

ELY QUEIROZ GOMES

**INFLUÊNCIA DO IMPACTO DAS HASTES RÍGIDAS NO PROCESSO DE  
COLHEITA DO CAFÉ POR VIBRAÇÕES**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2017

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

T

G633i  
2017  
Gomes, Ely Queiroz, 1989-  
Influência do impacto das hastes rígidas no processo de colheita  
do café por vibrações / Ely Queiroz Gomes. - Viçosa, MG, 2017.  
xi, 65f. : il. ; 29 cm.

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

1. Colhedoras de café - Eficiência. 2. Café - Colheita -  
Mecanização. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia  
Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 631.3

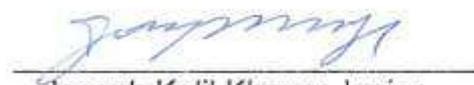
ELY QUEIROZ GOMES

INFLUÊNCIA DO IMPACTO DAS HASTES RÍGIDAS NO PROCESSO DE  
COLHEITA DO CAFÉ POR VIBRAÇÕES

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

APROVADA: 31 de julho de 2017.

  
Geice Paula Villibor

  
Joseph Kalil Khoury Junior

  
Fábio Lúcio Santos  
(Orientador)

*"É praticamente uma lei na vida. Quando uma porta se fecha para nós, outra se abre. A dificuldade está em que, frequentemente, ficamos olhando com tanto pesar a porta fechada, que não vemos aquela que se abriu."*

Andrew Carnegie

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e pelos objetivos conquistados.

Aos meus pais Ely Gomes Coura e Maria Helena de Queiroz Gomes e meu irmão Lucas pelo total apoio e incentivo.

Em especial, a minha namorada Lívia, pelo incentivo, apoio e compreensão durante essa jornada.

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

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.

Aos Professores Daniel Marçal de Queiroz, Domingos Sárvio Magalhães Valente e Moysés Nascimento pelas contribuições e sugestões neste trabalho.

Aos amigos do laboratório: Flávio, Marco, Diego (Bahia), Paulo (Paraná), Grégory, Juliana, Larissa, Remo, Jéssica, Cleonice (Dinha), Bruno, Gustavo, Mateus, Anderson (Catatau), Rubén (Espanhol), Rodrigo, Emanuel, Amélia, Marcelo, Lucas, Helizane (Nina), Raquel, Tiago, Tiago (Tião), André.

Aos meus Familiares, principalmente meu tio Zé pelas incontáveis caronas.

A TODOS que, de alguma forma, contribuíram para mais uma conquista em minha vida.

Muito Obrigado!

## BIOGRAFIA

ELY QUEIROZ GOMES, filho de Ely Gomes Coura e Maria Helena de Queiroz Gomes, nasceu em Viçosa, Minas Gerais, em 01 de Setembro de 1989.

Em Julho de 2008, iniciou o curso de Engenharia Agrícola, em Lavras Minas Gerais.

Em Janeiro de 2010 transferiu-se para o curso de Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Viçosa, concluído em dezembro de 2014.

Em Janeiro de 2015 trabalhou como Encarregado de Manutenção, permanecendo até Julho de 2015 nesta função.

Em Agosto de 2015 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 Julho de 2017, submeteu-se aos exames de defesa da dissertação, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	viii
RESUMO.....	x
ABSTRACT .....	xi
INTRODUÇÃO GERAL .....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	3
CAPÍTULO I: INFLUÊNCIA DO IMPACTO DE HASTES RÍGIDAS NA EFICIÊNCIA DE DERRIÇA DOS FRUTOS DE CAFÉ POR VIBRAÇÕES MECÂNICAS .....	5
Resumo .....	6
Abstract .....	7
1. INTRODUÇÃO .....	8
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
2.1. Projeto de sistema mecânico para realização do experimento de eficiência de derrida com impacto.....	11
2.2. Eficiência de derrida por vibrações mecânicas com e sem impacto direto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo .....	14
2.3. Análise de dados .....	17
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	18
4. CONCLUSÕES .....	43
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
CAPÍTULO II: TRANSMISSIBILIDADE DE SISTEMAS FRUTO-PEDÚNCULO- RAMO DO CAFEIRO SUBMETIDOS À VIBRAÇÃO INDUZIDA POR IMPACTO .....	47
Resumo .....	48
Abstract .....	49
1. INTRODUÇÃO .....	50
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	52
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	56
4. CONCLUSÃO .....	60
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
CONCLUSÕES GERAIS.....	64

## LISTA DE TABELAS

### **CAPITULO I: Influência do impacto das hastes rígidas na eficiência de derrça dos frutos de café por vibrações mecânicas**

Tabela 1: Esquema de arranjo dos tratamentos para a Rotina 1 .....	19
Tabela 2: Resultado teste de Kruskal-Wallis para a Rotina 1 .....	20
Tabela 3: Resultado do teste de Dunn para a Rotina 1 .....	20
Tabela 4: Resultado da análise de variância referente ao arranjo experimental com impacto direto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro .....	25
Tabela 5: Resultado da análise de regressão da eficiência de derrça em função da frequência .....	27
Tabela 6: Resultado da análise de regressão da eficiência de derrça em função da amplitude .....	29
Tabela 7: Resultado da análise de variância do desdobramento da interação do fator maturação dentro dos níveis do fator amplitude .....	29
Tabela 8: Eficiência de derrça média (%) em função do estágio de maturação e da amplitude de vibração .....	30
Tabela 9: Resultado da análise de variância do desdobramento da interação do fator amplitude dentro dos níveis do fator maturação .....	30
Tabela 10: Resultado da análise de regressão da eficiência de derrça em função da amplitude, para o estágio de maturação verde .....	31
Tabela 11: Resultado da análise de regressão da eficiência de derrça em função da amplitude, para o estágio de maturação verde .....	32
Tabela 12: Resultado da análise de variância do desdobramento da interação frequência dentro dos níveis do fator amplitude .....	33
Tabela 13: Resultado da análise de regressão da eficiência de derrça em função da frequência, para a amplitude de 3mm .....	34
Tabela 14: Resultado da análise de regressão da eficiência de derrça em função da frequência, para a amplitude de 4mm .....	35
Tabela 15: Resultado do teste de Kruskal-Wallis para a Rotina 3 .....	37
Tabela 16: Esquema de arranjo dos tratamentos .....	38
Tabela 17: Resultado do teste de Dunn para a Rotina 3 .....	38

Tabela 18: Resultado do teste de Kruskal-Wallis para a Rotina 4 .....	40
Tabela 19: Resultado do teste de Dunn para a Rotina 4 .....	41

## **CAPITULO II: Transmissibilidade de sistemas fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro submetidos à vibração induzida por impacto**

Tabela 1: Resultado da análise de variância da transmissibilidade em função da frequência e maturação .....	56
Tabela 2: Resultado da análise de regressão linear da transmissibilidade em função da frequência de vibração .....	59

## LISTA DE FIGURAS

### **CAPITULO I: Influência do impacto das hastes rígidas na eficiência de derrça dos frutos de café por vibrações mecânicas**

Figura 1: Da esquerda para direita: Gerador de sinais, fonte de alimentação, amplificador e vibrador eletromagnético.....	10
Figura 2: Bancada utilizada no experimento para o deslocamento do sistema fruto-pedúnculo-ramo em relação às hastes vibratórias.....	11
Figura 3: Aparato onde as amostras submetidas ao impacto de hastes rígidas foram engastadas.....	12
Figura 4: Cabeçote de montagem das hastes rígidas.....	13
Figura 5: Aparato experimental utilizado nos ensaios de eficiência de derrça por meio do impacto de hastes rígidas.....	14
Figura 6: Amostras de café (sistema fruto-pedúnculo-ramo) preparadas para o experimento.....	15
Figura 7: Amostra preparada para a realização do ensaio de eficiência de derrça sem impacto.....	16
Figura 8: Amostra preparada para a realização do ensaio de eficiência de derrça com impacto das hastes rígidas.....	17
Figura 9: Eficiência de derrça média dos tratamentos 16 e 18.....	21
Figura 10: Eficiência de derrça média dos tratamentos 14 e 23.....	22
Figura 11: Eficiência de derrça média em função da frequência de vibração (sem impacto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo).....	23
Figura 12: Eficiência de derrça média dos tratamentos 6 e 18.....	24
Figura 13: Eficiência de derrça média para os estádios maturação verde e cereja.....	26
Figura 14: Modelo linear para descrever a eficiência de derrça em função da frequência.....	27
Figura 15 Modelo linear para descrever a eficiência de derrça em função da amplitude.....	29
Figura 16: Modelo linear para descrever a eficiência de derrça em função da amplitude para frutos no estágio de maturação verde.....	31

Figura 17: Modelo linear para descrever a eficiência de derriça em função da amplitude para frutos no estágio de maturação cereja.....	32
Figura 18: Eficiência de derriça média, para o a amplitude de 2mm em função da frequência.....	34
Figura 19: Modelo linear para descrever a eficiência de derriça em função da frequência com uma amplitude de 3mm.....	35
Figura 20: Modelo linear para descrever a eficiência de derriça em função da frequência com uma amplitude de 4mm.....	36
Figura 21: Médias de eficiência de derriça obtidas comparando os respectivos tratamentos, (a): 9 e 21; (b):10 e 22; (c): 11 e 23; (d): 12 e 24.....	39
Figura 22: Eficiência de derriça média obtida pelo tratamento 12 e 24.....	41
Figura 23: Eficiência de derriça média obtida pelo tratamento 5 e 17.....	42

## **CAPITULO II: Transmissibilidade de sistemas fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro submetidos à vibração induzida por impacto**

Figura 1: Da esquerda para direita: Gerador de sinais, fonte de alimentação, amplificador e vibrador eletromagnético.....	52
Figura 2: Cabeçote de montagem das hastes rígidas.....	53
Figura 3: Amostras empregadas na realização dos ensaios de vibração.....	54
Figura 4: Sistema de fixação das amostras.....	54
Figura 5: Configuração experimental empregada para a realização do ensaio de vibração.....	55
Figura 6: Média dos valores de transmissibilidade em função da maturação...57	
Figura 7: Transmissibilidade média nas frequências de 20, 30 e 40 Hz.....	58
Figura 8: Modelo linear para a transmissibilidade em função da frequência.....	60

## RESUMO

GOMES, Ely Queiroz, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2017. **Influência do impacto das hastes rígidas no processo de colheita do café por vibrações**. Orientador: Fábio Lúcio Santos. Coorientadores: Daniel Marçal de Queiroz e Domingos Sárvio Magalhães Valente.

Atualmente a cafeicultura passa por um momento de transição acarretada pela dificuldade em conseguir mão de obra, o que vem tornando a colheita manual impraticável. A operação de colheita mecanizada assume um papel de destaque na sustentação da cadeia produtiva do café, dando fôlego aos cafeicultores em épocas de crise, por meio da redução dos custos operacionais. O desenvolvimento de máquinas de colheita eficientes exige conhecimento do comportamento dinâmico da planta, visando à maior eficiência de derriça e evitando quebra de ramos e queda de folhas. Objetivou-se neste trabalho analisar a influência do impacto das hastes de rígidas de colheita no comportamento dinâmico do processo de derriça do cafeeiro. O trabalho foi desenvolvido empregando amostras de café arábica, da variedade catuaí vermelho. O trabalho foi dividido em dois artigos. No primeiro capítulo foi avaliado a influência do impacto na eficiência de derriça dos frutos de café. Concluiu-se que a eficiência de derriça aumenta na medida em que o estágio de maturação progride do verde para o cereja. Observou-se também uma maior eficiência de derriça durante o aumento da frequência e da amplitude de vibração. A eficiência de derriça foi baixa quando a vibração foi transmitida sem o impacto das hastes. Já a vibração em associação com impacto chegou a obter médias de eficiência de derriça da ordem de 89%. No segundo capítulo foi determinada a transmissibilidade média de amostras de ramo de café contendo frutos na maturação verde e cereja. Concluiu-se que a frequência de 20 Hz foi a que apresentou maior transmissibilidade devido à frequência natural das amostras serem próximas a este valor. As amostras contendo frutos no estágio de maturação cereja também apresentaram maior transmissibilidade quando comparadas as contendo frutos no estágio de maturação verde.

## ABSTRACT

GOMES, Ely Queiroz, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2017. **Influence of the impact of rigid rods on the coffee harvesting process by mechanical vibrations.** Adviser: Fábio Lúcio Santos. Co-advisers: Daniel Marçal de Queiroz and Domingos Sárvio Magalhães Valente.

Nowadays coffee production is going through a transitional period due to the difficulty in obtaining labor, which has made manual harvesting impractical. The mechanized harvesting operation has a important role in sustaining the coffee production chain, giving coffee farmers a boost in times of crisis, by reducing operating costs. The development of efficient harvesting machines requires knowledge of the dynamic behavior of the plant, aiming at greater harvest efficiency and avoiding the breaking of branches and the fall of leaves. The objective of this scientific work was to analyze the influence of the impact of the rigid harvesting rods on the dynamic behavior of the coffee harvest process. The work was carried out using samples of Arabica coffee of the Catuaí vermelho variety. The work was divided into two chapters. In the first chapter the influence of impact on coffee fruit harvest efficiency was evaluated. It was concluded that the harvest efficiency increases as the maturation stage progresses from green to cherry. Greater harvest efficiency was also observed during increasing frequency and amplitude of vibration. The harvest efficiency was low when the vibration was transmitted without the impact of the rods. On the other hand, the vibration in association with impact reached 89% harvest efficiency in terms of efficiency. In the second chapter, the average transmissibility of samples of fruit coffee in green and cherry maturation was determined. It was concluded that the frequency of 20 Hz was the one with the highest transmissibility due to the natural frequency of the samples being close to this value. Samples containing fruits at the cherry maturation stage also showed higher transmissibility when compared to those containing fruits at the green maturation stage.

## INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil tem a cultura do café como uma das principais atividades agrícolas. A receita bruta total do café na safra 2017 foi estimada em R\$ 21,51 bilhões no limite inferior de produção e R\$ 23,42 bilhões no limite superior, sendo que o estado de Minas Gerais contribui com cerca de 58% deste valor (CONAB, 2017). Neste estado, a região da Zona da Mata Mineira, em adição à região Central e Rio Doce, tem uma produção de café estimada em 7.461,4 mil sacas para 2017. Os levantamentos de campo apontam para um aumento da produção de 22,7% quando comparada com a safra anterior (CONAB, 2017).

Segundo Souza et al. (2006), a colheita do café é dividida em seis operações: arruação, derriça, varrição, recolhimento, abanação e transporte. Independente do sistema de colheita utilizado, a derriça pode ser considerada uma operação complexa no tocante ao contingente de mão de obra e do tempo demandado para sua execução.

A mecanização do processo de colheita pode ser um importante fator para redução dos custos de produção do café, pois a redução dos custos é diretamente proporcional ao nível de mecanização empregado nas operações de colheita e processamento (Silva, 2001). De acordo com Barbosa et al. (2005), comparando o volume de café efetivamente colhido, um processo mecanizado utilizando derriçadoras portáteis apresenta um rendimento superior em 64%, comparado com trabalhadores realizando o mesmo trabalho manualmente.

A colheita mecanizada dos frutos do cafeeiro tem sido realizada por meio de vibrações mecânicas. Este processo resume-se na ação de hastes rígidas vibrando que impactam e induzem vibração aos frutos e ramos da planta. Desta forma, quando se utiliza energia vibracional para remover frutos, a associação de variáveis como frequência e amplitude de vibração são primordiais para um processo eficaz (Silva et al., 2006; Santos et al., 2010a; Santos et al., 2010b; Silva et al., 2013)

GUEDES (2011) afirma que para a otimização de projetos de máquinas destinadas a colheita do café é necessário o conhecimento prévio de detalhes relativos às propriedades mecânicas, geométricas e dinâmicas dos frutos e da planta. A realização de testes experimentais em laboratório utilizando máquinas

apropriadas para analisar o comportamento do sistema fruto-pedúnculo-ramo pode auxiliar o projeto de máquinas de colheita mais eficientes.

Castro-García et al. (2011) afirmam que plantas são estruturas dinâmicas que respondem à indução de vibrações com movimentação complexa. Sua resposta é condicionada por propriedades como frequências naturais, amortecimento e modos de vibração. Todos esses parâmetros interferem na transmissibilidade de vibração entre os dispositivos de derriça e o sistema fruto-pedúnculo-ramo do café reforçando a necessidade de estudá-los para as diferentes partes da planta de café e diferentes condições de vibração (VILIBOR, 2012).

Estudar diferentes parâmetros e variáveis de sistemas de colheita é uma maneira eficiente de adquirir conhecimento para otimizar o maquinário já existente, bem como estabelecer uma base de conhecimento para novos projetos. A análise e estudo da influência do impacto entre as hastes das colhedoras e o sistema fruto-pedúnculo-ramo do café é algo pouco estudado, mesmo sendo um parâmetro fundamental no projeto de máquinas derriçadoras.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar a influência do impacto das hastes rígidas na eficiência de derriça dos frutos de café. Para isto foi necessário determinar a eficiência de derriça média variando a frequência de vibração, amplitude e também a forma de indução da vibração, com e sem o impacto das hastes rígidas. Também objetivou-se determinar a transmissibilidade média dos sistemas fruto-pedúnculo-ramo sujeito a vibrações induzidas pelo impacto das hastes durante o processo colheita.

Este trabalho é composto por dois capítulos, além da introdução geral. No primeiro capítulo foram realizados ensaios de eficiência de derriça em amostras do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro, contendo frutos verde e cereja. As amostras foram submetidas a variáveis como frequências de 20, 30, 40 e 50 Hz; amplitudes de 2, 3 e 4 mm; e a forma de indução da vibração, com e sem o impacto de hastes rígidas. O objetivo foi avaliar a influência desses parâmetros no comportamento da eficiência de derriça dos frutos.

No segundo capítulo foram realizados ensaios para a determinação da transmissibilidade média de amostras do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro, contendo frutos nos estádios de maturação verde e cereja. As amostras foram submetidas à vibração induzida por meio do impacto de hastes

diretamente no ramo. As frequências utilizadas foram de 20, 30 e 40 Hz, com uma amplitude constante de 2 mm.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Café V.4 - Safra 2017 – N.1 - Primeiro levantamento, janeiro/2017**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 11 Julho. 2017.

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

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

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T. Analysis of 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.

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

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.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.

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

VILLIBOR, G. P. **Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de derriça do café**. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2012.

**CAPÍTULO I: INFLUÊNCIA DO IMPACTO DE HASTES RÍGIDAS NA  
EFICIÊNCIA DE DERRIÇA DOS FRUTOS DE CAFÉ POR VIBRAÇÕES  
MECÂNICAS**

## INFLUÊNCIA DO IMPACTO DE HASTES RÍGIDAS NA EFICIÊNCIA DE DERRIÇA DOS FRUTOS DE CAFÉ POR VIBRAÇÕES MECÂNICAS

### Resumo

A mecanização das atividades do campo vem sendo a saída encontrada pelos produtores de café para contornar a escassez de mão de obra, principalmente para a etapa de colheita dos frutos. O uso de máquinas para a colheita permite maior eficiência na operação e proporciona a viabilidade econômica das lavouras cafeeiras, que atualmente dependem, principalmente, da redução dos custos de produção. O princípio utilizado para realizar a colheita mecanizada do café tem como base vibrações mecânicas. Objetivou-se com este trabalho realizar o estudo do comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do café submetidos à vibrações mecânicas e sua associação com o impacto das hastes colhedoras no processo de desprendimento dos frutos. Foram utilizados neste experimento amostras de frações dos ramos de café contendo frutos no estágio de maturação verde e cereja. Estas amostras foram submetidas a diferentes frequências (20, 30, 40 e 50 Hz) e amplitudes (2, 3 e 4 mm). A forma de indução da vibração também foi uma variável, sendo transmitidas as amostras com ou sem o impacto das hastes de fibra de vidro. Concluiu-se que a eficiência de derriça aumenta na medida em que o estágio de maturação evolui de verde para cereja. Observou-se também uma maior eficiência de derriça durante o aumento da frequência e da amplitude de vibração devido a maior energia vibracional imposta ao fruto. A eficiência de derriça foi baixa quando a vibração foi transmitida sem o impacto das hastes. Já a vibração em associação com impacto chegou a obter médias de eficiência de derriça da ordem de 89%.

**Palavras-chave:** Colheita mecanizada, comportamento dinâmico, impacto.

## INFLUENCE OF THE IMPACT OF RIGID RODS ON COFFEE FRUIT HARVEST EFFICIENCY BY MECHANICAL VIBRATION

### Abstract

The mechanization of the activities of the agriculture has been the exit found by coffee producers to overcome the lack of labor, mainly in the harvesting stage. The use of harvesting machines allows a better efficiency in the operation and provides the economic viability of the coffee plantations, which currently depend mainly on the reduction of production costs. The principle used to carry out mechanized harvesting of coffee is based on mechanical vibrations. The objective was to study the dynamic behavior of the fruit-peduncle-branch system of coffee subjected to mechanical vibrations and its association with the impact of the harvester rigid rods on the fruit detachment process. Samples of fractions of the coffee branch containing fruits at the stage of green and cherry maturation were used in this experiment. These samples were submitted to different frequencies (20, 30, 40 and 50 Hz) and amplitudes (2, 3 and 4 mm). The way of vibration induction was also a variable, the samples being transmitted with or without the impact of the fiberglass rods. It was concluded that the harvest efficiency increases as the maturation stage evolves from green to cherry. It was also observed a greater harvest efficiency during the increase of the frequency and the amplitude of vibration due to the greater vibrational energy imposed to the fruit. The harvest efficiency was low when the vibration was transmitted without the impact of the rods. On the other hand, the vibration in association with impact reached 89% harvest efficiency in terms of efficiency.

**Key words:** Mechanized harvesting, dynamic behavior, impact.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o século XIX, a cultura do café está entre as atividades agrícolas com grande destaque na agricultura do Brasil. No ano de 2016, a área em produção destinada a cafeicultura foi de 1,95 milhões de hectares. Dentre os estados brasileiros, Minas Gerais é responsável por 51,75% da área total (CONAB, 2017). Neste estado, a região da Zona da Mata, em adição com as regiões central e Rio Doce, contribuem com expressivos 269,59 mil hectares, ou seja, 26% do montante mineiro (CONAB, 2017).

A cafeicultura passa por um momento de transição acarretada pela dificuldade em conseguir mão de obra, o que vem tornando a colheita manual impraticável. A mecanização das atividades do campo permite maior eficiência nas operações e proporciona a viabilidade econômica das lavouras cafeeiras que, neste cenário, dependem da redução dos custos de produção (Cunha et al., 2016).

O café, assim como outros produtos agrícolas, tem seu preço e sua aceitação de mercado diretamente associados à sua qualidade final. Nesse contexto, notam-se alguns incentivos à atuação no segmento de grãos de qualidade superior. Exemplos desses incentivos são o melhor acesso a mercados internacionais e o crescimento da demanda por produtos de maior qualidade (Pereira et al., 2010). A seletividade durante a colheita confere ao café uma qualidade superior e, conseqüentemente, um melhor preço. Contudo, a operação de derriça torna-se mais onerosa (Ciro, 2001; Santos et al., 2010a).

Quando realizada manualmente, a colheita do café pode representar até 60% do custo de uma saca, valores atribuídos, principalmente, à elevada demanda de mão de obra (Oliveira et al., 2007). As operações de cultivo e colheita mecanizadas assumem um papel de destaque na sustentação da cadeia produtiva do café, conferindo fôlego aos cafeicultores em épocas de crise, por meio da redução dos custos operacionais (Silva et al., 2010). Santinato et al. (2014) afirmam que a execução da colheita mecanizada com o máximo de eficiência reduz os custos operacionais e minimiza a necessidade de repasse manual.

O princípio utilizado para realizar a colheita mecanizada do café tem como base vibrações mecânicas. Pode-se definir vibrações mecânicas, ou oscilações, como qualquer movimento que se repete após um intervalo de tempo (Rao, 2011). No mercado, encontram-se desde máquinas colhedoras autopropelidas que realizam todas as etapas do processo de colheita, até pequenas máquinas portáteis que são empregadas em processos semimecanizados de colheita, sempre utilizando o princípio de vibrações mecânicas para realizar a derriça do fruto.

Visando uma colheita eficiente deve-se proceder à correta regulagem da vibração das hastes e da velocidade de trabalho da máquina de acordo com a variedade da planta, porte, enfolhamento, produtividade, estágio de maturação dos frutos, clima e declividade (Santinato et al., 2014).

O processo de colheita por vibrações mecânicas resume-se na ação de hastes que induzem vibração aos frutos e ramos da planta por meio do impacto. Desta forma, quando se utiliza energia vibracional para remover frutos, a associação de variáveis como frequência e amplitude de vibração são primordiais para um processo eficaz (Sessiz e Özcan, 2006; Santos et al. 2010a; Santos et al. 2010b). Ao submeter a planta de café a vibração forçada, a resposta desse sistema torna-se complexa devido as propriedades geométricas e mecânicas. Logo, fatores como frequência, e amplitude de vibração e estágio maturação, são importantes e necessários para a compreensão do comportamento do sistema (Santos et al., 2010b).

Objetivou-se com este trabalho realizar o estudo do comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do café submetidos à vibrações mecânicas e sua associação com o impacto das hastes colhedoras no processo de desprendimento dos frutos. Tais resultados contribuirão no âmbito de projeto de máquinas destinadas à colheita mecanizada.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Projetos de Máquinas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas amostras de café arábica, coletadas no período de safra na região de Viçosa, entre março e maio do ano de 2017. Foi estudada a variedade Catuaí Vermelho, nos estádios de maturação verde e cereja.

Para a realização deste experimento os frutos de café foram submetidos à diferentes combinações de frequências e amplitudes. Para isso foi utilizado um sistema de vibração da fabricante *Ling Dynamic Systems* (LDS), alimentado por um amplificador modelo PA 1000 L, uma fonte de campo FPS 10L, um vibrador eletromagnético modelo V 555M6-CE e um controlador Dactron modelo Comet USB (Figura 1).



Figura 1: Da esquerda para direita: Gerador de sinais, fonte de alimentação, amplificador e vibrador eletromagnético.

O gerador de sinais recebe os comandos diretamente de um computador por meio de software específico do fabricante. Os sinais elétricos de vibração gerados são enviados para o amplificador, onde são amplificados para alimentar a máquina vibradora. Na máquina vibradora, os sinais elétricos provenientes do amplificador são convertidos em deslocamentos de sua base móvel.

O controle do sistema foi realizado por um acelerômetro (transdutor piezoelétrico de aceleração), do fabricante PCB, com faixa de trabalho de 10 a

4000 Hz. A resposta desse acelerômetro permite o controle preciso das frequências e amplitudes de vibração, conforme estabelecido no software.

Foi utilizado também uma bancada da FESTO composta por uma estante de fixação de acessórios, um cilindro hidráulico, uma unidade hidráulica (bomba, reservatório, filtro, manômetros e conexões de engate rápido), válvulas de controle de vazão e uma válvula direcional 4/3 vias. Tal equipamento foi utilizado para promover o deslocamento das amostras, essencial para manter a velocidade constante de deslocamento do sistema fruto-pedúnculo-ramo em relação às hastes vibratórias, garantindo uniformidade em cada repetição.



Figura 2: Bancada utilizada no experimento para o deslocamento do sistema fruto-pedúnculo-ramo em relação às hastes vibratórias.

### **2.1. Projeto de sistema mecânico para realização do experimento de eficiência de derriça com impacto.**

Foi necessário projetar e construir uma estrutura que permitiu a realização do experimento no qual a vibração foi transmitida aos frutos por meio do impacto de hastes rígidas. O processo de criação e modelagem sólida do protótipo foi realizado em software CAD 3D.

Visando projetar um sistema que mais se aproximasse à dinâmica de colheita dos maquinários já existentes no mercado, as hastes vibratórias deveriam percorrer as amostras do ramo de café por toda sua extensão. As máquinas derriçadoras atuam desta maneira nas plantas de café, sua dinâmica de colheita ocorre com a vibração sendo transmitida aos ramos e frutos da planta, ocorrendo assim a derriça.

Definiu-se que o ponto de engaste da amostra seria móvel permitindo assim a movimentação do ramo por entre as hastes vibrando. Para atender esse requisito, foi construído um trilho no qual uma base móvel poderia se deslocar, de forma que essa movimentação ocorresse em apenas uma direção (Figura 3).

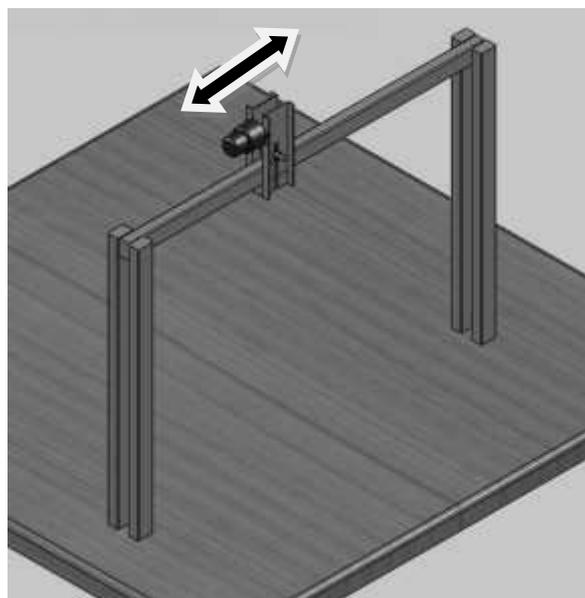


Figura 3: Aparato onde as amostras submetidas ao impacto de hastes rígidas foram engastadas.

Devido às amostras não apresentarem homogeneidade em relação ao diâmetro do ramo e arranjo dos frutos, as hastes também deveriam permitir a regulagem de sua abertura por onde os ramos se deslocariam. Essa regulagem foi importante para evitar o arranquio dos frutos durante a movimentação da

amostra. Dessa forma, foi possível garantir que o fenômeno de derriça dos frutos de café ocorresse somente pelo efeito da vibração induzida pelas hastes. Na Figura 4 é apresentado o cabeçote de fixação e o sistema de posicionamento das hastes desenvolvido.

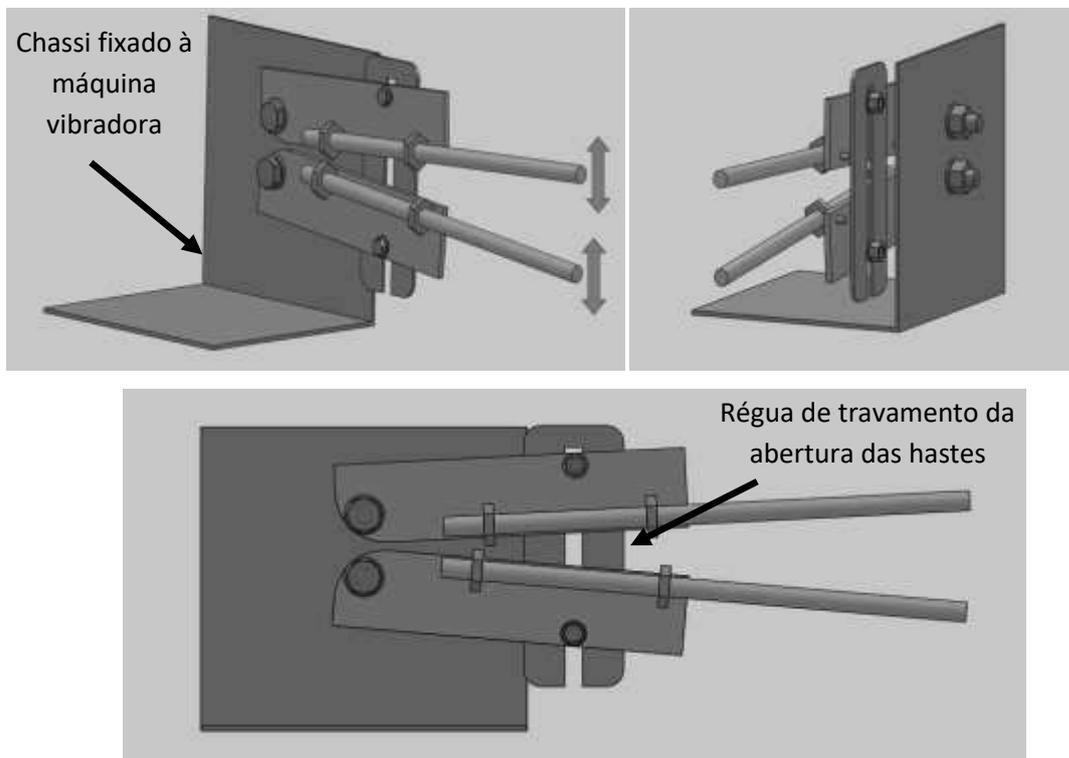


Figura 4: Cabeçote de montagem das hastes rígidas.

No arranjo em questão, optou-se por realizar a translação dos ramos em relação às hastes vibratórias, permitindo que o impacto das hastes ocorresse ao longo de todo o ramo. Para realizar o deslocamento das amostras entre as hastes vibratórias foi utilizado um atuador hidráulico conectado a base móvel por meio de uma barra metálica. O uso de válvulas controladoras de vazão permitiu regular a velocidade de deslocamento de forma precisa, garantindo a reprodução das condições configuradas em todos os ensaios realizados durante experimento.

Na Figura 5 é apresentado o sistema empregado para realização da translação das amostras em relação às hastes vibratórias durante os ensaios de eficiência de derriça por impacto.

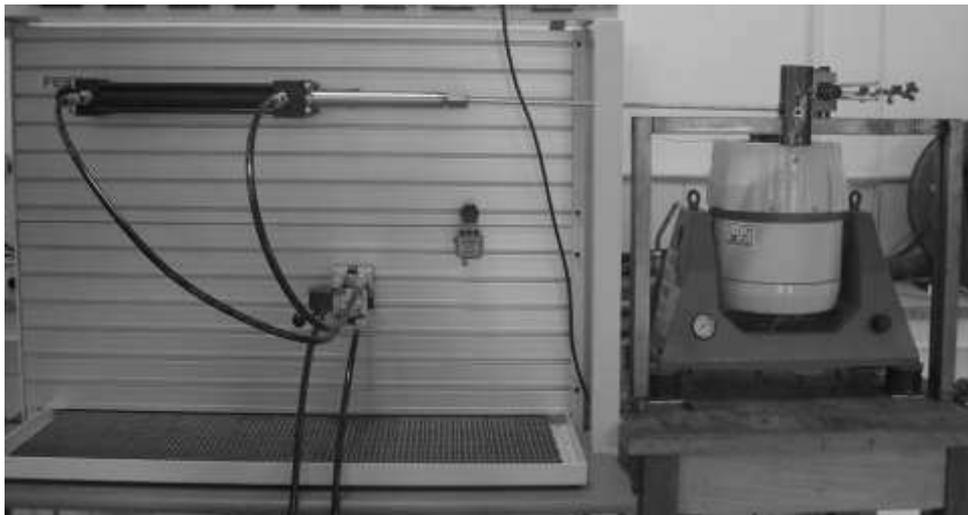


Figura 5: Aparato experimental utilizado nos ensaios de eficiência de derrça por meio do impacto de hastes ríidas.

## 2.2. Eficiência de derrça por vibraões mecânicas com e sem impacto direto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo

A eficiência de derrça foi determinada considerando-se a razão entre o número de frutos derrçados e o número inicial de frutos presente no ramo. Tal relação é apresentada na Equação 1.

$$\eta = 100 \left( \frac{n_d}{n_i} \right) \quad (1)$$

em que,

$\eta$  = eficiência de derrça, %;

$n_d$  = número de frutos derrçados;

$n_i$  = número inicial de frutos na amostra;

Os ramos de café coletados no campo foram levados para o laboratório e preparados com o objetivo de se obter amostras (sistema fruto-pedúnculo-ramo) com comprimento de 150 mm. Na Figura 6 são apresentadas as amostras prontas para os ensaios de vibração.



Figura 6: Amostras de café (sistema fruto-pedúnculo-ramo) preparadas para o experimento.

Antes da execução de cada ensaio, determinou-se o número de frutos presentes no ramo de café (amostra). Imediatamente após a realização do ensaio o número de frutos foi novamente quantificado, possibilitando assim determinar a eficiência de derrça (Equação 1).

Por meio de diferentes arranjos experimentais, avaliou-se a eficiência de derrça de frutos do cafeeiro por meio de vibrações mecânicas sem efeito do impacto e, vibrações mecânicas transmitidas pelo impacto de hastes rígidas. No arranjo em que a vibração foi transmitida às amostras sem impacto sobre o sistema fruto-pedúnculo-ramo, ou seja, o sinal foi transmitido a partir do ponto de engaste entre a amostra ensaiada e máquina vibradora, estabeleceu-se a duração dos ensaios de 20 segundos. Na Figura 7 é apresentado o aparato experimental para realização de ensaios nesse arranjo.

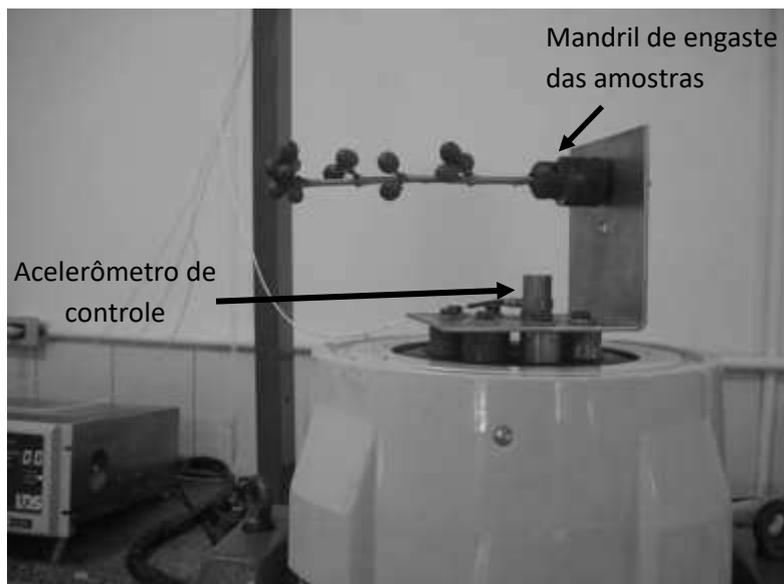


Figura 7: Amostra preparada para a realização do ensaio de eficiência de derricha dos frutos de café sem impacto.

Para o arranjo experimental em que a vibração foi transmitida ao sistema fruto-pedúnculo-ramo do café por meio do impacto (Figura 8) foi necessário controlar a velocidade de deslocamento das amostras em relação às hastes. Dessa forma, estabeleceu-se uma velocidade de translação do sistema fruto-pedúnculo-ramo igual a 7,5mm/s, a qual foi realizada e controlada pelo atuador hidráulico. Tal valor foi necessário para garantir que o deslocamento da amostra entre as hastes vibratórias ocorresse em um intervalo de tempo de 20 segundos, permitindo que o tempo de exposição à vibração nos dois arranjos experimentais fosse o mesmo.

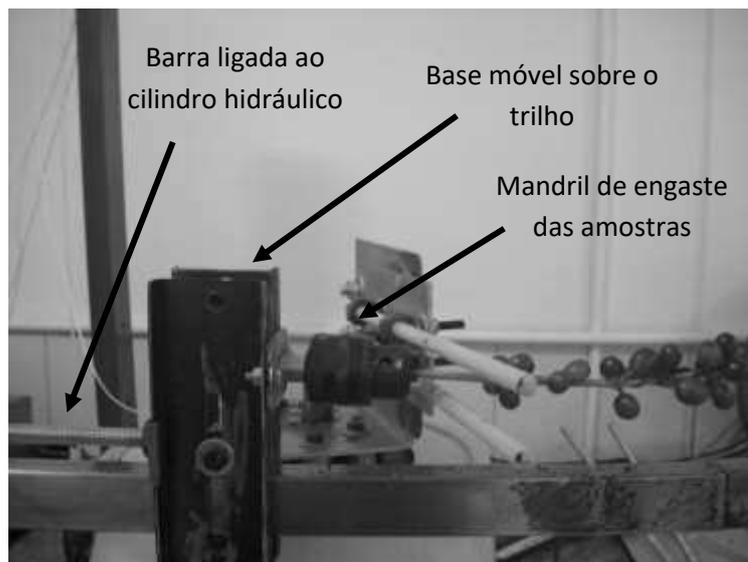


Figura 8: Amostra preparada para a realização do ensaio de eficiência de derrça com impacto das hastes rígidas.

Para os ensaios de eficiência de derrça foram considerados os seguintes fatores: dois estádios de maturação (verde e cereja); quatro frequências de vibração (20, 30, 40 e 50 Hz); três amplitudes de oscilação (2, 3 e 4 mm); e duas formas de transmissão de vibração para as amostras (vibrações mecânicas transmitidas sem impacto direto no sistema fruto-pedúnculo-ramo e vibrações transmitidas diretamente ao sistema fruto-pedúnculo-ramo pelo impacto de hastes rígidas).

### 2.3. Análise de dados

O trabalho envolveu a avaliação em quatro rotinas: vibrações transmitidas sem impacto direto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo de café (Rotina 1); vibrações transmitidas ao sistema fruto-pedúnculo-ramo pelo impacto (Rotina 2) e avaliação das diferentes formas de transmissão de vibrações (com e sem impacto) sob a eficiência de derrça dos frutos verde (Rotina 3) e frutos cereja (Rotina 4).

Para a Rotina 1, conduziu-se experimento segundo delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, em esquema fatorial 2 x 4 x 3, ou seja, dois estádios de maturação, quatro frequências, três amplitudes e transmissão de vibração sem impacto direto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo.

Na Rotina 2, também empregou-se delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, em esquema fatorial  $2 \times 4 \times 3$ , no qual foram considerados os seguintes fatores: dois estádios de maturação, quatro frequências, três amplitudes e forma de transmissão de vibração a partir do impacto de uma haste rígida sobre o sistema fruto-pedúnculo-ramo.

Para a Rotina 3, o experimento foi conduzido segundo delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, considerando-se os seguintes fatores: quatro frequências, três amplitudes e vibração com e sem impacto direto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo no estádio de maturação verde.

Por último, a Rotina 4 foi conduzida segundo delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, considerando-se os seguintes fatores: quatro frequências, três amplitudes e vibração com impacto e sem impacto direto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo no estádio de maturação cereja.

Nos dados referentes às rotinas, foi utilizada dados relativos à eficiência de derriça dos ensaios foram submetidos primeiramente ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk à 5% de probabilidade. Havendo normalidade nos dados foi realizado a análise de variância considerando um nível de significância de 5% de probabilidade. As médias referentes aos fatores qualitativos foram avaliadas por meio do teste de Tukey à 5% de probabilidade. As médias referentes aos fatores quantitativos foram avaliadas por meio de análise regressão em que os modelos foram selecionados segundo a significância dos coeficientes e pelo coeficiente de determinação.

No caso de não haver normalidade nos dados referentes às rotinas apresentadas foi utilizada uma estratégia de análise por meio de testes não paramétricos. Os dados foram analisados primeiramente pelo teste de Kruskal-Wallis seguido do teste de Dunn considerando-se 10% de probabilidade. Para aplicação dos testes não paramétricos foi necessário organizar os dados de forma que os fatores empregados na análise fossem organizados em tratamentos.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os dados referentes à Rotina 1 (vibrações transmitidas sem impacto direto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo de café) foram submetidos ao teste de

normalidade Shapiro-Wilk à 5% de probabilidade e não apresentaram distribuição normal. Na Tabela 1 são apresentados os tratamentos analisados a partir de testes não paramétricos, os quais foram constituídos pela combinação dos fatores considerados na análise.

Tabela 1: Esquema de arranjo dos tratamentos para a Rotina 1

Tratamento	Maturação	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)
1	Verde	20	2
2	Verde	20	3
3	Verde	20	4
4	Verde	30	2
5	Verde	30	3
6	Verde	30	4
7	Verde	40	2
8	Verde	40	3
9	Verde	40	4
10	Verde	50	2
11	Verde	50	3
12	Verde	50	4
13	Cereja	20	2
14	Cereja	20	3
15	Cereja	20	4
16	Cereja	30	2
17	Cereja	30	3
18	Cereja	30	4
19	Cereja	40	2
20	Cereja	40	3
21	Cereja	40	4
22	Cereja	50	2
23	Cereja	50	3
24	Cereja	50	4

Devido à não normalidade dos dados, na Tabela 2 é apresentado o resultado do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para a Rotina 1. Foi

encontrado significância à 5% de probabilidade na análise dos dados, indicando que ao menos uma combinação de tratamento apresenta médias diferentes entre si.

Tabela 2: Resultado teste de Kruskal-Wallis para a Rotina 1

Teste de Kruskal-Wallis	
C.Q.	48,36
G.L.	23
P-Valor	0,00*

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Após o teste de Kruskal-Wallis foi aplicado o teste de Dunn para determinar quais combinações de tratamentos possuem médias diferentes à 10% de probabilidade. Na Tabela 3 são apresentados alguns resultados do teste de Dunn que foram significativos e devem ser discutidos.

Tabela 3: Resultado do teste de Dunn para a Rotina 1

Tratamentos	Z	P-Valor	P-Valor Ajustado
16 vs 18	-3,03	0,00	0,03*
19 vs 21	-2,85	0,00	0,03*
20 vs 21	-2,85	0,00	0,03*
14 vs 23	-3,16	0,00	0,04*
18 vs 6	3,03	0,00	0,04*

\* - significativo ao nível de 10% de probabilidade.

O tratamento 16 corresponde a uma amostra com frutos cerejas submetidos a uma frequência de 30 Hz e amplitude de 2 mm. Com essa configuração, obteve-se média de eficiência de derriça de 0%, ou seja, não houve derriça dos frutos. Já o tratamento 18 que corresponde a uma amostra com frutos cerejas submetidos a uma frequência de 30 Hz e amplitude de 4 mm, alcançou uma eficiência de derriça média de 13,51%. Percebe-se então a significância do fator amplitude em relação à eficiência de derriça, pois é a única variável entre os dois tratamentos cujo nível foi alterado, o que reforça a importância da amplitude de vibração no processo de derriça dos frutos de café

por vibrações mecânicas. Na Figura 9 são apresentadas as médias de eficiência de derricha dos tratamentos analisados.

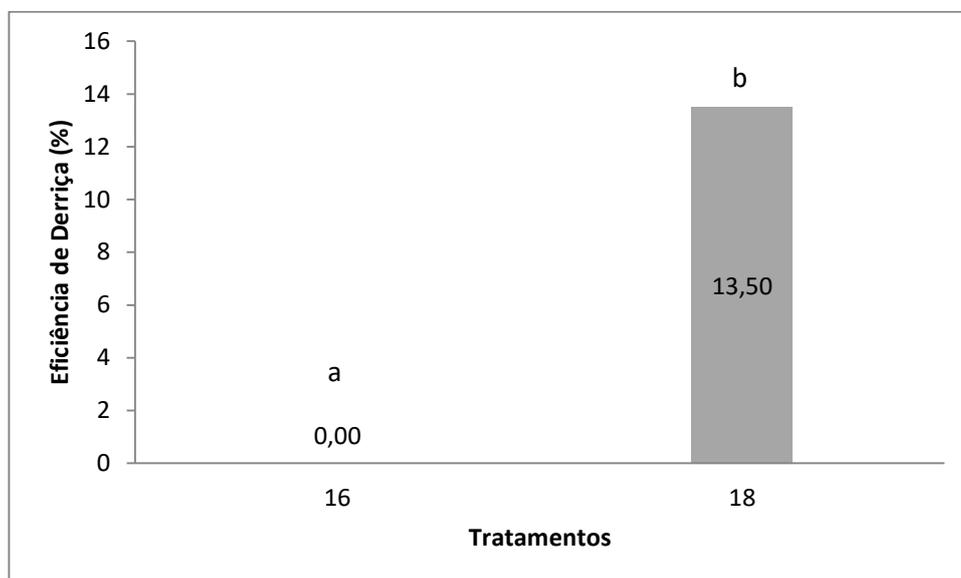


Figura 9: Eficiência de derricha média dos tratamentos 16 e 18.

Coelho et al. (2015), Santos et al. (2010b) e Santos et al. (2010a) também verificaram que o fator amplitude de vibração apresentou efeito significativo sobre a eficiência de derricha. Apesar dos níveis de amplitude serem similares ao empregado neste trabalho, as amostras utilizadas envolviam apenas uma roseta de café com poucos frutos e comprimento de ramo pequeno. Ao se adotar amostras contendo mais frutos de café e comprimento de ramos maiores, as condições observadas no processo de colheita no campo foram aproximadas. Contudo, aumenta-se a exigência em termos de aparatos e equipamentos para a realização do experimento.

O aumento da amplitude imposta à um sistema vibrando a uma frequência fixa implica em, conseqüentemente, um aumento nas acelerações as quais esse sistema experimenta. Maiores acelerações por sua vez aumentam a energia imposta a amostra, garantindo assim um maior desprendimento dos frutos de café.

A comparação entre o tratamento 19 e o tratamento 21 também apresentou diferença significativa à 10% e novamente pode-se atribuir esse resultado à influência do fator amplitude. O tratamento 19 apresentou eficiência

de derriça de 0% enquanto o tratamento 21 apresentou eficiência de 12,18%. Comportamento similar foi observado entre os tratamentos 20 e 21.

O tratamento 14 é composto por amostras com frutos cereja, submetidos a uma frequência de 20 Hz e uma amplitude de 3 mm, configuração que não foi suficiente para promover o desprendimento de frutos. Enquanto o tratamento 23 foi composto por amostras com frutos cereja, submetidos a uma frequência de 50 Hz, amplitude de 3 mm e obteve eficiência de derriça de 12,18%. Sendo a frequência a única variável entre esses dois tratamentos, pode-se atribuir a este fator a diferença significativa a 10% de probabilidade. Na Figura 10 é ilustrada a diferença observada entre as médias obtidas.

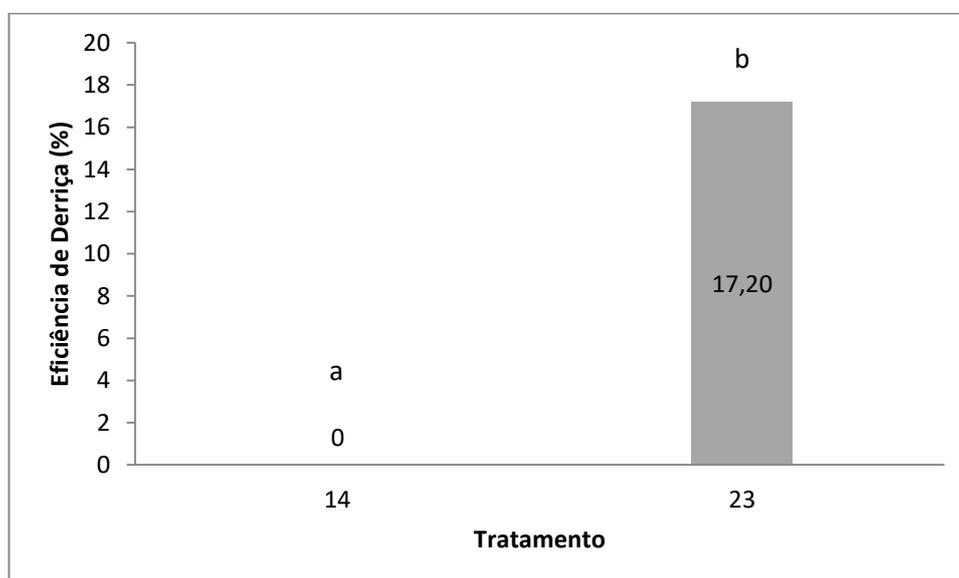


Figura 10: Eficiência de derriça média dos tratamentos 14 e 23.

Ao estudar a eficiência de derriça do café, Santos et al. (2010a) encontraram a frequência de vibração como um fator significativo em seu trabalho. Entretanto, os níveis de frequência avaliados pelos autores foram diferentes dos níveis empregados nesse trabalho, correspondendo a 16,67; 20,00; 23,33 e 26,67Hz, sendo que a maior eficiência de derriça ocorreu para o valor mais alto. Este valor é próximo a frequência de ressonância encontrada por Santos et al. (2015). A faixa de frequência avaliada nesse trabalho foi de 20 a 50 Hz, níveis considerados altos para a derriça dos frutos do cafeeiro e ainda pouco estudados.

Silva et al. (2015) avaliaram o desempenho operacional da colheita mecanizada dos frutos de cafeeiros com uma colhedora KTR® Advance considerando a variação da frequência de vibração das varetas. De acordo com os autores, não foram observadas diferenças significativas para o fator frequência, contudo, houve uma tendência da eficiência de derriça média aumentar à medida que se aumenta a frequência de vibração. Tal comportamento também foi encontrado neste trabalho. Para as frequências de vibração de 20, 30, 40 e 50 Hz valores de eficiência de derriça média para cada estágio de maturação são apresentados na Figura 11.

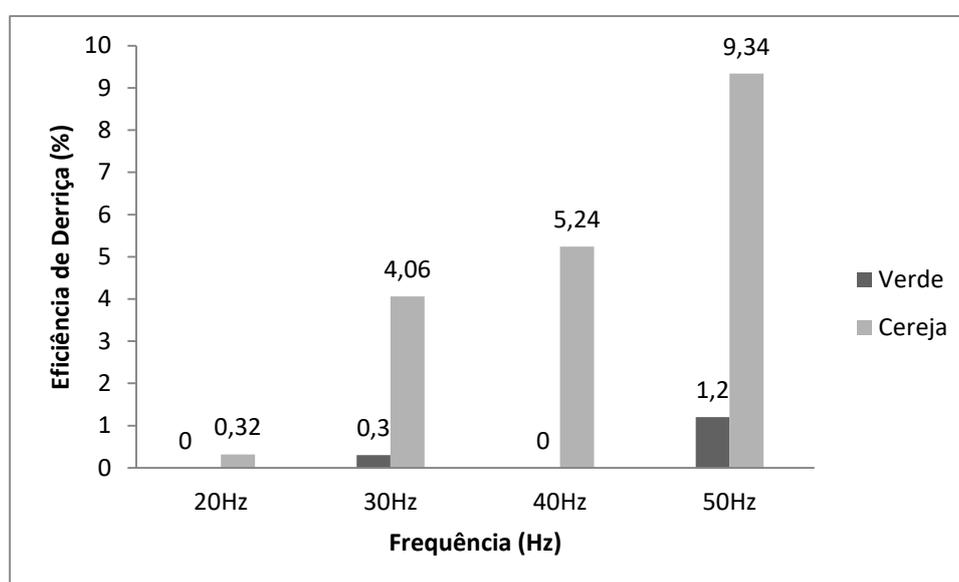


Figura 11: Eficiência de derriça média em função da frequência de vibração (sem impacto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo).

Ainda em relação à análise da Rotina 1, tem-se a comparação entre as médias dos tratamentos 6 e 18. O tratamento 6 corresponde ao estágio de maturação verde, 30 Hz e amplitude de 4 mm, enquanto o tratamento 18 consiste em uma amostra no estágio de maturação cereja, com 30 Hz e amplitude de 4 mm. Os tratamentos 6 e 18 obtiveram 0 e 13,51% de eficiência de derriça média, respectivamente. Sendo a maturação o único fator com variação entre os tratamentos, pode-se atribuir a este fator as diferenças significativas observadas (Figura 12).

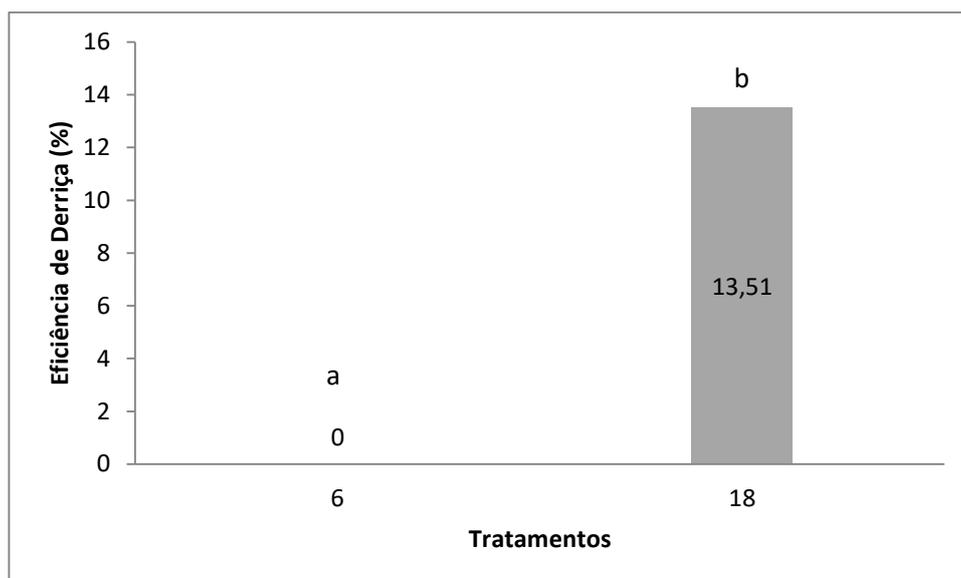


Figura 12: Eficiência de derrça média dos tratamentos 6 e 18.

Os resultados obtidos corroboram com a literatura (Santos et al., 2010a; Santos et al., 2010b; Coelho et al., 2015), os quais permitem inferir que para esta forma de transmissão da vibração, nas condições em que o experimento foi realizado, há possibilidade de se obter seletividade na colheita dos frutos de café. Foi observado que frutos no estágio de maturação cereja apresentaram maior eficiência de derrça. Coelho et al. (2015) afirmam que frutos neste estágio de maturação possuem menor rigidez em seus pedúnculos, característica essa que pode favorecer a colheita seletiva a partir da combinação adequada dos fatores frequência e amplitude de vibração.

Os baixos índices de eficiência de derrça obtidos na Rotina 1 podem ser relacionados com as frequências e amplitudes utilizadas no experimento, não adequadas para o desprendimento dos frutos nessa configuração. O uso de amostras com maiores comprimentos de ramo também contribuem para essa baixa eficiência, pois o amortecimento do ramo de café dissipa parte da energia vibracional entregue às amostras.

Para a Rotina 2 (vibrações transmitidas com impacto direto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo de café) os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk à 5% de probabilidade e apresentaram distribuição normal. Dessa forma, os dados dessa Rotina foram analisados por meio da análise de variância (ANAVA).

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da ANAVA para a Rotina 2. Verificou-se que os fatores maturação e frequência apresentaram diferenças significativas à 5% de probabilidade. Resultados similares foram encontrados na literatura (Santos et al., 2010a; Coelho et al., 2015). As interações duplas significativas envolveram os fatores maturação e amplitude; frequência e amplitude.

Tabela 4: Resultado da análise de variância referente ao arranjo experimental com impacto direto ao sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Maturação (A)	1	1921,04	1921,04	10,07*	0,00
Frequência (B)	3	19704,51	6568,17	34,43*	0,00
Amplitude (C)	2	16794,13	8397,06	44,02*	0,00
A x B	3	408,39	136,13	0,71	0,54
A x C	2	1855,06	927,53	4,86*	0,01
B x C	6	5059,62	843,27	4,42*	0,00
A x B x C	6	1155,74	192,62	1,01	0,43
Resíduo	48	9156,44	190,76		
Total	71	56054,94	789,51		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

O fator maturação foi significativo à 5% de probabilidade. Este resultado está de acordo com o encontrado na literatura (Santos et al., 2010a; Santos et al., 2010b; Coelho et al., 2015). De forma similar ao processo onde não há impacto direto aos frutos, pode-se sugerir que uma colheita seletiva seria algo tangível ao se usar o impacto das hastes para transmitir vibração aos frutos de café.

Silva et. al. (2015) avaliando o desempenho de uma colhedora *KTR* sob diferentes frequências de vibração das hastes obtiveram médias de eficiência de derriça baixas para os frutos na maturação verde, em torno de 6,77%, mesmo com as plantas de café apresentando 31% de frutos neste estágio de maturação. Tal resultado confirma a possibilidade de se obter colheita seletiva utilizando vibrações mecânicas na colheita do café.

Ao se analisar as médias de eficiência de derriça obtidas no arranjo experimental com impacto, verificou-se que os frutos no estágio de maturação cereja foram mais facilmente derriçados. A eficiência de derriça para o fruto cereja foi de 41,98%, enquanto que para os frutos verdes a eficiência média foi de 31,65% (Figura 13).

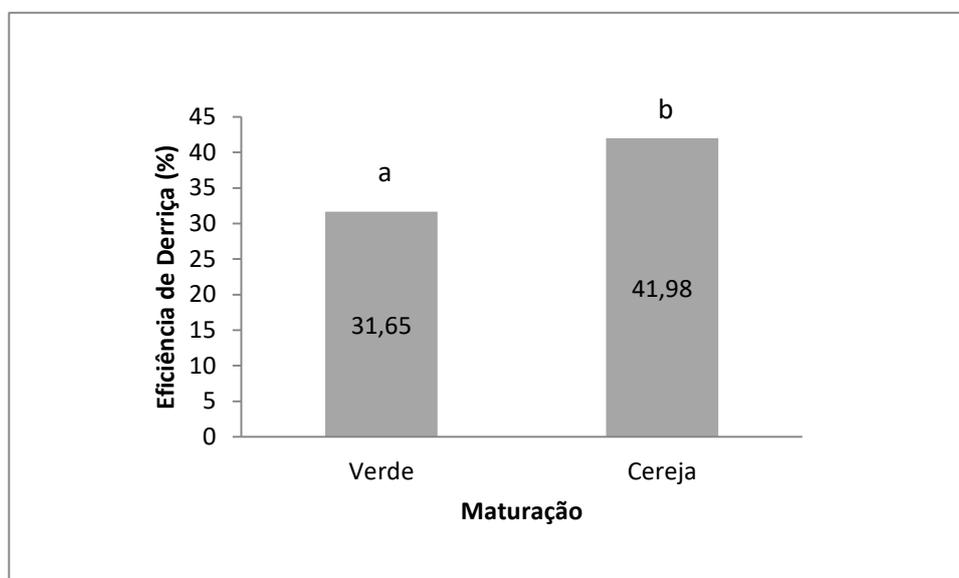


Figura 13: Eficiência de derriça média para os estádios maturação verde e cereja.

Silva et al. (2010) estudaram a força axial de desprendimento entre o fruto e o pedúnculo do café. Em alguns casos a força necessária para o desprendimento foi 73,42% maior para o fruto verde em relação ao cereja. Este resultado pode ser atribuído ao fato de frutos verdes possuírem maior rigidez em seus pedúnculos. Segundo Rodrigues e Ono (2001), a redução da rigidez está relacionada com a degradação das paredes celulares dos pedúnculos por atividade enzimática. Contudo, ao se transmitir a vibração impactando diretamente ao fruto a energia é transmitida de forma rápida e abrupta, resultando em eficiências de derriça próximas para frutos verdes e cereja.

Foram observadas diferenças significativas para o fator frequência, resultado também encontrado na literatura (Santos et al., 2010a; Santos et al., 2010b; Coelho et al., 2015). Foram observadas eficiências de derriça da ordem de 14,5%, 28,3%, 47,1% e 57,3% para as respectivas frequências de 20, 30, 40 e 50 Hz.

A análise de regressão foi utilizada para avaliar este fator quantitativo. Determinou-se um modelo para descrever a eficiência de derrça em função da frequência de vibração das hastes (Tabela 5).

Tabela 5: Resultado da análise de regressão da eficiência de derrça em função da frequência

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Regressão	1	19480,00	19480,10	36,44*	0,00
Resíduo	70	36575,00	522,50		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A Equação 1 representa o modelo escolhido para descrever eficiência de derrça em função da frequência. A Figura 14 representa graficamente o modelo escolhido.

$$Ef = 1,47 * F - 14,67 \quad (R^2 = 98,8\%) \quad (1)$$

em que,

$Ef$  = Eficiência de derrça do fruto verde (%);

$F$  = Frequência de oscilação das hastes (Hz).

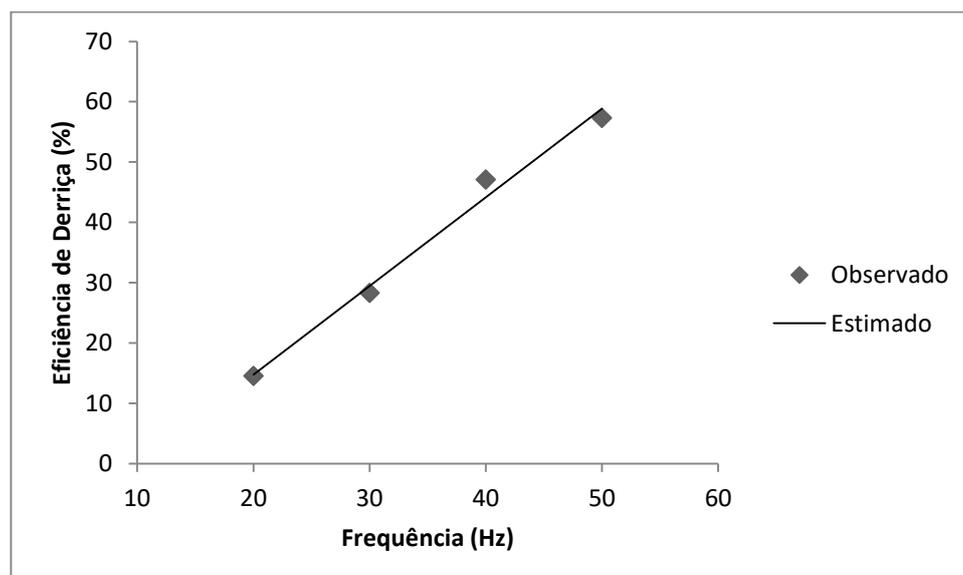


Figura 14: Modelo linear para descrever a eficiência de derrça em função da frequência.

O aumento da frequência imposta a um sistema vibrando com amplitude fixa implica, conseqüentemente, em um aumento nas acelerações as quais esse sistema é submetido. Maiores acelerações por sua vez aumentam a energia entregue à amostra, garantindo assim uma maior quantidade de frutos destacados. Santos et al. (2010a) afirmam que a frequência e a amplitude de vibração estão diretamente relacionadas à eficiência de derriça.

A amplitude de vibração que as hastes foram submetidas também apresentou efeito significativo sobre a eficiência de derriça. Este resultado corrobora com a literatura (Santos et al., 2010a; Coelho et al., 2015). Ao analisar os valores médios é possível verificar um aumento da eficiência de derriça na medida em que se aumenta a amplitude de oscilação das hastes. Para valores de 2, 3 e 4 mm, verificou-se uma eficiência de derriça média de, 17,12%, 38,98% e 54,35% respectivamente. Tal comportamento pode ser atribuído ao aumento de energia imposta na vibração com o aumento da amplitude.

Por meio da análise de regressão, determinou-se um modelo para descrever a eficiência de derriça em função da amplitude das hastes para o estágio de maturação verde (Tabela 6).

Tabela 6: Resultado da análise de regressão da eficiência de derriça em função da amplitude

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Regressão	1	16625,00	16625,10	29,21*	0,00
Resíduo	70	39429,00	563,30		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A Equação 2 representa o modelo escolhido para descrever eficiência de derriça em função da amplitude. A Figura 15 representa graficamente o modelo escolhido.

$$Ef = 18,61 \cdot A - 19,01 \quad (R^2 = 98,9\%) \quad (2)$$

em que,

$Ef =$  Eficiência de derriça do fruto verde (%);

A = Amplitude de oscilação das hastes (mm).

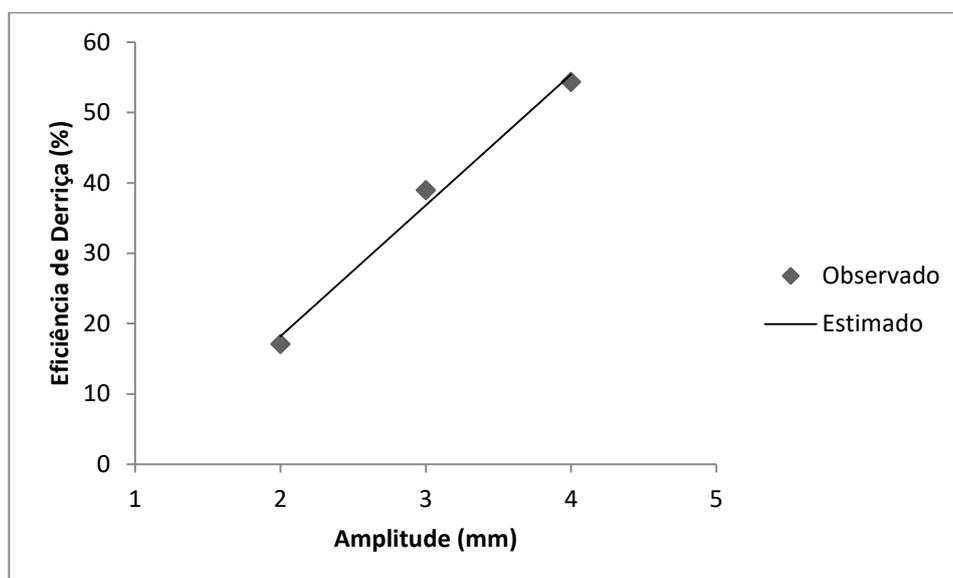


Figura 15: Modelo linear para descrever a eficiência de derrifa em função da amplitude.

A avaliação da eficiência de derrifa dos frutos em função da maturação e da amplitude foi realizada desdobrando a interação da maturação dentro dos níveis do fator amplitude (Tabela 7).

Tabela 7: Resultado da análise de variância do desdobramento da interação do fator maturação dentro dos níveis do fator amplitude

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Maturação: 2 mm	1	54,92	54,92	0,29	0,59
Maturação: 3 mm	1	929,75	929,75	4,87*	0,03
Maturação: 4 mm	1	2791,43	2791,43	14,63*	0,00
Resíduo	48	9156,44	190,76		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Para a amplitude de 2 mm não foi encontrado diferença significativa na eficiência de derrifa entre os estádios de maturação. Para as amplitudes de 3 e 4 mm, a eficiência de derrifa foi superior para o estágio de maturação cereja (Tabela 8).

Tabela 8: Eficiência de derricha média (%) em função do estágio de maturação e da amplitude de vibração

Maturação	Amplitude		
	2 mm	3 mm	4 mm
Verde	18,64 a	32,75 a	43,56 a
Cereja	15,62 a	45,21 b	65,13 b

Obs.: Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas das médias pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade

Observando as médias diferentes entre si, percebe-se uma menor eficiência de derricha dos frutos no estágio de maturação verde. Este comportamento novamente pode ser associado a uma menor rigidez do pedúnculo em amostras de café na maturação cereja (Coelho et al., 2015).

Realizando o desdobramento do fator amplitude dentro dos níveis do fator maturação (Tabela 9), percebe-se que as interações entre os fatores foram significativas para ambos os estádios de maturação. Pode-se afirmar que a eficiência de derricha foi influenciada pela amplitude de oscilação para o estágio de maturação verde e cereja.

Tabela 9: Resultado da análise de variância do desdobramento da interação do fator amplitude dentro dos níveis do fator maturação

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Verde:Amp	2	3749,34	1874,67	9,83*	0,00
Cereja:Amp	2	14899,85	7449,92	39,05*	0,00
Resíduo	48	9156,44	190,76		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Por meio de análise de regressão, ajustou-se um modelo para descrever a eficiência de derricha em função da amplitude das hastes para o estágio de maturação verde (Tabela 10).

Tabela 10: Resultado da análise de regressão da eficiência de derrça em função da amplitude, para o estágio de maturação verde

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Regressão	1	3727,36	3727,36	19,54*	0,00
Resíduo	48	9156,44	190,76		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A Equação 3 representa o modelo escolhido para descrever eficiência de derrça em função da amplitude, para o estágio de maturação verde. A Figura 16 representa graficamente o modelo escolhido.

$$Ef = 12,46 \cdot A - 5,74 \quad (R^2 = 99,4\%) \quad (3)$$

em que,

$Ef$  = Eficiência de derrça do fruto verde (%);

$A$  = Amplitude de oscilação das hastes (mm).

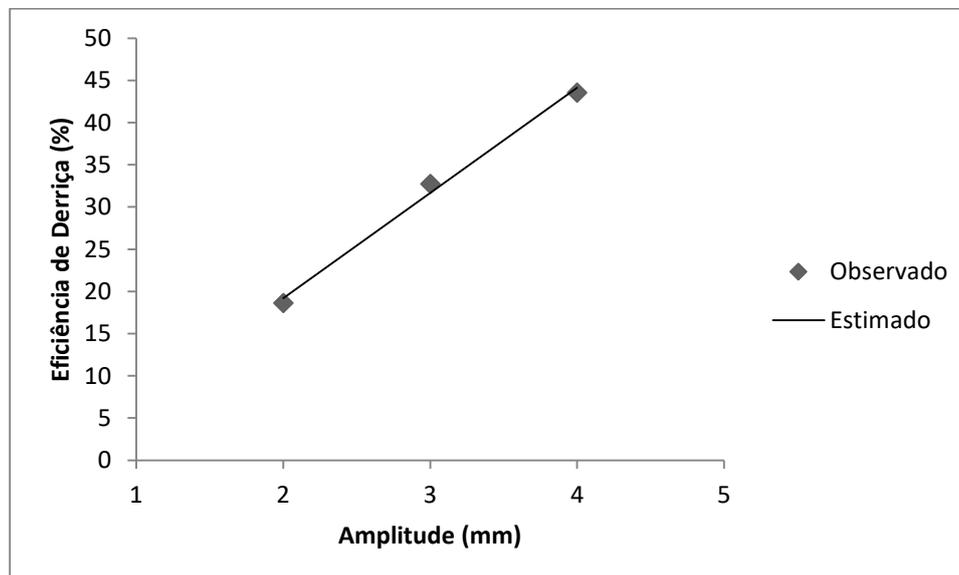


Figura 16: Modelo linear para descrever a eficiência de derrça em função da amplitude para frutos no estágio de maturação verde.

Procedendo de maneira análoga à análise dos frutos verdes, na Tabela 11 são apresentados os resultados para a análise de regressão aplicada aos dados referentes às amostras do estágio de maturação cereja.

Tabela 11: Resultado da análise de regressão da eficiência de derrça em função da amplitude, para o estágio de maturação verde

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Regressão	1	14712,91	14712,91	77,13*	0,00
Resíduo	48	9156,44	190,76		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A Equação 4 representa o modelo escolhido para descrever eficiência de derrça em função da amplitude, para o estágio de maturação cereja. A Figura 17 representa graficamente o modelo escolhido.

$$Ef = 24,76 \cdot A - 32,29 \quad (R^2 = 98,7\%) \quad (4)$$

em que,

$Ef$  = Eficiência de derrça do fruto cereja (%);

$A$  = Amplitude de oscilação das hastes (mm).

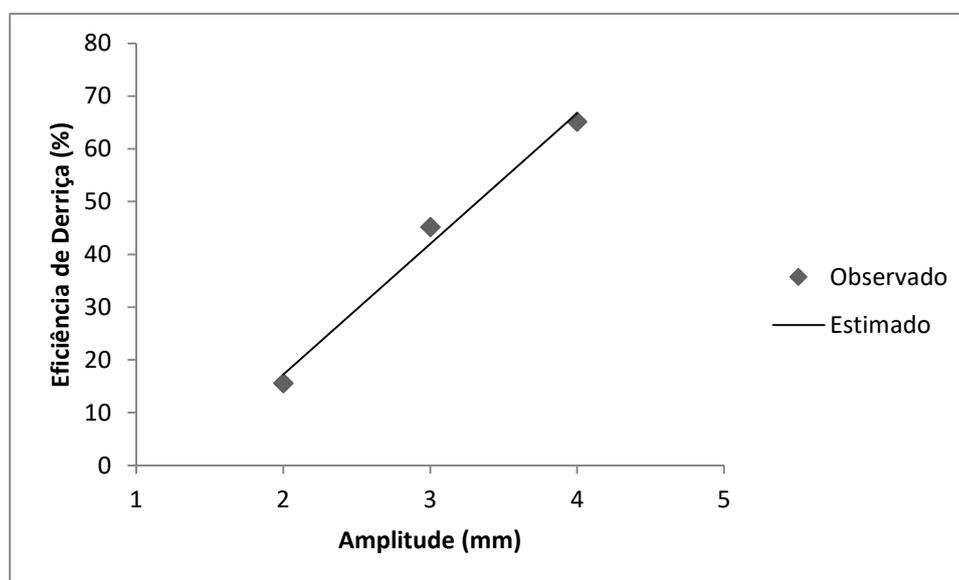


Figura 17: Modelo linear para descrever a eficiência de derrça em função da amplitude para frutos no estágio de maturação cereja.

A partir das Equações 3 e 4, pode-se afirmar que, independente da frequência de vibração em que as amostras foram submetidas no experimento, verificou-se um aumento na eficiência de derriça dos frutos verde e cereja na medida em que houve o aumento da amplitude das hastes.

O desdobramento do fator frequência dentro dos níveis do fator amplitude também foi estudado na análise de variância (Tabela 12). Percebe-se que apenas a interação entre frequência e amplitude de 2 mm não apresentou significância à 5% de probabilidade.

Tabela 12: Resultado da análise de variância do desdobramento da interação frequência dentro dos níveis do fator amplitude

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Freq : 2 mm	3	1253,10	4177,00	2,19	0,10
Freq : 3 mm	3	6979,85	23266,15	12,20*	0,00
Freq : 4 mm	3	16531,18	5510,39	28,89*	0,00
Resíduo	48	9156,44	190,76		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Apesar da não significância da interação entre frequência e a amplitude de 2 mm, observa-se uma tendência de aumento da média de eficiência de derriça à medida em que se aumenta a frequência. Foram obtidos valores de 7,25%, 14,86%, 19,15% e 27,23% para os respectivos níveis de 20, 30, 40 e 50 Hz (Figura 18).

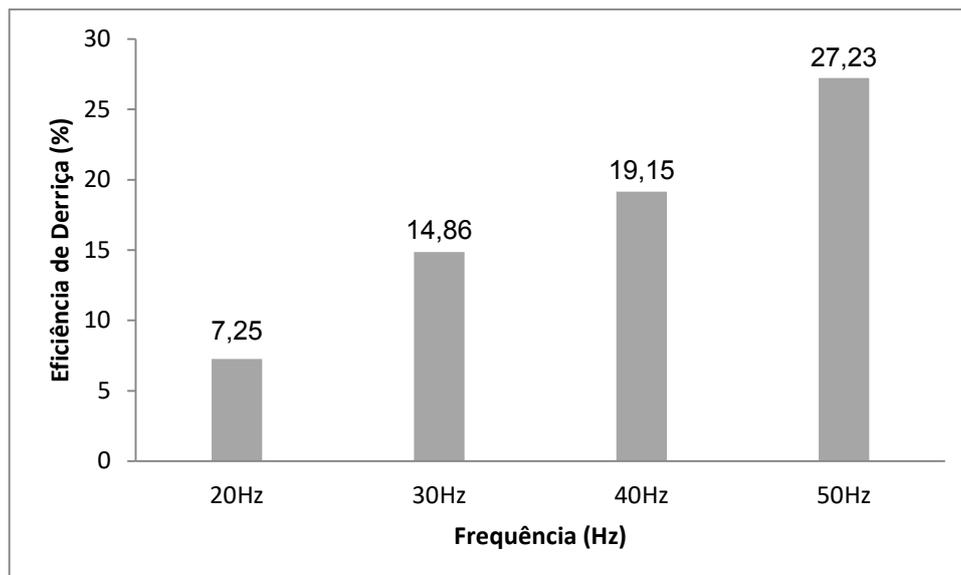


Figura 18: Eficiência de derriza média, para o a amplitude de 2 mm em função da frequência.

Na Tabela 13 são apresentados os resultados da análise de regressão para um modelo que descreve a eficiência de derriza em função da frequência de vibração para a amplitude de vibração de 3 mm.

Tabela 13: Resultado da análise de regressão da eficiência de derriza em função da frequência, para a amplitude de 3 mm

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Regressão	1	6883,99	6883,99	36,09*	0,00
Resíduo	48	9156,44	190,76		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A Equação 5 retrata o modelo escolhido para descrever eficiência de derriza em função da frequência, para a amplitude de 3 mm. A Figura 19 representa graficamente o modelo escolhido.

$$Ef = 1,51 * F - 14,03 \quad (R^2 = 98,6\%) \quad (5)$$

em que,

$Ef =$  Eficiência de derriza (%);

$F =$  Frequência de vibração (Hz).

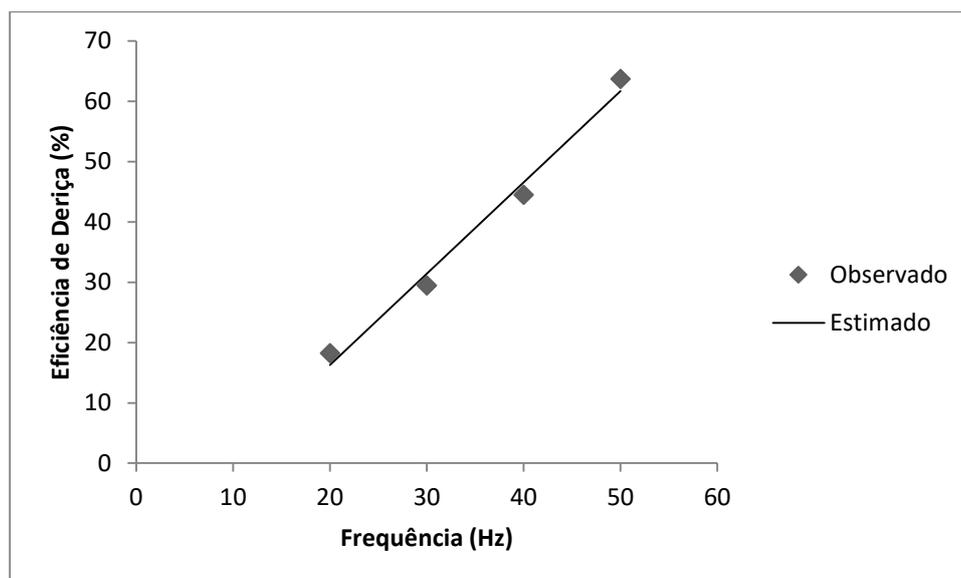


Figura 19: Modelo linear para descrever a eficiência de derriza em função da frequência com uma amplitude de 3 mm.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados para a análise de regressão do modelo que descreve o comportamento da eficiência de derriza em função da frequência de vibração para a amplitude de vibração de 4 mm.

Tabela 14: Resultado da análise de regressão da eficiência de derriza em função da frequência, para a amplitude de 4 mm

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Regressão	1	1527,66	15275,66	80,08*	0,00
Resíduo	48	9156,44	190,76		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A Equação 6 representa o modelo escolhido para descrever eficiência de derriza em função da frequência, para a amplitude de 4 mm. A Figura 20 representa graficamente o modelo escolhido.

$$Ef = 2,25 * F - 24,63 \quad (R^2 = 92,4\%) \quad (6)$$

em que,

$Ef =$  Eficiência de derriza (%);

$F$  = Frequência de vibração (Hz).

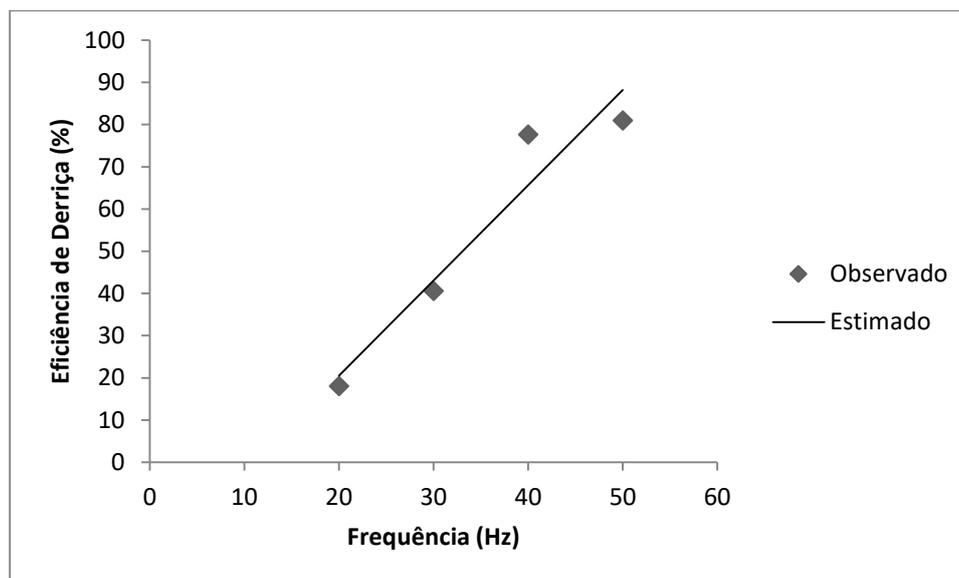


Figura 20: Modelo linear para descrever a eficiência de derrça em função da frequência com uma amplitude de 4 mm.

Constatou-se o aumento da eficiência de derrça na medida em que se aumentou a frequência e a amplitude de vibração das hastes rígidas. Estes resultados concordam com trabalhos encontrados na literatura (Santos et al., 2010a; Santos et al., 2010b; Guedes, 2011; Coelho et al., 2015). Ao se aumentar quaisquer dos dois fatores, isolados ou em conjunto, aumenta-se, por consequência, a aceleração a qual a amostra é submetida. Maiores acelerações indicam que mais energia foi transmitida e, consequentemente, mais frutos serão colhidos.

As eficiências de derrça médias chegaram a valores superiores a 80 %, ou seja, a quantidade de energia vibracional fornecida às amostras foi suficiente para o desprendimento eficiente dos frutos. Utilizando as maiores frequências e maiores amplitudes seria possível realizar uma colheita com uma única passada e obter resultados satisfatórios. Santos et al. (2010a) obtiveram eficiências de derrça médias de 65,25 %, para frequência 26,67 Hz, amplitude 7,50 mm. GUEDES (2011) obteve eficiência de derrça médias inferiores a 50 % para frequência 55 Hz e amplitude 3,25 mm. É válido ressaltar que estes trabalhos aqui citados foram conduzidos em um cenário que a vibração era transmitida aos frutos sem o impacto das hastes. O resultado obtido nesta

rotina comprova que para uma colheita mais eficiente é recomendado que a vibração seja transmitida em associação com o impacto das hastes nos frutos, conforme o princípio já empregado nas colhedoras.

Os dados referentes à Rotina 3 (Comparativo entre as diferentes formas de transmissão da vibração na maturação verde) foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk à 5% de probabilidade e não apresentaram distribuição normal.

Devido à falta de normalidade, foi aplicado então o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Observou-se que pelo menos uma combinação dos fatores que compuseram os tratamentos avaliados apresentaram médias diferentes entre si com uma significância de 5% de probabilidade (Tabela 13).

Tabela 15: Teste de Kruskal-Wallis para a Rotina 3

Teste de Kruskal-Wallis	
C.Q.	64,51
G.L.	23
P-Valor	0,00*

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Foi aplicado o teste de Dunn para determinar quais são combinações de tratamentos que possuem médias diferentes à 10% de probabilidade. Na Tabela 16 são apresentados os tratamentos avaliados definidos os tratamentos, os quais foram compostos pela combinação dos fatores considerados na Rotina 3. Alguns contrastes de tratamentos com diferenças significativas pelo teste de Dunn encontram-se na Tabela 17.

Tabela 16: Esquema de arranjo dos tratamentos

Tratamento	Impacto ao fruto	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)
1	Não	20	2
2	Não	20	3
3	Não	20	4
4	Não	30	2
5	Não	30	3
6	Não	30	4
7	Não	40	2
8	Não	40	3
9	Não	40	4
10	Não	50	2
11	Não	50	3
12	Não	50	4
13	Sim	20	2
14	Sim	20	3
15	Sim	20	4
16	Sim	30	2
17	Sim	30	3
18	Sim	30	4
19	Sim	40	2
20	Sim	40	3
21	Sim	40	4
22	Sim	50	2
23	Sim	50	3
24	Sim	50	4

Tabela 17: Teste de Dunn para a Rotina 3

Tratamentos	Z	P-Valor	P-Valor Ajustado
9vs 21	3,01	0,00	0,07*
10 vs 22	-2,54	0,01	0,06*
11 vs 23	-2,46	0,01	0,07*
12 vs 24	-2,74	0,01	0,06*

\* - significativo ao nível de 10% de probabilidade.

Na Figura 21 são apresentadas as médias de eficiência de derrição obtidas em cada comparação de tratamentos.

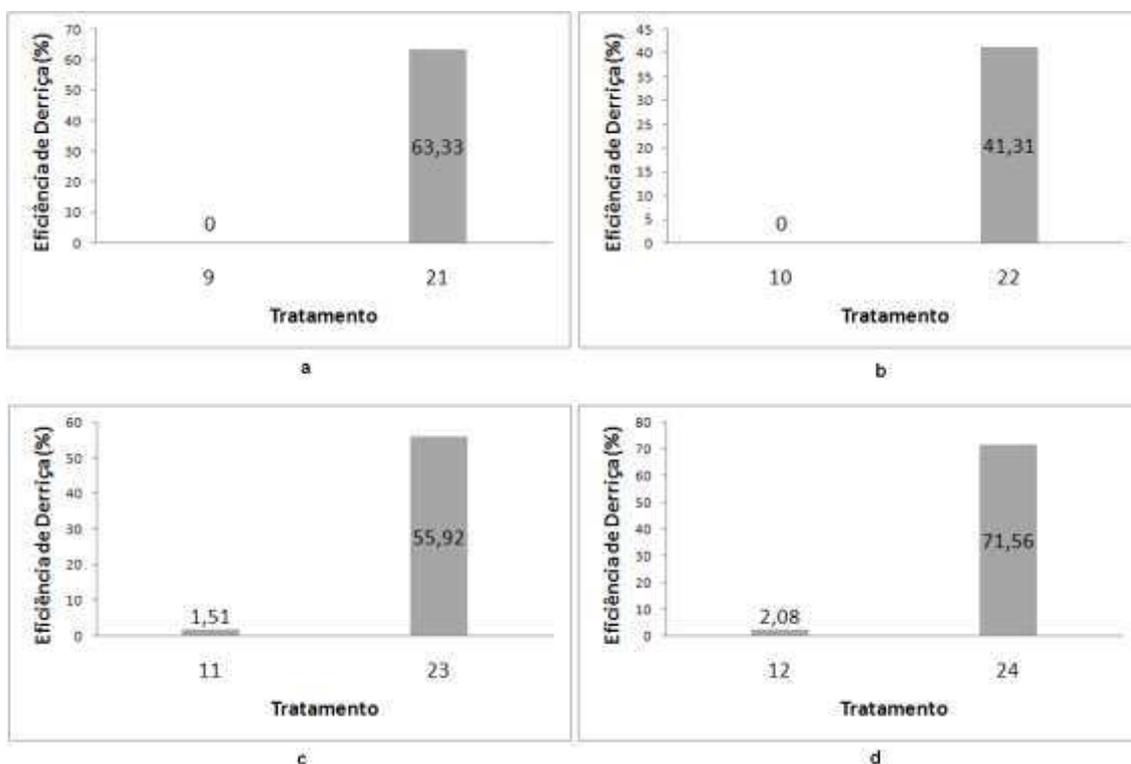


Figura 21: Médias de eficiência de derrição obtidas comparando os respectivos tratamentos, (a): 9 e 21; (b): 10 e 22; (c): 11 e 23; (d): 12 e 24.

As configurações de tratamento em que os frutos foram submetidos ao impacto da haste rígida obtiveram médias de eficiência de derrição superiores comparadas às sem impacto ao fruto.

Fica evidente a importância de se utilizar o impacto em associação com a vibração mecânica para se obter maiores valores de eficiência de derrição dos frutos de café. A comparação entre o tratamento 12 e o tratamento 24 indicou uma diferença de 69,48%, ou seja, podemos afirmar que a vibração em associação com impacto pode ser até 70% mais eficiente ao derrigar frutos de café verdes quando comparada ao uso da vibração isoladamente.

O impacto tem como característica a transmissão da energia cinética das hastes rígidas em um curto intervalo de tempo, fornecendo assim acelerações de maior intensidade aos frutos de café. Maiores acelerações indicam uma maior quantidade de energia entregue ao fruto.

É válido salientar o comportamento das médias de eficiência de derricha dos tratamentos. Se compararmos o tratamento 21 com o tratamento 24 observa-se que houve um aumento de 8,21% na eficiência de derricha. A única variável entre esses tratamentos é frequência, sendo assim possível atribuir a este fator essa diferença. Esse comportamento também encontrado na literatura (Santos et al., 2010a; Santos et al., 2010b; Coelho et al., 2015) pode ser explicado devido à maior energia entregue as amostras com o aumento da frequência.

No tocante de colheita seletiva, é possível sugerir que o uso da vibração sem a associação com o impacto das hastes seria uma solução para alcançar esse objetivo. As eficiências de derricha obtidas nesta análise (vibração sem impacto) foram baixas indicando que frutos no estágio de maturação verde não seriam efetivamente colhidos se excitados nos níveis de frequência e amplitudes empregados.

Na Rotina 4 (Comparativo entre as diferentes formas de transmissão da vibração na maturação cereja) foi aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk à 5% de probabilidade e os dados não apresentaram distribuição normal.

Dessa forma, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (Tabela 18). Foi encontrada significância à 5% de probabilidade na análise dos dados, indicando que ao menos um dos contrastes entre tratamentos apresenta médias diferentes entre si.

Tabela 18: Resultado do teste de Kruskal-Wallis para a Rotina 4

Teste de Kruskal-Wallis	
C.Q.	60,58
G.L.	23
P-Valor	0,00*

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A partir do teste de Dunn determinou-se quais comparações entre tratamentos possuem médias diferentes entre si, considerando-se uma significância de 10% de probabilidade. A organização destes tratamentos seguem a mesma ordem apresentada na Tabela 14. Na Tabela 19 são

apresentadas algumas combinações do teste de Dunn que foram significativas e devem ser discutidas.

Tabela 19: Resultado do teste de Dunn para a Rotina 4

Tratamentos	Z	P-Valor	P-Valor Ajustado
12 vs 24	-2,68	0,01	0,06*
17 vs 5	2,59	0,01	0,07*

\* - significativo ao nível de 10% de probabilidade.

O tratamento 12 é formado por uma frequência de 50 Hz, amplitude de oscilação de 4 mm e tem a vibração transmitida sem o impacto, enquanto o tratamento 24 se diferencia por ter a vibração transmitida aos frutos pelo impacto das hastes colhedoras (Figura 18).

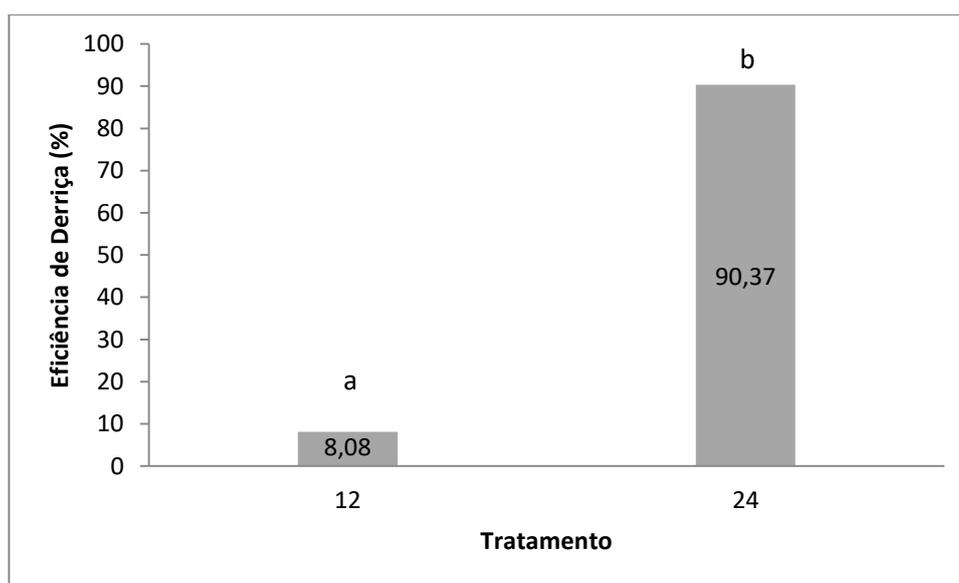


Figura 22: Eficiência de derrça média obtida pelo tratamento 12 e 24.

O tratamento 17 foi composto por uma frequência de vibração de 30 Hz, amplitude de vibração de 3 mm e a vibração foi transmitida pelo impacto das hastes aos frutos. O tratamento 5 se diferiu devido à vibração ser transmitida a amostra ensaiada sem o impacto das hastes. A Figura 19 ilustra as médias de eficiência de derrça obtidas.

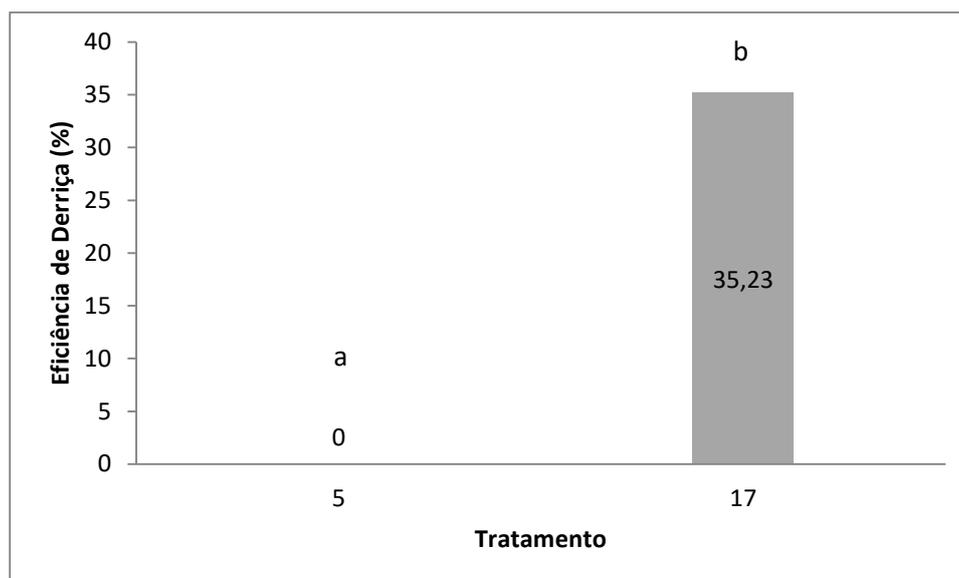


Figura 23: Eficiência de derrça média obtida pelo tratamento 5 e 17.

Assim como o resultado encontrado para os frutos verdes é possível observar o quanto é mais eficiente derrçar frutos do café utilizando vibração em associação ao impacto. A diferença entre as médias de eficiência de derrça entre os tratamentos 12 e 24 foi de 82,29%.

O tratamento 12 (frequência de 50 Hz e amplitude de 4 mm) da maturação verde obteve eficiência de derrça de 2,08%. O tratamento de mesmo número da maturação cereja obteve eficiência de derrça de 8,08%. Essa tendência afirma que frutos cereja são mais facilmente derrçados, concordando com a literatura (Santos et al., 2010a; Santos et al., 2010b; Coelho et al., 2015). Contudo, uma colheita seletiva não seria algo tangível nestas configurações, visto que a eficiência de derrça foi baixa para ambos estádios de maturação.

Deve-se ressaltar que a elevada eficiência de derrça de eficiência observada, utilizando vibração em associação ao impacto, deve-se ao fato também de que, mesmo que por um pequeno intervalo de tempo, a grande maioria dos frutos foram submetidos à uma excitação como mínima dissipação de energia. Ao transmitir a vibração pelo engaste do ramo na máquina vibradora parte da energia fornecida à amostra é dissipada pelo amortecimento do ramo e, conseqüentemente, não atinge magnitude suficiente para promover o destacamento dos frutos.

Contudo, o impacto das hastes rígidas em associação com a vibração também podem aumentar os danos aos frutos e também à planta de café. Danos aos frutos podem causar perda na qualidade do café e, conseqüentemente, um menor preço de comercialização. Enquanto danos à planta de café podem causar perda de produtividade na próxima safra (Sakiyama, 2015).

Garantir que as hastes em vibração de uma máquina derriçadora entrem em contato com todos os frutos presentes em uma planta de café não é uma tarefa simples no tocante de projetos de máquinas. Muitas são as dificuldades de projetos, desde materiais de construção mecânica até a variabilidade de forma e porte que as plantas de café apresentam. Contudo, com este trabalho fica clara a importância que essa interação haste-fruto, tem durante o processo de colheita por vibrações mecânicas.

Portanto, uma melhora na eficiência de derriça poderia ser obtida garantindo que as hastes rígidas impactem sobre os frutos durante o processo de colheita do café. O aumento da frequência e da amplitude de vibração também contribuem para uma colheita mais eficiente. Frutos na maturação cereja são mais facilmente colhidos que os frutos na maturação verde.

#### **4. CONCLUSÕES**

Pode-se concluir que nas condições em que o trabalho foi conduzido:

- A eficiência de derriça aumenta na medida em que o estágio de maturação progride de verde para cereja.
- Observa-se uma maior eficiência de derriça na medida em que se aumenta a frequência e a amplitude de vibração, uma vez que maior energia vibracional imposta ao fruto.
- Em um processo de vibração onde não há impacto nos frutos, a eficiência de derriça foi baixa, indicando que os níveis dos fatores frequência e amplitude, empregados nesse trabalho, não estão adequados para uma colheita eficiente.

- Ao utilizar o impacto das hastes em associação com a vibração os valores médios de eficiência de derriça chegaram a 90%.
- A eficiência de derriça em um processo onde há vibração em associação com o impacto das hastes pode ser até 82% superior quando comparado a um processo sem o impacto de hastes vibratórias.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

COELHO, A. L. F.; SANTOS, F. L.; PINTO, F.de ASSIS de.; QUEIROZ, D. M.de. Detachment efficiency of fruits from coffee plants subjected to mechanical vibrations. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Online)**, v. 45, p. 406-412, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Café V.4 - Safra 2017 – N.1 - Primeiro levantamento, janeiro/2017**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 11 Julho. 2017.

CUNHA, J. P. B.; SILVA, F. M.; DIAS, R. E. B. A.; LISBOA, C. F.; MACHADO, T. A.; Viabilidade técnica e econômica de diferentes sistemas de colheita do café. **Coffee Science**, v. 11, n. 3, p. 416 - 425, jul./set. 2016.

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

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.

PEREIRA, V. F.; VALE, S. M. L. R.; BRAGA, M. J.; RUFINO, J. L. S. Risco e retornos da cafeicultura em Minas Gerais: uma análise de custos e diferenciação. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48. n.3,jul/set. 2010.

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. Quarta Edição: Editora PEARSON, 3ª reimpressão. 448p. 2011.

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

SAKIYAMA N.S.; MARTINEZ, H. E. P.; TOMAZ, M.A.; BOREM, A. **Café arábica do Plantio à Colheita**. 1. ed. Viçosa-MG: UFV. v. 1. 316p. 2015.

SANTINATO, F.; SILVA, R. P.; CASSIA, M. T.; SANTINATO, R. Análise quali-quantitativa da operação de colheita mecanizada de café em duas safras. **Coffee Science**, v. 9, n. 4, p. 495 - 505, out./dez. 2014

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, 2010a.

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

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

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

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

**CAPÍTULO II: TRANSMISSIBILIDADE DE SISTEMAS FRUTO-PEDÚNCULO-  
RAMO DO CAFEIRO SUBMETIDOS À VIBRAÇÃO INDUZIDA POR  
IMPACTO**

## TRANSMISSIBILIDADE DE SISTEMAS FRUTO-PEDÚNCULO-RAMO DO CAFEIRO SUBMETIDOS À VIBRAÇÃO INDUZIDA POR IMPACTO

### Resumo

A cafeicultura se destaca como uma das principais atividades agrícolas no Brasil. Contudo, esta atividade passa por um momento de dificuldade em conseguir mão de obra, tornando operações como a colheita manual impraticável. Neste cenário a mecanização das atividades do campo aparece como solução, permitindo uma maior eficiência nas operações e proporcionando a viabilidade das lavouras cafeeiras. O desenvolvimento de máquinas eficientes para a colheita de café exige conhecimento sobre o comportamento dinâmico da planta. Ao submeter a planta de café a vibração mecânica, a resposta do sistema torna-se complexa devido aos esforços dinâmicos. Dessa forma, a transmissibilidade de vibração é um parâmetro que pode ajudar nesse entendimento. Neste trabalho foi determinada a transmissibilidade média de amostras de ramo de café contendo frutos nos estádios de maturação verde e cereja. Essas amostras foram submetidas a três níveis de frequência de vibração, 20, 30 e 40 Hz, induzidas ao ramo por hastes rígidas de fibra de vidro deslocando com uma amplitude constante de 2mm. Os dados de aceleração foram coletados utilizando um acelerômetro fixado ao ramo. Concluiu-se que a frequência de 20 Hz foi a que apresentou maior transmissibilidade. As amostras contendo frutos no estágio de maturação cereja também apresentaram maior transmissibilidade quando comparadas as contendo frutos no estágio de maturação verde.

**Palavras-chave:** Colheita mecanizada, comportamento dinâmico, vibrações mecânicas.

## TRANSMISSIBILITY OF COFFEE FRUIT-STEM-BRANCH SYSTEMS SUBMITTED TO VIBRATION INDUCED BY IMPACT

### **Abstract**

Coffee cultivation stands out as one of the main agricultural activities in Brazil. However, this activity goes through a age where the difficulty to finding labor has made operations such as manual harvesting impractical. In this scenario the mechanization of the coffee activities becomes as a solution allowing a better efficiency in the operations and providing the viability of the coffee plantations. The development of efficient machines for the harvesting of coffee requires solid knowledge about the dynamic behavior of the plant. Inducing mechanical vibration to the coffee plant, the response of the system becomes complex due to the dynamic forces. The transmissibility of vibration is a parameter that may help to understand this process. The average transmissibility was determined of coffee branch samples containing fruits at green and cherry maturation was determined. These samples were submitted to three vibration frequency levels, 20, 30 and 40 Hz, induced to the branch by rigid rods of fiberglass with a constant amplitude of 2mm. The data of acceleration were collected using an accelerometer fixed to the branch. The frequency of 20 Hz showed the highest transmissibility. Samples containing fruits at the cherry maturation stage also obtained higher transmissibility when compared to those containing fruits at the green maturation stage.

**Key Words:** Mechanized harvesting, dynamic behavior, mechanical vibrations.

## 1. INTRODUÇÃO

A cafeicultura destaca-se no Brasil como uma das principais atividades agrícolas. Na safra de 2016, a produção brasileira de café foi de 51,36 milhões de sacas de café beneficiado. O estado de Minas Gerais é o principal produtor sendo responsável por cerca de 60,1% da produção nacional. Neste estado, a região da Zona da Mata, em adição com as regiões central e Rio Doce, contribuem com expressivos 6,08 milhões de sacas ou 19,8% do montante mineiro (CONAB, 2017).

Contudo, os cafeicultores passam por um momento onde a dificuldade em conseguir mão de obra, o que vem tornando a colheita manual impraticável. Em um processo exclusivamente manual, a colheita do café pode representar até 60% do custo de uma saca, valores atribuídos, principalmente, à elevada demanda de mão de obra (Oliveira et al., 2007).

A mecanização das atividades do campo permite uma maior eficiência nas operações e proporciona a viabilidade das lavouras cafeeiras, que atualmente dependem, principalmente, da redução de custos de produção (Cunha et al., 2016). As operações de cultivo e colheita mecanizada assumem um papel de destaque na sustentação da cadeia produtiva do café, pois contribuem para a redução dos custos operacionais (Silva et al., 2010). Santinato et al. (2014) afirmam que a execução da colheita mecanizada com o máximo de eficiência reduz os custos operacionais, pois minimiza a necessidade de repasse.

Para realizar a colheita mecanizada do café utiliza-se o princípio de vibrações mecânicas. Vibrações mecânicas, ou oscilações, podem ser definidas como qualquer movimento que se repete após um intervalo de tempo (Rao, 2011). No mercado de máquinas agrícolas, encontram-se desde máquinas colhedoras autopropelidas que realizam todas as etapas do processo de colheita, até pequenas máquinas portáteis que são empregadas em processos semimecanizados de colheita, sempre utilizando vibrações mecânicas para realizar a derriça do fruto.

Em um processo de colheita mecanizada dos frutos de café a derriça é uma das etapas mais difíceis de ser realizada (Villibor et al., 2016). A derriça consiste na transferência de energia vibracional e de impacto para realização

do desprendimento dos frutos de café. A transferência de energia vibracional para o sistema fruto-pedúnculo depende de combinações adequadas entre frequência e amplitude de vibração de forma a realizar a derriça com eficiência (Oliveira et al., 2007; Santos et al., 2010a; Santos et al., 2010b; Coelho et al., 2015).

Ao submeter a planta de café a vibração forçada, a resposta do sistema fruto-pedúnculo torna-se mais complexa devido aos esforços dinâmicos. Logo, outros fatores, além da força de desprendimento, são importantes e necessários para a compreensão do comportamento do sistema. A transmissibilidade de vibração é um parâmetro que pode ajudar nesse entendimento, além de indicar faixas de trabalho favoráveis à seletividade dos frutos (VILIBOR, 2012).

Pezzy & Caprara (2009) estudaram a transmissibilidade de vibração para a cultura de uva por meio de medições das acelerações resultantes diretamente nas plantas. O efeito da frequência das hastes batedoras de uma colhedora de uva foi avaliado com objetivo de estudar a interação máquina-planta. Os resultados demonstraram a importância da frequência das hastes nas vibrações transmitidas para a planta e os consequentes efeitos sobre o produto e a planta.

Os trabalhos que visam estudar o comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do café tem sido realizados submetendo-se o ramo à vibrações sem levar em consideração o efeito do impacto das hastes vibratórias no processo de derriça (Santos et. al., 2010a; Santos et. al., 2010b; Coelho et. al., 2015). Este tipo de análise é uma simplificação em relação ao princípio de colheita mecanizada que vem atualmente sendo empregada.

Detecta-se uma falta de estudos que incorporem o efeito do impacto no comportamento dinâmico da planta, isso poderia tornar as análises muito mais próximas da realidade e contribuir para a busca de sistemas mais eficientes de derriça. Dessa forma, neste trabalho objetivou-se determinar a transmissibilidade média dos ramos de café contendo frutos nos estádios de maturação verde e cereja, submetidos ao impacto.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Para este experimento foram utilizadas plantas de café Arábica, variedade Catuaí Vermelho, nos estádios de maturação verde e cereja. A coleta do material foi realizada na fazenda experimental da Universidade Federal de Viçosa, localizada na zona rural do município de Viçosa, Minas Gerais.

As amostras de café, compostas por ramos com frutos na maturação verde e cereja, foram submetidas à diferentes níveis de frequências. Para isso foi utilizado um sistema de vibração da fabricante *Ling Dynamic Systems* (LDS), alimentado por um amplificador modelo PA 1000 L, uma fonte de alimentação de campo FPS 10L, um vibrador eletromagnético modelo V 555M6-CE e um controlador Dactron modelo Comet USB (Figura 1).



Figura 1: Da esquerda para direita: Gerador de sinais, fonte de alimentação, amplificador e vibrador eletromagnético.

O controle do sistema foi realizado por um acelerômetro (transdutor piezoelétrico de aceleração), do fabricante PCB, com faixa de trabalho de 10 a 4000 Hz. A resposta desse acelerômetro permite o controle preciso das frequências e amplitudes de vibração, conforme configurado no software de gerenciamento do sistema.

Neste trabalho, a vibração foi transmitida ao ramo de café pelo impacto de hastes de fibra de vidro. Devido às amostras não apresentarem homogeneidade em relação ao diâmetro do ramo e arranjo dos frutos, as hastes deveriam permitir a regulagem de sua abertura, garantindo que o ramo de café se posicionasse entre elas. Sendo assim, foi necessário projetar e

construir um sistema mecânico que permitiu a realização desse experimento. O processo de criação e modelagem sólida do protótipo foi realizado em software CAD 3D. Na Figura 2 é apresentado o cabeçote de fixação desenvolvido contendo o sistema de regulagem das hastes.

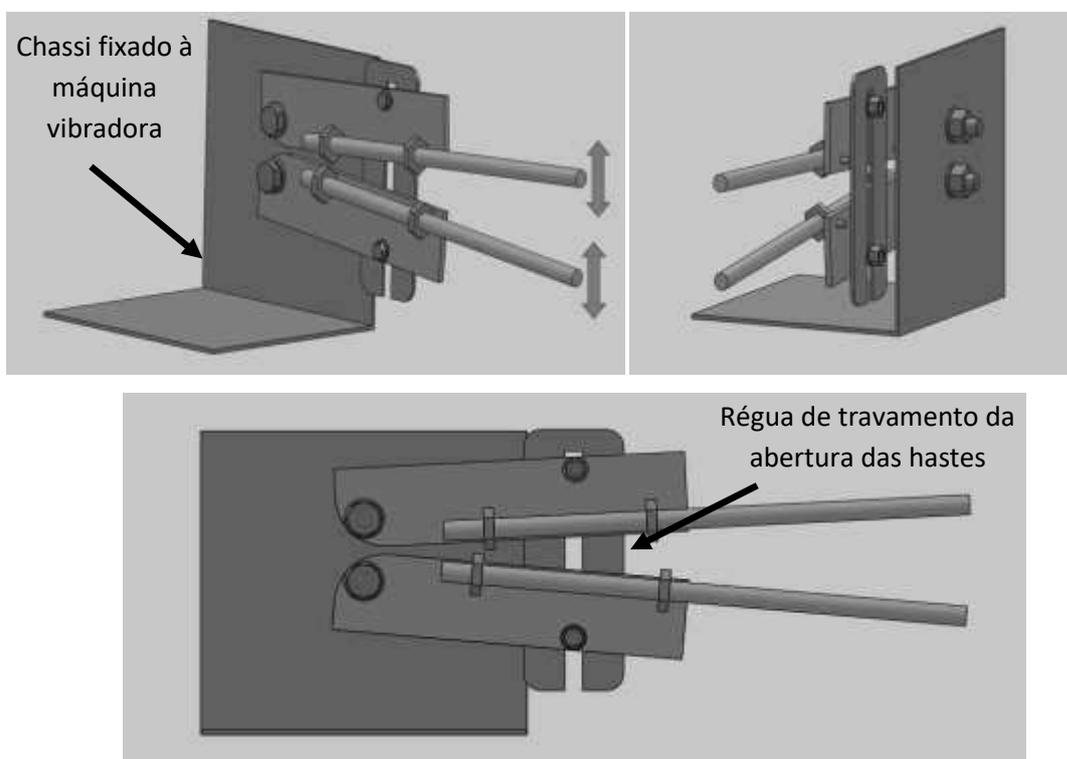


Figura 2: Cabeçote de montagem das hastes rígidas.

As amostras foram coletadas e levadas para laboratório para serem processadas. O processamento foi composto por etapas. Primeiramente, cada ramo foi padronizado em um comprimento de aproximadamente 25 cm. Posteriormente, foi determinado o número de frutos em cada amostra e contabilizada sua massa total, para uma melhor caracterização das amostras. A Figura 3 ilustra algumas amostras separadas para os ensaios de vibração.

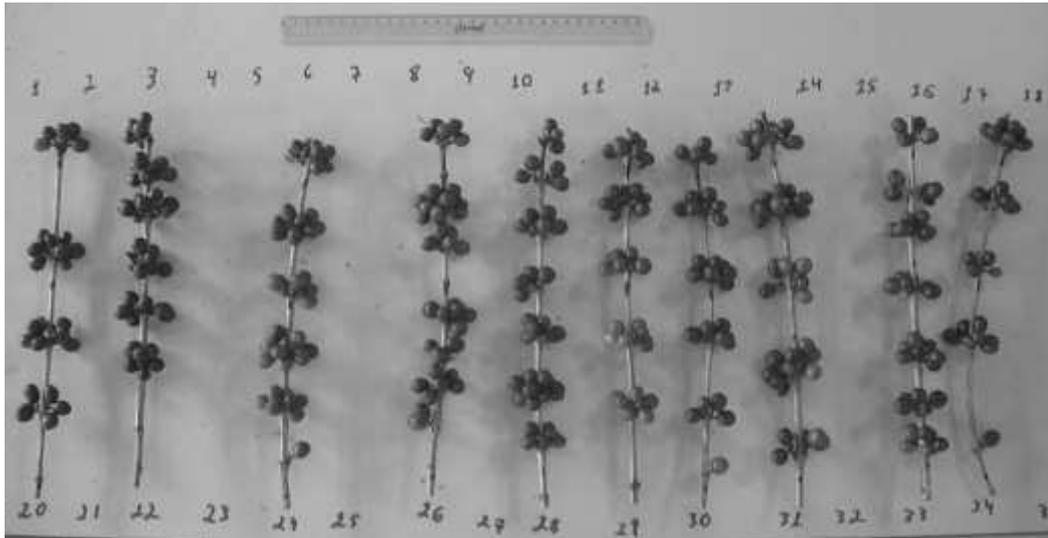


Figura 3: Amostras empregadas na realização dos ensaios de vibração.

As amostras foram engastadas por meio de um mandril de  $\frac{1}{2}$  polegada. Este mandril foi fixado em uma base que se encaixava sobre um trilho de aço (Figura 4).

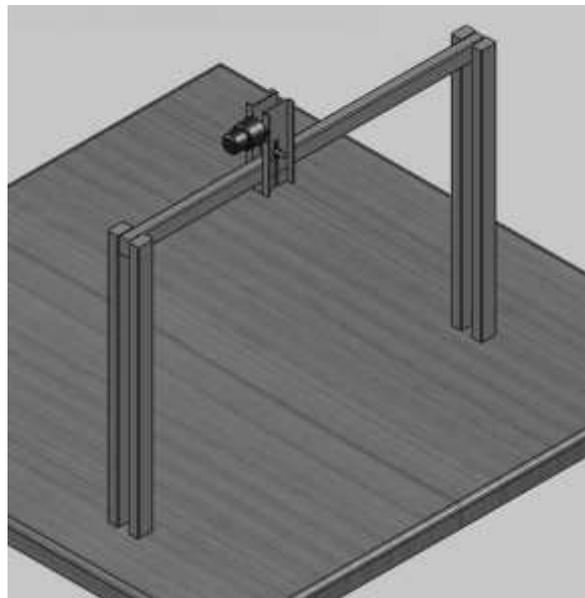


Figura 4: Sistema de fixação das amostras.

O ponto de fixação dos acelerômetros foi estabelecido em uma posição distante de 10 centímetros do ponto de contato das hastes com os ramos. Os acelerômetros foram fixados diretamente no ramo utilizando abraçadeiras autotravantes plásticas, de massa desprezível. Para diminuir a influência da

massa dos cabos dos acelerômetros no experimento, foi utilizado um suporte com a finalidade de apoiá-los. Na Figura 5 é apresentada a configuração experimental empregada durante os ensaios de vibração.

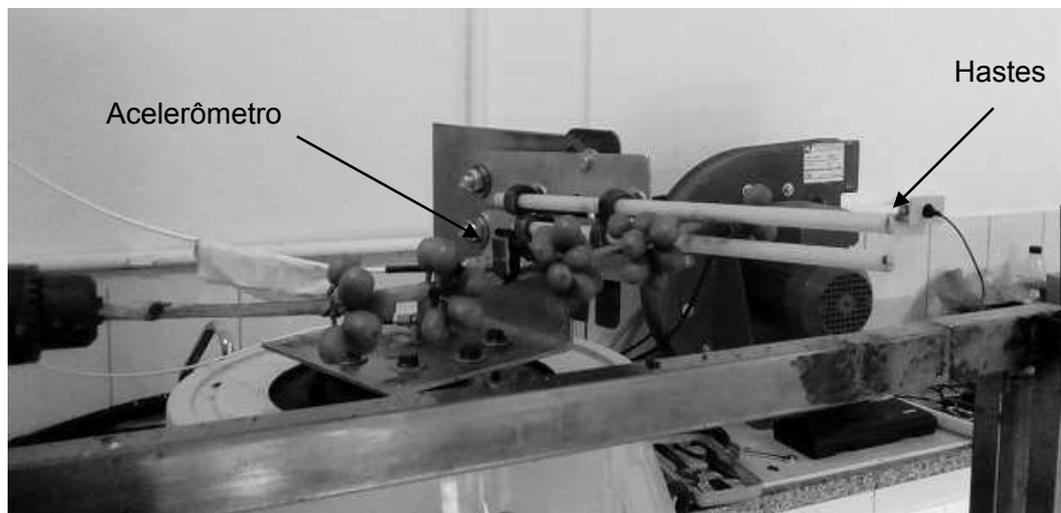


Figura 5: Configuração experimental empregada para a realização do ensaio de vibração.

A aquisição dos sinais de aceleração advindos do ramo foi realizada por meio de um sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, composto por um chassi NI cDAQ-9174 e um módulo NI 9234 com quatro canais coaxiais. O sistema de aquisição foi conectado ao computador, sendo gerenciado pelo software *LabView versão 14.5 (National Instruments)*. Posteriormente, os dados de aceleração em função do tempo foram processados para obter o valor RMS (*Root Mean Square*) de aceleração. Dessa forma, a transmissibilidade do ramo de café foi determinada por meio da Equação 1.

$$T = \frac{a_p}{a_e} \quad (1)$$

em que,

$T$  = transmissibilidade;

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

$a_e$  = aceleração de excitação,  $m/s^2$ .

Os dados referentes aos ensaios de transmissibilidade foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento inteiramente casualizado, com oito repetições. Empregou-se um esquema fatorial 2 x 3, considerando-se dois estádios de maturação (verde e cereja) e três frequências de vibração (20, 30 e 40 Hz). A amplitude empregada foi de 2 milímetros, sendo mantida constante para evitar o desprendimento dos frutos durante a vibração, fenômeno que induziria a erros na análise devido à alteração da massa da amostra durante a coleta de dados. As médias referentes aos fatores qualitativos foram avaliadas por meio do teste de Tukey à 5% de probabilidade. As médias referentes aos fatores quantitativos foram avaliadas por meio de análise regressão em que os modelos foram selecionados segundo a significância dos coeficientes e pelo coeficiente de determinação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados referentes à transmissibilidade dos sistemas fruto-pedúnculo-ramo foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk à 5% de probabilidade e apresentaram distribuição normal. Sendo assim foi realizado a análise de variância seguido do teste Tukey à 5% de probabilidade (Tabela 1). Os fatores frequência e maturação foram significativos, contudo a interação entre estes dois fatores não foi significativa.

Tabela 1: Análise de variância da transmissibilidade em função da frequência e maturação

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Maturação (A)	1	0,07	0,07	4,42	0,04*
Frequência (B)	2	0,37	0,18	11,63	0,00*
A x B	2	0,00	0,00	0,00	0,99
Resíduo	42	0,68	0,02		
Total	47	1,13			

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

O fator maturação foi significativo à 5% de probabilidade. Tal resultado diverge do encontrado por VILIBOR (2012). É válido ressaltar que, além de

uma metodologia diferente para a aquisição dos dados, o trabalho avaliava a transmissibilidade apenas do sistema fruto-pedúnculo. Neste trabalho, foram utilizadas frações do ramo de café visando obter o comportamento do sistema fruto-pedúnculo-ramo, diferencial que garante uma maior proximidade das condições de colheita no campo. Na Figura 6 são apresentadas as transmissibilidades médias obtida em cada estágio de maturação.

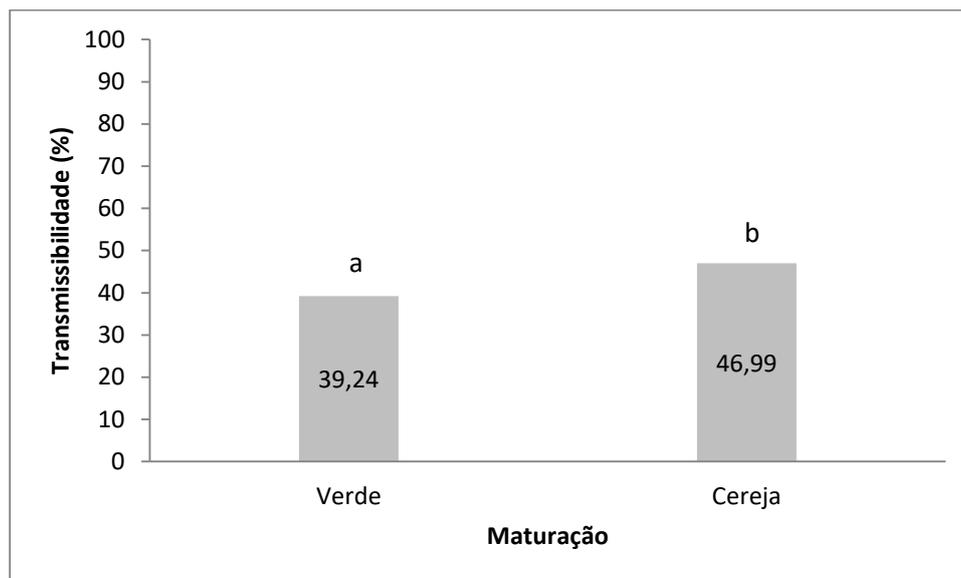


Figura 6: Média dos valores de transmissibilidade em função da maturação (%).

A transmissibilidade média obtida para ramos com frutos no estágio de maturação cereja foi maior que para o verde. Ao estudar as propriedades físicas do café Coelho et. al. (2015) determinaram a massa média dos frutos do cafeeiro e obtiveram como resultado que frutos no estágio de maturação cereja possuem 24,64% mais massa quando comparados aos verdes. O ramo de café não sofre mudança em sua rigidez com a variação da maturação dos frutos, sendo assim, uma amostra com maior massa irá sofrer maior deflexão durante um movimento vibratório. Maiores deflexões implicam em maiores acelerações, garantindo assim uma maior transmissibilidade da energia de vibração. Analisando a massa média das amostras utilizadas no experimento foi obtido um valor de 54,7g para as amostras de maturação cereja e 50,6g para as amostras de maturação verde.

Pode-se inferir com este resultado que uma colheita seletiva seria algo viável no tocante de transmissibilidade de vibração. Além dos ramos contendo

frutos na maturação cereja transmitirem com menor perda de energia a excitação inicial, os pedúnculos apresentam menor rigidez, o que facilita o processo de derriça dos frutos (Santos et al., 2015). Contudo, outros fatores como frequência, amplitude e forma de transmissão da vibração são essenciais para a obtenção do comportamento almejado.

Na Figura 7 são apresentados os valores de transmissibilidade média em função do fator frequência. Este fator é amplamente estudado em trabalhos sobre colheita por vibrações mecânicas, e sempre observado como significativo nas análises estatísticas, o que reflete sua importância no processo de colheita mecanizada (Oliveira et al., 2007; Santos et al., 2010a; Santos et al., 2010b; VILIBOR, 2012; Coelho et al., 2016).

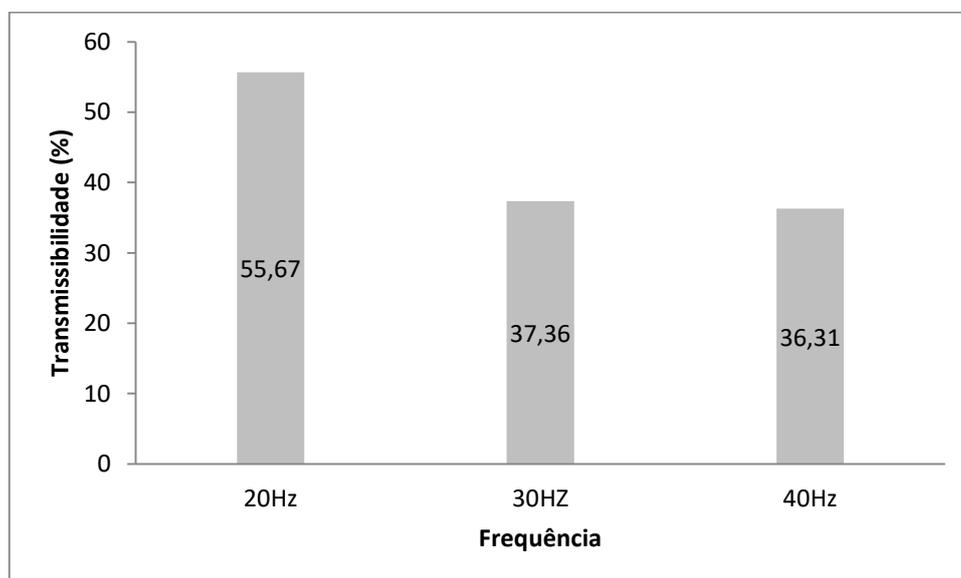


Figura 7: Transmissibilidade média nas frequências de 20, 30 e 40Hz.

Na frequência de 20 Hz foi observada a maior transmissibilidade, superando os níveis de 30 e 40 Hz. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato da frequência de ressonância do sistema fruto-pedúnculo ser próxima a este valor. Tinoco et al. (2014) apontam a frequência de 18,56Hz e 17,01Hz como a primeira frequência natural do fruto do cafeeiro nos respectivos estádios de maturação verde e cereja. Santos et al. (2015) obteve o valor médio de 23,20 Hz e 19,90 Hz para a primeira frequência natural de ressonância dos frutos de café para os respectivos estádios de maturação verde e cereja. Coelho et al. (2016) determinaram a frequência natural do

sistema fruto-pedúnculo obtendo os valores médios de 18,64 Hz para os frutos verdes e 17,38 Hz para os frutos cereja.

Os valores encontrados pelos autores (Tinoco et al., 2014; Santos et al., 2015; Coelho et al., 2016) são próximos, e a pequena diferença existente pode-se atribuir à variedade de café estudada e a metodologia de obtenção desses valores. É válido ressaltar novamente que as frequências naturais encontradas se referem ao sistema fruto-pedúnculo. Contudo, pode-se inferir que a resposta das amostras deve-se a contribuição dos sistemas fruto-pedúnculo excitados a uma frequência próxima a de ressonância, que interferem diretamente no comportamento do sistema fruto-pedúnculo-ramo.

O fenômeno de ressonância é caracterizado quando um sistema físico recebe energia por meio de excitações de frequência igual a uma de suas frequências naturais de vibração. Assim, esse sistema passa a vibrar com amplitudes cada vez maiores (Rao, 2011). Este fenômeno, que na maioria das vezes é evitado em projetos de máquinas e estruturas, é uma característica desejável no tocante de derriça de frutos por vibrações. Induzir o fenômeno da ressonância no sistema fruto-pedúnculo-ramo garante maior transmissibilidade da vibração e, conseqüentemente, maior eficácia na colheita.

Por se tratar de uma variável quantitativa pode-se analisar a frequência por meio de análise de regressão (Tabela 2). Foi determinado um modelo para descrever a transmissibilidade em função da frequência de vibração.

Tabela 2: Resultado da análise de regressão linear da transmissibilidade em função da frequência de vibração

FV	GL	SQ	QM	F	P-Valor
Regressão	1	0,29	0,29	18,41*	0,00
Resíduo	42	0,68	0,02		

\* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A Equação 2 representa o modelo linear escolhido para descrever a transmissibilidade em função da frequência de vibração. A Figura 8 ilustra o comportamento da transmissibilidade em função da frequência de vibração.

$$Tr = -0,97F + 72,15 \quad (R^2 = 79\%) \quad (2)$$

em que,

$Tr$  = Transmissibilidade de vibração(%);

$F$  = Frequência de vibração (Hz).

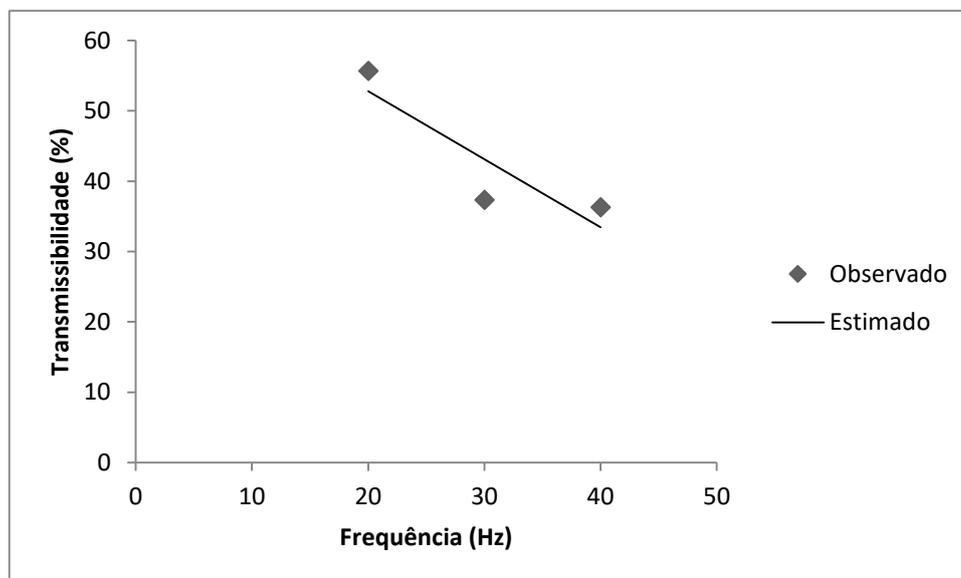


Figura 8: Modelo linear para a transmissibilidade em função da frequência.

A análise de regressão linear apresentou coeficiente de determinação aceitável. Entretanto, ao se avaliar a transmissibilidade considerando-se um número maior de níveis frequências, provavelmente, este modelo não seja representativo. Tal afirmação pode ser explicada baseada em que a transmissibilidade tem como fator principal a excitação da estrutura em níveis de frequência próximos à sua frequência natural do sistema, ou seja, os maiores valores são atingidos quando ocorre o fenômeno de ressonância.

#### 4. CONCLUSÃO

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

- As amostras do sistema fruto-pedúnculo-ramo contendo frutos na maturação cereja obtiveram maior transmissibilidade da vibração.

- A frequência de 20 Hz foi a que apresentou maior transmissibilidade de vibração, superando os níveis mais altos de 30 e 40 Hz.
- A frequência de 20 Hz obteve maior transmissibilidade devido ao fato da frequência natural do sistema fruto-pedúnculo ser próxima a este valor, e influenciar a resposta global do sistema avaliado (fruto-pedúnculo-ramo).

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COELHO, A. L. F.; SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C. Dynamic behavior of the coffee fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. **CoffeeScience**, v. 11, p. 1, 2016.

COELHO, A. L.F.; SANTOS, F.L.; PINTO, F.A. C.; QUEIROZ, D.M. Detachment efficiency of fruits from coffee plants subjected to mechanical vibrations. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Online)**, v. 45, p. 406-412, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Café V.4 - Safra 2017 – N.1 - Primeiro levantamento, janeiro/2017**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 11 de Julho de 2017.

CUNHA, J. P. B.; SILVA, F. M.; DIAS, R. E. B. A.; LISBOA, C. F.; MACHADO, T. A.; Viabilidade técnica e econômica de diferentes sistemas de colheita do café. **Coffee Science**, v. 11, n. 3, p. 416 - 425, jul./set. 2016.

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.

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

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**; Quarta Edição: Editora PEARSON, 3ª reimpressão. 448p. 2011.

SANTINATO, F.; SILVA, R. P.; CASSIA, M. T.; SANTINATO, R. Análise quali-quantitativa da operação de colheita mecanizada de café em duas safras. **Coffee Science**, v. 9, n. 4, p. 495 - 505, out/dez. 2014.

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, 2010a.

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

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

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

TINOCO, H. A.; OCAMPO, D. A.; PEÑA, F. M.;SANZ-URIBE, J. R. Finiteelement modal analysis of the fruit-peduncle of Coffea arabica L. var. Colombia estimatingist geometrical and mechanical properties. **Computer and Electronics in Agriculture**, 108(1), 17-27. 2014.

VILLIBOR, G. P.; SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M. de.; KHOURY JUNIOR, J. K.; PINTO, F. A. C. Determination of modal properties of the coffee fruit-stem system using high speed digital video and digital image processing. **Acta Scientiarum. Technology (Impresso)**, v. 38, p. 41-48, 2016.

VILLIBOR, G. P. **Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de derricha do café**. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.2012.

## CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro e sua associação com o impacto das hastes de colheita. Os experimentos foram realizados utilizando amostras da planta de café da variedade Catuai Vermelho.

No primeiro capítulo foram realizados ensaios de eficiência de derriça em que amostras dos ramos do cafeeiro, contendo frutos nos estádios de maturação verde e cereja, foram submetidos à vibrações mecânicas em diferentes frequências, amplitudes e forma de transmissão da vibração.

No segundo capítulo foi avaliada a transmissibilidade média em amostras de ramos do cafeeiro, contendo frutos nos estádios de maturação verde e cereja, submetidas a vibração devido o impacto das hastes de colheita em diferentes frequências de oscilação.

Com base nos resultados obtidos experimentalmente, pode-se concluir que:

- A eficiência de derriça aumenta na medida em que o estágio de maturação progride de verde para cereja.
- Observa-se uma maior eficiência de derriça na medida em que se aumenta a frequência e a amplitude de vibração, uma vez que maior energia vibracional imposta ao fruto.
- Em um processo de vibração onde não há impacto nos frutos, a eficiência de derriça foi baixa, indicando que os níveis dos fatores frequência e amplitude, empregados nesse trabalho, não estão adequados para uma colheita eficiente.
- Ao utilizar o impacto das hastes em associação com a vibração os valores médios de eficiência de derriça chegaram a 90%.

- A eficiência de derrça em um processo onde há vibração em associação com o impacto das hastes pode ser até 82% superior quando comparado a um processo sem o impacto de hastes vibratórias.
- As amostras do sistema fruto-pedúnculo-ramo contendo frutos na maturação cereja obtiveram maior transmissibilidade da vibração.
- A frequência de 20 Hz foi a que apresentou maior transmissibilidade de vibração, superando os níveis mais altos de 30 e 40 Hz.
- A frequência de 20 Hz obteve maior transmissibilidade devido ao fato da frequência natural do sistema fruto-pedúnculo ser próxima a este valor, e influenciar a resposta global do sistema avaliado (fruto-pedúnculo-ramo).