

ANDRE LUIZ DE FREITAS COELHO

**COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO-
RAMO DO CAFEIRO SUBMETIDO A VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

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

T

C672c
2014
Coelho, Andre Luiz de Freitas, 1989-
Comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo
do cafeeiro submetido a vibrações mecânicas / Andre Luiz de
Freitas Coelho. – Viçosa, MG, 2014.
xvi, 128f. : il. ; 29 cm.

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

1. Café - Colheita - Efeito da vibração. 2. Vibração -
Medição. 3. Mecanização agrícola. 4. Máquinas agrícolas.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

ANDRE LUIZ DE FREITAS COELHO

**COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO-
RAMO DO CAFEIEIRO SUBMETIDO A VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

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

APROVADA: 24 de fevereiro de 2014.

Prof. Ricardo Capúcio de Resende

Prof. Daniel Marçal de Queiroz
(Coorientador)

Prof. Fábio Lúcio Santos
(Orientador)

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Martin Luther King)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e pelos objetivos conquistados.

Aos meus pais José Paulo e Maria Auxiliadora e minhas irmãs Ana Paula, Angélica e Amanda pelo apoio e incentivo.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de cursar o Mestrado em Engenharia Agrícola.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Fábio Lúcio Santos, pela orientação deste trabalho, pelos conhecimentos passados, pela paciência, compreensão e amizade.

Aos Prof. Daniel Marçal, Francisco Pinto e Ricardo Capúcio pelas contribuições e sugestões neste trabalho.

Aos Prof. Sárvio, Mauri, Haroldo, Daniel e Francisco pelos conhecimentos passados nas disciplinas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial ao Délio, Graça e Marcelo.

Aos amigos do laboratório de Mecanização Agrícola Remo, Túlio, Anderson Costa, Anderson Castro, Jardênia, Juliana, Larissa, Humberto, Robson, Cristian, Júlio, Jesael, Mateus, Flora, Gracielly, Marconi, Marcus, Rafael, Geice e Danilo pelo apoio e companheirismos.

Aos amigos de Viçosa, Kauê, Alley, Willian, Erick, Kauan, Simone, Leandro, Guilherme, Fábio, Murici, Juliete, Carolina, Bárbara, Janaína, Lilian, Jonatas, Fabrício, Augusto, Rober, Rodolfo, Leonardo, Daniel, Mateus e Marciel pelo apoio e companheirismos.

Ao Ely, Naiani e Samuel pelos auxílios nos experimentos.

Aos meus avós, tios e primos pelo incentivo.

Em especial, a minha namorada Elenice Rosa Costa, pelo incentivo, apoio compreensão e paciência a todo momento.

A TODOS que, de alguma forma, incentivaram e contribuíram para mais um conquista em minha caminhada.

Meu Muito Obrigado!

BIOGRAFIA

ANDRE LUIZ DE FREITAS COELHO, filho de José Paulo Coelho e Maria Auxiliadora de Freitas Coelho, nasceu em Guidoal, Minas Gerais, em 06 de fevereiro de 1989.

Em 2004 iniciou o Ensino Médio pela Escola Estadual “Mariana de Paiva”, em Guidoal, Minas Gerais, concluindo em 2006.

Em março de 2007, iniciou o curso de Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, concluindo em dezembro de 2012.

Em fevereiro de 2012 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado, área de concentração em Mecanização Agrícola, pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2014, submeteu-se aos exames de defesa da dissertação, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
ARTIGO I: Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro.....	8
<i>Resumo</i>	9
<i>Abstract</i>	10
1. Introdução	11
2. Material e métodos	13
2.1. Dimensões.....	14
2.2. Massa e volume.....	15
2.3. Massa específica	15
2.4. Módulo de elasticidade do fruto	16
2.5. Coeficiente de Poisson	18
2.5.1. Coeficiente de Poisson do fruto	18
2.5.2. Coeficiente de Poisson do pedúnculo	19
2.6. Razão de amortecimento do pedúnculo e do ramo	19
2.7. Análise dos dados.....	21
3. Resultados e discussão	21
3.1. Dimensões.....	22
3.2. Massa e volume.....	23
3.3. Massa específica	23
3.4. Módulo de elasticidade do fruto	24
3.5. Coeficiente de Poisson	25
3.7. Razão de amortecimento.....	26
4. Conclusões	28
5. Referências bibliográficas	29
ARTIGO II: Metodologia para determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo do cafeeiro.....	33
<i>Resumo</i>	34
<i>Abstract</i>	35
1. Introdução	36

2. Material e métodos	38
2.1. Determinação experimental das frequências naturais	38
2.2. Determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo ...	41
3. Resultados e discussão	48
3.1 Determinação experimental da frequência natural	48
3.2. Determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo ...	50
4. Conclusões	52
5. Referências bibliográficas	53
ARTIGO III: Análise do comportamento dinâmico do sistema fruto- pedúnculo-ramo do cafeeiro	56
Resumo	57
Abstract	58
1. Introdução	59
2. Material e métodos	62
3. Resultados e discussão	67
4. Conclusões	76
5. Referências bibliográficas	76
ARTIGO IV: Análise de tensões no sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro	81
Resumo	82
Abstract	83
1. Introdução	84
2. Material e métodos	86
2.1. Análise de tensões.....	86
2.2. Validação dos modelos	90
3. Resultados e discussão	93
3.1 Validação dos modelos	93
3.2. Análise de tensões.....	95
4. Conclusões	100
5. Referências bibliográficas	100
ARTIGO V: Análise da eficiência de derricha dos frutos do cafeeiro submetidos à vibrações mecânicas	105
Resumo	106
Abstract	107
1.Introdução	108
2. Material e métodos	110
3. Resultados e discussão	114
4. Conclusões	121

5. Referências bibliográficas.....	122
CONCLUSÕES GERAIS	125

LISTA DE TABELAS

ARTIGO I: Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

Tabela 1: Valores médios das propriedades geométricas para o fruto e pedúnculo, nos estádios de maturação verde, verdoengo e cereja	22
Tabela 2: Valores médios de massa e volume do fruto e pedúnculo, nos estádios de maturação verde, verdoengo e cereja	23
Tabela 3: Valores médios para massa específica do fruto e pedúnculo, nos três estádios de maturação.....	24
Tabela 4: Valores médios para módulo de elasticidade do fruto, nos três estádios de maturação.....	25
Tabela 5: Valores médios para coeficiente de Poisson do fruto e pedúnculo, nos estádios de maturação verde, verdoengo e cereja	26
Tabela 6: Valores médios para razão de amortecimento do sistema fruto-pedúnculo, nos três estádios de maturação	27

ARTIGO II: Metodologia para determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo do cafeeiro

Tabela 1: Características técnicas da máquina vibradora eletromagnética .	39
Tabela 2: Valores de incremento ou decremento do módulo de elasticidade em função do desvio percentual	43
Tabela 3: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o fruto para os estádios de maturação verde e cereja	44
Tabela 4: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o pedúnculo para os estádios de maturação verde e cereja	44
Tabela 5: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o ramo	44
Tabela 6: Frequências de ressonância experimentais para o sistema fruto-pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja, e para o ramo.....	49
Tabela 7: Módulo de elasticidade para o pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja e para o ramo	50

ARTIGO III: Análise do comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

Tabela 1: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o fruto para os estádios de maturação verde e cereja	62
Tabela 2: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o pedúnculo para os estádios de maturação verde e cereja	63
Tabela 3: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do ramo	63

ARTIGO IV: Análise de tensões no sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

Tabela 1: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o fruto para os estádios de maturação verde e cereja	86
---	----

Tabela 2: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o pedúnculo para os estádios de maturação verde e cereja	87
Tabela 3: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do ramo	87
Tabela 4: Primeira frequência natural para os sistemas fruto-pedúnculo e fruto-pedúnculo-ramo, com um, dois ou três frutos, nos dois estádios de maturação	89
Tabela 5: Características técnicas da máquina vibradora eletromagnética .	91
Tabela 6: Desvio entre os valores de frequência natural experimental média e simulada, para o sistema fruto-pedúnculo e o ramo	94

ARTIGO V: Análise da eficiência de derriça dos frutos do cafeeiro submetidos à vibrações mecânicas

Tabela 1: Características técnicas da máquina vibradora eletromagnética	111
Tabela 2: Níveis dos fatores avaliados no ensaio de derriça dos frutos do cafeeiro	113
Tabela 3: Resultado para análise de variância do experimento para avaliação de derriça do cafeeiro	114
Tabela 4: Resultado para a análise de variância do desdobramento da interação do fator maturação dentro dos níveis do fator deslocamento.....	116
Tabela 5: Eficiência de derriça média (%) em função do estágio de maturação e do deslocamento.....	116
Tabela 6: Resultado para a análise de variância do desdobramento da interação do fator deslocamento dentro dos níveis do fator maturação.....	117
Tabela 7: Resultado para a análise de regressão da eficiência de derriça em função do deslocamento, para o estágio de maturação cereja.....	117
Tabela 8: Resultado para a análise de regressão para a eficiência de derriça dos frutos em função do deslocamento e frequência de vibração	119

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I: Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

Figura 1: Imagem de uma amostra do (a) sistema fruto-pedúnculo e do (b) ramo do cafeeiro sobre malha graduada em milímetros.....	15
Figura 2: Aparato experimental para ensaio de compressão do fruto: (a) equipamento e (b) detalhe do sistema de fixação.....	16
Figura 3: Determinação dos raios de curvatura do corpo convexo nos pontos de contato com a placa plana (RIBEIRO et al., 2007).	18
Figura 4: Sistema utilizado no experimento para excitação das amostras composto por (a) máquina vibradora eletromagnética, (b) amplificador e (c) gerador de sinal.	19
Figura 5: Sistema de fixação das amostras e suporte do transdutor piezoelétrico.....	20
Figura 6: Curva de decaimento para aplicação do método de decremento logarítmico (MEIROVITCH, 2001).	21
Figura 7: Curvas de decaimentos obtidos para o pedúnculo nos estádios de maturação cereja (a), verdoengo (b), verde (c), e para o ramo (d).	27

ARTIGO II: Metodologia para determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo do cafeeiro

Figura 1: Sistema utilizado nos ensaios de vibração para excitação das amostras, composto por máquina vibradora eletromagnética (a), amplificador de sinal (b) e gerador de sinal (c).	39
Figura 2: Sistema de fixação das amostras e suporte do transdutor piezoelétrico.....	40
Figura 3: Fluxograma do método de determinação do módulo de elasticidade implementado no Ansys Mechanical APDL.....	42
Figura 4: Geometria para o (a) sistema fruto-pedúnculo e (b) ramo.	45
Figura 5: Frequência natural do sistema fruto-pedúnculo-ramo com três frutos, simulado empregando três refinamentos de malha.	46
Figura 6: Transmissibilidade para o sistema fruto-pedúnculo nos estádios de maturação (a) verde e (b) cereja, e para o (c) ramo.	48
Figura 7: Desvio entre a frequência natural experimental e simulada para diversos valores de módulos de elasticidade, para amostra do sistema fruto-pedúnculo nos estádios de maturação (a) verde e (b) cereja, e para o (c) ramo.....	51

ARTIGO III: Análise do comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

Figura 1: Geometria para o sistema fruto-pedúnculo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários a um mesmo pedúnculo.....	63
Figura 2: Geometria para o ramo.....	64

Figura 3: Geometria para o sistema fruto-pedúnculo-ramo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários a um mesmo pedúnculo.	64
Figura 4: Frequência natural do sistema fruto-pedúnculo-ramo com três frutos, simulado empregando três refinamentos de malha.	65
Figura 5: Frequências naturais para o sistema fruto-pedúnculo, com um fruto, nos estádios de maturação verde e cereja.	68
Figura 6: Frequências naturais para o sistema fruto-pedúnculo, com dois frutos, nos estádios de maturação verde e cereja.	70
Figura 7: Frequências naturais para o sistema fruto-pedúnculo, com três frutos, nos estádios de maturação verde e cereja.	71
Figura 8: Frequências naturais para o ramo, obtidos no presente trabalho e por FILGUEIRAS (2001).	72
Figura 9: Frequências naturais para o sistema fruto-pedúnculo-ramo, com (a) um, (b) dois e (c) três frutos, nos estádios de maturação verde e cereja. ...	73
Figura 10: Variação da primeira frequência natural do sistema fruto-pedúnculo com um fruto, no estádio de maturação cereja, em função da variabilidade da massa específica do fruto e do módulo de elasticidade do pedúnculo, em (a) superfície de resposta e (b) cortes.	75

ARTIGO IV: Análise de tensões no sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

Figura 1: Geometria para o sistema fruto-pedúnculo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários a um mesmo pedúnculo.	87
Figura 2: Geometria para o ramo.	87
Figura 3: Geometria para o sistema fruto-pedúnculo-ramo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários a um mesmo pedúnculo.	88
Figura 4: Sistema utilizado no experimento para excitação das amostras, composto por (a) máquina vibradora eletromagnética, (b) amplificador de sinal e (c) gerador de sinal.	91
Figura 5: Sistema de fixação das amostras e suporte do transdutor piezoelétrico.	92
Figura 6: Transmissibilidade para o sistema fruto-pedúnculo nos estádios de maturação (a) verde e (b) cereja, e para o (c) ramo.	94
Figura 7: Tensões de <i>von Mises</i> nas regiões do sistema fruto-pedúnculo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários ao pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja.	96
Figura 8: Tensões de <i>von Mises</i> em três regiões do ramo.	97
Figura 9: Tensões de <i>von Mises</i> nas regiões do ramo do sistema fruto-pedúnculo-ramo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários ao pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja.	98

ARTIGO V: Análise da eficiência de derrixa dos frutos do cafeeiro submetidos à vibrações mecânicas

Figura 1: Sistema utilizado no experimento para excitação das amostras, composto por máquina vibradora eletromagnética (a), amplificador de sinal (b) e gerador de sinal (c).	111
Figura 2: Sistema de fixação das amostras e suporte do transdutor piezoelétrico.	112

Figura 3: Superfície de resposta ajustada da eficiência de derrça em função do deslocamento e frequência de vibração, para frutos da variedade Catuaí Vermelho.....	120
Figura 4: Eficiência de derrça em função da frequência de vibração, para cada deslocamento pico-a-pico avaliado.	120

RESUMO

COELHO, Andre Luiz de Freitas, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2014. **Comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro submetido à vibrações mecânicas.** Orientador: Fábio Lúcio Santos. Coorientadores: Daniel Marçal de Queiroz e Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

A colheita manual do café é considerada uma atividade complexa e onerosa, devido a fatores como altura das plantas, inclinação dos terrenos, condições climáticas, necessidade da colheita no período correto, além do elevado custo de produção com mão de obra. A mecanização surge, então, como uma solução pelo aumento da capacidade operacional do processo e redução dos esforços físicos para a colheita. O desenvolvimento de máquinas de colheita eficientes exige conhecimento acerca do comportamento dinâmico da planta, visando à maior eficiência de derriça, além de menor quebra de galhos e queda de folhas. Objetivou-se neste trabalho analisar o comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro submetido a vibrações mecânicas. O trabalho foi desenvolvido empregando amostras de café arábica, variedade Catuaí Vermelho, coletados em uma Área Experimental da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa/MG, no período maio a julho/2013. O trabalho foi dividido por cinco artigos. No primeiro artigo, foram determinados experimentalmente a massa, o volume, a massa específica, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a razão de amortecimento dos constituintes do sistema fruto-pedúnculo-ramo. Os módulos de elasticidade dos frutos e dos pedúnculos no estágio de maturação verde foram superiores aos valores para o estágio de maturação cereja. Foram obtidos valores de razão de amortecimento para o pedúnculo e ramo menores que o unitário, caracterizando-os como um sistema subamortecido. No segundo, foi desenvolvida uma metodologia para determinação do módulo de elasticidade do fruto e do pedúnculo pela comparação entre as frequências naturais obtidas pelo método de elementos finitos e as frequências naturais obtidas experimentalmente. Os valores médios para os módulos de elasticidades foram de 15,74; 23,90 e 4645,90 MPa para o pedúnculo nos

estágios de maturação verde, cereja e para o ramo, respectivamente. No terceiro artigo, foram determinados as frequências naturais e os modos de vibração dos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo, empregando o método de elementos finitos estocástico, em que a massa específica e o módulo de elasticidade dos frutos pedúnculos e ramos foram tratados como valores aleatórios. As frequências naturais foram reduzidas na medida em que evoluiu o estágio de maturação ou na medida em que aumentou a massa total do sistema. Para o quarto e o quinto modos de vibração, foram constatadas maiores deformações nos pedúnculos. No quarto artigo, foram determinadas as tensões nos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo, quando submetidos à vibração mecânica com frequência referente à frequência natural, deslocamento pico a pico de 10 mm e tempo de excitação de 10 s. As tensões de *von Mises* foram superiores para sistemas no estágio de maturação verde e nas regiões de engaste do pedúnculo ao ramo e no engaste do ramo ao tronco devidas às maiores frequências de vibrações aplicadas neste estágio de maturação e aos maiores momentos fletores nestas regiões, respectivamente. E no quinto artigo, foi feito um ensaio de eficiência de derriça, em que amostras com um cacho de frutos foram submetidas a vibrações mecânicas em diferentes frequências (16,4; 20,3; 24; 25,6; 30,0 e 33,0 Hz), deslocamento pico-a-pico (5,0; 7,0 e 9,0 mm) e tempos de vibração (10,0 e 20,0 s). Para as amplitudes estudadas, houve tendência de a eficiência de derriça dos frutos cereja ser superior à dos frutos verdes. A eficiência de derriça aumentou na medida em que foram aumentadas a frequência e a amplitude de vibração.

ABSTRACT

COELHO, Andre Luiz de Freitas, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February of 2014. **Dynamic behavior of coffee fruit-stem-branch system subject to mechanical vibrations.** Adviser: Fábio Lúcio Santos. Co-advisers: Daniel Marçal de Queiroz and Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

Coffee manual harvesting is a complex and costly activity due to factors such as plant height, land slope, weather conditions, correct time for harvesting, beyond high production cost with manpower. Then, mechanization arises as a solution by increasing the process' operational capability and the reduction of physical effort for harvesting. The development of efficient harvesting machines requires the knowledge about the plant's dynamic behavior, aiming a greater overthrowing efficiency and less breakage of branches and leaf fall. This study aimed to analyze the dynamic behavior of the fruit-stem-branch system of the coffee plant subjected to mechanical vibration. This study was carried out using samples of Arabica coffee – Red Catuaí variety – collected in an experimental area of the Universidade Federal de Viçosa (Federal University of Viçosa) in Viçosa City/Minas Gerais State, Brazil, from May to July, 2013. This study is composed by five papers: (1) in the first paper, mass, volume, specific density, elasticity modulus, Poisson's ratio, and the constituents' damping ratio of the fruit-stem-branch system were experimentally determined. Damping ratio values obtained for the stem and the branch were lower than one, characterizing them as an underdamped system; (2) in the second paper, certain methodology was developed for determining the elasticity modulus of the fruit and stem by comparing the natural frequencies obtained by the finite elements method with the natural frequencies obtained experimentally. The average values for the elasticity modulus were 15.74; 23.90, and 4645.90 MPa for stem in green and ripe ripeness stages, and for the branch, respectively; (3) in the third study, the natural frequencies and the modes shapes were determined for the fruit-stem, branch, and fruit-stem-branch systems using the stochastic finite elements method, in which the specific density and elasticity modulus of fruits, stems, and branches were treated as random values. The natural

frequencies were reduced to the extent that the ripeness stage evolved or according as the system total mass increased. For the fourth and fifth modes shapes, larger deformations in the stems were found; (4) in the fourth paper, the stresses in the fruit-stem, branch and fruit-stem-branch systems were determined when subjected to mechanical vibration with frequency related to the natural frequency, peak to peak displacement of 10 mm, and stimulation time of 10 s. The von Mises stresses were higher for systems in green ripeness stage and in the jointing regions of the stem to the branch and of the branch to the stem due to higher frequency vibrations applied on this ripeness stage and to the higher bending moments in these regions, respectively; (5) in the fifth paper, a overthrowing efficiency test with a fruits' bunch samples were subjected to mechanical vibrations at different frequencies (16.4; 20.3; 24.0; 25.6; 30.0; and 33.0 Hz), peak to peak displacement (5.0; 7.0; and 9.0 mm), and vibration times (10.0 and 20.0 s). For the studied amplitudes, the overthrowing efficiency of ripe fruits tended to be higher than the overthrowing efficiency of the green fruits. The overthrowing efficiency increased according as the frequency and vibration amplitude increased.

INDRODUÇÃO GERAL

O Brasil ocupa a posição de maior produtor mundial de café, e a estimativa de produção do país para a safra de 2013 é de 47,54 milhões de sacas de 60 quilos, destacando-se como produtores os estados de Minas Gerais e Espírito Santos (CONAB, 2013).

Entre as etapas da colheita do cafeeiro, destaca-se a derriça por ser uma atividade complexa e onerosa (BARBOSA et al., 2005). A complexidade da derriça está relacionada com os fatores altura das plantas, umidade dos frutos, inclinação do terreno, condições climáticas e a necessidade de se realizar a atividade no período correto (CIRO, 2001; OLIVEIRA et al., 2007b). A oneração da derriça deve-se ao contingente de mão de obra necessário para sua execução, representando de 30 a 40 % dos custos com a colheita (CIRO, 2001; OLIVEIRA et al., 2007a).

Devido à escassez de mão de obra no setor agrícola, associada à crescente necessidade de aumento na produção de alimentos, a mecanização da colheita do cafeeiro torna-se indispensável. Além de aumentar a capacidade operacional do processo, reduzindo a demanda de mão de obra, a mecanização torna as atividades da colheita menos árduas, reduzindo os esforços físicos dos trabalhadores.

Na colheita mecanizada do cafeeiro e de outras culturas, como damasco, laranja, pistache, oliva e uva, emprega-se o princípio de vibrações mecânicas. A partir de tal princípio, a energia cinética é transmitida à planta ou a uma parte dela, promovendo o desprendimento dos frutos (ERDOGAN et al., 2003; SANDERS, 2005; SESSIZ e OZCAN, 2006; SOUZA et al., 2006; POLAT et al., 2007; PEZZI e CAPRAVA, 2009; SANTOS et al., 2010a).

Uma colhedora eficiente deve garantir uma boa eficiência no desprendimento dos frutos, fator que afeta diretamente a capacidade operacional do processo (OLIVEIRA et al., 2007b). Além disso, são desejáveis a ocorrência de uma menor desfolha e quebra de ramos, uma vez que danos à estrutura da planta podem comprometer a safra seguinte.

A eficiência na colheita é alcançada pela utilização de uma combinação adequada dos parâmetros frequência, amplitude e tempo de

vibração. Também é necessário o emprego de conhecimentos sólidos a respeito das frequências naturais, modos de vibração e tensões da planta a ser colhida, ou de parte dela, durante a fase de projeto da colhedora (CIRO, 2001).

Estudos relacionados à determinação de frequências naturais, modos de vibração e análise de tensões no cafeeiro têm sido conduzidos com base em equações analíticas, experimentos controlados em laboratório, experimentos em campo ou por meio de ferramentas computacionais (CIRO, 2001; FILGUEIRAS, 2001; ARISTIZÁBAL et al., 2003; SANTOS, 2008). Análises de eficiência de derrça, em campo ou em laboratório, também tem sido desenvolvidas visando a avaliar fatores como frequência, amplitude e tempo de vibração (SILVA et al., 2006; SANTOS et al., 2010a,2010b; GUEDES, 2011; SILVA et al., 2013).

Entre as ferramentas computacionais para análise do comportamento dinâmico e análise de tensões do cafeeiro, destaca-se o método de elementos finitos, que consiste na geração e solução de equações diferenciais que governam o fenômeno físico em estudo. O método apresenta duas variações: o determinístico e o estocástico. No método de elementos finitos determinístico, são utilizados parâmetros de entrada com valores únicos e constantes, obtendo nos resultados um valor único para determinado parâmetro de saída. No método de elementos finitos estocástico, os parâmetros de entrada são definidos como um conjunto de valores aleatórios, obtendo, assim, um conjunto de resultados para um dado parâmetro (REH et al., 2009; BERTHAUME et al., 2012). A aleatorização dos valores é, normalmente, executada a partir de modelos que descrevem a distribuição de probabilidade dos parâmetros em questão (STEFANOU, 2009).

Para a utilização do método de elementos finitos, é necessário inserir como parâmetros de entrada as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema em análise (RODRÍGUEZ et al., 2006).

Devido às irregularidades na geometria e composição heterogênea dos constituintes do sistema fruto-pedúnculo-ramo do café, torna-se difícil a determinação das propriedades mecânicas desse sistema com exatidão. Para a determinação de propriedades mecânicas da madeira e compostos,

tem sido adotado o uso de ensaios dinâmicos, em que o módulo de elasticidade é determinado pela frequência de ressonância do sistema, empregando ensaios de vibração (TARGA et al., 2005; ALMEIDA, 2012; SEGUNDINHO et al, 2012). Este método de ensaio vem ganhando importância, principalmente em materiais que não apresentam regime elástico bem definido, em que a determinação do módulo de elasticidade pela Lei de *Hooke* é imprecisa. Além disso, são mais confiáveis, uma vez que não têm erros relativos à deformação da própria máquina de ensaio ou à influência da velocidade de ensaio na linearidade entre deformação e tensão (ALMEIDA, 2012).

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho: Determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas dos frutos, pedúnculos e ramos; Determinar o módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo do cafeeiro; Analisar o comportamento dinâmico dos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo; Analisar as tensões nos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo; e Avaliar a derriça do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro.

– Disposição do trabalho

Este trabalho é composto por cinco artigos, além da introdução geral e da conclusão geral.

No primeiro artigo, é apresentada a parte do trabalho referente à determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas dos frutos, pedúnculos e ramos do cafeeiro. Os resultados obtidos serão posteriormente utilizados na modelagem por método de elementos finitos, para determinação das frequências naturais, modos de vibração e tensões geradas.

No segundo artigo, é apresentada a metodologia desenvolvida para determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e do ramo. O método consiste na determinação experimental da frequência natural do sistema fruto-pedúnculo e do ramo e posterior comparação com frequências obtidas por método de elementos finitos. O módulo de elasticidade considerado é aquele em que se obtém menor erro entre a frequência experimental e a obtida pelo método de elementos finitos.

No terceiro artigo, é feito um estudo acerca do comportamento dinâmico dos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo. São determinados as frequências naturais e os modos de vibração dos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo, empregando o método de elementos finitos estocástico, no qual as propriedades massa específica e módulo de elasticidade são tratados como variáveis com valores aleatórios.

No quarto artigo, são analisadas as tensões nos pedúnculos e ramos dos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo durante excitações por vibrações mecânicas. São determinadas as tensões de *von Mises* nos sistemas quando excitados com frequência referente à primeira frequência natural, amplitude de 5 mm e tempo de vibração de 10 s.

No quinto artigo, é realizado um ensaio para determinação da eficiência de derriça de cachos com frutos do cafeeiro. O ensaio é realizado empregando diferentes frequências, amplitudes e tempos de excitação 10 e 20 s, com o objetivo de avaliar a influência desses parâmetros na eficiência da derriça.

Por último, são apresentadas uma visão geral do trabalho e uma conclusão geral sobre os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. M., **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012. 213f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

ARISTZABAL, I. D., OLIVEROS, T. C. E., ALVARES, M. F. Mechanical harvest of coffee applying circular and multidirectional vibrations. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 2, p.205-209, 2003.

BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N.; SILVA, F. M. Desempenho operacional de derriçadoras mecânicas portáteis, em diferentes condições de lavouras

cafeeiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 129-132, 2005.

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

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Café Safra 2013 Terceira Estimativa, Setembro/2013**. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t>>. Acesso em: 14 out. 2013.

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

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

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; SOUZA, Z.M.; CHALFOU, S.M.; FIGUEIREDO, C.A.P. Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.6, p.827-831, 2007.

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; FIGUEREIDO, C.A.P, influência da vibração das hastes e da velocidade de Deslocamento da colhedora no processo de colheita mecanizada do café. **Revista Engenharia Agrícola**, v.27, n.3, p.714-721, 2007.

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

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

REH, S.; BELEY, J.; MUKHERJEE, S.; KHOR, E. H. Probabilistic finite element analysis using ANSYS. **Structural Safety**. v.28, n.1-2, p.17-43, 2006.

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

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

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

SEGUNDINHO, P.G.A.; COSSOLINO, L.C.; PEREIRA, A.H.A.; JUNIOR, C.C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, v.36.n.6 pp. 1155-1162, 2012

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

SILVA, F.M; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, R. J.; FIGUEIREDO, C. A. P.; SILVA, F. C. Desempenho operacional e econômico da derriça do café com uso da derriçadora lateral. **Coffee Science**, v.1, n.2, p.119-126, 2006.

SILVA, F.C.; SILVA, F.M.; SILVA, A.C.; BARROS, M.M; PALMA, M.A.Z, Desempenho operacional da colheita mecanizada e seletiva do café em

função da força de desprendimento dos frutos. **Coffee Science**, v.8, n.1, p.53-60, 2013.

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

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

TARGA, L.A.; BALLARIN, A.W.; BIAGGIONI, M.A.M.. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Revista Engenharia Agrícola**, v.25.n.2.p. 291-299, 2005

ARTIGO I: Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

Resumo

O desenvolvimento de máquinas eficientes para a colheita do café exige estudo sobre o comportamento dinâmico da planta. O método de elementos finitos tem sido empregado no projeto de máquinas, bem como para o estudo do comportamento dinâmico da planta do cafeeiro ou de suas partes. Como parâmetros de entrada para utilização do método de elementos finitos, devem ser informadas as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema em estudo. Objetivou-se neste trabalho determinar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo, nos estádios de maturação verde, verdoengo e cereja, e do ramo do cafeeiro. As dimensões foram determinadas por meio de processamento de imagens, as massas e os volumes mensurados, utilizando-se balança e proveta, respectivamente. O módulo de elasticidade do fruto foi determinado por meio de ensaios mecânicos de compressão. Os coeficientes de Poisson foram determinados pelas deformações longitudinais e transversais dos frutos e pedúnculos. A razão de amortecimento foi determinada pelas curvas de decaimento, utilizando o método de decremento logarítmico. Concluiu-se que as dimensões e a massa dos frutos apresentaram tendência de aumento na medida em que seu estágio de maturação evoluiu. Os módulos de elasticidade dos frutos no estágio de maturação verde foram superiores aos valores para o estágio de maturação cereja. Foram obtidos valores de razão de amortecimento para o pedúnculo e ramo menores que o unitário, caracterizando-os como um sistema subamortecido.

Palavras-chave: módulo de elasticidade, massa específica, Catuaí Vermelho, razão de amortecimento, coeficiente de Poisson.

Determination of geometric, physical, mechanical properties of coffee fruit-stem-branch system

Abstract

The development of efficient machines for the coffee harvesting requires the study of the plant's dynamic behavior. The finite elements method has been applied for machines design as well as for studying the dynamic behavior of the coffee plant or its parts. For using the finite elements method, the geometric, physical, and mechanical properties of system under study must be informed as input parameters. This study aimed to determine the geometric, physical, and mechanical properties of fruit-stem system in the green, half-ripe, and ripe ripeness stage, and of coffee plant branch. The dimensions were determined by image processing; the masses and volumes were measured using scale and beaker, respectively. The fruit's elasticity modulus was determined by mechanical compression tests. The Poisson's ratios were determined using the longitudinal and transversal deformation of the fruits and stems. The damping ratio was determined by the decay curves using the logarithmic decrement method. It was concluded that the fruits' dimensions and mass showed tendency to increase with the ripeness stage evolution. The fruits' elasticity modules in green ripeness stage are higher than the values of the ripe stage. Values of damping ratio for the stem and branch were less than a unit, characterizing them as underdamped system.

Key words: elasticity modulus, density, Red Catuai, damping ratio, Poisson's ratio.

1. Introdução

O café é uma importante fonte de receita, que contribui para o produto interno bruto (PIB) do Brasil. Como maior produtor mundial, a produção em 2012 foi de 50,83 milhões de sacas de 60 quilos. Para 2013, a estimativa de produção é de 48,59 milhões de sacas, cuja previsão de redução se deve, principalmente, ao ciclo de bienalidade e à irregularidade das chuvas, associadas a altas temperaturas em grande parte das áreas de café arábica (CONAB, 2013).

A colheita do café é realizada em seis etapas: arruação, derriça, varrição, recolhimento, abanação e transporte. A derriça é uma etapa que demanda elevado contingente de mão de obra, contribuindo significativamente para o custo de colheita (BARBOSA et al., 2005). A derriça pode ser total, em que todos os frutos são colhidos, independentemente do estágio de maturação, ou seletiva, em que apenas os frutos maduros são colhidos (SOUZA et al., 2006). Apesar de a segunda forma permitir a obtenção de um produto de melhor qualidade e, conseqüentemente, aumentar a receita do produtor, a primeira forma é comumente empregada por reduzir os custos de produção. É necessário o desenvolvimento de máquinas para a derriça dos frutos para aumentar a capacidade operacional do processo de colheita e, por sua vez, amenizar os problemas relativos à escassez de mão de obra no setor agrícola.

Atualmente, as máquinas empregadas para colheita mecanizada de culturas, como café, damasco, laranja, pistache, oliva e uva, utilizam o princípio das vibrações mecânicas (ERDOGAN et al., 2003; SANDERS, 2005; SESSIZ e OZCAN, 2006; SOUZA et al., 2006; POLAT et al., 2007; PEZZI e CAPRAVA, 2009; SANTOS et al., 2010a). Por meio de fontes de potência elétrica, pneumática, hidráulica ou mecânica, a energia cinética é transmitida à planta ou a uma parte dela, promovendo o desprendimento dos frutos.

A colheita mecanizada por vibrações mecânicas exige uma combinação adequada dos parâmetros frequência, amplitude e tempo de

vibração, que permitem melhor desprendimento dos frutos, além de promover menor desfolha e quebra de ramos. A determinação destes parâmetros pode ser realizada pelo estudo do comportamento dinâmico da planta a ser colhida (CIRO, 2001; SANTOS et al., 2010a).

O comportamento dinâmico da planta de café, ou de parte dela, vem sendo estudado por meio de equações analíticas, experimentos controlados em laboratório, experimentos de campo ou ferramentas computacionais (CIRO, 2001; FILGUEIRAS, 2001; ARISTIZÁBAL et al., 2003; SOUZA, et al., 2006; SANTOS et al., 2010a, 2010b). Esta última compreende o método de elementos finitos, que consiste na geração e solução de um sistema de equações diferenciais que governam o comportamento físico em questão (ALBURQUEQUE, 2005; TAPLAK e PARLAK, 2012). No entanto, para a realização de simulações computacionais, que permitam o estudo de diferentes cenários, são demandados parâmetros de entrada referentes às propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema.

Estas propriedades compreendem as dimensões massa específica, momento de inércia, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, razão de amortecimento, forças de desprendimento, entre outras. Tratando-se de estruturas biológicas, as propriedades podem variar em função da espécie, variedade, condições climáticas, além da idade da planta e tipo de manejo realizado (ARISTIZÁBAL et al., 2003; RODRÍGUEZ et al., 2006).

ARISTIZÁBAL et al. (2003), estudando variedades colombianas de café, determinaram as propriedades físicas, o módulo de elasticidade, a constante elástica, o coeficiente de amortecimento e a frequência natural amortecida para o tronco e os ramos do cafeeiro. Entre as conclusões, os autores verificaram que o cafeeiro apresenta propriedades físicas e mecânicas favoráveis à transmissão de vibrações mecânicas aplicadas em seu tronco.

Ao estudar a variedade Colombiana do cafeeiro, CIRO (2001) determinou as propriedades físicas, geométricas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo em três estádios de maturação. Posteriormente, o autor realizou a modelagem do sistema fruto-pedúnculo como um sistema de um e dois graus de liberdade, determinando analiticamente as frequências naturais de vibração. Constatou que as frequências naturais do sistema

fruto-pedúnculo são dependentes das propriedades físicas e mecânicas. Verificou, também, que estas frequências se reduzem na medida em que o estágio de maturação do sistema fruto-pedúnculo evolui de verde para cereja.

Com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas dos frutos de café, COUTO et al. (2002) determinaram o módulo de deformidade de frutos do cafeeiro, para a variedade Catuaí Vermelho, nos estádios de maturação verde, verdoengo e cereja. A partir dos resultados, verificou-se que o módulo de deformidade se reduz na medida em que os frutos passam do estágio de maturação verde para cereja.

SAMPAIO (2000) estudou as forças necessárias para desprendimento dos frutos do cafeeiro em diversas variedades para os estádios de maturação verde, verdoengo e cereja. Entre os resultados, constatou-se que as forças necessárias para o desprendimento dos frutos variam em função do estágio de maturação e da posição dos frutos na planta.

Visando a entender os esforços necessários para desprendimentos dos frutos de café, SILVA et al. (2010) desenvolveram um dinamômetro portátil, que possibilitou a realização dos ensaios diretamente na planta. Experimentos foram realizados em diversas variedades, nos estádios de maturação verde, cereja, passa e seco, em cinco épocas, numa mesma colheita. Foram observadas diferenças significativas nas forças de desprendimento dos frutos entre os estádios de maturação, obtendo valores superiores para o estágio de maturação verde.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho determinar e avaliar as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro, bem como avaliar os efeitos do estágio de maturação sobre essas propriedades.

2. Material e métodos

A pesquisa foi executada utilizando amostras de café arábica, variedade Catuaí Vermelho, coletadas em uma Área Experimental localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa – MG. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, no período maio/2013 a julho/2013. As amostras foram coletadas sempre pela manhã e os ensaios realizados durante o mesmo dia da coleta.

Foram determinadas as dimensões, massa, volume, massa específica e coeficiente de Poisson e razão de amortecimento para o sistema fruto-pedúnculo e para o ramo. Para o fruto, foi determinado ainda o módulo de elasticidade. Especificamente para o sistema fruto-pedúnculo, foram considerados os estádios de maturação verde, verdoengo e cereja.

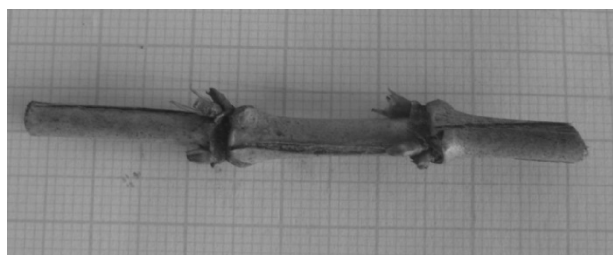
Nos experimentos para determinação das dimensões, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, foi empregada uma câmera digital SAMSUNG PL 120 com resolução de 14 megapixels, sendo os vídeos e as imagens posteriormente processados por meio do programa computacional SCILAB (SCILAB ENTERPRISES, 2012), versão 5.4.

2.1. Dimensões

Para cada estágio de maturação, foram capturadas imagens de 120 amostras do sistema fruto-pedúnculo sobre uma malha graduada em milímetros (Figura 1a). De forma similar ao sistema fruto-pedúnculo, outras 120 imagens de amostras foram adquiridas para o ramo (Figura 1b).



(a)



(b)

Figura 1: Imagem de uma amostra do (a) sistema fruto-pedúnculo e do (b) ramo do cafeeiro sobre malha graduada em milímetros.

As imagens capturadas foram processadas para determinar o comprimento e o diâmetro equatorial do fruto, o comprimento e o diâmetro do pedúnculo e o diâmetro médio do ramo.

2.2. Massa e volume

As massas médias dos frutos e pedúnculos foram determinadas em 120 amostras para cada estágio de maturação, utilizando-se uma balança digital, com precisão 0,01 g. As massas dos frutos foram mensuradas individualmente, enquanto, para os pedúnculos, foram empregados conjuntos de dez amostras. A massa média dos ramos foi obtida e 120 amostras, mensuradas em conjuntos de dez amostras.

O volume médio de 120 amostras dos frutos, em cada estágio de maturação e do ramo, foi mensurado, utilizando uma proveta de 100 mL, com precisão de 1 mL. Para o pedúnculo, 120 amostras em cada estágio de maturação, utilizou-se uma proveta de 10 mL, com precisão de 0,1 mL. Para os frutos, pedúnculos e ramos, as medições dos volumes foram realizadas imergindo um conjunto de dez amostras em água.

2.3. Massa específica

A massa específica foi determinada para as amostras dos frutos, pedúnculos e ramo, por meio dos valores de massa e volume médios obtidos experimentalmente, segundo a Equação (1).

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

em que

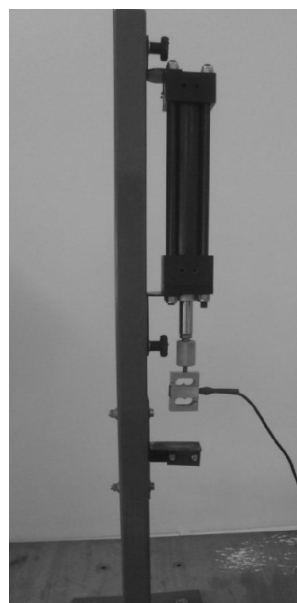
ρ = massa específica, g.cm⁻³;

m = massa, g;

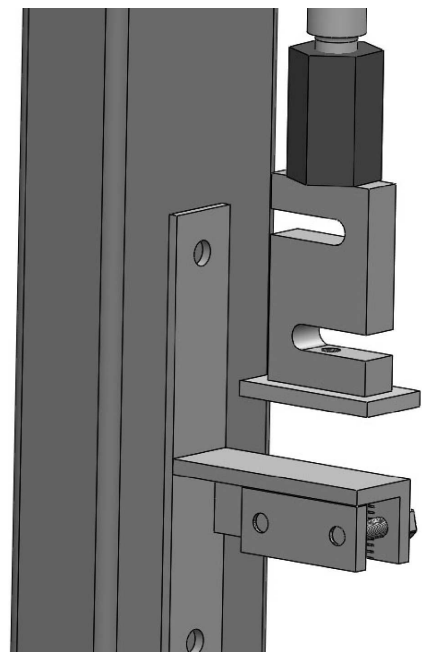
V = volume, cm³.

2.4. Módulo de elasticidade do fruto

O módulo de elasticidade dos frutos, determinado utilizando 36 amostras, foi obtido por meio de ensaios de compressão, sendo as amostras colocadas entre duas placas planas paralelas (Figura 2).



(a)



(b)

Figura 2: Aparato experimental para ensaio de compressão do fruto: (a) equipamento e (b) detalhe do sistema de fixação.

A força de compressão, provida por atuador hidráulico linear com velocidade de 1,0 mm/s, foi monitorada por meio de célula de carga Omega LC 101, com capacidade de 448,8 N, conectada a um sistema de aquisição de dados HBM, modelo Spider 8, gerenciado por computador, pelo software HBM Catman 2.2. O deslocamento da placa de compressão foi capturado

em vídeos, sendo, posteriormente, processados para obtenção da deformação do fruto.

O módulo de elasticidade dos frutos foi calculado pelo método de Hertz, que é utilizado para a determinação de módulo de elasticidade de corpos convexos, comprimidos entre duas placas planas paralelas, conforme a Equação (2) (RIBEIRO et al., 2007).

$$E = \frac{0,531F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

em que

E = Módulo de elasticidade, Pa;

F = Força de compressão, N;

D = Deformação elástica do corpo, m;

μ = coeficiente de Poisson, m.m⁻¹; e

r_1, R_1 = raio de curvatura do corpo convexo nos pontos de contato, m.

Para determinação dos raios de curvatura, as imagens dos frutos entre as placas foram capturadas, utilizando uma câmera digital SAMSUNG PL 120. Posteriormente, um ajuste de circunferências à curvatura na imagem do corpo foi realizado para determinação dos raios de curvatura (Figura 3).

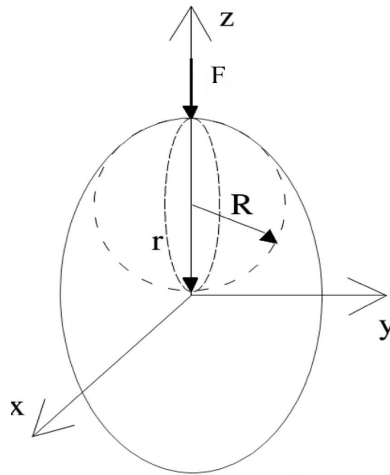


Figura 3: Determinação dos raios de curvatura do corpo convexo nos pontos de contato com a placa plana (RIBEIRO et al., 2007).

Aplicando a Equação (2), o módulo de elasticidade foi calculado utilizando valores de força de compressão e deformação elástica correspondentes a uma deformação específica do fruto de $0,01 \text{ m.m}^{-1}$.

2.5. Coeficiente de Poisson

Os coeficientes de Poisson para os frutos e pedúnculos foram determinados utilizando 12 amostras em cada estágio de maturação.

2.5.1. Coeficiente de Poisson do fruto

As amostras dos frutos foram colocadas entre duas placas planas paralelas e comprimidas por meio de um atuador hidráulico linear (Figura 2). Imagens do fruto antes e durante a compressão foram capturadas e, posteriormente, processadas para determinação dos comprimentos e diâmetros equatoriais dos frutos.

O coeficiente de Poisson foi calculado pela Equação (5).

$$v = \frac{-\Delta d}{\Delta l} \quad (5)$$

em que

v =coeficiente Poisson, m.m^{-1} ;

Δd =deformação transversal, m; e

Δl =deformação longitudinal, m.

2.5.2. Coeficiente de Poisson do pedúnculo

As amostras dos pedúnculos foram fixadas diretamente no fruto e no ramo por meio de placas e tracionadas por meio de um atuador hidráulico linear.

Imagens das amostras do pedúnculo antes e durante a tração foram capturadas e, posteriormente, processadas para determinação do comprimento e diâmetro do pedúnculo. O coeficiente de Poisson foi calculado pela Equação (5).

2.6. Razão de amortecimento do pedúnculo e do ramo

Amostras dos sistemas fruto-pedúnculo e de ramos com comprimento 300 mm foram excitadas utilizando um sistema produzido pela LDS (Ling Dynamic Systems), composto por um gerador de sinais COMET USB da marca Dactron, um amplificador LDS PA100E-CE e uma máquina vibradora eletromagnética, modelo V-406 (Figura 4). O gerador de sinais foi controlado por computador por meio de programa computacional fornecido pelo fabricante. As amostras foram presas ao sistema de fixação por placas, que, por sua vez, foram fixadas à máquina vibradora eletromagnética.



(a)



(b)



(c)

Figura 4: Sistema utilizado no experimento para excitação das amostras composto por (a) máquina vibradora eletromagnética, (b) amplificador e (c) gerador de sinal.

As amostras dos sistemas fruto-pedúnculo e dos ramos foram presas ao sistema de fixação, o qual foi acoplado à base móvel da máquina

vibradora eletromagnética (Figura 5). O sistema de fixação também foi utilizado para acoplamento do transdutor piezoelétrico.

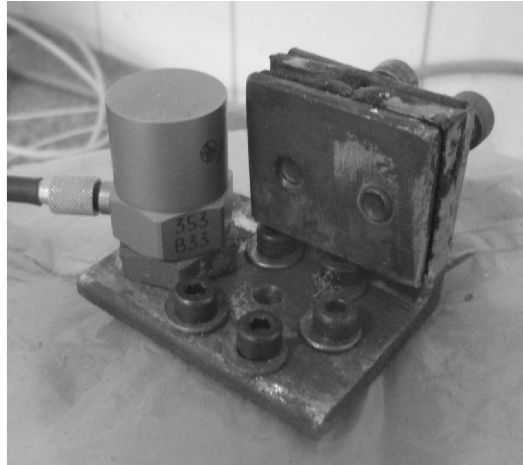


Figura 5: Sistema de fixação das amostras e suporte do transdutor piezoelétrico.

Excitações do tipo função impulso foram geradas pela máquina vibradora eletromagnética e usadas para gerar os deslocamentos nas amostras. Tais deslocamentos foram capturados por uma câmera de alta velocidade Mega Speed HHC modelo X3, com capacidade de captura de 1000 quadros por segundo. As imagens foram processadas em software Scilab (SCILAB ENTERPRISES, 2012), versão 5.4, obtendo o deslocamento de um ponto da amostra em função do tempo. Por meio da curva de decaimento, Figura 6, utilizando método de decremento logarítmico, a razão de amortecimento foi calculada pela Equação 6 (RAO, 1995).

$$A = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{X_I}{X_{I+N}} \right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (6)$$

em que

A = decremento logarítmico;

N = número de ciclos usados para medição das amplitudes;

X_I e X_{I+N} = amplitude de deslocamento; e

ζ = razão de amortecimento do sistema.

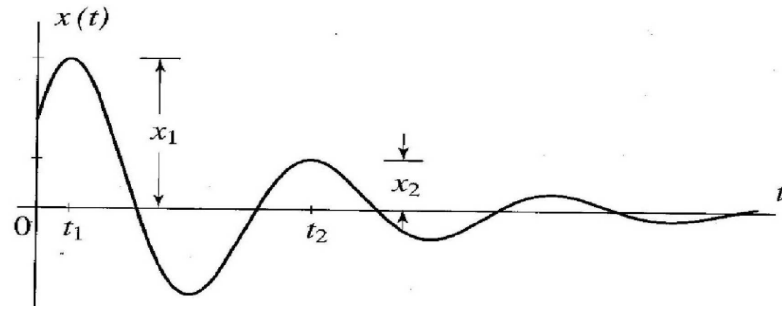


Figura 6: Curva de decaimento para aplicação do método de decremento logarítmico (MEIROVITCH, 2001).

Resolvendo a Equação (6), a razão de amortecimento pode ser determinada pela Equação (7).

$$\zeta = \frac{A}{\sqrt{A^2 + 4\pi^2}} \quad (7)$$

A razão de amortecimento foi determinada para 30 amostras do sistema fruto-pedúnculo e para 10 amostras do ramo.

2.7. Análise dos dados

Os dados de dimensões, massa específica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e razão de amortecimento das amostras foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos (estádios de maturação verde, verdoengo e cereja). O efeito dos estádios de maturação sobre o comportamento das propriedades geométricas, físicas e mecânicas foi estudado por meio do teste de Tukey, ao nível de significância de 5%. As análises estatísticas foram feitas pelo programa computacional R (R CORE TEAM, 2013), versão 2.15.

3. Resultados e discussão

3.1. Dimensões

As dimensões dos frutos aumentaram na medida em que evoluíram do estágio de maturação verde para cereja (Tabela 1). Porém, diferenças significativas não foram encontradas ao comparar os valores médios para comprimento e diâmetro do fruto nos estádios verdeoengo e cereja. Este comportamento, também observado por YUNG e FRIDLEY (1974), CIRO (2001) e RODRÍGUEZ et al. (2006), pode ser explicado pelo desenvolvimento do endosperma e perisperma em decorrência da divisão e do alongamento celular (CASTRO e MARRACCINI, 2006).

Tabela 1: Valores médios das propriedades geométricas para o fruto e pedúnculo, nos estádios de maturação verde, verdeoengo e cereja

Estádio de Maturação	Fruto		Pedúnculo	
	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
Verde	16,14 A	12,77 A	6,64 A	2,12 A
Verdeoengo	16,99 B	14,83 B	7,19 B	2,22 AB
Cereja	17,12 B	14,76 B	6,36 A	2,32 B

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

O diâmetro do pedúnculo aumentou na medida em que o estágio de maturação evoluiu, Tabela 1, concordando com o encontrado por YUNG e FRIDLEY (1974), CIRO (2001) e RODRÍGUEZ et al. (2006). Para o comprimento do pedúnculo, esperava-se obter o mesmo comportamento encontrado para o diâmetro, isto é, aumento da sua dimensão na medida em que o estágio de maturação evoluía de verde para cereja. Assim, uma vez que o sistema fruto-pedúnculo se encontrasse em fase de desenvolvimento, esperava-se que todas as dimensões apresentassem tendência de aumento, conforme observado por SANTOS (2008). A divergência no comportamento pode estar relacionada à variabilidade das propriedades geométricas dos pedúnculos (ARISTIZÁBAL et al., 2003; RODRÍGUEZ et al., 2006). Para o ramo, obteve-se diâmetro médio de 5,06 mm, com desvio padrão de 0,85 mm.

3.2. Massa e volume

A massa e o volume do fruto aumentaram na medida em que o estágio de maturação passou de verde para cereja, Tabela 2, conforme reportado por CIRO (2001), RODRÍGUEZ et al. (2006) e SANTOS (2008). Este comportamento também pode ser explicado pela divisão e alongamento das células dos frutos, ocasionando aumentos de massa e volume (CASTRO e MARRACCINI, 2006). Os volumes do pedúnculo nos três estádios de maturação são estaticamente iguais, ao nível de 5 %, pelo teste de Tukey.

Tabela 2: Valores médios de massa e volume do fruto e pedúnculo, nos estádios de maturação verde, verdoengo e cereja

Estádio de Maturação	Fruto		Pedúnculo	
	Massa (g)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Volume (cm ³)
Verde	1,04 A	0,92 A	0,03 A	0,03 A
Verdoengo	1,34 A	1,25 B	0,04 B	0,02 A
Cereja	1,38 B	1,37 C	0,03 A	0,02 A

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

3.3. Massa específica

A massa específica do fruto se reduziu na medida em que o estágio de maturação evoluiu, Tabela 3, em concordância com o obtido por SANTOS (2008), enquanto CIRO (2001) e RODRÍGUEZ et al. (2006) obtiveram tendência de aumento na massa específica, porém em magnitudes desprezíveis.

Tabela 3: Valores médios para massa específica do fruto e pedúnculo, nos três estádios de maturação

Estádio de Maturação	Massa Específica (g.cm ⁻³)	
	Fruto	Pedúnculo
Verde	1,13 A	1,09 A
Verdoengo	1,07 AB	1,76 BC
Cereja	1,02 B	1,46 AC

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

A redução da massa específica está relacionada às taxas em que os frutos aumentaram seus volumes e suas massas. Portanto, no presente trabalho, verificou-se taxa de aumento do volume superior à taxa de aumento da massa, ocasionando redução da massa específica do fruto.

Para o ramo, obteve-se valor médio 0,90 g.cm⁻³, com desvio padrão de 0,11 g.cm⁻³ para a massa específica. FILGUEIRAS (2001) obteve 0,978 g.cm⁻³ para ramos com diâmetro de 5,4 mm. O valor inferior encontrado no presente trabalho pode ter sido devido a variações nas propriedades físicas em função da espécie, variedade, idade e tipo de manejo do cafeeiro, além de condições climáticas (ARISTIZÁBAL et al., 2003, RODRÍGUEZ et al., 2006).

3.4. Módulo de elasticidade do fruto

Para os frutos, o módulo de elasticidade se reduziu na medida em que evoluiu do estágio de maturação verde para cereja, porém, sem diferenças significativas entre os estádios verdoengo e cereja (Tabela 4).

Tabela 4: Valores médios para módulo de elasticidade do fruto, nos três estádios de maturação

Estádio de Maturação	Módulo de elasticidade (MPa)
Verde	15,82 A
Verdoengo	4,95 B
Cereja	2,93 B

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

A redução do módulo de elasticidade do fruto, também observado por COUTO et al. (2002), é devida à redução da rigidez da mucilagem, que sofre um processo de desestruturação na medida em que ocorre a maturação do fruto, adquirindo a forma de gel (CASTRO e MARRACCINI, 2006). Associado à desestruturação da mucilagem, ocorre também o enfraquecimento das paredes celulares do fruto, causado pela ação de enzimas (RODRIGUES e ONO, 2011).

Em experimento utilizando amostras de café da variedade Catuaí Vermelho, COUTO et al. (2002) obtiveram valores próximos a 9,0; 27,0; 45,0 MPa para módulo de elasticidade de frutos cereja, verdoengo e verde, respectivamente. As diferenças de magnitudes podem estar relacionadas às variações das propriedades mecânicas em função da espécie, idade, manejo da planta, entre outras (ARISTILZÁBAL et al., 2003). Além disso, também podem estar relacionadas a parâmetros do ensaio, como velocidade de compressão.

3.5. Coeficiente de Poisson

Não foram encontradas diferenças significativas entre os valores de coeficiente de Poisson para o pedúnculo, nos três estádios de maturação (Tabela 5).

Tabela 5: Valores médios para coeficiente de Poisson do fruto e pedúnculo, nos estádios de maturação verde, verdoengo e cereja

Estádio de Maturação	Coeficiente de Poisson	
	Fruto	Pedúnculo
Verde	0,24 AC	0,35 A
Verdoengo	0,32 B	0,34 A
Cereja	0,27 BC	0,35 A

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

Para o fruto, o coeficiente de Poisson no estágio de maturação cereja foi superior ao valor para o estágio verde, significando que, para uma determinada deformação longitudinal, os frutos cereja apresentam maior deformação na direção longitudinal quando comparados aos frutos verdes. Tal comportamento pode estar relacionado à desestruturação da mucilagem e à degradação da parede celular do fruto-pedúnculo, favorecendo as deformações transversais (CASTRO e MARRACCINI, 2006; RODRIGUES e ONO, 2011).

RODRÍGUEZ et al. (2006) obtiveram valores de 0,3191 e 0,3457 para o coeficiente de Poisson dos pedúnculos cereja e verdes, respectivamente, de plantas de café da variedade Catuaí. Comparando os resultados obtidos pelos autores com os obtidos no presente trabalho, verificam-se resultados com magnitudes próximas, principalmente para o estágio de maturação cereja.

3.7. Razão de amortecimento

A razão de amortecimento do sistema fruto-pedúnculo, Tabela 6, e ramo foi determinada pelas curvas de decaimento (Figura 7).

Tabela 6: Valores médios para razão de amortecimento do sistema fruto-pedúnculo, nos três estádios de maturação

Estádio de Maturação	Razão de Amortecimento
Verde	0,15 A
Verdoengo	0,11 A
Cereja	0,09 A

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

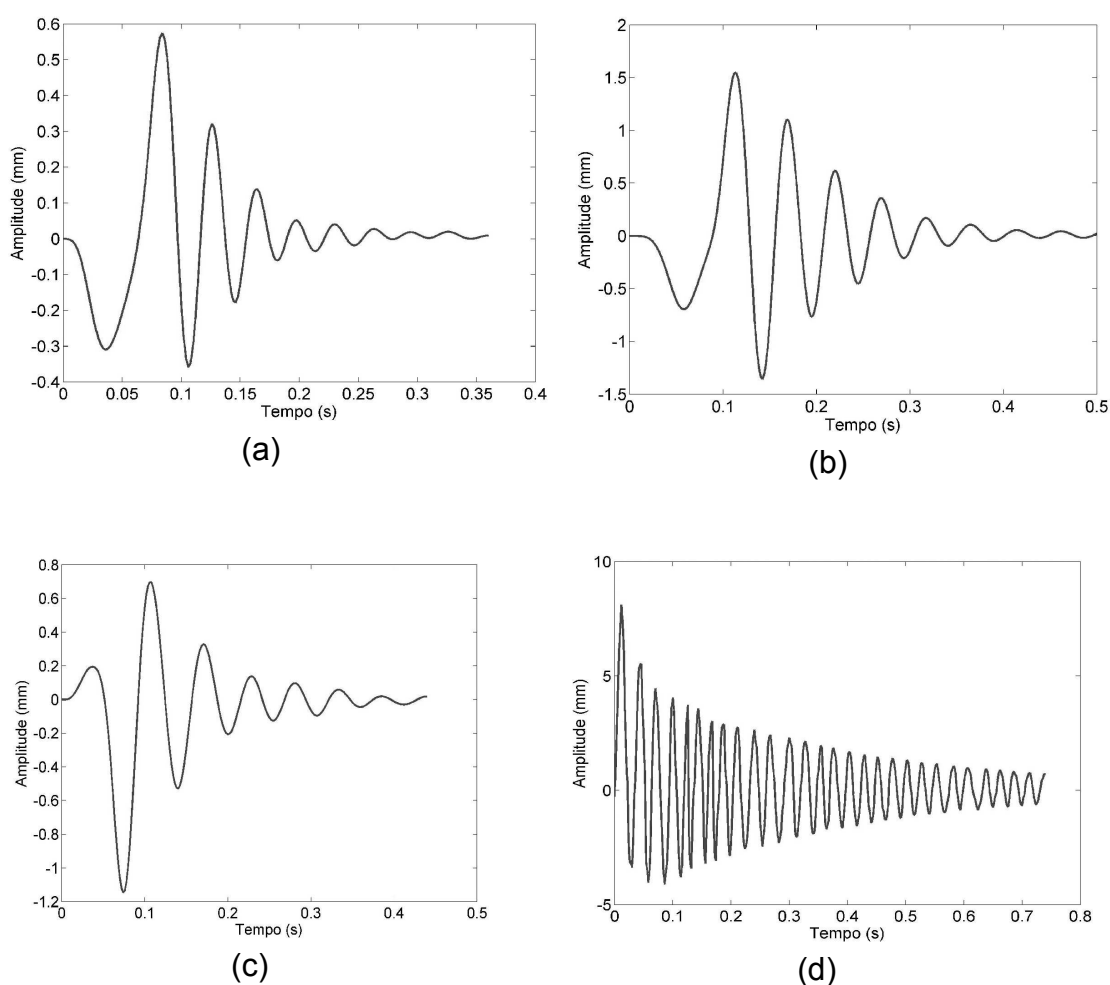


Figura 7: Curvas de decaimentos obtidos para o pedúnculo nos estádios de maturação cereja (a), verdoengo (b), verde (c), e para o ramo (d).

Ao comparar os valores para os estádios de maturação, diferenças significativas não foram encontradas ao nível de 5%. Analisando a tendência dos valores, a razão de amortecimento do pedúnculo se reduziu na medida

em que o estágio de maturação passou de verde para cereja, significando que o sistema fruto-pedúnculo no estágio de maturação verde apresentou maior capacidade de amortecimento da excitação a que foi submetido. Para o ramo, encontrou-se razão de amortecimento com valor médio de 0,02 e desvio padrão de 0,01.

ARISTILZÁBAL et al. (2003), também utilizando método de decremento logaritmo, encontraram valores entre 0,04 e 0,10 para razão de amortecimento do sistema tronco-ramo do cafeeiro e para o sistema tronco-ramo-folhas, obtiveram valores entre 0,08 e 0,1, indicando que as folhas do cafeeiro favorecem o amortecimento de excitações provocadas na planta. Os valores para razão de amortecimento obtidos no presente trabalho e por ARISTILZÁBAL et al. (2003) são menores que 1,0, caracterizando a planta do cafeeiro e suas partes como um sistema subamortecido (RAO, 1995)

4. Conclusões

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

- i. Houve tendência de aumento nas dimensões, na massa e no volume dos frutos na medida em que o estágio de maturação evoluiu. Para massa específica, houve tendência de redução na medida em que o estágio de maturação do fruto evoluiu.
- ii. Os módulos de elasticidade para as amostras de frutos tenderam a se reduzir na medida em que seu estágio de maturação evoluiu.
- iii. Os valores obtidos para a razão de amortecimento dos pedúnculos e dos ramos foram menores que o unitário, caracterizando o sistema fruto-pedúnculo e ramo do cafeeiro como subamortecido.

5. Referências bibliográficas

ALBURQUEQUE, E.L. **Investigação sobre a variabilidade da resposta dinâmica de painéis reforçados**. 2005. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

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

BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N.; SILVA, F. M. Desempenho operacional de derriçadoras mecânicas portáteis, em diferentes condições de lavouras cafeeiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 129-132, 2005.

CASTRO, R.D.; MARRACCINI, P. Cytology, biochemistry and molecular changes during coffee fruit development. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, n.1, p.175-199, 2006

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Café Safra 2013 Segunda Estimativa, Maio/2013**. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t>>. Acesso em: 31 jul. 2013.

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

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

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

MEIROVITCH, L. **Fundamentals of Vibrations**. First edition. Singapore, Mc Graw Hill, 2001. 806 p.

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

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

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. Third edition. New York, EUA: Addison-Wesley Publishing Company, 1995. 912p.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, 2013, URL <http://www.R-project.org/>.

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

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

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

SAMPAIO, C.P. **Determinação da força requerida para o desprendimento de frutos de café em diferentes estádios de maturação**. 2000. 48 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)– Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

SANTOS, F. L. **Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derriça**. 2008. 136 p. 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**, v. 32, n.3, p. 373-378, 2010.

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.

SCILAB ENTERPRISES. **Scilab: Free and Open Source software for numerical computation** (Version 5.4), 2012. Available from: <http://www.scilab.org>

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

SILVA, F.C.; SILVA, F.M.; ALVES, M. C; BARROS, M.M.; SALES, R.S. Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiro ao longo do período de colheita. **Revistas Ciências Agrotécnicas**, v.34, n.2, p.468-474, 2010.

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

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

YUNG, C.; FRIDLEY, R.B. **Computer analysis of fruit detachment during tree shaking**. St. Joseph: ASAE, 1974 (Paper n. 74-3009)

**ARTIGO II: Metodologia para determinação do módulo de elasticidade
do pedúnculo e ramo do cafeeiro**

Metodologia para a determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo do cafeeiro

Resumo

O desenvolvimento de máquinas eficientes para a colheita de café exige conhecimentos sólidos sobre o comportamento dinâmico da planta. Entre as ferramentas para determinação das frequências naturais e modos de vibração tem-se a modelagem pelo método de elementos finitos, que consiste na geração e solução de equações diferenciais que descrevem o fenômeno físico em estudo. No entanto, esta ferramenta exige como parâmetros de entrada as propriedades geométricas e mecânicas do sistema. Essas propriedades podem ser difíceis de ser obtidas experimentalmente. Assim, objetivou-se desenvolver uma metodologia para a determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e do ramo do cafeeiro por meio da comparação da frequência natural experimental com a frequência obtida por método de elementos finitos. A frequência natural experimental foi obtida a partir de um ensaio de varredura de frequências, em que o sistema fruto-pedúnculo e o ramo foram excitados em uma faixa de 10 a 30 Hz. Os deslocamentos dos sistemas foram capturados por uma câmera de alta velocidade e, posteriormente, processados para a obtenção das frequências de ressonância. Foi desenvolvido um algoritmo a partir do qual a frequência natural do sistema foi determinada para vários módulos de elasticidade. O módulo de elasticidade foi considerado aquele que cujo o desvio entre a frequência natural simulada e experimental foi menor que a tolerância. A partir dos resultados, verificou-se que a frequência natural do sistema fruto-pedúnculo no estágio de maturação verde foi superior ao cereja e que o módulo de elasticidade do pedúnculo no estágio de cereja foi superior ao valor para verde. Os valores médios para os módulos de elasticidades foram de 15,74; 23,90 e 4645,90 MPa para o pedúnculo nos estágios de maturação verde, cereja e para o ramo, respectivamente. A metodologia desenvolvida foi eficaz para a determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo do cafeeiro.

Palavras-chave: algoritmo, método de elementos finitos, frequência natural.

Methods for modulus elasticity determination of coffee branch and stem

Abstract

The development of efficient machines for the coffee harvesting requires a solid knowledge on this plant's dynamic behavior. Among the tools to determine the natural frequencies and mode shapes, the modeling by finite elements method is used, which consists in generation and solution of differential equations that describe the physical phenomenon under study. However, this tool requires as input parameters the geometrical and mechanical properties of the system. Maybe it is difficult to obtain these properties experimentally. Thus, this study aimed to develop a methodology for determining the elasticity modulus of stem and branch by comparing the experimental natural frequency with the frequency obtained by finite elements method. The experimental natural frequency was obtained based on frequencies sweep test, by which the fruit-stem system and the branch were stimulated in a range of 10 to 30 Hz. The systems displacement were captured by a high speed camera and subsequently processed to obtain the resonance frequencies. An algorithm has been developed from which the natural frequency of the system was determined for various elasticity modules. It was taken into account the elasticity modulus whose deviation between the simulated natural frequency and the experimental frequency was lower than the required tolerance. Based on results, it was found that the natural frequency of the fruit-stem system at green ripeness stage was higher than cherry stage and then stem's elasticity modulus at the ripe stage was higher than green ripeness stage. The average values for the elasticity modules were 15.74; 23.90; and 4645.90 MPa for stem at the green and ripe ripeness and for branch, respectively. The methodology was effective for determining the elasticity modulus of the stem and branch of the coffee plants.

Key words: algorithm, finite element method, natural frequencies

1. Introdução

Com o crescente aumento da população mundial aliada ao maior poder de compra, torna-se inevitável o aumento da produção de alimento, entre eles o café. Porém, com a escassez de mão de obra no campo surge a necessidade de aumentar a eficiência na produção de alimentos, neste contexto a mecanização de processos agrícolas surge com relevante destaque.

As colhedoras usadas em culturas, como café, damasco, laranja, pistache, oliva e uva, utilizam o princípio de vibrações mecânicas (ERDOGAN et al., 2003; SANDERS, 2005; SESSIZ e OZCAN, 2006; SOUZA et al., 2006; POLAT et al., 2007; PEZZI e CAPRAVA, 2009; SANTOS et al., 2010a). A colheita por vibrações mecânicas de modo eficiente exige a utilização de frequências, amplitudes e tempos de vibração adequados. Garantindo um maior desprendimento dos frutos, além de promover uma menor desfolha e quebra de ramos. A determinação dos valores ótimos dessas variáveis podem ser realizada a partir do estudo do comportamento dinâmico da planta a ser colhida (CIRO, 2001; SANTOS et al., 2010a).

O comportamento dinâmico da planta de café, ou de parte dela, vem sendo estudado por meio de experimentos controlados em laboratório, experimentos de campo ou por meio de ferramentas computacionais (CIRO, 2001; FILGUEIRAS, 2001; ARISTIZÁBAL et al., 2003; SOUZA, et al., 2006; SANTOS et al., 2010a, 2010b). As ferramentas computacionais apresentam como vantagem o menor custo e a rapidez para obtenção dos resultados. Uma das ferramentas computacionais utilizadas é o método de elementos finitos, que consiste na geração e solução de um sistema de equações diferenciais que governam o comportamento físico em questão (ALBURQUEQUE, 2005; TAPLAK e PARLAK, 2012). No entanto, para a realização de simulações computacionais, que permitam o estudo de diferentes cenários, são demandados parâmetros de entrada referentes às propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema.

Ao determinar o módulo de elasticidade por ensaios de flexão, ARISTILZÁBAL (2003) engastou os ramos do cafeeiro em uma das extremidades, sendo a extremidade livre submetida a diferentes carregamentos. A deflexão foi medida por meio transdutor de deslocamento e o módulo de elasticidade determinado considerando o ramo como viga engastada com seção circular. Foram encontrados módulos de elasticidade entre 2,26 e 8,43 GPa para ramos em diferentes posições na planta das variedades Caturra Vermelho, Colombia Vermelho e Colombia Amarelo.

RODRÍGUEZ et al. (2006) determinaram o módulo de elasticidade do pedúnculo, considerando o sistema como uma viga engastada com massa na extremidade. O sistema foi submetido a diversos carregamentos, sendo o deslocamento determinado por processamento de imagens. Foram determinados valores médios 15,88 e 4,73 MPa para pedúnculo nos estádios de maturação cereja e verde, respectivamente.

A variabilidade das propriedades mecânicas está associada a vários fatores, dentre os quais destacam-se a idade da planta, a espécie, o clima, o manejo, entre outros fatores. Ademais, a discrepância entre os resultados presentes disponíveis na literatura pode estar relacionada à imprecisão dos métodos empregados na determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo do cafeeiro (ARISTIZÁBAL et al., 2003; RODRÍGUEZ et al., 2006; ALMEIDA, 2012).

Para a determinação de propriedades mecânicas da madeira e compostos como cimento e asfalto tem-se adotado uso de ensaios dinâmicos, em que o módulo de elasticidade é determinado a partir da frequência de ressonância do sistema, empregando ensaios de vibração (TARGA et al., 2005; ALMEIDA, 2012; SEGUNDINHO et al, 2012). Este método de ensaio vêm ganhando importância, principalmente em materiais que não apresentam regime elástico bem definido, em que a determinação do módulo de elasticidade pela Lei de *Hooke* é imprecisa. Além disso, são mais confiáveis uma vez que não possuem erros relativos à deformação da própria máquina de ensaio ou a influência da velocidade de ensaio na linearidade entre deformação e tensão (ALMEIDA, 2012).

Devido às irregularidades na geometria e composição heterogênea dos constituintes do sistema fruto-pedúnculo-ramo do café, torna-se difícil a

determinação das propriedades mecânicas desse sistema. Assim, esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se criar uma metodologia para a determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e do ramo do cafeeiro por meio de ensaio dinâmico e análise por elementos finitos.

2. Material e métodos

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. As amostras utilizadas nos experimentos foram coletadas em plantas de café arábica, variedade Catuaí Vermelho, localizados em uma Área Experimental da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa – MG, no período Maio/2013 a Julho/2013.

A primeira frequência natural de dezesseis amostras do sistema fruto-pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja, e de oito amostras do ramo foram determinadas experimentalmente, por meio de ensaios controlados de varredura de frequências. Posteriormente, os módulos de elasticidade dos pedúnculos e ramos foram determinados comparando as frequências naturais experimentais com as frequências obtidas por meio do método de elementos finitos, a partir de um algoritmo desenvolvido especialmente para esta função.

2.1. Determinação experimental das frequências naturais

Para determinação experimental das frequências de ressonância, amostras de sistemas fruto-pedúnculo e de ramos foram excitadas por um sistema produzido pela LDS (Ling Dynamic Systems) composto por um gerador de sinais COMET_{USB} da marca Dactron, um amplificador LDS PA100E-CE e uma máquina vibradora eletromagnética modelo V-406 (Figura 1).



(a)



(b)



(c)

Figura 8: Sistema utilizado nos ensaios de vibração para excitação das amostras, composto por máquina vibradora eletromagnética (a), amplificador de sinal (b) e gerador de sinal (c).

O gerador de sinais, controlado por computador, permitiu a obtenção de sinais de vibração da forma impulso, aleatória e senoidal. Os sinais elétricos de vibração gerados foram enviados para o amplificador, onde foram amplificados em até dez vezes. Na máquina vibradora (Tabela 1), os sinais elétricos já amplificados foram convertidos em deslocamentos de sua base móvel, por meio de eletroímãs.

Tabela 7: Características técnicas da máquina vibradora eletromagnética

Faixa dinâmica de trabalho (Hz)	5-9000
Carga máxima (N)	198
Deslocamento máximo pico-a-pico máximo (mm)	17,6
Aceleração máxima (g)	100

O controle do sistema foi realizado por meio de um transdutor piezoelétrico de aceleração (acelerômetro), fabricado pela PCB, com faixa de trabalho de 10 a 4000 Hz. Os sinais desse transdutor permitiram ao gerador de sinais o controle preciso das frequências e amplitudes de vibração impostas à base móvel da máquina vibradora.

As amostras dos sistemas fruto-pedúnculo e dos ramos foram presas ao sistema de fixação, o qual foi acoplado à base móvel da máquina vibradora eletromagnética (Figura 2). O sistema de fixação também foi utilizado para acoplamento do transdutor piezoelétrico.



Figura 9: Sistema de fixação das amostras e suporte do transdutor piezoelétrico.

Para os ensaios de vibração dos sistemas fruto-pedúnculo empregou-se excitação longitudinal sob a forma de função senoidal. Utilizou-se frequência de vibração variando progressivamente de 10 a 30 Hz, com deslocamento pico-a-pico constante de 7,21 mm. Para o ramo, a excitação foi realizada no sentido transversal sob a forma de função senoidal, utilizando frequência de vibração variando progressivamente de 10 a 30 Hz, com deslocamento pico-a-pico constante de 1,75 mm.

Os deslocamentos dos sistemas fruto-pedúnculo e do ramo foram capturados por meio de uma câmera de alta velocidade Mega Speed HHC, modelo X3, com capacidade de captura de 1000 quadros por segundo. Posteriormente, as imagens foram processadas por meio do software Scilab (SCILAB ENTERPRISES, 2012), versão 5.4, obtendo os deslocamentos das amostras em função do tempo. No sistema fruto-pedúnculo foi monitorado a região central do fruto enquanto no sistema ramo foi monitorada sua extremidade livre.

Os dados de deslocamento em função do tempo foram submetidos a transformada rápida de Fourier para a determinação dos espectros de frequência, realizada por meio do software Scilab (SCILAB ENTERPRISES, 2012), versão 5.4. A partir dos dados de amplitude de deslocamento dos pontos monitorados e da amplitude de excitação determinou-se a transmissibilidade dos pedúnculos e ramos, por meio da Equação (1).

$$T = \frac{Y_{ponto}}{Y_{excitação}} \quad (1)$$

em que,

T = transmissibilidade, mm.mm⁻¹;

Y_{ponto} = amplitude de deslocamento do ponto monitorado, mm;

$Y_{excitação}$ = amplitude de excitação, mm.

Os gráficos de transmissibilidade das amostras em função da frequência de excitação foram gerados para as amostras do sistema fruto-pedúnculo e do ramo. A frequência de ressonância foi determinada considerando a frequência de excitação correspondente à maior transmissibilidade do sistema. Exclusivamente para o sistema fruto-pedúnculo, os resultados obtidos para as frequências naturais foram submetidos à análise de variância para avaliar a influência do estágio de maturação sendo as médias das frequências comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5 %.

2.2. Determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo

Foi desenvolvido um algoritmo (Figura 3), o qual permitiu determinar o módulo de elasticidade por meio da comparação dos valores de frequências naturais obtidas experimentalmente e pelo método de elementos finitos (MEF). Para o cálculo da frequência natural dos sistemas pelo método de elementos finitos empregou-se o programa computacional Ansys Mechanical APDL, versão, 14.5, a partir do qual o algoritmo foi implementado.

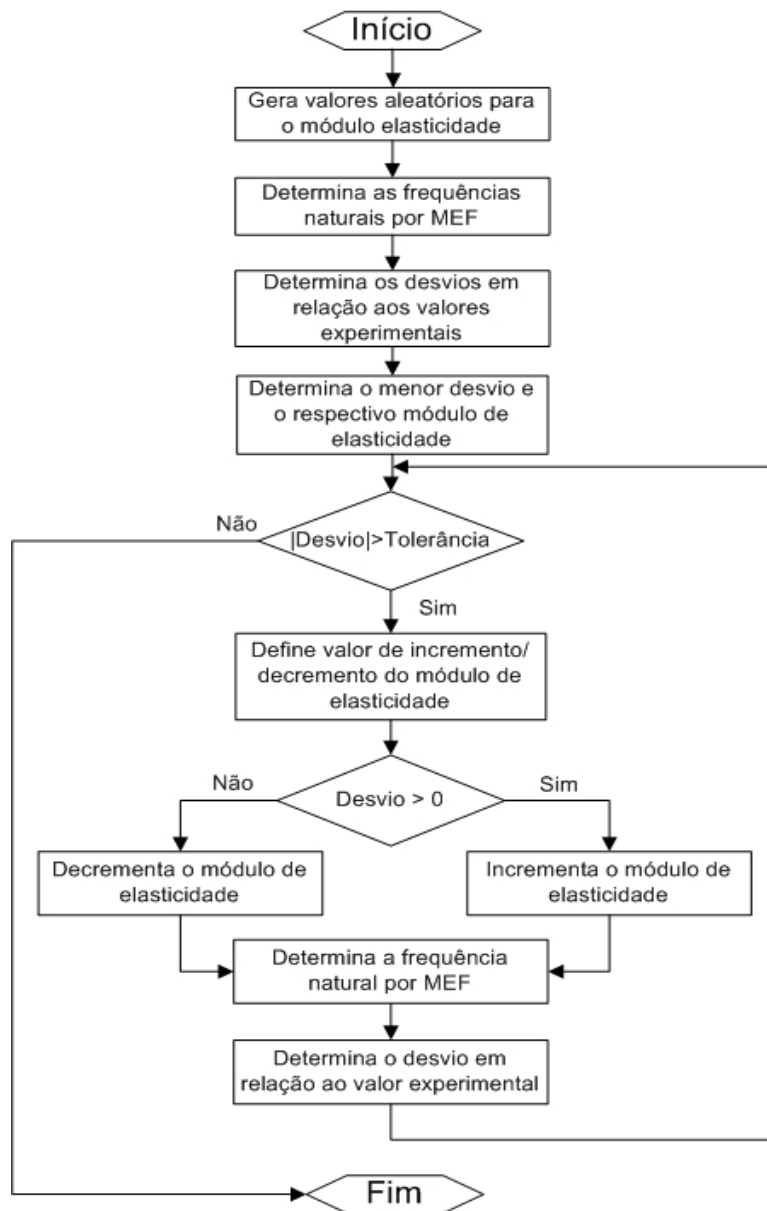


Figura 10: Fluxograma do método de determinação do módulo de elasticidade implementado no Ansys Mechanical APDL

O desvio entre a frequência natural obtida pelo método de elementos finitos (simulada) e pelo método experimental foi determinado pela Equação (2).

$$Desvio = F_{exp} - F_{mef} \quad (2)$$

em que,

$Desvio$ = desvio entre frequência natural simulada e experimental, Hz;

F_{exp} = frequência natural determinada experimentalmente, Hz;

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

Durante a execução do algoritmo, considerou-se o valor de incremento ou decremento no módulo de elasticidade (Tabela 2) em função do desvio percentual entre os valores de frequências experimentais e obtidas pelo método de elementos finitos, determinado pela Equação (3). O incremento ou decremento do módulo de elasticidade foi adotado nos cenários em que a frequência experimental foi superior ou inferior à frequência simulada, respectivamente, objetivando a minimização do erro (Figura 3).

$$Desvio_p = \frac{|F_{exp} - F_{mef}|}{F_{exp}} \quad (3)$$

em que,

$Desvio_p$ = desvio percentual entre frequência natural simulada e experimental, %;

Tabela 8: Valores de incremento ou decremento do módulo de elasticidade em função do desvio percentual

Faixa de desvio percentual (%)	Valor de incremento ou decremento	
	Pedúnculo (kPa)	Ramo (MPa)
Maior que 25	500	250
25 < desvio < 12,5	250	125
12,5 < desvio < 6,25	125	62,5
3,12 < desvio < 6,25	62,5	31,25
Menor que 3,12	31,25	15,62

As geometrias para os modelos dos sistemas fruto-pedúnculo e ramo (Figura 4) foram geradas por meio do programa computacional CAD-3D *SolidWorks* 2011, com base em dimensões determinadas experimentalmente (Tabela 3, 4 e 5).

Tabela 9: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o fruto para os estádios de maturação verde e cereja

Estádio de Maturação	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa Específica (g.cm ⁻³)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Razão de Poisson
Verde	16,14	12,77	1,13	15,82	0,24
Cereja	17,12	14,76	1,02	2,93	0,27

Tabela 10: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o pedúnculo para os estádios de maturação verde e cereja

Estádio de Maturação	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa Específica (g.cm ⁻³)	Razão de Poisson
Verde	6,64	2,12	1,09	0,35
Cereja	6,36	2,32	1,46	0,35

Tabela 11: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o ramo

Diâmetro (mm)	Massa Específica (g.cm ⁻³)	Razão de Poisson
5,06	0,90	0,34

Exclusivamente para o ramo (Tabela 5), o valor para a razão de Poisson foi determinada a partir da média dos resultados encontrados por BALLARIN e NOGUEIRA (2003), e MASCIA e LAHR (2006).

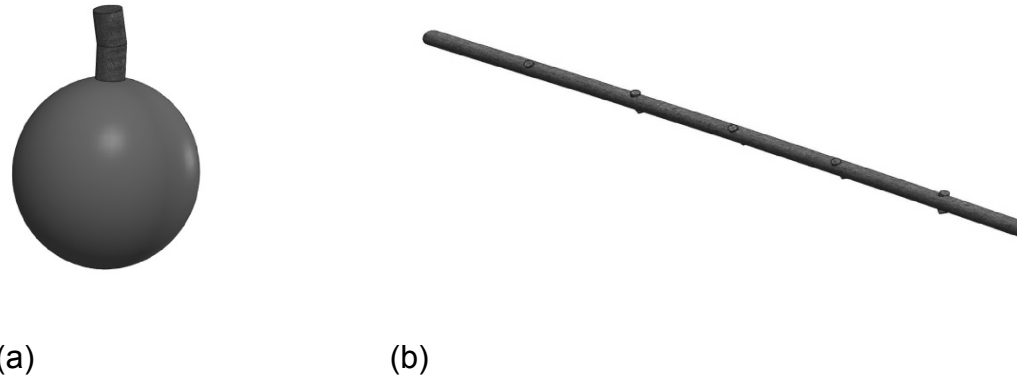


Figura 11: Geometria para o (a) sistema fruto-pedúnculo e (b) ramo.

As etapas de discretização das geometrias, definições das propriedades físicas e mecânicas e das condições de contorno, solução e visualização dos resultados, foram executadas a partir programa computacional *Ansys Mechanical APDL*, versão 14.5. As simulações computacionais foram executadas em uma estação de trabalho com processador Intel® Xeon 3,5 GHz, com sistema operacional Linux centOS 6.3.

Na discretização das geometrias foram utilizados elementos tetraédricos com dez nós. A escolha das dimensões dos tetraedros foi realizada por meio de teste de refinamento de malhas, sendo avaliada a qualidade dos resultados em função do tempo de processamento. O teste de refinamento foi executado para o sistema fruto-pedúnculo-ramo com três frutos solidários a um mesmo pedúnculo, no estágio de maturação verde.

O modelo foi simulado para três dimensões de tetraedros obtendo para cada uma as cinco primeiras frequências naturais do sistema (Figura 5).

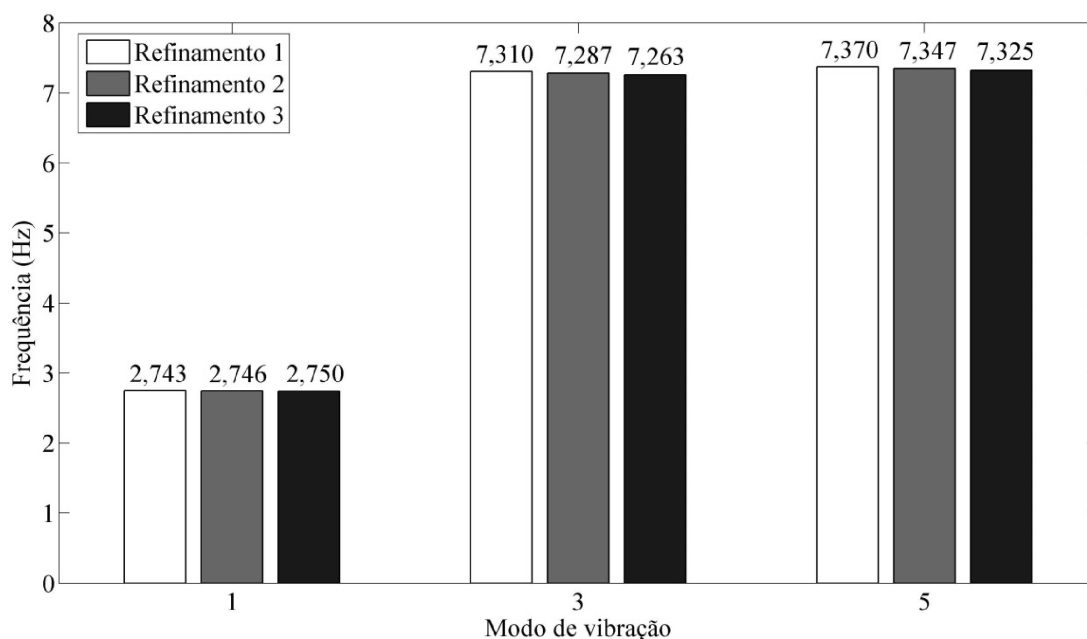


Figura 12: Frequência natural do sistema fruto-pedúnculo-ramo com três frutos, simulado empregando três refinamentos de malha.

Os refinamentos 1, 2 e 3 (Figura 5) resultaram em uma geometria discretizada composta por 34143, 57232 e 110409 elementos tetraédricos e um tempo de processamento total de 122, 271 e 2987 s, respectivamente. As diferenças percentuais para a primeira, terceira e quinta frequências naturais empregando o refinamento 2 em comparação ao refinamento 1 foram de 0,15; 0,32 e 0,31 % respectivamente, com um aumento de 112 % no tempo de processamento. Já as diferenças entre refinamento 3 em relação ao 2 foram 0,11; 0,32 e 0,30 % com um aumento de 1002 % no tempo de processamento.

Adotou-se para este trabalho elementos com dimensões referentes ao refinamento 1. Uma vez que o refinamento da malha ocasionou um aumento significativo do tempo de processamento, sem variações significativas das frequências naturais calculadas.

Os sistemas foram modelados com múltiplos graus de liberdade e sujeitos a vibração livre não amortecida, cuja equação na forma matricial é dada pela Equação (4) (RAO, 1995). Por simplificação, os materiais que compõe os frutos, pedúnculos e ramos foram tratados como homogêneos e isotrópicos.

$$[M]\{\ddot{v}\}+[K]\{v\}=\{0\} \quad (4)$$

em que,

$[M]$ =matriz massa, kg;

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

$[K]$ =matriz rigidez, N.m⁻¹;

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

Derivando a Equação (5), que representa o deslocamento do sistema em relação ao tempo e substituindo na Equação (4), obtém se a Equação (6).

$$\{v\}=\left(\cos \omega_i t+i \operatorname{sen} \omega_i t\right)\left\{\varphi_j\right\} \quad (5)$$

em que,

$\left\{\varphi_j\right\}$ = autovetor associado a i-ésima frequência natural do sistema;

ω_i = i-ésima frequência natural, rad.s⁻¹;

t =tempo, s.

$$\left(-\omega^2[M]+[K]\right)\left\{\varphi_j\right\}=\{0\} \quad (6)$$

O algoritmo selecionado no *Ansys Mechanical APDL*, versão 14.5, para solução da Equação (6) foi o *Block Lanczos*, utilizado para solução de problemas de autovetores e autovalores, fornecendo as frequências naturais e os modos de vibração para os sistemas, respectivamente. O algoritmo foi empregado para as 16 amostras do sistema fruto-pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja e para oito amostras do ramo, determinado em cada caso o módulo de elasticidade do pedúnculo correspondente ao menor erro entre as frequências experimentais e simuladas. Exclusivamente para o sistema fruto-pedúnculo, os valores de módulos de elasticidade foram submetidos a análise de variância sendo as médias comparados pelo teste

de Tukey, ao nível de significância de 5 %, a fim de avaliar a influência do estágio de maturação sobre o módulo de elasticidade do pedúnculo.

3. Resultados e discussão

3.1 Determinação experimental da frequência natural

As frequências de ressonância experimentais foram obtidas a partir da análise dos resultados de transmissibilidade (Figura 6), considerando as frequências que resultaram em maior transmissibilidade do sistema. Os valores mínimo, médio e máximo para as frequências de ressonância do sistema fruto-pedúnculo e ramo (Tabela 6) foram determinados a partir dos resultados das repetições realizadas. As médias para as frequências naturais do sistema fruto-pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja, são estatisticamente iguais ao nível de 5% pelo teste Tukey.

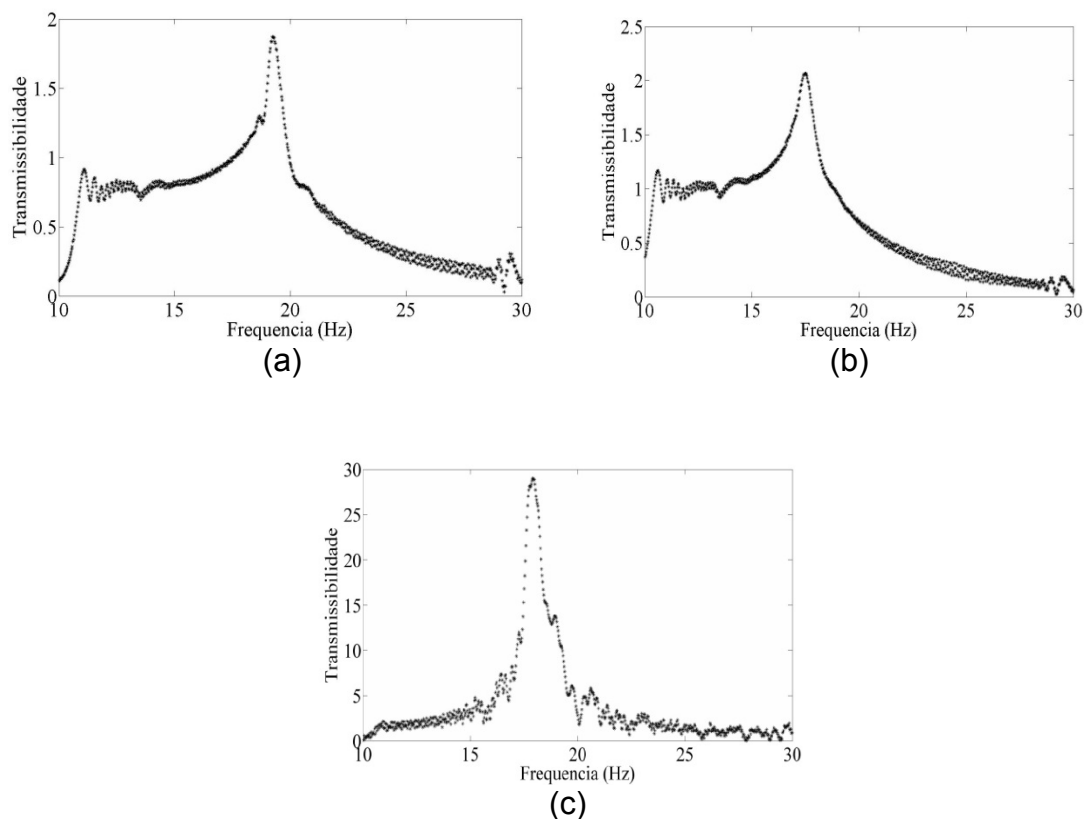


Figura 13: Transmissibilidade para o sistema fruto-pedúnculo nos estádios de maturação (a) verde e (b) cereja, e para o (c) ramo.

Tabela 12: Frequências de ressonância experimentais para o sistema fruto-pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja, e para o ramo

Valor	Sistema fruto-pedúnculo		Ramo
	Verde	Cereja	
Mínimo (Hz)	14,87	14,11	14,57
Médio (Hz)	18,64	17,38	16,83
Máximo (Hz)	23,71	20,59	19,45

Por meio de um método analítico, CIRO (2001) determinou as frequências naturais do sistema fruto-pedúnculo, obtendo valores 25,10 e 26,97 Hz para o primeiro modo de vibração, 470,95 e 518,79 Hz para o segundo modo de vibração, para os estádios de maturação, cereja e verde, respectivamente. O autor utilizou módulos de elasticidade de 22,61 e 23,14 MPa para o pedúnculo nos estádios cereja e verde, respectivamente.

FILGUEIRAS (2001), ao modelar o sistema fruto-pedúnculo do cafeeiro por meio de método de elementos finitos, obteve frequências de 6,65 e 2,68 Hz para o primeiro modo de vibração e de 85,05 e 24,65 Hz para o segundo modo de vibração, para os estádios verde e cereja, respectivamente. O sistema fruto-pedúnculo foi modelado utilizando os valores de massa específica e módulo de elasticidade obtidos por YUNG E FRIDLEY (1974). Os valores empregados para módulo de elasticidade do sistema fruto-pedúnculo foram 31,03 e 26,06 MPa nos estádios verde e cereja, respectivamente. Os valores empregados para massa específica foi $1,107 \text{ g.cm}^{-3}$.

Pelo método de elementos finitos, SANTOS (2008) determinou as frequências naturais para o sistema fruto-pedúnculo, empregando os módulos de elasticidade de 31,03 e 26,06 MPa, para o fruto e pedúnculo nas maturações verde e cereja, respectivamente, obtidos por YUNG E FRIDLEY (1974). Utilizou-se massas específicas $1,199$ e $1,090 \text{ g.cm}^{-3}$ para os frutos e pedúnculos nos estádios de maturação verde e cereja. O autor obteve 19,86; 19,94 e 50,30 Hz, e 23,21; 23,30 e 57,66 Hz para a primeira, segunda e terceira frequência natural nos estádios de maturação cereja e verde.

Apesar de não apresentar diferenças significativas, existiu a tendência do sistema de fruto-pedúnculo no estágio de maturação verde apresentar maiores frequências naturais em comparação aos valores para o estágio de maturação cereja. O comportamento, também observado por CIRO (2001), FILGUEIRAS (2001) e SANTOS (2008) pode ser explicado pelo maior módulo de elasticidade do sistema no estágio de maturação verde (RODRIGO e ONO, 2011).

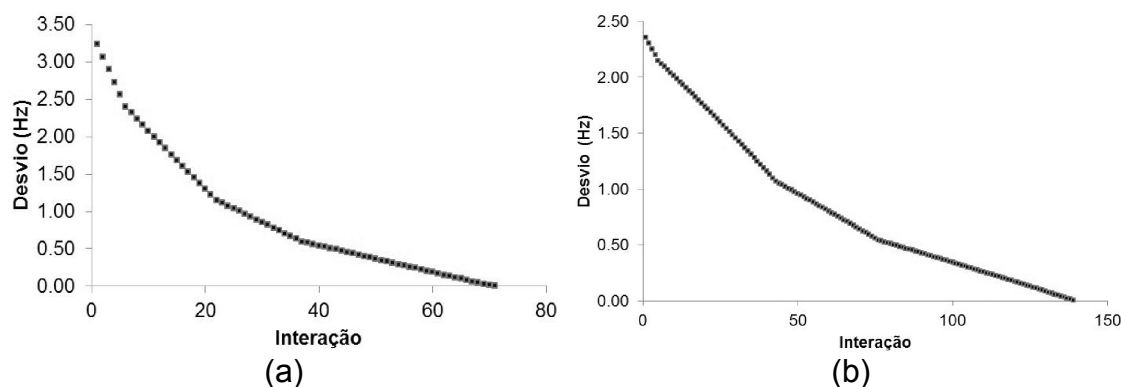
3.2. Determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo

Os valores mínimo, médio e máximo para o módulo de elasticidade (Tabela 7) foram determinados a partir dos resultados obtidos nas repetições. Em cada amostra, o módulo de elasticidade considerado foi aquele que resultou em desvios inferiores à tolerância preestabelecida entre os valores de frequência experimental e simulada (Figura 7).

Tabela 13: Módulo de elasticidade para o pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja e para o ramo

Valor	Sistema fruto-pedúnculo		Ramo
	Verde	Cereja	
Mínimo (MPa)	9,67	13,46	3450,27
Médio (MPa)	15,74	23,90	4645,94
Máximo (MPa)	25,60	36,72	6144,15

Desvio padrão para os valores médios: Verde = 4,68 MPa; Cereja = 8,65 MPa; Ramo = 941 MPa.



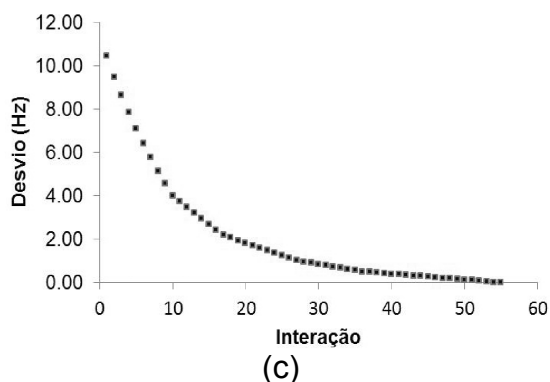


Figura 14: Desvio entre a frequência natural experimental e simulada para diversos valores de módulos de elasticidade, para amostra do sistema fruto-pedúnculo nos estádios de maturação (a) verde e (b) cereja, e para o (c) ramo.

Pelo teste Tukey, ao nível de significância de 5%, a média do módulo de elasticidade para o pedúnculo no estádio de maturação cereja foi superior ao do estádio de verde (Tabela 7).

RODRÍGUEZ et al. (2006) determinaram módulos de elasticidade com magnitudes 15,88 MPa e 4,73 MPa para pedúnculos do cafeeiro da variedade Catuaí nos estádios cereja e verde, respectivamente. CIRO (2001) obteve valores de 22,61 e 23,14 MPa, para pedúnculo nos estádios de maturação cereja e verde, respectivamente para café variedade Colombiano. Já YUNG e FRIDLEY (1974) obtiveram 26,06 e 31,03 MPa, para o pedúnculo nos estádios cereja e verde, respectivamente. ARISTIZÁBAL et al. (2003) encontraram valores entre 2,26 e 8,43 GPa para os ramos de café das variedades Vermelho Caturra, Colômbia Vermelho e Colômbia Amarelo. FILGUEIRAS (2001) obteve 3,56 GPa para ramos de 5,4 mm de diâmetro.

Ocorreu uma grande variação entre os valores obtidos no presente trabalho e os valores encontrados na literatura, para um mesmo cenário. Essa variação está relacionada com a espécie, variedade, condição climática, idade da planta ou até mesmo do tipo de manejo realizado (ARISTIZÁBAL et al., 2003, RODRÍGUEZ et al., 2006). Por outro lado, as diferenças também podem estar relacionadas com os tipos de ensaios empregados para sua determinação, já que CIRO (2001) e RODRÍGUEZ et al. (2006) determinaram o módulo de elasticidade por meio de ensaio de

flexão, considerando a sistema fruto-pedúnculo, com uma viga engastada em umas extremidades.

O comportamento de aumento do módulo de elasticidade do pedúnculo na medida em que evolui o estágio de maturação, verificado no presente trabalho, também foi obtido por RODRIGUEZ et al. (2008). Tais comportamentos são opostos aos obtidos por YUNG e FRIDLEY (1974) e CIRO (2001), em que se verifica redução do módulo de elasticidade na medida em que evolui o estágio de maturação. Este comportamento é explicado pela redução da resistência mecânica dos pedúnculos em função da degradação da parede celular em função do processo de maturação do fruto, em que a planta está se preparando para seu desprendimento (RODRIGUES e ONO, 2011).

Apesar das variações nos valores obtidos no presente trabalho e na literatura, o que pode ser explicado por meio de diversos fatores que influenciam variabilidade dessa propriedade nas plantas de café (ARISTIZÁBAL et al., 2003, RODRÍGUEZ et al., 2006), a metodologia proposta mostrou-se viável para a determinação do módulo de elasticidade, por permitir a determinação de uma propriedade mecânica essencial a modelagem do sistema fruto-pedúnculo, a partir do fenômeno dinâmico a ser estudado.

4. Conclusões

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

- As frequências naturais experimentais para o estágio de maturação verde foram superiores aos valores para o estágio de maturação cereja.
- Obteve-se valor médio de 15,74; 23,90 e 4645,90 MPa para o módulo de elasticidade do pedúnculo nos estágios de maturação verde, cereja e para o ramo, respectivamente.

- O módulo de elasticidade para o pedúnculo no estágio de maturação cereja foi superior ao valor para o estágio de maturação verde.
- A metodologia desenvolvida foi eficaz para a determinação do módulo de elasticidade do fruto e pedúnculo do cafeeiro.

5. Referências bibliográficas

ALBURQUEQUE, E.L. **Investigação sobre a variabilidade da resposta dinâmica de painéis reforçados**. 2005. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

ALMEIDA, S. M., **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012. 213f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

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

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

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

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

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; SOUZA, Z.M.; CHALFOU, S.M.; FIGUEIREDO, C.A.P. Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v.42, n.6, p.827-831, 2007.

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; SOUZA, Z.M.; 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, p.714-721, 2007.

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

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

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. Third edition. New York, EUA: Addison-Wesley Publishing Company, 1995. 912p.

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

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

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

SANTOS, F. L. **Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derrça**. 2008. 136 p. 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**, v. 32, n.3, p. 373-378, 2010.

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.

SCILAB ENTERPRISES. **Scilab: Free and Open Source software for numerical computation** (Version 5.4), 2012. Available from: <http://www.scilab.org>

SEGUNDINHO, P.G.A.; COSSOLINO, L.C.; PEREIRA, A.H.A.; JUNIOR, C.C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, v.36, n.6 pp. 1155-1162, 2012

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

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

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

TARGA, L.A.; BALLARIN, A.W.; BIAGGIONI, M.A.M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Revista Engenharia Agrícola**, v.25, n.2, p. 291-299, 2005

YUNG, C.; FRIDLEY, R.B. **Computer analysis of fruit detachment during tree shaking**. St. Joseph: ASAE, 1974 (Paper n. 74-3009)

**ARTIGO III: Análise do comportamento dinâmico do sistema fruto-
pedúnculo-ramo do cafeeiro**

Análise do comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

Resumo

O desenvolvimento de máquinas eficientes para a colheita do cafeeiro exige conhecimentos sólidos sobre o comportamento dinâmico da planta. Entre as ferramentas para determinação das frequências naturais e modos de vibração tem-se a modelagem por método de elementos finitos, que consiste na geração e solução de equações diferenciais que descrevem o fenômeno físico em estudo. Porém não se tem empregado o método de elementos finitos estocástico para análise do comportamento dinâmico do cafeeiro. Assim, objetivou-se neste trabalho determinar as frequências naturais e modos de vibração do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. Foram modelados os sistemas fruto-pedúnculo e fruto-pedúnculo-ramo, nos estádios de maturação verde e cereja. Foram determinadas as frequências naturais e os modos de vibração empregando-se o método de elementos finitos estocástico, em que o módulo de elasticidade e a massa específica dos frutos, pedúnculo e ramos foram tratados como variáveis aleatórias, obtendo a variação das frequências naturais em função da variabilidade destas propriedades. As frequências naturais reduziram na medida em que se evolui o estágio de maturação dos frutos e pedúnculos ou se aumenta a massa total do sistema, dado pelo aumento do número de frutos solidários ao pedúnculo. As frequências naturais aumentaram na medida em que se elevou o módulo de elasticidade ou reduziu a massa específica dos frutos, pedúnculos e ramos. Para o quarto e quinto modos de vibração, constatou-se maiores deformações dos pedúnculos.

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

Dynamic behavior analysis of coffee fruit-stem-branch system

Abstract

The development of efficient machines for the coffee harvesting requires solid knowledge on this plant's dynamic behavior. Among the tools for determining the natural frequencies and mode shapes, the modeling by finite elements method is used that consists in the generation and solution of differential equations describing the physical phenomenon under study. However, the stochastic finite elements method has not been used for analysis of the coffee plant's dynamic behavior. Thus, this study aimed to determine the natural frequencies and mode shapes for fruit-stem-branch system of coffee plants. Fruit-stem and fruit-stem-branch were modeled in the green and ripe ripeness stages. Natural frequencies and mode shapes were determined using the stochastic finite elements method, in which the elasticity modulus and specific density of the fruits stem, and branches were treated as random variables, obtaining the variation of the natural frequency due to variability of these properties. The natural frequencies were reduced according as the ripeness stage of fruits and stems evolved or the total mass of the system increased due to the increased number of fruit grouped to the peduncle. The natural frequencies increased according as the elastic modulus increased or the specific mass of the fruit, stem, and branches were reduced. For the fourth and fifth vibrations mode shapes, greater deformations of stem were observed.

Key words: finite element methods, natural frequencies, mode shapes.

1. Introdução

O valor de comercialização do café está diretamente relacionado com parâmetros qualitativos, reduzindo significativamente seu preço na medida em que ocorre perda de qualidade (OLIVEIRA et al., 2007b). Tais perdas podem reduzir o preço entre 10 a 20 %, se for analisado o aspecto do produto, e em até 40 % caso seja analisado a qualidade da bebida (FILGUEIRAS, 2001).

Dentre o ciclo de produção do cafeeiro, a colheita é considerada a etapa mais onerosa, uma vez que demanda um elevado contingente de mão de obra. Assim, a mecanização da colheita surge como uma solução para a redução dos custos, por meio do aumento da capacidade operacional do processo (CIRO, 2001; GARCÍA e TASCÓN, 2003; BARBOSA et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2007a). O princípio utilizado para a colheita mecanizada do café é o de vibrações mecânicas, em que forças inercias são aplicadas aos frutos, superando as forças de rompimento dos pedúnculos e, conseqüentemente, resultando na derriça dos frutos (ARISTIZÁBAL et al., 2003; SOUZA et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2007b).

A colheita mecanizada do cafeeiro deve garantir um menor repasse, fator que afeta diretamente a capacidade operacional do processo (OLIVEIRA et al., 2007b). Além disso, a ocorrência de uma menor desfolha e quebra de ramos são desejáveis, uma vez que danos à estrutura da planta podem comprometer a safra seguinte.

Para se desenvolver colhedoras eficientes, é necessário um conhecimento sólido a respeito do comportamento dinâmico da planta a ser colhida, ou de parte dela (CIRO, 2001). Para a colheita por vibrações mecânicas, a determinação dos parâmetros modais, das frequências naturais e dos modos de vibração é fundamental para o projeto de máquinas. Estudos relacionados a determinação de frequências naturais e modos de vibração do cafeeiro têm sido realizados a partir de equações analíticas, experimentos controlados em laboratório, experimentos em

campo ou por meio de ferramentas computacionais (CIRO, 2001; FILGUEIRAS, 2001; ARISTIZÁBAL et al., 2003; SANTOS, 2008; SANTOS et al., 2010a, 2010b). Dentre as ferramentas computacionais destaca-se o método de elementos finitos, que consiste na geração e solução de equações diferenciais que governam o fenômeno físico em estudo. Para a utilização desse método, são necessários parâmetros de entrada como as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema em análise (RODRÍGUEZ et al., 2006).

O método de elementos finitos apresenta duas variações: o determinístico e o estocástico. No método de elementos finitos determinístico são utilizados parâmetros de entrada com valores únicos e constantes, obtendo nos resultados um valor único para determinado parâmetro de saída. No método de elementos finitos estocástico, os parâmetros de entrada são definidos como um conjunto de valores aleatórios, obtendo assim, um conjunto de resultados para um dado parâmetro (REH et al., 2009; BERTHAUME et al., 2012). A aleatorização dos valores é, normalmente, executada a partir de modelos que descrevem a distribuição de probabilidade dos parâmetros em questão (STEFANOU, 2009).

O método de elementos finitos pode apresentar limitações na exatidão dos resultados devido, principalmente, as simplificações realizadas nos modelos com o intuito de reduzir o tempo de processamento (NORTON et al., 2007). Neste contexto, surge a necessidade da validação dos modelos, a fim de se evitar a análise e a utilização de dados enganosos (ASFOUR e GADI, 2007; GRAY et al., 2008). Entre os métodos de validação, tem-se a comparação dos resultados estimados com os resultados observados em experimentos controlados realizados em laboratório ou em campo.

ARISTIZÁBAL et al. (2003) determinaram experimentalmente, a partir do período de oscilação, a primeira frequência natural amortecida do cafeeiro com e sem as folhas. O tronco foi tratado como sistema com um grau de liberdade. Os autores determinaram, por meio de equações analíticas, as três primeiras frequências naturais do cafeeiro, a partir de suas propriedades físicas e mecânicas. Verificou-se ainda que a presença de

folhas reduziu a frequência natural amortecida do cafeeiro. Os valores para as frequências naturais amortecidas, obtidos experimentalmente, foram similares aos valores obtidos analiticamente.

CIRO (2001) determinou analiticamente as frequências naturais de um sistema fruto-pedúnculo em três estádios de maturação. Os modelos empregados apresentavam um e dois graus de liberdade. O autor concluiu que as frequências naturais reduziram na medida em que os frutos evoluem de estágio de maturação.

Ao determinar as frequências naturais e os modos de vibração para o sistema tronco-ramo, ramo e fruto-pedúnculo do cafeeiro, FILGUEIRAS (2001) e SANTOS (2008) utilizaram o método de elementos finitos por meio do programa computacional comercial *Ansys*, versão 5.4 e de um programa desenvolvido em linguagem FORTRAN 90, respectivamente. Os autores concluíram que as frequências naturais tendem a diminuir na medida em que o estágio de maturação evolui de verde para cereja.

O método de elementos finitos tem sido utilizado para modelar diversos sistemas, sejam eles mecânicos ou biológicos. Dentre tais estudos, realizados por meio de modelos determinísticos e estocásticos, tem-se análise da resposta dinâmica de painéis reforçados (ALBURQUEQUE, 2005), análise de tensões e deformações em crânios de macacos (BERTHAUME et al., 2012), comportamento dinâmico da tampa de um compressor (FABRO, 2010), análise modal de peras (JANCSÓK et al., 2001), análise termomecânica das pás de uma turbina a gás (REH et al., 2006), análise modal e de tensão de uma estrutura automobilística (REH et al., 2006), análise de tensão e deformação dos dentes (PENEDO et al., 2010). Entretanto, não foram encontrados registros de pesquisas aplicando o método de elementos finitos estocástico para a análise do comportamento dinâmico de plantas, especificamente do cafeeiro ou de suas partes.

O método de elementos finitos estocástico caracteriza-se como um avanço no estudo da dinâmica do cafeeiro, uma vez que existe uma grande variabilidade nas suas propriedades geométricas, físicas e mecânicas (ARISTIZÁBAL et al., 2003; RODRÍGUEZ et al., 2006). Portanto, objetivou-se neste trabalho determinar as frequências naturais e modos de vibração dos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo empregando-se

o método de elementos finitos estocástico. Adicionalmente, avaliou-se a influência do estágio de maturação e o número de frutos solidários a um mesmo pedúnculo sobre as frequências naturais e nos modos de vibração do sistema.

2. Material e métodos

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, no período Maio/2013 a Julho/2013.

Os sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro foram modelados, com o intuito de determinar as frequências naturais e os respectivos modos de vibração pelo método de elementos finitos estocástico. Especificamente, para os sistemas fruto-pedúnculo e fruto-pedúnculo-ramo foram analisados cenários com um, dois ou três frutos solidários a um mesmo pedúnculo, e os estádios de maturação verde e cereja.

Com base nas dimensões determinadas experimentalmente (Tabelas 1, 2 e 3), foram geradas as geometrias para os modelos dos sistemas (Figuras 1, 2 e 3), por meio do programa computacional CAD-3D *SolidWorks* 2011.

Tabela 14: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o fruto para os estádios de maturação verde e cereja

Estádio de Maturação	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa Específica (g.cm ⁻³)		Módulo de Elasticidade (MPa)		Razão de Poisson
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
Verde	16,14	12,77	1,13	0,07	15,82	5,74	0,24
Cereja	17,12	14,76	1,02	0,10	2,93	0,46	0,27

Tabela 15: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o pedúnculo para os estádios de maturação verde e cereja

Estádio de Maturação	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa Específica (g.cm ⁻³)		Módulo de Elasticidade (MPa)		Razão de Poisson
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
Verde	6,64	2,12	1,09	0,47	15,74	4,68	0,35
Cereja	6,36	2,32	1,46	0,46	23,90	8,65	0,35

Tabela 16: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do ramo

Diâmetro (mm)	Massa Específica (g.cm ⁻³)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Razão de Poisson
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
5,06	0,90	0,11	4,65	0,94	0,34

Exclusivamente para o ramo (Tabela 3), o valor para a razão de Poisson foi determinado a partir da média dos resultados encontrados por BALLARIN e NOGUEIRA (2003), e MASCIA e LAHR (2006).

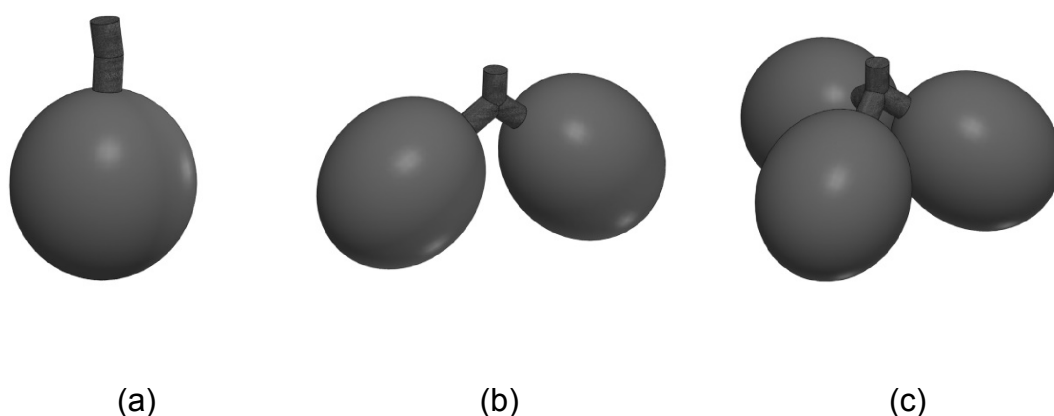


Figura 15: Geometria para o sistema fruto-pedúnculo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários a um mesmo pedúnculo.



Figura 16: Geometria para o ramo.

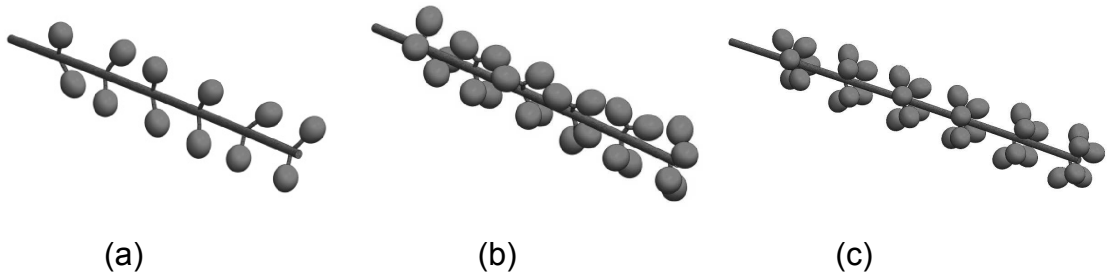


Figura 17: Geometria para o sistema fruto-pedúnculo-ramo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários a um mesmo pedúnculo.

As etapas de discretização das geometrias, definições das propriedades físicas e mecânicas e das condições de contorno, solução e visualização dos resultados foram executadas no programa computacional *Ansys Mechanical APDL*, versão 14.5. As simulações computacionais foram executadas em uma estação de trabalho com processador Intel® Xeon 3,5 GHz, com sistema operacional Linux centOS 6.3.

Na discretização das geometrias, foram utilizados elementos tetraédricos com dez nós. A escolha das dimensões dos tetraedros foi realizada por meio de teste de refinamento de malhas, sendo avaliada a qualidade dos resultados em função do tempo de processamento. O teste de refinamento foi executado para o sistema fruto-pedúnculo-ramo com três frutos solidários a um mesmo pedúnculo, no estágio de maturação verde.

O modelo foi simulado para três dimensões de tetraedros, obtendo-se, para cada uma, as cinco primeiras frequências naturais do sistema (Figura 4).

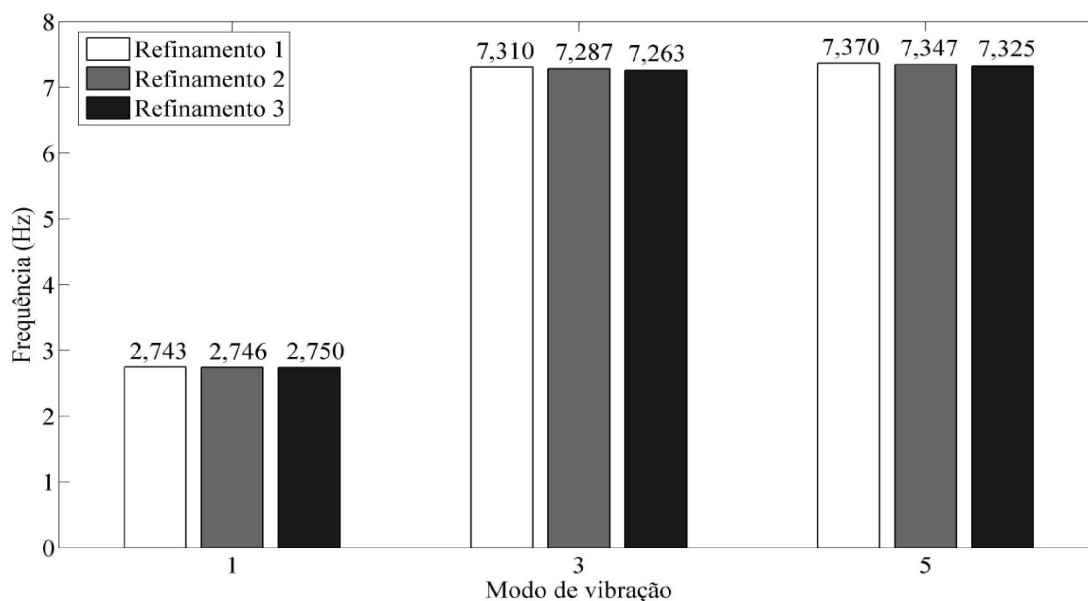


Figura 18: Frequência natural do sistema fruto-pedúnculo-ramo com três frutos, simulado empregando três refinamentos de malha.

Os refinamentos 1, 2 e 3 resultaram em uma geometria discretizada composta por 34143, 57232 e 110409 elementos tetraédricos e um tempo de processamento total de 122, 271 e 2987 s, respectivamente (Figura 4). As diferenças percentuais para a primeira, terceira e quinta frequências naturais, empregando o refinamento 2 em comparação ao refinamento 1, foram de 0,15; 0,32 e 0,31 %, respectivamente, com um aumento de 112 % no tempo de processamento. Já as diferenças entre refinamento 3 em relação ao 2 foram 0,11; 0,32 e 0,30 % com um aumento de 1002 % no tempo de processamento.

Desta maneira, adotou-se para este trabalho elementos com dimensões referentes ao refinamento 1. Uma vez que o refinamento da malha ocasionou um aumento significativo do tempo de processamento, sem variações significativas das frequências naturais calculadas.

Os parâmetros módulo de elasticidade e massa específica do fruto, pedúnculo e ramo foram tratados como variáveis aleatórias. Os parâmetros dimensionais, bem como a razão de Poisson, foram tratados como valores constantes, em todos os cenários.

As variáveis aleatórias foram compostas por seis conjuntos com cinquenta valores para o módulo de elasticidade e para a massa específica. Os conjuntos de dados foram gerados a partir dos valores médios e desvios

padrões de cada um dos parâmetros (Tabela 1, 2 e 3), por meio de um algoritmo gerador de números aleatórios, utilizando a Equação (1).

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

em que,

V_i = i-ésimo valor aleatório;

V_0 =valor médio do parâmetro;

s =desvio padrão do parâmetro;

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

O conjunto de valores referente ao módulo de elasticidade foi combinado ao conjunto da massa específica, resultando em 2500 cenários. A geração dos parâmetros de entrada para cada cenário foi realizada por meio de um programa desenvolvido em linguagem FORTRAN 90 e compilado por meio do compilador g95.

Os sistemas foram modelados com múltiplos graus de liberdade e sujeitos a vibração livre não amortecida, cuja equação na forma matricial é dada pela Equação (2) (RAO, 1995). Por simplificação, os materiais que compõe os frutos, pedúnculos e ramos foram tratados como homogêneos e isotrópicos.

$$[M]\{\ddot{v}\} + [K]\{v\} = \{0\} \quad (2)$$

em que,

$[M]$ =matriz massa, kg;

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

$[K]$ =matriz rigidez, N.m⁻¹;

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

Derivando a Equação (3), que representa o deslocamento do sistema em relação ao tempo e substituindo na Equação (2), obtém-se a Equação (4).

$$\{v\} = (\cos \omega_i t + i \operatorname{sen} \omega_i t) \{\varphi_j\} \quad (3)$$

em que,

$\{\varphi_j\}$ = autovetor associado a i -ésima frequência natural do sistema;

ω_i = i -ésima frequência natural, rad.s^{-1} ;

t = tempo, s.

$$(-\omega^2[M] + [K])\{\varphi_j\} = \{0\} \quad (4)$$

O algoritmo selecionado no *Ansys Mechanical APDL*, versão 14.5, para solução da Equação (4) foi o *Block Lanczos*, utilizado para solução de problemas de autovetores e autovalores, fornecendo as frequências naturais e os modos de vibração para os sistemas, respectivamente.

O método de simulação de Monte Carlo foi empregado para a solução do modelo estocástico, os casos foram solucionados extraindo as cinco primeiras frequências naturais e os respectivos modos de vibração. A partir dos resultados, determinou-se a frequência natural média de cada cenário e seu respectivo desvio padrão, sendo apresentados na forma de barra de erros. A influência da variação das frequências naturais em função das variáveis aleatórias, nos estádios de maturação verde e cereja, foi avaliada graficamente. Os modos de vibração foram avaliados a partir da sua deflexão modal.

3. Resultados e discussão

As faixas de valores (Figura 5) representam o valor médio e o desvio das frequências naturais, devido à aleatoriedade da massa específica e

módulo de elasticidade considerados na modelagem. As frequências naturais do sistema fruto-pedúnculo, com um fruto solidário ao pedúnculo, reduziram na medida em que o estágio de maturação evoluiu do verde para o cereja. Este comportamento, também verificadas por CIRO (2001), FILGUEIRAS (2001) e SANTOS (2008), é provocado pela redução na rigidez do sistema, que por sua vez está relacionada a degradação das paredes celulares (RODRIGO e ONO, 2011).

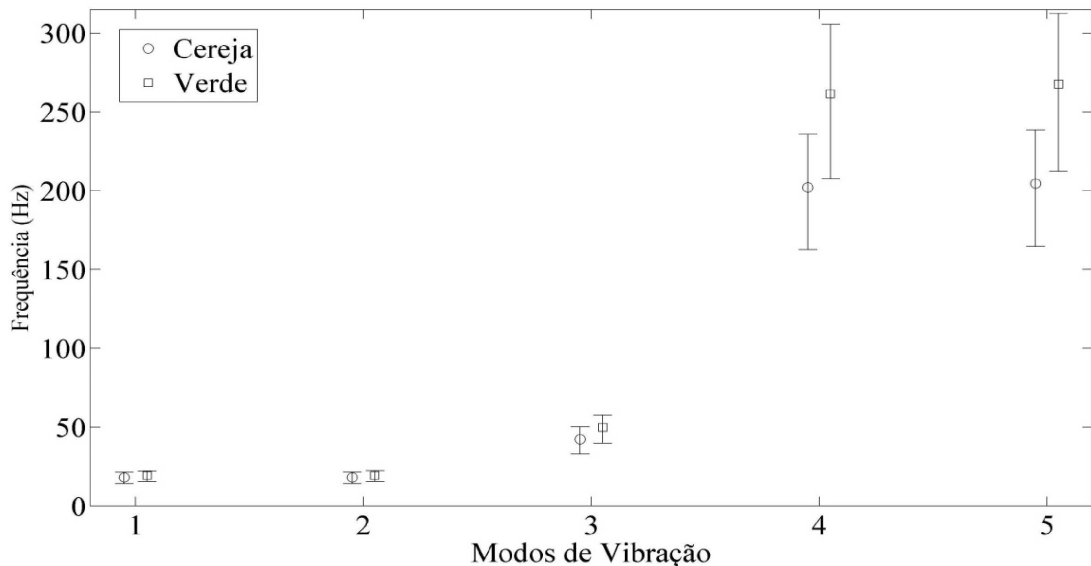


Figura 19: Frequências naturais para o sistema fruto-pedúnculo, com um fruto, nos estádios de maturação verde e cereja.

Para uma colheita seletiva, realizada exclusivamente por vibrações mecânicas, o emprego de frequências naturais referentes até o quinto modo pode não ser eficiente, já que existe a sobreposição entre as faixas de frequência para os estádios de maturação verde e cereja.

Por meio de um método analítico, CIRO (2001) determinou as frequências naturais do sistema fruto-pedúnculo, obtendo valores 25,10 e 26,97 Hz para o primeiro modo de vibração, 470,95 e 518,79 Hz para o segundo modo de vibração, para os estádios de maturação, verde e cereja, respectivamente. O autor utilizou módulos de elasticidade de 22,61 e 23,14 MPa para o pedúnculo nos estádios cereja e verde, respectivamente.

FILGUEIRAS (2001), ao modelar o sistema fruto-pedúnculo do cafeeiro por meio de método de elementos finitos determinístico, obteve frequências de 6,65 e 2,68 Hz para o primeiro modo de vibração e de 85,05

e 24,65 Hz para o segundo modo de vibração, para os estádios verde e cereja, respectivamente. O sistema fruto-pedúnculo foi modelado utilizando os valores de massa específica e módulo de elasticidade obtidos por YUNG e FRIDLEY (1974). Os valores empregados para módulo de elasticidade do sistema fruto-pedúnculo foram 31,03 e 26,06 MPa nos estádios verde e cereja, respectivamente. Os valores empregados para massa específica foi $1,107 \text{ g.cm}^{-3}$.

Pelo método de elementos finitos, SANTOS (2008) determinou as frequências naturais para o sistema fruto-pedúnculo, empregando os módulos de elasticidade de 31,03 e 26,06 MPa, para o fruto e pedúnculo nas maturações verde e cereja, respectivamente, obtidos por YUNG e FRIDLEY (1974). Utilizou-se massas específicas $1,199$ e $1,090 \text{ g.cm}^{-3}$ para os frutos e pedúnculos nos estádios de maturação verde e cereja. O autor obteve 19,86; 19,94 e 50,30 Hz, e 23,21; 23,30 e 57,66 Hz para a primeira, segunda e terceira frequência natural nos estádios de maturação cereja e verde.

A variabilidade dos resultados está relacionada com variações nas propriedades geométricas, físicas e mecânicas dos constituintes do sistema fruto-pedúnculo. Sendo que tais propriedades, por sua vez, estão associadas às características da planta, como variedade e idade, características de solo, clima e manejo da planta (ARISTIZÁBAL et al., 2003; RODRÍGUEZ et al., 2006). Além disso, FILGUEIRAS (2001) e SANTOS (2008), utilizando os mesmos valores para as propriedades mecânicas, obtiveram resultados discrepantes, indicando que os valores de frequências naturais também podem variar em função de parâmetros da modelagem do sistema, como número e tipo dos elementos empregados na discretização, algoritmo de solução do modelo, entre outros.

Os modos de vibração foram coincidentes para os diferentes estádios de maturação e valores de módulo de elasticidade e massa específica, já que não ocorreram variações nos aspectos geométricos e na distribuição de massas.

O primeiro e segundo modos de vibração caracterizaram-se como deslocamentos pendulares do sistema fruto-pedúnculo, em planos perpendiculares, justificando os valores de frequências naturais próximos

relacionados a tais modos. Estes modos de vibração também foram obtidos por FILGUEIRAS (2001) e SANTOS (2008).

No terceiro modo, o sistema apresentou um movimento torcional do fruto em relação ao pedúnculo. Para o quarto e quinto modo de vibração, constatou-se deslocamentos pendulares do sistema em contra-fase, em que os frutos deslocam em um sentido e o pedúnculo em sentido oposto. Tais modos também foram verificados por SANTOS (2008). Já FILGUEIRAS (2001) obteve, para o terceiro modo, deslocamento em contra-fase.

A derricha utilizando as frequências naturais correspondentes ao terceiro, quarto e quinto modos devem ser mais eficiente, uma vez que podem ser geradas maiores tensões nos pedúnculos (ESPINOSA et al., 2007), devido modos de vibração em contra-fase e torcionais.

Para os sistemas fruto-pedúnculo, com dois e três frutos solidários ao pedúnculo, os valores das frequências naturais apresentaram um comportamento de redução na medida em que se evolui o estágio de maturação (Figuras 6 e 7). Tal comportamento está relacionado com a redução nas propriedades mecânicas dos frutos e pedúnculos, na medida em que ocorre evolução do estágio de maturação (RODRIGO e ONO, 2011).

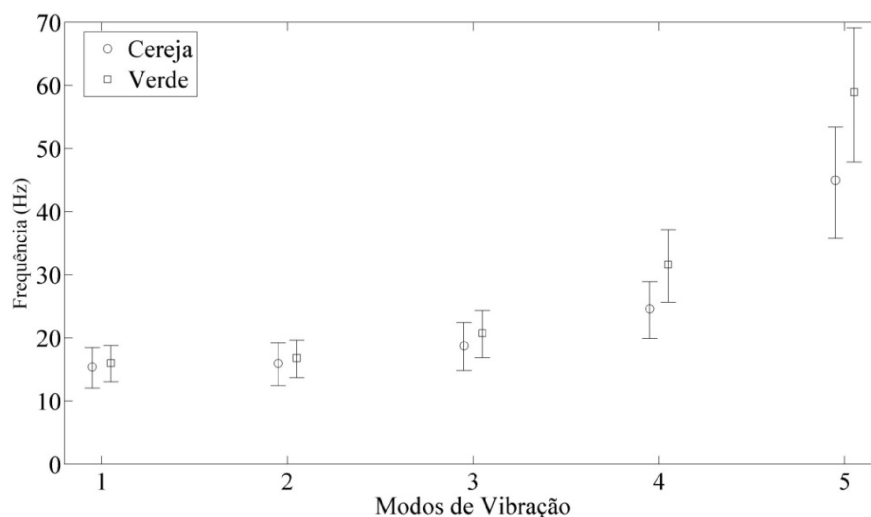


Figura 20: Frequências naturais para o sistema fruto-pedúnculo, com dois frutos, nos estádios de maturação verde e cereja.

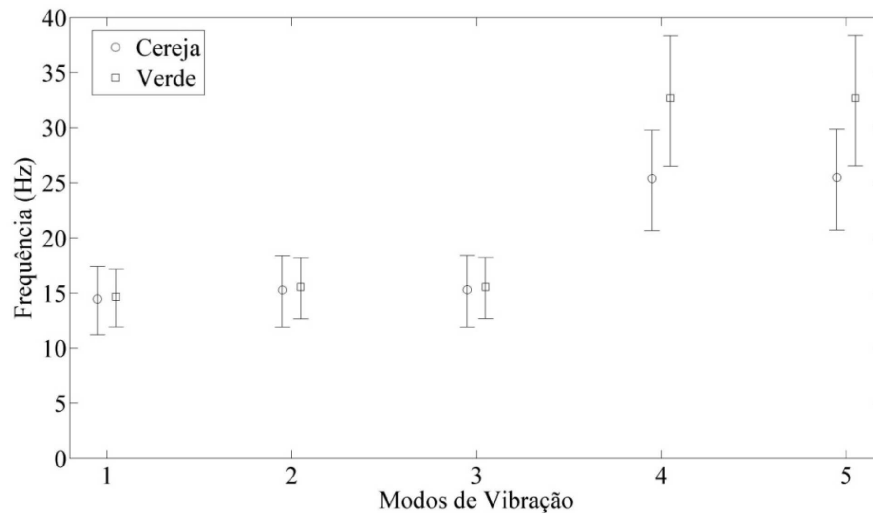


Figura 21: Frequências naturais para o sistema fruto-pedúnculo, com três frutos, nos estádios de maturação verde e cereja.

Visando uma colheita seletiva por vibrações mecânicas, o emprego de frequências naturais até o quinto modo de vibração não são adequados, uma vez que há sobreposição das faixas de frequência para os estádios de maturação verde e cereja.

Para o sistema fruto-pedúnculo com dois frutos, o primeiro e o terceiro modos de vibração caracterizam-se como movimentos pendulares do sistema, em planos perpendiculares. No segundo modo ocorre a rotação do sistema em relação ao engaste do pedúnculo. No quarto, ocorre deslocamentos pendulares de cada um dos frutos em conjunto com as respectivas subpartes do pedúnculo. O quinto modo caracteriza-se como uma rotação dos frutos em relação ao seu engaste com o pedúnculo.

No sistema fruto-pedúnculo com três frutos, no primeiro modo de vibração ocorre a rotação do sistema em relação ao engaste do pedúnculo. O segundo e terceiro modos caracterizam-se como movimentos pendulares do sistema em planos perpendiculares. No quarto e o quinto modos ocorrem movimentos pendulares de cada um dos frutos em conjunto com as respectivas subpartes do pedúnculo.

Para os modos de vibração de rotação e de movimento pendular, a frequência natural do sistema fruto-pedúnculo reduziu na medida em que se aumentou o número de frutos de um para três, e conseqüentemente, a massa do sistema.

Os valores para frequências naturais do ramo obtidos no presente trabalho foram superiores aos valores encontrados por FILGUEIRAS (2001) (Figura 8). O autor utilizou módulo de elasticidade 3562 MPa, contra 4650 MPa empregado neste trabalho. Além da diferença de magnitude no módulo de elasticidade, as diferenças nos resultados podem estar relacionadas a aspectos da modelagem, como a geometria e elementos utilizados na discretização.

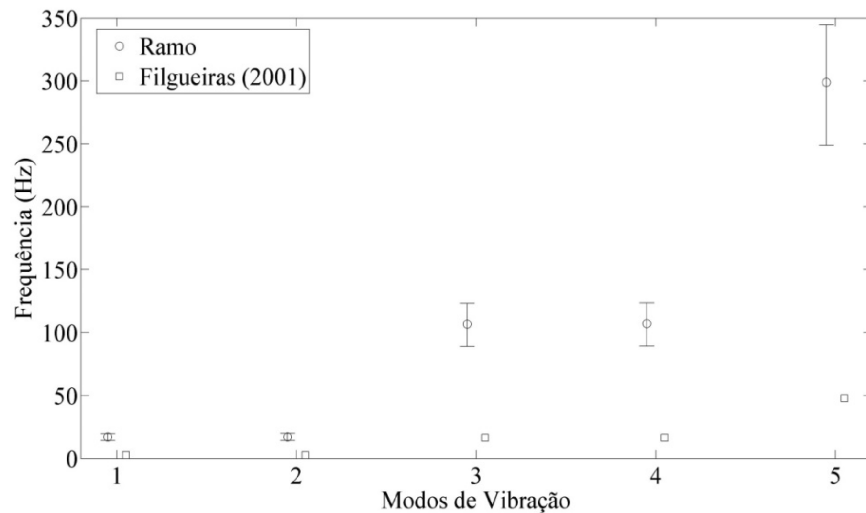
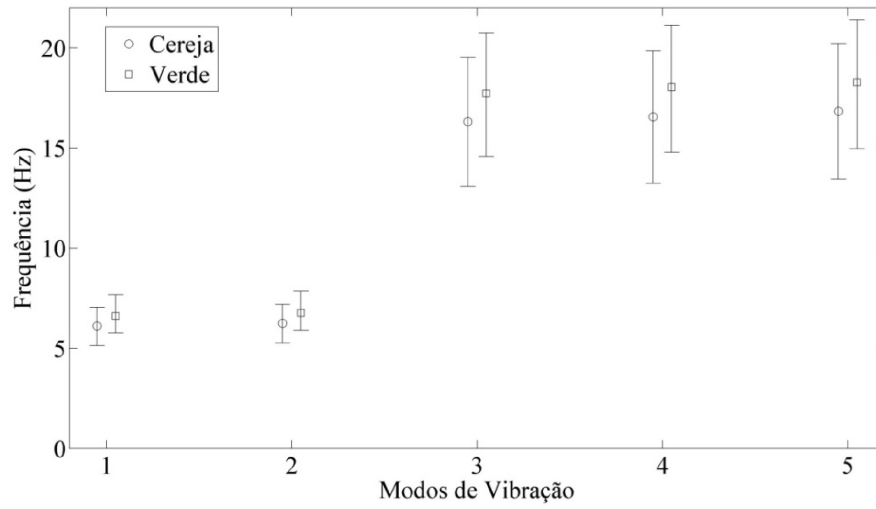


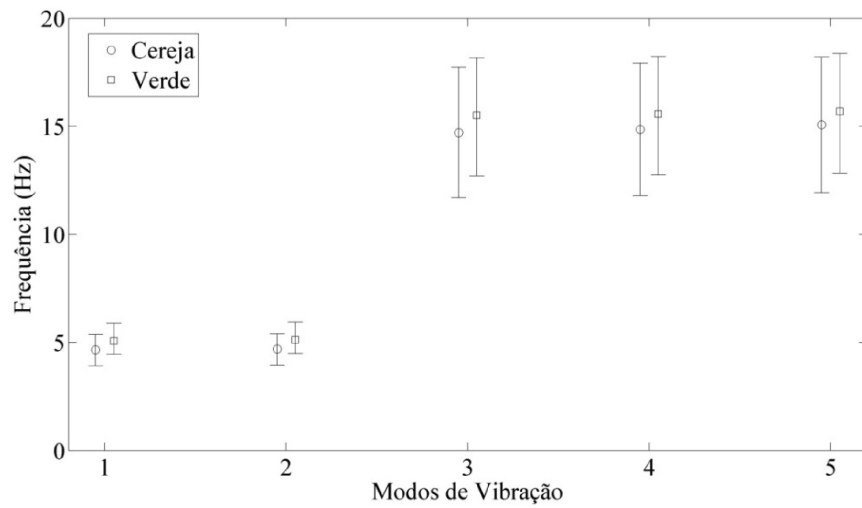
Figura 22: Frequências naturais para o ramo, obtidos no presente trabalho e por FILGUEIRAS (2001).

No primeiro e segundo modos de vibração ocorreram movimentos pendulares do ramo, em planos perpendiculares. O terceiro e quarto também caracterizaram-se como movimentos pendulares em planos perpendiculares, porém, com deslocamentos em contra-fase. No quinto ocorreu deslocamento pendular em contra-fase, porém, com aumento da quantidade de regiões em contra-fase. Os modos de vibração concordam como os obtidos por FILGUEIRAS (2001).

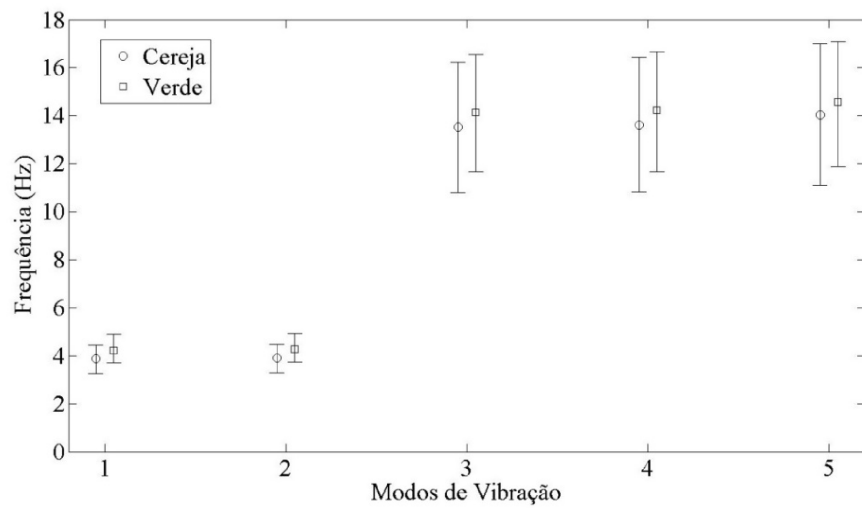
Para os sistemas fruto-pedúnculo-ramo, de forma similar aos sistemas fruto-pedúnculo, as frequências naturais reduziram na medida em que evolui do estágio de maturação verde para cereja (Figura 9).



(a)



(b)



(c)

Figura 23: Frequências naturais para o sistema fruto-pedúnculo-ramo, com (a) um, (b) dois e (c) três frutos, nos estádios de maturação verde e cereja.

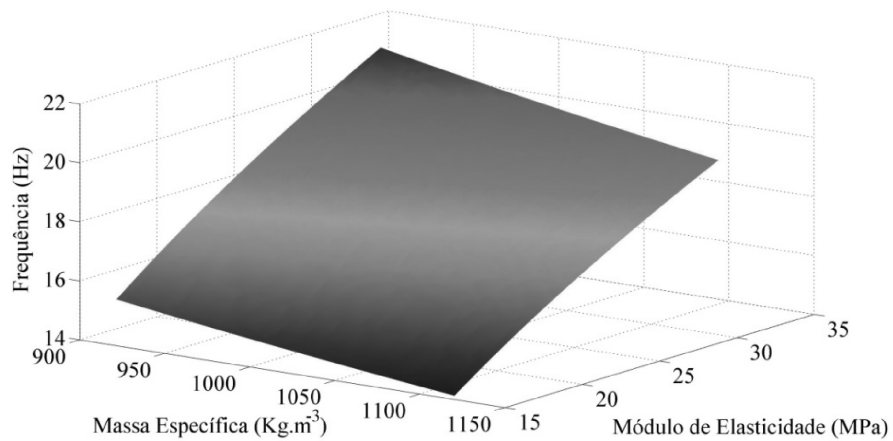
Nos três cenários avaliados com um, dois e três frutos por pedúnculos distribuídos ao longo do seu comprimento, o primeiro e o segundo modo de vibração caracterizam-se como movimentos pendulares do sistema fruto-pedúnculo-ramo, em planos perpendiculares. No terceiro, quarto e quinto modos ocorreram deslocamentos pendulares e rotacionais dos sistemas fruto-pedúnculo conectados ao ramo.

FILGUEIRAS (2001), ao modelar os ramos do cafeeiro com os frutos, também observou movimentos pendulares para os primeiros e segundos modos. Para o terceiro modo, porém, obteve-se movimento pendular em contra-fase, com deformação do ramo. Tal divergência pode ser explicada pelo método de modelagem utilizado pelo autor, em que as massas dos frutos não estavam deslocadas do eixo do ramo, além de não serem consideradas as geometrias dos frutos e dos pedúnculos.

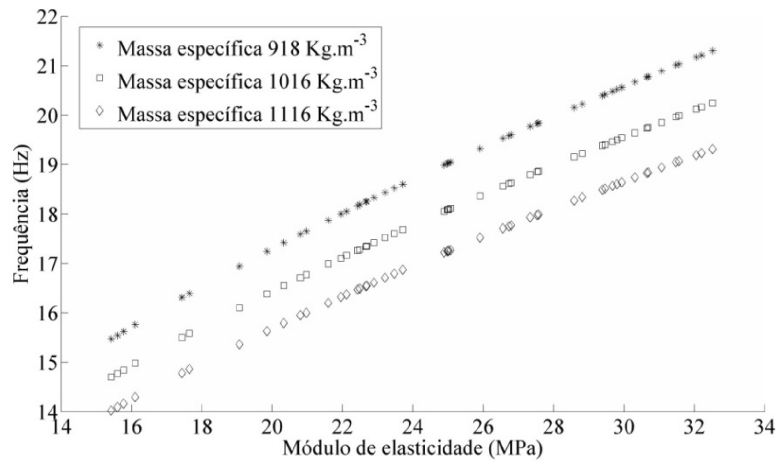
Assim, como ocorrido para o sistema fruto-pedúnculo, os valores de frequências naturais para um mesmo modo de vibração reduziram na medida em que aumentou o número de frutos solidários a um mesmo pedúnculo, e conseqüentemente, a massa do sistema. Tal comportamento, também ocorreu ao comparar o resultado do sistema fruto-pedúnculo-ramo com os do ramo, também devido ao aumento de massa, concordando com FILGUEIRAS (2001).

Para uma colheita eficiente indica-se a aplicação de frequências referentes ao terceiro, quarto ou quinto modo de vibração. Para estas frequências, os deslocamentos ocorreram, principalmente, devido a deslocamentos dos pedúnculos, aumentando a probabilidade de seu rompimento. Porém, visando uma colheita seletiva a utilização de frequências até o quinto modo de vibração não são adequados, uma vez que há sobreposição das faixas de frequência referentes aos estádios de maturação verde e cereja, impossibilitando a seletividade da colheita.

Houve um aumento das frequências naturais na medida em que reduziu a massa específica ou se aumentou o módulo de elasticidade dos frutos, pedúnculos e ramos (Figura 10). A elevação das frequências naturais está relacionada com a redução da massa ou aumento da rigidez do sistema.



(a)



(b)

Figura 24: Variação da primeira frequência natural do sistema fruto-pedúnculo com um fruto, no estágio de maturação cereja, em função da variabilidade da massa específica do fruto e do módulo de elasticidade do pedúnculo, em (a) superfície de resposta e (b) cortes.

A variação de 918 a 1116 kg.m^{-3} (22 %) na massa específica do fruto associada a variação de 15,4 a 32,5 MPa (111 %) no módulo de elasticidade do pedúnculo, ambas variações em relação a média experimental, resultou para a primeira frequência natural uma faixa de valores entre 14,0 a 21,3 Hz, representando uma variação percentual de 52 % (Figura 10).

Portanto, constatou-se uma influência significativa das variações as propriedades físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro nos valores de frequências naturais. Essa influência ressalta a importância de se utilizar o método de elementos finitos estocástico para estudo do comportamento dinâmico do cafeeiro, vislumbrando o

desenvolvimento de máquinas de colheita mais eficientes e que possibilitem a seletividade da colheita.

4. Conclusões

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

- As frequências naturais dos sistemas fruto-pedúnculo e fruto-pedúnculo-ramo apresentaram comportamento de redução na medida em que o estágio de maturação evolui do verde para o cereja;
- As frequências naturais dos sistemas reduziram na medida em que se aumentou o número de frutos, devido ao aumento de massa;
- No quarto e quinto modos de vibração, dos sistemas fruto-pedúnculo e fruto-pedúnculo-ramo, houve maiores deslocamentos dos pedúnculos;
- Ocorreu sobreposição das faixas de frequências naturais referentes aos estádios de maturação verde e cereja, devido a variação das propriedades físicas e mecânicas do sistema, o que pode impossibilitar a colheita seletiva por vibrações mecânicas;
- Os sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo apresentaram aumentos frequências naturais na medida em que aumentou o módulo de elasticidade ou reduziu a massa específica dos frutos, pedúnculos e ramos.

5. Referências bibliográficas

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

ASFOUR, O. S., & GADI, M. B. A comparison between CFD and Network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. **Building and Environment**, v.42, n.12, p. 4079-4085, 2007

BALLARIN, A.W., NOGUEIRA, M. CARACTERIZAÇÃO ELÁSTICA DA MADEIRA DE Eucalyptus Citriodora. **Cerne**, v.9, v1, p.066-080, 2003

BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N.; SILVA, F. M. Desempenho operacional de derriçadoras mecânicas portáteis, em diferentes condições de lavouras cafeeiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 129-132, 2005.

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

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

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

FABRO, A.T. **Análise estocástica do comportamento dinâmico de estrutura via métodos probabilísticos**. 2010, 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

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

GARCÍA-URIBE, F.; OLIVERES-TASCÓN, C.E. Design of a Shaker-Clamp System for Inertial Shaker of Coffee Trees. **ASAE Meeting Presentation**, Paper number 031143:1-14, 2003.

GRAY, H.A.; TADDEI, F.; ZAVATSKY, A.B.; CRISTOFOLINI, L.; GILL, H.S. Experimental Validation of a Finite Element Model of a Human Cadaveric Tibia. **Journal of Biomechanical Engineering**, v.130, n.3, p.1-9, 2008.

JANCSÓK, P.T, CLIJIMANS, L., NICOLAI, B.M., BAERDEMAEKER, J. Investigation of the effect of shape on the acoustic response of 'conference' pears by finite element modeling, **Postharvest Biology and Technology**, v.23, n. 1, p.1-12, 2001.

MASCIA, N.T., LAHR, F.A.R., Remarks on Orthotropic Elastic Models Applied to Wood, **Materials Research**, v. 9, n. 3, p.301-310, 2006

NORTON, T., SUN, D.-W., GRANT, J., RICHARD, F., & DODD, V. Applications of CFD in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. **Bioresource Technology**, v.98, n.12,p. 2386-2414, 2007

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; SOUZA, Z.M.;CHALFOU, S.M.; FIGUEIREDO, C.A.P. Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v.42, n.6, p.827-831, 2007.

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; SOUZA, Z.M.; 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, p.714-721, 2007.

PENEDO, N. D.; ELIAS, C.N.; PACHECO, M.C.T.; GOUVEA, J.P.; Simulação 3D de movimento ortodôntico. **Dental Press Journal of Orthodontics**, v.15, n.5, p.98-108, 2010.

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

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. Third edition. New York, EUA: Addison-Wesley Publishing Company, 1995. 912p.

REH, S.; BELEY, J.; MUKHERJEE, S.; KHOR, E. H. Probabilistic finite element analysis using ANSYS. **Structural Safety**. v.28, n.1-2, p.17-43, 2006.

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

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

SANTOS, F. L. **Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derriça**. 2008. 136 p. 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**, v. 32, n.3, p. 373-378, 2010.

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.

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

STEFANOU, G; The stochastic finite element method: Past, present and future. **Computer Methods Applied Mechanics and Engineerings**. v.198, n.9-12, p.1031-1051, 2009.

YUNG, C.; FRIDLEY, R.B. **Computer analysis of fruit detachment during tree shaking**. St. Joseph: ASAE, 1974 (Paper n. 74-3009)

**ARTIGO IV: Análise de tensões no sistema fruto-pedúnculo-ramo do
cafeeiro**

Análise de tensões no sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

Resumo

O desenvolvimento de máquinas para uma colheita eficiente do cafeeiro requerem o conhecimento acerca das tensões geradas nos pedúnculos e ramos devido à excitação. Dentre as ferramentas para a determinação de tais tensões tem-se a modelagem por método de elementos finitos. Assim, objetivou-se neste artigo determinar as tensões geradas no sistema fruto-pedúnculo-ramo durante às excitações, bem como avaliar sua influência em função do número de frutos e estágio de maturação. Foram determinadas as tensões de *von Mises* geradas nos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo quando submetidos a vibrações mecânicas com frequência referente à sua frequência natural, deslocamento pico-a-pico 10 mm e tempo de excitação de 10 s. Foram avaliados os cenários com um, dois e três frutos solidários a um mesmo pedúnculo e os estádios de maturação verde e cereja. As tensões de *von Mises* foram superiores para o estágio de maturação verde, devido à maiores de frequências de vibrações aplicadas neste estágio de maturação. As tensões de *von Mises* foram superiores nas regiões de engaste do pedúnculo ao ramo e no engaste do ramo ao tronco, devido aos maiores momentos fletores nestas regiões. As tensões de *von Mises* foram superiores nos sistemas fruto-pedúnculo com três frutos e menores no sistema fruto-pedúnculo-ramo com três frutos, devido à maior influência do aumento de massa do sistema e redução da frequência de vibração, respectivamente.

Palavras-chave: deformação, método de elementos finitos, tensão de *von Mises*,

Stress analysis in coffee fruit-stem-branch system

Abstract

The machines development for coffee's efficient harvesting requires the knowledge about the stresses generated in the stem and branches due to their stimulation. Among the tools for determining such stresses, the modeling by finite elements method is used. Thus, this paper aimed to determine the stresses generated in the fruit-stem-branch system during the stimulation as well as to evaluate their influence based on the number of fruit grouped at the stem and ripeness stage. The von Mises stresses generated in the fruit-stem, branch, and fruit-stem-branch systems were determined when subjected to mechanical vibration with frequency regarding to its natural frequency, peak to peak displacement of 10 mm, and stimulation time of 10 s. Scenarios with one, two, or three fruits grouped at a same stem and green and ripe ripeness stages were evaluated. The von Mises stresses were higher for the green ripeness stage due to the higher vibrations frequency applied at this ripeness stage. The von Mises stresses were higher in the joint regions of the stem to the branch and the branch to the stem due to higher bending moments in these regions. The von Mises stresses were higher in fruit-stem system with three fruits and lower in the fruit-stem-branch system with tree fruits due to the greater influence of the system mass increase and the vibration frequency reduction, respectively.

Key words: displacement, finite element method, *von Mises* stress

1. Introdução

A colheita do café compreende um conjunto de operações, dentre elas a derrça, uma atividade complexa e onerosa (BARBOSA et al., 2005). A complexidade da derrça está relacionada com os seguintes fatores: altura das plantas, umidade dos frutos, inclinação dos terrenos, condições climáticas e a necessidade de se realizar a atividade no período correto (CIRO, 2001; OLIVEIRA et al., 2007b;). A oneração da derrça deve-se ao contingente de mão de obra necessário para sua execução, representando de 30 a 40 % dos custos com a colheita (CIRO, 2001; OLIVEIRA et al., 2007a).

A mecanização surgiu como uma solução para tornar as atividades de derrça do cafeeiro menos árdua e onerosa, por meio do aumento da capacidade operacional e da redução de esforços físicos referentes aos processos de colheita manual (GARCÍA e TASCÓN, 2003; SOUZA et al., 2006; ESPINOSA et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2007b). No setor cafeeiro, uma colheita mecanizada eficiente deve minimizar a derrça de frutos verdes, fator que reduz a qualidade do produto, além de reduzir a desfolha e a quebra de ramos.

A qualidade do produto é imprescindível, tanto na colheita mecanizada quanto na manual, uma vez que o preço do café está relacionado com a qualidade da bebida. Para se obter uma melhor qualidade de bebida deve-se, durante a colheita, minimizar a quantidade de frutos que não estejam maduros (ESPINOSA et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2007a; SANTOS et al., 2010b);

A derrça dos frutos de qualquer cultura envolve o rompimento do pedúnculo, parte vegetativa responsável por conectar o fruto à planta. Quando se utiliza a colheita por vibrações mecânicas, princípio utilizado em culturas como o café, damasco, laranja, pistache, oliva e uva, a energia cinética é transmitida à planta, promovendo o rompimento dessa estrutura (ERDOGAN et al., 2003; SANDERS, 2005; SESSIZ e OZCAN, 2006; POLAT et al., 2007; PEZZI e CAPRAVA, 2009; SANTOS et al., 2010a).

No estudo do processo de derrixa, visando obter dados para o desenvolvimento de máquinas mais eficientes, necessita-se entender as tensões geradas no pedúnculo devido às vibrações mecânicas e responsáveis pelo seu rompimento (SANTOS, 2008).

Entre as ferramentas disponíveis para o estudo da análise de tensões tem-se a solução de equações analíticas, os ensaios controlados em laboratórios, os ensaios em campo e a utilização de ferramentas computacionais para a simulação da dinâmica dos sistemas. Nesta última, enquadra-se o método de elementos finitos, que consiste na geração e solução de um sistema de equações diferenciais que governam o comportamento físico em questão (ALBURQUEQUE, 2005; TAPLAK e PARLAK, 2012).

SANTOS (2008), empregando o método de elementos finitos, determinou as tensões de *von Mises* geradas no sistema fruto-pedúnculo do cafeeiro, quando submetido à vibrações mecânicas, com frequências correspondentes à primeira, segunda e terceira frequências naturais e, deslocamento pico a pico 15 mm. O autor concluiu que as tensões aumentaram na medida em que se aumentou a frequência de vibração.

A análise de tensões de diversos sistemas, mecânicos ou biológicos, tem sido realizadas, empregando-se o método de elementos finitos, como: pás de turbina, carroceria de carro, crânio de macaco, dente humano (REH et al., 2006; PENEDO et al., 2010; BERTHAUME et al., 2012).

Apesar da importância da análise de tensões para a compreensão do processo de colheita por vibração mecânica, não foram encontrados registros de trabalhos acerca da análise de tensões no cafeeiro ou suas partes, quando submetido à vibrações mecânicas. Assim, objetivou-se no presente trabalho analisar as tensões geradas nos sistemas fruto-pedúnculo-ramo durante o processo de colheita por vibrações mecânicas, empregando-se o método de elementos finitos. Adicionalmente, avaliou-se os níveis de tensões em função do número de frutos solidários a um mesmo pedúnculo e do estágio de maturação, quando submetidos à vibrações mecânicas.

2. Material e métodos

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, no período Maio/2013 a Julho/2013.

2.1. Análise de tensões

Os sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo foram modelados com o objetivo de determinar as tensões durante as excitações, empregando o método de elementos finitos. Para os sistemas fruto-pedúnculo e fruto-pedúnculo-ramo foram analisados os cenários com um, dois e três frutos solidários aos pedúnculos, e os estádios de maturação verde e cereja.

Com base nas dimensões determinadas experimentalmente (Tabelas 1, 2 e 3) foram geradas as geometrias para os modelos dos sistemas (Figuras 1, 2 e 3), por meio do programa computacional CAD-3D *SolidWorks* 2011.

Tabela 17: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o fruto para os estádios de maturação verde e cereja

Estádio de Maturação	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa Específica (g.cm ⁻³)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Razão de Poisson
Verde	16,14	12,77	1,13	15,82	0,24
Cereja	17,12	14,76	1,02	2,93	0,27

Tabela 18: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas para o pedúnculo para os estádios de maturação verde e cereja

Estádio de Maturação	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa Específica (g.cm ⁻³)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Razão de Poisson
Verde	6,64	2,12	1,09	15,74	0,35
Cereja	6,36	2,32	1,46	23,90	0,35

Tabela 19: Propriedades geométricas, físicas e mecânicas do ramo

Diâmetro (mm)	Massa Específica (g.cm ⁻³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Razão de Poisson
5,06	0,90	4,65	0,34

Exclusivamente para o ramo (Tabela 3), o valor para a razão de Poisson foi determinado a partir da média dos resultados encontrados por BALLARIN e NOGUEIRA (2003), e MASCIA e LAHR (2006).

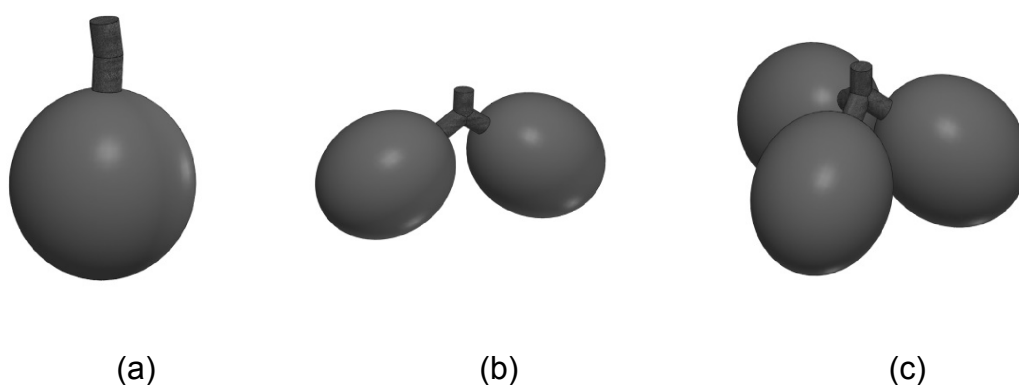


Figura 25: Geometria para o sistema fruto-pedúnculo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários a um mesmo pedúnculo



Figura 26: Geometria para o ramo.

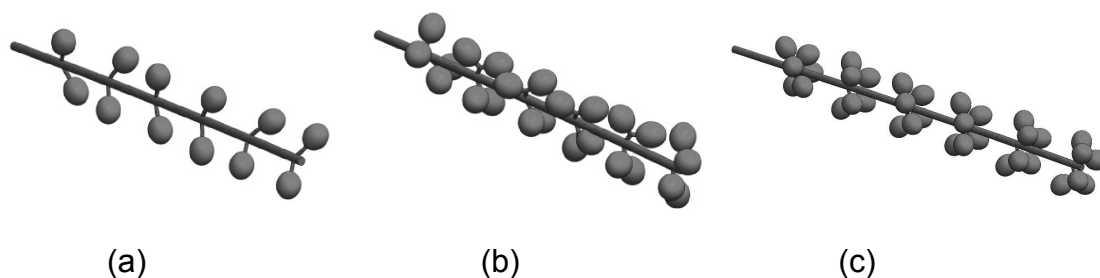


Figura 27: Geometria para o sistema fruto-pedúnculo-ramo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários a um mesmo pedúnculo.

As etapas de discretização das geometrias, definições das propriedades físicas e mecânicas e das condições de contorno, solução e visualização dos resultados, foram executadas utilizando o programa computacional *Ansys Mechanical APDL*, versão 14.5. O programa computacional foi executado em uma estação de trabalho com processador Intel® Xeon 3,5 GHz, com sistema operacional Linux centOS 6.3.

Os frutos, pedúnculos e ramo foram modelados como sendo compostos por materiais isotrópicos, adotando os dados de massa específica, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson determinados experimentalmente (Tabelas 1, 2 e 3).

A fim de simular o processo de colheita por vibrações mecânicas, os sistemas fruto-pedúnculo, fruto-pedúnculo-ramo e o ramo foram submetidos a deslocamentos sob a forma de onda senoidal, com deslocamento pico-a-pico de 10 mm e tempo de excitação de 10 s. A frequência de vibração adotada foi a primeira frequência natural do sistema (Tabela 4), determinados por análise modal empregando o programa computacional *Ansys Mechanical APDL*, versão 14.5. Para o ramo, a primeira frequência natural de vibração foi 17,07 Hz.

Tabela 20: Primeira frequência natural para os sistemas fruto-pedúnculo e fruto-pedúnculo-ramo, com um, dois ou três frutos, nos dois estádios de maturação

Cenários		Um fruto (Hz)	Dois frutos (Hz)	Três Frutos (Hz)
Sistema fruto-pedúnculo	Cereja	18,00	15,40	14,46
	Verde	19,11	16,01	14,65
Sistemas fruto-pedúnculo-ramo	Cereja	6,11	4,66	3,87
	Verde	6,61	5,08	4,22

A relação entre deformações e as respectivas tensões geradas em um corpo foram determinadas pela Lei de *Hooke* para material homogêneo e isotrópico, conforme a Equação (1) (HUEBNER et al., 2001).

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (1)$$

sendo,

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \tau_{xy} \tau_{xz} \tau_{yz}\} \quad (2)$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} \varepsilon_{xy} \varepsilon_{xz} \varepsilon_{yz}\} \quad (3)$$

em que,

$\{\sigma\}$ = vetor tensão, MPa;

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

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

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

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

$\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}$ e ε_{yz} = deformações cisalhantes, mm.mm⁻¹;

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

A tensão de *von Mises*, resultante de todas as tensões normais e cisalhantes que agem em um ponto do corpo, foi calculada a partir da Equação (4)

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}{2}} \quad (4)$$

em que

σ_{VM} =tensão de *von Mises*, MPa.

As tensões de *von Mises* máximas, correspondente ao pico de tensão ao longo do período de excitação, foram determinadas para cada cenário. Nos cenários referentes ao sistema fruto-pedúnculo foram avaliadas as regiões de engaste ao ramo, intermediária e engaste ao fruto. Já nos cenários para os sistemas ramo e fruto-pedúnculo-ramo foram avaliadas as regiões de engaste ao tronco, intermediária e extremidade livre.

2.2. Validação dos modelos

A validação da modelagem empregada para determinação das tensões, foi realizada por meio da determinação do desvio entre a frequência natural experimental e a simulada (Equação 5).

$$Desv = 100 \frac{|f_{exp} - f_{mef}|}{f_{exp}} \quad (5)$$

em que

$Desv$ = desvio, %

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

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

Para determinação experimental da frequência natural, amostras do sistema fruto-pedúnculo com um fruto e do ramo com comprimento 300 mm foram excitadas por um sistema produzido pela LDS (Ling Dynamic Systems) composto por um gerador de sinais COMET USB da marca Dactron, um amplificador LDS PA100E-CE e uma máquina vibradora eletromagnética modelo V-406 (Figura 4).



(a)



(b)



(c)

Figura 28: Sistema utilizado no experimento para excitação das amostras, composto por (a) máquina vibradora eletromagnética, (b) amplificador de sinal e (c) gerador de sinal.

O gerador de sinal, controlado pelo computador por meio de software, permitiu a obtenção de sinais de vibração da forma impulso, aleatória e senoidal. Os sinais elétricos de vibração gerados foram enviados para o amplificador, onde pode ser amplificado em até dez vezes. Na máquina vibradora, os sinais elétricos já amplificados foram convertidos em deslocamentos de sua base móvel, por meio de eletroímãs (Tabela 5).

Tabela 21: Características técnicas da máquina vibradora eletromagnética

Faixa dinâmica de trabalho (Hz)	5-9000
Carga máxima (N)	198
Deslocamento máximo pico-a-pico máximo (mm)	17,6
Aceleração máxima (g)	100

O controle do sistema foi realizado por meio de um transdutor piezoelétrico de aceleração (acelerômetro), fabricado pela PCB, com faixa de trabalho de 10 a 4000 Hz. Os sinais deste transdutor permitiram ao gerador de sinal o controle preciso das frequências e amplitudes de vibração impostas à base móvel da máquina vibradora.

As amostras do sistema fruto-pedúnculo foram presas ao sistema de fixação por meio do ramo. O sistema de fixação, por sua vez, foi acoplado à

base móvel da máquina vibradora eletromagnética (Figura 5). O sistema de fixação também foi utilizado para acoplamento do transdutor piezoelétrico.

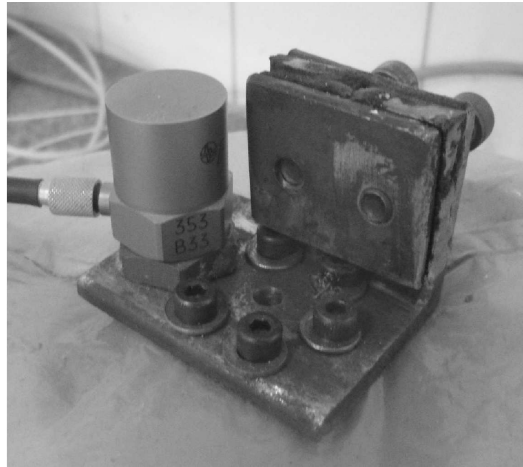


Figura 29: Sistema de fixação das amostras e suporte do transdutor piezoelétrico.

As amostras do sistema fruto-pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja, foram excitadas longitudinalmente sob a forma de função senoidal. Utilizou-se frequência de vibração variando progressivamente de 10 a 30 Hz, com deslocamento pico a pico de 7,21 mm. Para o ramo, a excitação foi realizada no sentido transversal sob a forma de função senoidal, utilizando frequência de vibração variando progressivamente de 10 a 30 Hz, com amplitude pico a pico de vibração constante de 1,75 mm.

Os deslocamentos do sistema fruto-pedúnculo e do ramo, gerados pelas excitações, foram capturados por meio de uma câmera de alta velocidade Mega Speed HHC modelo X3, com capacidade de captura de 1000 quadros por segundo. Posteriormente, as imagens foram processadas por meio do software Scilab (SCILAB ENTERPRISES, 2012), versão 5.4, obtendo os deslocamentos de uma região da amostra em função do tempo.

Os dados de deslocamento em função do tempo foram submetidos a transformada rápida de Fourier para a determinação dos espectros de frequência, realizada por meio do software Scilab (SCILAB ENTERPRISES, 2012), versão 5.4. A partir dos dados de amplitude de deslocamento dos pontos monitorados e da amplitude de excitação determinou-se a transmissibilidade dos pedúnculos e ramos, por meio da Equação (6).

$$T = \frac{Y_{\text{ponto}}}{Y_{\text{excitação}}} \quad (6)$$

em que,

T = transmissibilidade, $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$;

Y_{ponto} = amplitude de deslocamento do ponto monitorado, mm;

$Y_{\text{excitação}}$ = amplitude de excitação, mm.

Os gráficos de transmissibilidade das amostras em função da frequência de excitação foram gerados para as amostras do sistema fruto-pedúnculo e do ramo. A frequência de ressonância foi determinada considerando a frequência de excitação correspondente à maior transmissibilidade do sistema.

O experimento foi realizado para oito amostras do sistema fruto-pedúnculo, nos estádio de maturação verde e cereja, e para oito amostras do ramo. Os resultados de frequência natural simulados foram obtidos a partir da análise modal dos sistemas fruto-pedúnculo com um fruto e o ramo, por método de elementos finitos, empregando o programa computacional *Ansys Mechanical APDL*, versão 14.5.

3. Resultados e discussão

3.1 Validação dos modelos

Para a frequência natural simulada foi considerada a frequência referente ao primeiro modo de vibração pendular, compatível com o deslocamento verificado experimentalmente. Para a frequência natural experimental foi considerada a frequência referente ao maior deslocamento do sistema (Figura 6).

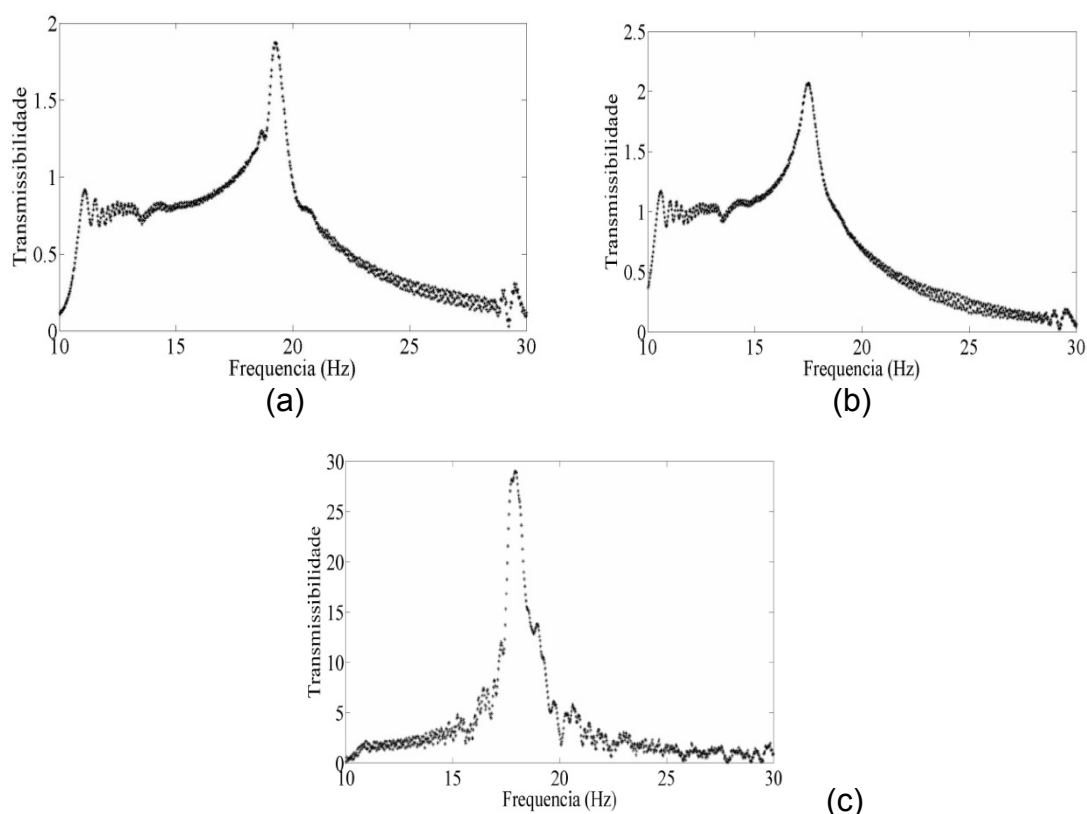


Figura 30: Transmissibilidade para o sistema fruto-pedúnculo nos estádios de maturação (a) verde e (b) cereja, e para o (c) ramo

Os valores médios para a frequência naturais experimentais e os simulados, (Tabela 6) apresentaram um comportamento de redução da frequência na medida em que o sistema fruto-pedúnculo evolui do estágio de maturação verde para cereja.

Tabela 22: Desvio entre os valores de frequência natural experimental média e simulada, para o sistema fruto-pedúnculo e o ramo

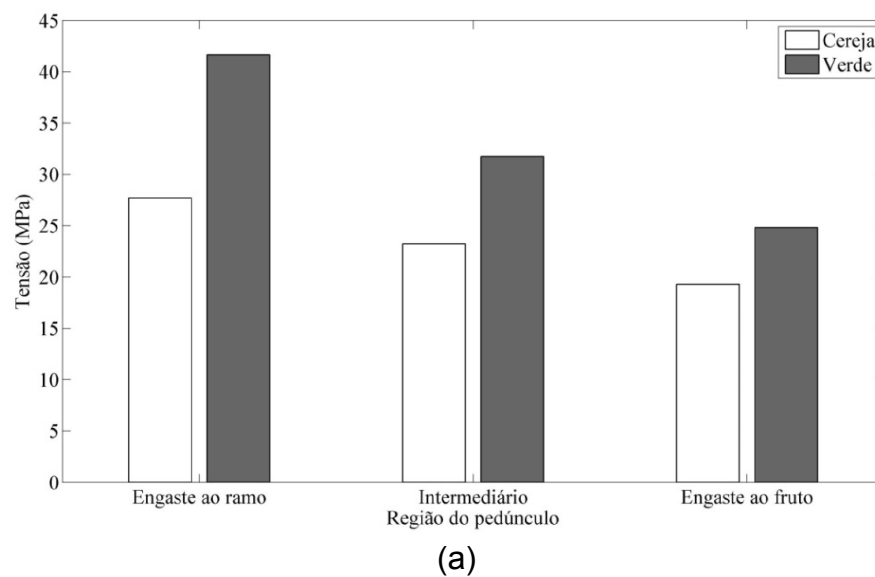
Cenário	Frequência natural (Hz)		Desvio (%)
	Experimental	Simulado	
Verde	18,64	19,11	2,52
Cereja	17,38	18,00	3,57
Ramo	16,83	17,07	1,43

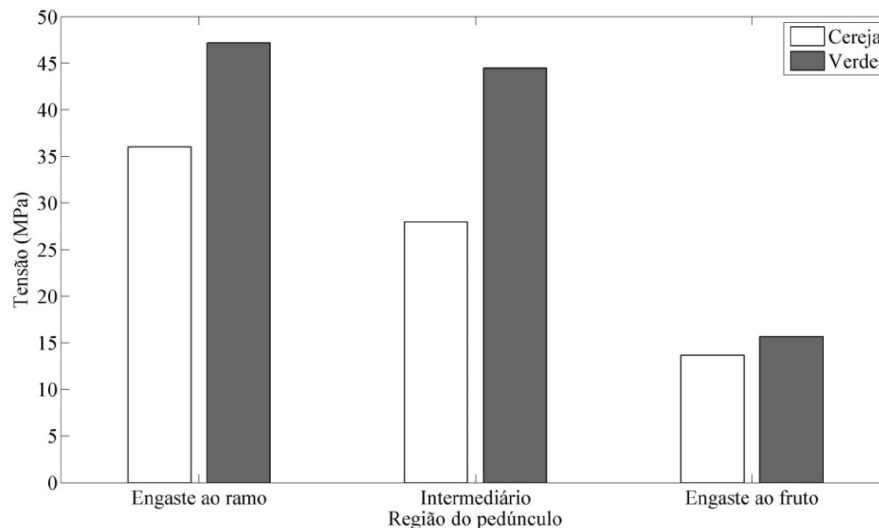
Os desvios entre os resultados experimentais e simulado podem ser explicados pelas variabilidades nas propriedades geométricas, físicas e mecânicas das amostras, fatores que influenciam diretamente na frequência natural (ARISTIZÁBAL et al., 2003, RODRÍGUEZ et al., 2006). Para o

sistema fruto-pedúnculo a tendência de redução da frequência natural na medida em que evoluiu o estágio de maturação ocorreu em ambos os resultados. Portanto, os modelos gerados pelo método de elementos finitos são coerentes, podendo ser utilizados para análise de tensões nos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro.

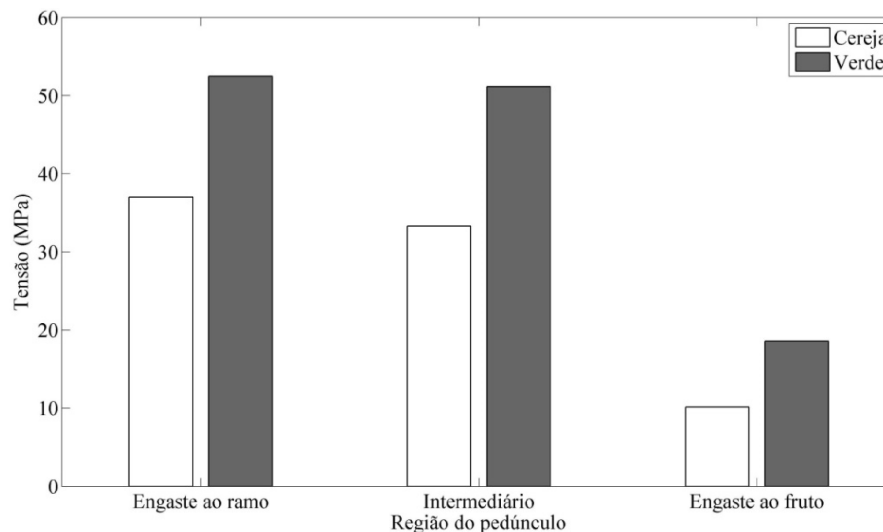
3.2. Análise de tensões

As tensões de *von Mises* nos pedúnculos dos sistemas fruto-pedúnculo, independente do número de frutos solidários ao pedúnculo, reduziram na medida que se deslocou a região monitorada do engaste do ramo para o engaste do fruto (Figura 7). As frequências de excitação empregadas corresponderam às frequências naturais dos sistemas, que são dependentes das propriedades geométricas, físicas e mecânicas.





(b)



(c)

Figura 31: Tensões de *von Mises* nas regiões do sistema fruto-pedúnculo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários ao pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja.

A tendência de maiores tensões nas regiões do engaste do pedúnculo ao ramo pode ser explicada pelo maior momento fletor nesta região, uma vez que os deslocamentos do sistema foram caracterizados como movimentos pendulares.

As tensões de *von Mises* foram superiores nos cenários com estágio de maturação verde quando comparado aos valores para a maturação cereja. Este comportamento, também observado por SANTOS (2008), pode ser explicado pelas maiores frequências de excitação utilizadas para a avaliação do estágio de maturação verde, o que resultou na geração de uma

quantidade de energia cinética fornecida ao sistema. Além disso, o pedúnculo no estágio de maturação verde apresentou maior resistência mecânica, comprovado pelos valores de módulo de elasticidade e força de destacamento dos frutos (CIRO, 2001; SAMPAIO, 2002; SILVA et al., 2010), provocando maiores tensões no sistema fruto-pedúnculo.

As tensões de *von Mises* também aumentaram na medida em que se aumentou o número de frutos solidários a um mesmo pedúnculo. Apesar de a frequência de excitação ter sido menor para o sistema com três frutos, as maiores tensões neste cenário podem ser explicadas pela maior influência do aumento da massa no deslocamento modal, resultando em aumento do momento fletor no pedúnculo, e o conseqüente aumento de tensões.

Nos sistemas ramo e fruto-pedúnculo-ramo com um, dois e três frutos solidários ao pedúnculo as tensões de *von Mises* também reduziram na medida em que se deslocou da região de engaste ao tronco para a extremidade do ramo (Figuras 8 e 9), tal comportamento esta associado aos maiores momentos fletores no engaste do ramo ao tronco. Os maiores momentos fletores nesta região ocorreram, por sua vez, devido ao movimento pendular do sistema, característico do seu primeiro modo de vibração.

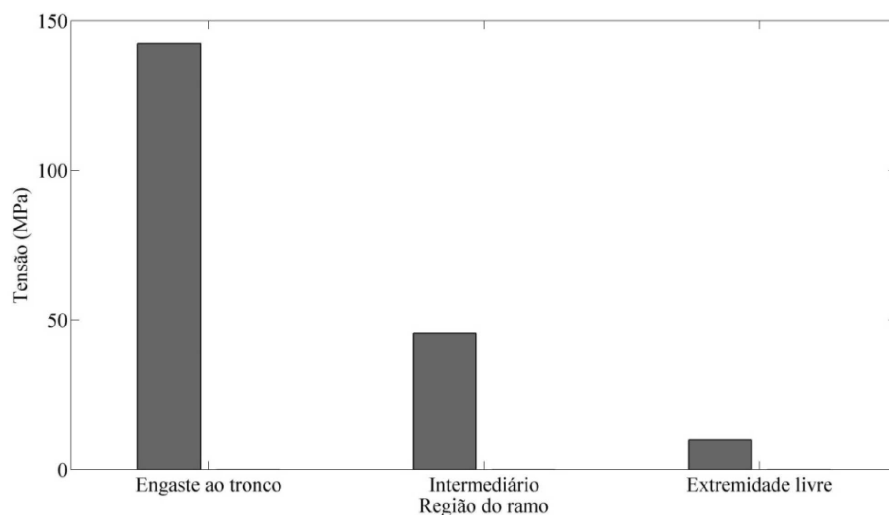


Figura 32: Tensões de *von Mises* em três regiões do ramo.

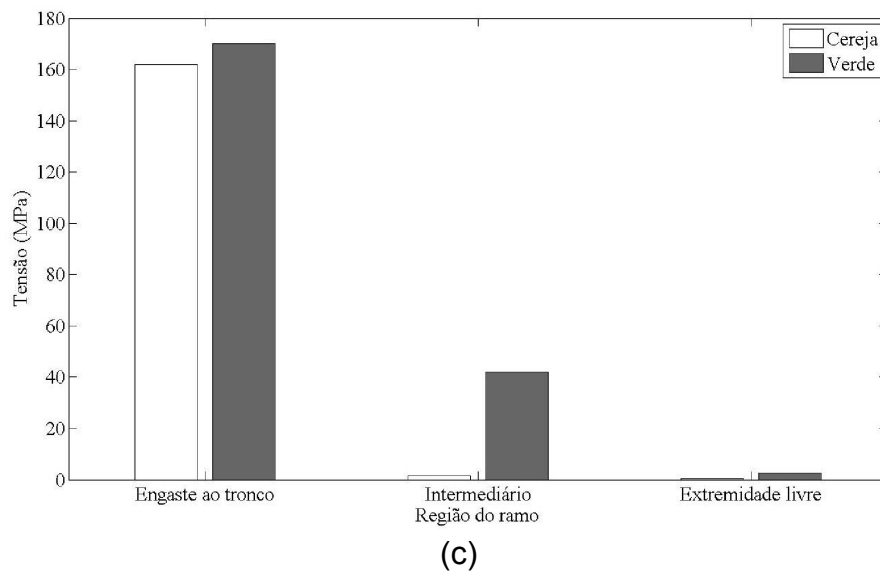
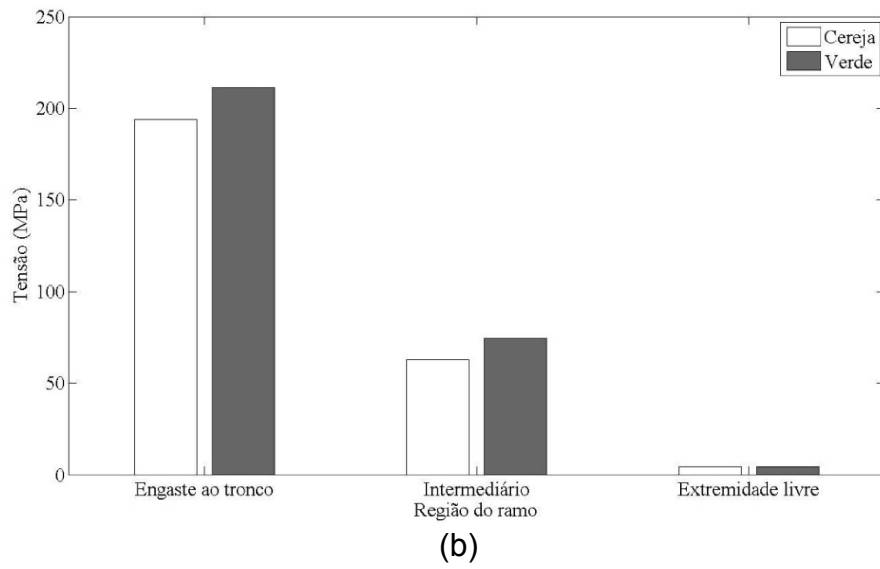
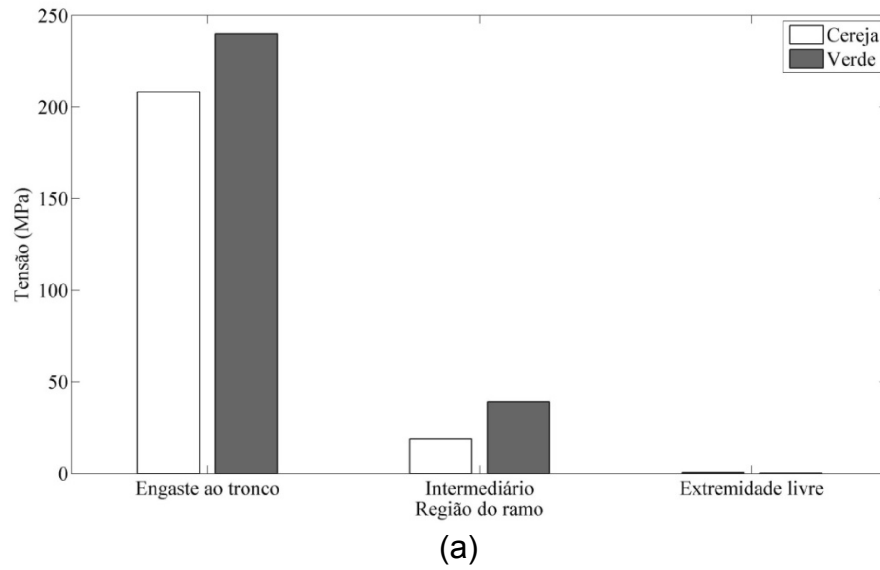


Figura 33: Tensões de *von Mises* nas regiões do ramo do sistema fruto-pedúnculo-ramo com (a) um, (b) dois e (c) três frutos solidários ao pedúnculo, nos estádios de maturação verde e cereja.

Foram obtidos resultados similares aos cenários avaliados para o sistema fruto-pedúnculo, as tensões foram maiores para os sistemas fruto-pedúnculo-ramo no estágio de maturação verde, sendo este comportamento explicado pelas maiores frequências de vibração mecânicas empregados nestes sistemas.

As tensões de *von Mises* nos sistemas fruto-pedúnculo-ramo reduziram na medida em que se aumentou o número de frutos solidários ao mesmo pedúnculo. Apesar do aumento da massa do sistema, a redução das tensões pode ser explicada pela maior influência das frequências de excitação, resultando em menor energia cinética transmitida ao sistema, conforme verificado por SANTOS (2008), ocasionando menores deslocamentos.

A influência da distribuição de massa, além da frequência de excitação, nas tensões podem ser comprovada ao comparar os resultados para o ramo e para o sistema fruto-pedúnculo-ramo. Já que as tensões no ramo, 142 MPa na região de engaste ao tronco, foram inferiores às tensões no sistema fruto-pedúnculo-ramo, 208 MPa na região de engaste ao tronco no sistema com um fruto e estágio de maturação cereja, mesmo sendo excitado em maiores frequências, devido ausência de massa referente aos frutos e pedúnculos.

A redução nas tensões ocasionadas pela redução das frequências de excitação também podem ser explicadas ao analisar a eficiência de derriça do cafeeiro em função das frequências de vibração. BARBOSA et al. (2005), OLIVEIRA et al. (2007b), SILVA et al. (2006), (2013) ao avaliar a eficiência de derriça do cafeeiro verificaram um aumento na eficiência de derriça na medida em que se aumentou a frequência de vibração das hastes da colhedora. Constatando assim, que maiores frequências de vibração provocam maiores tensões nos pedúnculos do cafeeiro, aumento a probabilidade de seu rompimento e, por sua vez, aumentando a eficiência de derriça. Este comportamento está associado a energia fornecida aos sistemas durante o processo de colheita por vibrações mecânicas.

4. Conclusões

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

- As tensões de *von Mises* foram superiores para o estágio de maturação verde, devido à maiores de frequências de vibrações aplicadas neste estágio de maturação, relativa à sua primeira frequência natural;
- As tensões de *von Mises* foram superiores nas regiões de engaste do pedúnculo ao ramo e no engaste do ramo ao tronco, devido aos maiores momentos fletores nestas regiões;
- As tensões de *von Mises* foram superiores nos sistemas fruto-pedúnculo com três frutos, devido à maior influência do aumento de massa do sistema.
- As tensões de *von Mises* menores no sistema fruto-pedúnculo-ramo com três frutos, devido à maior influência da redução de na frequência de excitação.

5. Referências bibliográficas

ALBURQUEQUE, E.L. **Investigação sobre a variabilidade da resposta dinâmica de painéis reforçados**. 2005. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

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

BALLARIN, A.W., NOGUEIRA, M. CARACTERIZAÇÃO ELÁSTICA DA MADEIRA DE Eucalyptus citriodora. **Cerne**, v.9, v1, p.066-080, 2003

BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N.; SILVA, F. M. Desempenho operacional de derriçadoras mecânicas portáteis, em diferentes condições de lavouras cafeeiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 129-132, 2005.

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

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

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

GARCÍA-URIBE, F.; OLIVERES-TASCÓN, C.E. Design of a Shaker-Clamp System for Inertial Shaker of Coffee Trees. **ASAE Meeting Presentation**, Paper number 031143:1-14, 2003.

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

MASCIA, N.T., LAHR, F.A.R., Remarks on Orthotropic Elastic Models Applied to Wood, **Materials Research**, v. 9,n. 3, p.301-310, 2006

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; SOUZA, Z.M.; CHALFOU, S.M.; FIGUEIREDO, C.A.P. Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.6, p.827-831, 2007.

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; SOUZA, Z.M.; FIGUEIREDO, C.A.P. Influência da vibração das hastes e da velocidade de deslocamento da colhedora no processo de colheita mecanizada do café. **Revista Engenharia Agrícola**, v.27, n.3, p.714-721, 2007.

PENEDO, N. D.; ELIAS, C.N.; PACHECO, M.C.T.; GOUVEA, J.P.; Simulação 3D de movimento ortodôntico. **Dental Press Journal of Orthodontics**, v.15, n.5, p.98-108, 2010.

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

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

REH, S.; BELEY, J.; MUKHERJEE, S.; KHOR, E. H. Probabilistic finite element analysis using ANSYS. **Structural Safety**. v.28, n.1-2, p.17-43, 2006.

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

SAMPAIO, C.P. **Determinação da força requerida para o desprendimento de frutos de café em diferentes estádios de maturação**. 2000. 48 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)– Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

SANTOS, F. L. **Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derriça**. 2008. 136 p. 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.

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

SCILAB ENTERPRISES. **Scilab: Free and Open Source software for numerical computation** (Version 5.4), 2012. Available from: <http://www.scilab.org>

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

SILVA, F.M; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, R. J.; FIGUEIREDO, C. A. P.; SILVA, F. C. Desempenho operacional e econômico da derriça do café com uso da derriçadora lateral. **Coffee Science**, v.1, n.2, p.119-126, 2006.

SILVA, F.C.; SILVA, F.M.; SILVA, A.C.; BARROS, M.M; PALMA, M.A.Z, Desempenho operacional da colheita mecanizada e seletiva do café em função da força de desprendimento dos frutos. **Coffee Science**, v.8, n.1, p.53-60, 2013.

SILVA, F.C.; SILVA, F.M.; ALVES, M. C; BARROS, M.M.; SALES, R.S. Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiro ao longo

do período de colheita. **Revistas Ciências Agrotécnicas**, v.34, n.2, p.468-474, 2010.

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

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

**ARTIGO V: Análise da eficiência de derriza dos frutos do cafeeiro
submetidos à vibrações mecânicas**

Análise da eficiência de derrça dos frutos do cafeeiro submetidos à vibrações mecânicas

Resumo

O desenvolvimento de máquinas eficientes para a colheita mecanizada do cafeeiro exige a utilização de parâmetros vibracionais adequados. Assim, para um menor desprendimento de frutos verdes, menor quebra de galhos e menor desfolha devem ser utilizados magnitudes de frequências, amplitudes e tempos de vibração adequados. Objetivou-se analisar a eficiência de derrça dos frutos do cafeeiro em função de parâmetros vibracionais e do estágio de maturação. Amostras com um cacho de frutos nos estádios de maturação verde e cereja foram submetidos à vibração utilizando um sistema composto por um gerador de sinais, um amplificador e uma máquina vibratória eletromagnética. Os ensaios foram realizados combinando diferentes frequências (16,4; 20,3; 24; 25,6; 30,0 e 33,0 Hz), deslocamento pico a pico (5,0; 7,0 e 9,0 mm) e tempos de vibração (10,0 e 20,0 s). O número de frutos no cacho foi contabilizado antes e após a excitação, a fim de determinar a eficiência de derrça. Os tempos de excitação empregados não influenciaram a eficiência de derrça. Para os deslocamentos estudados, houve uma tendência da eficiência de derrça dos frutos cerejas ser superior à dos frutos verdes. A eficiência de derrça aumentou na medida em que se aumentou a frequência de vibração e o deslocamento.

Palavras-chave: superfície de resposta, parâmetros vibracionais, colheita mecanizada.

Detachment efficiency analysis of coffee fruits submitted to mechanical vibrations

Abstract

The efficient machines development for mechanized harvesting of coffee requires usage suitable vibrational parameters. Thus, the use of magnitudes of frequency, amplitude, and suitable vibration times are required for a less overthrowing of green fruits, lower branches breakage, and lower leaf loss. This study aimed to analyze the overthrowing efficiency of coffee plant considering the vibrational parameters and ripeness stage. Samples of fruit bunch at green and ripe ripeness stage were submitted to vibration using a system composed by a signal generator, an amplifier, and an electromagnetic shaker. The tests were carried out combining different frequencies (16.4; 20.3; 24.0; 25.6; 30.0; and 33.0 Hz), peak to peak displacements (5.0; 7.0; and 9.0 mm), and vibration times (10.0 and 20.0 s). The fruits amount in the bunch was recorded before and after stimulation for determining the overthrowing efficiency. It was found that the used stimulation times did not influence the overthrowing efficiency. For the studied displacements, the overthrowing efficiency of ripe fruits tended to be higher than the green fruits efficiency. The overthrowing efficiency increased as the vibration frequency and the displacement increased.

Key words: response surface, vibrational parameters, mechanized harvest.

1.Introdução

O café é um importante produto para a economia nacional. O Brasil ocupa a posição de maior produtor mundial, sendo que a estimativa de produção do país para a safra de 2013 é de 47,54 milhões de sacas de 60 quilos. A concretização da produção estimada implicará em uma redução de 6,46 % em relação a safra 2012, causada, principalmente, pelo ciclo de baixa bienalidade em grande parte das áreas de café arábica e a irregularidade das chuvas associadas a altas temperaturas (CONAB, 2013).

De acordo com a CONAB (2013), do total de produção estimada para o ano de 2013, 77,12 % será de café arábica, tendo como principal produtor o estado de Minas gerais. Enquanto 27,88 % será de café da espécie robusta, sendo Espírito Santo o maior produtor.

Dentre as etapas da colheita do café, a derriça caracteriza-se por exigir um elevado contingente de mão de obra. Os custos com a derriça manual do café representam aproximadamente 40 % dos custos totais de produção (CIRO, 2001). A mecanização da colheita tem sido a alternativa encontrada pelos produtores, obtendo um aumento considerável da capacidade operacional do processo. BARBOSA et al. (2005) observaram que capacidade operacional da derriça utilizando derriçadoras portáteis foi 251 % superior à capacidade operacional da derriça manual.

A colheita mecanizada do cafeeiro e de outras culturas, como damasco, laranja, pistache, oliva e uva, tem sido realizada por meio de vibrações mecânicas. A partir de tal princípio, a energia cinética é transmitida a planta ou a parte dela, promovendo o desprendimento dos frutos (ERDOGAN et al., 2003; SANDERS, 2005; SESSIZ e OZCAN, 2006; SOUZA et al., 2006; POLAT et al., 2007; SANTOS et al., 2010a)

Uma colheita mecanizada eficiente do cafeeiro compreende o desprendimento mínimo de frutos verdes, um menor repasse além de uma menor desfolha, quebra dos ramos e descortiçamentos dos troncos. O desprendimento dos frutos verdes é indesejável, uma vez que somente os frutos no estágio de maturação cereja apresentam todas as características químicas necessárias para se obter um café com aroma e paladar ideais

(FAGAN et al., 2011; SAGIO, 2012). O repasse, tarefa que compreende o retorno à planta colhida para derrça dos frutos ainda presentes, é normalmente realizada de forma manual, aumentando os custos de produção (OLIVEIRA et al., 2007a). A desfolha, a quebra de ramos e o descortçamento, além de elevarem o grau de impurezas do café reduzindo sua qualidade, prejudicam a estrutura arbórea da planta, comprometendo a produção seguinte (SOUZA et al., 2006).

A análise de eficiência de colheita tem sido realizada para o cafeeiro e outras culturas que utilizam a colheita por vibrações mecânicas, como cerejas, damasco, nozes e olivas (ERDOGAN et al., 2003; MATEEV e KOSTADINOV, 2004; SESSIZ e OZCAN, 2006; POLAT et al., 2007). Esse tipo de análise permite estabelecer os parâmetros vibracionais adequados para o projeto e operação de máquinas de colheita.

Após a determinação analítica das frequências naturais para o primeiro e o segundo modo de vibração do sistema fruto-pedúnculo, CIRO (2001) realizou um ensaio de derrça em ramos de café com quantidade de frutos maduro inferior a 50 %. Os ramos foram submetidos à vibração unidirecional em diferentes frequências (24,66; 30,0 e 36,66 Hz), amplitudes (5,0; 10,0 e 15,0 mm) e tempo de vibração de 5 s. Verificou que na medida em que se aumentou a frequência e a amplitude de vibração melhorou a eficiência de derrça dos frutos cereja. O maior grau de seletividade foi encontrado vibrando o ramo na frequência natural do estágio de maturação cereja (24,66 Hz), com menores amplitudes de vibração.

Ao avaliar a eficiência de derrça do cafeeiro, SANTOS et al. (2010a) testaram três comprimentos de ramos (5, 10 e 15 mm) submetidos à vibrações mecânicas, das variedades Catuaí Vermelho e Mundo Novo. Os ramos foram submetidos às vibrações com diferentes frequências (13,33; 16,67; 20,00; 23,33 e 26,67 Hz) e amplitudes (3,75; 5,00; 6,25 e 7,50 mm), em duas direções distintas (longitudinal e transversal). Os autores concluíram que a eficiência de derrça foi diretamente relacionada com a frequência e amplitude de vibração, com tendência de aumento na medida em que aumentou a frequência e amplitude.

GUEDES (2011) também analisou a eficiência de derrça do café, estudando ramos com comprimento 50 e 100 mm, da variedade Catuaí

Vermelho, em dois períodos da safra. Os ensaios foram realizados em ramos considerando diferentes frequências (35, 40, 45, 50 e 55 Hz) e deslocamentos de vibração pico-a-pico (3,5; 5,0; 6,5 mm). Os fatores amplitude e frequência de vibração influenciaram na eficiência de derriça. Para as frequências e amplitudes analisadas, verificou-se uma maior tendência na derriça dos frutos cereja. Além disso, o estágio de maturação influenciou na eficiência de derriça apenas no final da safra, apontando influência do período da safra na seletividade da colheita.

A colheita eficiente exige a utilização de uma combinação adequada dos parâmetros frequência, amplitude e tempo de vibração. Assim, análises de eficiência de derriça dos frutos do cafeeiro em função dos parâmetros vibracionais e de outros fatores vêm sendo estudada por diversos autores (CIRO, 2001; SANTOS et al., 2010a, 2010b; GUEDES, 2011). Porém, não se têm encontrado registros de pesquisas sobre os efeitos do tempo de vibração na eficiência de derriça para a colheita de café por vibrações mecânicas a partir de ensaios mecânicos controlados em laboratório.

Diante do exposto, objetivou-se neste trabalho, avaliar a eficiência de derriça dos frutos do cafeeiro, da variedade Catuaí Vermelho, em função dos parâmetros estágio de maturação, frequência, amplitude e tempo de vibração.

2. Material e métodos

A pesquisa foi realizada utilizando-se amostras de café arábica, variedade Catuaí Vermelho, coletados em uma Área Experimental localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa – MG, no período maio/2013 a julho/2013. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Projetos de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Os ramos foram coletados aleatoriamente entre as plantas pela manhã e ensaiados durante o mesmo dia. As amostras foram preparadas

escolhendo os cachos que continham todos os frutos nos estádios de maturação verde ou cereja.

Para avaliação do processo de colheita por vibrações mecânicas, os frutos de café foram submetidos à diferentes combinações de frequências e amplitudes. Para tal, utilizou-se um sistema produzido pela LDS (Ling Dynamic Systems) composto por um gerador de sinais COMET USB da marca Dactron, um amplificador LDS PA100E-CE e uma máquina vibradora eletromagnética modelo V-406 (Figura 1).

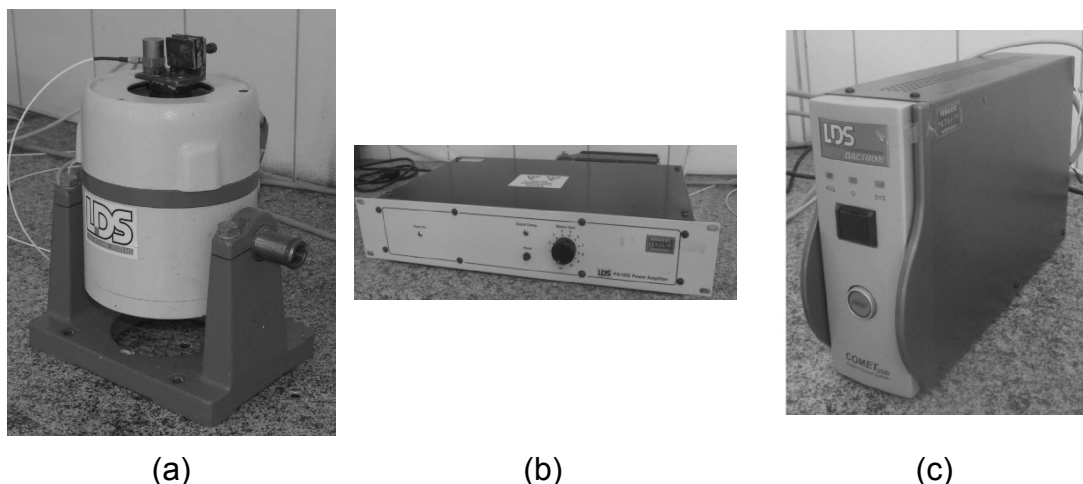


Figura 34: Sistema utilizado no experimento para excitação das amostras, composto por máquina vibradora eletromagnética (a), amplificador de sinal (b) e gerador de sinal (c).

O gerador de sinal, controlado por computador por meio de um software específico do fabricante, permitiu a obtenção de sinais de vibração da forma impulso, aleatória e senoidal. Os sinais elétricos de vibração gerados foram enviados para o amplificador, podendo ser amplificado em até dez vezes. Na máquina vibradora, os sinais elétricos já amplificados foram convertidos em deslocamentos de sua base móvel, por meio de eletroímãs (Tabela 1).

Tabela 23: Características técnicas da máquina vibradora eletromagnética

Faixa dinâmica de trabalho (Hz)	5-9000
Carga máxima (N)	198
Deslocamento máximo pico-a-pico máximo (mm)	17,6
Aceleração máxima (g)	100

O controle do sistema foi realizado por meio de um transdutor piezoelétrico de aceleração (acelerômetro), fabricado pela empresa PCB, com faixa de trabalho de 10 a 4000 Hz. Os sinais deste transdutor permitiram ao gerador de sinal o controle preciso das frequências e amplitudes de vibração impostas à base móvel da máquina vibradora.

As amostras foram presas ao sistema de fixação por meio do ramo com comprimento 50 mm. O sistema de fixação, por sua vez, foi acoplado à base móvel da máquina vibradora eletromagnética (Figura 2). O sistema de fixação também foi utilizado para acoplamento do transdutor piezoelétrico de aceleração.



Figura 35: Sistema de fixação das amostras e suporte do transdutor piezoelétrico.

Os ensaios foram realizados submetendo as amostras às excitações sob a forma de função senoidal, adotando o sentido de vibração longitudinal. Os fatores avaliados foram os estádios de maturação, as frequências, os deslocamentos pico-a-pico e os tempos de vibração (Tabela 2).

Tabela 24: Níveis dos fatores avaliados no ensaio de derrça dos frutos do cafeeiro

Fatores	Níveis
Estádio de Maturação	Verde; Cereja
Frequências (Hz)	16,4; 20,3; 24; 25,6; 30,0; 33,0
Deslocamentos pico-a-pico (mm)	5,0; 7,0; 9,0
Tempo (s)	10,0; 20,0

O tempo de vibração de 10,0 s foi adotado por corresponder ao tempo que uma planta adulta fica exposta à excitação, quando a colhedora opera a uma velocidade de 0,10 m.s⁻¹, velocidade mínima adotada em colhedoras acopladas ao trator (OLIVEIRA et al., 2007b). Já o tempo de 20,0 s, corresponde a uma velocidade de colheita de 0,05 m.s⁻¹.

As quantidades de frutos presentes nos cachos foram determinadas antes e após os ensaios para cálculo da eficiência de derrça a partir da Equação (1).

$$Ef = 100 \cdot \left(\frac{n_i - n_f}{n_i} \right) \quad (1)$$

em que,

Ef = eficiência de derrça, %;

n_i = número inicial de frutos no cacho;

n_f = número final de frutos no cacho.

A eficiência de derrça foi avaliada a partir de um experimento segundo delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 6 x 3 x 2 (estádios de maturação x frequências x deslocamento pico-a-pico x tempos), com três repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância para o estudo da influência dos fatores avaliados sobre a eficiência de derrça, As médias dos fatores qualitativos foram comparadas por meio do teste Tukey a 5 % de significância. Enquanto os fatores quantitativos foram submetidos à análise de regressão, sendo os modelos escolhidos com

base no coeficiente de determinação, na significância dos coeficientes e na falta de ajustamento dos modelos.

As análises foram realizadas por meio do programa computacional estatístico R (R CORE TEAM, 2013), versão 2.15. Os desdobramentos de interações significativas foram realizados usando a função *fat2.dic*, contida no pacote *ExpDes.pt* (FERREIRA et al., 2013). A análise de regressão foi realizada empregando-se o método de superfície de resposta a partir do pacote *rsm* (LENTH, 2009).

3. Resultados e discussão

Na análise de variância do experimento para avaliação de eficiência de derrça (Tabela 3), as interações triplas e a quádrupla foram incluídas no resíduo, devido à dificuldade de análise e explicação do comportamento físico do sistema a partir dos resultados.

Tabela 25: Resultado para análise de variância do experimento para avaliação de derrça do cafeeiro

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Tempo (T)	1	93,69	93,69	0,90 ^{ns}	0,343
Freq. (F)	5	3988,80	797,76	7,68*	<0,001
Desloc. (D)	2	6210,26	3105,13	29,91*	<0,001
Maturação (M)	1	2164,10	2164,10	20,85*	<0,001
T x F	5	431,90	86,38	0,83 ^{ns}	0,528
T x D	2	69,48	34,74	0,33 ^{ns}	0,716
T x M	1	140,68	140,68	1,35 ^{ns}	0,246
F x D	10	4242,6	424,26	4,09*	<0,001
F x M	5	918,95	183,79	1,77 ^{ns}	0,121
D x M	2	2032,44	1016,22	9,79*	<0,001
Resíduo	181	18789,61	103,81		
Total	215				

* - significativo ao nível de 5% de probabilidade. ns – não-significativo.

Diferenças significativas foram observadas apenas nas interações entre os fatores frequência de vibração e deslocamento e entre deslocamento e estágio de maturação. A interação significativa entre frequência e deslocamento, também encontradas por SANTOS et al. (2010a, 2010b) e GUEDES (2011), reforça a importância da compreensão da influência destes fatores no processo de derriça por vibração mecânica. Por outro lado, a interação significativa entre a deslocamento e os estágios de maturação, indica a possibilidade de uma colheita seletiva, a partir da seleção adequada da amplitude de vibração, além da frequência (SANTOS, 2008).

As interações não significativas envolvendo o fator tempo mostram que não houve influência do tempo na eficiência de derriça. A análise da tendência dos valores médios de eficiência de derriça de 6,34 e 5,03 % para os tempos 10,0 e 20,0 s, respectivamente, o que caracteriza um comportamento de redução da eficiência de derriça na medida em que se aumenta o tempo de exposição à vibração.

Entretanto, OLIVEIRA et al. (2007b) obtiveram um aumento da eficiência de colheita na medida em que se aumentou o tempo de exposição da planta à vibração. Tal comportamento deve-se ao fato do aumento do tempo de vibração provocar um maior número de ciclos de deslocamentos no sistema fruto-pedúnculo, aumentando a probabilidade de desprendimento dos frutos. Por outro lado, um aumento no tempo de vibração reduz a capacidade operacional da colheita, além de aumentar os danos à estrutura da planta como desfolha e quebra de ramos (SOUZA et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2007b).

O comportamento verificado no presente trabalho pode estar relacionado com as frequências e deslocamentos pico-a-pico utilizadas no experimento, não adequadas para o desprendimento dos frutos, comprovado pela baixa eficiência de derriça obtida.

A avaliação da eficiência de derriça dos frutos em função do deslocamento e do estágio de maturação foi realizada desdobrando a interação do fator maturação dentro dos níveis do fator deslocamento (Tabela 4).

Tabela 26: Resultado para a análise de variância do desdobramento da interação do fator maturação dentro dos níveis do fator deslocamento

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
M/ D(5)	1	5,10	5,10	0,037 ^{ns}	0,847
M/ D(7)	1	238,49	238,49	1,746 ^{ns}	0,188
M/ D(9)	1	3952,94	3952,94	1,746 [*]	<0,001
Resíduo	210	28676,42	136,55		
Total	215				

* - significativo ao nível de 5% de probabilidade. ns – não-significativo. M-maturação. D–deslocamento (mm).

Para os deslocamentos pico-a-pico 5,0 e 7,0 mm, não foram encontradas diferenças significativas nas eficiências de derricha entre os estádios de maturação. Para o deslocamento pico-a-pico 9,0 mm, a eficiência de derricha foi superior para o estágio de maturação cereja (Tabela 5).

Tabela 27: Eficiência de derricha média (%) em função do estágio de maturação e do deslocamento

Estádio de Maturação	Deslocamento (mm)		
	5,0	7,0	9,0
Verde	1,04 A	0,69 A	5,83 A
Cereja	1,57 A	4,33 A	20,65B

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

Para os três deslocamentos analisados, observa-se uma tendência de maior eficiência de derricha dos frutos no estágio de maturação cereja. Este comportamento, também obtido por CIRO (2001), deve-se a uma menor rigidez do pedúnculo no estágio de maturação cereja. A redução da rigidez, por sua vez, está relacionada com a degradação das paredes celulares dos pedúnculos por atividade enzimática (RODIRGUES e ONO, 2011).

Vislumbrando a colheita seletiva dos frutos, além da frequência, a influência do deslocamento também deve ser melhor compreendida. Nos resultados para o desdobramento do fator deslocamento dentro dos níveis do fator maturação (Tabela 6), a interação entre os fatores foi significativa apenas para o estágio de maturação cereja, ou seja, a eficiência de derriça foi influenciada pelo deslocamento apenas para o estágio de maturação cereja.

Tabela 28: Resultado para a análise de variância do desdobramento da interação do fator deslocamento dentro dos níveis do fator maturação

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
D/M (C)	2	7650,09	3825,04	28,01*	<0,001
D/M (V)	2	592,61	296,30	2,17 ^{ns}	0,117
Resíduo	210	28676,42	136,55		
Total	215				

* - significativo ao nível de 5% de probabilidade. ns – não-significativo. M- Maturação. D – deslocamento (mm). V – verde. C – cereja

Um modelo para descrever a eficiência de derriça em função do deslocamento, para o estágio de maturação cereja, foi obtido por análise de regressão (Tabela 7). A escolha do modelo foi realizada com base na significância dos coeficientes da equação e do coeficiente de determinação.

Tabela 29: Resultado para a análise de regressão da eficiência de derriça em função do deslocamento, para o estágio de maturação cereja

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Regressão	1	6548,06	6548,06	47,95*	<0,001
Resíduo	210	28676,42	213,48		
Total	215				

* - significativo ao nível de 5% de probabilidade. ns – não-significativo.

A Equação (2) representa o modelo escolhido para descrever a eficiência de derriça em função da amplitude de vibração, para o estágio de maturação cereja.

$$E_{fc} = -24,53 + 4,77 \cdot D \quad (R^2=85,59\%) \quad (2)$$

em que,

E_{fc} = eficiência de derrça para o estádio de maturação cereja;

D = deslocamento pico-a-pico, em mm.

A partir da equação (2) pode-se estabelecer que, independente da frequência de vibração empregada nos ensaios, verificou-se um aumento na eficiência de derrça dos frutos cereja na medida em que se aumentou o deslocamento pico-a-pico.

Para o estádio de maturação verde, as eficiências de derrça para os três deslocamentos foram estatisticamente iguais, pelo teste F ao nível de 5% de significância. Porém, analisando a tendência dos valores de eficiência de derrça médios, constata-se um aumento na medida em que eleva o deslocamento de 5 para 9 mm, para as frequências empregadas. Para ambos o estádios de maturação, o comportamento deve-se aos maiores deslocamentos impostos ao sistema fruto-pedúnculo, fornecendo energia suficiente para o rompimento dos pedúnculos.

A interação significativa entre frequência e deslocamento foi analisada por meio de regressão, empregando-se o método de superfície de resposta (Tabela 8). Os termos lineares, os termos cruzados e os termos quadráticos para a frequência e o deslocamento foram significativos, ao nível de significância de 5% pelo teste F.

Tabela 30: Resultado para a análise de regressão para a eficiência de derrça dos frutos em função do deslocamento e frequência de vibração

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
F, D	2	8899,14	4449,57	36,02 [*]	<0,001
F*D	1	3028,31	3028,31	24,51 [*]	<0,001
F ² , D ²	2	1214,24	607,12	4,91 [*]	0,008
Falta Ajustamento	12	13299,60	108,30	0,87 ^{ns}	0,578
Erro Puro	198	24652,98	124,51		
Resíduo	210				

* - significativo ao nível de 5% de probabilidade. ns – não-significativo. D=Deslocamento, F=frequência.

A Equação (3) apresenta o modelo selecionado para descrever a eficiência de derrça em função do deslocamento e frequência de vibração. A contribuição dos termos quadráticos foi desprezível, e por isso não foram adicionados ao modelo.

$$Ef = 37,81 - 7,26 \cdot D - 2,13 \cdot F + 0,41 \cdot F \cdot D \quad (R^2 = 29,53) \quad (3)$$

em que,

Ef = eficiência de derrça, em %;

D = deslocamento pico-a-pico, em mm;

F = frequência de vibração, em Hz.

A eficiência de derrça aumentou na medida em que se aumentou a frequência de vibração e o deslocamento (Figura 3), concordando com os resultados obtidos em trabalhos semelhantes (CIRO, 2001; SOUZA, 2004; OLIVEIRA, 2009 SANTOS et al., 2010a, 2010b; GUEDES, 2011).

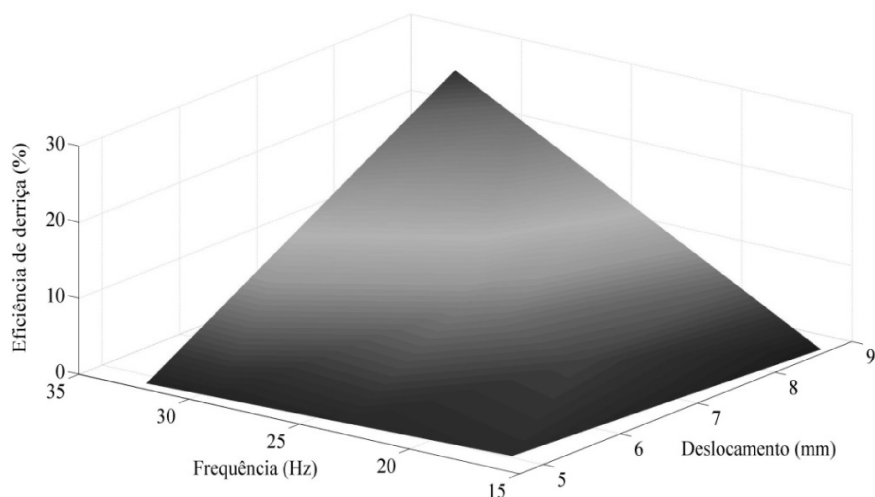


Figura 36: Superfície de resposta ajustada da eficiência de derrça em função do deslocamento e frequência de vibração, para frutos da variedade Catuaí Vermelho.

Nos cortes da superfície de resposta, constata-se que o aumento da eficiência de derrça em função do aumento da frequência de vibração tornou-se mais significativo na medida em que se elevou o deslocamento (Figura 4).

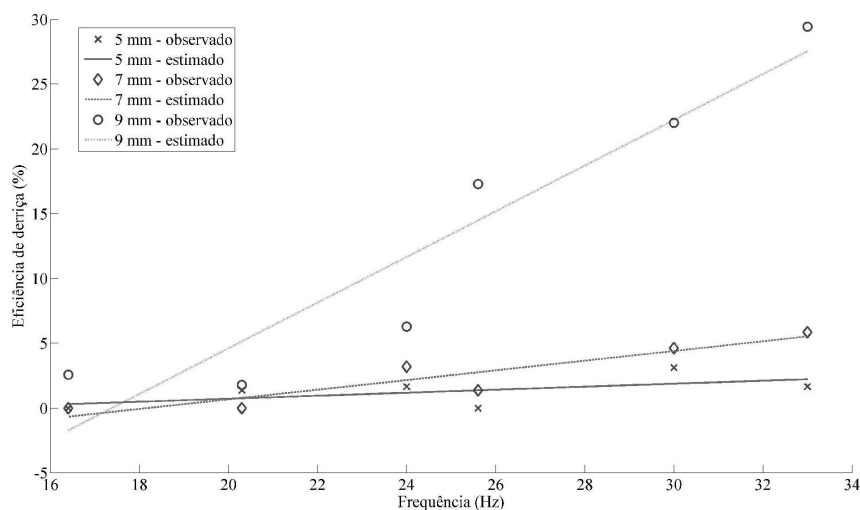


Figura 37: Eficiência de derrça em função da frequência de vibração, para cada deslocamento pico-a-pico avaliado.

As eficiências de derrça médias foram inferiores a 30 %, ou seja, a quantidade de energia vibracional e o tempo de exposição não foram suficientes para o desprendimento eficiente dos frutos. Assim, uma colheita em única passada utilizando tais frequências e deslocamentos torna-se

inviável. Por outro lado, SANTOS et al. (2010a) obtiveram eficiências de derriça médias de 65,25 %, para frequência 26,67 Hz, amplitude 7,50 mm e tempo de vibração de 15 s, enquanto GUEDES (2010) obteve eficiência de derriça médias inferiores a 50 % para frequência 55 Hz, amplitude 3,25 mm e tempo de vibração de 15 s.

Portanto, uma melhora na eficiência de derriça poderia ser obtida por meio do aumento da frequência de vibração, do deslocamento pico-a-pico ou ambos.

4. Conclusões

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

- Interações não significativas foram encontradas envolvendo o fator tempo de excitação, indicando que a eficiência de derriça é independente do tempo de vibração.
- Para dada deslocamento pico-a-pico, a eficiência de derriça dos frutos no estágio de maturação cereja foram maior que a dos frutos verdes.
- A eficiência de derriça aumentou na medida em que se aumentou a frequência de vibração e o deslocamento pico-a-pico, uma vez que maior energia vibracional foi fornecida ao fruto.
- As frequências e deslocamentos estudadas resultaram em eficiência de derriça médias baixas (inferiores a 30 %), indicando que tais parâmetros não foram adequados para uma derriça eficiente das amostras ensaiadas.

5. Referências bibliográficas

BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N.; SILVA, F. M. Desempenho operacional de derriçadoras mecânicas portáteis, em diferentes condições de lavouras cafeeiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 129-132, 2005.

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Café Safra 2013 Terceira Estimativa, Setembro/2013**. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t>>. Acesso em: 14 out. 2013.

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

FAGAN, E.B.; SOUZA, C.H.E.; PEREIRA, N.M.B.;MACHADO, V.J. Efeito do tempo de formação do grão de café (*Coffea sp*) na qualidade da bebida. **Bioscience Journal**, v.27, n.5, p.729-738, 2011.

FERREIRA, E. B., CAVALCANTI, P. P., NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Experimental Designs pacakge (Portuguese)**. R package version 1.1.2, 2013.

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. 52 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LENTH, R.V. Response-Surface Methods in R, Using rsm. **Journal of Statistical Software**, 32(7), 1-17. URL <http://www.jstatsoft.org/v32/i07/>, 2009.

MATEEV, L.M; KOSTADINOV, G.D. Probabilistic Model of Fruit Removal during Vibratory Morello Harvesting. **Biosystems Engineering**, v.87, n. 4, p. 425-435, 2004.

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; SOUZA, Z.M.; CHALFOU, S.M.; FIGUEIREDO, C.A.P. Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.6, p.827-831, 2007.

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; SOUZA, Z.M.; FIGUEIREDO, C.A.P. Influência da vibração das hastes e da velocidade de deslocamento da colhedora no processo de colheita mecanizada do café. **Revista Engenharia Agrícola**, v.27, n.3, p.714-721, 2007.

OLIVEIRA, M.V.M. **Desenvolvimento e avaliação de um dispositivo para derriza de café**. 2009. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

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

R Core Team (2013). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

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

SÁGIO, S.A. **Análise molecular e fisiológica do etileno durante o amadurecimento de frutos de café.** 2012.116p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG

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

SANTOS, F. L. **Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derrça.** 2008. 136 p. 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 derrça de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.425-431, 2010.

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

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

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

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

CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. Foi realizada a modelagem empregando o método de elementos finitos, por meio do programa computacional *Ansys Mechanical APDL*, versão 14.5.

Primeiramente, foram determinados experimentalmente as propriedades geométricas, físicas e mecânicas dos constituintes do sistema fruto-pedúnculo-ramo. Isto é, dimensões, massa, volume, massa específica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e razão de amortecimento de frutos, pedúnculos e ramos.

Para a determinação do módulo de elasticidade do pedúnculo e ramo foi desenvolvida uma metodologia, por meio da comparação entre a frequência natural do sistema fruto-pedúnculo e do ramo obtida experimentalmente e por método de elementos finitos.

A partir dos dados experimentais para as propriedades, foram simulados os cenários do sistema fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo ramo, com o intuito de determinar as frequências naturais e os respectivos modos de vibração. Para o sistema fruto-pedúnculo e o fruto-pedúnculo-ramo foram analisados os cenários com um, dois e três frutos solidários ao pedúnculo e os estádios de maturação verde e cereja.

Foi simulada também a excitação dos sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo quando submetido à vibração mecânica, com frequência correspondente à primeira frequência natural, amplitude 5 mm e tempo de 10 s. Em cada cenário foram determinadas as tensões de *von Mises* máximas.

Por último, foi realizado um ensaio de eficiência de derriça, em que ramos do cafeeiro com um cacho de frutos foram submetidos à vibrações mecânicas, em diferentes frequências, amplitudes e dois tempos de excitação. Sendo o número de frutos contabilizados antes e após o ensaio.

Com base nos resultados obtidos experimentalmente e por simulações empregando o método de elementos finitos, pode-se concluir que:

- Existiu uma tendência de aumento nas dimensões, na massa e no volume dos frutos na medida em que evoluiu o estágio de maturação. Enquanto que para a massa específica existiu tendência de redução na medida em que o fruto evoluiu seu estágio de maturação.
- Os módulos de elasticidade para as amostras de frutos tenderam a reduzir na medida em que evoluiu seu estágio de maturação. Maiores magnitudes de forças foram necessárias para desprendimento dos frutos verdes quando comparados aos frutos cerejas.
- Os valores obtidos para a razão de amortecimento dos pedúnculos e dos ramos foram menores que o unitário, caracterizando o sistema fruto-pedúnculo e ramo do cafeeiro como subamortecido.
- As frequências naturais experimentais para sistema fruto-pedúnculo no estágio de maturação verde foram superiores aos valores para o estágio cereja.
- Obteve-se valores médios 15,74; 23,90 e 4645,90 MPa para o módulo de elasticidade do pedúnculo nos estágios de maturação verde e cereja, e para o ramo, respectivamente.
- O módulo de elasticidade para o pedúnculo no estágio de maturação cereja foi superior ao valor para o estágio de maturação verde.
- A metodologia desenvolvida foi eficaz para a determinação do módulo de elasticidade do fruto e pedúnculo do cafeeiro.
- As frequências naturais dos sistemas fruto-pedúnculo e fruto-pedúnculo-ramo apresentaram comportamento de redução na

medida em que o estágio de maturação evoluiu do verde para o cereja;

- As frequências naturais dos sistemas reduziram na medida em que se aumentou o número de frutos, devido ao aumento de massa;
- No quarto e quinto modos de vibração, dos sistemas fruto-pedúnculo e fruto-pedúnculo-ramo, houve maiores deslocamentos dos pedúnculos;
- Até o quinto modo de vibração ocorreu sobreposição das faixas de frequências naturais referentes aos estádios de maturação verde e cereja, devido a variação das propriedades físicas e mecânicas do sistema, o que pode impossibilitar a colheita seletiva por vibrações mecânicas;
- Os sistemas fruto-pedúnculo, ramo e fruto-pedúnculo-ramo apresentaram elevação nas frequências naturais na medida em que aumentou o módulo de elasticidade ou reduziu a massa específica dos frutos, pedúnculos e ramos.
- As tensões de *von Mises* foram superiores para o estágio de maturação verde, devido à maiores de frequências de vibrações aplicadas nesta maturação, relativa à sua primeira frequência natural;
- As tensões de *von Mises* foram superiores nas regiões de engaste do pedúnculo ao ramo e no engaste do ramo ao tronco, devido aos maiores momentos fletores nestas regiões;
- As tensões de *von Mises* foram superiores nos sistemas fruto-pedúnculo com três frutos, devido à maior influência do aumento de massa do sistema.

- As tensões de *von Mises* foram menores no sistema fruto-pedúnculo-ramo com três frutos, devido à maior influência da redução da frequência de excitação.
- Interações não significativas foram encontradas envolvendo o fator tempo de excitação, indicando que a eficiência de derriça é independente do tempo de vibração.
- Para dado deslocamento pico-a-pico, a eficiência de derriça dos frutos no estágio de maturação cereja foi maior que a dos frutos verdes.
- A eficiência de derriça aumentou na medida em que se aumentou a frequência de vibração e o deslocamento pico-a-pico, uma vez que maior energia vibracional foi fornecida ao fruto.
- As frequências e deslocamentos estudadas resultaram em eficiência de derriça médias baixas (inferiores a 30 %), indicando que tais parâmetros não foram adequados para uma derriça eficiente das amostras ensaiadas.