biológicos.....	43
2.4. Modelagem matemática para estudo da dinâmica do sistema fruto-pedúnculo do café	45
2.5. Referências Bibliográficas	48

CAPÍTULO 3 - DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MODAIS DO SISTEMA
FRUTO-PEDÚNCULO DO CAFÉ POR VÍDEOS DE ALTA VELOCIDADE54

3.1. Introdução	54
3.2. Material e Métodos	56
3.2.1. Parâmetros modais determinados para o sistema fruto-pedúnculo do café..	56
3.2.2. Equipamentos utilizados nos testes de vibração.....	60
3.2.3. Determinação dos deslocamentos resultantes do sistema fruto-pedúnculo do café.....	62
3.2.4. Processamento dos vídeos de monitoramento da vibração	65
3.2.5. Avaliação dos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café obtidos nos testes de vibração.....	69
3.2.6. Caracterização das amostras utilizadas nos testes de vibração.....	70
3.3 - Resultados e Discussão	72
3.3.1. Resultado do processamento dos vídeos de monitoramento da vibração....	72
3.3.2. Parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café	80
3.4. Conclusões	85
3.5. Referências Bibliográficas	86

CAPÍTULO 4 - DETERMINAÇÃO DA TRANSMISSIBILIDADE DE VIBRAÇÃO
NO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO DO CAFÉ SUBMETIDO À
VIBRAÇÃO FORÇADA

4.1. Introdução	89
4.2. Material e Métodos	91
4.2.1. Determinação da transmissibilidade de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café.....	92
4.2.2. Delineamento experimental e análise dos dados	97
4.2.3. Determinação das propriedades físicas do sistema fruto-pedúnculo do café	98
4.3. Resultados e Discussão	99
4.3.1. Processamento dos vídeos de monitoramento dos ensaios de vibração	99
4.3.2. Transmissibilidade de vibração para frequências entre 13,33 e 26,67 Hz e amplitudes entre 5 e 15 mm.....	100

4.3.3. Transmissibilidade de vibração para frequências entre 35 e 55 Hz e amplitudes entre 3,5 e 6,5 mm.....	113
4.4. Conclusões	127
4.5. Referências Bibliográficas	128
CAPÍTULO 5 - ESTUDO DA DINÂMICA DO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO DO CAFÉ UTILIZANDO MODELAGEM DE CORPOS FLEXÍVEIS.....	131
5.1. Introdução	131
5.2. Material e Métodos	132
5.3. Resultados e Discussão	139
5.4. Conclusões	155
5.5. Referências Bibliográficas	155
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	157
6.1. Resumo e conclusões	157

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 2.1 - Dispositivo agitador com padrão multidirecional para troncos de plantas de café desenvolvido pelo CENICAFE (2001) (Fonte: GARCÍA-URIBE & OLIVEROS-TASCÓN, 2003). 32
- FIGURA 2.2 - Esquema representativo de um agitador de tronco de plantas de café com padrão circular (a) e padrão multidirecional com quatro loopings (b) (Fonte: ARISTIZÁBAL et al., 2003a). 33
- FIGURA 2.3- Derrçador portátil que aplica vibração aos ramos plagiotrópico do café a fim de promover o desprendimento dos frutos (Fonte: TASCÓN et al., 2005). 33
- FIGURA 2.4- Derrçadoras portáteis utilizadas para derriça dos frutos do cafeeiro (a) costal e (b) lateral (Fonte: NAKASHI, 2012). 34
- FIGURA 2.5 - Derrçadora tratorizada com um cilindro derrçador (a) e colhedora automotriz (b) utilizada para derriça dos frutos do cafeeiro (Fonte: MUNDO NOVO ALIANÇA, 2012 e CASE IH, 2012). 34
- FIGURA 2.6 - Dispositivo para derriça de frutos de café aplicando vibração aos galhos por meio de hastes vibratórias em movimento vertical (Fonte: OLIVEIRA, 2009). 35
- FIGURA 2.7 - Aplicação combinada de torção e flexão ao sistema fruto-pedúnculo do café (Fonte: GOMEZ & TÁSCON, 2003). 36
- FIGURA 3.1 - Resposta teórica de decaimento da oscilação de um sistema submetido a um deslocamento inicial (Adaptado: BEARDS, 1996). 57
- FIGURA 3.2 - Sistema empregado nos ensaios de derriça: (a) gerador de sinais, (b) amplificador e (c) máquina vibradora (Fonte: SANTOS, 2008). 61
- FIGURA 3.3 - Esquema representativo da configuração utilizada para a determinação dos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café. 62
- FIGURA 3.4 - Representação do fundo de imagem com pontos de controle (PC1 a PC4) e ponto de monitoramento (PM), em três imagens (I1 I2 I3), para uma amostra do sistema fruto-pedúnculo do café..... 64

FIGURA 3.5 - Fluxograma do programa computacional desenvolvido para determinação dos deslocamentos do sistema fruto-pedúnculo do café durante os ensaios de vibração.....	68
FIGURA 3.6 - Amostras dos ramos plagiotrópicos de café utilizadas para a determinação das características geométricas e para os testes de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café: (a) cereja e (b) verde. ...	71
FIGURA 3.7 - Processo de segmentação das imagens para quatro cenas do vídeo do processo de decaimento da oscilação para o sistema fruto-pedúnculo do café no estágio de maturação verde.	73
FIGURA 3.8 - Processo de segmentação das imagens para quatro cenas do vídeo do processo de decaimento da oscilação para o sistema fruto-pedúnculo do café no estágio de maturação verde.	74
FIGURA 3.9 - Decaimento da oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café, estágio de maturação cereja, para as taxas de amostragem de vídeo de 210, 420 e 1000 Hz.	77
FIGURA 3.10 - Decaimento da oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café, estágio de maturação verde, para as taxas de amostragem de vídeo de 210, 420 e 1000 Hz.	78
FIGURA 3.11 - Deslocamento resultante para amostras do sistema fruto-pedúnculo do café nos estádios de maturação (a) cereja e (b) verde com vibração coincidente ao base de excitação.	79
FIGURA 4.1 - Representação esquemática do sistema fruto-pedúnculo do café engastado a máquina vibradora, eixos de referência e a direção do deslocamento de entrada.	95
FIGURA 4.2 - Resultado da segmentação de quatro quadros de um dos vídeos adquiridos para o sistema fruto-pedúnculo do café no estágio de maturação cereja para uma taxa de amostragem de 210 Hz.	99
FIGURA 4.3 - Resultado da segmentação de quatro quadros de um dos vídeos adquiridos para o sistema fruto-pedúnculo do café no estágio de maturação verde para uma taxa de amostragem de 210 Hz.	100

FIGURA 4.4 - Transmissibilidade de vibração média observada para o sistema fruto-pedúnculo do café, para a direção x e y, no estágio de maturação cereja (Experimento 1: 13,33 a 26,67 Hz; 5,00 a 15,00 mm).....	102
FIGURA 4.5 - Transmissibilidade de vibração média observada para o sistema fruto-pedúnculo do café, para a direção x e y, no estágio de maturação verde (Experimento 1: 13,33 a 26,67 Hz; 5,00 a 15,00 mm).....	103
FIGURA 4.6 - Deslocamento resultante para o sistema fruto-pedúnculo do café, no estágio de maturação cereja e verde, para uma frequência de vibração de 20 Hz e amplitude de 10 mm.	105
FIGURA 4.7 - Deslocamento resultante para o sistema fruto-pedúnculo do café, no estágio de maturação verde, para uma frequência de vibração de 13,33 Hz e amplitude de 15,00 mm.	106
FIGURA 4.8 - Variação da transmissibilidade na direção x (Tx) em função das frequências de vibração (13,33; 20,00 e 26,67 Hz) e amplitudes de vibração (5; 10 e 15 mm), estágio de maturação cereja.....	108
FIGURA 4.9 - Variação da transmissibilidade na direção y (Ty) em função das frequências de vibração (13,33; 20,00 e 26,67 Hz) e amplitudes de vibração (5; 10 e 15 mm), estágio de maturação cereja.....	110
FIGURA 4.10 - Transmissibilidade na direção x (Tx) em função das frequências de vibração (13,33; 20,00 e 26,67 Hz) e amplitudes de vibração (5; 10 e 15 mm), estágio de maturação verde.	111
FIGURA 4.11 - Superfície de resposta ajustada para a transmissibilidade de vibração na direção y ($Ty = -4,37329 - 0,08447F - 0,08330F^2$) (a) e respectivos cortes (b), para o estágio de maturação verde.	113
FIGURA 4.12 - Transmissibilidade de vibração média observada para o sistema fruto-pedúnculo do café, para a direção x e y, no estágio de maturação cereja (Experimento 2: 35 a 55 Hz; 3,5 a 6,5 mm).....	115
FIGURA 4.13 - Transmissibilidade de vibração média observada para o sistema fruto-pedúnculo do café, para a direção x e y, no estágio de maturação verde (Experimento 2: 35 a 55 Hz; 3,5 a 6,5 mm).....	116

FIGURA 4.14 - Deslocamento resultante para o sistema fruto-pedúnculo do café, nos estádios de maturação cereja e verde, para a frequência de vibração de 55 Hz e amplitude de 5 mm.	117
FIGURA 4.15 - Superfície de resposta ajustada ($T_x = -0,90859 - 0,01723F - 0,12336A$) para a transmissibilidade de vibração ao sistema fruto-pedúnculo do café cereja, na direção transversal ao deslocamento de entrada (Experimento 2).....	119
FIGURA 4.16 - Transmissibilidade de vibração, na direção x, estimada e observada para as amplitudes de vibração trabalhadas para o sistema fruto-pedúnculo do café cereja (Experimento 2).	120
FIGURA 4.17 - Superfície de resposta ajustada ($T_y = 3,73338 - 0,07020F - 0,54943A + 0,0130FA$) para representar a transmissibilidade de vibração ao sistema fruto-pedúnculo do café cereja, na direção y (direção do movimento de entrada).	121
FIGURA 4.18 - Transmissibilidade de vibração, na direção y, estimada e observada para as amplitudes de vibração trabalhadas para o sistema fruto-pedúnculo do café cereja.....	122
FIGURA 4.19 - Variação da transmissibilidade na direção x (T_x) em função das três amplitudes de vibração trabalhadas (3,5; 5,0 e 6,5 mm): considerando o experimento total (a) e para cada frequência individualmente (b), estágio de maturação verde.....	124
FIGURA 4.20 - Superfície de resposta ajustada para T_y ($T_y = -4,89307 - 0,05237F - 0,23986A$) , estágio de maturação verde, para o Experimento 2.	125
FIGURA 4.21 - Cortes realizados na superfície de resposta ajustada para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para o estágio de maturação verde (Experimento 2).	126
FIGURA 5.1 - Esquema representativo do sistema fruto-pedúnculo do café após a discretização do pedúnculo em uma viga flexível.	133
FIGURA 5.2 - Esquema representativo para determinação do módulo de elasticidade dos pedúnculos do café	135

FIGURA 5.3 - Representação esquemática do sistema fruto-pedúnculo do café utilizado nas simulações computacionais no WM2D.	137
FIGURA 5.4 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 13,33 Hz e amplitude de 15,00 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.	142
FIGURA 5.5 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 20,00 Hz e amplitude de 15,00 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.	143
FIGURA 5.6 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 26,67 Hz e amplitude de 15,00 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.	144
FIGURA 5.7 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 35 Hz e amplitude de 6,5 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde. ..	146
FIGURA 5.8 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 45 Hz e amplitude de 6,5 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde. ..	147
FIGURA 5.9 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 55 Hz e amplitude de 6,5 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde. ..	148
FIGURA 5.10 - Deslocamento simulado na ligação entre o fruto e o pedúnculo do café para a combinação entre a frequência de 35 Hz e amplitude de 6,5 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.	149
FIGURA 5.11 - Deslocamento simulado na ligação entre o fruto e o pedúnculo do café para a combinação entre a frequência de 55 Hz e amplitude de 6,5 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.	150

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Principais características técnicas do vibrador eletromagnético utilizado nos testes de vibração.....	61
TABELA 3.2 - Principais características técnicas da câmera utilizada para monitoramento da vibração do galho e do sistema fruto-pedúnculo do café.....	61
TABELA 3.3 - Exemplo de matriz de confusão calculada para avaliar o processamento dos vídeos para cada estágio de maturação do sistema fruto-pedúnculo do café e taxa de amostragem de vídeo.....	69
TABELA 3.4 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estágio de maturação cereja e taxa de amostragem de vídeo de 210 Hz.....	74
TABELA 3.5 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estágio de maturação cereja e taxa de amostragem de vídeo de 420 Hz.....	74
TABELA 3.6 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estágio de maturação cereja e taxa de amostragem de vídeo de 1000 Hz.....	75
TABELA 3.7 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estágio de maturação verde e taxa de amostragem de vídeo de 210 Hz	75
TABELA 3.8 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estágio de maturação verde e taxa de amostragem de vídeo de 420 Hz	75
TABELA 3.9 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estágio de maturação verde e taxa de amostragem de vídeo de 1000 Hz	75
TABELA 3.10 - Médias determinadas para os parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café, estádios de maturação cereja e verde (Safrade 2010)	80
TABELA 3.11 - Propriedades físicas determinadas para o sistema fruto-pedúnculo do café, estádios de maturação cereja e verde (Safrade 2010)	81
TABELA 3.12 - Resultado do teste F para os parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café para verificar a influência da taxa de amostragem de vídeo, estágio de maturação cereja (Safrade 2011).....	82

TABELA 3.13 - Resultado do teste F para os parâmetros vibracionais do sistema fruto-pedúnculo do café para verificar a influência da taxa de amostragem de vídeo, estágio de maturação verde (Safrade 2011)	82
TABELA 3.14 - Médias determinadas para os parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café, estádios de maturação cereja e verde (Safrade 2011)	83
TABELA 3.15 - Propriedades físicas determinadas para o sistema fruto-pedúnculo do café, estágio de maturação cereja e verde (Safrade 2011)	83
TABELA 4.1 - Descrição das faixas de frequência e amplitude trabalhadas para determinação da transmissibilidade de vibração no sistema fruto-pedúnculo do café	93
TABELA 4.2 - Energia por ciclo de entrada imposta ao sistema fruto-pedúnculo do café durante os ensaios de vibração para cada combinação entre frequência e amplitude de vibração	94
TABELA 4.3 - Principais características técnicas do vibrador eletromagnético utilizado nos testes de vibração	95
TABELA 4.4 - Taxas de amostragens empregadas durante os ensaios, determinadas a partir do teorema de Nyquist, para o monitoramento das máximas frequências avaliadas	96
TABELA 4.5 - Resultado da análise de variância para o estudo efeito dos fatores frequência, amplitude e maturação sobre a transmissibilidade de vibração na direção x do sistema fruto-pedúnculo de café	101
TABELA 4.6 - Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores frequência, amplitude e maturação sobre a transmissibilidade de vibração na direção y do sistema fruto-pedúnculo de café	101
TABELA 4.7 - Primeira frequência natural (Hz) estimada para o sistema fruto-pedúnculo do café por diferentes autores utilizando modelagem matemática	104
TABELA 4.8 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção x, para o sistema fruto-pedúnculo de café cereja	107

TABELA 4.9 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para os frutos de café cereja	108
TABELA 4.10 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção y, para o sistema fruto-pedúnculo de café cereja	109
TABELA 4.11 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para os frutos de café cereja	109
TABELA 4.12 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção x, para o sistema fruto-pedúnculo de café verde.....	110
TABELA 4.13 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção x, para os frutos de café cereja, considerando o experimento total	111
TABELA 4.14 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção y, para o sistema fruto-pedúnculo de café verde.....	112
TABELA 4.15 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para os frutos de café verde, considerando o experimento total.....	112
TABELA 4.16 - Resultado da análise de variância para a transmissibilidade de vibração na direção x, em função dos fatores frequência, amplitude e estágio de maturação	114
TABELA 4.17 - Resultado da análise de variância para a transmissibilidade de vibração na direção y, em função dos fatores frequência, amplitude e estágio de maturação	114
TABELA 4.18 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção x, para o sistema fruto-pedúnculo de café cereja	118

TABELA 4.19 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção x, para os frutos de café cereja	118
TABELA 4.20 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção y, para o sistema fruto-pedúnculo de café cereja	120
TABELA 4.21 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para os frutos de café cereja	121
TABELA 4.22 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção x, para o sistema fruto-pedúnculo de café verde.....	123
TABELA 4.23 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção x, para os frutos de café verde	123
TABELA 4.24 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção y, para o sistema fruto-pedúnculo de café verde.....	124
TABELA 4.25 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para os frutos de café verde	125
TABELA 4.26 - Propriedades físicas médias dos frutos de café usados nos testes de vibração.....	127
TABELA 5.1 - Dimensões médias (mm) da geometria padrão do sistema fruto-pedúnculo do café para os estádios de maturação cereja e verde (Safrá 2010)	136
TABELA 5.2 - Combinações entre frequências e amplitudes de vibração utilizadas nas simulações computacionais para avaliação do processo de derriça....	137
TABELA 5.3 - Energia de entrada imposta ao sistema fruto-pedúnculo do café durante os ensaios de vibração considerando a massa média dos frutos de café por ciclo de vibração	139

TABELA 5.4 - Parâmetros de entrada do modelo implementado no programa computacional WM2D para representar o sistema fruto-pedúnculo de café.....	140
TABELA 5.5 - Comparativo entre os valores experimentais de deslocamentos “pico-a-pico” e valores simulados para o sistema fruto-pedúnculo do café para as frequências de vibração de 13,33; 20,00 e 26,67 Hz e amplitudes de vibração de 5, 10 e 15 mm.	141
TABELA 5.6 - Comparativo entre os valores experimentais de deslocamentos “pico-a-pico” e valores simulados computacionalmente para o sistema fruto-pedúnculo do café, para as frequências de vibração de 35; 45 e 55 Hz e amplitudes de vibração de 3,5; 5,0 e 6,5 mm.....	145
TABELA 5.7 - Força(RMS) (N) estimada na ligação fruto-pedúnculo do café por meio do modelo idealizado no WM2D, para os estádios de maturação cereja e verde, em função da frequência e amplitude de vibração de entrada .	151
TABELA 5.8 - Torque(RMS) (N mm) estimado na ligação fruto-pedúnculo do café por meio do modelo idealizado no WM2D, para os estádios de maturação cereja e verde, em função da frequência e amplitude de vibração de entrada.....	152
TABELA 5.9 - Força resultante (N) no fruto de café para os estádios de maturação cereja e verde, em função da frequência e amplitude de vibração de entrada.....	153
TABELA 5.10 - Energia cinética (J) no fruto de café para os estádios de maturação cereja e verde, em função da frequência e amplitude de vibração de entrada.....	153
TABELA 5.11 – Porcentagem de energia contida no fruto de café para os estádios de maturação cereja e verde, em função da frequência e amplitude de vibração de entrada	154

RESUMO

VILLIBOR, Geice Paula, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2012. **Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de derriça de café.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Márcio Arêdes Martins.

A cultura do café tem importância expressiva na agricultura brasileira, sendo o Brasil o maior produtor mundial. Dentre todas as operações de campo envolvidas na cadeia produtiva, a colheita é uma das mais complexas e onerosas de ser realizada. A mecanização da colheita está sendo imprescindível para a manutenção da atividade cafeeira, uma vez que os custos envolvidos com mão-de-obra reduzem expressivamente, o tempo dispendido para a operação é minimizado e ainda evitam-se perdas de qualidade devido à retirada tardia dos frutos do campo. A determinação experimental de propriedades mecânicas do sistema fruto-pedúnculo do café, em conjunto à modelagem matemática e à simulação, é importante para a concepção e melhoria de dispositivos de colheita. Entender a resposta do sistema, submetido à vibração, auxilia na definição de parâmetros que propiciam a derriça seletiva dos frutos do café. A derriça seletiva dos frutos do café contribui positivamente para a qualidade final da bebida. Objetivou-se com o presente trabalho determinar os parâmetros modais incluindo amortecimento, frequência natural e rigidez; e a transmissibilidade de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café por meio de vídeos digitais de alta velocidade. Adicionalmente, por meio de modelagem matemática, objetivou-se também estudar a dinâmica do sistema submetido à vibração forçada. Os parâmetros modais foram determinados pelo método do decaimento logarítmico, para as safras de 2010 e 2011. A transmissibilidade de vibração entre um vibrador eletromagnético e o sistema fruto-pedúnculo do café, na direção e transversalmente ao deslocamento de entrada, foi estudada em dois experimentos distintos. O primeiro na faixa dos dispositivos comerciais de colheita, em frequências entre 13,33 e 26,67 Hz e amplitudes de 5 a 15 mm; e o segundo trabalhando com frequências mais elevadas e amplitudes reduzidas, 35 a 55 Hz e 3,5 a 6,5 mm. O deslocamento resultante do fruto de café foi obtido por meio de vídeos digitais de alta velocidade e técnicas de processamento de imagens. Foi utilizado um fundo de imagem para prover informações necessárias para obtenção dos deslocamentos do sistema fruto-pedúnculo do café em coordenadas métricas. Os deslocamentos obtidos nos testes de transmissibilidade de vibração foram utilizados para validação das simulações

realizadas. Para a safra de 2010, para os frutos cereja e verde, respectivamente, as frequências naturais do sistema fruto-pedúnculo do café foram 15,74 e 13,97 Hz; o coeficiente de amortecimento foi de 0,053 e 0,032 N s m^{-1} e a rigidez foi de 14,40 e 8,32 N m^{-1} . Para a safra de 2011, as frequências naturais do sistema fruto-pedúnculo do café foram 11,62 e 13,29 Hz; o coeficiente de amortecimento foi de 0,029 e 0,0253 N s m^{-1} e a rigidez equivalente foi de 8,61 e 7,09 N m^{-1} . A maior transmissibilidade de vibração no sistema fruto-pedúnculo do café foi observada para faixas próximas a frequência de 20 Hz para ambos os estádios de maturação. Utilizando as simulações, também para essa frequência, foram estimados os maiores esforços resultantes no sistema fruto-pedúnculo do café, para ambos os estádios de maturação. Foi possível a determinação dos deslocamentos resultantes do sistema fruto-pedúnculo do café por meio de vídeos de alta velocidade submetido à excitação harmônica com adequabilidade. Os resultados mostraram que a obtenção de elevados índices de seletividade no processo de derriça, utilizando a faixa para a primeira frequência natural, parece difícil de ser alcançada visto que a diferença entre os parâmetros modais, transmissibilidade de vibração e esforços, para os estádios de maturação verde e cereja, é reduzida.

ABSTRACT

VILLIBOR, Geice Paula, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, September of 2012. **Modeling of the fruit-stem system on coffee harvesting process.** Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Co-Advisers: Francisco de Assis de Carvalho Pinto and Márcio Arêdes Martins.

The coffee crop has significant importance in Brazilian agriculture; and Brazil is the world's largest producer. Among all the field operations involved, the harvest is one of the most complex and costly to realize. The mechanization of the harvest is essential for the maintenance and sustainability of the coffee activity, since the costs involved with manpower are reduced and the time spent for the operation is minimized. Moreover the use of mechanical harvesting can reduce loss of quality because the operation can be performed when the fruits reach the ripeness stage those results in the best quality. The experimental determination of mechanical properties of the coffee fruit-stem system together the mathematical modeling and simulation is important for the development and improvement of harvesting devices. Understanding the system response subjected to vibration, assists in defining parameters that allow the selective detachment of the coffee fruits. The selective detachment of the coffee fruits contributes positively to the quality of the final beverage. The objective of this study was to determine the modal parameters including damping, natural frequency and stiffness, and transmissibility of vibration properties of the coffee fruit-stem system through high-speed digital video. Additionally, by means of computer simulation, the dynamics of the fruit-stem system subjected to forced vibration was analyzed. The modal parameters were determined by the logarithmic decrement for the season of 2010 and 2011. The transmissibility of vibration between an electromagnetic shaker and the coffee fruit-stem system in the direction and transversely to the displacement input was studied in two different experiments. The first experiment was performed using vibration frequencies in the range of commercial harvest devices. Frequencies between 13.33 and 26.67 Hz and amplitude of 5 to 15 mm were used. The second experiment was performed using higher frequencies and small amplitudes of 35 to 55 Hz and 3.5 to 6.5 mm, respectively. The resulting displacement of the coffee fruit was obtained by means of high-speed digital video and techniques of image processing. It was used a background image to provide information necessary to obtain the displacements of the coffee fruit-stem

system in metric coordinates. The displacements obtained from the vibration transmissibility tests were used to validate the simulations performed. For the 2010 harvesting season, for ripe and green fruits, respectively, the natural frequencies of coffee fruit-stem system were 15.74 and 13.97 Hz; the damping coefficient was 0.053 and 0.032 N s m⁻¹ and the stiffness was 14.40 and 8.32 N m⁻¹. For the 2011 harvesting season, the natural frequencies of coffee fruit-stem system were 11.62 and 13.29 Hz; the damping coefficient was 0.029 and 0.0253 N s m⁻¹ and the stiffness was 8.61 and 7.09 N m⁻¹. The highest transmissibility of vibration in the coffee fruit-stem system was observed for bands near the frequency of 20 Hz for both ripeness stages. By means of simulations, utilizing this frequency as input, the larger efforts resulting in coffee fruit-stem system, were estimated for both ripeness stages. It was possible to determine the displacements resulting from the coffee fruit-stem system by means of high speed videos submitted to harmonic excitation with appropriateness. The obtained result showed that the coffee harvesting selectivity, using the range of the first natural frequency, seems to be is a difficult task because the difference between the modal parameters, transmissibility and efforts for the green and red ripeness stages are small.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Introdução

A cultura do café tem importância expressiva na agricultura brasileira, sendo o Brasil o maior produtor e exportador mundial. Dentre os estados, Minas Gerais e Espírito Santo destacam-se com 52 e 25% da produção brasileira, respectivamente (CONAB, 2012). O valor de mercado do café está diretamente ligado a sua qualidade final, e esta dependente de todas as operações envolvidas em sua cadeia de produção.

De todas as operações na produção de café, destaca-se a colheita dos frutos pelas elevadas dificuldades e custos envolvidos. A colheita pode ser dividida em três etapas principais: derriça; varrição e recolhimento; e abanação dos frutos. A derriça pode ser realizada em uma só etapa ou ainda de forma seletiva em que somente os frutos maduros são retirados (SOUZA, 2004). A seletividade no momento da colheita influencia positivamente a qualidade do produto final contribuindo para a obtenção de melhores preços na saca de café beneficiado, contudo torna a operação de derriça mais complicada e onerosa.

Quando realizada manualmente, a parte dos custos referentes à colheita de café pode representar até 60% do total da saca, o que pode ser atribuído à elevada demanda por mão-de-obra (OLIVEIRA, 2011). A escassez da mão-de-obra nas principais regiões cafeicultoras vem tornando inexecutável a colheita manual. A mecanização das etapas envolvidas na colheita está sendo imprescindível para a manutenção e sustentabilidade da atividade cafeeira. Com a colheita mecanizada, os custos envolvidos com mão-de-obra reduzem expressivamente, o tempo dispendido para a operação é minimizado e ainda evitam-se perdas de qualidade devido à retirada tardia dos frutos do campo.

Mecanicamente, os frutos de café têm sido derriçados por meio de vibrações mecânicas e impactos ao cafeeiro causando o desprendimento dos frutos. Quando energia vibracional é utilizada para remover os frutos, a associação adequada dos fatores frequência e amplitude de vibração são fundamentais para eficiência no processo (SESSIZ & ÖZCAN, 2006). Além dos fatores anteriormente citados, identificar parâmetros inerentes ao sistema fruto-pedúnculo do café ajuda a definir faixas de trabalhos que favoreçam o desempenho operacional dos dispositivos de colheita e a

seletividade dos frutos no momento da colheita. Podem-se destacar as características modais e transmissibilidade de vibração como informações cuja importância é notória ao desenvolvimento de novos dispositivos de colheita e definição de faixas de trabalho adequadas.

No entanto, a mensuração de parâmetros que caracterizam a vibração da planta de café e das suas partes constituintes é difícil de ser realizada. Parte das dificuldades observadas é atribuída à arquitetura e às características geométricas dos ramos e do sistema fruto-pedúnculo do café. A medição de níveis de vibração e parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café com sensores como acelerômetros piezoelétricos é impraticável. O uso de acelerômetros, além de adicionar massa à estrutura estudada, fornece o valor apenas no ponto em que o sensor foi instalado (HELFRICK *et al.*, 2011).

Atualmente, a maior parte das informações relativas aos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café é proveniente de resultados de simulação matemática do comportamento dinâmico desse sistema. Técnicas de modelagem matemática por parâmetros concentrados, método de elementos finitos assim como modelagem de corpos rígidos são comumente utilizadas. Como exemplo, Espinosa *et al.* (2007) estimaram os 25 primeiros modos de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café utilizando o método de elementos finitos. Em trabalho semelhante, Santos (2008) estimou os cinco primeiros modos de vibração e frequências naturais associadas. Em ambos os trabalhos buscou-se identificar faixas de frequências favoráveis à seletividade da colheita dos frutos de café.

Neste contexto, surge como alternativa à utilização de acelerômetros os vídeos de alta velocidade juntamente as técnicas de processamento de imagens para determinar parâmetros modais e níveis de vibração no sistema fruto-pedúnculo do café. O contínuo melhoramento na tecnologia de aquisição de imagens em altas velocidades vem propiciando sua ampla aplicação na área da mecânica experimental (THORODDSEN *et al.*, 2008). A utilização de imagens digitais e vídeos de alta velocidade tem sido usado com sucesso para reconhecimento de formas modais de componentes (WANG *et al.*, 2009) e determinação de frequências naturais de sistema mecânicos (NOGUEIRA *et al.*, 2005; GUNGOR *et al.*, 2008), monitoramento de ondas sísmicas em estruturas civis (CHOI *et al.*, 2011) e mensuração de vibração multipontos (JEON *et al.*, 2010).

O monitoramento por vídeo da vibração do sistema fruto-pedúnculo do café submetido a diferentes tipos de excitações apresenta potencial para obtenção de características vibracionais úteis a validação de modelos matemáticos, bem como, para entender o processo de derriça. As determinações das frequências naturais permitem identificar faixas de trabalho propícias para a colheita de café por vibração. Já o coeficiente de amortecimento pode ser utilizado para verificar as implicações na necessidade de energia para que a colheita seja realizada (MEIROVITCH, 2001).

Em complemento às determinações experimentais dos parâmetros modais e de transmissibilidade de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café, a utilização de técnicas de modelagem matemática podem gerar informações relevantes para o estudo do processo de derriça dos frutos de café. A flexibilidade do pedúnculo do café depende do estágio de maturação e pode ser expressivo na resposta dinâmica do sistema. Desta maneira, a modelagem de corpos flexíveis pode ser utilizada para representar o sistema fruto-pedúnculo do café de forma mais realística e prover informações mais precisas do comportamento do sistema quando submetido à vibração forçada.

A hipótese que precede este estudo é que técnicas de processamento de imagens digitais podem ser utilizadas para a determinação de parâmetros vibracionais do sistema fruto-pedúnculo do café de maneira simples e satisfatória. Além disso, modelagem de corpos flexíveis pode prover informações úteis a respeito dos esforços atuantes no sistema fruto-pedúnculo do café a fim de estudar o processo de derriça por vibrações mecânicas.

1.2. Objetivos

Analisar o processo de derriça de café por meio de determinações experimentais de parâmetros modais e de transmissibilidade do sistema fruto-pedúnculo do café utilizando vídeos digitais de alta velocidade e por meio de modelagem de corpos flexíveis.

Especificamente, pretendeu-se:

- Determinar as propriedades modais do sistema fruto-pedúnculo do café, tais como razão de amortecimento, frequência natural e coeficiente de

amortecimento por meio de vídeos digitais de alta velocidade e técnicas de processamento de imagens;

- Avaliar a transmissibilidade de vibração entre um dispositivo vibrador e o sistema fruto-pedúnculo do café submetido à excitação harmônica em diferentes combinações entre frequências e amplitudes de vibração;
- Desenvolver um modelo bidimensional do sistema fruto-pedúnculo do café fundamentado em técnicas de modelagem de corpos flexíveis e nas equações de movimento, para obtenção resposta dinâmica do sistema;
- Obter as melhores combinações entre amplitude e frequência de vibração para a realização da derriça para cada estágio de maturação do sistema fruto-pedúnculo do café.

1.3. Justificativa

A colheita de café é a operação de campo mais onerosa a qual demanda a maior parte da mão-de-obra envolvida em todo o processo de produção. A mecanização da atividade faz-se necessária para a manutenção da atividade cafeeira, desta forma estudar o processo de derriça dos frutos do café é de suma importância para o desenvolvimento de novos equipamentos que não só proporcione uma melhor eficiência de durante o processo, mas também melhores os índices de seletividade.

Visto que a derriça por vibrações mecânicas dos frutos é intensamente utilizada, entender o comportamento do sistema fruto-pedúnculo do café submetido a diferentes tipos de excitação é imprescindível. A disponibilidade de equipamentos adequados, como câmeras digitais de alta velocidade, juntamente às técnicas de processamento de imagens e vídeos, possibilita a determinação experimental de parâmetros vibracionais do sistema, com erros relativamente baixos. Além disso, contribui para a validação de modelos matemáticos desenvolvidos por meio do histórico de deslocamentos.

Muitos modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos para estudar o comportamento do sistema fruto-pedúnculo do café, cada um com vantagens e limitações em representar a flexibilidade do pedúnculo do café. A análise utilizada para a dinâmica do sistema fruto-pedúnculo do café por meio de técnicas de modelagem de corpos flexíveis pode possibilitar a obtenção de resultados mais próximos ao

comportamento real do sistema e desta forma podem-se obter informações mais acuradas sobre os deslocamentos e esforços nas regiões críticas do sistema.

Estudar o deslocamento do sistema fruto-pedúnculo do café durante o processo de derriça em diferentes combinações de frequência e amplitude é essencial para a melhoria na eficiência da colheita mecanizada do café. Entender a resposta do sistema em relação à imposição de vibrações mecânicas pode dar suporte ao desenvolvimento de dispositivos que realizem a derriça de café de forma seletiva e com melhor rendimento operacional.

1.4. Disposição do trabalho

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos sendo realizada uma descrição dos tópicos abordados em cada capítulo nesta seção.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão de literatura a respeito do processo de derriça por vibração e os dispositivos utilizados para sua realização. Também são abordados na revisão os principais parâmetros mecânicos utilizados para entender o processo de derriça, as formas de determinação experimental e a utilização de vídeos digitais de alta velocidade para o estudo de dinâmica estrutural. Em complemento, apresenta-se a aplicação de modelagem de corpos flexíveis discutindo seus principais aspectos.

No capítulo 3, estão apresentadas as determinações experimentais para obtenções dos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café, considerando o sistema com um grau de liberdade, utilizando vídeos de alta velocidade e técnicas de processamento de imagens digitais. O sistema fruto-pedúnculo do café foi submetido a um deslocamento inicial e deixado a vibrar livremente. Por meio do decaimento da oscilação, utilizando o método do decremento logarítmico foi possível determinar a frequência natural; razão e coeficiente de amortecimento para os estádios de maturação cereja e verde.

No capítulo 4, foi determinada a transmissibilidade de vibração no sistema fruto-pedúnculo do café submetido à excitação harmônica por meio de um vibrador mecânico com acionamento eletromagnético, em dois experimentos distintos. O primeiro

determinando a transmissibilidade na faixa de frequências de vibração entre 13,33 e 26,67 Hz, associadas a amplitudes de vibração entre 5 e 15 mm, que correspondem a faixa de trabalho utilizadas por máquinas comerciais de colheita. No segundo experimento, utilizam-se frequências entre 35 e 55 Hz, associadas a amplitudes de 3,5 a 6,5 mm. Em ambos os trabalhos buscou verificar faixas com maiores valores de transmissibilidade entre os estádios de maturação cereja e verde.

No capítulo 5 é apresentado o desenvolvimento de um modelo matemático para estudar a resposta dinâmica do sistema fruto-pedúnculo do café a fim de identificar parâmetros favoráveis a derriça seletiva dos frutos. O modelo foi idealizado utilizando técnicas de modelagem de corpos flexíveis a fim de representar as características de flexibilidade observadas no pedúnculo do café. Para isso utilizou-se um programa computacional proprietário para o desenvolvimento do modelo e resolução das equações de movimento inerentes do problema estudado.

Os resultados obtidos nos capítulos 3 e 4, além de gerar informações a respeito da resposta dinâmica do sistema, serviram como parâmetro de validação do modelo matemático desenvolvido no capítulo 5.

Finalizando, no capítulo 6 é apresentada uma discussão e considerações sobre o trabalho apresentando as conclusões finais agrupando as informações e estabelecendo as relações entre os resultados encontrados e a derriça de café por vibração.

1.5. Referências Bibliográficas

CHOI, H.; CHEUNG, J.; KIM, S.; AHN, J. Structural dynamic displacement vision system using digital image processing. **NDT&E International**, v. 44, p. 597–608, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Café – Safra 2012**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_05_10_08_56_04_boletim_cafe_-_maio_2012.pdf> Acesso em 20 de agosto de 2012.

ESPINOSA, B. G.; RODRÍGUEZ, A. M.; GUERRA, O. L. Búsqueda de modos de vibración apropiados para la cosecha selectiva del café. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2007.

GUNGOR, F.; GUMUS, E.; ERTAS, A.; EKWARO-OSIRE, S.; NIETO, E. Vibration Absorption of Tip Appendage Using Digital Image Processing. In: XIth International Congress and Exposition, 2008, Orlando. **Proceedings...** Orlando, p. 1-8.

HELFRICK, M. N.; NIEZRECKI, C.; AVITABILE, P.; SCHMIDT, T. 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, p. 917–927, 2011.

JEON, H., CHOI, Y., PARK, J., PARK, J. W. Multi-point measurement of structural vibration using pattern recognition from camera image. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 42, n. 6, 2010.

MEIROVITCH, L. **Fundamental of Vibrations**. New York: McGraw Hill, 2001, 806p.

NOGUEIRA, F. M. A.; BARBOSA, F. S.; BARRA, L. P. S. Identificação das características modais de estruturas via processamento de imagens. In: XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2005, Guarapari. **Proceedings...** Guarapari, 2005, p. 1-14.

OLIVEIRA, E. Falta de mão de obra afeta colheita de café. **Folha de São Paulo**. São Paulo, 08 de junho de 2011. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/926784-falta-de-mao-de-obra-afeta-colheita-de-cafe.shtml>>. Acesso em: 30 de agosto de 2012.

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

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

SOUZA, C. M. A. **Desenvolvimento e modelagem de sistema de derriça e de abanação de frutos do cafeeiro**. 2004. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

THORODDSEN, S. T.; ETOH, T. G. TAKEHARA, K. High-Speed Imaging of Drops and Bubbles. **Annual Review of Fluid Mechanics**, n. 40, p. 257–85, 2008.

WANG, W.; MOTTERSHEAD, J. E.; MARES, C. Vibration mode shapes recognition using image processing. **Journal of Sound and Vibration**, v. 326, p. 909–938, 2009.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Derrixa dos frutos do café

O Brasil é o maior produtor de café do mundo, produzindo 2,7 milhões de toneladas no ano de 2011 (IBGE, 2012), e tem como maiores estados produtores Minas Gerais e Espírito, com aproximadamente 51,9 e 25,4% de área cultivada, respectivamente (CONAB, 2012). O café é um produto com alto valor agregado devido às etapas envolvidas em toda cadeia produtiva desde a implantação da lavoura, operações de campo e processamento final. Dentre as operações de campo, a colheita dos frutos do café se destaca devido à contribuição expressiva no custo de produção (VEGRO *et al.*, 2000) e deve ser continuamente estudada.

A colheita dos frutos de café se divide basicamente em seis operações: arruação, derrixa, varrição, recolhimento, abanação e transporte dos frutos (SOUZA *et al.*, 2006). Três tipos de sistemas de colheita podem ser implantados: manual, semi-mecanizado e mecanizado. No sistema manual todas as operações, exceto o transporte, são realizadas pela ação humana, já no sistema semi-mecanizado uma, ou mais operações, são realizadas mecanicamente. Na colheita mecanizada todas as operações envolvidas são executadas por meio de máquinas (SILVA & SALVADOR, 1998).

A fase de derrixa, ou seja, de retirada dos frutos da planta, é a mais complexa e dispendiosa, podendo ser realizada em uma só etapa ou ainda de forma seletiva, em que somente os frutos maduros são colhidos (SOUZA, 2004). A presença de frutos verdes é uma das principais causas de perda de qualidade do café brasileiro (MACHADO *et al.*, 2005). A obtenção de bebida de melhor qualidade eleva os preços por saca de café beneficiado, sendo mais vantajosa ao produtor. Segundo Fernandes *et al.* (2012), nas áreas cafeeiras do Cerrado, a colheita seletiva tem sido utilizada com sucesso, em algumas propriedades, garantindo a qualidade final da produção.

A derrixa manual é caracterizada pela elevada demanda por mão-de-obra e por tempo o que eleva os custos de produção envolvidos tornando-a impraticável em determinadas ocasiões (CIRILLO, 2007). Relativa redução nos custos e a melhoria no

desempenho da derrça podem ser alcançadas pela introdução de derrçadoras portáteis, favorecendo principalmente a cafeicultura de montanha e aos produtores familiares (SOUZA *et al.*, 2006). Em regiões com declividade abaixo de 20%, a introdução da mecanização da colheita aumentou a capacidade produtiva, além de minimizar os problemas de escassez de mão-de-obra (SILVA *et al.*, 2001). Silva *et al.* (2004) observaram redução de custos no sistema mecanizado, em relação ao manual, da ordem de 41 a 50%, em operação com duas passadas da colhedora automotriz na lavoura.

A derrça mecânica dos frutos do cafeeiro vem sendo realizada por meio de vibrações mecânicas em que energia vibracional é transferida ao sistema fruto-pedúnculo, promovendo o destacamento dos frutos de café (SRIVASTAVA *et al.*, 1996). Juntamente às forças vibracionais podem ser aplicados impactos como outra estratégia para derrça dos frutos, a fim de induzir uma força de desprendimento suficiente para retirá-los da planta (DU *et al.*, 2012). Para vibrar a planta de café, as máquinas e dispositivos podem atuar diretamente pelo tronco da planta ou aplicar a vibração aos ramos plagiotrópicos por meio de hastes vibratórias.

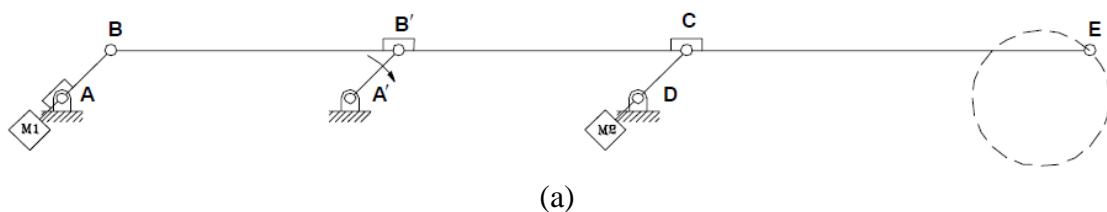
Em alguns dispositivos utilizados na derrça, a vibração é aplicada diretamente no tronco da planta e é transmitida através dos ramos ao sistema fruto-pedúnculo do café. A vibração em condições ideais permite desprender os frutos, mediante a transmissão de forças inercias através da estrutura da planta, em poucos segundos (RAMÍREZ V. *et al.*, 2003). O movimento vibratório de saída pode ser gerado por sistema de massas excêntricas ou por meio de mecanismos biela-manivela.

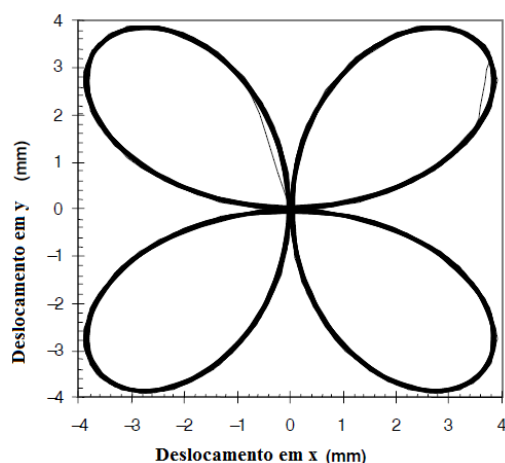
Os equipamentos que utilizam massas excêntricas rotativas fornecem frequências entre 12 e 40 Hz, deslocamentos de pico de 5 a 20 mm, com um padrão de vibração do tronco no plano horizontal, para derrçar diferentes frutos (ABDEL-FATTAH *et al.*, 2003). Dependendo da configuração das massas excêntricas rotativas a vibração de saída pode ser linear, circular ou multidirecional. A vibração gerada pelo sistema vibratório é transferida ao tronco através de grampos, os quais podem ser observados no dispositivo inercial desenvolvido pelo CENICAFE (GARCÍA-URIBE & OLIVEROS-TASCÓN, 2003) para aplicação derrça de café por meio de vibrações multidirecionais (Figura 2.1).



FIGURA 2.1 - Dispositivo agitador com padrão multidirecional para troncos de plantas de café desenvolvido pelo CENICAFE (2001) (Fonte: GARCÍA-URIBE & OLIVEROS-TASCÓN, 2003).

Aristizábal *et al.* (2003a) desenvolveram dois tipos de dispositivos inerciais para vibração de tronco de plantas de café com diferentes padrões de deslocamento de saída. O primeiro deles impunha a planta um deslocamento com padrão circular (Figura 2.2, a) e o segundo com um padrão multidirecional (Figura 2.2, b) de vibração com deslocamento de saída com quatro *loopings*. Os autores observaram que o agitador multidirecional proporcionou um maior desprendimento dos frutos maduros, por causar rotações mais acentuadas do fruto em torno do pedúnculo, maior capacidade e menor desfolha da planta de café.





(b)

FIGURA 2.2 - Esquema representativo de um agitador de tronco de plantas de café com padrão circular (a) e padrão multidirecional com quatro *loopings* (b) (Fonte: ARISTIZÁBAL *et al.*, 2003a).

Tascón *et al.* (2005) avaliaram um derriçador portátil que aplica vibração aos galhos plagiotrópico do café a fim de promover o desprendimento dos frutos (Figura 2.3). O sistema de vibração é composto por um mecanismo biela manivela que gera amplitude e frequência máximas de 62 mm e 30 Hz, respectivamente. O movimento de vibração é unidimensional e paralelo ao eixo central da haste que transmite vibração a planta. Os autores encontraram valores de eficiência na derriça entre 79,2 e 85,9 % considerada alta.



FIGURA 2.3- Derriçador portátil que aplica vibração aos ramos plagiotrópico do café a fim de promover o desprendimento dos frutos (Fonte: TASCÓN *et al.*, 2005).

Dispositivos que utilizam dedos ou hastes vibratórias vêm sendo amplamente utilizados na operação de derriça dos frutos do café. As derriçadoras portáteis são constituídas de hastes, com dedos vibratórios, que fazem a derriça do café, podendo ser

acionadas pneumáticamente ou motorizadas (SILVA *et al.*, 2001), com dois modelos exemplificados na Figura 2.4. Segundo Souza *et al.* (2006) além de proporcionar maior eficiência de derriça as derriçadoras portáteis quando comparada a derriça manual podem proporcionar menores índices de desfolha e quebramento dos ramos.



FIGURA 2.4- Derriçadoras portáteis utilizadas para derriça dos frutos do cafeeiro (a) costal e (b) lateral (Fonte: NAKASHI, 2012).

As derriçadoras tratorizadas e automotrizes possuem cilindros derriçadores laterais com hastes vibratórias, operando a cavaleiro em torno das linhas das plantas, derriçando os dois lados da planta. Tratorizadas ou automotrizes, a inclinação do terreno é um fator limitante, além da implantação da lavoura com espaçamento entre linhas e alinhamento adequados entre as plantas de café (SILVA *et al.*, 2001). Na Figura 2.5 estão apresentadas uma colhedora tratorizada e uma colhedora automotriz utilizada para a colheita dos frutos de café.



FIGURA 2.5 - Derriçadora tratorizada com um cilindro derriçador (a) e colhedora automotriz (b) utilizada para derriça dos frutos do cafeeiro (Fonte: MUNDO NOVO ALIANÇA, 2012 e CASE IH, 2012).

Ao utilizar impactos associados com vibrações mecânicas é importante determinar as combinações entre frequência e amplitude de vibração para otimizar o desempenho das máquinas de colheita. Oliveira *et al.* (2007) avaliaram uma colhedora tracionada composta por dois cilindros derrçadores, dotados de hastes vibratórias, que envolvem o cafeeiro lateralmente, derrçando os frutos pelo efeito da vibração e impacto das hastes. A colhedora trabalhou em faixas variando entre 10,83 e 16,67 Hz, com um aumento na eficiência de derrça de aproximadamente 30%, com incremento de apenas 5,84 Hz na vibração de saída da máquina.

Oliveira (2009) desenvolveu um dispositivo para derrça dos frutos de café no qual a energia vibracional e impactos são transmitidos para a planta por meio de hastes vibratórias engastadas em uma base móvel movimentando-se verticalmente (Figura 2.6). Foi observada eficiência de derrça na ordem de 82% quando trabalhadas a amplitude de vibração de 20 mm e frequência de vibração de 19 Hz.



FIGURA 2.6 - Dispositivo para derrça de frutos de café aplicando vibração aos galhos por meio de hastes vibratórias em movimento vertical (Fonte: OLIVEIRA, 2009).

Alternativamente a aplicação de vibrações mecânicas e impactos, a derrça pode ser realizada por dispositivos que assemelham a derrça manual, mas buscando maior seletividade dos frutos do café. Gomez & Táscon (2003) desenvolveram um dispositivo portátil (DESCAFÉ) para realização da derrça seletiva dos frutos maduros da planta por meio da aplicação de torção e momento de flexão aos cachos mostrando ser um sistema eficiente e uma ferramenta rápida para melhorar a capacidade dos apanhadores na colheita manual (Figura 2.7).



FIGURA 2.7 - Aplicação combinada de torção e flexão ao sistema fruto-pedúnculo do café (Fonte: GOMEZ & TÁSCON, 2003).

2.2. Propriedades mecânicas da planta de café importantes ao processo de derriça por vibração

A derriça dos frutos de café, utilizando vibrações mecânicas, pode ser influenciada por fatores relativos à máquina e pela própria planta. A resposta da planta de café submetida à vibração depende diretamente das propriedades mecânicas das partes constituintes tais como o sistema fruto-pedúnculo e os ramos.

2.2.1. Força axial de desprendimento dos frutos de café

A força axial requerida para o desprendimento do fruto de seu pedúnculo tem sido estudada para diferentes tipos de culturas que são colhidas utilizando vibrações mecânicas e é considerado por Sessiz & Özcan (2006) como um fator importante para a colheita mecânica por vibração. Esse parâmetro pode ser utilizado para o dimensionamento de equipamentos para colheita de café com desempenho melhorado, além de contribuir para que seletividade seja atingida durante o processo (SAMPAIO *et al.*, 2000).

Silva *et al.* (2010) estudaram a força axial de desprendimento entre o fruto e o pedúnculo do café, em diferentes épocas durante a colheita, para diferentes cultivares e estádios de maturação. Na maioria dos períodos avaliados pelos autores as cultivares Catuaí e Mundo Novo apresentaram os menores valores de força de desprendimento para os frutos cereja e também apresentaram as maiores diferenças entre a força de

desprendimento dos frutos verdes e cerejas, indicando maior aptidão a derriça seletiva. A força necessária para o desprendimento dos frutos verdes foi até 73,42% superior à força necessária para o desprendimento de frutos cerejas.

Ferraz *et al.* (2012), aplicando técnicas de geoestatística, verificaram a variabilidade espacial da força requerida para desprendimento dos frutos do café a fim de promover um manejo variável no momento da colheita. Os mapas de força de desprendimento podem ajudar os cafeicultores a escolher o local e a hora correta de iniciar a colheita do café mecânica e seletivamente. Os valores da força de desprendimento para os frutos maduros e verdes variaram entre 4,92 a 8,36 N e de 9,34 a 10,96 N, respectivamente, para a variedade Topazio.

Para demais culturas, o estágio de maturação mostra ser um fator de grande influência sobre a força de desprendimento dos frutos. Polat *et al.* (2011) estudaram a força de desprendimento ao longo do período da colheita para concepção de uma máquina para colheita de noz de pistache, para duas diferentes variedades. A força de desprendimento das nozes diminui com o aumento do tempo para maturação, reduzida em média 66% do início ao fim da época de colheita.

Estudo semelhante foi realizado por Gomes & Ferraz (2011) para analisar o comportamento mecânico de uvas ‘Niagara Rosada’ por meio de informações sobre a força de desprendimento do fruto de seu pedicelo e sobre sua variação temporal. A análise permitiu identificar os tipos de rupturas ocorridas entre o fruto e o pedicelo além de verificar o decréscimo da resistência com o passar do tempo. Os autores verificaram também uma variabilidade elevada em relação à força de desprendimento para as amostras de uva trabalhadas.

Uma das formas para diminuir a força de desprendimento dos frutos é a utilização de produtos químicos que aceleram a desprendimento dos frutos. Sessiz & Özcan (2006) conduziram experimentos para determinação do efeito de abscisão química sobre a força de desprendimento de frutos de oliveiras, utilizando um vibrador mecânico pneumático para a colheita. A razão entre a força de desprendimento e a massa dos frutos decresceu 79,8% em 100 dias de testes. Os autores verificaram que a utilização de abscisão química aumentou a remoção dos frutos em 51%.

Silva *et al.* (2009) estudaram o efeito do maturador fisiológico Ethrel sobre a colheita mecanizada e seletiva dos frutos de café utilizando uma colhedora automotriz e em duas passadas. Os autores verificaram que com o uso do maturador fisiológico a proporção de frutos cereja aumentou de 36% para 60%. Além disso, os autores observaram um acréscimo de 91% no volume de frutos cerejas colhidos na primeira passada da colhedora com a utilização do Ethrel. O aumento na proporção de cerejas pode facilitar a realização da derriça de café de forma seletiva.

2.2.2. Parâmetros modais da planta de café e transmissibilidade de vibração

As árvores são estruturas dinâmicas que respondem à aplicação de vibrações mecânicas por meio de um movimento complexo. Sua resposta é condicionada pelas propriedades modais tais como frequências naturais, amortecimento e modos de vibração, as quais são definidas de acordo com a magnitude, distribuição e relação entre massa, rigidez e amortecimento das partes constituintes (CASTRO-GARCÍA *et al.*, 2008). Todos esses parâmetros interferem na transmissibilidade de vibração entre os dispositivos de derriça e o sistema fruto-pedúnculo do café reforçando a necessidade de se estudá-los para as diferentes partes da planta de café e diferentes condições de vibração.

A determinação das frequências naturais do sistema fruto-pedúnculo do café pode contribuir para aprimoramento dos dispositivos utilizados na derriça do café e para o estabelecimento de faixas de trabalho propícias à ressonância do sistema. Se uma frequência de excitação estiver próxima à frequência natural de qualquer subsistema da planta de café, então esse subsistema responderá com máxima amplitude de vibração (ARISTIZÁBAL *et al.*, 2003b). A determinação teórica das frequências naturais e modos de vibração associados é difícil de realizar devido à complexidade e não uniformidade das estruturas biológicas.

A utilização de métodos numéricos, como o método de elementos finitos, e técnicas de modelagem matemática vem permitindo a determinação dos modos de vibração e das frequências do sistema fruto-pedúnculo do café. Espinosa *et al.* (2007) obtiveram valores da frequência natural associada ao modo pendular entre 15,9 e 18,6 Hz, para frutos maduros; e 19,5 e 22,4 Hz para frutos verdes. Santos (2008) encontrou

valores associados ao primeiro modo de vibração foram de 19,86 e 23,21 Hz, para o estágio de maturação cereja e verde, respectivamente, para variedade Catuaí Vermelho. Ciro (2001) obteve valores para a primeira frequência natural de 24,22 e 28,88 Hz para os estádios de maturação cereja e verde, respectivamente.

A frequência natural do sistema fruto-pedúnculo do café é dependente da massa e da rigidez. A rigidez é função das características geométricas e das propriedades do material constituinte sendo esse último caracterizado pelo módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade das partes constituintes do cafeeiro pode variar com o teor de água, com a direção de referência para estudo ou ainda com a posição. Segundo Logsdon (1998), o módulo de elasticidade de algumas madeiras tem decréscimo de até 50% quando se aumenta a umidade. Aristizábal *et al.* (2003b) determinaram propriedades de rigidez da planta de café experimentalmente para segmentos de ramos de 70 cm de comprimento. Os autores verificaram um decréscimo da rigidez dos ramos em até 62,26% com o posicionamento ao longo do tronco a partir do solo.

No entanto, a planta de café possui diferentes mecanismos que dissipam a energia quando a energia vibracional é imposta durante o processo de derrça. A dissipação de energia é caracterizada pelo amortecimento do sistema o qual ocorre quando uma partícula de um sistema em vibração é resistida por uma força com magnitude proporcional a magnitude da velocidade e em direção oposta ao movimento da partícula (HARRIS & PIERSOL, 2002). Quando o atrito entre plantas, entre os diferentes ramos e entre os mecanismos dissipativos no sistema solo-raiz são postos lado a lado, existem duas fontes principais de amortecimento: o amortecimento aerodinâmico e amortecimento viscoso no interior do material constituinte (SPATZ *et al.*, 2007).

As características de amortecimento podem ser caracterizadas pelo coeficiente de amortecimento e pela razão de amortecimento. O amortecimento do sistema pode ser caracterizado pelo coeficiente de amortecimento e pela razão de amortecimento. O coeficiente de amortecimento apresenta a relação entre a força de amortecimento e a velocidade relativa entre os corpos em movimento. A razão de amortecimento é adimensional e não depende da ordem de grandeza dos parâmetros o sistema, desta maneira expressando o quanto o sistema está amortecido (MEIROVITCH, 2001).

Queiroz *et al.* (2010) determinaram as características de amortecimento ramos plagiotrópicos de café sem folhas, para as variedades Catuaí Vermelho e Mundo Novo, utilizando vídeos de alta velocidade. Os valores médios observados foram de 0,031 e 0,024, para as variedades Catuaí Vermelho e Mundo Novo, respectivamente, caracterizando um sistema subamortecido. Aristizábal *et al.* (2003b) determinaram o coeficiente de amortecimento do cafeeiro com e sem a presença de folhas para três diferentes variedades. Os autores verificaram um decréscimo de até 50% na razão de amortecimento quando as folhas eram retiradas da planta de café, o que evidencia o potencial em dissipar energia das folhas.

Quando a vibração é imposta ao tronco da planta a energia vibracional deve ser transmitida através de todas as partes constituintes até chegar ao sistema fruto-pedúnculo do café. O estudo da transmissibilidade da base dos galhos aos frutos, em diferentes condições, permite a identificação dos valores de frequência que induz a picos de amplificação da vibração (CASTRO-GARCÍA *et al.*, 2011).

Quando um sistema é submetido a uma vibração harmônica com frequência de excitação próxima à frequência natural do sistema, a transmissibilidade de vibração tem maiores valores observados (MEIROVITCH, 2001). Mesmo trabalhando nas faixas de ressonância do sistema, a transmissibilidade de vibração entre os dispositivos de derriça e o sistema fruto-pedúnculo do café pode ser reduzida devido à dissipação de energia. O amortecimento influencia a transmissibilidade de vibração através da planta de café durante a derriça por vibrações mecânicas (RAO, 2008).

A transmissibilidade de vibração dos dispositivos de colheita até o sistema fruto-pedúnculo do café é um parâmetro vibracional que incide diretamente na eficiência e na seletividade na derriça. A transmissibilidade pode ser dada em termos de deslocamento ou acelerações, a qual relata o deslocamento ou a aceleração efetiva da resposta de um sistema com a aceleração efetiva de entrada em cada ponto medido (RAO, 2008; MEIROVITCH, 2001).

Para diferentes culturas, colhidas por vibrações mecânicas, a transmissibilidade de vibração vem sendo determinada. Castro-García *et al.* (2011) avaliaram a resposta em frequência dos galhos e frutos de pinheiro manso (*Pinus Pinea L.*), maduros e verdes, em uma faixa ampla de valores de vibração. Os autores verificaram que frutos com maior massa receberam maiores amplificações de vibração através de seu caule e

estavam mais susceptíveis a remoção. Além disso, a transmissibilidade de aceleração ao longo dos galhos mostrou ser altamente influenciada pela frequência de vibração e posição na qual a medição foi realizada.

Savary *et al.* (2011) estudaram a distribuição das acelerações no dossel de plantas de citros. Acelerômetros sem fio foram posicionados nos frutos e ao longo dos galhos, sendo obtida a força resultante, durante a colheita por vibração. Os autores verificaram que a força requerida para remoção dos frutos dependia não só das variedades, mas também da localização do fruto na árvore. Pezzi & Caprara (2009) estudaram a transmissão de vibração durante a colheita mecânica de uvas, utilizando acelerômetros instalados em posições diferentes do galho. Verificaram que o nível de vibração incidente nos galhos é dependente da posição de referência para medição, com maiores valores observados, na máxima distância do ponto de aplicação da vibração. Isso se dá pela maior liberdade de movimento do sistema nessa posição.

2.2.3. Medição de vibração em sistemas mecânicos e biológicos

Para a medição de vibrações em sistemas mecânicos e biológicos é necessário dispositivos que convertam o choque ou movimento vibratório em sinal óptico, mecânico, ou, mais comumente, em sinal elétrico o qual é proporcional ao parâmetro de movimento experimentado (HARRIS & PIERSOL, 2002). Para a medição de vibrações em nesses sistemas tem-se comumente a medição de deslocamentos ou acelerações (MEIROVITCH, 2001).

Dentre os transdutores mais comuns podem-se citar os transdutores de resistência variável, transdutores piezoelétricos, transdutor transformador diferencial linear variável, vibrômetros a laser entre outros (RAO, 2008). O transdutor mais utilizado para medição de vibrações é o acelerômetro piezoelétrico. Este tipo de transdutor consiste em um sistema massa-mola, onde a mola é um conjunto de elementos piezoelétricos de alta rigidez mecânica, os quais sofrem o efeito da força gerada por uma massa rígida quando o sistema é submetido a uma aceleração (RIPPER, 2005).

Muitos autores vêm utilizando esses transdutores para determinação de propriedades modais e transmissibilidade de vibração em plantas e árvores sob a ação

de diferentes carregamentos. James *et al.* (2006) utilizaram medidores de deformação para medir o movimento das fibras de árvores submetidas a carregamento de ventos, o movimento do tronco da planta do cafeeiro foi medido utilizando LVDT (*linear variable displacement transducers*) a fim de determinar propriedades modais da planta (ARISTIZÁBAL *et al.*, 2003, b). Amirante *et al.* (2007) utilizaram acelerômetros para medir aceleração resultante nos troncos de oliveiras durante o processo de derriça por vibradores de tronco a fim de estudar a transmissibilidade de vibração.

A maior parte dos transdutores supracitados é necessário o contato direto com o sistema a ser estudado o que dificulta a utilização quando o sistema possui pequenos valores de massa. Há desvantagens significativas associadas a cada tipo de sensor, sendo algumas delas relacionadas a custos de aquisição, dificuldade de montagem, interferência no funcionamento do sistema, bem como, no caso de sensores com funcionamento baseados em princípios eletromagnéticos, interferência do meio externo na medição (SILVA, 2006). O uso de acelerômetros pode ocasionar o aumento de massa da estrutura estudada interferindo na resposta do sistema (HELFRICK *et al.*, 2011), além de ter o posicionamento exato em superfícies curvas dificultado (NEUGEBAUER *et al.*, 2011).

Atualmente, a medição sem contato tem sido realizada por meio dos Vibrômetros Doppler a Laser (*Laser Doppler Vibrometers*). Este instrumento é basicamente um dispositivo interferométrico o qual mede a velocidade instantânea de um objeto através da medição do efeito Doppler da luz vinda do objeto em vibração (RIGHINI *et al.*, 2009). A vibração da superfície provoca deflexões no raio laser incidente, que medidas no tempo, identificam a velocidade de vibração de uma estrutura (TAVARES, 2006).

A aplicação da vibrometria a laser é observada para análise de vibração nas mais diferentes áreas da ciência. Neugebauer *et al.* (2011) utilizaram vibrometria a laser para determinação experimental dos cinco modos de vibração de uma amostra de um osso pélvico humano. Siringoringo & Fujino (2009) utilizaram a vibrometria a laser para medição de vibrações em membros estruturais e desenvolvimento de métodos para detecção de danos. Uma das vantagens observada dos medidores de vibração a laser é a medição a longa distância com sensibilidade adequada, no entanto, uma das grandes

desvantagens é que a maioria dos vibrômetros comerciais a medida é realizada em apenas um ponto por vez (ALLEN & SRACIC, 2010).

2.3. Utilização de vídeos de alta velocidade para a determinação de propriedades mecânicas e transmissibilidade de vibração de sistemas mecânicos e biológicos

O avanço contínuo na tecnologia de obtenção de imagens em altas velocidades contribui de forma expressiva para sua aplicação na área de mecânica experimental (THORODDSEN *et al.*, 2008) dentre as quais se destaca o estudo da dinâmica de estruturas, determinação de parâmetros modais e propriedades mecânicas, bem como o estudo de fluidodinâmica.

Usualmente, a análise de objetos em movimento envolve a segmentação das imagens, rastreamento de características do objeto ao longo da sequência de imagens e, muito frequentemente, a adequação desses recursos entre as imagens consecutivas. Duas fontes principais de dificuldades para realização de uma análise computacional de objetos em movimento são as mudanças na aparência do objeto causada pelas variações dos pontos de vista considerados; condições de iluminação e deformações geométricas; e situações de total ou parcial oclusão que pode ocorrer durante a sequência de imagens (TAVARES *et al.*, 2007).

A utilização de vídeos de alta velocidade associada às técnicas de processamento de imagens é altamente vantajosa para monitorar vibrações e deslocamentos resultantes em estruturas e sistema em que a utilização de métodos tradicionais é restrita. Câmeras digitais podem ser utilizadas para monitorar vibrações em grandes estruturas (arranha-céus e pontes de grande extensão), dada à dificuldade de se estabelecer pontos de referências para os transdutores tradicionais (CHOI *et al.*, 2011).

Observa-se a utilização com sucesso de vídeos digitais para determinações de diferentes propriedades mecânicas de estruturas. Nogueira *et al.* (2005) estudaram a resposta de uma viga em balanço utilizando sequências de imagens que simularam os resultados experimentais de vibrações livres. Os parâmetros modais da viga foram determinados em diferentes configurações da câmera e do alvo. Com os resultados encontrados, os autores verificaram a potencialidade de aplicação da técnica enfatizando

a importância da manutenção aproximada do paralelismo entre o plano sensor da câmera e o plano do alvo de interesse.

O monitoramento de vibrações em tirantes de pontes utilizando vídeos digitais foi realizado por Silva *et al.* (2008). Para o monitoramento de vibrações em tirantes, é exigida a instalação de um número elevado de sensores, o que constitui uma tarefa impraticável, dado o risco e o custo de conduzir os sinais medidos a um sistema central de aquisições de dados. Com o uso de câmeras digitais é possível adquirir imagens que cubram toda a área de interesse e observar simultaneamente a vibração em vários pontos, ainda que a sua caracterização espacial seja incompleta.

Choi *et al.* (2011) utilizaram câmeras comerciais, com taxa de amostragem máxima de 60 Hz e resolução de imagem de 1280 x 720 pixels, para determinação de deslocamentos estruturais em condições de abalos sísmicos. Os autores verificaram que, mesmo com a resolução e taxa de amostragem relativamente baixa para detecção de movimentos sísmicos rápidos, vagarosos e congelados; os vídeos digitais mostraram ser aplicáveis em substituição aos métodos convencionais para a detecção de ondas sísmicas.

Em uma análise experimental, Gungor *et al.* (2008) monitoraram a vibração de um sistema constituído por uma viga flexível de comprimento elevado com um pêndulo acoplado a sua extremidade por meio de uma câmera com capacidade de captura de 500 Hz. A posição na massa na extremidade do pêndulo, o ângulo de deflexão da viga e o ângulo desenvolvido pelo pêndulo obtidos por meio dos vídeos corroboraram resultados analíticos encontrados na literatura.

Morlier *et al.* (2007) utilizaram uma câmera de vídeo, em substituição aos acelerômetros, para detecção de danos em estruturas. Utilizando investigações do fluxo óptico em uma aproximação bidimensional os autores detectaram o movimento dos objetos. Por meio da sequência de imagens os autores extraíram informações de frequência e amortecimento de uma ponte excitada harmonicamente. Foi verificado que métodos de visão artificial são mais convenientes e menos caros que vibrômetros Doppler e acelerômetros quando o objetivo for o monitoramento contínuo de grandes estruturas.

Queiroz *et al.* (2010) determinaram do coeficiente de amortecimento de ramos de café sem a folhas utilizando vídeos de alta velocidade e técnicas de processamento de

imagens digitais. Cinco pontos dispostos ao longo do ramo foram monitorados por uma câmera digital a taxa de 1000 Hz e resolução máxima de 264 x 80 pixels após a aplicação de um impulso. Utilizando técnicas de segmentação de imagens os deslocamentos ao longo do tempo foram monitorados para cinco pontos ao longo do ramo. Os autores verificaram desvios pequenos entre as curvas experimentais e teóricas do decaimento da oscilação do sistema.

2.4. Modelagem matemática para estudo da dinâmica do sistema fruto-pedúnculo do café

Modelos matemáticos que representam o sistema fruto-pedúnculo do café vêm sendo desenvolvidos com o objetivo estudar o comportamento durante a derriça por vibrações mecânicas. Diferentes técnicas e métodos podem ser utilizados para modelagem matemática do sistema cada qual apresenta vantagens e particularidades.

Métodos analíticos podem ser implementados para modelagem do sistema fruto-pedúnculo do café durante o processo de derriça por vibrações, no entanto requerem modelos mais simplificados. Wang *et al.* (2011) estudou o comportamento dinâmico de frutos colhidos por vibração. Os autores consideraram o fruto como um pêndulo com um dos pontos fixados ao galho. A vibração era imposta na base do tronco das plantas e transmitida até o sistema fruto-pedúnculo. Os autores analisaram as forças inerciais no fruto verificando um aumento da força com o incremento da frequência e amplitude de vibração imposta à planta.

Ciro (2001) determinaram as frequências naturais do sistema fruto-pedúnculo do café por meio de dois modelos analíticos de vibração. O primeiro deles assumiu-se o sistema com um grau de liberdade representado por uma viga engastada com uma massa concentradas na extremidade. No segundo modelo, o sistema fruto-pedúnculo do café foi definido com dois graus de liberdade. Em ambos os modelos, a massa do pedúnculo e o amortecimento foi considerado. Os modelos analíticos propostos mostraram ser uteis para predizer o comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo do café no primeiro modo de vibração.

O método de elementos finitos (MEF) é um dos mais difundidos para estudar o sistema fruto-pedúnculo do café submetido a vibrações mecânicas. O método realiza a

discretização do domínio espacial em elementos menores para solução das equações governantes do problema de forma simplificada. Em problemas dinâmicos em que as variáveis de campo são dependentes das coordenadas espaciais e também do tempo, a discretização em elementos finitos é realizada no espaço e no tempo (SORIANO, 2003).

Diferentes autores utilizaram o MEF para determinação de parâmetros mecânicos e estudo do comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo do café. Espinosa *et al.* (2007) determinaram por meio do MEF os 25 primeiros modos de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café, com diferentes números de frutos por pedúnculo, a fim de determinar faixa de trabalho favoráveis a derriça seletiva. Os autores verificaram por meio dos modelos implementados que o modo de vibração em contra-fase foi o que apresentou maiores diferenças entre o estágio de maturação cereja e verde, o que facilita a seletividade, no entanto em frequências de vibração acima de 150 Hz.

Santos (2008) determinou as cinco primeiras frequências naturais e modos de vibração associados do sistema fruto-pedúnculo do café o qual observou maiores diferenças entre os estádios de maturação também para o modo de vibração em contra-fase. Além disso, o autor avaliou as tensões resultantes no sistema quando vibrações eram impostas ao mesmo. Pode-se identificar que as maiores tensões ocorreram na ligação entre o fruto e o pedúnculo, devido às diferenças geométricas de massa entre os subsistemas.

O pedúnculo do café apresenta flexibilidade acentuada devido às características geométricas e às propriedades do material constituinte, o qual pode apresentar deformações significativas quando submetido a carregamento. O conteúdo de água presente no pedúnculo, considerando características similares a da madeira do cafeeiro, pode influenciar a rigidez do sistema. O módulo de elasticidade de algumas madeiras decresce com o aumento da umidade podendo cair até 50% com o aumento de 20% no teor de água presente (LOGSDON, 1998).

Muitas aplicações em engenharia requer o desenvolvimento de modelos, para simulações de sistemas de corpos flexíveis, que sejam dinamicamente precisos e computacionalmente acessíveis. A tarefa de desenvolver modelos para formas genéricas, completamente deformáveis, exige ferramentas e códigos de simulação especializados, devido à complexidade da tarefa (SCHIAVO *et al.*, 2005).

Formulações utilizando o método de elementos finitos baseiam-se no pressuposto de pequenas deformações nos órgãos flexíveis. Pode-se conseguir um considerável aumento na velocidade computacional quando os pontos de aplicação das forças forem conhecidos e não variarem ao longo da simulação. Tensões e deformações podem ser computadas em cada instante de tempo no pós-processamento. Por outro, a flexibilidade dos corpos não afeta o comportamento da simulação multicorpos, sendo desvantajoso especialmente no caso de deformações consideráveis (KŁODOWSKI *et al.*, 2011). Outra desvantagem é que o método analisa todos os corpos como flexíveis, o que resulta em simulações mais lentas (RECKDAHL, 2012).

A análise dinâmica clássica multicorpos espacial, ou planar, não leva em conta fatores como flexibilidade dos corpos e folgas nas junções (NIKRAVESH, 1988) e desta maneira é necessário buscar alternativas para a modelagem de sistema que tem característica acentuada de flexibilidade. Shabana (2003) cita como alternativa para modelagem de corpos flexíveis a formulação por parâmetros concentrados. Na formulação por parâmetros concentrados a flexibilidade mecânica de um corpo flexível é representada por um conjunto de massas pontuais conectadas por molas que se deformam com aplicação das cargas externas (KŁODOWSKI *et al.*, 2011).

Quando utilizada a formulação de parâmetros concentrados requerimentos de convergência numérica e complexidade geométrica podem resultar em modelos de tamanho considerável, proibindo a simulação rápida (HEIRMAN *et al.*, 2011). No entanto se modelos adequados forem implementados é possível à obtenção de modelos simplificados e condizentes com o modelo real estudado.

O conjunto de massas e molas dá origem às vigas flexíveis, as quais são sistemas dinâmicos, contínuos e não lineares caracterizados por um número infinito de graus de liberdade (FERRETTI *et al.*, 2005). Uma das vantagens observadas na modelagem de vigas flexíveis é permitir ao analista controlar facilmente a flexibilidade dos componentes do sistema e incorporar efeitos dinâmicos não lineares. A definição da flexibilidade nesse caso requer a determinação das contates das molas (MITIGUY & BANERJEEY, 2000).

2.5. Referências Bibliográficas

ABDEL-FATTAH, H. M.; SHACKEL, K. A.; SLAUGHTER, D. C. Substantial vertical tree displacements occur during almond shaker harvesting. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 19, n. 2, p. 145–150, 2003.

ALLEN, M. S.; SRACIC, M. W. A new method for processing impact excited continuous-scan laser Doppler vibrometer measurements. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 24, p. 721–735, 2010.

AMIRANTE, P.; CATALANO, P.; GIAMETTA, F.; LEONE, A.; MONTEL, G. L. Vibration Analysis of an Olives Mechanical Harvesting System. **Agricultural Engineering International the CIGR Journal**, v. 9, p 1-10. 2007

ARISTIZÁBAL T., I. D.; OLIVEROS T., C. E.; ALVAREZ M., F. Mechanical harvest of coffee applying circular and multidirectional vibrations. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 2, p. 205–209, 2003, a.

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

CASE IH AGRICULTURE. **Coffee Express 100 e 200**. Disponível em: <<http://www.caseih.com/brazil/Products/Colhedoras-e-Colheitadeiras/Coffee-Express-100-e-200/Pages/Intro.aspx>> . Acesso em: 18 de junho de 2012.

CASTRO-GARCIA, S., BLANCO-ROLDÁN, G. L., GIL-RIBES, J. A., AGÜERA-VEGA, J. Dynamic analysis of olive trees in intensive orchards under forced vibration. **Trees**, n. 22, p. 795-802, 2008.

CASTRO-GARCIA, S., BLANCO-ROLDÁN, G. L., GIL-RIBES. Frequency response of Pinus Pinea L. for selective cone harvesting by vibration, **Trees**, v. 25, p. 801–808, 2011.

CHOI, H.; CHEUNG, J.; KIM, S.; AHN, J. Structural dynamic displacement vision system using digital image processing. **NDT&E International**, v. 44, p. 597–608, 2011.

CIRILLO, J. E. Avaliação de tempo efetivo da derriça mecanizada e manual do café, na região de Garça. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, n.11, p.1-7, 2007.

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

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Café – Safra 2012**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_05_10_08_56_04_boletim_cafe_-_maio_2012.pdf> Acesso em 20 de agosto de 2012.

DU, X.; CHEN, D.; ZHANG, Q.; SCHARF, P. A. WHITING, M. D. Dynamic responses of sweet cherry trees under vibratory excitations. **Biosystems Engineering**, v. 3, p. 305-314, 2012.

ESPINOSA, B. G.; RODRÍGUEZ, A. M.; GUERRA, O. L. Búsqueda de modos de vibración apropiados para la cosecha selectiva del café. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2007.

FERNANDES, A. L. T.; PARTELLI, F. L.; BONOMO, R., GOLYNSKI, A. A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012.

FERRAZ, G. A. S.; SILVA, F. M.; ALVES, M. C.; BUENO, R. L.; COSTA, P. A. N. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agricultural**, v. 13, p. 76–89, 2012.

GARCÍA-URIBE, F., OLIVEROS-TASCÓN, C. E. Design of a shaker-clamp system for inertial shaker of coffee trees. In: ASAE Annual International Meeting, 2003. Las Vegas, **Proceedings...** Las Vegas, 2003, p. 1-14.

GOMES, D.; FERRAZ, A. D. Mechanical behavior of 'niagara rosada' grape berry detachment. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, p. 1115-1122, 2011.

GOMEZ, C. A. R.; TASCÓN, C. E. O. A portable device for the selective harvesting of coffee berries. In: ASAE Annual International Meeting, 2003. Las Vegas, **Proceedings...** Las Vegas, 2003, p. 1-10.

GUNGOR, F.; GUMUS, E.; ERTAS, A.; EKWARO-OSIRE, S.; NIETO, E. Vibration Absorption of Tip Appendage Using Digital Image Processing. In: XIth International Congress and Exposition, 2008, Orlando. **Proceedings...** Orlando, p. 1-8.

HARRIS, C. M.; PIERSOL, A. G. **Harris' Shock and Vibration Handbook**. Fifth edition. New York: McGraw-Hill, 2002, 1168p.

HEIRMAN, G. H. K.; NAETS, F.; DESMET, W. A system-level model reduction technique for the efficient simulation of flexible multibody systems. **International Journal for Numerical Methods In Engineering**, v. 85, p. 330–354, 2011.

HELFRICK, M. N.; NIEZRECKI, C.; AVITABILE, P.; SCHMIDT, T. 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, p. 917–927, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Área, produção e rendimento**. Confronto das Safras de 2011 e das Estimativas para 2012. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201202_5.shtm>. Acesso em 14 de março de 2012.

JAMES, K. R., HARITOS, N., ADES, P. K. Mechanical stability of trees under dynamic loads. **American Journal of Botany**, n.9 3, v. 10, p. 1522–1530, 2006.

KLODOWSKI, A.; RANTALAINEN, T.; HEINONEN, A.; SIEVÄNEN, H.; MIKKOLA, A. The use of the flexible multibody approach for lower body skeletal loading analysis. **Procedia IUTAM**, v. 2, p. 93–100, 2011.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 1998. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

MACHADO, F. C.; SCHOLZ, M. B. S.; BACCETI, M. A. Potencial de qualidade do café produzido na microrregião de São Jerônimo da Serra –PR. *In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2005: Londrina, PR. Anais*. Brasília, D.F.: Embrapa Café, 2005.

MEIROVITCH, L. **Fundamental of Vibrations**. New York: McGraw Hill, 2001, 806p.

MITIGUY, P., BANERJEEY, A. K. **Determination of Spring Constants for Modeling Flexible Beams**, Working Model Technical Paper, 2000.

MORLIER, J.; SALOM, P.; BOS, F. New Image Processing Tools for Structural Dynamic Monitoring. **Journal of Key Engineering Materials**, v. 347, p. 239 – 244, 2007.

MUNDO NOVO ALIANÇA. **Colhedora de Café - CCMN-2000**. Disponível em: <<http://www.mundonovoalianca.com.br/site/produto/index/colhedora-cafe.php>>. Acesso em: 20 de setembro de 2012.

NAKASHI. **Derriçadoras portáteis para café**. Disponível em: <<http://www.brasutil.com/produto>>. Acesso em: 05 de setembro de 2012.

NEUGEBAUER, R.; WERNER, M.; VOIGT, C.; STEINKE, H.; SCHOLZ, R.; SCHERER, S.; QUICKERT, M. Experimental modal analysis on fresh-frozen human hemipelvic bones employing a 3D laser vibrometer for the purpose of modal parameter identification. **Journal of Biomechanics**, v. 44, n. 8, p. 1610–1613, 2011.

NIKRAVESH, P. E. **Computer-aided Analysis of Mechanical Systems**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1988, 370p.

NOGUEIRA, F. M. A.; BARBOSA, F. S.; BARRA, L. P. S. Identificação das características modais de estruturas via processamento de imagens. *In: XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2005, Guarapari. Proceedings...* Guarapari, 2005. p. 1-14.

OLIVEIRA, E. I.; SILVA, F. M.; SALVADOR, N.; FIGUEIREDO, C. A. P. Influência da vibração das hastes e da velocidade de deslocamento da colhedora no processo de colheita mecanizada do café. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.3, 2007.

OLIVEIRA, M. V. M. **Desenvolvimento e avaliação de um dispositivo para derriça de café**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PEZZY, F.; CAPRARA, C. Mechanical grape harvesting: Investigation of the transmission of vibrations. **Biosystems Engineering**, v. 1, n. 3, p. 281-286, 2009.

POLAT, R.; ACAR, I.; BILIM, H. I. C.; SAGLAM, R.; EROL, A. K. B. Determination of spring rigidity and fruit detachment force with respect to harvesting technique in pistachio nut trees. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 3, p. 532-537, 2011.

QUEIROZ, D. M.; VILLIBOR, G. P. PINTO, F. A. C.; GUEDES, D. M. **Determination of the damping coefficient of coffee branches using image processing techniques**. In: XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR), 2010, Quebec, Proceedings... Quebec, 2010, p.1-10.

RAMÍREZ V., C. M.; ALVAREZ M., F.; OLIVEROS T, C.; ARISTIZÁBAL T, I. D. Evaluación de un cosechador de café por vibración circular al tallo. . **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 56, n. 1., p. 1789-1803, 2003.

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

RECKDAHL, K. **Working Model Technical Note: Modeling Uniform Flexible Bodies in Working Model**. Technical Documentation, Disponível em: <<http://www.maelabs.ucsd.edu/cosmos/resources/wm2d/documentation/ModelingFlexibleBeamsOld.pdf>> Acesso em: 12 de abril de 2012.

RIGHINI, G. C.; TAJANI, A.; CUTOLO, A. **An Introduction to Optoelectronic Sensors: Series in optics and photonics**. Singapore: World Scientific Publishers, v. 7, 2009, 584p.

RIPPER, G. P. **Padronização primária em metrologia de vibrações**. 2005. 219 f. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

SAMPAIO, C. P.; CORRÊA, P. C.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. N. Determinação da força requerida para o desprendimento dos frutos de café em diferentes estádios de maturação. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil; 2000, Poços de Caldas, **Resumos expandidos...** Brasília: Embrapa Café e MINASPLAN, 2000. p. 98-100.

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

SAVARY, S. K. J. U.; EHSANI, R.; SALYANI, M.; HEBEL, M. A.; BORA, G. C. Study of force distribution in the citrus tree canopy during harvest using a continuous canopy shaker. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 76, p. 51-58, 2011.

SCHIAVO, F.; FERRETTI, G.; VIGANO, L. **Object-Oriented Modelling and Simulation of Flexible Multibody Thin Beams in Modelica with the Finite Element Method**. **Modelica 2005**, p. 24 – 34, 2005.

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

SHABANA, A. A. **Dynamics of Multibody Systems**. Cambridge University Press, 2003, 384 p.

SPATZ, H.; BRÜCHERT, F.; PFISTERER, J. Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations? **American Journal of Botany**, v. 94, n. 10, p. 1603–1611, 2007.

SILVA, D. A. **Diagnóstico de Equipamentos de Propulsão Naval Através de Análise de Vibração**. 2006. 135 f. Dissertação (Mestrado Ciências em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

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

SILVA, F. M. **Colheita do café mecanizada e semi-mecanizada**, Boletim de Extensão. Lavras-MG: UFLA, 2001, 88p.

SILVA, F. M. **Colheita mecanizada e seletiva do café: cafeicultura empresarial: produtividade e qualidade**. Lavras: UFLA/Faepe, 2004.

SILVA, F. M; ARRÉ, T. J.; TOURINO, E. S.; GOMES, T. S.; ALVES, M. C. Uso de Ethrel na colheita mecanizada e seletiva de café arábica (*Coffea arabica* L.). **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 2, p. 178-182, 2009.

SILVA, F. M.; SALVADOR, N. **Mecanização da lavoura cafeeira**. Lavras: UFLA, 1998. 55 p.

SILVA, S.; BATEIRA, J.; CAETANO, E. Sistema de visão artificial para monitorização de vibrações em tirantes de pontes. **Revista de Mecânica Experimental**, n. 15, p. 1-11, 2008.

SIRINGORINGO, D. M.; FUJINO, Y. Noncontact operational modal analysis of structural members by laser doppler vibrometer. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 24, p. 249–265, 2009.

SORIANO, H. L. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**. São Paulo: EdUSP, 2003, 608 p.

SOUZA, C. M. A. **Desenvolvimento e modelagem de sistema de derrça e de abanação de frutos do cafeeiro**. 2004. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOUZA, C. M. A.; QUEIROZ, D. M.; RAFULL, L. Z. L.; CECON, P. R. Comparação entre derrça manual e mecânica de frutos de cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 53, n. 305, p. 39-43, 2006.

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

TASCÓN, C. E. O.; MORA, R. B.; MEJÍA, F. A.; TÓRRES, I. D. A.; GÓMEZ, C. A. R.; URIBE, J. R. S. Cosecha del café con vibradores portátiles del tallo. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 58, n. 1, p. 2697-2708, 2005.

TAVARES, S. G. **Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte**. 2006. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, MG.

TAVARES, J. M. R. S., CARVALHO, F. J. S.; OLIVEIRA, F. P. M., VASCONCELOS, M. J. M., GONÇALVES, P. C. T., PINHO, R. R. Computer analysis of objects' movement in image sequences methods and applications. In: Conferência Nacional de Dinâmica de Sistemas Multicorpo, 2007, Guimarães. **Actas...**, Guimarães, p. 33-40.

THORODDSEN, S. T.; ETOH, T. G. TAKEHARA, K. High-Speed Imaging of Drops and Bubbles. **Annual Review of Fluid Mechanics**. n. 40, p. 257–85, 2008.

VEGRO, C. L. R.; MARTIN, N. B.; MORICOCCHI, L. Sistemas de produção e competitividade da cafeicultura paulista. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, (1.: 2000 : Poços de Caldas, MG). **Resumos expandidos**. Brasília, D.F.: Embrapa Café; Belo Horizonte : Minasplan, 2000. 2v. (1490p.) : il.

WANG, W.; MOTTERSHEAD, J. E.; MARES, C. Vibration mode shapes recognition using image processing. **Journal of Sound and Vibration**, v. 326, p. 909–938, 2009.

CAPÍTULO 3 - DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MODAIS DO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO DO CAFÉ POR VÍDEOS DE ALTA VELOCIDADE

3.1. Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de café com uma safra de 2,7 milhões de toneladas no ano de 2011. Dentre os estados, Minas Gerais possui 51,9% das lavouras cafeeiras, seguido pelo Espírito Santo, com 25,4%. As duas principais espécies cultivadas, *Coffea arabica* e *Coffea canephora*, representam 74 e 26% do total da produção, respectivamente (IBGE, 2012).

Dentre todas as operações envolvidas na cadeia produtiva do café, a colheita dos frutos apresenta as maiores dificuldades para mecanização. É composta por seis etapas: arruação, derriça, varrição, recolhimento, abanação e transporte dos frutos. A fase de derriça pode ser realizada em uma só etapa ou seletivamente, em que somente os frutos maduros são retirados da lavoura (SOUZA *et al.*, 2006). A colheita seletiva pode contribuir para que sejam produzidas bebidas de melhor qualidade.

Uma estratégia comum utilizada para a derriça mecânica de diferentes frutos é a aplicação de impactos e forças vibracionais à planta a fim de induzir uma força de desprendimento nos frutos suficiente para retirá-los da planta (DU *et al.*, 2012). Para que as máquinas destinadas à colheita de café realizem a derriça de forma eficiente é fundamental que seja determinada a combinação adequada entre frequência e amplitude de vibração (SANTOS *et al.*, 2010). A resposta do sistema fruto-pedúnculo do café submetido à vibração é condicionada por seus parâmetros modais, tais como frequências naturais, modos de vibração e amortecimento (RAO, 2008). Se uma excitação for aplicada na frequência natural, ou próxima da mesma, o sistema responderá com amplitude máxima. A dissipação de energia durante a aplicação da vibração é caracterizada pelo amortecimento o qual reduz as amplitudes de saída do sistema vibrante (ARISTIZÁBAL *et al.*, 2003).

Frequências naturais e modos de vibração vêm sendo estimados por diferentes autores para o sistema fruto-pedúnculo do café utilizando técnicas de modelagem matemática. Santos (2008) e Espinosa *et al.* (2007) utilizaram o método de elementos

finitos para a determinação de modos de vibração e frequências naturais buscando faixas de ressonância favorável a derrixa seletiva dos frutos de café. No entanto, são escassas as informações experimentais de tais parâmetros, o que dificulta a validação dos modelos matemáticos e entendimento do comportamento do sistema quando posto a vibrar.

Determinações experimentais de parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café ainda são restritas pelas dificuldades inerentes ao sensoriamento da resposta à vibração do sistema. Transdutores de deslocamento (LVDT- *Linear Variable Displacement Transducers*) (ARISTIZÁBAL *et al.*, 2003); acelerômetros (JONSSON *et al.*, 2007) e medidores de deformações (JAMES *et al.*, 2006) são comumente utilizados para medição de vibração em plantas. A obtenção da resposta à vibração do sistema fruto-pedúnculo do café, utilizando-se sensores e transdutores de contato direto, é dificultada devido a limitações físicas e mecânicas. A resposta de um sistema quando submetido à vibração pode ser influenciada pelo acréscimo de massa gerado pela utilização de acelerômetros (HELFRICK *et al.*, 2011).

Uma alternativa para determinação da resposta à vibração do sistema fruto-pedúnculo café é a utilização de vídeos de alta velocidade juntamente às técnicas de processamento de imagens digitais. Aplicações de vídeos de alta velocidade têm sido observadas em diferentes áreas do conhecimento, tais como ciências médicas para estudo de parâmetros vibracionais de pregas vocais (QIN *et al.*, 2009), em dinâmica de fluidos para análise de gotas e bolhas de cavitação (THORODDSEN *et al.*, 2008) e para o estudo de deslocamento estrutural sísmico (NAYYERLOO *et al.*, 2010).

Algumas vantagens inerentes aos vídeos, para monitoramento da vibração e determinação de comportamento dinâmico estrutural, referem-se à localização do sensor estar fora da estrutura, ao monitoramento multipontos na estrutura, ao mesmo tempo (SIEBERT & CROMPTON, 2010) e a possibilidade de monitoramento das vibrações em três dimensões.

A hipótese que precede o trabalho é que é possível determinar parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café com o uso de vídeos digitais de alta velocidade e técnicas de segmentação global simples. Desta forma, objetivou-se determinar, em condições laboratoriais, os principais parâmetros modais do sistema

fruto-pedúnculo do café tais como razão de amortecimento, frequência natural e coeficiente de amortecimento, por meio de vídeos digitais de alta velocidade.

3.2. Material e Métodos

Os testes de vibração para determinação de parâmetros vibracionais do sistema fruto-pedúnculo do café foram conduzidos no Laboratório de Mecanização Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Foram utilizadas amostras de café variedade Catuaí Vermelho, coletadas em uma área experimental localizada no campus UFV, durante as safras de 2010 e 2011. As amostras de ramos foram mantidas em comprimento constante de 0,05 m, contendo um fruto de café por pedúnculo, para a realização de todos os testes.

Foi determinada durante os testes de vibração, a resposta do sistema fruto-pedúnculo do café submetido a uma excitação impulsiva, da qual foram extraídas informações sobre a frequência natural e o amortecimento do sistema. A resposta temporal do sistema fruto-pedúnculo do café foi dada em termos de deslocamentos determinados por meio de vídeos digitais de alta velocidade e técnicas de processamento de imagens digitais.

3.2.1. Parâmetros modais determinados para o sistema fruto-pedúnculo do café

Determinou-se para o sistema fruto-pedúnculo do café, por meio dos testes de vibração, os seguintes parâmetros:

- i. Período de oscilação amortecida;
- ii. Razão de amortecimento;
- iii. Primeira frequência natural amortecida e não amortecida; e
- iv. Coeficiente de amortecimento.

Definiu-se o sistema fruto-pedúnculo do café por três parâmetros, a massa (m), o coeficiente de amortecimento (c) e a rigidez (k). A resposta livre amortecida pode ser descrita pela Equação 3.1, a qual representa o movimento do sistema.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{0\} \quad (3.1)$$

em que,

$[m]$ = massa equivalente do sistema fruto-pedúnculo do café;

$[c]$ = amortecimento equivalente do sistema fruto-pedúnculo do café;

$[k]$ = rigidez equivalente do sistema do sistema fruto-pedúnculo do café;

$\{x\}$ = posição medida a partir da posição de equilíbrio da massa m ;

$\{\dot{x}\}$ = velocidade do sistema fruto-pedúnculo do café;

$\{\ddot{x}\}$ = aceleração do sistema fruto-pedúnculo do café.

O sistema fruto-pedúnculo do café foi submetido a um deslocamento inicial, por meio da base móvel do vibrador eletromagnético, e deixado a vibrar até retornar a posição de equilíbrio. O deslocamento inicial, imposto ao sistema fruto-pedúnculo do café, foi um impulso de onda semi-senoidal, definido em termos da aceleração de pico e do tempo de aplicação do impulso.

A Figura 3.1 ilustra a resposta teórica de um sistema subamortecido, após a aplicação do impulso. Na mesma figura estão destacadas duas amplitudes consecutivas (X_1 e X_{1+N}) e o período de oscilação amortecida (τ_v), ou seja, o período entre as respectivas amplitudes de oscilação.

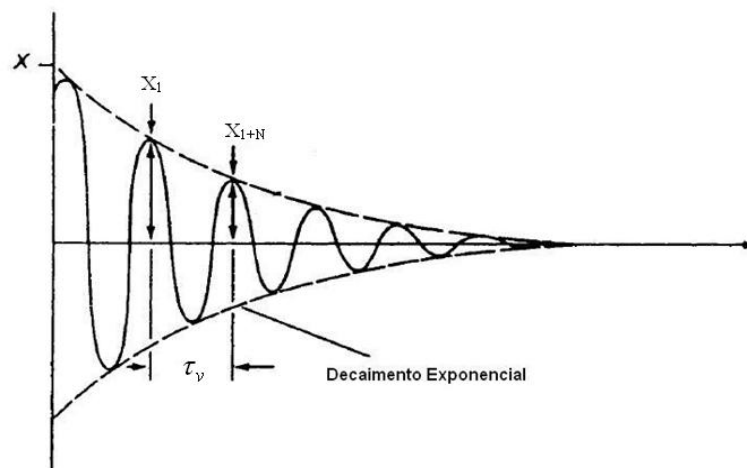


FIGURA 3.1 - Resposta teórica de decaimento da oscilação de um sistema submetido a um deslocamento inicial (Adaptado: BEARDS, 1996).

Para a determinação dos parâmetros modais supracitados, foi utilizado o método do decremento logarítmico (MOHSEIN, 1986; DIMAROGONAS & HADADD,

1992). O decremento logarítmico representa a taxa de redução da amplitude de uma vibração livremente amortecida sendo definido como o logaritmo natural da relação entre duas quaisquer amplitudes sucessivas medidas numa mesma direção, e representada pela Equação 3.2 (BEARDS, 1996).

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{X_1}{X_{1+N}} \right) \quad (3.2)$$

em que,

δ = decremento logarítmico;

X_1 e X_{1+N} = duas sucessivas amplitudes de oscilação, mm;

N = número de ciclos utilizado para a medição das amplitudes.

A relação entre o decremento logarítmico e os parâmetros modais foi obtida considerando o sistema fruto-pedúnculo do café como sistema subamortecido. Um sistema subamortecido tem seu deslocamento teórico ao longo do tempo, após a aplicação de um deslocamento inicial, descrito pela Equação 3.3 (RAO, 2008).

$$x(t) = X_0 e^{-\zeta \omega_n t} \text{sen}(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t + \varphi_0) \quad (3.3)$$

em que,

$x(t)$ = deslocamento do sistema ao longo do tempo, mm;

X_0 = deslocamento inicial, mm;

t = tempo, s;

ω_n = frequência angular natural, rad s⁻¹;

ζ = razão de amortecimento do sistema;

φ_0 = ângulo de fase, rad.

A relação entre o valor do decremento logarítmico, após N ciclos de oscilação, com a razão de amortecimento do sistema em estudo é representada pela Equação 3.4. Sendo assim, o valor da razão de amortecimento do sistema pode ser calculado pela utilização da Equação 3.5. A razão de amortecimento é uma medida adimensional que representa quão rápida é o decaimento das oscilações quando um sistema é posto a vibrar (BEATTY, 2006).

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{X_1}{X_{1+N}} \right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{(1-\zeta^2)}} \quad (3.4)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (3.5)$$

Por meio das curvas de decaimento da oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café foi obtido o período de oscilação amortecida pela medição do instante de tempo entre dois picos de deslocamento consecutivos. A frequência natural amortecida foi determinada pela relação existente com o período de oscilação amortecida (Equação 3.6). Desconsiderando os efeitos do amortecimento, a primeira frequência natural para o sistema fruto-pedúnculo do café foi obtida pela Equação 3.7.

$$\omega_v = \frac{2\pi}{\tau_v} \quad (3.6)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_v}{\sqrt{(1-\zeta^2)}} \quad (3.7)$$

em que,

τ_v = período de oscilação amortecida;

ω_v = frequência angular natural amortecida, rad s⁻¹.

Ambas as frequências foram apresentadas em ciclos de vibração por segundo, utilizando a relação com a frequência angular natural dos sistemas estudados (Equações 3.8 e 3.9).

$$f_v = \frac{\omega_v}{2\pi} \quad (8)$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (9)$$

em que,

f_v = frequência natural amortecida, Hz;

f_n = frequência natural não-amortecida, Hz.

O coeficiente de amortecimento viscoso do sistema fruto-pedúnculo do café foi determinado por meio da Equação 3.10. Em qualquer sistema real, o amortecimento prove resistência mecânica ao movimento (OGATA, 1992), fazendo com que a amplitude de vibração livre decaia continuamente até um valor insignificante.

$$c = 2m\omega_n \zeta \quad (3.10)$$

em que,

c = coeficiente de amortecimento do sistema, N s m⁻¹;

A rigidez equivalente do sistema fruto-pedúnculo do café foi estimada por meio da Equação 3.11 e pode contribuir para o entendimento da resposta do sistema fruto-pedúnculo do café submetido à vibração forçada. A rigidez é a taxa de mudança da força para uma mudança correspondente na deflexão translacional de um elemento elástico (HARRIS & PIERSOL, 2002).

$$k = \omega_n^2 m \quad (3.11)$$

em que,

k = rigidez equivalente, N m⁻¹.

3.2.2. Equipamentos utilizados nos testes de vibração

A vibração foi imposta ao sistema fruto-pedúnculo do café por meio de um vibrador eletromagnético da marca LDS (*Ling Dynamic Systems*), composto por um gerador de sinais COMET_{USB}, um amplificador de sinais PA100E-CE e uma máquina vibradora, modelo V406 (Figura 3.2).



FIGURA 3.2 - Sistema empregado nos ensaios de derrixa: (a) gerador de sinais, (b) amplificador e (c) máquina vibradora (Fonte: SANTOS, 2008).

Na Tabela 3.1 estão apresentadas as principais características técnicas do vibrador eletromagnético utilizado nos testes de vibração. Utilizou-se um transdutor piezoelétrico uniaxial, marca PCB, modelo 353B33, faixa de operação de 1 a 4 kHz, para monitorar a aceleração imposta pela base móvel do vibrador eletromagnético. Por meio do programa proprietário foi possível definir como parâmetros de entrada o pico de aceleração e o tempo do impulso imposto ao sistema fruto-pedúnculo do café.

TABELA 3.1 - Principais características técnicas do vibrador eletromagnético utilizado nos testes de vibração

Faixa dinâmica de trabalho (Hz)	5 – 9000
Carga máxima (N)	198
Deslocamento máximo da base móvel (mm)	17,6
Aceleração máxima (G)	100

O deslocamento ao longo do tempo do sistema fruto-pedúnculo do café, após a aplicação do impulso, foi monitorado por meio uma câmera digital da marca Casio, modelo Exilim EX-FH20. As principais características técnicas relativas à câmera estão apresentadas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - Principais características técnicas da câmera utilizada para monitoramento da vibração do galho e do sistema fruto-pedúnculo do café

Pixels efetivos	9,1 Megapixels
Elemento imageador	CMOS alta-velocidade (1/2.3 polegadas)
Lentes/distância focal	F 2,8 (W) a 4,5 (T); f=4,6 a 92,00 mm (14 lentes em 11 grupos, incluindo lentes esféricas)
Taxa de amostragem (Hz)	210; 420 e 1000
Resolução da imagem (pixel x pixel)	480 x 168; 224 x 168 e 224 x 80
Razão de aspecto (Hz)	20:7; 4:3 e 14:5

As distâncias entre o alvo (sistema fruto-pedúnculo do café) e o plano da lente da câmera, e do alvo e o fundo de imagem, foram mantidas constantes, em todas as aquisições, a fim de proporcionar a mesma resolução espacial e as mesmas distorções para todos os vídeos. O plano do alvo, o plano do fundo e o plano da câmera foram mantidos paralelos durante os testes. A iluminação foi mantida constante durante a aquisição de todos os vídeos, por meio de duas lâmpadas fluorescentes de 50 W. Na Figura 3.3 está apresentada a configuração utilizada para determinação dos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café.

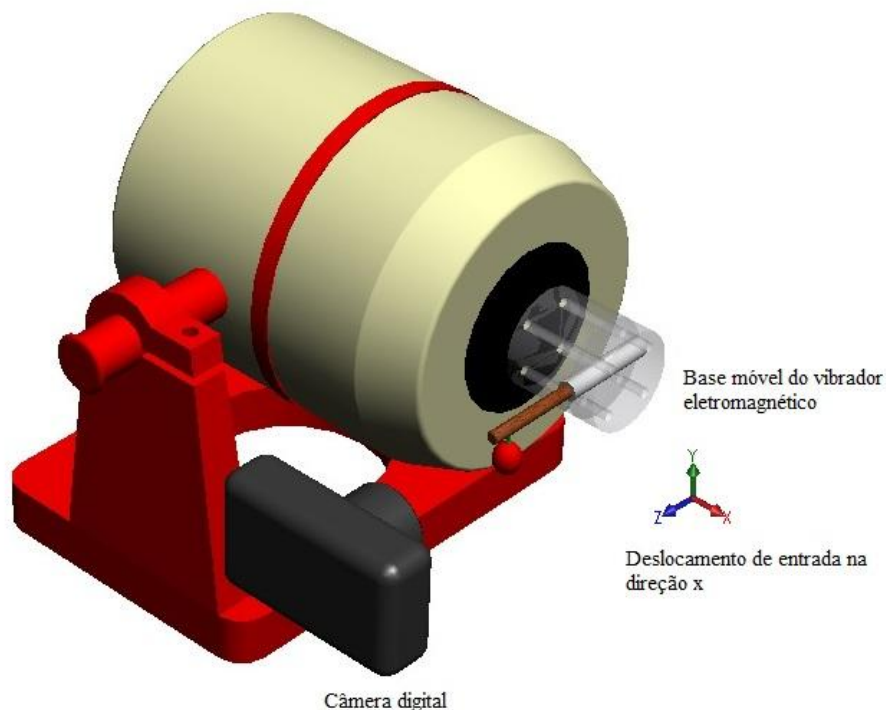


FIGURA 3.3 - Esquema representativo da configuração utilizada para a determinação dos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café.

3.2.3. Determinação dos deslocamentos resultantes do sistema fruto-pedúnculo do café

Os deslocamentos do sistema fruto-pedúnculo do café foram monitorados pela aquisição de vídeos de alta velocidade considerando um ponto de referência na extremidade livre do fruto de café. O ponto de monitoramento, para ambos os estádios

de maturação estudados, foi destacado com tinta branca. Foram realizadas dois grupos de testes para determinação dos parâmetros modais supracitados referentes às safras de 2010 e 2011.

Nos testes realizados na safra de 2010, trabalhou-se com uma taxa de amostragem de vídeo de 1000 Hz a fim de prover menores perdas de informações a respeito do deslocamento do sistema fruto-pedúnculo do café após a aplicação do impulso. Foi aplicado um impulso com um pico de aceleração de $103,59 \pm 0,48 \text{ m s}^{-2}$ e duração de 11 milissegundos.

Na safra de 2011, os testes foram realizados para a determinação dos mesmos parâmetros vibracionais, porém utilizaram-se as três taxas de amostragem de vídeo disponível (210, 420 e 1000 Hz) para o monitoramento do decaimento da oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café após a aplicação do impulso. Com base nos resultados nos primeiros testes, verificou-se a adequabilidade das três taxas de amostragem trabalhadas, com base no teorema de Nyquist; e a necessidade de aumentar o pico de aceleração imposta ao sistema fruto-pedúnculo do café. O teorema de Nyquist estabelece que a mesma deva ser de pelo menos duas vezes, preferencialmente dez vezes, maior que a frequência a ser estudada (BRANDT, 2011; NATIONAL INSTRUMENTS, 2006). Foi aplicado, no segundo grupo de testes, um pico de aceleração de $147,15 \pm 0,51 \text{ m s}^{-2}$ e duração de 11 ms.

Para obtenção das curvas de deslocamentos do sistema fruto-pedúnculo do café, o ponto de maior deslocamento no sistema, considerado na extremidade livre do fruto de café, foi escolhido como o ponto de monitoramento. A cor do fundo da imagem foi escolhida preta de forma a contrastar com o sistema a ser estudado e prover informações necessárias para estimativas do deslocamento do sistema em coordenadas métricas. Na Figura 3.4 são representados o fundo da imagem e os quatro pontos de controle (PC₁ a PC₄), localizados nas extremidades da imagem a distâncias conhecidas um do outro, formando uma região retangular de dimensões (2b x 2a). Os pontos de controle foram destacados na cor branca.

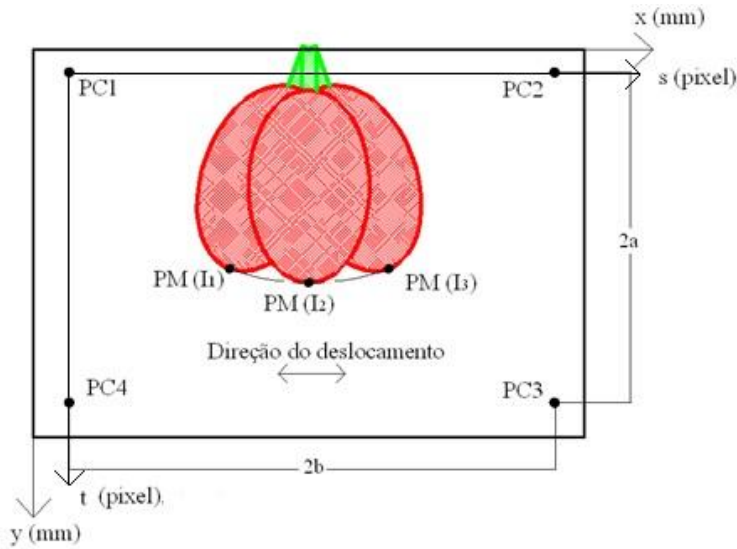


FIGURA 3.4 - Representação do fundo de imagem com pontos de controle (PC_1 a PC_4) e ponto de monitoramento (PM), em três imagens (I_1 I_2 I_3), para uma amostra do sistema fruto-pedúnculo do café.

Foi definido um sistema de coordenadas nas imagens (s , t), em pixel, utilizado para obtenção do deslocamento do ponto de monitoramento (PM), escolhido no sistema fruto-pedúnculo do café. Um sistema de coordenadas (x , y), em milímetros, foi definido no espaço real de tal maneira que o plano de contém os pontos de controle sejam o mesmo de (x , y). Na Figura 3.4 está representada uma amostra do sistema fruto-pedúnculo do café em três imagens hipotéticas destacando-se os pontos de controle e monitoramento; os eixos e dimensões de referência; e a direção do deslocamento de entrada.

A calibração das imagens para transformar os valores do sistema os valores do sistema (s , t), em pixel, para o sistema (x , y), em milímetros, foi realizada com as funções de transformação propostas por Segerlind (1984), representadas pelas Equações 3.14 e 3.15.

$$x = \varphi_{1x} + \frac{1}{2b}(\varphi_{2x} - \varphi_{1x})s + \frac{1}{2a}(\varphi_{4x} - \varphi_{1x})t + \frac{1}{4ab}(\varphi_{1x} - \varphi_{2x} + \varphi_{3x} - \varphi_{4x})st \quad (3.14)$$

$$y = \varphi_{1y} + \frac{1}{2b}(\varphi_{2y} - \varphi_{1y})s + \frac{1}{2a}(\varphi_{4y} - \varphi_{1y})t + \frac{1}{4ab}(\varphi_{1y} - \varphi_{2y} + \varphi_{3y} - \varphi_{4y})st \quad (3.15)$$

em que,

x e y = coordenadas métricas do ponto de monitoramento, mm;

s e t = coordenadas do monitoramento na imagem, em pixel;

φ_{1x} , φ_{2x} , φ_{3x} e φ_{4x} = valor real da coordenada x nos pontos de controle, mm;

φ_{1y} , φ_{2y} , φ_{3y} e φ_{4y} = valor real da coordenada y nos pontos de controle, mm;

$2b$ = comprimento do retângulo formado pelos pontos de controle, pixel;

$2a$ = altura do retângulo formado pelos pontos de controle, pixel.

Com as coordenadas métricas do ponto de monitoramento, as curvas de deslocamento do sistema fruto-pedúnculo do café foram plotadas em função do tempo. Todas as determinações foram realizadas com base na coordenadas com maior deslocamento, ou seja, referentes às coordenadas do eixo x .

3.2.4. Processamento dos vídeos de monitoramento da vibração

Os vídeos de monitoramento possibilitaram a determinação da resposta transiente do sistema fruto-pedúnculo do café. Para isso, foram utilizadas técnicas de segmentação de imagens digitais para extrair informações de deslocamento do sistema ao longo do tempo.

Para o processamento dos vídeos adquiridos durante os testes de vibração, foi elaborada uma rotina no programa computacional MATLAB[®]. As informações extraídas dos vídeos foram as coordenadas dos pontos de controle (dispostos no fundo da imagem) e monitoramento (extremidade livre do fruto de café), para cada imagem constituinte. As coordenadas dos pontos previamente, em pixel, foram transformadas com referência às posições reais dos pontos de controle, para obtenção das coordenadas em milímetros.

O processamento dos vídeos foi composto pelas seguintes etapas:

- I. Extração das imagens do vídeo e criação de um banco de dados composto pelas imagens dos vídeos de decaimento;
- II. Segmentação das imagens originais para obtenção das coordenadas, em pixel, dos pontos desejados;

- III. Processo de transformação de coordenadas para obtenção das coordenadas em milímetros; e
- IV. Plotagem das coordenadas dos pontos de monitoramento em função do tempo para obtenção das curvas de decaimento.

Os vídeos adquiridos inicialmente eram compostos por uma sequência de imagens coloridas (RGB), com tamanho de imagem dependente da taxa de amostragem utilizada para o monitoramento. Na safra de 2010 os vídeos foram adquiridos em taxa de amostragem única de 1000 Hz e na safra de 2011 foram trabalhadas as três taxas de amostragem disponíveis na câmera de 210, 420 e 1000 Hz. Por meio da utilização do zoom ótico, aproveitou-se ao máximo a área útil para focalizar o sistema fruto-pedúnculo do café de forma a obter a melhor resolução possível.

Após a leitura do vídeo, foi criado um banco de dados composto pelas imagens originais do vídeo. Antes de iniciar o processamento para segmentação dos pontos de controle e monitoramento, tomando como base a primeira imagem, definiu uma região da imagem para recortar a borda, pois a mesma não era de interesse no processamento. Para isto foi definida uma a região de corte da imagem e as coordenadas determinadas na primeira imagem foram utilizadas para cortar todas as imagens que compunha o vídeo.

Para cada estágio de maturação dos frutos do café foi definida as condições que favoreceram o processo de segmentação. A segmentação foi realizada por meio de operação de limiarização (GONZALEZ & WOODS, 2000), que consistiu em definir um nível de cinza, em uma determinada banda, para segmentar os pontos de monitoramento e de referência do resto da imagem. Verificou-se qual banda que melhor realçou os pontos de interesse da imagem e definiu-se o limiar de segmentação manualmente.

Para cada imagem da sequência dos vídeos, os valores de *pixels* que excederam o limiar T foram definidos iguais a um (pixel branco) e os demais iguais a zero (pixel preto), originando-se uma imagem binária. Essa limiarização foi realizada para todas as imagens com um único valor de T.

Com as imagens binárias resultantes, identificaram-se todos os objetos presentes, tais como os pontos de controle e monitoramento; e pontos ruídos considerando uma

conectividade com oito vizinhos próximos. A conectividade define a área local de influência com base na vizinhança local de um pixel.

Para cada objeto identificado na imagem binária, calculou-se a área de influência e o respectivo centroide. Para uma imagem sem a presença de ruídos, cinco objetos eram identificados (quatro pontos de controle e um de ponto monitoramento). Quando identificados um número superior a cinco objetos na imagem binária, imagens de referência eram utilizadas para verificar as possíveis origens dos objetos ruídos, como reflexão da iluminação pelos frutos ou pelo fundo de imagem. Foram utilizadas como referência as imagens correspondentes aos picos de oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café.

Quando a área dos objetos ruídos tinha influência menor que a área das regiões de interesse, os mesmos eram eliminados por meio do filtro morfológico de abertura. Esse filtro remove da imagem binária objetos com área menor que a área dos objetos de interesse produzindo uma nova imagem binária. Outra forma de eliminação dos pontos ruídos foi atribuindo à região de ruído valores referente à cor preta na imagem binária, assim tornando-a como fundo também. Isso foi realizado para ruídos referentes à reflexão de iluminação pelos frutos, os quais apresentavam área superior às regiões de interesse. Após a eliminação dos ruídos, as coordenadas, em pixel, de centroide dos objetos de interesse foram dispostas em uma matriz de resultados. O total de linhas da matriz de resultados era igual ao número de quadros que compunha o vídeo de monitoramento da vibração e dez colunas.

O próximo passo do processamento dos vídeos foi transformar as coordenadas de deslocamento, em pixels, para coordenadas, em milímetros, por meio das equações de transformação estabelecidas na seção anterior (Equações 3.14 e 3.15). Com as coordenadas métricas obteve-se o histórico do deslocamento do ponto de monitoramento do sistema fruto-pedúnculo do café e a partir deste foram obtidos os parâmetros modais do sistema. O fluxograma do programa computacional desenvolvido para determinação dos deslocamentos do sistema fruto-pedúnculo do café está apresentado da Figura 3.5.

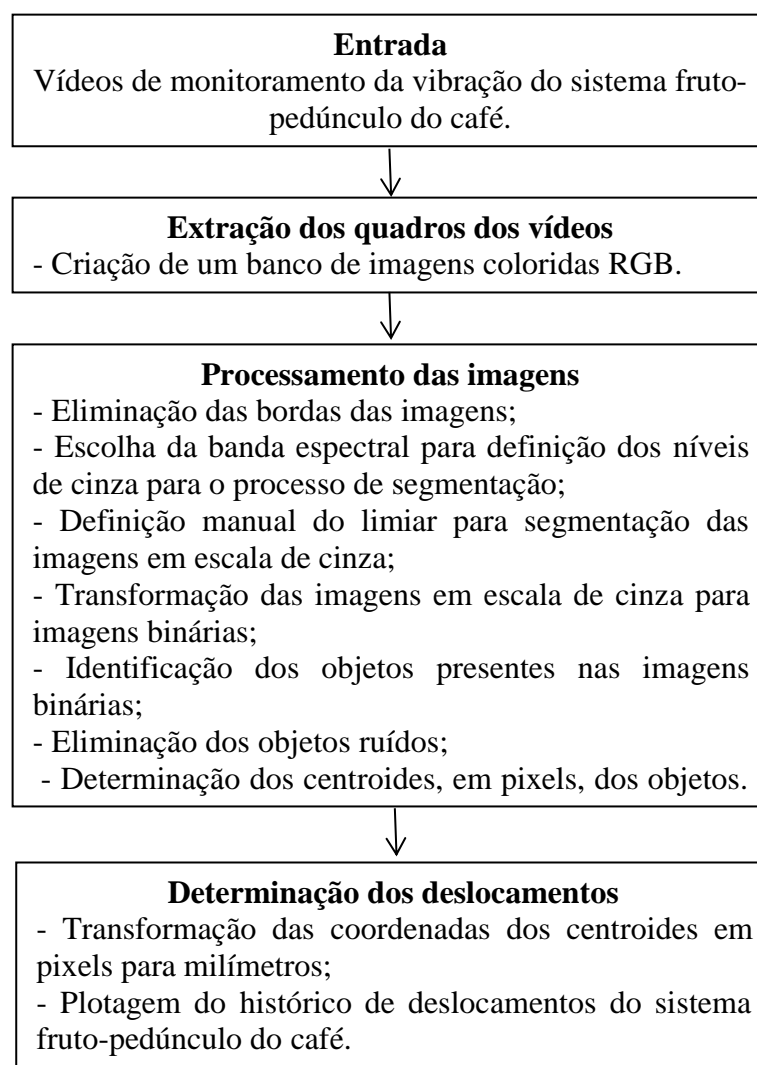


FIGURA 3.5 - Fluxograma do programa computacional desenvolvido para determinação dos deslocamentos do sistema fruto-pedúnculo do café durante os ensaios de vibração.

Para avaliar a classificação realizada pelo processamento das imagens, foi calculada uma matriz de confusão (Tabela 3.3) com base em 56 imagens amostradas antes e depois da segmentação, para cada taxa de amostragem em cada estágio de maturação. As imagens escolhidas referiram-se a quatro picos de oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café de cada vídeo de monitoramento. Comparou-se visualmente a imagem original com a imagem binária, após a remoção dos ruídos, verificando os erros de omissão e inclusão.

TABELA 3.3 - Exemplo de matriz de confusão calculada para avaliar o processamento dos vídeos para cada estágio de maturação do sistema fruto-pedúnculo do café e taxa de amostragem de vídeo

Valor Estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Regiões de interesse	Fundo	
Regiões de interesse	Imagens com regiões de interesse classificadas como regiões de interesse (PP)	Imagens com regiões referentes a fundo classificados como regiões de interesse (FP)	$\frac{(FP) \times 100}{(PP) + (FP)}$
Fundo	Imagens com regiões de interesse classificadas como fundo (PF)	Imagens com regiões referentes a fundo classificados com fundo (FF)	$\frac{(PF) \times 100}{(PF) + (FF)}$
Erros de omissão (%)	$\frac{(PF) \times 100}{(PF) + (PP)}$	$\frac{(FP) \times 100}{(FP) + (FF)}$	Exatidão global (%) $\frac{((PP) + (FF)) \times 100}{(PP) + (FP) + (PF) + (FF)}$

A matriz de confusão contém informações sobre a classificação real e predita feita por um sistema de classificação (KOHAVI & PROVOST, 1998). A matriz de confusão ou matriz de erros é uma das maneiras utilizadas para a representação da exatidão do classificador, visto que as exatidões das diferentes classes estão claramente definidas, apresentando os erros de inclusão e de omissão, sendo a exatidão global definida pela soma da diagonal principal (amostras corretamente classificadas) pelo número total de amostras (CONGALTON, 1991).

3.2.5. Avaliação dos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café obtidos nos testes de vibração

Na safra de 2010, foram utilizadas 32 amostras para cada estágio de maturação estudado (cereja e verde) e taxa de amostragem de vídeo constante de 1000 Hz. Na safra de 2011 foram utilizadas três taxas de amostragem de vídeo disponíveis 210, 420 e 1000 Hz, para determinação dos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café. Foram utilizadas 14 amostras para cada estágio de maturação sendo cada uma delas avaliadas nas três taxas de amostragem.

Primeiramente foi realizada uma análise visual das curvas de decaimento obtidas a fim de verificar a coerência da resposta experimental com a resposta teórica. Para a safra de 2010, foi realizada uma comparação entre médias de 15 amostras do estágio de

maturação cereja e 7 amostras para o estágio de maturação verde, por meio do teste de médias t, ao nível de 5 % de significância.

Para a safra de 2011, foi verificada a influência da taxa de amostragem sobre os parâmetros vibracionais do sistema fruto-pedúnculo do café por meio de análise de variância. As médias entre tais parâmetros foram comparados entre os estádios de maturação pelo teste de média t, ao nível de 5% de probabilidade. Os resultados dos testes de vibração realizados em 2010 foram utilizados para verificar a adequabilidade do impulso imposto ao sistema fruto-pedúnculo do café por meio do vibrador eletromagnético.

3.2.6. Caracterização das amostras utilizadas nos testes de vibração

As características físicas do sistema fruto-pedúnculo do café foram determinadas para as amostras coletadas (variedade Catuaí Vermelho), durante o período de colheita do café nas safras 2010 e 2011. Foram preparadas amostras de ramos plagiotrópicos de café com 0,05 m de comprimento contendo um fruto por pedúnculo nos estádios de maturação cereja e verde. O estágio de maturação foi determinado de forma visual.

Principais dimensões do sistema fruto-pedúnculo do café

As principais dimensões do sistema fruto-pedúnculo do café foram determinadas com base em imagens digitais adquiridas por meio de uma câmera digital CASIO, modelo Exilim EH20, com 9,1 megapixels de resolução. Na Figura 3.6 estão apresentadas imagens adquiridas para duas amostras de café utilizadas nos testes de vibração.



FIGURA 3.6 - Amostras dos ramos plagiotrópicos de café utilizadas para a determinação das características geométricas e para os testes de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café: (a) cereja e (b) verde.

As dimensões do sistema fruto-pedúnculo do café foram obtidas por meio de do programa computacional Autocad[®]. Foi utilizada uma malha de referência composta por papel milimetrado, disposto no fundo da imagem, a qual foi utilizada como referência para determinação das características geométricas. Distorções nas imagens foram verificadas visualmente observando o paralelismo entre as retas que compuseram a malha de referência.

As dimensões determinadas para o sistema fruto-pedúnculo do café: comprimento do fruto (C_f), diâmetro equatorial do fruto (D_e), comprimento do pedúnculo (C_p) e o diâmetro médio do pedúnculo (d). Os dados referentes às características geométricas tiveram suas médias comparadas, entre os estádios de maturação, por meio do teste t, a um nível de probabilidade de 5 %. Foram utilizadas 32 amostras de cada estágio de maturação para a safra de 2010 e 14 amostras na safra de 2011.

Massa específica do sistema fruto-pedúnculo do café

A massa média dos frutos amostrados foi determinada por meio de pesagem em uma balança de precisão com exatidão de 0,01 g. Foram pesadas 18 amostras, contendo 100 frutos cada, coletadas ao longo da safra de café para os estádios de maturação verde e cereja. O volume médio dos frutos foi determinado para as mesmas amostras de 100 frutos utilizando uma proveta graduada com graduação mínima de 0,5 mL, na qual os frutos foram imersos em água. Pelo volume deslocado estimou-se o volume dos frutos.

A massa específica média dos frutos do café foi determinada a partir da razão entre a massa média e o volume médio dos frutos para cada estágio de maturação, para a variedade Catuaí Vermelho, como apresentada pela Equação 3.16.

$$\rho = \frac{m_m}{v_m} \quad (3.16)$$

em que,

ρ = massa específica média dos frutos de café, kg m³;

m_m = massa média dos frutos de café, kg;

v_m = volume médio dos frutos de café, m³.

As médias da massa e do volume dos frutos foram comparadas entre os estágios de maturação verde e cereja por meio do teste t, com nível de significância de 1% de probabilidade.

3.3 - Resultados e Discussão

O decaimento da oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café quando submetido a um deslocamento inicial permite a determinação de parâmetros modais importantes ao entendimento do comportamento do sistema durante o processo de derriça. A utilização de vídeos de alta velocidade e processamento de imagens digitais permitiu a obtenção experimental de parâmetros tais como razão e coeficiente de amortecimento, período de oscilação não amortecida e a frequência natural amortecida e não amortecida.

3.3.1. Resultado do processamento dos vídeos de monitoramento da vibração

Os resultados obtidos por meio do processamento dos vídeos de decaimento da oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café foram similares para todas as taxas de amostragem trabalhadas bem como para os diferentes estágios de maturação.

As resoluções espaciais resultantes para as imagens foram de 0,16; 0,35 e

0,82 mm/pixel, para as taxas de aquisição de 210, 420 e 1000 Hz, respectivamente. Com base nesses valores, as amplitudes escolhidas para o cálculo do decremento logarítmico tinham valores superiores à resolução espacial para a respectiva taxa de amostragem, a fim de minimizar os erros envolvidos.

A banda do azul proporcionou o melhor realce dos pontos de interesse no processamento de segmentação por limiarização que, conseqüentemente obteve melhor condição para determinação dos centroides das regiões de interesse nas imagens, para ambos os estádios de maturação, visto que a quantidade de azul presente no fundo da imagem (cor preta) e no fruto (cores verde e vermelho) é pequena, quando comparadas às regiões de controle (cor branca).

Quando comparados o processamento das imagens entre as taxas de amostragem de vídeos trabalhadas, verificou-se que o limiar para segmentação das imagens variou entre as mesmas. Para altas taxas de amostragem, a quantidade de luz disponível influencia na qualidade final das imagens e no processo de segmentação. O pequeno tempo de exposição inerente ao imageador de alta velocidade demanda grandes intensidades de iluminação (THORODDSEN *et al.*, 2008). A taxa de amostragem de vídeo 1000 Hz resultou em imagens mais escuras.

Nas Figuras 3.7 e 3.8 estão apresentados os resultados do processamento para quatro quadros de um vídeo adquirido para o sistema fruto-pedúnculo do café, no estágio de maturação cereja e verde, respectivamente, para uma taxa de amostragem de 420 Hz. Nestas figuras estão apresentadas as imagens coloridas, as imagens na banda espectral do azul e as imagens binárias resultantes.

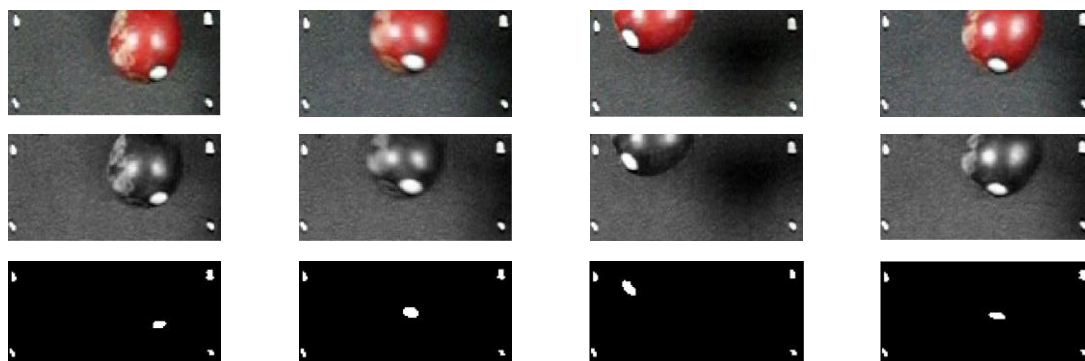


FIGURA 3.7 - Processo de segmentação das imagens para quatro cenas do vídeo do processo de decaimento da oscilação para o sistema fruto-pedúnculo do café no estágio de maturação verde.

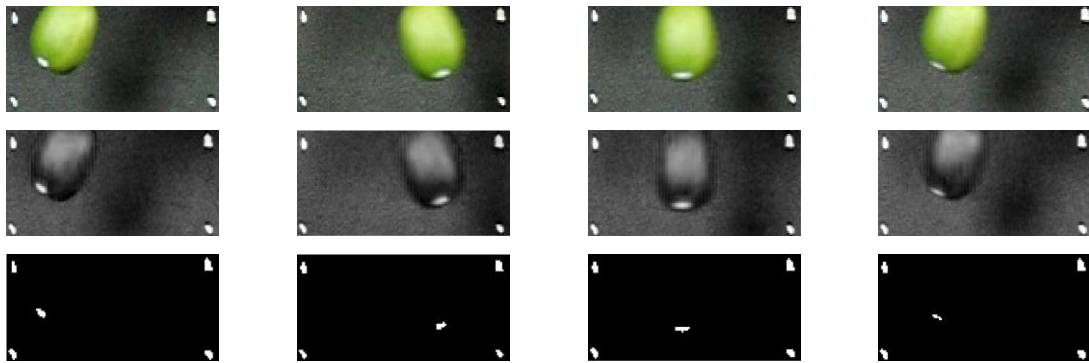


FIGURA 3.8 - Processo de segmentação das imagens para quatro cenas do vídeo do processo de decaimento da oscilação para o sistema fruto-pedúnculo do café no estágio de maturação verde.

Nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6 estão apresentadas as matrizes de confusão, para o estágio de maturação cereja, para as taxas de amostragem de vídeo de 210, 420 e 1000 Hz, respectivamente, nas quais estão apresentados os erros de omissão e inclusão, bem como a exatidão global do classificador utilizado na segmentação das imagens dos vídeos de decaimento da oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café. Para o estágio de maturação verde, as matrizes de confusão estão apresentadas nas Tabelas 3.7, 3.8 e 3.9.

TABELA 3.4 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estágio de maturação cereja e taxa de amostragem de vídeo de 210 Hz

Valor Estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Regiões de interesse	Fundo	
Regiões de interesse	56	10	15,15
Fundo	0	56	0
Erros de omissão (%)	0	15,15	Exatidão global (%) 91,80

TABELA 3.5 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estágio de maturação cereja e taxa de amostragem de vídeo de 420 Hz

Valor Estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Regiões de interesse	Fundo	
Regiões de interesse	56	8	12,50
Fundo	0	56	0
Erros de omissão (%)	0	12,50	Exatidão global (%) 93,33

TABELA 3.6 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estádio de maturação cereja e taxa de amostragem de vídeo de 1000 Hz

Valor Estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Regiões de interesse	Fundo	
Regiões de interesse	56	14	20
Fundo	0	56	0
Erros de omissão (%)	0	20	Exatidão global (%) 88,89

TABELA 3.7 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estádio de maturação verde e taxa de amostragem de vídeo de 210 Hz

Valor Estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Regiões de interesse	Fundo	
Regiões de interesse	56	4	6,67
Fundo	0	56	0
Erros de omissão (%)	0	6,67	Exatidão global (%) 96,55

TABELA 3.8 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estádio de maturação verde e taxa de amostragem de vídeo de 420 Hz

Valor Estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Regiões de interesse	Fundo	
Regiões de interesse	56	0	0
Fundo	0	56	0
Erros de omissão (%)	0	0	Exatidão global (%) 100

TABELA 3.9 - Matriz de confusão do processamento das imagens obtida para o estádio de maturação verde e taxa de amostragem de vídeo de 1000 Hz

Valor Estimado	Valor de referência		Erros de inclusão (%)
	Regiões de interesse	Fundo	
Regiões de interesse	56	2	3,45
Fundo	0	56	0
Erros de omissão (%)	0	3,45	Exatidão global (%) 98,26

A exatidão global observada, do classificador utilizado no processo de segmentação das imagens, para as taxas de amostragem trabalhadas e estádios de maturação foi considerada elevada. Os valores observados variaram entre 88,89 e 100%, entre as taxas de amostragem e os estádios de maturação estudados.

Observa-se nas Tabelas 3.4 a 3.9 que os erros de omissão das regiões de interesse foram nulos, isto mostra que a segmentação não omitiu a identificação de nenhuma região de interesse, porém alguns pixels de fundo foram confundidos como regiões de interesse, entretanto essas regiões consideradas como ruídos ou indesejáveis na segmentação, puderam ser eliminadas da análise de posição do fruto, através da utilização de filtros morfológicos ou pela atribuição dos ruídos como fundo. Como se trata de somente duas classes na matriz de confusão, anulou-se também os erros de inclusão, ou seja, aqueles pixels que foram incluídos como objetos de interesse e eram fundo. Desta maneira, pode-se considerar que a segmentação por limiarização possibilitou a adequada determinação do deslocamento do ponto de monitoramento, disposto no sistema fruto-pedúnculo do café, utilizando métodos simples de processamento de imagens.

Nas Figuras 3.9 e 3.10 estão apresentadas as curvas de decaimento da oscilação obtidas por meio dos vídeos de alta velocidade para uma das amostras no estádio de maturação cereja e uma amostra no estádio de maturação verde, nas taxas de amostragem trabalhadas (210, 420 e 1000 Hz), respectivamente.

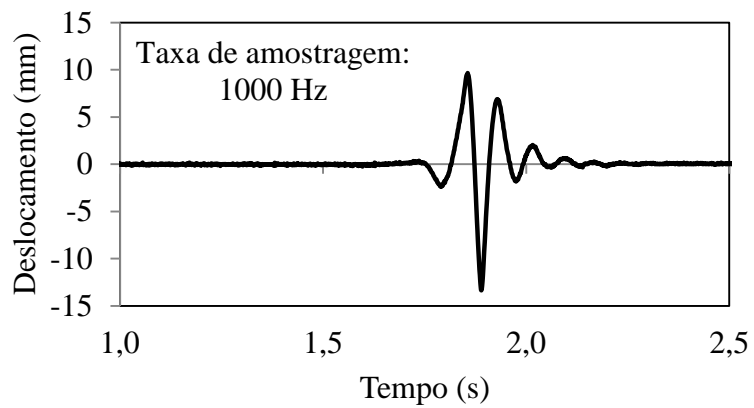
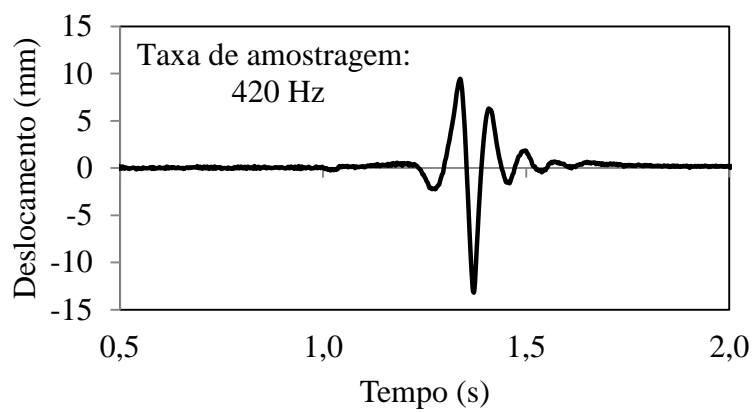
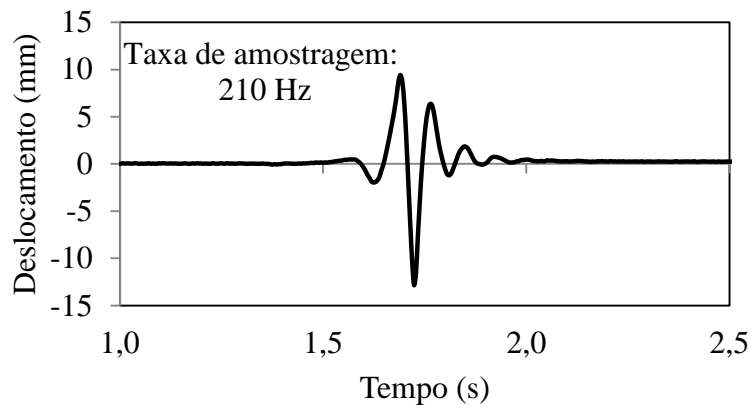


FIGURA 3.9 - Decaimento da oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café, estágio de maturação cereja, para as taxas de amostragem de vídeo de 210, 420 e 1000 Hz.

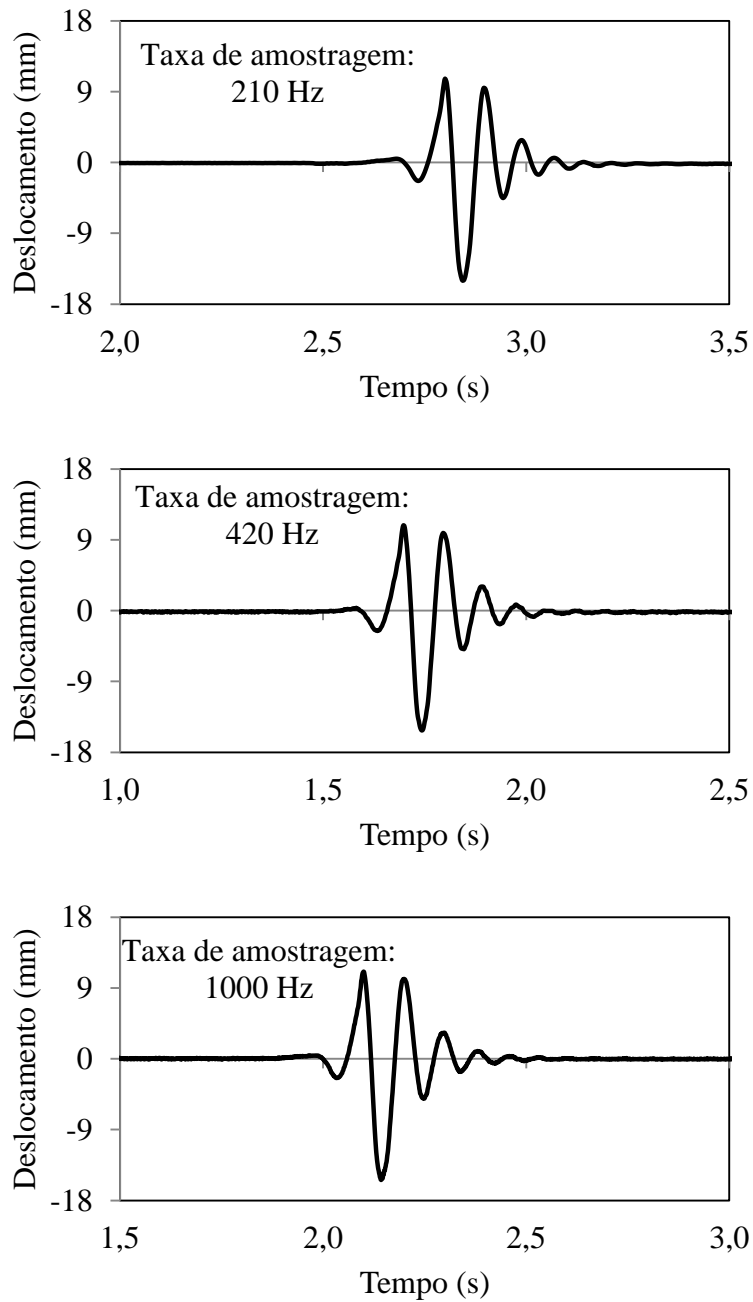


FIGURA 3.10 - Decaimento da oscilação do sistema fruto-pedúnculo do café, estágio de maturação verde, para as taxas de amostragem de vídeo de 210, 420 e 1000 Hz.

O deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café corrobora com a curva teórica de decaimento da oscilação para um sistema subamortecido, o que permitiu a determinação dos parâmetros modais, para os frutos de café cereja e verde. Nota-se também que, visualmente, não é possível verificar diferenças entre as curvas de decaimento, ao considerar as taxas de amostragens trabalhadas.

Verificou-se na safra de 2010 que algumas amostras tanto do estágio de maturação cereja quanto do estágio de maturação verde não apresentaram o decaimento da oscilação inerente de um sistema subamortecido. Tais amostras apresentaram deslocamento resultante coincidente ao deslocamento da base da máquina vibradora como exemplificado na Figura 3.11. Esse fato impossibilita a determinação dos parâmetros modais para essas amostras requerendo a utilização de câmeras com maior resolução para identificação do decaimento da oscilação nas condições trabalhadas na safra de 2010. A geometria do sistema fruto-pedúnculo do café, tal como o posicionamento do pedúnculo, também pode ter influenciado na resposta. Das 32 amostras estudadas para cada estágio de maturação, 17 amostras do estágio de maturação cereja e 25 amostras do estágio de maturação verde apresentaram esse comportamento.

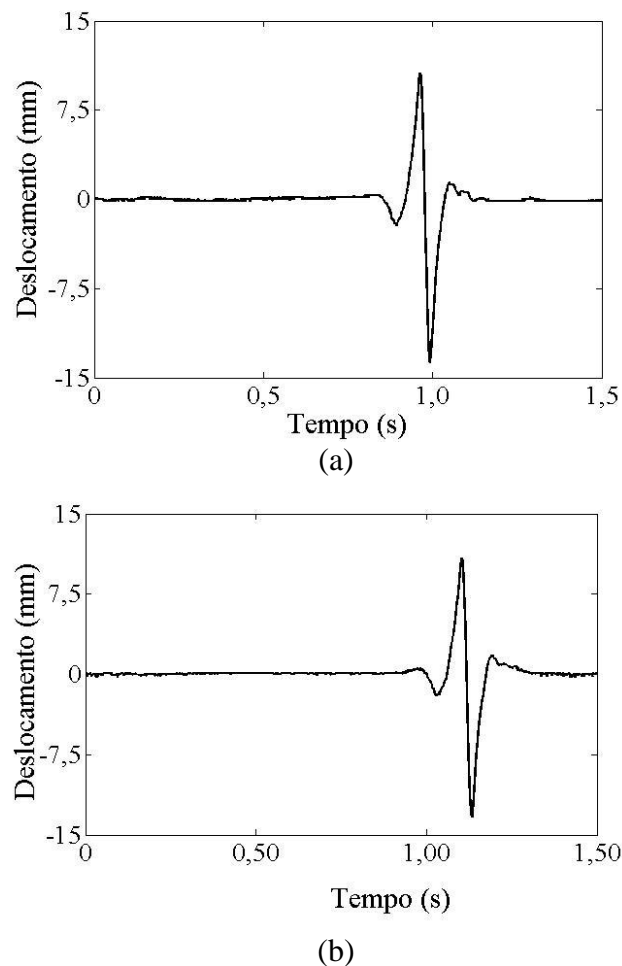


FIGURA 3.11 - Deslocamento resultante para amostras do sistema fruto-pedúnculo do café nos estádios de maturação (a) cereja e (b) verde com vibração coincidente ao base de excitação.

Para essas amostras não foi possível determinar os parâmetros modais, do mesmo modo, esse fato indicou a necessidade de se aumentar o pico de aceleração aplicado ao sistema fruto-pedúnculo do café para que o decremento da oscilação fosse visualizado. Foi aumentado em 50% o valor do pico de aceleração imposta durante a aplicação de um impulso.

3.3.2. Parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café

Na Tabela 3.10 estão sumarizadas as médias dos parâmetros modais determinadas para amostras do sistema fruto-pedúnculo do café, estádios de maturação verde e cereja, coletadas na safra de 2010. As propriedades físicas relacionadas estão apresentadas na Tabela 3.11. Ambos os estádios de maturação apresentaram a mesma faixa de ressonância, salientando a dificuldade na derriça seletiva dos frutos de café na faixa de trabalho da primeira frequência natural. Nota-se, exceto o coeficiente de amortecimento e rigidez equivalente do sistema, todos os parâmetros modais obtidos na safra 2010, não tiveram diferença significativa entre as médias, para os estádios de maturação cereja e verde.

TABELA 3.10 - Médias determinadas para os parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café, estádios de maturação cereja e verde (Safra de 2010)

Parâmetro	Estádio de Maturação				$t_{\text{calculado}}$
	Cereja		Verde		
	Média	DP	Média	DP	
Período de oscilação amortecida (s)	0,076	0,021	0,086	0,013	-0,77 ^{n.s.}
Razão de amortecimento	0,193	0,068	0,176	0,078	0,49 ^{n.s.}
Frequência natural amortecida (Hz)	16,01	3,307	14,20	2,873	1,32 ^{n.s.}
Frequência natural não-amortecida (Hz)	15,74	3,252	13,97	2,821	1,24 ^{n.s.}
Coefficiente de amortecimento (N s m ⁻¹)	0,053	0,021	0,032	0,011	2,56 ^{**}
Rigidez equivalente (N m ⁻¹)	14,40	5,473	8,32	3,271	2,86 ^{**}

H₀: $\mu_{\text{cereja}} = \mu_{\text{verde}}$ VS H₁: $\mu_{\text{cereja}} \neq \mu_{\text{verde}}$; ** - As médias diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade; ns - As médias não diferem entre si; $t_0(21) = 1,72074$; DP – desvio padrão.

TABELA 3.11 - Propriedades físicas determinadas para o sistema fruto-pedúnculo do café, estádios de maturação cereja e verde (Safrá 2010)

Propriedade	Estádio de Maturação				
	Cereja		Verde		$t_{\text{calculado}}$
	Média	DP	Média	DP	
Comprimento do fruto (mm)	17,19	1,19	15,40	1,21	5,78**
Diâmetro equatorial do fruto (mm)	13,77	0,93	11,95	1,07	7,28**
Comprimento do pedúnculo (mm)	4,38	1,22	6,00	1,32	-4,91**
Diâmetro do pedúnculo (mm)	2,52	0,22	2,45	10,32	1,44 ^{ns}
Massa (g)	1,22	0,06	0,94	0,25	13,02**
Volume (cm ³)	1,21	0,09	0,91	0,08	13,56**
Massa específica (g cm ⁻³)	1,01	-	1,03	-	-

H₀: $\mu_{\text{cereja}} = \mu_{\text{verde}}$ vs H₁: $\mu_{\text{cereja}} \neq \mu_{\text{verde}}$; ** - As médias diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade; ns - As médias não diferem entre si; $t_0(62) = 1,67$; DP – desvio padrão

A frequência natural do sistema fruto-pedúnculo do café, para a safra de 2010, não diferiu estatisticamente entre os estádios de maturação cereja e verde, respectivamente (Tabela 3.10). A frequência natural média foi de 14,86 Hz, o que indica que uma taxa de amostragem de 150 Hz seria adequada para monitorar o processo de vibração quando informações sobre a primeira frequência natural do sistema for requerida. Desta maneira, a menor taxa de amostragem da câmera utilizada no presente trabalho, igual a 210 Hz, poderia ser utilizada sem a ocorrência de *aliasing* e com detecção da forma da onda adequadamente.

Os resultados obtidos para as amostras coletadas na safra de 2011, em que foram avaliadas as propriedades modais nas taxas de 210, 420 e 1000 Hz, para os estádios de maturação cereja e verde, estão apresentados a seguir. Por meio da análise de variância (Tabelas 3.12 e 3.13) foi possível verificar que não houve diferença entre as médias dos parâmetros modais entre as taxas de amostragem de vídeo, para ambos os estádios de maturação, indicando que ambas poderiam ser utilizadas durante os testes. Visto que a taxa de amostragem não teve influência sobre os parâmetros modais determinados, por meio das curvas de decaimento da oscilação, compararam-se as médias entre os estádios de maturação para todas as repetições realizadas.

TABELA 3.12 - Resultado do teste F para os parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café para verificar a influência da taxa de amostragem de vídeo, estádio de maturação cereja (Safrade 2011)

Parâmetro vibracional	Quadrado médio	F calculado	P-valor
Período de oscilação amortecida (s)	0,00002	0,084	0,9197
Razão de amortecimento	0,00090	0,261	0,7715
Frequência natural amortecida (Hz)	1,28361	0,252	0,7788
Frequência natural não-amortecida (Hz)	0,14292	0,033	0,9679
Coefficiente de amortecimento (N s m ⁻¹)	0,00001	0,070	0,9323
Rigidez (N m ⁻¹)	0,00576	0,567	0,7234

TABELA 3.13 - Resultado do teste F para os parâmetros vibracionais do sistema fruto-pedúnculo do café para verificar a influência da taxa de amostragem de vídeo, estádio de maturação verde (Safrade 2011)

Parâmetro vibracional	Quadrado médio	F calculado	P-valor
Período de oscilação amortecida (s)	0,00003	0,210	0,8111
Razão de amortecimento	0,00244	0,755	0,4765
Frequência natural amortecida (Hz)	1,28361	0,252	0,7788
Frequência natural não-amortecida (Hz)	1,58397	0,304	0,7398
Coefficiente de amortecimento (N s m ⁻¹)	0,00006	0,576	0,5664
Rigidez (N m ⁻¹)	0,00786	0,456	0,6967

Na Tabela 3.14 estão apresentadas as médias dos parâmetros modais determinadas para amostras do sistema fruto-pedúnculo do café, estádios de maturação verde e cereja, coletadas na safra de 2011. Na Tabela 3.15 estão apresentadas as propriedades físicas referentes às amostras. Nota-se, pelo teste t, que somente o coeficiente de amortecimento não apresentou diferença significativa entre as médias. É verificada, para a safra de 2011, novamente uma sobreposição das frequências naturais determinadas.

TABELA 3.14 - Médias determinadas para os parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café, estádios de maturação cereja e verde (Safrá de 2011)

Parâmetro	Estádio de Maturação				
	Cereja		Verde		$t_{\text{calculado}}$
	Média	DP	Média	DP	
Período de oscilação amortecida (s)	0,088	0,016	0,076	0,012	3,70**
Razão de amortecimento	0,126	0,058	0,149	0,055	-2,23**
Frequência natural amortecida (Hz)	11,74	2,059	13,45	2,219	-3,46**
Frequência natural não-amortecida (Hz)	11,62	2,037	13,29	2,247	-3,36**
Coefficiente de amortecimento (N s m ⁻¹)	0,029	0,015	0,025	0,009	1,62 ^{ns}
Rigidez equivalente (N/m)	8,611	3,403	7,087	2,419	2,35**

H₀: $\mu_{\text{cereja}} = \mu_{\text{verde}}$ vs H₁: $\mu_{\text{cereja}} \neq \mu_{\text{verde}}$; ** - As médias diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade; ns - As médias não diferem entre si; $t_0(80) = 1,72$; DP - desvio padrão

TABELA 3.15 - Propriedades físicas determinadas para o sistema fruto-pedúnculo do café, estádio de maturação cereja e verde (Safrá 2011)

Propriedade	Estádio de Maturação				
	Cereja		Verde		$t_{\text{calculado}}$
	Média	DP	Média	DP	
Comprimento do fruto (mm)	16,93	1,08	15,49	1,27	3,30**
Diâmetro equatorial do fruto (mm)	15,00	0,08	12,10	1,04	8,27**
Comprimento do pedúnculo (mm)	6,25	1,19	6,63	1,61	-0,73 ^{ns}
Diâmetro do pedúnculo (mm)	2,81	0,48	2,08	0,80	2,97**
Massa (g)	1,57	0,23	1,04	0,23	6,04**

H₀: $\mu_{\text{cereja}} = \mu_{\text{verde}}$ vs H₁: $\mu_{\text{cereja}} \neq \mu_{\text{verde}}$; ** - As médias diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade; ns - As médias não diferem entre si; $t_0(26) = 1,71$; DP - desvio padrão

A razão de amortecimento do sistema fruto-pedúnculo do café foi igual a 0,193 e 0,176; para safra 2010 (Tabela 3.10); e 0,126 e 0,149; para a safra 2011 (Tabela 3.15); para os estádios de maturação cereja e verde, respectivamente. Dentre os valores obtidos para a razão de amortecimento nota-se que o sistema fruto-pedúnculo do café comporta-se como um sistema subamortecido, ou seja, $0 < \zeta < 1$ (RAO, 2008), como é observado para a maior parte dos sistemas na natureza.

A frequência natural determinada foi maior para o estádio de maturação verde do que para o estádio de maturação cereja, sendo de 11,62 e 13,29 Hz, respectivamente. Para as amostras da Safra 2011, não foi verificada diferença entre o comprimento do pedúnculo entre os estádios de maturação, o que pode ter contribuído para essa pequena diferença. Na safra de 2010, a frequência natural do fruto cereja foi de 15,74 Hz evidenciando a sobreposição de faixas de ressonância entre os estádios de maturação do sistema fruto-pedúnculo do café.

A sobreposição de faixas de ressonância entre os estádios de maturação foi observada por Ciro (2001) ao considerar o sistema com apenas um grau de liberdade e representado por uma viga com uma massa na extremidade. Visto que a diferença entre as médias da frequência natural para os estádios de maturação cereja e verde é muito pequena a realização da derriça com seletividade utilizando essa faixa de trabalho torna-se mais difícil.

Máquinas e dispositivos de derriça de café trabalhando com uma varredura de frequências poderiam realizar a operação com maior eficiência quando o objetivo for a realização da colheita em uma única etapa. Com a varredura dos valores de frequência a ressonância do sistema fruto-pedúnculo do café seria atingida para ambos os estádios de maturação e para distintas características físicas e geométricas.

Santos (2008) estimou por meio da utilização do método de elementos finitos, valores para a primeira frequência natural iguais a 23,21 e 19,86 Hz, para os graus de maturação verde e cereja, respectivamente, para a variedade Catuai Vermelho. Tais valores são mais elevados do que os encontrados nos testes experimentais, para a mesma variedade do café.

Para outras variedades, valores determinadas por meio de modelos matemáticos ficaram na faixa de 17 a 21 Hz para a variedade Caturra vermelho (RODRIGUEZ, 2007). Espinosa (2008) estimou a primeira frequência natural do sistema fruto pedúnculo do café, para a variedade Caturra amarelo e estádio de maturação cereja, como 15,86 Hz. O valor foi estimado utilizando o método de elementos finitos e ficou próximo ao encontrado nos testes realizados na safra de 2010 do presente trabalho.

Na maioria dos modelos matemáticos o material constituinte do pedúnculo do café é considerado isotrópico, todavia realisticamente o material não é. Anisotropia do material e os efeitos viscoelásticos do sistema fruto-pedúnculo podem contribuir para uma alta variação nas características de rigidez do sistema (CIRO, 2001) e consequentemente nos valores observados para as frequências naturais.

Propriedades geométricas influenciam a rigidez do pedúnculo do café visto que a mesma é função do momento de inércia da seção transversal e do comprimento do mesmo, e do módulo de elasticidade do material. Amostras com maiores comprimentos e menores diâmetros do pedúnculo apresentam menor rigidez e desta forma menores

valores para a frequência natural. Tais propriedades variam ano a ano, com a variedade, estágio de maturação, com a localização e idade do cafeeiro.

Na safra de 2010, coeficiente de amortecimento foi de 0,053 e 0,032 N s m⁻¹ para os estádios de maturação cereja e verde, respectivamente (Tabela 3.10), implicando uma maior dissipação de energia devido ao amortecimento para o estágio de maturação cereja. Esse fato não foi observado para a safra de 2011, em que não houve diferença significativa entre as médias do coeficiente de amortecimento, obtido para os estádios de maturação cereja e verde (Tabela 3.14), sendo a média geral igual a 0,027 N s m⁻¹.

Já a rigidez equivalente do sistema fruto-pedúnculo do café foi maior para o estágio de maturação cereja para as safras de 2010 e 2011. A rigidez torna-se maior com o incremento da frequência natural e da massa. A massa dos frutos cereja foi maior para ambas as safras o que pode ter contribuído para esse fato.

3.4. Conclusões

Com o presente trabalho concluiu-se que:

- A utilização de vídeos de alta velocidade e técnicas de processamento de imagens digitais permitiu a determinação dos parâmetros vibracionais do sistema fruto-pedúnculo do café de forma simples e satisfatória;

- Quaisquer das taxas de amostragem, na faixa de 210 a 1000 Hz, associadas às resoluções espaciais obtidas, proporcionaram a determinação dos deslocamentos resultantes do sistema fruto-pedúnculo satisfatoriamente, para a primeira frequência natural;

- Houve uma sobreposição de faixas de ressonância, entre os estádios de maturação cereja e verde, dificultando a derriça mecânica seletiva na faixa da primeira frequência natural do sistema fruto-pedúnculo do café;

- As características geométricas, tal como o comprimento do pedúnculo, influenciam o valor da frequência natural, sendo que maiores pedúnculos facilitam a derriça em uma só etapa, pois com uma menor rigidez as máquinas de colheita poderiam trabalhar a menores frequências.

3.5. Referências Bibliográficas

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

BEARDS, C. E. **Structural Vibration: Analysis and Damping**. First edition. Burlington: Butterworth-Heinemann, 1996, 276 p.

BEATTY, M. F. **Principles of Engineering Mechanics: Dynamics - The Analysis of Motion**. First edition. Birkhäuser, v. 2, 2006, 617 p.

BRANDT, A. **Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures**. First edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 2011, 464p.

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

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, n. 37, p. 35 - 46, 1991.

DIMAROGONAS, A. D.; HADDAD, S. **Vibration for Engineers**. Prentice Hall, 1992, 749 p.

DU, X.; CHEN, D.; ZHANG, Q.; SCHARF, P. A. WHITING, M. D. Dynamic responses of sweet cherry trees under vibratory excitations. **Biosystems Engineering**, v. 3, p. 305-314, 2012.

ESPINOSA, B. G.; RODRÍGUEZ, A. M.; GUERRA, O. L. Búsqueda de modos de vibración apropiados para la cosecha selectiva del café. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2007.

ESPINOSA, B. G.; RODRÍGUEZ, A. M.; GUERRA, O. L.; GUTIÉRREZ, R. Ensayo de un modo de vibración en contrafase del sistema fruto-pedúnculo para la cosecha selectiva del café. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 17, n. 1, p. 1-7, 2008.

GONZALEZ R.; WOODS, R. **Processamento de Imagens Digitais**, São Paulo: Edgard Blücher, 2000, 509 p.

HARRIS, C. M.; PIERSOL, A. G. **Harris' Shock and Vibration Handbook**. Fifth edition. New York: McGraw-Hill, 2002, 1168 p.

HELFRICK, M. N.; NIEZRECKI, C.; AVITABILE, P.; SCHMIDT, T. 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, p. 917–927, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Área, produção e rendimento**. Confronto das Safras de 2011 e das Estimativas para 2012. Disponível

em<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201202_5.shtm>. Acesso em 14 de março de 2012.

JAMES, K. R., HARITOS, N., ADES, P. K. Mechanical stability of trees under dynamic loads. **American Journal of Botany**, n. 93, v. 10, p. 1522–1530, 2006.

JONSSON, M. J., FOETZKI, A., KALBERER, M., LUNDSTRÖM, T., AMMANN, W., STÖCKLI, V. Natural frequencies and damping ratios of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growing on subalpine forested slopes. **Trees**, n. 21, p. 541–548. 2007.

KOHAVI, R.; PROVOST, F. Glossary of Terms: Special Issue on Applications of Machine Learning and the Knowledge Discovery Process. **Machine Learning**, v. 30, p. 271-274, 1998.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986, 841 p.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Aliasing and sampling at frequencies above the Nyquist frequency**, NI Documentation 2006. Disponível em:<<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3000>>. Acesso em 08 de abril de 2012.

NAYYERLOO, M.; CHEN, X. Q.; CHASE, J. G.; MALHERBE, A.; MACRAE, G. A. Seismic structural displacement measurement using a high-speed line-scan camera: experimental validation. In: 2010 NZSEE Conference, 2010, Wellington City **Proceedings...** Wellington City, 2010, p. 1-9.

OGATA, K. **System Dynamics**. Second Edition. New Jersey: Prentice-Hall, 1992, 712p.

QIN, X.; WANG, S.; WAN, M. Improving Reliability and Accuracy of Vibration Parameters of Vocal Folds Based on High-Speed Video and Electroglottography. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 56, n. 6, 2009.

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

RODRÍGUEZ, A. M.; ESPINOSA, B. G.; GUERRA, O. L. Cálculo de la amplitud de la excitación requerida para la cosecha selectiva del café por vibración. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v. 16, n. 2, p. 1-6, 2007.

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

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

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

SIEBERT, T.; CROMPTON, M. J. Application of High Speed Digital Image Correlation for Vibration Mode Shape Analysis. In: SEM Annual Conference, 2010, Indianapolis. **Proceedings...** Indianapolis, 2010, p. 1-8.

SOUZA, C. M. A.; QUEIROZ, D. M.; RAFULL, L. Z. L.; CECON, P. R. Comparação entre derrça manual e mecânica de frutos de cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 53, n. 305, p. 39-43, 2006.

THORODDSEN, S. T.; ETOH, T. G. TAKEHARA, K. High-Speed Imaging of Drops and Bubbles. **Annual Review of Fluid Mechanics**. n. 40, p. 257-85, 2008.

CAPÍTULO 4 - DETERMINAÇÃO DA TRANSMISSIBILIDADE DE VIBRAÇÃO NO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO DO CAFÉ SUBMETIDO À VIBRAÇÃO FORÇADA

4.1. Introdução

O café é um dos produtos mais importantes da agricultura brasileira, sendo o Brasil o maior produtor mundial, cuja safra no ano de 2011 foi de 2,7 milhões de toneladas. O estado brasileiro com maior produção é Minas Gerais seguido do Espírito Santo, com 51,9 e 25,4% das áreas cafeeiras do país (IBGE, 2012). Devido ao número elevado de operações durante o ciclo produtivo do café o valor final os custos finais são elevados.

A colheita dos frutos de café pode ser realizada de forma manual e mecânica, nesta última sendo a derriça uma das etapas mais difíceis de ser realizada. Mecanicamente, a derriça dos frutos de café combina a transferência de energia vibracional e de impacto para realização do desprendimento dos frutos de café. A transferência de energia vibracional para o sistema fruto-pedúnculo depende de combinações adequadas entre frequência e amplitude de vibração de forma a realizar a derriça com eficiência e seletividade.

Um dos complicadores para a derriça individualizada dos frutos maduros é a desuniformidade de maturação altamente pronunciada nas plantas de café o que, além de interferir na escolha do momento ideal de iniciar a colheita (SILVA *et al.*, 2009), torna mais difícil definir combinações entre frequência e amplitude de vibração imposta a ser pelas colhedoras.

A identificação de parâmetros mecânicos relativos à planta de café é de suma importância para a concepção de novos dispositivos utilizados para a derriça, bem como, para atingir melhor desempenho operacional pelas colhedoras. Alguns parâmetros vêm sendo estudados, como exemplo a força axial de desprendimento dos frutos (SILVA *et al.*, 2010). Este parâmetro tem sido determinado e estudado em outras culturas que são colhidas por meio de vibrações mecânicas, dentre as quais se destacam a uva (GOMES & FERRAZ, 2011), a noz de pistache (POLAT *et al.*, 2011) e a laranja (SAVARY *et al.*, 2011).

Entretanto, quando a planta é submetida à vibração forçada, a resposta do sistema fruto-pedúnculo do café, devido aos esforços dinâmicos, torna-se mais complexa. Logo, outros fatores, além da força de desprendimento, são influentes e necessários para a compreensão do comportamento dinâmico do sistema. A transmissibilidade de vibração é um parâmetro que pode ajudar no entendimento do comportamento do sistema e indicar faixas de trabalho favoráveis à seletividade dos frutos.

A transmissibilidade de vibração foi estudada por Pezzy & Caprara (2009), para a cultura de uva, por meio de medições das acelerações resultantes diretamente nas plantas. Os autores avaliaram o efeito da frequência das hastes batedoras de uma colhedora de uva a fim de estudar a interação máquina-planta. Savary *et al.* (2011) avaliaram a distribuição da aceleração nos galhos e nos frutos de árvores de laranja, em condições de campo, durante a operação de colheita. Em ambos os experimentos supracitados foram empregados acelerômetros, dispostos ao longo dos galhos da planta em estudo, para determinação das acelerações incidentes.

É escassa a disponibilidade de informações a respeito da transmissibilidade de vibrações entre os dispositivos de derriça e a planta, principalmente quando o objetivo é estudar a resposta do sistema fruto-pedúnculo do café individualmente. A avaliação de acelerações e deslocamentos *in loco* é circundada por vários complicadores, como a dificuldade na instalação de transdutores diretamente no sistema em questão. A utilização de acelerômetros pode gerar um acréscimo de massa ao sistema a ser estudado interferindo na sua resposta dinâmica quando submetido à vibração (HELFRICK *et al.*, 2011).

A utilização de vídeos de alta velocidade aliada às técnicas de processamento de imagens digitais é uma ferramenta poderosa para determinação de características vibracionais em diferentes sistemas mecânicos e, também, na área da saúde. O uso de câmeras de alta velocidade oferece uma alternativa para a determinação de deslocamentos com acurácia em eventos harmônicos e transientes (SIEBERT & CROMPTON, 2010).

A aplicabilidade de vídeos de alta velocidade para identificação de características modais em sistemas mecânicos foi verificada por Jeon *et al.* (2010). Os autores determinaram os modos de vibração de estruturas por meio da utilização de

câmeras digitais obtendo respostas próximas às soluções analíticas. Os autores enfatizam que é possível estimar deslocamentos em altas frequências sem muitos erros por meio da utilização de câmeras equipadas com alta resolução e com elevada taxa de aquisição de quadros por segundo.

Desta forma, a utilização de câmeras de alta velocidade pode possibilitar a determinação da transmissibilidade de vibração ao sistema fruto-pedúnculo do café durante a operação de derriça. Adicionalmente, a utilização desse tipo de equipamento permite o estudo do comportamento dinâmico do sistema sem a existência de contato direto entre o elemento sensor e o sistema a ser estudado, bem como, o monitoramento de múltiplos pontos ao mesmo tempo.

A hipótese que precede o presente trabalho é fundamentada na possibilidade de se estudar a transmissibilidade de vibração entre os dispositivos de derriça e o sistema fruto-pedúnculo de café por meio da utilização de câmeras digitais de alta velocidade e técnicas de processamento de imagens. Portanto, objetivou-se avaliar a transmissibilidade de vibração no sistema fruto-pedúnculo do café submetido à excitação harmônica, em diferentes combinações entre frequência e amplitude de vibração, identificando faixas de trabalho favoráveis à derriça seletiva.

4.2. Material e Métodos

Os ensaios para determinação da transmissibilidade de vibração e a das propriedades físicas, geométricas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo do café foram conduzidos no Laboratório de Mecanização Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Foram utilizadas amostras de café variedade Catuaí Vermelho, coletadas em área experimental localizada no campus da UFV, as quais foram utilizadas tanto para os ensaios de vibração como também para obtenção das características físicas, geométricas e mecânicas.

Os ensaios laboratoriais foram realizados para a determinação da transmissibilidade de vibração entre um vibrador eletromagnético e o sistema fruto-pedúnculo do café, excitado harmonicamente, em diferentes combinações de

frequências e amplitudes de entrada. Foram utilizadas amostras de café nos estádios de maturação cereja e verde, classificadas visualmente.

4.2.1. Determinação da transmissibilidade de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café

A transmissibilidade de vibração é definida como a razão entre a amplitude da resposta e a do movimento da entrada (RAO, 2008). Neste trabalho a transmissibilidade foi determinada comparando-se o deslocamento do eixo da máquina vibradora e o deslocamento da extremidade livre do fruto de café.

Para a determinação dos deslocamentos de saída na extremidade livre do fruto de café, esperou-se o sistema entrar em regime permanente após o início da aplicação da excitação harmônica, ou seja, para eliminar as influências dos efeitos transitórios na determinação das amplitudes de saída. A transmissibilidade de vibração foi verificada na direção transversal ao movimento da base da máquina vibradora (T_x) e na direção do deslocamento de entrada (T_y), as quais são relativas aos eixos de referência x e y, respectivamente (Equações 4.1 e 4.2).

$$T_x = \frac{X_s}{Y_e} \quad (4.1)$$

$$T_y = \frac{Y_s}{Y_e} \quad (4.2)$$

em que,

T_x = transmissibilidade de deslocamento na direção x de referência;

T_y = transmissibilidade de deslocamento na direção y de referência;

X_s = deslocamento da extremidade livre do fruto de café na direção x, (mm);

Y_s = deslocamento da extremidade livre do fruto de café na direção y, (mm);

Y_e = deslocamento de entrada na base vibradora, (mm).

A transmissibilidade de vibração foi determinada para o sistema fruto-pedúnculo do café, nos estádios de maturação cereja e verde, submetido a um deslocamento

harmônico senoidal, sendo os parâmetros de entrada a frequência e a amplitude de vibração. Os ensaios de vibração foram realizados em dois experimentos distintos cujas faixas de frequência e amplitudes trabalhadas foram variadas, conforme apresentado na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Descrição das faixas de frequência e amplitude trabalhadas para determinação da transmissibilidade de vibração no sistema fruto-pedúnculo do café

Parâmetros de entrada	Experimento 1	Experimento 2
Frequência (Hz)	13,33; 20,00 e 26,67 Hz	35,00; 45,00 e 55,00 Hz
Amplitude (mm)	5,0; 10,0 e 15,0 mm	3,5; 5,0 e 6,5 mm

As faixas de trabalho para a avaliação da transmissibilidade de vibração foram escolhidas com base nos trabalhos realizados por Santos (2008) e Guedes (2011) para avaliar a eficiência de derriça dos frutos de café. No Experimento 1 foram empregadas faixas de frequências e amplitudes dos dispositivos comerciais utilizadas para a derriça dos frutos de café. Para o Experimento 2, utilizou-se frequências mais elevadas associadas à amplitudes reduzidas a fim de aumentar o número de ciclos de carregamento imposto ao sistema.

A energia de entrada por ciclo de vibração, controlada pelo vibrador eletromagnético, em que o sistema fruto-pedúnculo do café foi submetido está apresentada na Tabela 4.2, para todas as combinações entre frequência e amplitude de vibração. A quantidade de energia transferida ao sistema fruto-pedúnculo do café depende das características de amortecimento dos subsistemas constituintes e da transmissibilidade de vibração.

TABELA 4.2 - Energia por ciclo de entrada imposta ao sistema fruto-pedúnculo do café durante os ensaios de vibração para cada combinação entre frequência e amplitude de vibração

Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Energia (J kg ⁻¹)	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Energia (J kg ⁻¹)
13,33	5,00	0,1754	35,00	3,50	0,5924
13,33	10,00	0,7015	35,00	5,00	1,2090
13,33	15,00	1,5783	35,00	6,50	2,0433
20,00	5,00	0,3948	45,00	3,50	0,9793
20,00	10,00	1,5791	45,00	5,00	1,9986
20,00	15,00	3,5531	45,00	6,50	3,3776
26,67	5,00	0,7020	55,00	3,50	1,4629
26,67	10,00	2,8081	55,00	5,00	2,9856
26,67	15,00	6,3181	55,00	6,50	5,0456

Amostras de ramos plagiotrópico de café, com 0,05 m de comprimento e contendo apenas um fruto por pedúnculo, foram engastadas à base móvel de um vibrador eletromagnético e submetidas a um deslocamento harmônico senoidal (Equação 4.3), cujos parâmetros frequência e amplitude de vibração foram configurados por meio do programa proprietário do sistema.

$$Y(t) = A \sin(\omega t) \quad (4.3)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (4.4)$$

em que,

$Y(t)$ = deslocamento harmônico imposto pela base do sistema vibrador, mm;

t = tempo, s;

A = amplitude de vibração pico a pico, mm;

ω = frequência angular de vibração, rad s⁻¹;

f = frequência linear de vibração, Hz.

Foi utilizado um vibrador eletromagnético da marca LDS (*Ling Dynamic Systems*), composto por um gerador de sinais COMET_{USB}, um amplificador de sinais PA100E-CE e uma máquina vibradora, modelo V406. As principais características técnicas do sistema de vibração completo estão sumarizadas na Tabela 4.3. Foi utilizado um transdutor piezoelétrico para monitorar a aceleração imposta pela base móvel do vibrador eletromagnético, marca PCB, modelo 353B33, faixa de operação de 1 a 4 kHz.

TABELA 4.3 - Principais características técnicas do vibrador eletromagnético utilizado nos testes de vibração

Faixa dinâmica de trabalho (Hz)	5 – 9000
Carga máxima (N)	198
Deslocamento máximo da base móvel (mm)	17,6
Aceleração máxima (G)	100

O deslocamento ao longo do tempo, da extremidade livre do fruto de café, foi monitorado por meio de vídeos de alta velocidade durante a aplicação da excitação harmônica. Foi utilizada uma câmera digital da marca Casio, modelo Exilim EX-FH20, com capacidade de captura de vídeos nas taxas de amostragem de 210; 420 e 1000 Hz com respectivas resoluções 480 x 168; 224 x 168 e 224 x 80 pixel x pixel. A iluminação foi mantida constante durante a aquisição de todos os vídeos.

A configuração do sistema fruto-pedúnculo do café durante os ensaios de vibração, os eixos de referência empregados, a direção do deslocamento e o posicionamento da câmera estão representados na Figura 4.1.

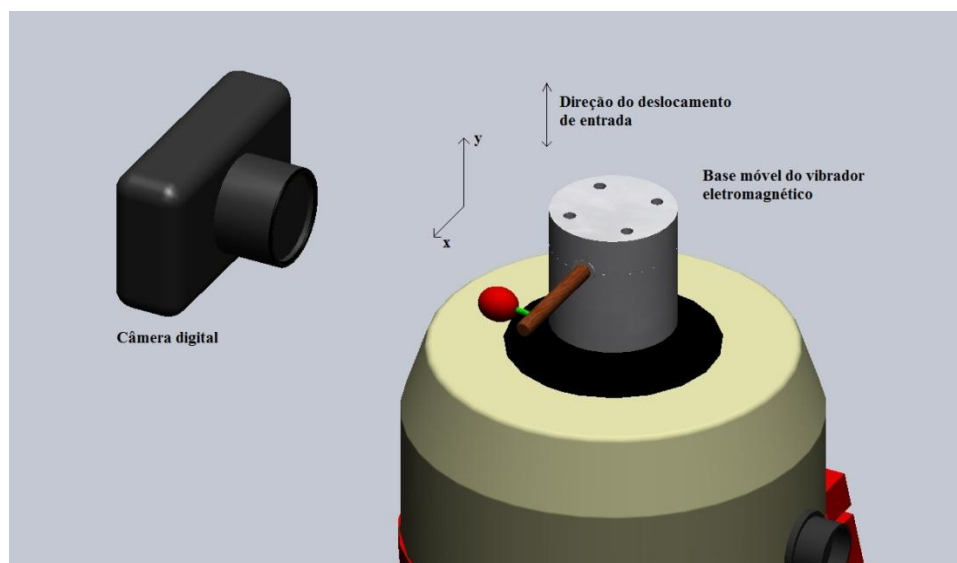


FIGURA 4.1 - Representação esquemática do sistema fruto-pedúnculo do café engastado a máquina vibradora, eixos de referência e a direção do deslocamento de entrada.

As taxas de amostragem de vídeo utilizadas foram escolhidas tomando como referência o teorema de Nyquist, o qual estabelece que a mesma deva ser pelo menos duas vezes a maior frequência contida no sinal (BRANDT, 2011). Embora uma

amostragem de duas vezes, assegure uma medição correta da frequência do sinal, não é suficiente para capturar a forma da onda. Quando a forma da onda é desejável a taxa de amostragem deve ser de aproximadamente 10 vezes a frequência de contida no sinal (NATIONAL INSTRUMENTS, 2006). Na Tabela 4.4 estão apresentadas as taxas de amostragem de vídeos utilizadas para cada frequência de vibração imposta ao sistema fruto-pedúnculo do café durante os ensaios de vibração.

TABELA 4.4 - Taxas de amostragens empregadas durante os ensaios, determinadas a partir do teorema de Nyquist, para o monitoramento das máximas frequências avaliadas

Excitação (Hz)	Taxa de amostragem (Hz)
13,33 e 20,00	210,00
26,67 e 35,00	420,00
45,00 e 55,00	1000,00

Um fundo de imagem, na cor preta, foi utilizado para prover informações necessárias para estimativas do deslocamento do sistema fruto-pedúnculo do café em coordenadas métricas composto por quatro regiões de controle de coordenadas conhecidas na cor branca. Uma região de monitoramento foi definida na extremidade livre do fruto de café e destacada com tinta branca. Para o processamento dos vídeos adquiridos durante os ensaios de vibração foi utilizada uma rotina elaborada no programa computacional MATLAB[®] no qual se utilizou o caixa de ferramentas específica para processamento de imagens.

Os vídeos originais foram compostos por uma sequência de imagens coloridas (RGB), com resolução dependente da taxa de amostragem de vídeo utilizada. Antes do processo de segmentação dos pontos de interesse, tomando como base a primeira imagem, definiu uma região para recortar a borda que não era de interesse no processamento. A segmentação foi realizada por meio de simples operação de limiarização (GONZALEZ & WOODS, 2000), que consistiu em definir um nível de cinza, em uma determinada banda, para segmentar os pontos de monitoramento e de referência, do resto da imagem. O limiar de segmentação determinado manualmente em função da primeira imagem foi utilizado em todas as imagens gerando uma a sequência de imagens binárias.

Identificaram-se todos os objetos presentes na imagem binária tais como os pontos de controle e monitoramento; e pontos ruídos identificados por sua área e centroide. Objetos ruídos, com área de influência menor que as áreas das regiões de

interesse, foram eliminados pela remoção do objeto ou pela sua atribuição como fundo, de forma manual. Após a eliminação dos ruídos, foi determinada uma matriz com resultados composta pelas coordenadas, em pixel, de cada objeto de interesse. Uma transformação de coordenadas foi realizada entre os pontos de controle e de monitoramento, com base nas equações propostas por Segerlind (1984) para determinação dos deslocamentos da extremidade livre do fruto, em milímetros. Os deslocamentos resultantes do sistema fruto-pedúnculo do café possibilitaram avaliar o modo de vibração predominante durante o movimento do sistema. O processamento detalhado foi apresentado no Capítulo 3 do presente trabalho.

4.2.2. Delineamento experimental e análise dos dados

Foram conduzidos dois experimentos, com frequências e amplitudes distintas, conforme apresentado na Tabela 4.1. Para ambos os experimentos, foram empregados delineamentos inteiramente casualizados, em esquema fatorial 3 x 3 x 2 (frequências de vibração x amplitudes de vibração x estádios de maturação), com três repetições, totalizando 54 unidades experimentais para cada. Estudou-se o efeito dos fatores frequência e amplitude de vibração sobre a transmissibilidade de vibração nas direções x e y (T_x e T_y) no sistema fruto pedúnculo.

Inicialmente, foi realizada uma análise de variância para cada experimento avaliando todos os fatores de entrada em conjunto (frequência de vibração, amplitude de vibração e estágio de maturação) e, posteriormente, considerando o efeito dos fatores frequência e amplitude de vibração em cada estágio de maturação individualmente.

A transmissibilidade de vibração, para cada estágio de maturação, foi estudada por meio de análise de regressão, considerando os fatores frequência e amplitude de vibração. Os modelos ajustados foram escolhidos com base na significância dos parâmetros estimados, verificada por meio do teste estatístico t. Foi definido um nível de significância de 10% em todas as análises, contemplando a variabilidade acentuada inerente da cultura do café. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando-se programa computacional SAS, versão 9.0.

Os deslocamentos resultantes foram avaliados qualitativamente em função do padrão observado para as faixas trabalhadas de frequência e amplitude de vibração.

Buscou-se relacionar o movimento de saída na extremidade livre do fruto de café com modos de vibração e suas respectivas frequências naturais, encontradas na literatura.

4.2.3. Determinação das propriedades físicas do sistema fruto-pedúnculo do café

As características físicas do sistema fruto-pedúnculo do café foram determinadas para amostras escolhidas de forma aleatória na área experimental. A coleta foi realizada no terço médio da planta de café durante o período de colheita, considerando os estádios de maturação verde e cereja.

As principais dimensões dos frutos de café, comprimento e dois diâmetros equatoriais, foram obtidas por meio de medição utilizando um paquímetro digital marca Mitutoyo. Foram medidos, ao longo da safra, 407 frutos de café.

A massa média dos frutos amostrados foi determinada por meio de pesagem em uma balança de precisão digital com exatidão de 0,01 g. Para tal, foram utilizadas 18 amostras, contendo 100 frutos cada, coletadas ao longo da safra de café para os estádios de maturação verde e cereja. O volume médio dos frutos foi determinado para as mesmas amostras de 100 frutos empregadas na determinação da massa média. Foi utilizada uma proveta graduada com graduação mínima de 0,5 mL, na qual os frutos foram imersos em água e, a partir do volume deslocado, estimou-se o volume médio dos frutos.

A massa específica média dos frutos do café foi determinada por meio da razão entre a massa média e o volume médio dos frutos para cada estágio de maturação da variedade Catuaí Vermelho (Equação 4.5).

$$\rho = \frac{m_m}{v_m} \quad (4.5)$$

em que,

ρ = massa específica média dos frutos de café, kg m³;

m_m = massa média dos frutos de café, kg;

v_m = volume médio dos frutos de café, m³.

As médias das propriedades físicas dos frutos foram comparadas entre os estádios de maturação verde e cereja por meio do teste t, com nível de significância de 5% de probabilidade.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Processamento dos vídeos de monitoramento dos ensaios de vibração

O resultado do processamento dos vídeos foi similar para todas as taxas de amostragem trabalhadas (210, 420 e 1000 Hz) diferenciando-se, principalmente, em relação ao limiar utilizado para a segmentação das imagens e pela resolução espacial resultante. Nas Figuras 4.2 e 4.3 estão apresentados os resultados do processamento (imagens RGB, na banda do azul e binária) de quatro quadros de um vídeo adquirido para o sistema fruto-pedúnculo do café, em uma taxa de amostragem de 210 Hz, nos estádios de maturação cereja e verde, respectivamente.

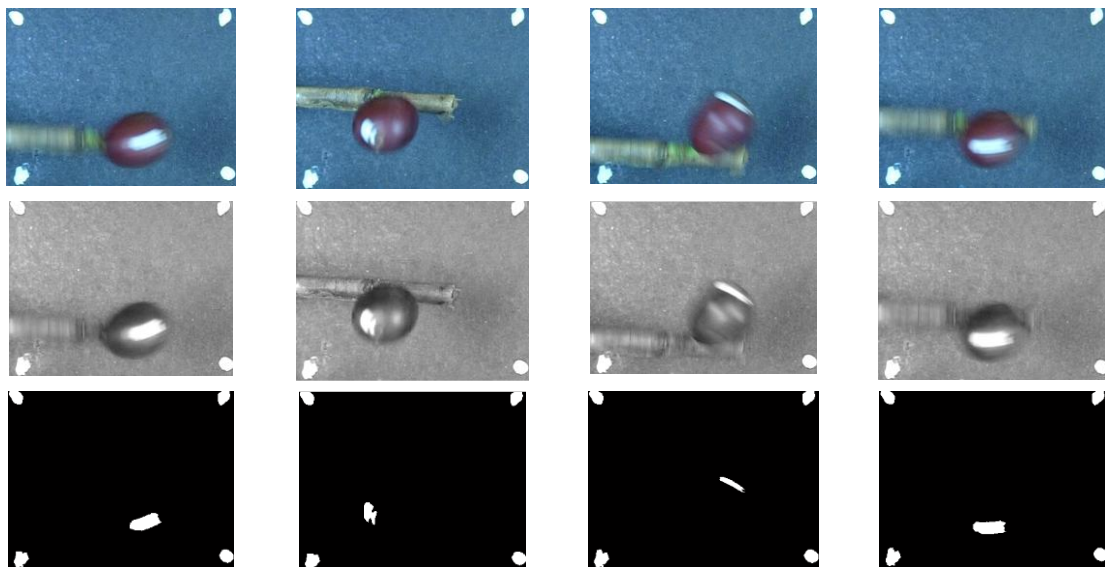


FIGURA 4.2 - Resultado da segmentação de quatro quadros de um dos vídeos adquiridos para o sistema fruto-pedúnculo do café no estágio de maturação cereja para uma taxa de amostragem de 210 Hz.

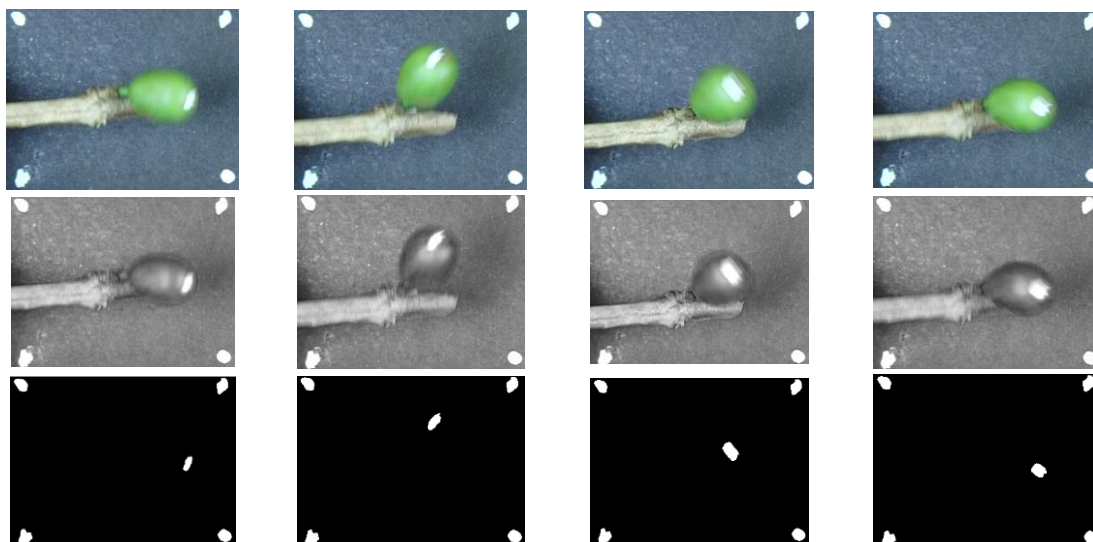


FIGURA 4.3 - Resultado da segmentação de quatro quadros de um dos vídeos adquiridos para o sistema fruto-pedúnculo do café no estágio de maturação verde para uma taxa de amostragem de 210 Hz.

A resolução espacial atingida para as três taxas de amostragem trabalhadas foram de 0,163; 0,347 e 0,818 mm/pixel para 210, 420 e 1000 Hz, respectivamente. A menor amplitude de saída na extremidade livre do fruto foi de 1,05 mm. Esse valor é maior que a resolução espacial trabalhada. Desta maneira, pode-se considerar adequada a determinação dos deslocamentos de saída do fruto de café utilizando a configuração do sistema proposto.

4.3.2. Transmissibilidade de vibração para frequências entre 13,33 e 26,67 Hz e amplitudes entre 5 e 15 mm

No Experimento 1 foram trabalhadas frequências e amplitudes de vibração na faixa comumente utilizada por dispositivos comerciais utilizados para derriça dos frutos de café, em que as frequências variaram entre 13,33 e 26,67 Hz e as amplitudes entre 5 e 15 mm, conforme apresentado na Tabela 4.1.

De acordo com os resultados obtidos nas análises de variância (Tabelas 4.5 e 4.6), nenhum dos fatores estudados mostrou efeito significativo sobre a transmissibilidade de vibração na direção x. No entanto, para a direção y, os fatores a frequência e a amplitude de vibração apresentaram efeito significativo sobre a transmissibilidade de vibração.

TABELA 4.5 - Resultado da análise de variância para o estudo efeito dos fatores frequência, amplitude e maturação sobre a transmissibilidade de vibração na direção x do sistema fruto-pedúnculo de café

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P - valor
Frequência (F)	2	3,50764	1,75382	0,51 ^{ns}	0,6056
Amplitude (A)	2	12,2212	6,11061	1,77 ^{ns}	0,1848
Maturação (M)	1	5,53547	5,53547	1,61 ^{ns}	0,2134
F x A	4	14,04116	3,51029	1,02 ^{ns}	0,4113
F x M	2	3,78411	1,89206	0,55 ^{ns}	0,5825
A x M	2	1,67205	0,83602	0,24 ^{ns}	0,7859
F x A x M	4	10,73956	2,68489	0,78 ^{ns}	0,5640
Resíduo	35	120,63550	3,446728		
Total	52	172,13672			

** significativo ao nível de 10 % de probabilidade, ns - não significativo; F(1,35) = 2,858; F(2,35) = 2,465; F(4,35) = 2,117; CV=207,50%.

TABELA 4.6 - Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores frequência, amplitude e maturação sobre a transmissibilidade de vibração na direção y do sistema fruto-pedúnculo de café

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P- valor
Frequência (F)	2	15,22218	7,611087	8,99 ^{**}	0,0007
Amplitude (A)	2	7,929030	3,96452	4,68 ^{**}	0,0158
Maturação (M)	1	0,00002	0,00002	0,00 ^{ns}	0,9958
F x A	4	3,50862	0,87712	1,04 ^{ns}	0,4026
F x M	2	0,12815	0,06408	0,08 ^{ns}	0,9273
A x M	2	0,43371	0,21685	0,26 ^{ns}	0,7755
F x A x M	4	3,11569	0,77892	0,92 ^{ns}	0,4634
Resíduo	35	29,64033	0,84687		
Total	52	59,97772			

** ** significativo ao nível de 10 % de probabilidade, ns - não significativo; F(1,35) = 2,858; F(2,35) = 2,465; F(4,35) = 2,117; CV=50,14%.

Nota-se o coeficiente de variação observado para T_x , de 207,5%, foi muito elevado, caracterizando alta variabilidade dessa variável na faixa de trabalho estudada, conforme apresentado na Tabela 4.5. Essa variabilidade elevada contribui para a não significância dos parâmetros estudados. Verifica-se também que entre os estádios de maturação verde e cereja não houve diferença entre os tratamentos estudados. A configuração física do sistema contribui para uma baixa transmissibilidade em x, para as diferentes combinações entre frequência e amplitude de vibração.

As médias de T_x e T_y estão apresentadas para cada um dos tratamentos, para os estádios de maturação cereja e verde, respectivamente (Figuras 4.4 e 4.5). Quando observadas as médias de T_x e T_y , para ambos os estádios de maturação do sistema fruto-pedúnculo do café, nota-se um comportamento muito similar. Esse fato pode ter contribuído para a que a diferença entre as médias de T_x e T_y não fossem significativa.

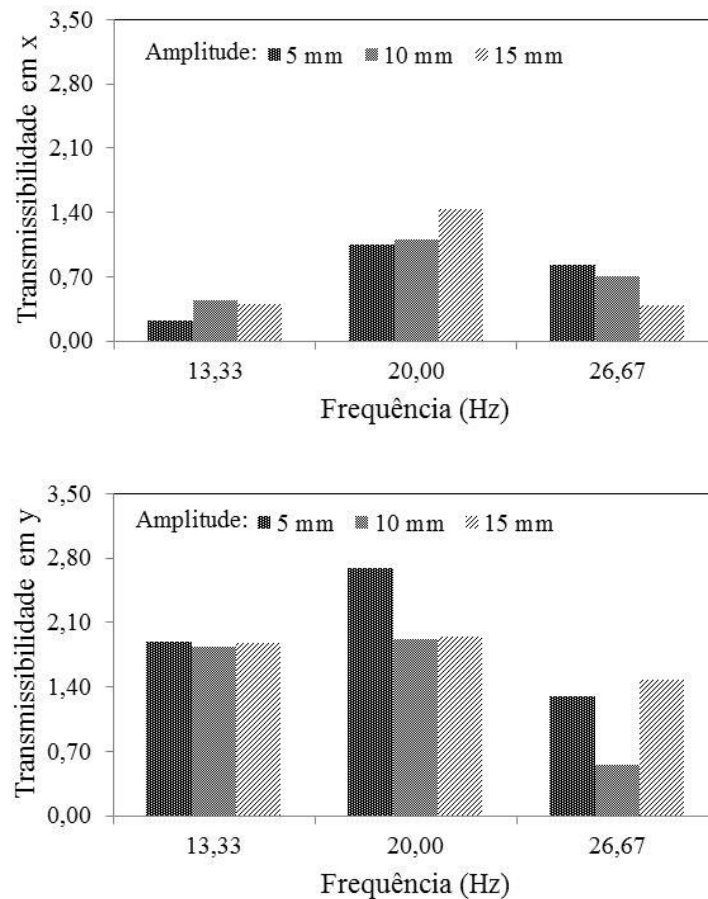


FIGURA 4.4 - Transmissibilidade de vibração média observada para o sistema fruto-pedúnculo do café, para a direção x e y, no estágio de maturação cereja (Experimento 1: 13,33 a 26,67 Hz; 5,00 a 15,00 mm).

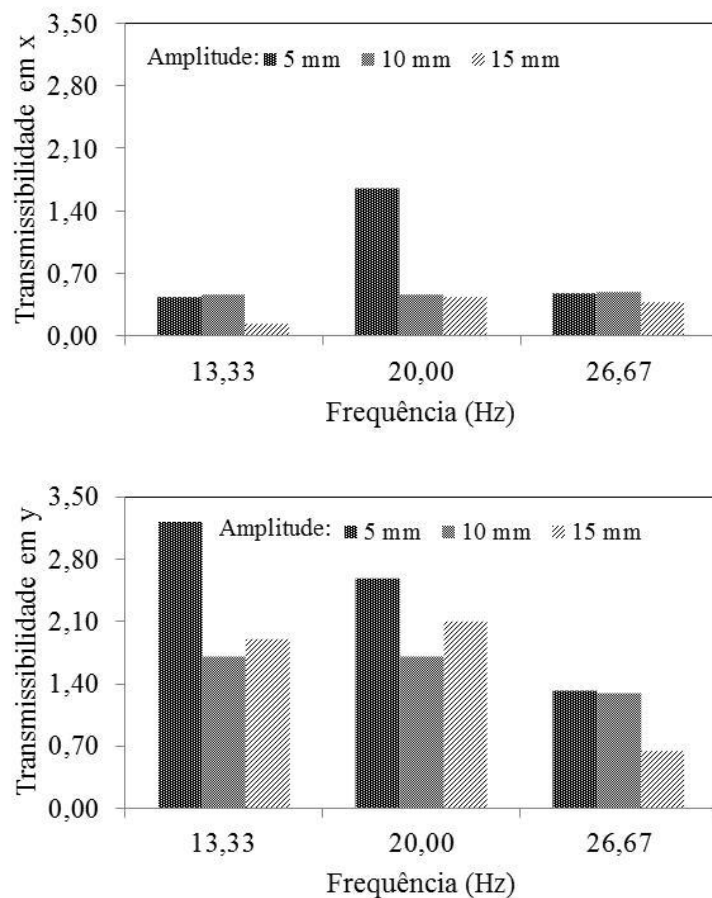


FIGURA 4.5 - Transmissibilidade de vibração média observada para o sistema fruto-pedúnculo do café, para a direção x e y, no estágio de maturação verde (Experimento 1: 13,33 a 26,67 Hz; 5,00 a 15,00 mm).

Na direção x, a frequência de vibração de 20 Hz associada a qualquer amplitude trabalhada proporcionou valores de transmissibilidade acima de 1,00; ou seja, ocorreu uma ampliação do movimento de saída em relação ao de entrada, para o estágio de maturação cereja (Figura 4.4). Para o estágio de maturação verde, valores de T_x acima de 1,00 foi observado somente para a amplitude de 5 mm (Figura 4.5). Os maiores valores observados foram iguais a 1,43 e 1,65; associados às amplitudes de 15 e 5 mm e aos estádios de maturação cereja e verde, respectivamente, resultando num deslocamento na extremidade livre do fruto de 21,5 e 8,3 mm.

Na direção y, valores elevados de transmissibilidade também foram observados para a frequência de 13,33 Hz associada a qualquer amplitude trabalhada, para ambos os estádios de maturação (Figuras 4.4 e 4.5). Para o estágio de maturação cereja, os valores de T_y ficaram na faixa de 1,85; sendo o maior deslocamento observado na extremidade

livre do fruto de 28,2 mm, quando trabalhada a uma amplitude de entrada de 15 mm. Para o estágio de maturação verde, o maior valor de T_y foi observado para a amplitude de 5,0 mm, sendo de 3,22; no entanto o maior deslocamento pico-a-pico de saída foi observado para a amplitude de 15 mm, sendo igual a 28,5 mm.

A transmissibilidade de vibração é maior quando o sistema é excitado próximo à região de ressonância. Diferentes autores estimaram valores para a primeira frequência natural do sistema fruto-pedúnculo do café na faixa trabalhada no Experimento 1. Os valores, provindos de modelagem matemática, estão sumarizados na Tabela 4.7. Verifica-se que os maiores valores de transmissibilidade foram observados na faixa estimada pelos autores.

TABELA 4.7 - Primeira frequência natural (Hz) estimada para o sistema fruto-pedúnculo do café por diferentes autores utilizando modelagem matemática

Referência	Variedade	Estádio de maturação	
		Cereja	Verde
Santos (2008)	Catuai Vermelho	19,86	23,21
Rodriguez (2007)	Caturra Rojo	17,00 a 21,00	17,00 a 21,00
Espinosa (2007)	Caturra Rojo	18,45	21,01
Espinosa (2007)	Caturra Amarillo	15,86	19,73

De acordo com o apresentado no Capítulo 3 do presente trabalho, a frequência natural foi de 15,74 e 13,97 Hz (Safrá 2010) e 11,23 e 13,29 Hz (Safrá 2011), para os estádios de maturação cereja e verde, respectivamente. Estas observações podem justificar elevados valores de T_y para a faixa de frequência de 13,33 Hz, especialmente para o estágio de maturação verde.

O modo de vibração correspondente à primeira frequência natural do sistema fruto-pedúnculo do café é o modo pendular. A predominância do modo de vibração pendular para faixa de frequência trabalhada pode ser reafirmada por meio da Figura 4.6, na qual estão apresentados os deslocamentos resultantes para o sistema fruto-pedúnculo do café nos estádios de maturação cereja e verde, respectivamente, para uma frequência de 20 Hz e amplitude de 10 mm. Deslocamento característico observado para 43,40% das amostras trabalhadas no Experimento 1.

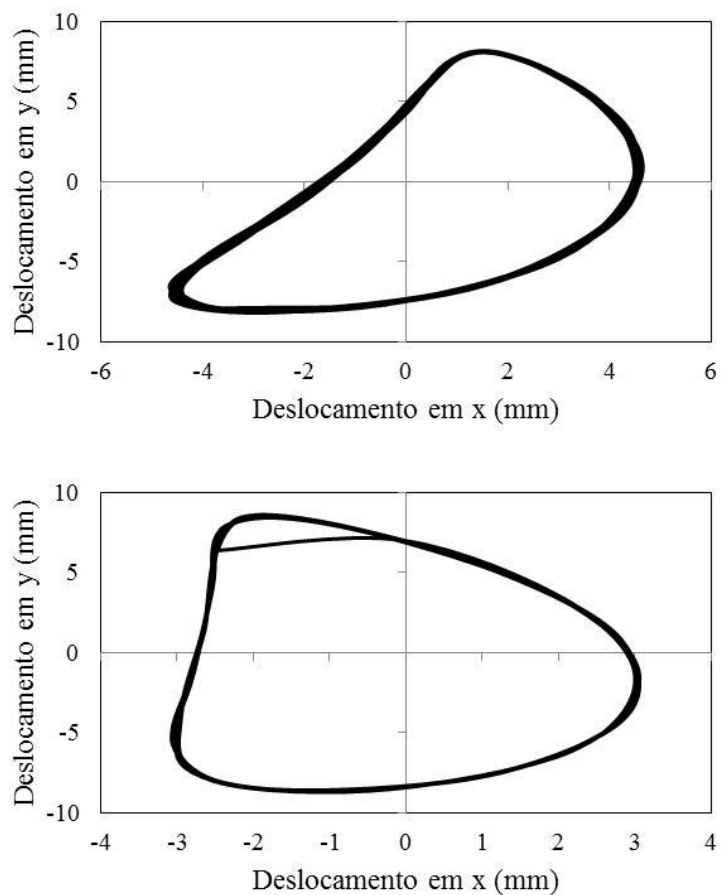


FIGURA 4.6 - Deslocamento resultante para o sistema fruto-pedúnculo do café, no estágio de maturação cereja e verde, para uma frequência de vibração de 20 Hz e amplitude de 10 mm.

A frequência de 13,33 Hz também apresentou valores elevados de transmissibilidade na direção y. Foi possível verificar em um dos vídeos adquiridos que o deslocamento pico-a-pico do ponto de monitoramento foi aumentando até o limite do sistema, o que pode caracterizar o fenômeno de ressonância (Figura 4.7). O deslocamento pico-a-pico do ponto de monitoramento é limitado pelas propriedades geométricas do sistema, ou seja, pelo comprimento do fruto e do pedúnculo do café.

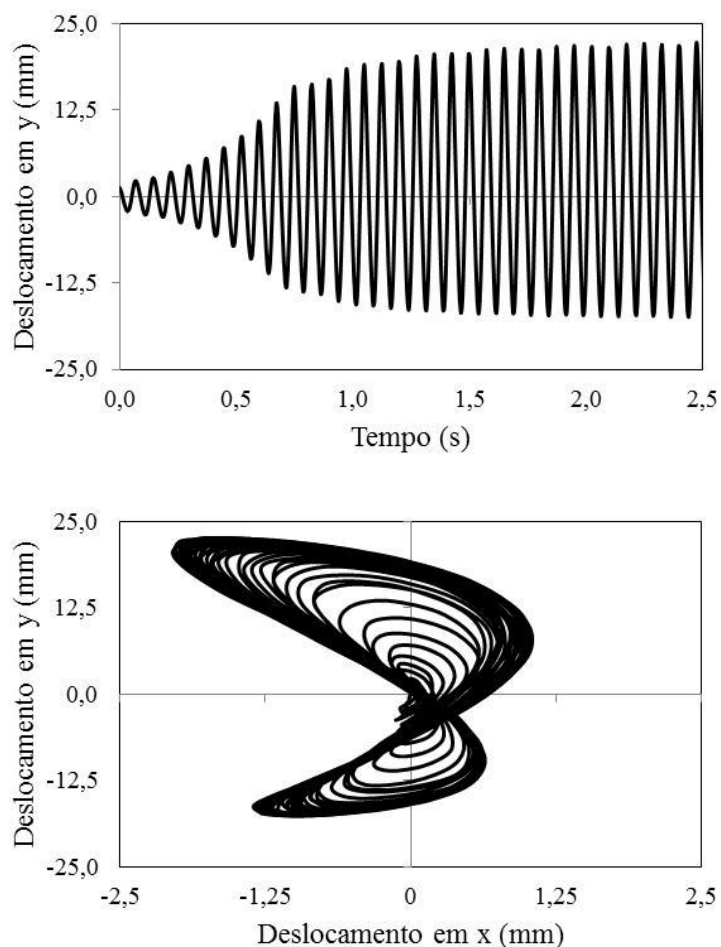


FIGURA 4.7 - Deslocamento resultante para o sistema fruto-pedúnculo do café, no estágio de maturação verde, para uma frequência de vibração de 13,33 Hz e amplitude de 15,00 mm.

No Capítulo 3, a frequência natural do sistema fruto-pedúnculo do café, no estágio de maturação verde, foi determinada e para as duas safras em 13,97 e 13,29 Hz, o que corrobora com o efeito de ressonância observado durante o ensaio de vibração, na frequência de excitação de 13,33 Hz. Quando um sistema é excitado próximo a sua frequência ressonante há um aumento na amplitude de vibração até o seu máximo valor (BALACHANDRAN & MAGRAB, 2011).

O deslocamento resultante verificado na Figura 4.7, o qual é assemelha-se a um duplo laço, repetiu-se para 28,30% amostras trabalhadas no Experimento 1. Essa característica de deslocamento pode estar associada à excentricidade de massa dos frutos e pelo ângulo entre o pedúnculo e o ramo plagiotrópico do café, além da própria geometria do pedúnculo, visto que este pode apresentar desvios longitudinais e transversais em relação ao seu maior eixo.

Em resumo, para essa faixa de trabalho, com base na transmissibilidade de vibração, a determinação da combinação entre frequência e amplitude de vibração que favoreça a derriça seletiva torna-se mais difícil, visto que para ambos os estádios de maturação, os valores observados tiveram um comportamento semelhante. Segundo Ciro (2001), ao vibrar os ramos de café no primeiro modo, é impossível atingir seletividade completamente, visto que o grau de seletividade não depende somente da frequência natural, mas também da amplitude de entrada, do tempo de vibração dentre outros parâmetros vibracionais.

4.3.2.1. Transmissibilidade de vibração para o sistema fruto-pedúnculo do café, no estádio de maturação cereja, para frequências entre 13,33 e 26,67 Hz e amplitudes entre 5 e 15 mm

Na Tabela 4.8 está apresentado o resultado para a análise de variância da regressão para T_x , para o sistema fruto-pedúnculo do café no estádio de maturação cereja. Na faixa trabalhada, referente a amplitudes de vibração entre 5,00 e 15,00 mm e frequências de vibração entre 13,33 e 26,67 Hz, o efeito da amplitude não foi significativo sobre a transmissibilidade de vibração na direção x. Verifica-se também que a falta de ajustamento não foi significativa indicando a adequabilidade do modelo utilizado para representar T_x . Além disso, o coeficiente de determinação foi de 83,42% mostrando que grande parte dos dados é explicada pela equação ajustada.

TABELA 4.8 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção x, para o sistema fruto-pedúnculo de café cereja

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Regressão	2	3,06583	1,53292	7,30 ^{**}	0,0018
Falta de ajuste (Tratamento)	6	0,60954	0,10159	0,48 ^{ns}	
Resíduo	8	3,67537	0,45942		
Total	17	3,57191	0,21011		
Total	25	7,24729			

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; F (2,17) = 2,668; F (6,17) = 2,178; CV (%) = 57,18%.

A frequência e o quadrado da frequência foram as variáveis com efeito significativo, cujos parâmetros ajustados estão apresentados na Tabela 4.9 e curva representativa está disposta na Figura 4.9. Nota-se que T_x tem os valores máximos estimados para a frequência de 20 Hz, para ambas as amplitudes trabalhadas.

TABELA 4.9 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para os frutos de café cereja

Variável	Grau de liberdade	Parâmetros estimados	Erro padrão	Valor de t	P-valor
Intercepto	1	-4,93265	1,49023	-3,31**	0,0017
Frequência (F)	1	0,57984	0,15340	3,78**	0,0005
F x F	1	-0,01368	0,00370	-3,70**	0,0006

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; $t(17) = 1,33$.

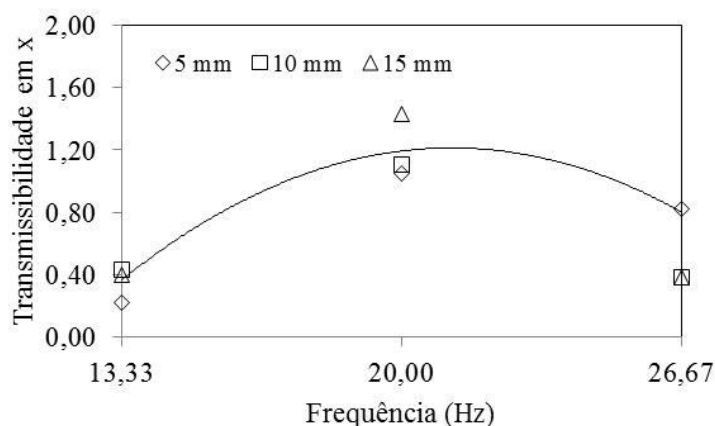


FIGURA 4.8 - Variação da transmissibilidade na direção x (T_x) em função das frequências de vibração (13,33; 20,00 e 26,67 Hz) e amplitudes de vibração (5; 10 e 15 mm), estádio de maturação cereja.

Na Tabela 4.10 está apresentado o resultado para a análise de variância da regressão para T_y , para o sistema fruto-pedúnculo do café no estádio de maturação cereja. Nota-se o mesmo comportamento observado para T_x , com a amplitude não sendo estatisticamente significativa na faixa de trabalho e com o efeito da frequência e do quadrado da frequência significativos. Verifica-se também que a falta de ajustamento não foi significativa indicando a adequabilidade do modelo utilizado para representar T_y . O coeficiente de determinação para o modelo ajustado foi de 67,95%.

TABELA 4.10 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção y, para o sistema fruto-pedúnculo de café cereja

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Regressão	2	5,48693	2,74346	3,49**	0,0335
Falta de ajuste (Tratamento)	6	2,58770	0,43128	0,55 ^{ns}	
Resíduo	8	8,07464	1,00933		
Total	17	13,37675	0,78687		
Total	25	21,45139			

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; F (2,17) = 2,668; F (6,17) = 2,178; CV (%) = 48,64%.

Na Tabela 4.11 está apresentado o resultado do teste t para os parâmetros estimados relativos ao modelo ajustado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para o estádio de maturação cereja. A curva ajustada para o modelo está apresentada na Figura 4.9. Nota-se que o comportamento de T_y , para ambas as amplitudes tiveram a mesma tendência, novamente caracterizando o máximo valor estimado para a frequência de 20 Hz. Quando a frequência de excitação está próxima à frequência de ressonância do sistema a transmissibilidade de vibração tende aos maiores valores (RAO, 2008).

TABELA 4.11 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para os frutos de café cereja

Variável	Grau de liberdade	Parâmetros estimados	Erro padrão	Valor de t	P-valor
Intercepto	1	-2,25868	2,89574	0,78 ^{ns}	0,4128
Frequência (F)	1	0,48352	0,29850	1,62 ^{ns}	0,0962
F x F	1	-0,01307	0,00714	1,83**	0,0500

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; t (17) = 1,33.

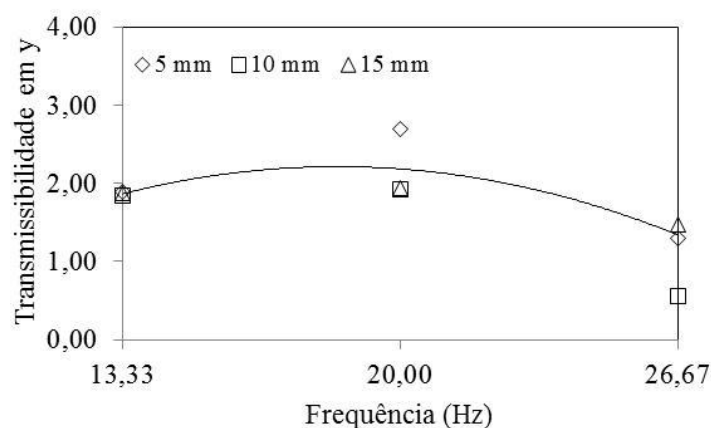


FIGURA 4.9 - Variação da transmissibilidade na direção y (T_y) em função das frequências de vibração (13,33; 20,00 e 26,67 Hz) e amplitudes de vibração (5; 10 e 15 mm), estádio de maturação cereja.

4.3.2.2. Transmissibilidade de vibração para o sistema fruto-pedúnculo do café no estádio de maturação verde, para frequências entre 13,33 e 26,67 Hz e amplitudes entre 5 e 15 mm

A análise de variância da regressão para T_x , para o sistema fruto-pedúnculo do café, no estádio de maturação verde, está apresentada na Tabela 4.12. Para amplitudes de vibração entre 5 e 15 mm e frequências de vibração entre 13,33 e 26,67 Hz, não houve efeito significativo da amplitude de vibração. Para T_x , a falta de ajustamento foi significativa indicando que o modelo não pode ser utilizado para estimação dos valores de T_x , mas pode ser utilizado para entender a comportamento da variável em função dos parâmetros com efeito significativo. Além disso, o coeficiente de determinação foi baixo no valor de 28,72%.

TABELA 4.12 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção x, para o sistema fruto-pedúnculo de café verde

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Regressão	2	1,26390	0,63195	4,12**	-
Falta de ajuste (Tratamento)	6	3,13678	0,52280	3,41**	-
Resíduo	18	2,76173	0,15343		
Total	26	7,16241			

** significativo ao nível de 10 % de probabilidade, ns- não significativo; F (2,18) = 2,624; F (6,18) = 2,130; CV (%) = 71,90%.

Os efeitos significativos foram verificados, somente para a frequência e para o quadrado da frequência, similarmente aos modelos ajustados para o estágio de maturação verde. Na Tabela 4.13 está apresentado o resultado do teste t para os parâmetros estimados, relativo ao modelo ajustado para representar a transmissibilidade de vibração na direção x, para o estágio de maturação verde.

TABELA 4.13 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção x, para os frutos de café cerejea, considerando o experimento total

Variável	Grau de liberdade	Parâmetros estimados	Erro padrão	Valor de t	P-valor
Intercepto	1	-3,01809	1,24201	2,43**	0,0674
Frequência (F)	1	0,36947	0,12874	2,87**	0,0330
F x F	1	-0,00882	0,00311	2,84**	0,0349

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; $t(18) = 1,33$.

Na Figura 4.10, o modelo ajustado está representado para o conjunto total de dados (Figura 9- a) e para cada amplitude trabalhada individualmente (Figura 9 - b). Nota-se que o comportamento de T_x , o comportamento parabólico foi mais expressivo para a amplitude de 5 mm comparadas as de 10 e 15 mm. Esse fato pode ter contribuído para a falta de ajustamento observada. Mesmo assim, os maiores valores de T_x tenderam à frequência de vibração de 20 Hz. Um dos pontos observados para a frequência de 20 Hz se distancia demasiadamente dos demais o que pode ter contribuído para a falta de ajustamento do modelo proposto.

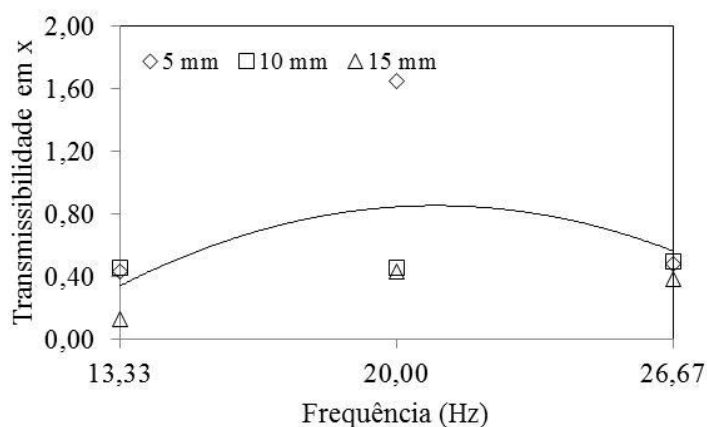


FIGURA 4.10 - Transmissibilidade na direção x (T_x) em função das frequências de vibração (13,33; 20,00 e 26,67 Hz) e amplitudes de vibração (5; 10 e 15 mm), estágio de maturação verde.

A análise de variância da regressão para T_y , para o sistema fruto-pedúnculo do café, no estágio de maturação verde, está apresentada na Tabela 4.14. A transmissibilidade de vibração na direção y, para o estágio de maturação verde, teve como fatores com influência significativa a frequência e a amplitude de vibração. A falta de ajustamento para o modelo escolhido foi não significativa mostrando a adequabilidade do mesmo para representar T_y na faixa trabalhada de frequência de 13,33 a 26,67 Hz e amplitudes de vibração entre 5 e 15 mm. O coeficiente de determinação para o modelo ajustado foi de 70,66%.

TABELA 4.14 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção y, para o sistema fruto-pedúnculo de café verde

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Regressão	2	9,76375	4,88188	6,10**	-
Falta de ajuste (Tratamento)	6	4,05516	0,67586	0,84 ^{ns}	-
Resíduo	8	13,81891	1,72736		
Total	18	14,41596	0,80009		
Total	26	28,23487			

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; F (2,18) = 2,624; F (6,18) = 2,130; CV (%) = 49,20%.

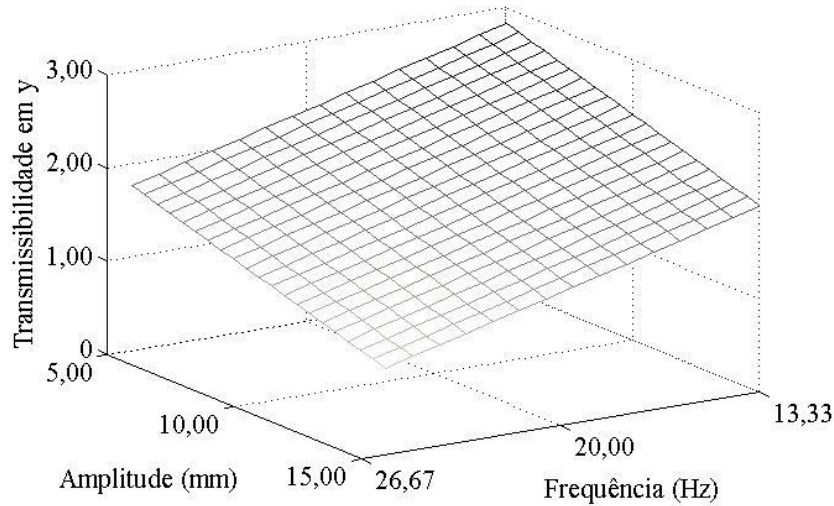
O resultado do teste t para os parâmetros estimados para o modelo ajustado para T_y , estágio de maturação verde, está apresentado na Tabela 4.15. Nota-se que com o aumento da amplitude e da frequência de vibração há uma diminuição da transmissibilidade de vibração. Os maiores valores observados são observados para a frequência de 13,33 Hz e amplitude de 5,00 mm, sendo igual a 2,83. Essa faixa de frequência é próxima ao valor da primeira frequência natural estimada para o sistema fruto-pedúnculo do café, no Capítulo 3 do presente trabalho.

TABELA 4.15 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para os frutos de café verde, considerando o experimento total

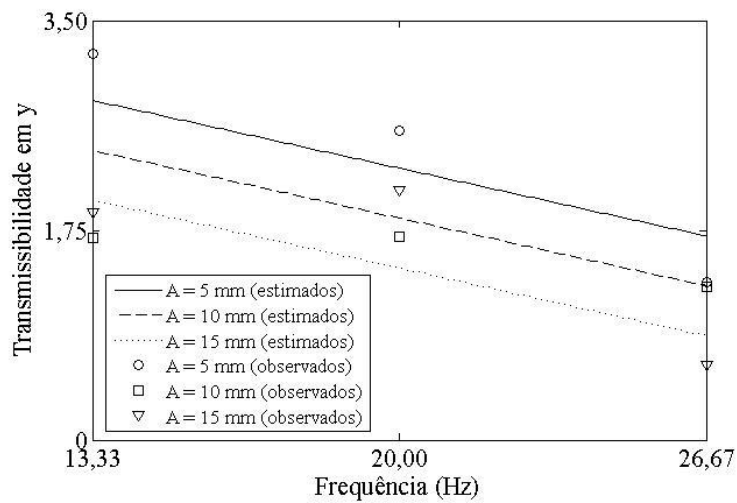
Variável	Grau de liberdade	Parâmetros estimados	Erro padrão	Valor de t	P-valor
Intercepto	1	4,37329	0,75142	5,82**	<0,0001
Frequência (F)	1	-0,08447	0,02933	2,88**	0,0072
Amplitude (A)	1	-0,08330	0,04228	1,97**	0,0500

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns - não significativo; t (18) = 1,33.

Na Figura 4.11 está apresentada a superfície de resposta, ajustada para T_y , e os cortes referentes ao modelo para as três amplitudes de vibração trabalhadas (5,00; 10,00 e 15,00 mm).



(a)



(b)

FIGURA 4.11 - Superfície de resposta ajustada para a transmissibilidade de vibração na direção y ($T_y = -4,37329 - 0,08447F - 0,08330F^2$) (a) e respectivos cortes (b), para o estádio de maturação verde.

4.3.3. Transmissibilidade de vibração para frequências entre 35 e 55 Hz e amplitudes entre 3,5 e 6,5 mm

Nas Tabelas 4.16 e 4.17 estão apresentados os resultados das análises de variância para o experimento completo avaliando o efeito de todos os fatores sobre a

transmissibilidade de vibração nas direções x e y. Duas unidades experimentais foram perdidas durante os testes, uma para o estádio de maturação cereja e outra para o verde, pois ocorreu o desprendimento do fruto de café no início do teste de vibração, inviabilizando a determinação dos deslocamentos resultantes.

TABELA 4.16 - Resultado da análise de variância para a transmissibilidade de vibração na direção x, em função dos fatores frequência, amplitude e estádio de maturação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Frequência (F)	2	133,40628	66,70314	1,17 ^{ns}
Amplitude (A)	2	126,28276	63,14138	1,10 ^{ns}
Maturação (M)	1	41,16799	41,16799	0,72 ^{ns}
F x A	4	448,31643	112,07911	1,96 ^{ns}
F x M	2	101,81878	50,90939	0,89 ^{ns}
A x M	2	118,25406	59,12709	1,00 ^{ns}
F x A x M	4	0	0	0,00 ^{ns}
Resíduo	34	1941,55380	57,10452	
Total	51	2910,72471		

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns - não significativo; F(1,34) = 2,8626; F(2,34) = 2,4694; F(4,34) = 2,1216; CV= 462,73%

TABELA 4.17 - Resultado da análise de variância para a transmissibilidade de vibração na direção y, em função dos fatores frequência, amplitude e estádio de maturação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Frequência (F)	2	0,67063	0,33532	0,31 ^{ns}
Amplitude (A)	2	0,13019	0,06509	0,06 ^{ns}
Maturação (M)	1	2,67991	2,67991	2,51 ^{ns}
F x A	4	8,73953	2,18488	2,05 ^{ns}
F x M	2	4,59891	2,29946	2,15 ^{ns}
A x M	2	4,17646	2,08823	1,96 ^{ns}
F x A x M	4	1,33578	0,33394	0,31 ^{ns}
Resíduo	34	36,29200	1,06741	
Total	51	58,62341		

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns - não significativo; F(1,34) = 2,8626; F(2,34) = 2,4694; F(4,34) = 2,1216; CV= 87,70%

Verificou-se que estatisticamente, ao nível de 10% de probabilidade, que nenhum dos fatores estudados teve efeito significativo sobre a transmissibilidade de vibração em ambas as direções, quando estudados todos os fatores de uma só vez. Esse fato pode estar relacionado à grande variabilidade existente entre as amostras de café

coletadas, principalmente, para a transmissibilidade de vibração na direção x, a qual apresentou coeficiente de variação de 462,73% (GOMES & GARCIA, 2000).

As médias de T_x e T_y , para o estágio de maturação cereja, estão apresentadas para cada um dos tratamentos na Figura 4.12. O maior valor observado para T_x e T_y foi para a combinação entre a frequência de 55 Hz e amplitude de 6,5 mm, sendo de 1,10 e 1,07; respectivamente. Com esses valores de transmissibilidade os deslocamentos observados, na extremidade livre do fruto de café, foram de 7,15 e 6,96 mm.

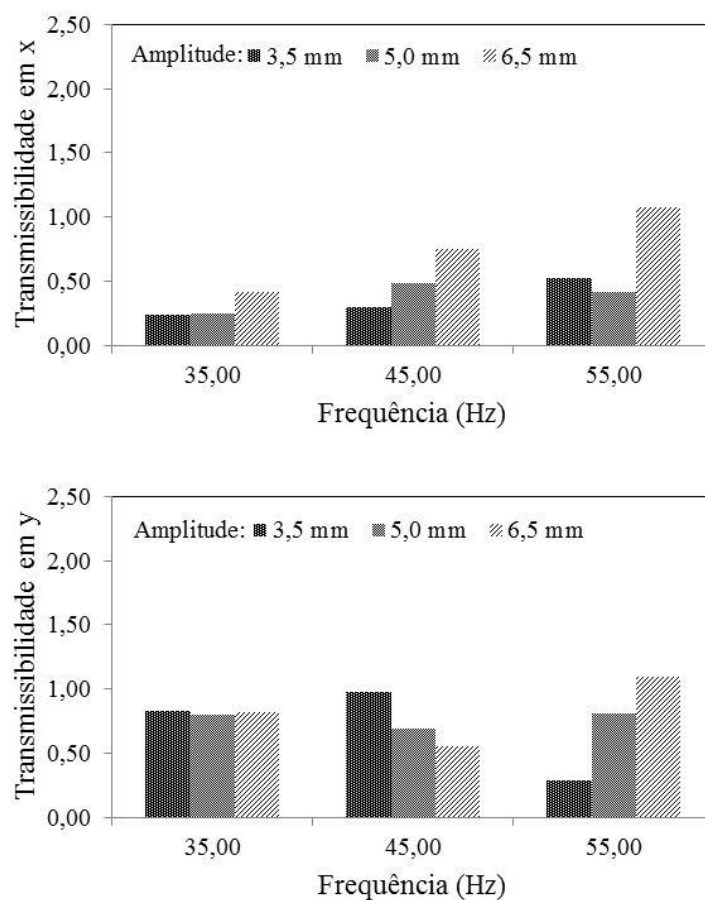


FIGURA 4.12 - Transmissibilidade de vibração média observada para o sistema fruto-pedúnculo do café, para a direção x e y, no estágio de maturação cereja (Experimento 2: 35 a 55 Hz; 3,5 a 6,5 mm).

As médias de T_x e T_y , para o estágio de maturação verde, estão apresentadas para cada um dos tratamentos na Figura 4.13. Nota-se que T_x apresentou valores superiores a 1,00 para a frequência de 35 Hz associada a uma amplitude de 3,5 mm, igual a 1,10, e para a frequência de 55 Hz associada a uma amplitude de 5 mm, igual a 1,23. O deslocamento resultante na extremidade livre do fruto foi de 3,85 e 6,15 mm,

respectivamente. Os maiores valores observados para a transmissibilidade em y foram para a frequência de 35 Hz associadas à amplitude de 3,5 mm sendo de 2,24. O maior deslocamento de saída foi observado para a frequência de 35 Hz associadas à amplitude de 5,0 mm de 10,05 mm.

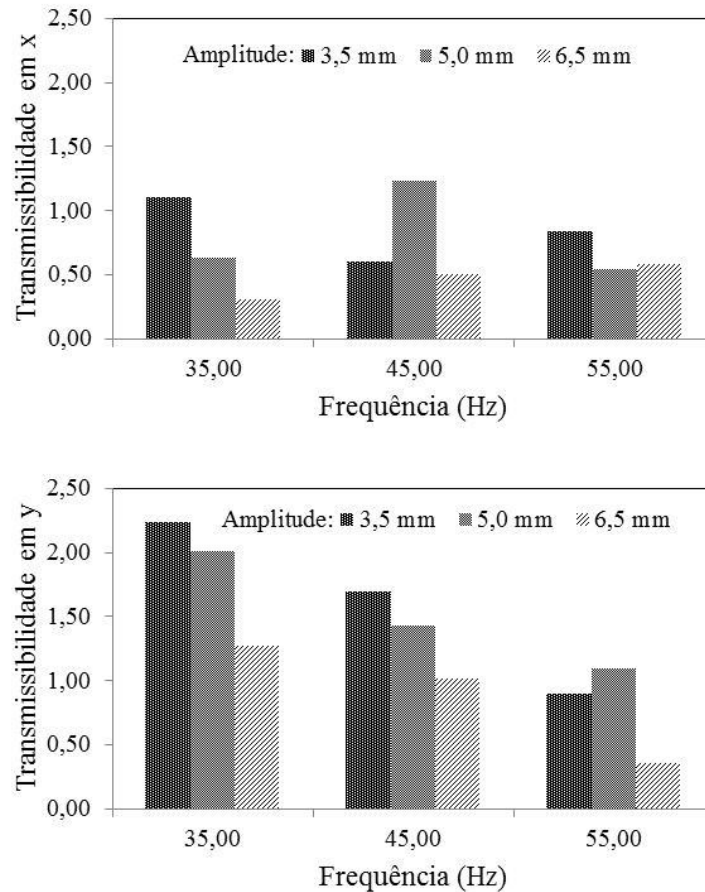


FIGURA 4.13 - Transmissibilidade de vibração média observada para o sistema fruto-pedúnculo do café, para a direção x e y, no estágio de maturação verde (Experimento 2: 35 a 55 Hz; 3,5 a 6,5 mm).

Santos (2008) estimou as frequências naturais associadas ao modo de vibração torcional em 50,37 e 57,66 Hz para o estágio de maturação cereja e verde, respectivamente. Se o sistema fruto-pedúnculo do café vibrar no modo torcional são esperados menores deslocamentos nas direções x e y, visto que os deslocamentos angulares em torno do pedúnculo seriam predominantes.

Na Figura 4.14 estão apresentados os deslocamentos resultantes para o sistema fruto-pedúnculo do café nos estágios de maturação cereja e verde, respectivamente, para

uma frequência de 55 Hz e amplitude de 5 mm. Verifica-se que a característica do movimento resultante para essa frequência se difere da observada para baixas frequências não sendo expressivos os deslocamentos na direção x. Esse padrão de vibração foi verificado para 60,8% das amostras do Experimento 2. A característica de deslocamento pendular é menos acentuada nas amostras trabalhando próxima ao modo de vibração torcional.

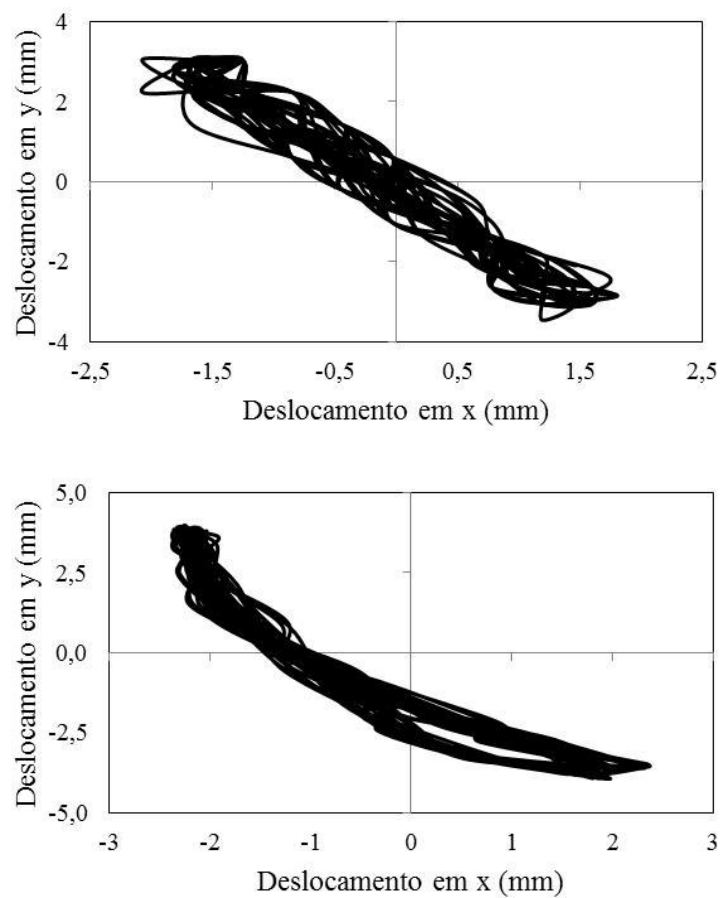


FIGURA 4.14 - Deslocamento resultante para o sistema fruto-pedúnculo do café, nos estádios de maturação cereja e verde, para a frequência de vibração de 55 Hz e amplitude de 5 mm.

Realizou-se de maneira individual uma análise de regressão linear, para os estádios de maturação verde e cereja, a fim de verificar a influência da frequência e da amplitude de vibração sobre a transmissibilidade de vibração, sendo os resultados apresentados nos tópicos seguintes.

4.3.3.1. Transmissibilidade de vibração para o sistema fruto-pedúnculo do café no estádio de maturação cereja entre 35 e 55 Hz e amplitudes entre 3,5 e 6,5 mm

Na Tabela 4.18 está apresentado o resultado para a análise de variância para a regressão de T_x para o sistema fruto-pedúnculo do café, no estádio de maturação cereja, excitadas harmonicamente com frequências entre 35 e 55 Hz e amplitudes entre 3,5 a 6,5 mm. Foi observada a influência da frequência e da amplitude de vibração sobre T_x para o estádio de maturação cereja, sendo o modelo proposto considerado adequado visto que regressão foi significativa e uma falta de ajuste não significativa, a 10% de probabilidade. O coeficiente de determinação para o modelo foi de 73,16% e o coeficiente de variação dos dados foi de 47,03%.

TABELA 4.18 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção x, para o sistema fruto-pedúnculo de café cereja

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Regressão	2	1,01784	0,50892	9,73 ^{**}	-
Falta de ajuste (Tratamento)	6	0,37332	0,06222	1,28 ^{ns}	-
Resíduo	8	1,39116	0,17390		
Total	17	0,82933	0,04878		
Total	25	2,22050			

^{**} significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; F (2,17) = 2,668; F (6,17) = 2,178; CV (%) = 47,03%.

O teste t realizado para verificar a significância dos parâmetros estimados para a transmissibilidade em x está apresentado na Tabela 4.19. Nota-se que com o aumento tanto da frequência quanto da amplitude de vibração ocorre um aumento da transmissibilidade de vibração ao sistema fruto-pedúnculo do café na direção transversal ao deslocamento de entrada.

TABELA 4.19 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção x, para os frutos de café cereja

Variável	Grau de liberdade	Parâmetros estimados	Erro padrão	Valor de t	P-valor
Intercepto	1	-0,90859	-0,31010	-	-
Frequência (F)	1	0,01723	0,00538	3,21 ^{**}	-
Amplitude (A)	1	0,12336	0,03577	3,45 ^{**}	-

^{**} significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; t (17) = 1,33.

Na Figura 4.15 está apresentada a superfície de resposta resultante do modelo ajustado para representar a transmissibilidade de vibração na direção x, para o sistema fruto-pedúnculo do café no estágio de maturação cereja. A transmissibilidade de vibração ficou abaixo de 1,00 para qualquer combinação entre a frequência e amplitude de entrada. O valor médio observado para foi de 0,47 e o maior valor estimado pelo modelo foi de 0,84; para a combinação entre 55 Hz e 6,5 mm.

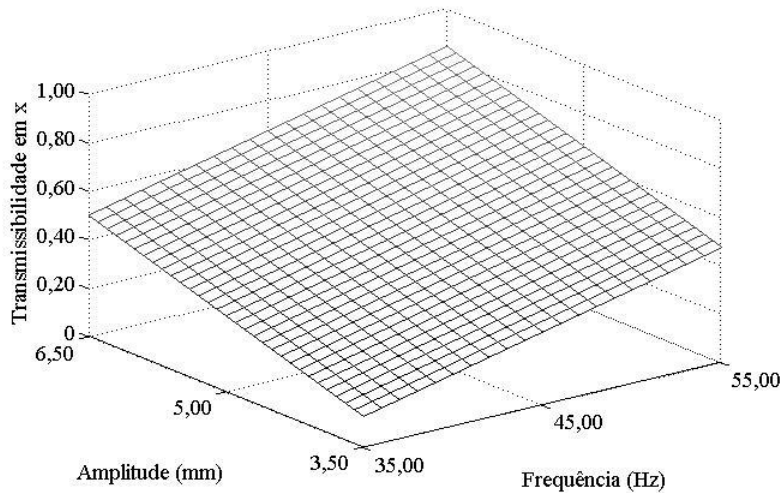


FIGURA 4.15 - Superfície de resposta ajustada ($T_x = -0,90859 - 0,01723F - 0,12336A$) para a transmissibilidade de vibração ao sistema fruto-pedúnculo do café cereja, na direção transversal ao deslocamento de entrada (Experimento 2).

Na Figura 4.16 estão apresentados os cortes feitos na superfície para as três amplitudes de vibração trabalhadas além das médias dos valores observados. Por meio dessas curvas, fica mais evidente a relação entre esses dois fatores. A energia vibracional transmitida ao sistema fruto-pedúnculo do café é maior com o aumento desses dois fatores, para a transmissibilidade no eixo x.

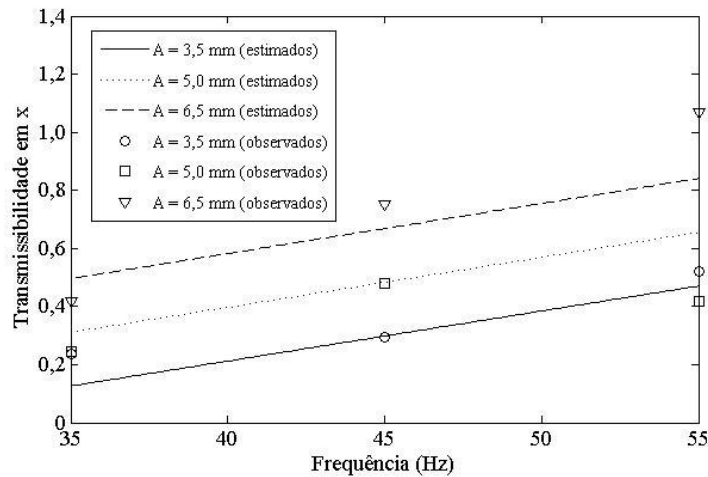


FIGURA 4.16 - Transmissibilidade de vibração, na direção x, estimada e observada para as amplitudes de vibração trabalhadas para o sistema fruto-pedúnculo do café cereja (Experimento 2).

Na Tabela 4.20 está apresentada a análise de variância para a regressão a T_y para o sistema fruto-pedúnculo do café no estágio de maturação cereja. Observa-se que a transmissibilidade de vibração, na direção x, foi influenciada significativamente pela interação entre frequência e amplitude de vibração (Tabela 4.21). Estes resultados indicam que o efeito da frequência sobre a transmissibilidade de vibração depende da amplitude de vibração imposta ao sistema fruto-pedúnculo do café, não podendo esses fatores serem trabalhados de maneira isolada. Fato semelhante foi observado por Santos *et al.* (2010) estudando os efeitos da frequência e amplitude de vibração sobre a eficiência de derricha dos frutos do café, para variedade Catuaí Vermelho.

TABELA 4.20 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção y, para o sistema fruto-pedúnculo de café cereja

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Regressão	3	0,51676	0,17225	2,48**	0,088
Falta de ajuste (Tratamento)	5	0,72258	0,14452	3,04**	-
Resíduo	17	0,80705	0,04747		
Total	25	2,04639			

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; $F(3,17) = 2,437$; $F(5,17) = 2,196$; CV (%) = 35,32%.

TABELA 4.21 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para os frutos de café cereja

Variável	Grau de liberdade	Parâmetros estimados	Erro padrão	Valor de t	P-valor
Intercepto	1	3,73338	1,00902	-	-
Frequência (F)	1	-0,07020	0,02229	-3,15**	-
Amplitude (A)	1	-0,54943	0,19909	-2,76**	-
F x A	1	0,01301	0,00441	2,95**	-

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; t (17) = 1,33

A superfície de resposta ajustada está apresentada na Figura 4.17 a qual sugere um comportamento atípico na transmissibilidade de vibração visto que em ambos os extremos de amplitude e frequências trabalhadas (35 Hz e 3,5 mm; e 55 Hz e 6,5 mm) apresentaram os maiores valores estimados, próximos a 0,95. O menor valor observado para a transmissibilidade de vibração na direção y refere-se à combinação entre a frequência de 55 Hz e amplitude de 3,5 mm, com valores abaixo de 0,5.

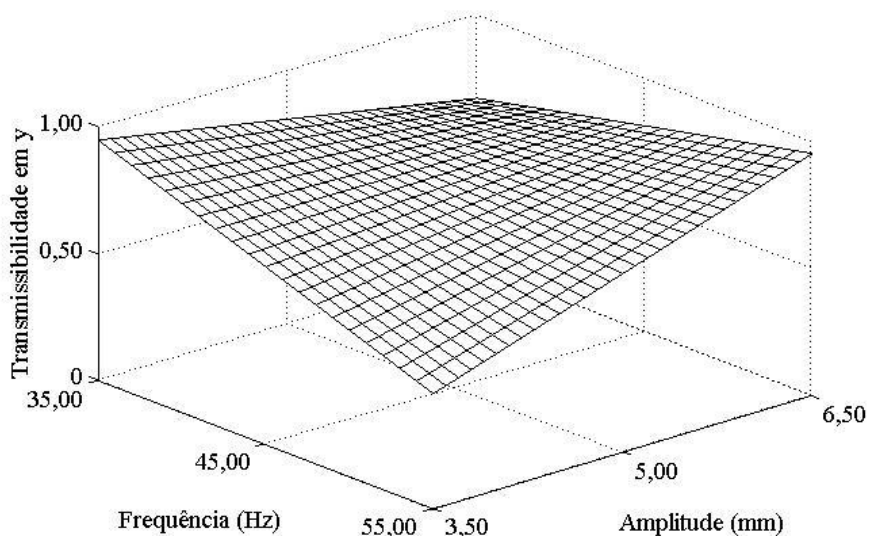


FIGURA 4.17 - Superfície de resposta ajustada ($T_y = 3,73338 - 0,07020F - 0,54943A + 0,01301FA$) para representar a transmissibilidade de vibração ao sistema fruto-pedúnculo do café cereja, na direção y (direção do movimento de entrada).

Na Figura 4.18 estão apresentados os cortes feitos na superfície para as três amplitudes de vibração trabalhadas além das médias dos valores observados, para a

transmissibilidade de vibração na direção y. Os valores observados para a transmissibilidade de vibração na frequência de 35 Hz ficaram bem próximos um do outro para ambas as amplitudes trabalhadas, o que não é verificado para as frequências de 45 e 55 Hz.

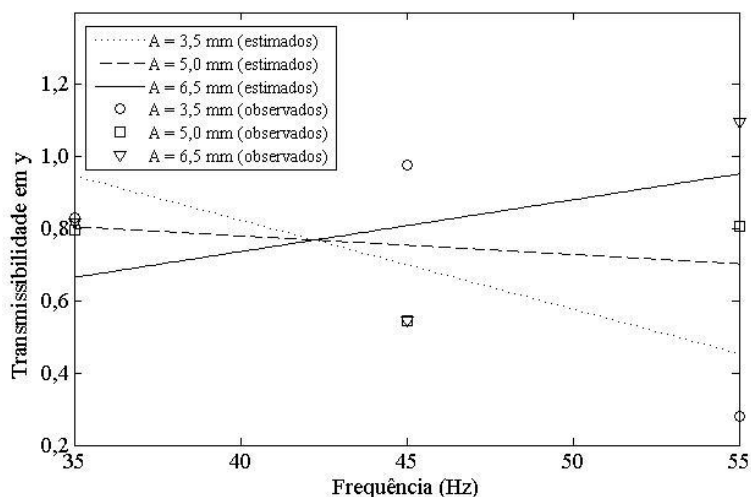


FIGURA 4.18 - Transmissibilidade de vibração, na direção y, estimada e observada para as amplitudes de vibração trabalhadas para o sistema fruto-pedúnculo do café cerejeira.

Quando analisada a transmissibilidade de vibração nas duas direções estudadas, a combinação entre a maior frequência e a maior amplitude de vibração (55 Hz e 6,5 mm) proporciona maiores deslocamentos de saída. Com maiores deslocamentos no sistema, maiores são as deformações ocorridas na ligação fruto-pedúnculo e também na ligação entre o pedúnculo e ramo do café, o que pode contribuir para o desprendimento do fruto. Considerando o modelo ajustado, a combinação entre 35 Hz e 3,5 mm proporciona a maior transmissibilidade na direção y, porém na direção transversal ao mesmo (direção x) a transmissibilidade de vibração apresentou valores baixos, próximos a 0,2.

4.3.3.2. Transmissibilidade de vibração para o sistema fruto-pedúnculo do no estágio de maturação verde entre 35 e 55 Hz e amplitudes entre 3,5 e 6,5 mm

O resultado para a análise de variância da regressão de T_x , para o estágio de maturação verde, está apresentado na Tabela 4.22. Somente a amplitude de vibração

teve efeito significativo sobre a transmissibilidade de vibração na direção x. Nota-se também que a falta de ajustamento foi não significativa indicando adequabilidade do modelo para explicar a variação de T_x em função da amplitude de vibração, no entanto o coeficiente de determinação, no valor de 31,16%, é considerado baixo.

TABELA 4.22 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção x, para o sistema fruto-pedúnculo de café verde

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Regressão	1	0,66286	0,66286	6,33**	-
Falta de ajuste (Tratamento)	7	1,46464	0,20923	2,00 ^{ns}	-
Resíduo	8	2,12750	0,26594		
Total	17	1,77925	0,10466		
Total	25	3,90675			

** significativo ao nível de 10 % de probabilidade, ns- não significativo; F (3,17) = 2,437; F (5,17) = 2,196; CV (%) = 52,00%.

Na Tabela 4.23 está apresentado o resultado para o teste t realizado para o parâmetro ajustado para o modelo. Na Figura 4.19 está apresentado o modelo ajustado com base somente na amplitude de vibração para o experimento total (Figura 18-a) e os modelos ajustados considerando cada frequência de vibração trabalhada separadamente (Figura 18-b). O maior observado para T_x foi associado a uma frequência de 45 Hz e uma amplitude de vibração de 5 mm.

TABELA 4.23 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção x, para os frutos de café verde

Variável	Grau de liberdade	Parâmetros estimados	Erro padrão	Valor de t	P-valor
Intercepto	1	1,35828	0,26633	5,10	0,0002
Amplitude (A)	1	-0,13179	0,05223	-2,52	0,0365

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; t (17) = 1,33.

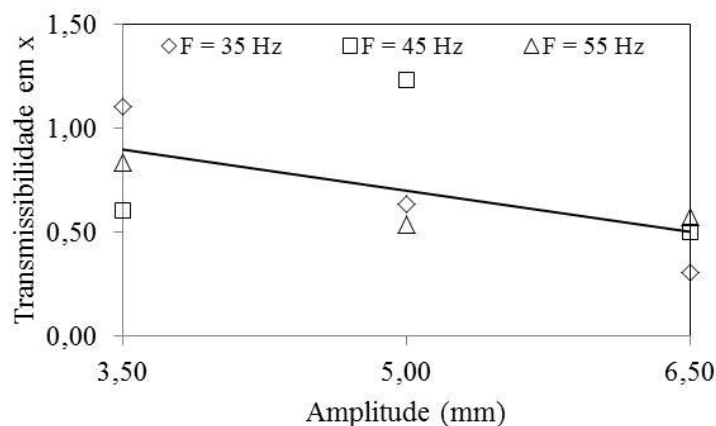


FIGURA 4.19 - Variação da transmissibilidade na direção x (T_x) em função das três amplitudes de vibração trabalhadas (3,5; 5,0 e 6,5 mm): considerando o experimento total (a) e para cada frequência individualmente (b), estágio de maturação verde.

O resultado da análise de variância da regressão de T_y , para o estágio de maturação verde, está apresentado na Tabela 4.24. Para a direção y, o modelo ajustado teve a frequência e a amplitude de vibração com efeito significativo sobre a transmissibilidade de vibração. Além disso, observou-se a não significância da falta de ajustamento, mostrando adequabilidade do modelo ajustado para representar T_y para o estágio de maturação verde no Experimento 2. O modelo apresentou coeficiente de determinação igual a 89,66%. Na Tabela 4.25 está apresentado o resultado do teste t para os parâmetros ajustados do modelo.

TABELA 4.24 - Resultado da análise de variância relativo ao modelo ajustado para a transmissibilidade de vibração na direção y, para o sistema fruto-pedúnculo de café verde

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Regressão	2	6,45599	3,22799	3,43**	0,0236
Falta de ajuste (Tratamento)	6	0,74414	0,12402	0,13 ^{ns}	
Resíduo	8	7,20013	0,90002		
Total	17	16,01393	0,94110		
Total	25	23,21407			

** significativo ao nível de 10 % de probabilidade, ns- não significativo; $F(2,17) = 2,668$; $F(6,17) = 2,178$; CV (%) = 62,25%.

TABELA 4.25 - Resultado do teste t para os parâmetros estimados do modelo utilizado para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para os frutos de café verde

Variável	Grau de liberdade	Parâmetros estimados	Erro padrão	Valor de t	P-valor
Intercepto	1	4,89307	1,19667	4,09**	0,0005
Frequência (F)	1	-0,05237	0,02076	-2,52**	0,0190
Amplitude (A)	1	-0,23986	0,13843	-1,73**	0,0965

** significativo ao nível de 10% de probabilidade, ns- não significativo; t (17) = 1,33

Na Figura 4.20 está apresentada a superfície de resposta para o modelo ajustado para T_y , estágio de maturação verde, no Experimento 2. Pode-se observar a tendência de diminuição de T_y com o aumento da frequência de vibração. Deve-se ressaltar que a frequência de vibração de 55 Hz está próxima a frequência de vibração relativa ao modo de vibração torcional estimado por Santos (2008), sendo estimada em 57,66 Hz, para o estágio de maturação cereja. Desta forma, deslocamentos angulares em torno do pedúnculo seriam mais expressivos do que os deslocamentos translacionais observados, contudo a determinação experimental é dificultada.

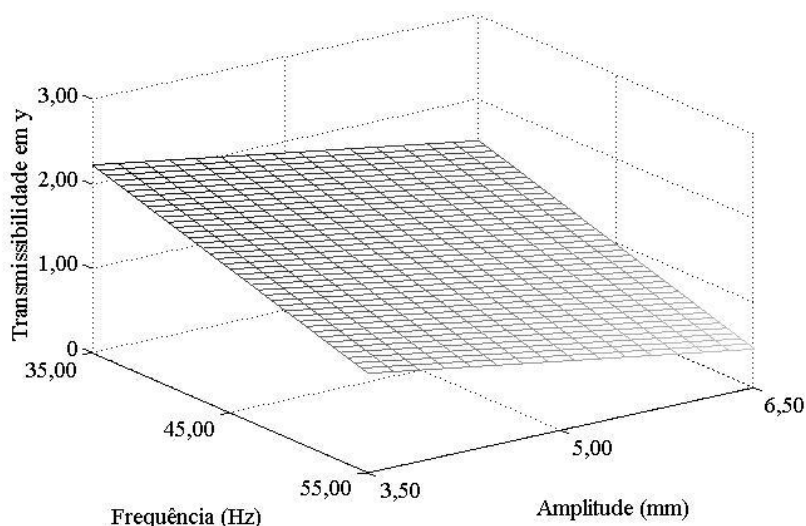


FIGURA 4.20 - Superfície de resposta ajustada para T_y ($T_y = -4,89307 - 0,05237F - 0,23986A$), estágio de maturação verde, para o Experimento 2.

Na Figura 4.21 estão apresentados os cortes realizados na superfície e os valores observados de T_y . Nota-se que o modelo ajustado é adequado visto que os dados observados não se encontram muito dispersos em relação às curvas ajustadas.

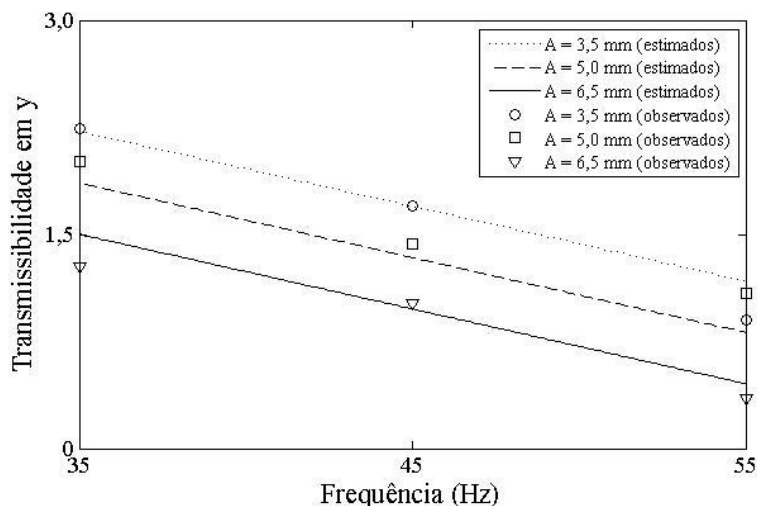


FIGURA 4.21 - Cortes realizados na superfície de resposta ajustada para representar a transmissibilidade de vibração na direção y, para o estágio de maturação verde (Experimento 2).

Quando comparada a transmissibilidade de vibração entre os estádios de maturação cereja e verde, nota-se que o estágio de maturação verde apresentou maiores valores de observados o estágio de maturação cereja, para a faixa trabalhada no Experimento 2. Para o estágio de maturação cereja não foram observados valores de transmissibilidade acima de 1,00 para ambas as direções estudadas. Estes resultados podem ser relacionados com a capacidade de amortecimento do sistema fruto-pedúnculo do café para os diferentes estádios de maturação.

No Capítulo 3, do presente trabalho, foi determinado, para os estádios de maturação cereja e verde, o coeficiente de amortecimento do sistema fruto-pedúnculo do café, o qual mostrou para o estágio de maturação cereja maiores valores de amortecimento que o estágio de maturação verde, durante a safra de 2010. Quanto maior o amortecimento de um sistema maior sua dissipação de energia quando o mesmo é colocado a vibrar (MEIROVITCH, 2001).

4.3.3.3. Propriedades físicas do sistema fruto-pedúnculo do café

Na Tabela 4.26 estão apresentadas as principais propriedades físicas das amostras utilizadas para estudar a transmissibilidade de vibração do sistema fruto-pedúnculo do

café. Nota-se que a massa dos frutos verdes foi menor que a dos frutos cerejas, assim como as dimensões dos frutos.

TABELA 4.26 - Propriedades físicas médias dos frutos de café usados nos testes de vibração

	Variável	Média	DP	CV (%)	Mediana	Máximo	Mínimo
Cereja	C _f	14,55	0,80	6,64	14,56	15,57	9,97
	D ₁	11,39	0,97	6,64	11,38	16,95	10,98
	D ₂	12,45	0,76	6,45	12,48	13,95	9,24
	m	1,22	0,06	5,01	1,22	1,32	1,14
	v	1,21	0,06	5,06	1,23		
	ρ	1,008	-	-	-	-	-
Verde	C _f	14,24	0,81	10,83	14,28	13,73	7,82
	D ₁	10,47	1,01	7,72	10,42	17,38	10,83
	D ₂	11,30	0,73	7,82	11,33	13,10	7,72
	m	0,94	0,07	7,36	0,91	1,09	0,85
	v	0,91	0,04	0,05	0,91	0,98	0,85
	ρ	1,033	-	-	-	-	-

C_f= comprimento do fruto (mm); D₁= diâmetro menor do fruto (mm); D₂= diâmetro maior do fruto (mm); m= massa do fruto (g); v = volume dos frutos (cm³); ρ = massa específica (g cm⁻³).

4.4. Conclusões

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Foi possível a determinação dos deslocamentos resultantes do sistema fruto-pedúnculo do café por meio de vídeos de alta velocidade submetido à excitação harmônica com adequabilidade;
- A maior transmissibilidade de vibração no sistema fruto-pedúnculo do café, trabalhando com baixas frequências, foi observada para faixas coincidentes com as frequências naturais do sistema, próximas a 20 Hz, para ambos os estádios de maturação;
- Por meio dos deslocamentos resultantes, foi possível verificar a predominância do modo de vibração pendular para a faixa de frequência trabalhada no Experimento 1, bem como foi possível verificar a ocorrência do fenômeno de ressonância em uma das amostras trabalhadas;

- Os valores observados para a transmissibilidade de vibração, nas direções x e y, tiveram valores próximos entre os estádios de maturação cereja e verde, o que pode dificultar a identificação de faixas de trabalho favoráveis à derriça dos frutos de café de forma seletiva, com base nesse parâmetro mecânico;
- Para frequências elevadas, a frequência de 35 Hz, associada às amplitudes de vibração trabalhadas (3,5 a 6,5 mm), foi a que mais se diferiu entre os estádios de maturação verde e cereja, para os valores de transmissibilidade de vibração observados para ambas as direções estudadas;
- Para a combinação entre a frequência de 55 Hz e amplitude de 6,5 mm para o estágio de maturação cereja, os valores de transmissibilidade observados foram maiores que 1,0; já para o estágio de maturação verde, essa combinação entre frequência e amplitude, foi a que apresentou as menores transmissibilidades, sendo uma faixa que poderia ser favorável seletividade dos frutos de café no momento da derriça.

4.5. Referências Bibliográficas

BALACHANDRAN , B. B.; MAGRAB, E. **Vibrações Mecânicas**. 2ª Edição, São Paulo: Editora Cengage, 2011, 640 p.

BRANDT, A. **Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures**. First edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 2011, 823 p.

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

ESPINOSA, B. G.; RODRÍGUEZ, A. M.; GUERRA, O. L. Búsqueda de modos de vibración apropiados para la cosecha selectiva del café. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2007.

GOMES, D.; FERRAZ, A. D. Mechanical behavior of ‘niagara rosada’ grape berry detachment. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6, p. 1115-1122, 2011.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônomicos e florestais**. Piracicaba: Editora FEALQ, 2002, 309p.

GONZALEZ R.; WOODS, R. **Processamento de Imagens Digitais**, São Paulo: Edgard Blücher, 2000, 509 p.

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. 44 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HELFRICK, M. N.; NIEZRECKI, C.; AVITABILE, P.; SCHMIDT, T. 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, p. 917–927, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Área, produção e rendimento.** Confronto das Safras de 2011 e das Estimativas para 2012. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201202_5.shtm>. Acesso em 14 de março de 2012.

JEON, H., CHOI, Y., PARK, J., PARK, J. W. Multi-point measurement of structural vibration using pattern recognition from camera image. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 42, n. 6, 2010.

MEIROVITCH, L. **Fundamental of Vibrations.** New York: McGraw Hill, 2001, 806p.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Aliasing and sampling at frequencies above the Nyquist frequency,** NI Documentation 2006. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3000>>. Acesso em 08 de abril de 2012.

PEZZY, F.; CAPRARA, C. Mechanical grape harvesting: Investigation of the transmission of vibrations. **Biosystems Engineering**, v. 1, n. 3, p. 281-286, 2009.

POLAT, R.; ACAR, I.; BILIM, H. I. C.; SAGLAM, R.; EROL, A. K. B. Determination of spring rigidity and fruit detachment force with respect to harvesting technique in pistachio nut trees. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 3, p. 532-537, 2011.

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

RODRÍGUEZ, A. M.; ESPINOSA, B. G.; GUERRA, O. L. Cálculo de la amplitud de la excitación requerida para la cosecha selectiva del café por vibración. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v. 16, n. 2, p. 1-6, 2007.

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

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

SAVARY, S. K. J. U.; EHSANI, R.; SALYANI, M.; HEBEL, M. A.; BORA, G. C. Study of force distribution in the citrus tree canopy during harvest using a continuous canopy shaker. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 76, p. 51-58, 2011.

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

SIEBERT, T.; CROMPTON, M. J. Application of High Speed Digital Image Correlation for Vibration Mode Shape Analysis. In: SEM Annual Conference, 2010, Indianapolis. **Proceedings...** Indianapolis, 2010, p. 1-8.

SILVA, F. M.; ARRÉ, T. J.; TOURINO, E. S.; GOMES, T. S.; ALVES, M. C. Uso de ethrel na colheita mecanizada e seletiva de café arábica (*Coffea arabica* L.). **Coffee Science**, v. 4, n. 2, p. 178-182, 2009.

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

CAPÍTULO 5 - ESTUDO DA DINÂMICA DO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO DO CAFÉ UTILIZANDO MODELAGEM DE CORPOS FLEXÍVEIS

5.1. Introdução

A seletividade dos frutos do café durante o processo de derriça depende do comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo. Modelos de simulação matemática são essenciais ao estudo do processo de derriça dos frutos do cafeeiro e podem contribuir de forma expressiva para a melhoria e desenvolvimento de máquinas e equipamentos.

A maioria dos objetos reais existentes tem rigidez suficiente o que permite a obtenção de resultados acurados em análises de dinâmica de corpos rígidos. Códigos de simulação dinâmica multicorpos são amplamente utilizadas, tais como na indústria automotiva, ferroviária e aeroespacial (BAUCHAU & RODRIGUEZ, 2002). No entanto, muitos sistemas existentes na natureza possuem flexibilidade fortemente pronunciada e devem ser consideradas no estudo da resposta dinâmica.

Muitas aplicações na engenharia requerem simulações de modelos de corpos flexíveis (manipuladores robóticos, rotores, aviões entre outros) dinamicamente acurados e computacionalmente acessíveis (SCHIAVO *et al.*, 2005). O pedúnculo do café possui flexibilidade acentuada, a qual pode variar ao longo do período da colheita, com a variedade e com a idade da planta de café. Esse fato pode conferir ao sistema fruto-pedúnculo do café uma dinâmica mais complexa durante o processo de derriça por vibração. No entanto a dinâmica de corpos flexíveis é computacionalmente muito mais intensa (RECKDAHL, 2012).

Uma das maneiras utilizadas para descrever a flexibilidade mecânica é a formulação de massa concentrada na qual um corpo flexível é representado por um conjunto de massas pontuais conectadas por molas. Esse tipo de abordagem não requer alterações nos *solvers* de modelagem de corpos rígidos, no entanto a medida que se aumenta a precisão requerida o desempenho decai, o que faz sua aplicação ser mais pronunciadas em estruturas de viga (KŁODOWSKI *et al.*, 2011).

Quanto utilizada estruturas de vigas um dos parâmetros mais importantes é a definição do módulo de elasticidade do material constituinte. O pedúnculo do café é formado por um material anisotrópico e suas propriedades de rigidez variam em relação ao sentido das fibras, assim como a madeira constituinte dos galhos e tronco do cafeeiro. Além disso, a umidade do pedúnculo pode influenciar significativamente nas propriedades de rigidez (LOGSDON, 1998).

Visto que há a necessidade de se entender o comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo do café e identificar parâmetros favoráveis à derrida dos frutos, objetivou-se com o presente trabalho analisar a dinâmica do sistema fruto-pedúnculo do café, submetido à vibração forçada, utilizando modelagem de corpos flexíveis.

5.2. Material e Métodos

As simulações computacionais foram realizadas para estudar os esforços atuantes na conexão entre o fruto e o pedúnculo do café, bem como a energia transmitida e força resultante no fruto quando o sistema é submetido à vibração harmônica.

Para a realização das simulações, foi utilizado o programa computacional *Working Model 2D*[®] (WM2D), o qual permitiu estudar de forma simplificada a resposta cinemática e dinâmica do sistema fruto-pedúnculo do café durante o processo de vibração forçada.

Idealizou-se um modelo composto por três partes principais – o ramo plagiotrópico, o pedúnculo e o fruto do café. O ramo plagiotrópico foi modelado como uma viga rígida de seção transversal circular uniforme ao longo de seu comprimento. O pedúnculo do café foi idealizado utilizando-se uma abordagem de modelagem de vigas flexíveis. O fruto de café foi modelado como um corpo rígido acoplado à extremidade do último elemento constituinte da viga flexível, representativa do pedúnculo do café, também por meio de uma mola torcional.

Vigas flexíveis são criadas no WM2D utilizando o *script Flexbeam*, o qual simula as características de flexibilidade pela discretização de uma viga rígida em uma quantidade de elementos, os quais são conectados por meio de molas torcionais.

Embora cada seção da viga seja um corpo rígido, as molas torcionais permitem ao sistema flexionar-se como um corpo flexível (RECKDAHL, 2012).

Na Figura 5.1 está apresentado um esquema representativo do ramo plagiotrópico do café (base - B_0) na qual o pedúnculo representado pela viga flexível discretizada em n corpos rígidos B_i ($i=1, \dots, n$), está engastado. O corpo B_i é conectado ao corpo B_{i+1} no ponto P_i por meio de uma mola torcional linear. A mola torcional restringe a flexão do pedúnculo nas direções transversais a linha que conecta P_i a P_{i+1} . O pedúnculo do café foi discretizado em quatro segmentos para a realização das simulações computacionais de forma a limitar modos de vibração mais complexos.

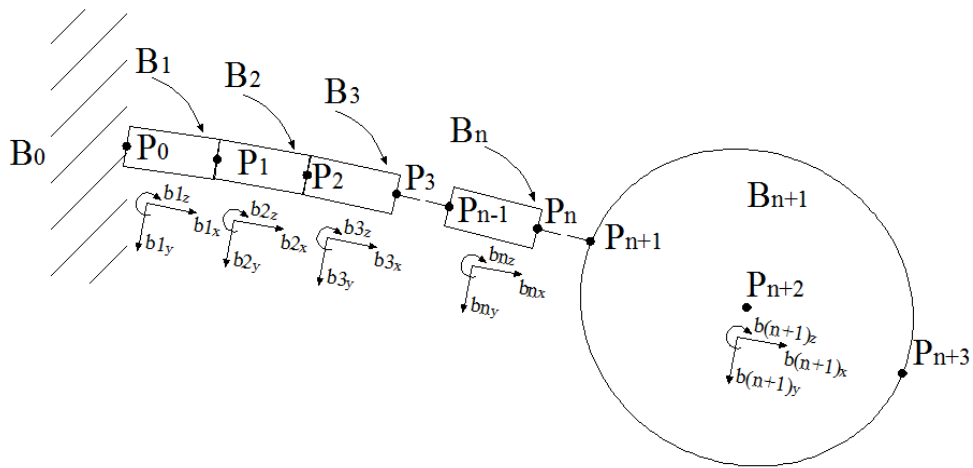


FIGURA 5.1 - Esquema representativo do sistema fruto-pedúnculo do café após a discretização do pedúnculo em uma viga flexível.

Cada elemento constituinte da viga flexível é caracterizado por sua rigidez flexional a qual é definida pelo produto entre o módulo de elasticidade do material e o momento de inércia da maior seção transversal do pedúnculo (Equação 5.1).

$$R_{flexional} = EI \quad (5.1)$$

em que,

$R_{flexional}$ = rigidez flexional do elemento, $N\ m^2$;

E = módulo de elasticidade do pedúnculo do café, $N\ m^2$;

I = momento de inércia da seção transversal do pedúnculo do café, m^4 .

As constantes de rigidez das molas torcionais foram definidas em função do material, das características geométricas da seção do segmento de viga e da posição do elemento ao longo do comprimento da viga flexível. Mitiguy & Banerjee (2000) apresentaram o equacionamento, para determinação das constantes de rigidez das molas para uma viga flexível, utilizada no WM2D. Para o elemento da viga flexível disposto no engastamento com a base e com o fruto de café a constante de rigidez é dada pela Equação 5.2 e para as molas intermediárias pela Equação 5.3. Em todas as simulações o amortecimento do sistema foi desprezado.

$$K_{\varphi 1} = \frac{EI}{L} \left(\frac{6N}{3N - 1} \right) \quad (5.2)$$

$$K_{\varphi i} = \frac{EI}{L} \quad (5.3)$$

em que,

$K_{\varphi 1}$ = constante de rigidez da mola torcional engastada ao ramo e ao fruto do café, N m rad⁻¹;

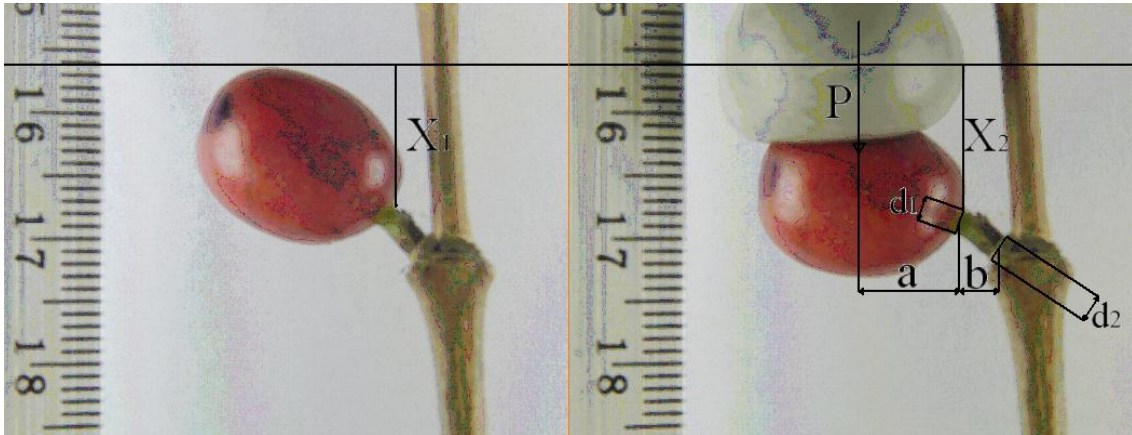
$K_{\varphi i}$ = constante de rigidez das molas intermediárias, N m rad⁻¹;

N = número de elementos discretizados;

L = comprimento de cada elemento discretizado, m;

E = módulo de elasticidade do pedúnculo do café, N m².

O módulo de elasticidade foi determinado experimentalmente para 10 amostras do sistema fruto-pedúnculo do café por meio de imagens digitais. O módulo de elasticidade (Módulo de Young) dos pedúnculos foi determinado aplicando-se uma carga P conhecida aos frutos e medindo-se a deformação produzida ($\Delta x = x_2 - x_1$), em relação a um ponto fixo localizado na união entre o fruto e o pedúnculo (Figura 5.2).



P = carga aplicada; X_1 = posição inicial do pedúnculo; X_2 = posição do pedúnculo após aplicação da carga; b = distância entre o engastamento do pedúnculo ao ramo e ao fruto; a = distância entre o engastamento do pedúnculo ao fruto e o ponto de aplicação da carga; d_1 e d_2 = diâmetros medidos no pedúnculo do café.

FIGURA 5.2 - Esquema representativo para determinação do módulo de elasticidade dos pedúnculos do café .

Após serem obtidos os valores da deformação, o módulo de elasticidade foi calculado por meio da Equação 5.4 (RODRÍGUEZ *et al.*, 2006).

$$E = \frac{2Pb^3 + 3Pab^2}{2I\Delta x} \quad (5.4)$$

em que,

E = módulo de elasticidade do pedúnculo, N m²;

P = carga aplicada, N;

b = distância entre o engastamento do pedúnculo ao ramo e ao fruto, m;

a = distância entre o engastamento do pedúnculo ao fruto e o ponto de aplicação da carga, m;

I = momento de inércia do pedúnculo (considerando o diâmetro médio), m⁴;

Δx = deformação, m.

O momento de inércia do pedúnculo foi calculado com base no diâmetro médio da seção transversal para cada estágio de maturação estudado. A massa do pedúnculo e do segmento de ramo plagiotrópico do café foi calculada pelo produto da massa específica do material e o volume do corpo, determinado com base nas dimensões médias. Foi utilizada a massa específica do pedúnculo e do ramo plagiotrópico do café com referência aos valores obtidos por Filgueiras (2002), sendo de 1015,6 kg m⁻³. A

massa dos frutos foi tomada como referência os valores obtidos experimentalmente no Capítulo 3 do presente trabalho sendo de $1,22 \times 10^{-3}$ e $0,94 \times 10^{-3}$ kg, para os estádios de maturação cereja e verde, respectivamente.

Outra entrada para as simulações foi o momento de inércia de massa dos corpos constituintes do sistema. O momento de inércia de massa foi calculado para o fruto do café considerando o mesmo como uma elipsoide, para o pedúnculo e o segmento do ramo plagiotrópico do café o momento de inércia de massa foi calculado considerando um corpo cilindro relativo ao eixo perpendicular à sua geratriz. Foram utilizadas as dimensões médias obtidas experimentalmente no Capítulo 3 do presente trabalho.

Utilizou-se um modelo padrão para o sistema fruto-pedúnculo do café com as dimensões médias, para os estádios de maturação cereja e verde, apresentadas na Tabela 5.1. Foram utilizadas amostras de café arábica, variedade Catuai Vermelho, colhidas na região de Viçosa-MG, Brasil, na safra de 2010, para determinação das propriedades geométricas. Na Figura 5.3 está apresentado um esquema representativo do sistema fruto-pedúnculo café bem como os demais componentes utilizados nas simulações computacionais.

TABELA 5.1 - Dimensões médias (mm) da geometria padrão do sistema fruto-pedúnculo do café para os estádios de maturação cereja e verde (Safra 2010)

Dimensão	Estádio de maturação	
	Cereja	Verde
Diâmetro do pedúnculo (mm)	2,52	2,45
Comprimento do pedúnculo (mm)	4,38	6,00
Comprimento do fruto (mm)	17,19	15,40
Diâmetro equatorial do fruto (mm)	13,77	11,95
Comprimento do ramo (mm)	50,00	50,00
Diâmetro médio do ramo (mm)	5,00	5,00

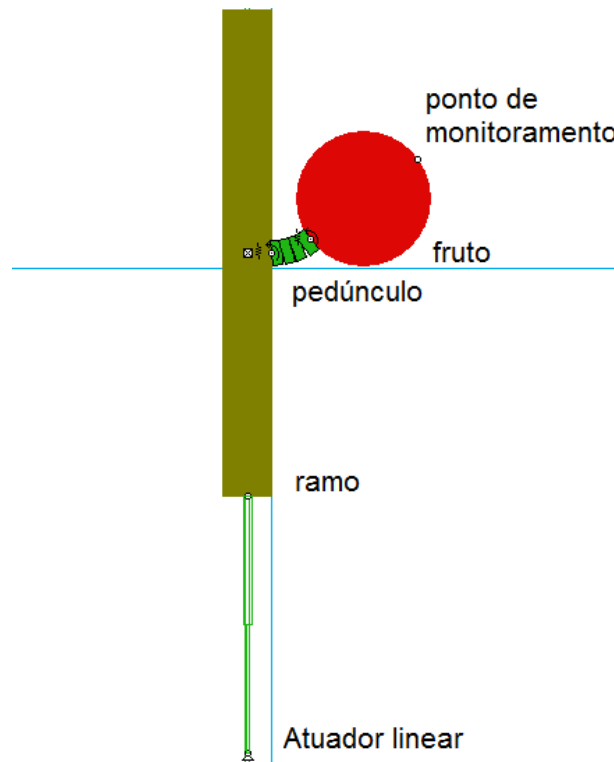


FIGURA 5.3 - Representação esquemática do sistema fruto-pedúnculo do café utilizado nas simulações computacionais no WM2D.

O modelo visou representar a deslocamento aplicado pela base móvel de um vibrador eletromagnético, similarmente aos ensaios de vibração realizados no Capítulo 4 do presente trabalho. A excitação aplicada ao sistema fruto-pedúnculo do café foi um deslocamento senoidal no qual a frequência e a amplitude de vibração foram os parâmetros de entrada. Para a aplicação do deslocamento foi criada uma junta deslizante junto ao ramo plagiotrópico do café e ao mesmo foi acoplado um atuador linear o qual gerou o deslocamento de saída. Na Tabela 5.2 estão apresentados os valores das combinações entre as frequências e as amplitudes de vibração utilizadas para avaliação do processo de derriça. As combinações são as mesmas utilizadas durante os ensaios de vibração para determinação da transmissibilidade de vibração no sistema fruto-pedúnculo do café no Capítulo 4 do presente trabalho.

TABELA 5.2 - Combinações entre frequências e amplitudes de vibração utilizadas nas simulações computacionais para avaliação do processo de derriça

Frequências (Hz)	Amplitude (mm)
13,33; 20,00 e 26,67	5,00; 10,00 e 15,00
35,00; 45,00 e 55,00	6,50; 5,00 e 6,50

A integração numérica no tempo foi realizada por meio do método de Kutta-Merson o qual tem como uma das principais vantagens a estabilidade da integração, no entanto com relativo custo computacional (FITZPATRICK, 2006). Utilizou-se um controle adaptativo do tamanho do passo de integração. Quando o passo de integração é definido como variável o programa computacional escolhe os passos de integração mais apropriados e monitora os erros de simulações automaticamente.

Monitorou-se o deslocamento na extremidade livre do fruto durante as simulações e este foi utilizado como referência para validação dos modelos implementados. Para validação do modelo idealizado foram comparados os deslocamentos simulados da extremidade livre do fruto de café com os deslocamentos obtidos experimentalmente durante os ensaios de vibração, conduzidos para determinação da transmissibilidade de vibração (Capítulo 4).

Foi utilizada uma amostra para cada combinação entre frequência e amplitude de vibração trabalhada, nos estádios de maturação cereja e verde. Para cada curva de deslocamento resultante foi determinado o desvio médio entre a curva experimental e a simulada, com base na média dos desvios de cinco picos de deslocamentos consecutivos. Além disso, a forma das curvas foi resultante foi analisada quanto a forma e a presença de fenômenos de batimento e soma de harmônicos.

Após a validação do modelo, foram estimados o torque transmitido e a força resultante na mola torcional posicionada na ligação entre o fruto e o pedúnculo do café, expressos em valor eficaz ou RMS. Também foi determinada a força no centro de gravidade, representada por meio de seu valor “pico-a-pico”, e a energia cinética translacional do fruto de café, dada por seu valor máximo, para todas as combinações entre frequência e amplitude de vibração de entrada, trabalhadas.

A energia cinética no fruto de café estimada por meio do modelo foi comparada a energia de entrada (Tabela 5.3), a qual foi calculada com base no trabalho realizado em cada combinação entre frequência e amplitude de vibração de entrada e considerando a massa média observada para os frutos de café nos estádios de maturação cereja e verde.

TABELA 5.3 - Energia de entrada imposta ao sistema fruto-pedúnculo do café durante os ensaios de vibração considerando a massa média dos frutos de café por ciclo de vibração

Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Energia (J)	
		Estádio de Maturação	
		Cereja	Verde
13,33	5,00	0,000214	0,000170
13,33	10,00	0,000856	0,000680
13,33	15,00	0,001926	0,001531
20,00	5,00	0,000482	0,000383
20,00	10,00	0,001927	0,001532
20,00	15,00	0,004335	0,003447
26,67	5,00	0,000856	0,000681
26,67	10,00	0,003426	0,002724
26,67	15,00	0,007708	0,006129
35,00	3,50	0,000723	0,000575
35,00	5,00	0,001475	0,001173
35,00	6,50	0,002493	0,001982
45,00	3,50	0,001195	0,000950
45,00	5,00	0,002438	0,001939
45,00	6,50	0,004121	0,003276
55,00	3,50	0,001785	0,001419
55,00	5,00	0,003642	0,002896
55,00	6,50	0,006156	0,004894

Por meio dos resultados buscou identificar as faixas de frequência e amplitude de vibração que proporcionam maiores esforços no sistema considerando que quanto maiores os valores obtidos, maior seria a facilidade de desprendimento do fruto de café no momento da derriça mecânica realizada por meio de vibração forçada.

5.3. Resultados e Discussão

Durante as simulações computacionais foram determinados os deslocamentos do sistema fruto-pedúnculo do café com base na extremidade livre do fruto e estes foram comparados às determinações experimentais utilizando vídeos de alta velocidade. Todos os parâmetros de entrada do programa relativos ao sistema fruto-pedúnculo do café, estádios de maturação cereja e verde, estão apresentados na Tabela 5.4.

TABELA 5.4 - Parâmetros de entrada do modelo implementado no programa computacional WM2D para representar o sistema fruto-pedúnculo de café

Parâmetros de entrada		Estádios de maturação	
Pedúnculo	Unidade	Cereja	Verde
Módulo de elasticidade (E)	(Pa)	$8,12 \times 10^6$	$1,69 \times 10^7$
Diâmetro da seção (d_p)	(m)	$2,52 \times 10^{-3}$	$2,45 \times 10^{-3}$
Comprimento (c_p)	(m)	$4,38 \times 10^3$	$6,00 \times 10^{-3}$
Momento de inércia da seção (I)	(m^4)	$1,98 \times 10^{-12}$	$1,77 \times 10^{-12}$
Rigidez flexional (EI)	($N m^2$)	$1,61 \times 10^{-5}$	$2,99 \times 10^{-5}$
Área da seção (a_p)	(m^2)	$4,99 \times 10^{-6}$	$4,71 \times 10^{-6}$
Volume (v_p)	(m^3)	$2,18 \times 10^{-8}$	$2,83 \times 10^{-8}$
Massa específica (ρ_p) *	($kg m^{-3}$)	1015,60	1015,60
Massa (m_p)	(kg)	$2,22 \times 10^{-5}$	$2,87 \times 10^{-5}$
Momento de inércia (I_p)	($kg m^2$)	$4,43 \times 10^{-11}$	$9,70 \times 10^{-11}$
Fruto			
Comprimento (c_f)	(m)	$1,72 \times 10^{-2}$	$1,54 \times 10^{-2}$
Massa (m_f)	(kg)	$1,22 \times 10^{-3}$	$9,40 \times 10^{-4}$
Momento de inércia (I_f)	($kg m^2$)	$1,19 \times 10^{-7}$	$7,14 \times 10^{-8}$
Ramo			
Comprimento (c_g)	(m)	50×10^{-3}	50×10^{-3}
Área da seção (a_g)	(m^2)	$1,96 \times 10^{-5}$	$1,96 \times 10^{-5}$
Volume (v_g)	(m^3)	$9,82 \times 10^{-7}$	$9,82 \times 10^{-7}$
Massa específica (ρ_p) *	($kg m^{-3}$)	1015,60	1015,60
Massa (m_g)	(kg)	$9,97 \times 10^{-4}$	$9,97 \times 10^{-4}$
Momento de inércia (I_g)	($kg m^2$)	$2,09 \times 10^{-4}$	$2,09 \times 10^{-4}$

* Massa específica da madeira do cafeeiro por Filgueiras (2002);

Os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade determinados experimentalmente (Tabela 5.4), na safra de 2010, foram de $8,12 \times 10^6$ e $1,69 \times 10^7 N m^2$ para os estádios de maturação cereja e verde, respectivamente, sendo considerados estatisticamente diferentes pelo teste t, ao nível de 5% de probabilidade ($t_{calculado}=2,12 > t_{tabelado} = 1,81$). Os coeficientes de variação associado foram de 87,5 e 65,4%, considerados elevados segundo Gomes & Garcia (2000). Esse fato pode estar associado ao número reduzido de amostras utilizadas para a determinação desse parâmetro e a variabilidade inerente da planta de café. O valor do módulo de elasticidade, obtido para o estágio de maturação cereja, ficou próximo ao valor obtido por Rodriguez *et al.* (2006), no entanto o autor encontrou valores para o estágio de maturação verde inferiores ao cereja. Já quando comparados aos valores determinados

por Young & Fridley (1974), de $26,06 \times 10^9$ e $31,03 \times 10^9$ N m², os valores obtidos, na safra de 2010, foram inferiores.

Os desvios entre os deslocamentos experimentais e os deslocamentos simulados para as frequências de vibração de 13,33; 20,00 e 26,67 Hz combinadas às amplitudes de vibração de 5, 10 e 15 mm estão apresentados na Tabela 5.5. Nessa faixa trabalhada a melhor aproximação foi observada para a frequência de 13,33 Hz, com um desvio médio de 10,53%. Os maiores desvios foram observados para as frequências de 20,00 e 26,67 Hz.

TABELA 5.5 - Comparativo entre os valores experimentais de deslocamentos “pico-a-pico” e valores simulados para o sistema fruto-pedúnculo do café para as frequências de vibração de 13,33; 20,00 e 26,67 Hz e amplitudes de vibração de 5, 10 e 15 mm.

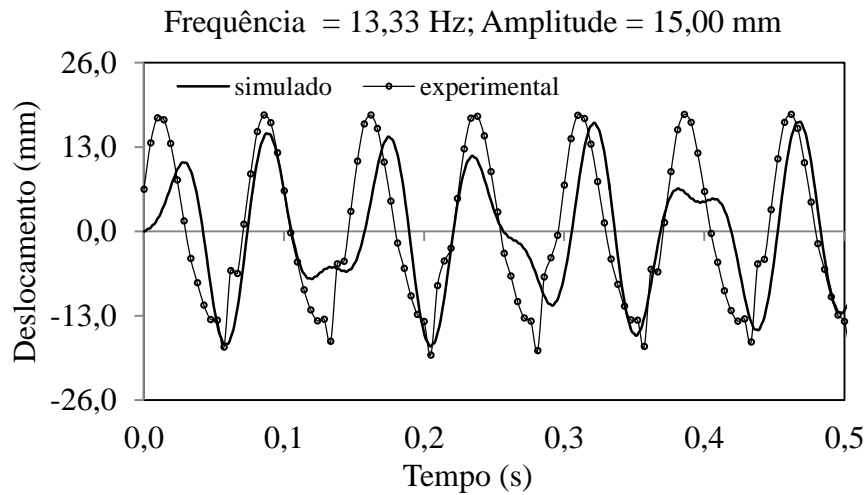
F (Hz) / A (mm)	Estádio de maturação	Deslocamento “pico-a-pico” (mm)		Desvio (%)	Desvio médio (%)
		Experimental	Simulado		
13,33 / 5,00	Cereja	7,98	8,92	11,78	23,23
	Verde	15,43	9,55	38,09	
13,33 / 10,00	Cereja	21,67	17,17	20,78	
	Verde	16,24	17,67	8,62	
13,33 / 15,00	Cereja	35,60	26,72	24,94	
	Verde	41,64	27,20	35,16	
20,00 / 5,00	Cereja	23,10	30,81	33,40	40,44
	Verde	19,18	29,19	52,20	
20,00 / 10,00	Cereja	32,17	35,40	10,05	
	Verde	20,62	33,67	63,27	
20,00 / 15,00	Cereja	38,09	40,61	6,62	
	Verde	24,40	43,21	77,10	
26,67 / 5,00	Cereja	8,76	8,70	0,68	92,77
	Verde	11,26	12,30	9,24	
26,67 / 10,00	Cereja	7,11	14,00	96,82	
	Verde	11,16	17,20	54,09	
26,67 / 15,00	Cereja	30,60	39,50	29,10	
	Verde	10,00	46,60	366	

F = frequência de vibração; A = amplitude de vibração.

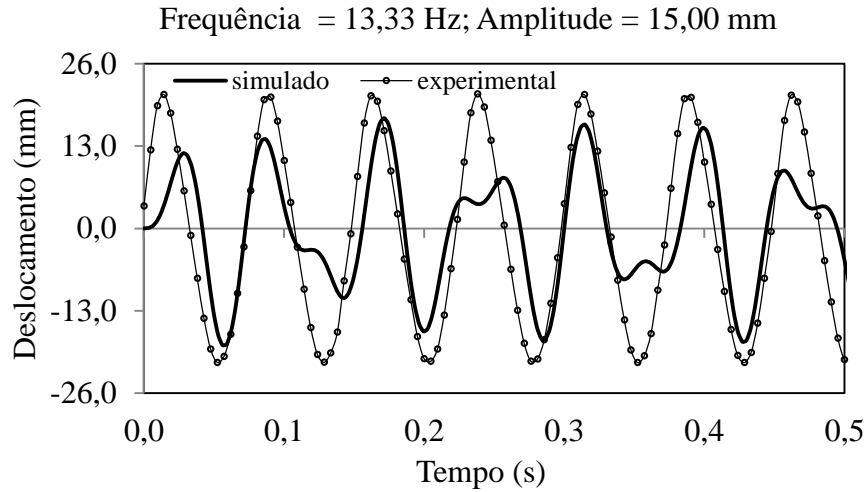
Exceto para a amostra de 26,67 Hz associada a 5,00 mm a amplitude “pico-a-pico” simulada foi menor que a experimental, todas as outras combinações apresentaram maiores valores simulados do que experimentais (Tabela 5.5). Isso pode estar associado ao fato de que o amortecimento foi desprezado fazendo com que as amplitudes simuladas fossem maiores que as experimentais. O desvio acentuado para a

frequência de 26,67 Hz foi devido a sua combinação com a amplitude de 15,00 mm. Esse resultado pode ser função da configuração geométrica do sistema.

Nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 estão apresentados os deslocamentos simulados *versus* experimentais obtidos para o sistema fruto-pedúnculo do café para frequências de vibração de 13,33; 20,00 e 26,67 Hz combinadas à amplitude de 15 mm, para os estádios de maturação cereja e verde.



(a)



(b)

FIGURA 5.4 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 13,33 Hz e amplitude de 15,00 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.

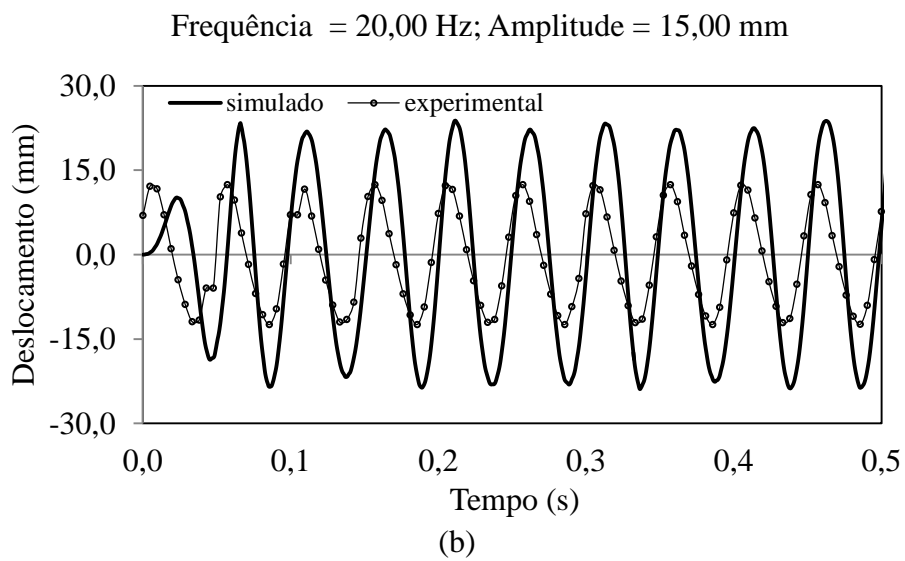
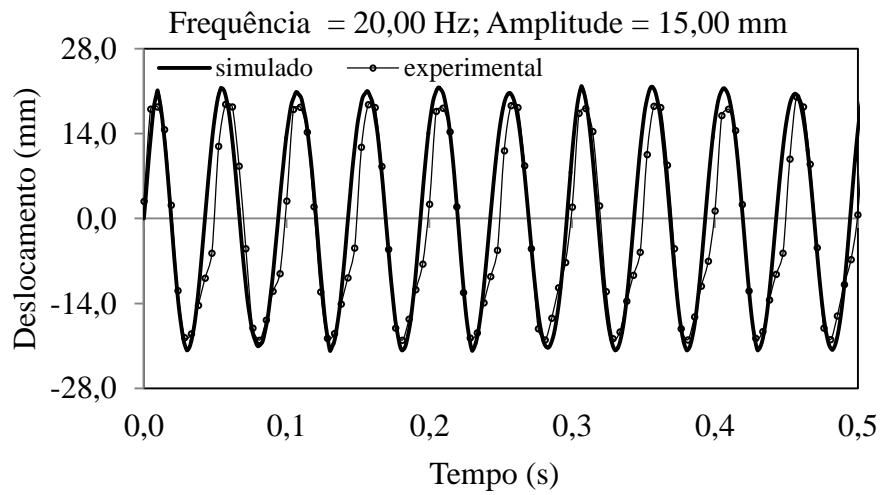
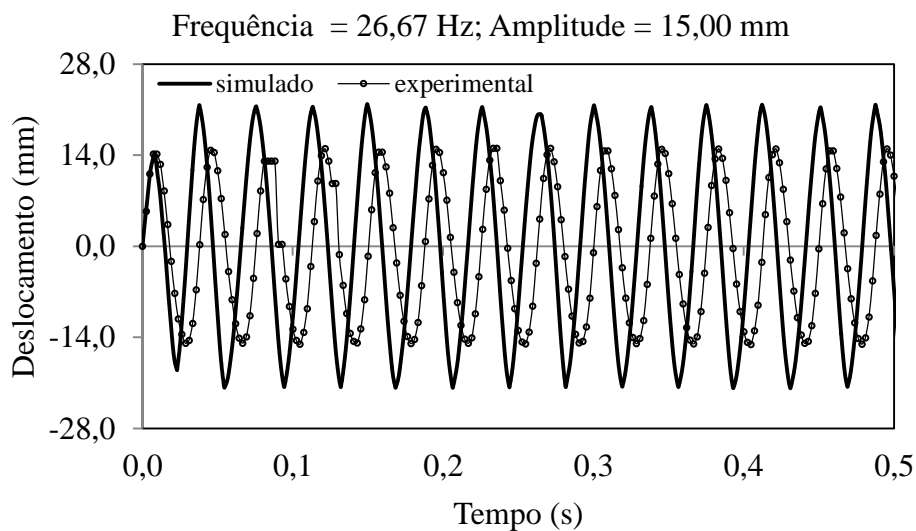
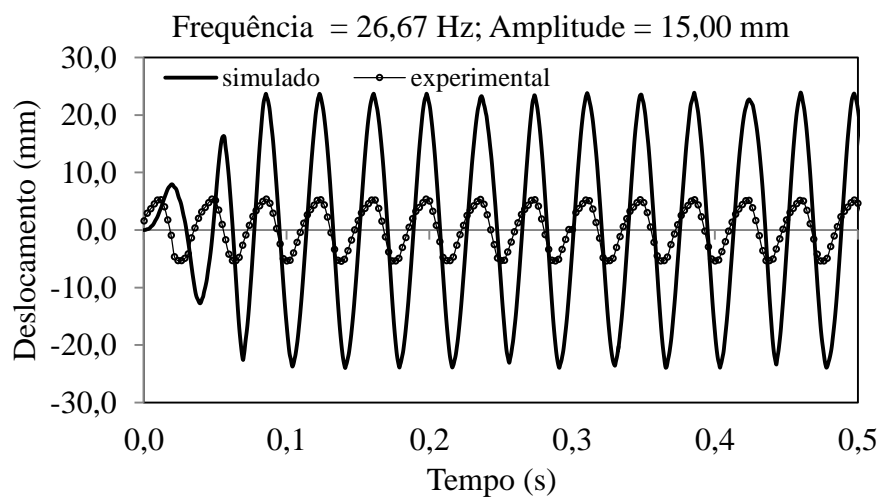


FIGURA 5.5 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 20,00 Hz e amplitude de 15,00 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.



(a)



(b)

FIGURA 5.6 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 26,67 Hz e amplitude de 15,00 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.

Na Tabela 5.6 estão apresentados os desvios para as frequências de vibração de 35; 45 e 55 Hz combinadas às amplitudes de vibração de 3,5; 5,0 e 6,5 mm. Para a faixa de frequência de vibração entre 35 e 55 Hz e amplitudes entre 3,5 e 6,5 mm quando comparados somente os picos de deslocamentos houve um ajuste razoável, no entanto a frequência de resposta foi menor que a frequência de entrada o que fica evidente nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 nas quais estão apresentados os deslocamentos simulados *versus* experimentais obtidos para o sistema fruto-pedúnculo do café, para os estádios de maturação cereja e verde.

TABELA 5.6 - Comparativo entre os valores experimentais de deslocamentos “pico-a-pico” e valores simulados computacionalmente para o sistema fruto-pedúnculo do café, para as frequências de vibração de 35; 45 e 55 Hz e amplitudes de vibração de 3,5; 5,0 e 6,5 mm.

F (Hz) / A (mm)	Estádio de maturação	Deslocamento “pico-a-pico” (mm)		Desvio (%)	Desvio médio (%)
		Experimental	Simulado		
35,0 / 3,5	Cereja	2,82	2,84	0,71	14,02
	Verde	5,51	4,52	17,97	
35,0 / 5,0	Cereja	3,10	3,68	18,84	
	Verde	8,46	6,31	25,41	
35,0 / 6,5	Cereja	5,00	4,72	5,60	
	Verde	8,12	6,86	15,58	
45,0 / 3,5	Cereja	2,90	3,32	14,48	21,49
	Verde	3,12	2,77	11,14	
45,0 / 5,0	Cereja	4,05	2,40	40,74	
	Verde	2,96	3,26	10,06	
45,0 / 6,5	Cereja	4,94	3,05	38,30	
	Verde	5,19	4,45	14,19	
55,0 / 3,5	Cereja	1,73	1,63	5,78	36,52
	Verde	3,94	1,99	49,49	
55,0 / 5,0	Cereja	1,52	2,00	31,84	
	Verde	4,50	2,78	38,22	
55,0 / 6,5	Cereja	5,49	2,62	52,20	
	Verde	2,43	3,44	41,56	

F = frequência de vibração; A = amplitude de vibração.

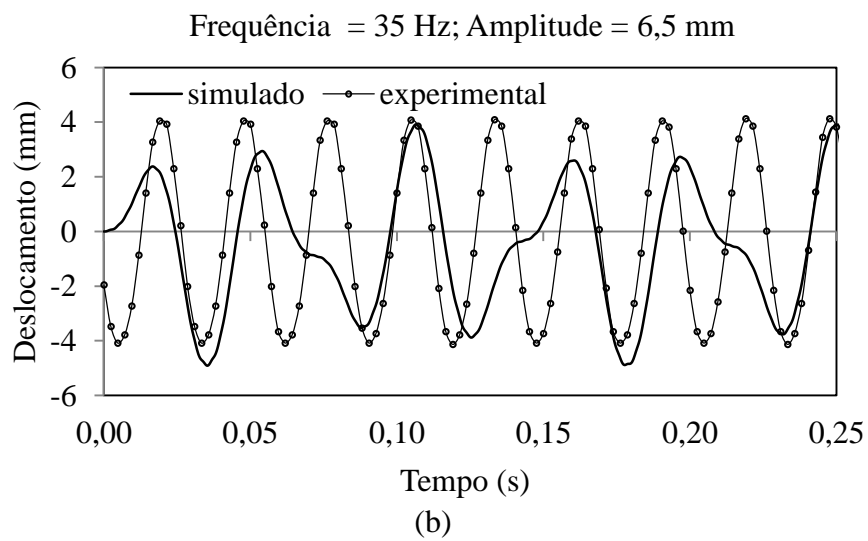
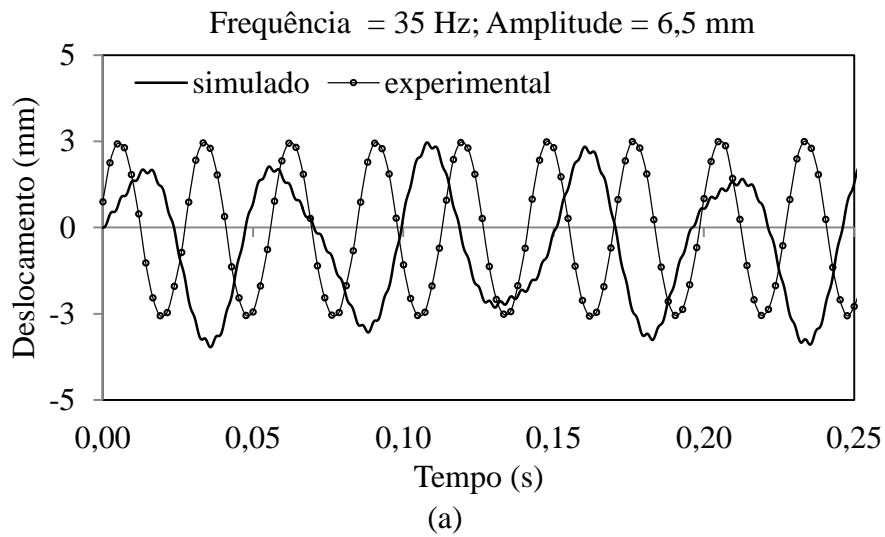


FIGURA 5. 7 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 35 Hz e amplitude de 6,5 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.

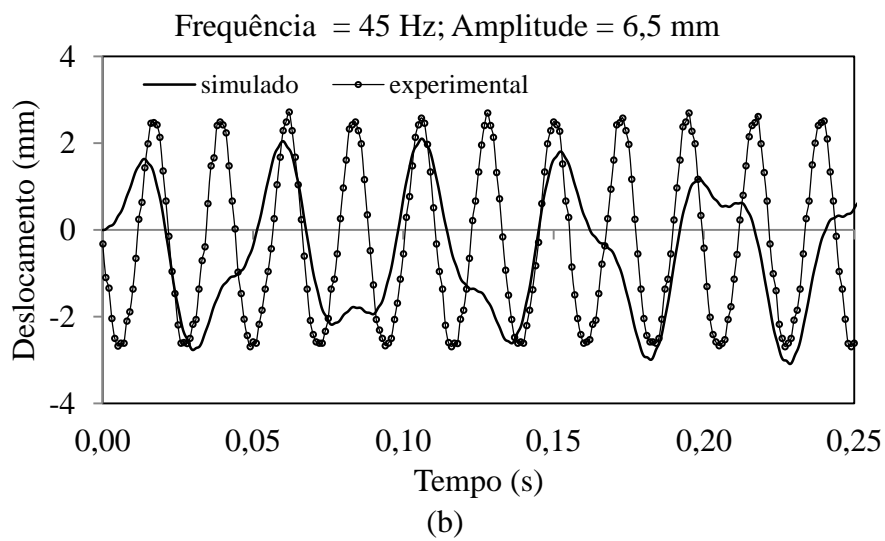
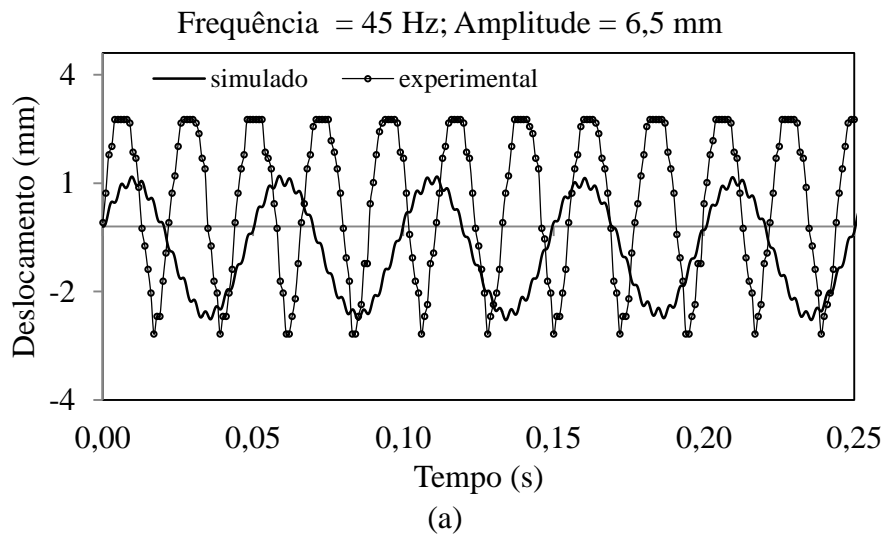


FIGURA 5.8 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 45 Hz e amplitude de 6,5 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.

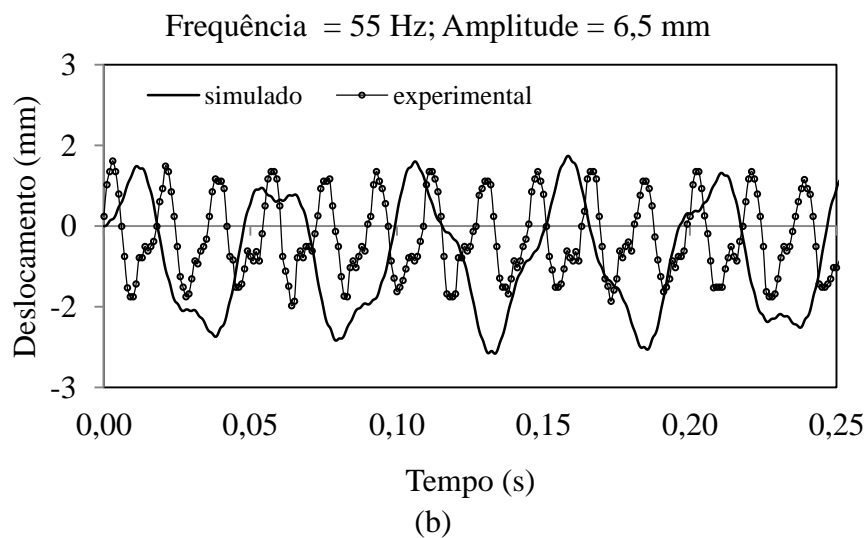
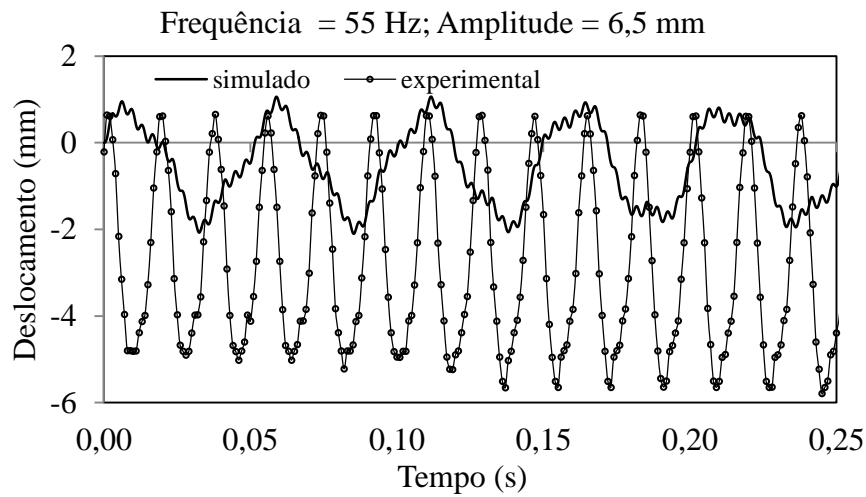


FIGURA 5.9 - Deslocamento resultante do sistema fruto-pedúnculo do café (simulado e experimental) para a combinação entre a frequência de 55 Hz e amplitude de 6,5 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.

A menor frequência verificada na extremidade livre do fruto do café, no modelo proposto, pode estar associada ao modo de vibração nessa faixa de frequência e a discretização empregada para representar o pedúnculo do café. Modos de vibração mais complexos apresentam nós estacionários ao longo do sistema. Se o ponto de referência estiver próximo a um nó estacionário do modo de vibração as frequências de vibração tendem a diminuir. Esse fato pode ser confirmado quando o monitoramento da vibração é realizado no ponto de engastamento entre o fruto e o pedúnculo do café. Além disso, o número de graus de liberdade do modelo o torna mais simples, possibilitando apenas a

análise de vibrações laterais. Para frequências mais elevadas, modos de vibração torcionais podem ser encontrados.

Nas Figuras 5.10 e 5.11 estão apresentados os deslocamentos monitorados na ligação entre o fruto e o pedúnculo, para as frequências de vibração de 35 e 55 Hz, associadas à amplitude de entrada de 6,5 mm, para ambos os estádios de maturação. Nota-se para ambos os estádios de maturação, a frequência de vibração na ligação entre o fruto e o pedúnculo é a mesma frequência de excitação imposta ao sistema. Essa observação ajuda a expor a complexidade de modo de vibração em frequências mais elevadas.

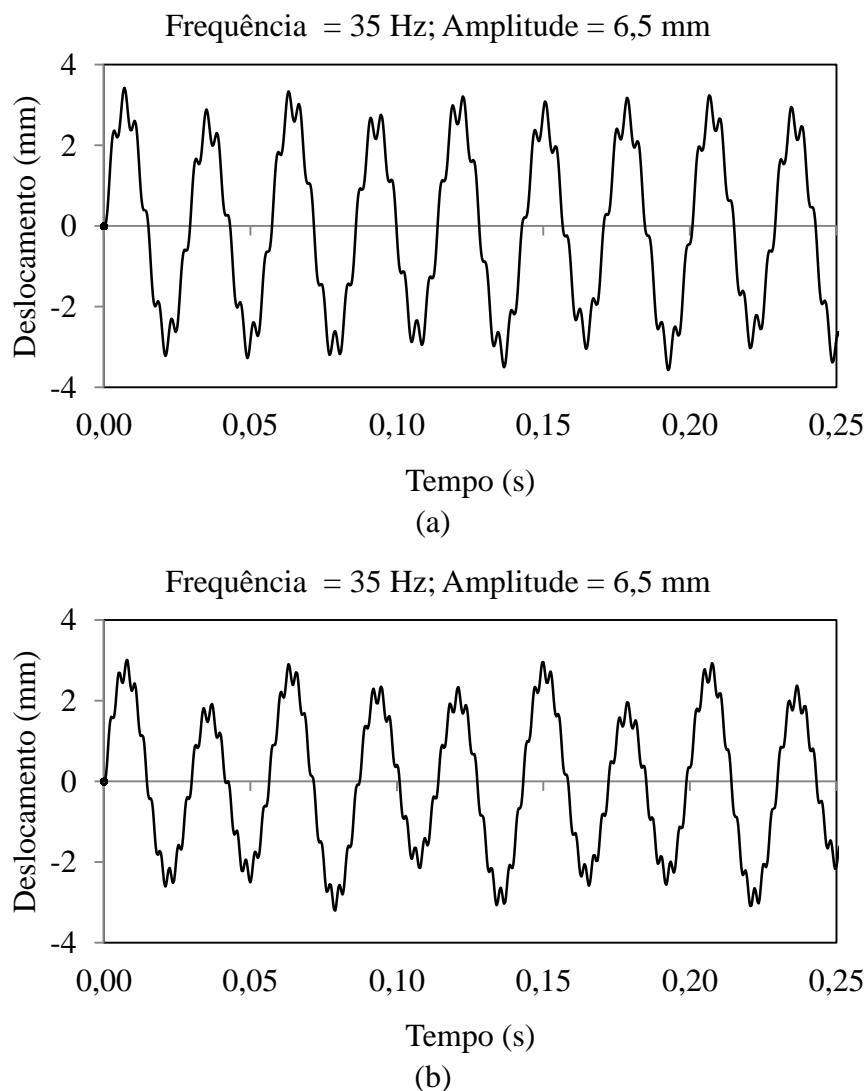
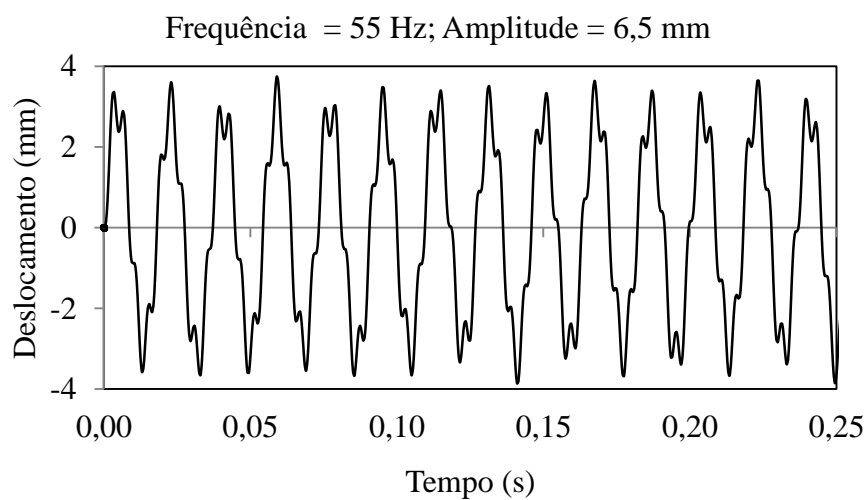
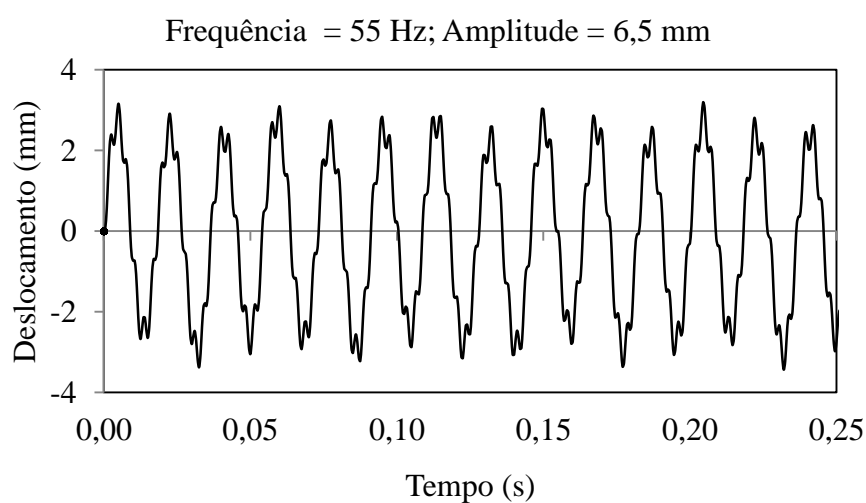


FIGURA 5. 10 - Deslocamento simulado na ligação entre o fruto e o pedúnculo do café para a combinação entre a frequência de 35 Hz e amplitude de 6,5 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.



(a)



(b)

FIGURA 5. 11 - Deslocamento simulado na ligação entre o fruto e o pedúnculo do café para a combinação entre a frequência de 55 Hz e amplitude de 6,5 mm, estágio de maturação: (a) cereja e (b) verde.

O desvio médio global entre os deslocamentos experimentais e simulados considerando todas as amostras trabalhadas foi de 35,90%. Quando comparados os picos de amplitude, o incremento da frequência de excitação aumentou os desvios observados entre os deslocamentos simulados e experimentais (Tabelas 5.5 e 5.6). Houve uma variação muito acentuada do módulo de elasticidade determinado o que pode ter contribuído para um incremento nos desvios observados. Além disso, propriedades geométricas do sistema fruto-pedúnculo do café, tais como comprimento e diâmetro do pedúnculo influenciam significativamente na rigidez do sistema.

Os valores estimados para a força e o torque na ligação entre o fruto e o pedúnculo do café estão apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8, respectivamente. Nota-se que tanto a força quanto o torque apresentaram os maiores valores para as frequências de 20,00 e 26,67 Hz; sendo essas frequências próximas à primeira frequência natural estimada por Santos (2008) para o sistema fruto-pedúnculo do café, de 19,86 e 23,21 Hz, para os estádios de maturação cereja e verde, respectivamente.

TABELA 5.7 - Força_(RMS) (N) estimada na ligação fruto-pedúnculo do café por meio do modelo idealizado no WM2D, para os estádios de maturação cereja e verde, em função da frequência e amplitude de vibração de entrada

Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Estádio de maturação		Diferença (%)
		Cereja	Verde	
13,33	5,00	0,18	0,11	38,89
13,33	10,00	0,37	0,24	35,14
13,33	15,00	0,57	0,40	29,82
20,00	5,00	11,69	18,31	56,63
20,00	10,00	16,78	20,97	24,97
20,00	15,00	21,28	21,05	1,08
26,67	5,00	0,37	0,26	29,73
26,67	10,00	0,76	3,35	340,79
26,67	15,00	35,32	27,63	21,77
35,00	3,50	0,33	0,21	36,36
35,00	5,00	0,49	0,32	34,69
35,00	6,50	0,64	0,42	34,38
45,00	3,50	0,44	0,27	38,64
45,00	5,00	0,64	0,40	37,50
45,00	6,50	0,84	0,57	32,14
55,00	3,50	0,55	0,34	38,18
55,00	5,00	0,81	0,53	34,57
55,00	6,50	1,09	0,67	38,53

A maior diferença, para a força, entre os estádios de maturação, foi observada para a combinação entre 26,67 Hz e 10,00 mm, já para o torque a maior diferença foi para a combinação entre 20,00 Hz e 15,00 mm (Tabelas 5.7 e 5.8). A frequência de 20 Hz foi a que apresentou maiores valores de transmissibilidade de vibração para ambos os estádios de maturação sendo os resultados apresentados no Capítulo 4. Pode-se observar pelas Tabelas 5.7 e 5.8 que mesmo trabalhando com altas frequências a força e o torque na ligação fruto-pedúnculo do café não foi elevado, evidenciando a importância da amplitude de vibração e das faixas de ressonância para os esforços resultantes. Esse fato pode explicar os baixos valores de eficiência de derriça (em torno

de 40%) encontrados por Guedes (2011) quando trabalhou com frequências entre 35 e 55 Hz e amplitudes entre 3,5 e 6,5 mm.

TABELA 5.8 - Torque_(RMS) (N mm) estimado na ligação fruto-pedúnculo do café por meio do modelo idealizado no WM2D, para os estádios de maturação cereja e verde, em função da frequência e amplitude de vibração de entrada

Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Estádio de maturação		Diferença (%)
		Cereja	Verde	
13,33	5,00	0,57	0,61	7,02
13,33	10,00	1,11	1,17	5,41
13,33	15,00	1,65	1,73	4,85
20,00	5,00	2,29	2,83	23,58
20,00	10,00	2,69	3,69	37,17
20,00	15,00	2,91	4,19	43,99
26,67	5,00	1,27	1,70	33,86
26,67	10,00	2,40	2,85	18,75
26,67	15,00	3,86	4,75	23,06
35,00	3,50	0,88	0,88	0,00
35,00	5,00	1,25	1,24	0,80
35,00	6,50	1,62	1,59	1,85
45,00	3,50	1,07	0,96	10,28
45,00	5,00	1,53	1,36	11,11
45,00	6,50	1,98	1,76	11,11
55,00	3,50	1,30	1,13	13,08
55,00	5,00	1,86	1,60	13,98
55,00	6,50	2,41	2,06	14,52

Os valores estimados para a força resultante no centro de gravidade do fruto de café e a energia cinética estão apresentados nas Tabelas 5.9 e 5.10, respectivamente, em função de todas as combinações entre frequências e amplitudes de vibração estudadas. Nota-se que a força resultante no fruto de café para ambos os estádio de maturação teve o maior valor observado para a frequência de 26,67 Hz associada às amplitudes de 10 mm. Essa combinação proporcionou grandes impactos do fruto ao ramo plagiotrópico de café, visualizado nas simulações, o que pode ter gerado os valores elevados de força.

TABELA 5.9 - Força resultante (N) no fruto de café para os estádios de maturação cereja e verde, em função da frequência e amplitude de vibração de entrada

Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Estádio de maturação		Diferença (%)
		Cereja	Verde	
13,33	5,00	0,293174	0,396278	-35,17
13,33	10,00	0,806064	0,563876	30,05
13,33	15,00	1,26995	1,156783	8,91
20,00	5,00	130,661	108,7392	16,78
20,00	10,00	198,371	164,117	17,27
20,00	15,00	184,896	341,5798	-84,74
26,67	5,00	0,842116	0,53901	35,99
26,67	10,00	1,557844	261,2921	-16672,66
26,67	15,00	321,079	669,3807	-108,48
35,00	3,50	0,627616	0,729269	-16,20
35,00	5,00	1,078391	0,926873	14,05
35,00	6,50	1,751316	1,368509	21,86
45,00	3,50	0,839895	0,787611	6,23
45,00	5,00	1,866166	1,24161	33,47
45,00	6,50	2,20383	1,959335	11,09
55,00	3,50	1,303461	1,123556	13,80
55,00	5,00	1,975255	1,910769	3,26
55,00	6,50	3,794044	2,732898	27,97

TABELA 5.10 - Energia cinética (J) no fruto de café para os estádios de maturação cereja e verde, em função da frequência e amplitude de vibração de entrada

Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Estádio de maturação		Diferença (%)
		Cereja	Verde	
13,33	5,00	0,000203	0,000237	-16,75
13,33	10,00	0,000792	0,00093	-17,42
13,33	15,00	0,001737	0,002059	-18,54
20,00	5,00	0,002718	0,004678	-72,11
20,00	10,00	0,003425	0,005438	-58,77
20,00	15,00	0,004046	0,007094	-75,33
26,67	5,00	0,000642	0,001071	-66,82
26,67	10,00	0,002133	0,008115	-280,45
26,67	15,00	0,006421	0,011577	-80,30
35,00	3,50	0,000239	0,000193	19,25
35,00	5,00	0,000481	0,000369	23,28
35,00	6,50	0,000797	0,000614	22,96
45,00	3,50	0,000365	0,0002	45,21
45,00	5,00	0,000726	0,000398	45,18
45,00	6,50	0,001221	0,000664	45,62
55,00	3,50	0,000529	0,000262	50,47
55,00	5,00	0,001083	0,000533	50,78
55,00	6,50	0,001814	0,000891	50,88

A frequência de 20 Hz associada às três amplitudes trabalhadas apresentou valores elevados de força resultante no centro de massa do fruto de café (Tabela 5.9) o que pode ser explicado pelos impactos ocorridos entre o fruto de café e o ramo plagiotrópico no modelo proposto. Além disso, essa frequência fica próxima à faixa de ressonância estimada por Santos (2008). A maior diferença entre os graus de maturação foi observada para a frequência de 26,67 Hz associadas às amplitudes de 10 e 15 mm, indicando uma faixa de trabalho que poderia ser favorável a derriça seletiva no momento da derriça.

Na Tabela 5.11 está representada a porcentagem da energia contida no fruto de café em função da energia de entrada, para cada combinação entre frequência e amplitude de vibração de entrada. Nota-se que as frequências de 20,00 e 26,67 Hz foram que apresentaram maiores valores de energia contida no fruto, o que indica mais uma vez que a faixa de ressonância do sistema fruto-pedúnculo do café está próxima a essa faixa de trabalho.

TABELA 5.11 – Porcentagem de energia contida no fruto de café para os estádios de maturação cereja e verde, em função da frequência e amplitude de vibração de entrada

Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Estádio de maturação	
		Cereja	Verde
13,33	5,00	94,87	139,30
13,33	10,00	92,54	136,67
13,33	15,00	90,21	134,49
20,00	5,00	564,30	1221,55
20,00	10,00	177,78	355,02
20,00	15,00	93,34	205,83
26,67	5,00	74,96	157,28
26,67	10,00	62,26	297,92
26,67	15,00	83,30	188,90
35,00	3,50	33,07	33,59
35,00	5,00	32,61	31,47
35,00	6,50	31,97	30,98
45,00	3,50	30,55	21,05
45,00	5,00	29,77	20,53
45,00	6,50	29,63	20,27
55,00	3,50	29,64	18,46
55,00	5,00	29,73	18,40
55,00	6,50	29,47	18,21

Verifica-se também por meio da energia cinética que na faixa de frequência trabalhada por Guedes (2011), em frequências de vibração entre 35 e 55 Hz e

amplitudes de vibração entre 3,5 e 6,5 mm, que a porcentagem de energia transferida ao sistema foi baixa o que também pode explicar os baixos valores de eficiência de derriça obtidos pelo autor.

5.4. Conclusões

Com o presente trabalho pode-se concluir que:

- É de suma importância a identificação das propriedades de rigidez do sistema fruto-pedúnculo do café, visto que essa influencia significativamente os resultados de simulações computacionais, a fim de identificar diferenças entre a resposta nos diferentes estádios de maturação;
- O aumento da frequência de excitação proporciona maiores valores de torque transmitido na ligação fruto-pedúnculo do café, conseqüentemente maiores tensões de cisalhamento também são observadas.
- Nas faixas de frequência trabalhadas, com base nos valores dos esforços na ligação fruto pedúnculo do café, a derriça seletiva poderia ser obtida ao trabalhar com uma combinação entre uma frequência de 26,67 Hz e uma amplitude de vibração de 10 mm.

5.5. Referências Bibliográficas

BAUCHAU O. A., RODRIGUEZ, J. Modeling of Joints with Clearance in Flexible Multibody Systems. **International Journal of Solids and Structures**, v. 39, p. 41-63, 2002.

FILGUEIRAS, W.H.; QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P.; DELLA LUCIA, R.M. Propriedades mecânicas da madeira do café. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 1, 2000, Poços de Caldas. **Resumos expandidos...** Brasília: Embrapa Café e MINASPLAN, 2000. p.1081-1084.

FITZPATRICK, R. **Advanced integration methods**, 2006. Disponível em: < <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/329/lectures/node40.html> > Acesso em: 15 de abril de 2012.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: Editora FEALQ, 2002, 309p.

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. 44 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

KLODOWSKI, A.; RANTALAINEN, T.; HEINONEN, A.; SIEVÄNEN, H.; MIKKOLA, A. The use of the flexible multibody approach for lower body skeletal loading analysis. **Procedia IUTAM**, v. 2, p. 93–100, 2011.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira.** 1998. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

MITIGUY, P., BANERJEEY, A. K. **Determination of Spring Constants for Modeling Flexible Beams**, Working Model Technical Paper, 2000.

RECKDAHL, K. **Working Model Technical Note: Modeling Uniform Flexible Bodies in Working Model.** Technical Documentation, Disponível em: <<http://www.maelabs.ucsd.edu/cosmos/resources/wm2d/documentation/ModelingFlexibleBeamsOld.pdf>> Acesso em: 12 de abril de 2012.

RODRÍGUEZ, A. M.; QUEIROZ, D. M.; ESPINOSA, B. G.; ZANDONADI, R. Determinación de propiedades físico-mecánicas de los frutos de café (Coffea arábica variedad Catuai) relacionadas con la cosecha mecanizada. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v. 15, n. 3, p. 22 -27, 2006.

SCHIAVO, F.; FERRETTI, G.; VIGANO, L. **Object-Oriented Modelling and Simulation of Flexible Multibody Thin Beams in Modelica with the Finite Element Method.** **Modelica 2005**, p. 24 – 34, 2005.

YOUNG, C., FRIDLEY, R. B. Computer analysis of fruit detachment during tree shaker. St. Joseph: **ASAE**, n.74, 2000.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

6.1. Resumo e conclusões

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a resposta do sistema fruto-pedúnculo do café submetido à vibração forçada. Para isso foram utilizados vídeos de alta velocidade para determinação experimental de parâmetros modais e transmissibilidade de vibração do sistema, bem como para prover informações para validação do modelo matemático implementado.

O trabalho foi dividido em três partes principais, sendo a primeira relacionada à determinação dos parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café. Submetido a um deslocamento impulsivo o sistema foi posto a vibrar e por meio do decaimento da oscilação, monitorada pela extremidade livre do fruto, obteve-se a razão de amortecimento, a primeira frequência natural e rigidez do sistema utilizando o método do decremento logarítmico. Caracterizaram-se as principais propriedades físicas das amostras de café utilizadas para as determinações experimentais, sendo a mesma da variedade Catuai Vermelho.

A segunda etapa foi o estudo da transmissibilidade de vibração entre a fonte excitadora e o sistema fruto-pedúnculo do café submetido a um deslocamento harmônico em diferentes combinações entre frequência e amplitude de entrada. Foi comparado o deslocamento de saída na extremidade livre do fruto com a amplitude de entrada imposta pela base vibradora de um vibrador eletromagnético. A transmissibilidade de vibração foi estudada em duas faixas de trabalho sendo a primeira com frequências de vibração entre 13,33 e 26,67 Hz e amplitudes de vibração de 5 a 15 mm; na segunda trabalhou-se com frequências entre 35 e 55 Hz e amplitudes de 3,5 a 6,5 mm. Buscou observar a combinação entre frequência e amplitude de vibração que proporcionou a maior transmissibilidade de vibração para ambos os estádios de maturação trabalhados.

Nos ensaios de vibração, das duas primeiras etapas, foi utilizada uma câmera digital de alta velocidade para monitorar a vibração do sistema fruto-pedúnculo do café. Foram utilizadas técnicas de segmentação global simples para obter informações de deslocamento do sistema de maneira simplificada. Determinaram-se as melhores condições para segmentação das imagens sequenciais de cada vídeo adquirido durante os testes de vibração.

Os deslocamentos resultantes da segunda etapa foram utilizados para validação do modelo implementado para estudar a dinâmica do sistema fruto-pedúnculo do café, o qual foi o objeto de trabalho da terceira etapa. Por meio de um programa proprietário, idealizou-se um modelo em que o pedúnculo do café é representado por uma viga flexível, buscando representar as deformações sofridas durante a imposição de vibrações mecânicas. Foram determinados os esforços resultantes para os estádios de maturação cereja e verde para as mesmas faixas de frequências trabalhadas nos testes para determinação da transmissibilidade de vibração. Com o modelo, foi possível determinar as combinações entre frequência e amplitude de vibração que proporcionaram maiores esforços na ligação entre o fruto e o pedúnculo do café.

Desta forma nas determinações experimentais e pelas simulações computacionais, pode-se concluir que:

- a utilização de vídeos de alta velocidade juntamente a técnicas de processamento de imagens proporcionou a determinação experimental de parâmetros modais e de transmissibilidade de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café de forma adequada;
- quaisquer das taxas de amostragem, na faixa de 210 a 1000 Hz, associadas às resoluções espaciais obtidas, proporcionaram a determinação dos deslocamentos resultantes do sistema fruto-pedúnculo satisfatoriamente, trabalhando na faixa da primeira frequência natural;
- a resolução espacial obtida nos vídeos de monitoramento da vibração não mostrou ser um fator impeditivo à determinação dos deslocamentos resultantes do sistema fruto-pedúnculo do café, quando monitorado a extremidade livre do fruto;
- com base nos valores da primeira frequência de ressonância determinadas a realização da derriça de forma seletiva seria uma operação difícil de ser realizada visto que há uma superposição de valores de frequências naturais entre os estádios de maturação cereja e verde;
- as características geométricas, tal como o comprimento do pedúnculo, influenciam o valor da frequência natural, sendo que maiores pedúnculos facilitam a derriça em uma só etapa, pois com uma menor rigidez as máquinas de colheita poderiam trabalhar a menores frequências;

- a energia dissipada pelo sistema fruto-pedúnculo do café foi maior para o estágio de maturação cereja na safra de 2010, no entanto na safra de 2011 não houve diferença em seus valores, o que contribui também para dificultar a derriça na faixa da primeira frequência natural;
- a transmissibilidade de vibração similar entre os estádios de maturação cereja e verde, o que contribui para dificultar a derriça seletiva dos frutos do cafeeiro, para a faixa de frequências de 13,33 e 26,67 Hz;
- os maiores valores observados para a transmissibilidade foram observados para a frequência de 20 Hz para ambos os estádios de maturação o que pode indicar essa frequência como uma frequência de ressonância do sistema fruto-pedúnculo do café;
- por meio dos deslocamentos resultantes, foi possível verificar a predominância do modo de vibração pendular para a faixa de frequência entre 13,33 e 26,67 Hz, bem como foi possível verificar a ocorrência do fenômeno de ressonância em uma das amostras trabalhadas;
- os valores observados para a transmissibilidade de vibração, nas direções x e y, tiveram valores próximos entre os estádios de maturação cereja e verde, para a faixa de frequência entre 13,33 e 26,67 Hz, o que pode dificultar a identificação de faixas de trabalho favoráveis à derriça dos frutos de café de forma seletiva, com base nesse parâmetro mecânico;
- para frequências elevadas, a frequência de 35 Hz, associada às amplitudes de vibração trabalhadas (3,5 a 6,5 mm), foi a que mais se diferiu entre os estádios de maturação verde e cereja, para os valores de transmissibilidade de vibração observados para ambas as direções estudadas;
- para a combinação entre a frequência de 55 Hz e amplitude de 6,5 mm para o estágio de maturação cereja, os valores observados foram maiores que 1,0; já para o estágio de maturação verde, essa combinação entre frequência e amplitude, foi a que apresentou as menores transmissibilidades, sendo uma faixa que poderia ser favorável seletividade dos frutos de café no momento da derriça.

- o modelo proposto para representar o sistema fruto-pedúnculo do café modelagem de corpos flexíveis foi adequado para simular a dinâmica do sistema, com maior acurácia para frequências próximas ao modo de vibração pendular;
- os deslocamentos resultantes do ensaio de vibração permitiram validar o modelo utilizando ferramentas de modelagem de corpos flexíveis evidenciando a elevada variabilidade inerente da planta de café;
- o modelo idealizado para o sistema fruto-pedúnculo do café permitiu a determinação dos esforços na ligação fruto-pedúnculo do café e a identificação das faixas de trabalho com maiores valores observados;
- é de suma importância a identificação das propriedades de rigidez do sistema fruto-pedúnculo do café, visto que essa influencia significativamente os resultados de simulações computacionais, a fim de identificar diferenças entre a resposta nos diferentes estádios de maturação;
- a combinação entre uma frequência de 26,67 Hz e uma amplitude de vibração de 10 mm proporcionou a maior diferença nos esforços na ligação entre o fruto e o pedúnculo do café a qual pode ser testada para a obtenção de seletividade do momento da derriça mecânica do café.
- os maiores valores para a energia cinética no fruto de café indicou as frequências de 20 e 26,67 Hz como faixas de trabalho como potencial para maiores eficiências de derriça para ambos os estádios de maturação dos frutos de café.