



MARIANA RIBEIRO PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DA PLANTA DO CAFEIEIRO
VISANDO A COLHEITA MECANIZADA POR VIBRAÇÕES
MECÂNICAS**

LAVRAS – MG

2023

MARIANA RIBEIRO PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DA PLANTA DO CAFEIEIRO VISANDO A
COLHEITA MECANIZADA POR VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

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

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos
Orientador
Prof. Dr. Hector Andres Tinoco Navarro
Coorientador
Prof. Dr. Geice Paula Villibor
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2023**

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

Pereira, Mariana Ribeiro

Caracterização dinâmica da planta do cafeeiro visando a colheita mecanizada por vibrações mecânicas / Mariana Ribeiro Pereira. – Lavras : UFLA, 2023.

81 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de Lavras, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos.

Bibliografia.

1. Mecanização Agrícola. 2. Transmissibilidade. 3. Análise Modal Experimental.

MARIANA RIBEIRO PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DA PLANTA DO CAFEEIRO VISANDO A
COLHEITA MECANIZADA POR VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

**DYNAMIC CHARACTERIZATION OF THE COFFEE PLANT FOR
MECHANICAL HARVESTING THROUGH MECHANICAL VIBRATIONS**

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

APROVADA em 28 de julho de 2023

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos	UFLA
Prof. DSc. Francisco Scinocca	UFLA
Prof. DSc. Daniel Marçal de Queiroz	UFV



Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos
Orientador (a)

Prof. Dr. Geice Paula Villibor
Coorientador (a)

Prof. Dr. Hector Andres Tinoco Navarro
Coorientador (a)

**LAVRAS – MG
2023**

*Dedico aos meu pais, Edgar e Solange, ao meu irmão Thales, aos meus avós, ao meu
namorado, aos amigos e familiares que estiveram comigo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por essa conquista.

Aos meus pais, Edgar e Solange, por toda ajuda, por sempre apoiarem minhas decisões e confiarem em mim.

Ao meu irmão pelo incentivo.

Aos meus avós pelas orações.

Ao meu namorado Luan pela paciência, companheirismo e ajuda na coleta dos dados experimentais.

Aos meus amigos pelo apoio.

Ao meu orientador Prof. Fábio Lúcio Santos pela disposição, amizade e ensinamentos ao longo de toda minha trajetória acadêmica, sendo fundamental para a realização desse trabalho.

Aos meus coorientadores Geice Villibor e Hector Tinoco pela orientação e ajuda.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Engenharia e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de complementar minha formação acadêmica com a realização do Mestrado.

Às agências CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro ao longo desse trabalho.

RESUMO

A colheita mecanizada do café tem sido realizada de forma eficiente por meio do princípio de vibrações mecânicas, sendo afetada por fatores relacionados à máquina e à planta, tornando-se necessário o conhecimento de suas propriedades modais. Neste contexto, este trabalho foi desenvolvido com o intuito de caracterizar o comportamento dinâmico das plantas de café visando a determinação de suas propriedades modais em condições de campo, considerando cargas pendentes de frutos em diferentes estádios de maturação. Para isso, foi realizado a instrumentação de quinze plantas escolhidas ao acaso, para a coleta dos dados de campo avaliando-se diferentes cenários. A partir de ensaios de análise modal experimental, foi possível observar que houve maior incidência de picos de frequências naturais concentrando-se entre 20 e 40 Hz. Os valores das razões de amortecimento dos ramos plagiotrópicos das plantas de café com frutos predominantemente maduros, relativas aos terços superiores, médios e inferiores, foram 0,145, 0,134 e 0,127, respectivamente. Por meio da indução de vibrações mecânicas, foi possível determinar os valores de transmissibilidade de vibração das plantas do café, em que a frequência de 20 Hz apresentou maior transmissibilidade de vibração em relação as demais frequências induzidas. Por fim, a partir de ensaios de varredura de frequências foi possível avaliar o comportamento dinâmico das plantas de café, os quais mostraram que houve uma maior incidência de picos de frequências naturais concentrando-se acima de 40 Hz. A partir deste estudo, observou-se que a colheita seletiva dos frutos de café mediante aplicação exclusiva de vibração torna-se inviável, já que não houveram diferenças significativas para as cargas pendentes de frutos em diferentes estádios de maturação e também devido a sobreposição de valores de frequências observados nas faixas de frequência estudadas.

Palavras-chave: Mecanização Agrícola. Transmissibilidade. Análise Modal Experimental. Varredura de Frequências.

ABSTRACT

The coffee mechanized harvesting has been carried out efficiently by using the mechanical vibrations theory, being affected by factors related to the machine and the plant, making it necessary to know its modal properties. In this context, this work was developed with the aim of characterizing the dynamic behavior of coffee plants in order to determine their modal properties in the field conditions, considering fruits at different maturation stages, mature and immature beans. For this, the instrumentation of fifteen plants chosen at random was carried out, for the collection of field data evaluating different scenarios. From experimental modal analysis tests, it was possible to observe that there was a higher incidence of natural frequency peaks concentrating between 20 and 40 Hz. The values of the damping ratios of plagiotropic branches of coffee plants with predominantly mature fruits, relative to the upper, middle and lower parts, were 0.145, 0.134 and 0.127, respectively. Through the induction of mechanical vibrations, it was possible to determine the values of vibration transmissibility of coffee plants, in which the frequency of 20 Hz presented greater vibration transmissibility in relation to the other induced frequencies. Finally, from frequency range tests it was possible to evaluate the dynamic behavior of coffee plants, which showed that there was a higher incidence of natural frequency peaks concentrated above 40 Hz. From this study, it was observed that the selective harvesting of coffee fruits using the exclusive application of vibration becomes unfeasible, since there were no significant differences for the fruits at different stages of maturation and also due to the overlapping of values of frequencies observed in the studied frequency range.

Keywords: Agricultural Mechanization. Transmissibility. Experimental Modal Analysis., Range of Frequency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Metodologia proposta para determinação de frequências naturais e razões de amortecimento das plantas de café.	31
Figura 2.2 – Área de estudo do experimento	32
Figura 2.3 – Esquema da planta de café, em condições de campo, com a indicação do ponto de impacto do martelo (A) e dos pontos de leitura do acelerômetro (B, C, D e E).	36
Figura 2.4 – Desenho esquemático da montagem experimental proposta para o trabalho	37
Figura 2.5 – Reposta teórica de decaimento da oscilação de um sistema subamortecido submetido a um deslocamento inicial	38
Figura 2.6 – Função de reposta em frequência e coerência para o terço superior dos ramos plagiotrópicos das plantas 11, 12, 15 e 17 para os estádios de maturação maduro e imaturo.	41
Figura 2.7 – Frequências naturais médias para cada estádio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, de acordo com a posição na planta, em Hz.	42
Figura 2.8 – Frequências naturais médias dos ramos plagiotrópicos para cada posição na planta de acordo com o estádio de maturação dos frutos, em Hz.	44
Figura 2.9 – Razão de amortecimento média dos ramos plagiotrópicos em relação a posição na planta para o estádio de maturação maduro dos frutos.	48
Figura 3.1 – Metodologia proposta para o trabalho	54
Figura 3.2 – Área de estudo do experimento	55
Figura 3.3 – Esquema da planta de café, em condições de campo, com a indicação do ponto de excitação do vibrador eletromecânico (A) e dos pontos de leitura do acelerômetro (B, C, D, E, F e G).	56
Figura 3.4 – Desenho esquemático da montagem experimental proposta para o trabalho	57
Figura 3.5 – Transmissibilidade de vibração média observada para as plantas de café para cada frequência de vibração avaliada.	61
Figura 3.6 – Função de reposta em frequência para o terço superior dos ramos plagiotrópicos das plantas 4, 11, 12 e 15 para os estádios de maturação maduro e imaturo.	68

Figura 3.7 – Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência advindas dos ensaios de varredura de frequência, de acordo com a posição na planta, em Hz.	69
Figura 3.8 – Frequências naturais médias dos ramos plagiotrópicos para cada posição na planta de acordo com o estágio de maturação dos frutos, em Hz.	70
Figura 3.9 – Frequências naturais médias dos ramos ortotrópicos para cada posição na planta de acordo com o estágio de maturação dos frutos, em Hz.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e maturação sobre a frequência natural dos ramos plagiotrópicos das plantas de café.	44
Tabela 2.2 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e maturação sobre a quarta faixa de frequência (40 à 50 Hz) dos ramos plagiotrópicos das plantas de café.	46
Tabela 2.3 – Desdobramentos da quarta faixa de frequência natural (40 à 50 Hz) para a posição na planta sobre a frequência natural, em Hz.	46
Tabela 2.4 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito do fator maturação sobre a frequência natural dos ramos ortotrópicos para o terço superior das plantas de café.	47
Tabela 3.1 – Principais características técnicas dos acelerômetros utilizados nos ensaios para a determinação da transmissibilidade de vibração	57
Tabela 3.2 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e estágio de maturação sobre a transmissibilidade de vibração dos ramos plagiotrópicos das plantas de café.	62
Tabela 3.3 – Desdobramento da transmissibilidade sobre o fator posição na planta para os ramos plagiotrópicos.	63
Tabela 3.4 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores frequência de vibração e estágio de maturação sobre a transmissibilidade de vibração dos ramos plagiotrópicos das plantas de café.	63
Tabela 3.5 – Desdobramento da transmissibilidade sobre o fator frequência de vibração para os ramos plagiotrópicos.	64
Tabela 3.6 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e estágio de maturação sobre a transmissibilidade de vibração dos ramos ortotrópicos das plantas de café.	65
Tabela 3.7 – Desdobramento da transmissibilidade sobre o fator posição na planta para os ramos ortotrópicos.	66
Tabela 3.8 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores frequência de vibração e estágio de maturação sobre a transmissibilidade de vibração dos ramos ortotrópicos das plantas de café.	66

Tabela 3.9 – Desdobramento da transmissibilidade sobre o fator frequência de vibração para os ramos ortotrópicos.	67
Tabela 3.10 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e maturação sobre a frequência natural dos ramos plagiotrópicos das plantas de café, obtidas por meio da varredura de frequência.	71
Tabela 3.11 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e maturação sobre a frequência natural dos ramos ortotrópicos das plantas de café, obtidas por meio da varredura de frequência.	71

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1	INTRODUÇÃO	14
1.2	OBJETIVO GERAL	15
1.2.1	Objetivos Específicos	15
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
1.3.1	Planta do Cafeeiro	16
1.3.2	Colheita Mecanizada de Café	17
1.3.3	Vibrações Mecânicas	18
1.3.4	Transmissibilidade de Vibração	21
1.3.5	Análise Modal	22
1.4	ESCOPO DO TRABALHO	27
2	CAPÍTULO 2 – DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MODAIS DA PLANTA DO CAFEIRO: UM ESTUDO REALIZADO EM CONDIÇÕES DE CAMPO	29
2.1	INTRODUÇÃO	29
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	31
2.2.1	Caracterização da Área Experimental	31
2.2.2	Determinação das Frequências Naturais e Razões de Amortecimento das Plantas de Café	32
2.2.3	Análise Estatística dos Dados	39
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
2.4	CONCLUSÃO	49
3	CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DA TRANSMISSIBILIDADE DE VIBRAÇÃO E DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DAS PLANTAS DE CAFÉ EM CONDIÇÕES DE CAMPO	51
3.1	INTRODUÇÃO	51
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	53
3.2.1	Caracterização da Área Experimental	54
3.2.2	Transmissibilidade de Vibração e Varredura de Frequência em Plantas de Café	55
3.2.3	Análise Estatística dos Dados	59
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60

3.4	CONCLUSÃO	72
4	CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES GERAIS	74
	REFERÊNCIAS	76

1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO

Os três maiores produtores mundiais de todos os tipos de café são o Brasil, o Vietnã e a Colômbia, que respondem por quase 70% da produção mundial (ICO, 2022). Além de maior produtor de café, o Brasil também se destaca como maior exportador do produto. No ano de 2022, o Brasil obteve uma produção de café arábica de 32,72 milhões de sacas e de café conilon de 18,20 milhões de sacas, totalizando aproximadamente 50,92 milhões de sacas beneficiadas. Para o ano de 2023, estima-se uma produção de 37,93 milhões de sacas para o café arábica e de 16,81 milhões de sacas para o café conilon, totalizando aproximadamente 54,74 milhões de sacas beneficiadas, o que significa um aumento de 15,9% em comparação ao resultado obtido na safra passada para o café arábica, devido a bialidade de produção da cultura e, uma diminuição de 7,6% para o café conilon, devido as condições climáticas adversas registradas no principal estado produtor, o Espírito Santo (CONAB, 2022).

Dentre os estados produtores de café no Brasil, destaca-se Minas Gerais, que em 2022, obteve uma produção de café de aproximadamente 21,96 milhões de sacas, o que representa aproximadamente 60% da produção total de café arábica no Brasil. Das sacas produzidas em Minas Gerais, cerca de 9,6 milhões advêm do Sul e Centro Oeste de Minas, representando aproximadamente 40% da produção total de café no estado e 30% da produção total de café no Brasil (CONAB, 2022).

A colheita do café está dividida em seis operações: arruação, derriça, varrição, recolhimento, abanação e transporte. Segundo Silva et al. (2002), a operação de derriça é a que mais influencia no custo e no tempo da colheita. Uma das formas de diminuir tais perdas é por meio da colheita mecanizada, o que pode ser confirmado nos trabalhos desenvolvidos por Oliveira et al. (2007) e Cunha et al. (2016), os quais concluíram que o sistema mecanizado de colheita do café apresenta significativa viabilidade técnica e econômica quando comparado ao sistema manual, a partir da redução de custos e aumento da produção.

A colheita mecanizada do café já tem sido realizada por alguns anos, de forma eficiente, por meio do princípio de vibrações mecânicas, conforme os trabalhos de Barbosa et al. (2005), Santos et al. (2010a), Santos et al. (2010b), Coelho et al. (2015a), Velloso et al. (2018), Gomes et al. (2020a), Gomes et al. (2020b) e Kazama et al. (2021). Tal princípio se baseia na transferência

de energia mecânica para o sistema fruto-pedúnculo, o qual promove o destacamento dos frutos dos pedúnculos.

A colheita do café por meio de vibrações mecânicas deve apresentar elevadas taxas de desprendimento dos frutos (derricha) no estágio de maturação maduro, baixos índices de recolheita, além de redução dos danos causados às plantas, como desfolha e quebra excessiva de ramos. Uma das formas de alcançar tais objetivos é através do aperfeiçoamento das máquinas que são utilizadas para colheita dos frutos e que utilizam tal princípio, através da sintonização da frequência natural com a frequência de excitação da máquina. Para isso torna-se necessário o conhecimento das propriedades dinâmicas das plantas de café, como frequências naturais, razões de amortecimento, bem como a transmissibilidade, as quais podem ser determinadas por meio do emprego de análise modal (COELHO et al., 2015a; SANTOS et al., 2010b; CARVALHO; MAGALHÃES; SANTOS, 2016).

A análise modal tem por finalidade determinar as propriedades dinâmicas a partir de excitações causadas por vibrações. A análise modal está pautada em medições e análises da resposta dinâmica de sistemas quando submetidos à uma força externa excitadora ou variável no tempo. Seja numérica ou experimental, ela é uma importante ferramenta para determinar, melhorar e otimizar características dinâmicas de sistemas mecânicos, como frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração.

Na literatura científica não existem registros de trabalhos que tenham objetivado a caracterização dinâmica da planta do cafeeiro em condições de campo. Este tipo de estudo é importante para validação dos modelos, aprimoramento dos modelos existentes e desenvolvimento de projetos de máquinas para colheita, contribuindo significativamente para a redução de custos na agroindústria (SOUZA et al., 2018).

1.2 OBJETIVO GERAL

Caracterizar o comportamento dinâmico das plantas de café visando a colheita mecanizada por vibração.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Determinar as frequências naturais e as razões de amortecimento das plantas de café, a partir de análise modal experimental;

- Determinar a transmissibilidade ao longo das plantas de café e o seu comportamento dinâmico quando submetidas a vibração;

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3.1 Planta do Cafeeiro

O cafeeiro, planta de longevidade perene, é um arbusto de crescimento contínuo, possui caule quase cilíndrico e lenhoso, seus ramos apresentam um dimorfismo relacionado com a direção do seu crescimento. Aqueles que se desenvolvem no sentido vertical são denominados de ortotrópicos, enquanto aqueles que tomam a direção horizontal, pela ação da gravidade, crescendo lateralmente, são os plagiotrópicos, e é por meio deles que a formação dos frutos de café acontece. Os ramos plagiotrópicos dão origem a ramos terciários, formando o “palmetamento”, uma característica desejada, já que aumenta a área produtiva da planta. A planta apresenta sistema radicular esbranquiçado em forma cônica, onde 80% das raízes prevalecem nos primeiros 20 cm de profundidade, nas chamadas raízes da placa superficial (CARVALHO et al., 2008).

O café pertence à família Rubiaceae que abrange mais de 10 mil espécies agrupadas em 630 gêneros. Dentre esses gêneros, o gênero *Coffea* é o mais importante economicamente, com destaque para as suas duas principais espécies: *Coffea arabica* L. (café arábica), responsável por cerca de 70% do café comercializado mundialmente, e *Coffea canéfora* (café robusta), utilizado mais comumente no preparo de misturas (blends). Ambas as espécies são originárias da África, no entanto, os grãos arábica são da Etiópia e os de conilon são da Bacia do Congo (SOUZA et al., 2004).

Em Minas Gerais, o maior estado produtor de café do Brasil, praticamente 100% das plantações são de café Arábica, já no Espírito Santo, o segundo maior estado produtor de café do Brasil, as plantações são de café Conilon (Robusta) (CONAB, 2022). As duas espécies se diferem em vários aspectos, como por exemplo em relação à resistência da planta, aos formatos dos grãos, ao aroma e sabor, ao consumo e no valor final do produto, dentre outros (SOUZA et al., 2004).

Existem muitas variedades da planta de café Arábica, sendo as mais comuns nas regiões produtoras brasileiras o Catuaí, que se subdivide em Catuaí Amarelo e Vermelho, e Mundo Novo. Os cultivares Catuaí Vermelho e Catuaí Amarelo apresentam baixa estatura, permitindo uma maior densidade de plantio, tornando mais fácil a colheita e mais eficientes os tratamen-

tos fitossanitários. Já o cultivar Mundo Novo apresenta elevada estatura, necessitando de um espaçamento maior do que o normalmente utilizado com cultivares de baixo porte.

1.3.2 Colheita Mecanizada de Café

A utilização de sistemas mecanizados nas lavouras de café reduz a necessidade de mão-de-obra, trazendo vantagem aos produtores uma vez que a disponibilidade de mão-de-obra para a colheita manual de café é cada vez menor nas operações. Além disso, uma maior capacidade operacional dos sistemas de colheita mecanizada permite a realização da colheita mais próxima do momento ideal de colheita, em que os frutos estão com estágio de maturação maduros, contribuindo para uma melhor qualidade do produto final.(CUNHA et al., 2016).

Além disso, a colheita mecanizada comparada à manual apresenta impacto significativo na composição de custos, contribuindo para a sua redução, refletindo em maiores rendimentos para o produtor (LANNA; REIS, 2012; CUNHA et al., 2016; TAVARES et al., 2015).

A colheita do café pode ser manual, semimecanizada ou mecanizada, e sua adoção depende de inúmeros fatores, dentre eles o nível tecnológico do produtor, as características das plantas e a topografia das áreas. O sistema de colheita manual consiste na realização das diversas operações da colheita, com exceção do transporte, a partir de serviços manuais. Já o sistema de colheita semimecanizado, consiste na utilização intercalada de processos manuais e de máquinas para a execução das operações de colheita, podendo ter apenas uma ou quase todas as operações realizadas mecanicamente. Em relação ao sistema mecanizado, todas as operações de colheita são realizadas mecanicamente (CUNHA et al., 2016).

A colheita semimecanizada normalmente se concentra na derriça dos frutos, podendo atender tanto a pequenos e médios, quanto a grandes produtores. Por se tratar de máquinas e equipamentos de menor porte, ela se adequa melhor a áreas em que a topografia, a arquitetura das plantas e a distribuição espacial das lavouras são desfavoráveis ao uso das colhedoras automotrizes ou tracionadas. Atualmente, a colheita semimecanizada utiliza as derriçadoras portáteis, que são manejadas manualmente e acionadas por motores laterais ou costais, com varetas nas extremidades de suas hastes, elas utilizam o princípio da vibração juntamente com o impacto para promover a derriça dos frutos. Estes equipamentos de derriça são considerados como alternativa viável, apresentando redução de 30% nos custos da colheita quando comparada à colheita manual (SOUZA et al., 2005; BARBOSA; SALVADOR; SILVA, 2005; SOBREIRA et al., 2015; SANTOS et al., 2015; KROLING et al., 2015; ALVES; COSTA; SANTOS, 2015).

A colheita mecanizada consiste no uso de colhedoras automotrizes, que possuem propulsão própria, e tracionadas, que necessitam ser acopladas a um trator por meio da barra de tração. O aperfeiçoamento dessas máquinas viabilizou a colheita mecânica em terrenos com declividade superior a 15% e, mais recentemente, a terceirização da colheita mecanizada está possibilitando a adoção desta prática também nas pequenas propriedades. Essas máquinas, a partir de varetas vibratórias, fazem o trabalho de derriça, recolhimento, abanação e descarga do café na forma ensacada ou a granel (MESQUITA et al., 2016a).

A partir da colheita mecanizada é possível realizar a derriça e o recolhimento do café contido nas plantas, no entanto, ainda há a necessidade de realizar o repasse manual, pois a colhedora dificilmente consegue derriçar todos os frutos das plantas com apenas uma operação, devido aos frutos apresentarem estágio de maturação desuniforme. Além disso, tem-se ainda o recolhimento do café presente no solo, comumente chamado café de varrição, que decorre por vários motivos, tais como: estágio avançado de maturação dos frutos (SILVA et al., 2010), incidência de pragas e doenças (MESQUITA et al., 2016b), ou ainda, pela própria ação da colheita mecanizada (SANTINATO et al., 2015).

As máquinas agrícolas desenvolvidas para a colheita mecanizada de café utilizam vibrações mecânicas como princípio de funcionamento (COELHO et al., 2015a). A partir da associação de fatores como frequência, amplitude e tempo de vibração, pode-se transferir energia mecânica suficiente para o desprendimento dos frutos (SANTOS et al., 2010a). Em associação às forças decorrentes do processo de vibração ocorrem impactos das varetas vibratórias junto aos ramos plagiotrópicos, o que induz forças de desprendimento suficientes para retirar os frutos de café da planta (GOMES et al., 2020b).

Para aumentar a eficiência de derriça dos frutos, sem que ocorram danos às plantas, os produtores precisam definir qual o momento adequado para iniciar a colheita (SILVA et al., 2013) e qual o melhor ajuste das máquinas, como velocidade operacional, frequência de excitação das varetas, tensão dos freios dos cilindros, número de passadas e quais ajustes devem ser feitos conforme as condições das plantas e do terreno (FERREIRA JÚNIOR et al., 2020; MESQUITA et al., 2016a; SANTINATO et al., 2015).

1.3.3 Vibrações Mecânicas

Vibração mecânica pode ser definida como qualquer movimento de um sistema em torno de uma posição de equilíbrio em um determinado intervalo de tempo. Geralmente, um sistema

vibratório inclui um meio que armazena energia potencial (mola ou elasticidade), um meio que armazena energia cinética (massa ou inércia) e um meio de dissipação gradual de energia (amortecedor). Logo, vibração se baseia na transferência de sua energia potencial para energia cinética e na energia cinética para potencial. Caso o sistema seja amortecido, certa quantidade de energia é dissipada em cada ciclo de vibração (RAO, 2017; MEIROVITCH, 2010).

As vibrações podem ser classificadas de diversas maneiras, sendo as mais importantes: vibração livre e forçada, vibração não amortecida e amortecida, vibração linear e não linear e vibração determinística e aleatória. Na vibração livre, o sistema sofre uma perturbação inicial e continua a vibrar por conta própria, já na vibração forçada, o sistema está sujeito à uma força externa que força o movimento ao longo do tempo. Na vibração não amortecida nenhuma energia é perdida ou dissipada por atrito, sendo oposta a vibração amortecida, em que ocorre perda de energia. Uma vibração é linear quando os componentes do sistema se comportam linearmente, e é não linear quando os componentes do sistema não se comportam linearmente. Na vibração determinística, o valor da excitação é conhecido em qualquer instante de tempo, já na vibração randômica, o valor da excitação em dado instante de tempo não pode ser previsto (RAO, 2017).

Para uma previsão precisa da resposta de vibração de um sistema, a consideração do amortecimento para seu estudo é importante. Na análise de vibração de sistemas biológicos, o amortecimento viscoso é o mecanismo de amortecimento comumente usado. Quando os sistemas mecânicos vibram em um meio fluido, como ar, gás, água ou óleo, a resistência oferecida pelo fluido ao corpo em movimento faz com que a energia seja dissipada. Nesse caso, a quantidade de energia dissipada depende de muitos fatores, como o tamanho e a forma do corpo, a viscosidade do fluido e a frequência da vibração. No amortecimento viscoso, a força de amortecimento é proporcional à velocidade do corpo vibratório (RAO, 2017; MEIROVITCH, 2010).

Quando um sistema, após uma perturbação inicial, continua a vibrar sem ação de forças externas, essa frequência de oscilação é chamada de frequência natural. A frequência natural do sistema está relacionada às suas propriedades físicas e mecânicas, sendo associada à sua rigidez e massa. A rigidez do sistema é função das características geométricas e das propriedades do material constituinte. Para cada frequência natural, existe um modo de vibração, que representa a forma como a estrutura vibra. Ao excitar um sistema em uma frequência coincidente com sua frequência natural, ocorre o fenômeno denominado ressonância, fazendo com que o sistema te-

na grandes oscilações. Estruturas como edifícios, pontes, turbinas e asas de aviões apresentam falhas que têm sido associadas à ocorrência de ressonância (RAO, 2017).

O sinal de vibrações pode ser analisado no domínio do tempo e do domínio da frequência. O domínio de tempo é uma representação bidimensional de amplitude no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal, já o domínio da frequência, representa a amplitude no eixo vertical e as frequências no eixo horizontal. No domínio do tempo, o sinal mostra o que está ocorrendo a cada instante, podendo revelar detalhes importantes das vibrações que não são visíveis no domínio da frequência, sendo possível a identificação da ocorrência de eventos de curta duração, como impactos, e determinar a sua taxa de repetição.

O sinal de vibração no domínio do tempo permite o cálculo de valores quantitativos globais: o valor eficaz (RMS), que é uma média global da vibração e representa a quantidade de energia contida em uma vibração, a amplitude, que é a medida de oscilação positiva e negativa de uma onda no tempo, o período, que é o tempo decorrido para que um ciclo seja completado, a frequência, que é o número de vezes que o movimento se repete em uma unidade de tempo, e a fase, que é a diferença entre a excitação da vibração e a resposta no sistema (RAO, 2017; MEIROVITCH, 2010).

Entretanto, quando existem muitas componentes no sinal, analisar a própria forma de onda no tempo pode ser muito trabalhoso e inviável. Além disso, existem informações dos sinais que não podem ser obtidas no domínio do tempo, tornando-se necessário a transformação do sinal para o domínio da frequência. Essa transformação pode ser obtida pela aplicação de métodos e ferramentas como a Transformada Rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform), que é um método de computar a Transformada Discreta de Fourier (DFT – Discrete Fourier Transform) de maneira eficiente, com menor custo computacional e o menor tempo de processamento. No domínio da frequência são obtidas as Funções de Resposta em Frequência (FRF), as quais relacionam a resposta medida com a entrada fornecida e permitem o acesso a informações úteis para a caracterização do comportamento dinâmico do sistema, sendo possível identificar as características modais da estrutura, como frequências naturais e fatores de amortecimento (EWINS, 2009; MEIROVITCH, 2010; AVITABILE, 2017; RAO, 2017).

Apesar dos efeitos negativos da vibração mecânica em determinados sistemas, ela pode ser aplicada de maneira positiva em máquinas para a colheita mecanizada, como é visto em culturas de café, damasco, laranja, pistache, azeitona, uva e macaúba. Através do conhecimento das propriedades mecânicas do sistema, os autores determinaram suas propriedades modais,

como as frequências naturais, modos de vibração e razão de amortecimento e, a partir delas, foi possível prever seu comportamento dinâmico (ERDOGAN et al., 2003; SANDERS, 2005; SOUZA et al., 2018; AIELLO; VALLONE; CATANIA, 2019; VILLAR et al., 2021; PEREIRA et al., 2022).

1.3.4 Transmissibilidade de Vibração

A transmissibilidade de vibração é um parâmetro que influencia diretamente na eficiência e na seletividade da colheita mecanizada de café, sendo importante para o desenvolvimento de novos dispositivos de colheita e definição de faixas de trabalho adequadas. A transmissibilidade pode ser dada em termos de deslocamento ou aceleração, a qual irá relacionar o deslocamento ou aceleração efetiva da resposta de um sistema com o deslocamento ou aceleração efetivo de entrada em cada ponto aferido (VILLIBOR et al., 2016; RAO, 2017; GOMES et al., 2020a).

A transmissibilidade de vibração apresenta valores elevados quando um sistema é submetido a vibração com frequência de excitação próxima à sua frequência natural. A vibração, quando imposta ao tronco da planta, deve ser transmitida através de todas as partes constituintes até chegar ao sistema fruto-pedúnculo do café. Porém, mesmo trabalhando em faixas de ressonância, a transmissibilidade de vibração entre o sistema e os dispositivos de derriça pode reduzir devido à presença de amortecimento no sistema em estudo (RAO, 2017; MEIROVITCH, 2010).

Castro-Garcia et al. (2020a) avaliaram o comportamento dinâmico dos ramos secundários de laranjeiras 'Valência' afim de determinar o efeito de frutos e folhas na resposta dinâmica do ramo cítrico. Os autores observaram que a transmissibilidade de aceleração ao longo do ramo diminuiu com o aumento da frequência de vibração, a presença de frutos no ramo reduziu ligeiramente os valores de transmissibilidade de aceleração e a presença de folhas nos ramos alterou a primeira frequência natural e amorteceu drasticamente a transmissibilidade de aceleração.

Sola-Guirado et al. (2018) analisaram a transmissão das vibrações geradas por um dispositivo vibrador de tronco para a estrutura da oliveira, considerando tanto a zona aérea, tronco e ramos, quanto a zona subterrânea, raízes. Os autores relataram que a transmissão da vibração para a parte aérea e subterrânea influencia de forma diversa o comportamento dinâmico da oliveira e, sua avaliação, pode contribuir para melhorar o desprendimento dos frutos, reduzir a quebra de ramos e a desfolha.

Castro-García, Blanco-Roldán e Gil-Ribes (2011) analisaram a resposta em frequência do pinheiro-manso (*Pinus Pinea L.*) com o intuito de definir os parâmetros de vibração para evitar danos à árvore e para a implementação de boas práticas de colheita. Os autores observaram que os frutos com maior massa receberam maiores amplificação de vibração através de seu caule, proporcionando condições favoráveis à derriça dos frutos.

A transmissibilidade de vibração vem sendo estudada em diferentes culturas cujas máquinas para a colheita utilizam como princípio de funcionamento as vibrações mecânicas. Gomes et al. (2020b) avaliaram a transmissibilidade média de vibração em amostras do sistema fruto-pedúnculo-ramo de café contendo frutos verdes e maduros. As amostras foram submetidas a três níveis de frequência de vibração, 20, 30 e 40 Hz, induzidas ao ramo com impacto de hastes de fibra de vidro rígidas movendo-se em amplitude constante 2 mm. A frequência de 20 Hz apresentou a maior transmissibilidade, devido ao fato da frequência natural do sistema ser próxima a este valor. As amostras que continham frutos cerejas apresentaram maior transmissibilidade de vibração quando comparadas àquelas contendo frutos verdes.

Villibor et al. (2019) analisaram a resposta dinâmica do sistema fruto-pedúnculo do café por meio de modelagem de corpos flexíveis. As simulações foram realizadas para estudar as forças e torques na ligação entre o fruto e o pedúnculo do café, a energia transmitida e a força resultante no fruto. A maior diferença na energia transmitida entre os estádios de maturação foi observada na frequência de 26,67 Hz associada às amplitudes de 10,00 e 15,00 mm, indicando uma faixa de trabalho que poderia ser favorável ao desprendimento seletivo dos frutos do café.

1.3.5 Análise Modal

A análise modal tem por finalidade determinar as propriedades dinâmicas a partir de excitações causadas por vibrações. O princípio de seus estudos deriva-se de medições e análise da resposta dinâmica estrutural quando submetidos à uma força externa. Seja numérica ou experimental, ela é uma importante ferramenta para determinar, melhorar e otimizar características dinâmicas de estruturas, como frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração (MAIA; SILVA, 1997; EWINS, 2009).

Um sistema com múltiplos graus de liberdade não amortecido, pode ser representado pela Equação 1.1.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1.1)$$

Onde $[M]$ e $[K]$ são matrizes de massa e rigidez, respectivamente, $\{x\}$ e $\{\ddot{x}\}$ são os vetores de deslocamento e aceleração e $\{F\}$ o vetor de forças externas aplicadas.

Os parâmetros modais são obtidos por meio da análise de vibração livre, portanto deve-se considerar $\{F\} = \{0\}$, obtendo a Equação 1.2, que descreve a vibração livre do sistema multi-graus de liberdade.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (1.2)$$

Esse sistema de equações apresenta uma solução geral representada pela Equação 1.3, onde s é um parâmetro que representa a taxa de crescimento exponencial ou decaimento do sinal $\{x(t)\}$ no domínio do tempo contínuo.

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{st} \quad (1.3)$$

Sendo $\{X\}$ um vetor (real ou complexo) de amplitudes de resposta independentes do tempo. A partir de $\{x(t)\}$, derivando-se duas vezes é possível encontrar o vetor de aceleração.

Substituindo a Equação 1.3 e sua derivada segunda na Equação 1.2, obtém-se a Equação 1.4.

$$([M]s^2 + [K])\{X\}e^{st} = \{0\} \quad (1.4)$$

Como e^{st} não se anula, tem-se a Equação 1.5.

$$([M]s^2 + [K])\{X\} = \{0\} \quad (1.5)$$

Para encontrar uma solução diferente da trivial, é necessário que a inversa da matriz $([M]s^2 + [K])$ não exista. Para não existir a inversa de uma matriz é necessário que o determinante dessa seja nulo, como mostra a Equação 1.6, conhecida como equação característica do sistema.

$$\det([M]s^2 + [K]) = 0 \quad (1.6)$$

A solução da expressão resultante da expansão deste determinante resultará nos autovalores do sistema que, por sua vez, correspondem às frequências naturais $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$. Substituindo cada um dos autovalores na equação 1.5 obtém-se os autovetores associados, que são

os modos próprios do sistema (RAO, 2017). Cada autovetor contém elementos que são quantidades reais (positivas ou negativas) e são conhecidos apenas em termos relativos. Portanto, sabe-se a direção dos vetores mas não sua magnitude absoluta.

Os autovetores do sistema podem ser agrupados em uma matriz $n \times n$, denominada matriz modal, onde a i -ésima coluna corresponde ao i -ésimo vetor modal, conforme Equação 1.7.

$$[X] = [X^{(1)} X^{(2)} \dots X^{(n)}] \quad (1.7)$$

Os autovetores apresentam uma propriedade importante, conhecida como ortogonalidade (Equações 1.8 e 1.9), os quais podem ser linearmente independentes, realizando assim, o desacoplamento de equações.

$$M_{ii} = X^{(i)T} [m] X^{(i)} \quad (1.8)$$

$$K_{ii} = X^{(i)T} [k] X^{(i)} \quad (1.9)$$

Para a Análise Modal, existe um processo de normalização chamado de normalização pela massa. Os autovetores normalizados pela massa podem ser escritos como $[\phi]$ o qual apresenta uma propriedade particular:

$$[\phi]^T [m] [\phi] = [I] \quad (1.10)$$

E assim

$$[\phi]^T [k] [\phi] = [\omega_r^2] \quad (1.11)$$

Para um modo de vibrar r , a relação entre o autovetor normalizado pela massa ϕ_r e sua forma geral X_r é dada pela Equação 1.12.

$$\phi_r = \frac{1}{\sqrt{M_r}} X_r \quad (1.12)$$

Os parâmetros modais também podem ser determinados de forma experimental, devido à inexistência de um modelo analítico ou, caso ele exista, para a validação e verificação dos resultados do mesmo.

A análise modal experimental segue o caminho reverso da análise modal teórica, iniciando com a medição da resposta da estrutura. Primeiramente, uma força de magnitude conhecida é aplicada na estrutura. Posteriormente, é realizada a aferição de vibração, por meio do sistema de aquisição de dados, que advém de transdutores dispostos na estrutura em pontos representativos. E, finalmente, por meio do processamento dos sinais de excitação e resposta, consegue-se estimar as respectivas Funções de Resposta em Frequência (FRF).

Se N amostras de $x(t)$ são coletadas em valores discretos de tempo, os dados podem ser usados para obter a forma discreta da transformada de Fourier conforme Equação 1.13.

$$x_j = x(t_j) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{N/2} \left(a_i \cos \frac{2\pi i t_j}{T} + b_i \sin \frac{2\pi i t_j}{T} \right) \quad (1.13)$$

Onde a_0 , a_i e b_i são dados pelas Equações 1.14, 1.15 e 1.16.

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \quad (1.14)$$

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \cos \frac{2\pi i t_j}{T} \quad (1.15)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \sin \frac{2\pi i t_j}{T} \quad (1.16)$$

As Equações 1.14, 1.15 e 1.16 denotam N equações algébricas para cada uma das N amostras e podem ser expressas em forma de matriz conforme Equação 1.17.

$$\vec{X} = [A] \vec{d} \quad (1.17)$$

Em que $\vec{X} = \{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n\}^T$ é o vetor de amostras, $\vec{d} = \{a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{N/2} \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{N/2}\}^T$ é o vetor de coeficientes espectrais e $[A]$ é matriz composta pelos coeficientes $\cos \frac{2\pi i t_j}{T}$ e $\sin \frac{2\pi i t_j}{T}$. O conteúdo de frequência do sinal ou resposta do sistema pode ser determinado a partir da solução da Equação 1.18.

$$\vec{d} = [A]^{-1} \vec{X} \quad (1.18)$$

Adicionalmente, o sistema de aquisição de dados traz informações sobre a função coerência. Esta função refere-se a medida da relação entre a potência do sinal de resposta em re-

lação à entrada, conforme as Equações 1.19, 1.20 e 1.21 (EWINS, 2009). Pode ser interpretada também como sendo análoga ao coeficiente de correlação aplicado ao domínio da frequência, e como uma medida dos ruídos presentes nos sinais. Tal função pode ser utilizada na verificação da qualidade do sinal medido, sendo um valor real entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1 for a função coerência, significa que os sinais são menos influenciados pelo ruído (RAO, 2017).

$$S_{xx}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{ff}(\omega) \quad (1.19)$$

$$S_{fx}(\omega) = H(\omega) S_{ff}(\omega) \quad (1.20)$$

$$S_{xx}(\omega) = H(\omega) S_{xf}(\omega) \quad (1.21)$$

Onde $S_{xx}(\omega)$ é a auto densidade espectral de potência da resposta, $S_{ff}(\omega)$ é a auto densidade espectral de potência da excitação, $S_{xf}(\omega)$ e $S_{fx}(\omega)$ são as densidades de potência cruzadas entre a excitação (força) e a resposta e $H(\omega)$ é a função de resposta em frequência que liga a excitação e a resposta.

Pode-se obter dois estimadores para a FRF, denominados por $H_1(\omega)$ e $H_2(\omega)$, os quais estão representados pelas Equações 1.22 e 1.23. O estimador $H_1(\omega)$ é influenciado principalmente por ruídos presentes no sinal de entrada, enquanto o estimador $H_2(\omega)$ é significativamente influenciado por ruídos presentes no sinal de saída.

$$H_1(\omega) = \frac{S_{fx}(\omega)}{S_{ff}(\omega)} \quad (1.22)$$

$$H_2(\omega) = \frac{S_{xx}(\omega)}{S_{xf}(\omega)} \quad (1.23)$$

A função coerência é definida pela razão entre os dois estimadores, conforme a Equação 1.24.

$$\gamma^2 = \frac{H_1(\omega)}{H_2(\omega)} \quad (1.24)$$

Segundo Rao (2017), quando um corpo é excitado em uma de suas frequências naturais ocorrem grandes deslocamentos, portanto, as frequências naturais aparecerão como pico de

frequências ressonantes nas Funções de Resposta em Frequência obtidas experimentalmente. Além disso, por meio delas, é possível encontrar também as razões de amortecimento.

Para a realização da Análise Modal Experimental é necessário dispor de um mecanismo de excitação, um sistema de transdução, que irá medir os diferentes parâmetros de interesse, e um analisador, para a extração das informações desejadas (EWINS, 2009).

Em sistemas mecânicos e biológicos, a medição de vibração é feita por dispositivos que convertam o movimento vibratório em sinais elétricos equivalentes, mais comumente a partir da medição de aceleração ou deslocamento. Esses dispositivos são chamados de transdutores.

Um dos transdutores mais utilizados na análise modal experimental é o acelerômetro piezoelétrico (VELLOSO et al., 2020a; SOUZA et al., 2018; GOMES et al., 2020a; GOMES et al., 2020b), que é capaz de medir a aceleração de um corpo sob vibração. Este tipo de transdutor consiste em um sistema massa-mola com elementos piezoelétricos, e a partir do movimento do massa-mola, o material piezoelétrico é deformado gerando uma diferença de potencial, o qual será convertido em aceleração de acordo com a sensibilidade do equipamento. Ele é fixado junto a estrutura, portanto, deve-se minimizar sua influência na resposta do sistema.

Outro transdutor utilizado para a excitação é o martelo de impacto (VELLOSO et al., 2020a), que produz uma excitação imposta manualmente. Ele possui diferentes ponteiros (plástico, metal, borracha) que permitem a variação da rigidez de acordo com a faixa de frequência de interesse a ser excitada. O uso do martelo de impacto apresenta vantagens em relação a outros transdutores quando deseja-se excitar a estrutura em vários pontos, facilitando assim, o ensaio.

Uma outra forma de excitação empregada é induzir vibrações mecânicas através de um dispositivo vibrador eletromecânico (GOMES et al., 2020b; COELHO et al., 2015a), o qual é responsável por gerar uma força senoidal de frequência constante durante o ensaio experimental. Assim como o acelerômetro, ele também é fixado junto a estrutura, portanto, deve-se minimizar sua influência na resposta do sistema (RAO, 2017; MAIA; SILVA, 1997; EWINS, 2009).

1.4 ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em quatro capítulos. O primeiro capítulo contém a introdução geral, a hipótese, objetivo geral e específicos e o referencial teórico. Os segundo e terceiro capítulos são compostos de artigos contendo introdução, material e métodos, resultados e discussão e conclusão.

No segundo capítulo é apresentado a análise modal experimental para as plantas de café em diferentes cenários. Foram avaliados fatores como estágio de maturação de frutos e posição de coleta dos dados ao longo da planta. Foi possível obter a frequência natural das plantas por meio da função resposta em frequência, com excitação através do martelo de impacto.

No terceiro capítulo é apresentado o estudo de transmissibilidade e varredura de frequências para as plantas de café em diferentes cenários. Também foram avaliados fatores como estágio de maturação de frutos e posição de coleta dos dados ao longo da planta. Foi possível obter os valores de transmissibilidade em cada cenário estudado, através dos dados de aceleração advindos de acelerômetros dispostos nas plantas, por meio de excitação através do excitador eletromagnético. Com a varredura de frequências, foi possível obter a frequência natural das plantas por meio da função resposta em frequência, em cada cenário estudado, com excitação através do excitador eletromagnético.

Por fim, o quarto capítulo apresenta uma conclusão geral sobre os resultados obtidos nos capítulos abordados neste trabalho.

2 CAPÍTULO 2 – DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MODAIS DA PLANTA DO CAFEIEIRO: UM ESTUDO REALIZADO EM CONDIÇÕES DE CAMPO

2.1 INTRODUÇÃO

O Brasil, além de ser um dos maiores produtores de café do mundo, também se destaca como maior exportador do produto (ICO, 2022). No ano de 2022, o Brasil obteve uma produção total de café de aproximadamente 50,92 milhões de sacas beneficiadas. Para o ano de 2023, estima-se uma produção total de aproximadamente 54,74 milhões de sacas beneficiadas, o que significa um aumento de 7,5% em comparação ao resultado obtido na safra passada, devido a bienalidade de produção da cultura (CONAB, 2022).

O café é um produto cujo valor está associado ao seu padrão de qualidade, portanto, desenvolver sistemas que propiciem a colheita do produto de melhor qualidade é uma forma de agregar valor ao produto, o que garante um maior retorno ao produtor. Uma das formas de obter um café de melhor qualidade, é através da colheita de frutos em estágio de maturação maduros. Como a colheita dos frutos é considerada a etapa que demanda um maior tempo e também apresenta o maior custo da cadeia produtiva do café, os produtores têm utilizado novas tecnologias disponíveis no mercado, com o intuito de diminuir tais perdas e aumentar a lucratividade. Uma das formas para se alcançar esses objetivos é por meio da utilização da colheita mecanizada, o que pode ser confirmado nos trabalhos desenvolvidos por Oliveira et al. (2007) e Cunha et al. (2016), os quais concluíram que o sistema mecanizado de colheita do café apresenta significativa viabilidade técnica e econômica quando comparado ao sistema manual, a partir da redução de custos e aumento da produção.

A colheita mecanizada do café tem sido realizada, de forma eficiente, por meio do princípio de vibrações mecânicas (BARBOSA; SALVADOR; SILVA, 2005; SANTOS et al., 2010a; COELHO et al., 2015a; VELLOSO et al., 2018; GOMES et al., 2020a; GOMES et al., 2020b; KAZAMA et al., 2021), o qual baseia-se na transferência de energia mecânica para o sistema fruto-pedúnculo, promovendo o destacamento dos frutos dos pedúnculos. Porém, a utilização de máquinas para a colheita que empregam o princípio de vibrações mecânicas, quando mal configuradas ou com deficiências associadas ao seu projeto, podem causar danos severos nas plantas, como desfolha e quebra excessiva de ramos, impactando diretamente na produtividade das plantas nos próximos anos. Portanto, torna-se necessário estudar os aspectos da colheita que envolvam vibrações mecânicas nas máquinas, bem como as interações da máquina com a planta

(SOUZA et al., 2018; GOMES et al., 2020a; GOMES et al., 2020b; FERREIRA JÚNIOR et al., 2020).

Desta forma, o conhecimento dos parâmetros modais do cafeeiro, como a frequência natural, é essencial para entender o comportamento da planta ao interagir com a máquina que fará a colheita, além de auxiliar no desenvolvimento e aperfeiçoamento dessas máquinas, o que acarretará na redução de danos causados às plantas e aumento de eficiência durante a colheita mecanizada ou semi-mecanizada (VELLOSO et al., 2020a).

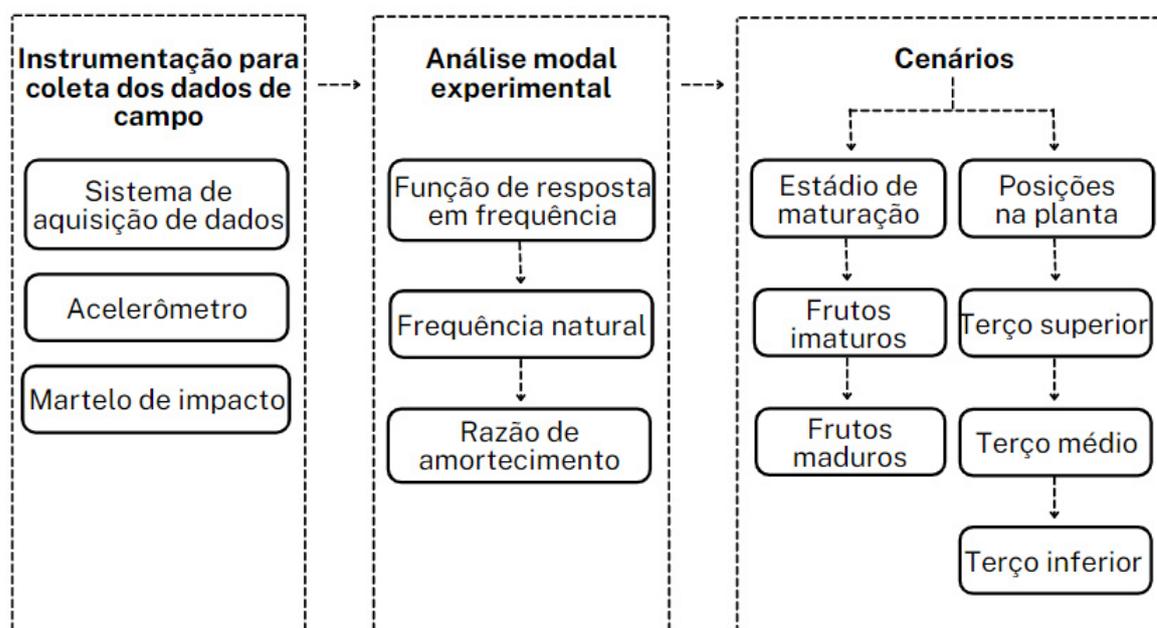
Tais parâmetros podem ser determinados por meio de análise modal, cuja finalidade é estudar as propriedades dinâmicas a partir de excitações causadas por vibrações. A análise modal está pautada em medições e análises da resposta dinâmica de sistemas quando submetidos à uma força externa. Seja numérica ou experimental, ela é uma importante ferramenta para determinar, melhorar e otimizar características dinâmicas de sistemas mecânicos (EWINS, 2009). Além da cultura do café, a análise modal também tem sido aplicada em estudos para o desenvolvimento de máquinas para a colheita mecanizada do damasco, laranja, pistache, azeitona, uva e macaúba (SOUZA et al., 2018; VILLAR et al., 2021; PEREIRA et al., 2022; ERDOGAN et al., 2003; SANDERS, 2005; AIELLO; VALLONE; CATANIA, 2019).

Vários trabalhos têm sido realizados com o objetivo de estudar o comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo, fruto-pedúnculo-ramo e planta do café por meio de análise modal numérica e experimental (SANTOS et al., 2010a; SANTOS et al., 2010b; TINOCO et al., 2014; SANTOS et al., 2015; COELHO et al., 2015a; VILLIBOR et al., 2016; CARVALHO; MAGALHÃES; SANTOS, 2016; SOUZA et al., 2018; VILLIBOR et al., 2019; VELLOSO et al., 2020a), porém, estes trabalhos que são voltados ao estudo das propriedades modais do café, abordaram subsistemas da planta como objeto de estudo. Acredita-se a que realização de um amplo estudo de caracterização de resposta dinâmica da planta de café em condições de campo, possa representar um significativo avanço no conhecimento voltado ao aprimoramento de equipamentos existentes e o desenvolvimento de novas máquinas. Portanto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de determinar as frequências naturais e as razões de amortecimento das plantas de café arábica, variedade Catuaí Vermelho, em condições de campo, a partir de análise modal experimental, em diferentes posições ao longo das plantas e considerando os estádios de maturação imaturo e maduro.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A seguir, será apresentada a metodologia para a determinação das frequências naturais e razões de amortecimento das plantas de café por meio de ensaios de análise modal a partir de excitação impulsiva. Na Figura 2.1 está sistematizada a metodologia proposta para o trabalho.

Figura 2.1 – Metodologia proposta para determinação de frequências naturais e razões de amortecimento das plantas de café.



Fonte: Elaborada pelo autor.

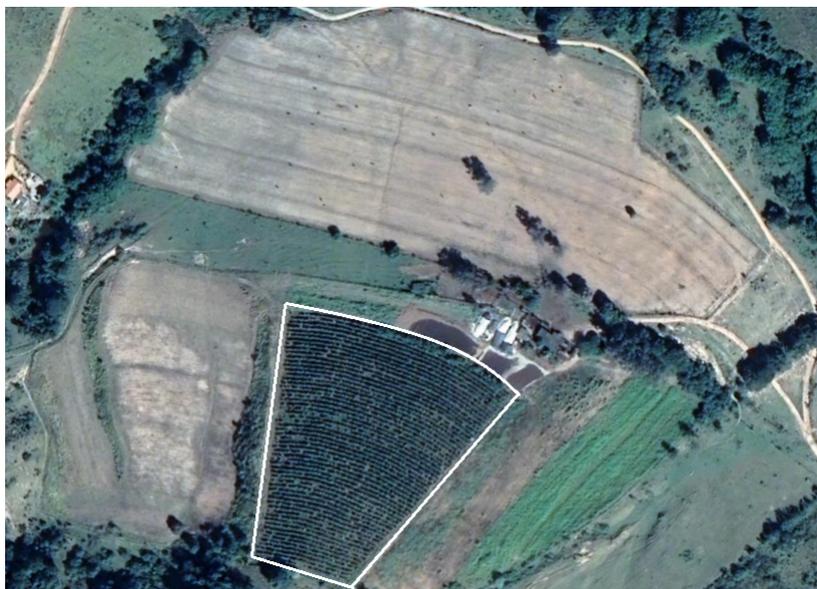
2.2.1 Caracterização da Área Experimental

O experimento foi conduzido na fazenda Cedro, localizada em Nazaré de Minas, no distrito de Nepomuceno, no sul do Estado de Minas Gerais, a 809 m de altitude, latitude de 21°05'S e longitude de 45°18'W. A fazenda possui cerca de 28 hectares, sendo 2,17 hectares destinados a plantação de café Arábica da variedade cultivar Catuaí Vermelho, o qual está delimitado na Figura 2.2. As plantas possuíam altura média de 3,10 m e idade de 12 anos.

As plantas são conduzidas com a técnica de poda de esqueletamento, que consiste em cortar na lateral da planta, no sentido de baixo para cima, nas extremidades dos ramos plagiotrópicos, próximos ao ramo ortotrópico do cafeeiro, deixando-os com comprimento médio de 20 cm a 30 cm, com o objetivo de promover a abertura da lavoura e renovar as hastes produtivas (SILVA et al., 2016). A poda é conduzida de maneira cíclica, sendo realizada em um ano e deixando-se o ano posterior apenas para desenvolvimento vegetativo. Desta forma, há ocorrên-

cia do crescimento de ramos novos para futura produção, de tal maneira que esse ciclo se repete a cada 2 anos.

Figura 2.2 – Área de estudo do experimento



Fonte: Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-21.09187715,-45.31430399,806.41122996a,725.36893088d,35y,257.39536682h,0t,0r>>

Para este trabalho, foram avaliadas 15 plantas de café com carga pendente de frutos em dois estádios de maturação, imaturo e, predominantemente maduro. Os ensaios foram conduzidos no campo durante a safra do ano de 2022, sendo realizados seguindo a evolução do estágio maturação dos frutos.

Afim de caracterizar a influência da arquitetura da planta, os ensaios foram realizados considerando diferentes posições ao longo do eixo definido por seu ramo ortotrópico, sendo elas: terço inferior, médio e superior. Adicionalmente, as plantas foram caracterizadas quanto ao comprimento dos ramos plagiotrópicos nos diferentes terços avaliados.

2.2.2 Determinação das Frequências Naturais e Razões de Amortecimento das Plantas de Café

Para a determinação das frequências naturais e razões de amortecimento das plantas de café, foram realizados ensaios de análise modal experimental a partir de excitação impulsiva para obtenção das Funções de Resposta em Frequência.

A análise modal experimental segue o caminho reverso da análise modal teórica, iniciando com a medição da resposta da estrutura. Primeiramente, uma força de magnitude co-

nhecida é aplicada na estrutura. Posteriormente, é realizada a aferição de vibração, por meio do sistema de aquisição de dados, que advém de transdutores dispostos na estrutura em pontos representativos. E, finalmente, por meio do processamento dos sinais de excitação e resposta, consegue-se estimar as respectivas Funções de Resposta em Frequência (FRF).

Um sistema com múltiplos graus de liberdade amortecido, pode ser representado pela Equação 2.1.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (2.1)$$

Onde $[M]$, $[C]$ e $[K]$ são matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente, $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$ e $\{\ddot{x}\}$ são os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração e $\{F\}$ o vetor de forças externas aplicadas, o qual está representado pela Equação 2.2.

$$\{f(t)\} = \{F\}e^{i\omega t} \quad (2.2)$$

Em que $\{F\}$ e ω são a força de excitação harmônica e a frequência forçante, respectivamente.

Esse sistema de equações apresenta uma solução particular representada pela Equação 2.3.

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (2.3)$$

Sendo $\{X\}$ um vetor complexo de amplitudes de resposta dependente de ω e dos parâmetros do sistema. A partir de $\{x(t)\}$, derivando-se uma vez é possível encontrar o vetor de velocidade, derivando-se novamente, é possível encontrar o vetor de aceleração.

Substituindo a Equação 2.2, a Equação 2.3 e suas derivadas na Equação 2.1, obtém-se a Equação 2.4.

$$\{X\} = \frac{\{F\}}{([K] - \omega^2[M]) + i\omega[C]} \quad (2.4)$$

Uma forma alternativa de representar a Equação 2.4 é considerar as propriedades dinâmicas do sistema, o qual contém uma expressão matemática que relaciona a saída $\{x(t)\}$ com a entrada $\{f(t)\}$, conforme Equação 2.5.

$$\frac{\{x(t)\}}{\{f(t)\}} = H(\omega) = \frac{\{X\}}{\{F\}} = \frac{1}{([K] - \omega^2[M]) + i\omega[C]} \quad (2.5)$$

Em que $H(\omega)$ é uma função de frequência complexa chamada de Função de Resposta em Frequência (FRF) do sistema. Da maneira como foi definida, esta FRF é chamada de Recepção, a qual relaciona a resposta de deslocamento e a força de excitação aplicada ao sistema. Porém, a resposta dinâmica do sistema pode ser expressa em termos de qualquer resposta característica que seja conveniente, a depender da forma de como a vibração será medida. Dessa forma, pode-se obter FRF's em termos de velocidade e aceleração, que são conhecidas como Mobilidade e Inertância, respectivamente (MAIA; SILVA, 1997).

Apesar de ter uma aparência simples, a Equação 2.5 tende a ser ineficiente em aplicações numéricas, tornando seu uso bastante limitado. Para solucioná-la, é preciso realizar a inversão de uma matriz $N \times N$ para cada valor de frequência. Por isso, torna-se necessário utilizar métodos para resolução de problemas, como por exemplo, a transformada de Fourier.

Se N amostras de $x(t)$ são coletadas em valores discretos de tempo, os dados podem ser usados para obter a forma discreta da transformada de Fourier conforme Equação 2.6.

$$x_j = x(t_j) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{N/2} \left(a_i \cos \frac{2\pi i t_j}{T} + b_i \sin \frac{2\pi i t_j}{T} \right) \quad (2.6)$$

Em que a_0 , a_i e b_i são dados pelas Equações 2.7, 2.8 e 2.9.

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \quad (2.7)$$

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \cos \frac{2\pi i t_j}{T} \quad (2.8)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \sin \frac{2\pi i t_j}{T} \quad (2.9)$$

As Equações 2.7, 2.8 e 2.9 denotam N equações algébricas para cada uma das N amostras e podem ser expressas em forma de matriz conforme Equação 2.10.

$$\vec{X} = [A] \vec{d} \quad (2.10)$$

Em que $\vec{X} = \{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n\}^T$ é o vetor de amostras, $\vec{d} = \{a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{N/2} \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{N/2}\}^T$ é o vetor de coeficientes espectrais e $[A]$ é matriz composta pelos coeficientes $\cos \frac{2\pi i t_j}{T}$ e $\sen \frac{2\pi i t_j}{T}$. O conteúdo de frequência do sinal ou resposta do sistema pode ser determinado a partir da solução da Equação 2.11.

$$\vec{d} = [A]^{-1} \vec{X} \quad (2.11)$$

Adicionalmente, o sistema de aquisição de dados traz informações sobre a função coerência. Esta função refere-se a medida da relação entre a potência do sinal de resposta em relação à entrada, conforme as Equações 2.12, 2.13 e 2.14 (EWINS, 2009). Ela pode ser interpretada também como sendo análoga ao coeficiente de correlação aplicado ao domínio da frequência, e como uma medida dos ruídos presentes nos sinais. Tal função pode ser utilizada na verificação da qualidade do sinal medido, sendo um valor real entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1 for a função coerência, significa que os sinais são menos influenciados pelo ruído (RAO, 2017).

$$S_{xx}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{ff}(\omega) \quad (2.12)$$

$$S_{fx}(\omega) = H(\omega) S_{ff}(\omega) \quad (2.13)$$

$$S_{xx}(\omega) = H(\omega) S_{xf}(\omega) \quad (2.14)$$

Em que $S_{xx}(\omega)$ é a auto densidade espectral de potência da resposta, $S_{ff}(\omega)$ é a auto densidade espectral de potência da excitação, $S_{xf}(\omega)$ e $S_{fx}(\omega)$ são as densidades de potência cruzadas entre a excitação (força) e a resposta e $H(\omega)$ é a função de resposta em frequência que liga a excitação e a resposta.

Pode-se obter dois estimadores para a FRF, denominados por $H_1(\omega)$ e $H_2(\omega)$, os quais estão representados pelas Equações 2.15 e 2.16. O estimador $H_1(\omega)$ é influenciado principalmente por ruídos presentes no sinal de entrada, enquanto o estimador $H_2(\omega)$ é significativamente influenciado por ruídos presentes no sinal de saída.

$$H_1(\omega) = \frac{S_{fx}(\omega)}{S_{ff}(\omega)} \quad (2.15)$$

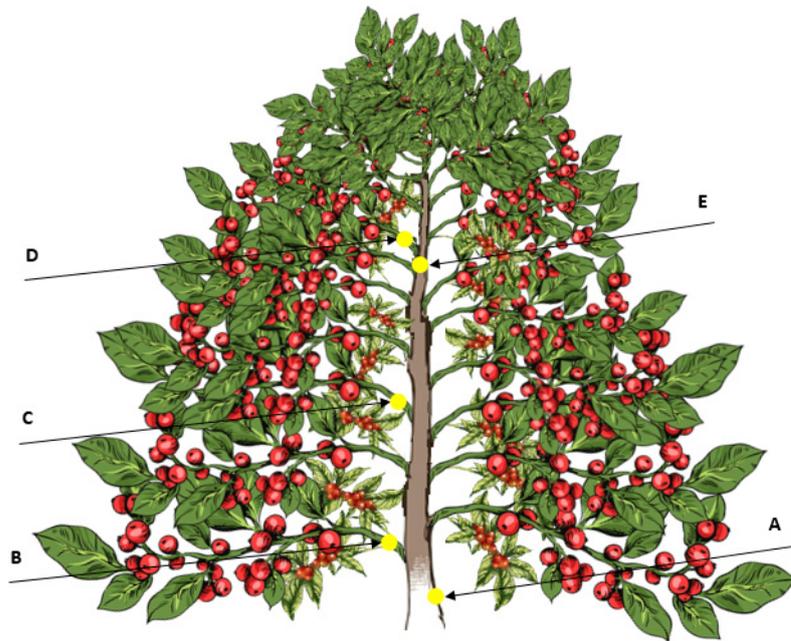
$$H_2(\omega) = \frac{S_{xx}(\omega)}{S_{xf}(\omega)} \quad (2.16)$$

A função coerência é definida pela razão entre os dois estimadores, conforme a Equação 2.17.

$$\gamma^2 = \frac{H_1(\omega)}{H_2(\omega)} \quad (2.17)$$

Para a obtenção das Funções de Resposta em Frequência (FRF) das plantas de café, foi utilizada uma excitação a partir de excitação impulsiva, realizada por meio do martelo de impacto e a aceleração foi medida por meio de acelerômetros de alta sensibilidade dispostos na planta, conforme ilustra a Figura 2.3. O impacto foi aplicado no ponto A. Ao longo da planta, a resposta à excitação foi obtida a partir de acelerômetros, fixados com o auxílio de fita adesiva, em 4 pontos distintos: E, D, C e B.

Figura 2.3 – Esquema da planta de café, em condições de campo, com a indicação do ponto de impacto do martelo (A) e dos pontos de leitura do acelerômetro (B, C, D e E).



Legenda: Ponto A- ramo ortotrópico na base das plantas. Ponto B- ramo plagiotrópico do terço inferior da planta. Ponto C- ramo plagiotrópico do terço médio da planta. Ponto D- ramo plagiotrópico do terço superior da planta. Ponto E- ramo ortotrópico do terço superior da planta.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O martelo de impacto utilizado no experimento é fabricado pela PCB Piezotronics, modelo 086C03. Este martelo foi utilizado com a ponteira de plástico, cuja sensibilidade é de

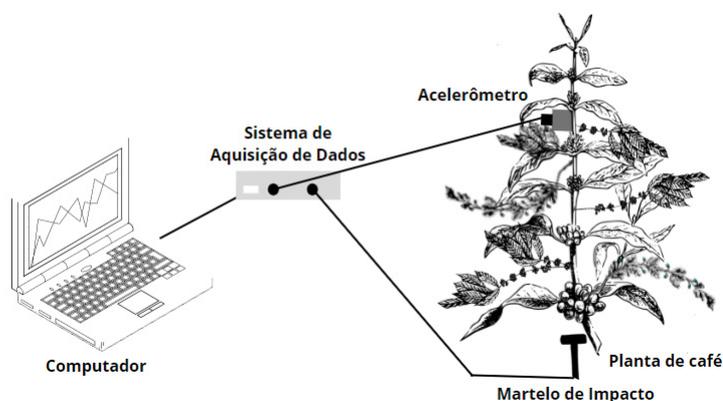
2,302 mV/N. O acelerômetro utilizado no experimento é do mesmo fabricante, PCB Piezotronics, modelo 352C33, cuja sensibilidade é de 99,5 mV/g.

Os locais onde aconteceram os impactos (excitação) e onde foram determinadas as respostas da planta por meio de acelerômetros, foram raspados para remoção da casca do tronco, com o intuito de evitar efeitos de amortecimento da força de impacto e na leitura de vibração da planta pelo acelerômetro.

A aquisição dos sinais de aceleração das plantas de café 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.

O sistema de aquisição foi conectado ao computador, sendo gerenciado pelo software LabVIEW versão 14.5. Por meio de uma rotina de testes de impacto, disponível no pacote *Sound and Vibration*, foi possível a determinação de Funções de Resposta em Frequência (FRF), os valores de coerência e a fase dos ensaios realizados nas plantas de café. Os dados foram coletados considerando-se uma faixa de frequência de 0 a 100 Hz e com resolução de 0,1 Hz. O esquema da montagem experimental está ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Desenho esquemático da montagem experimental proposta para o trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor.

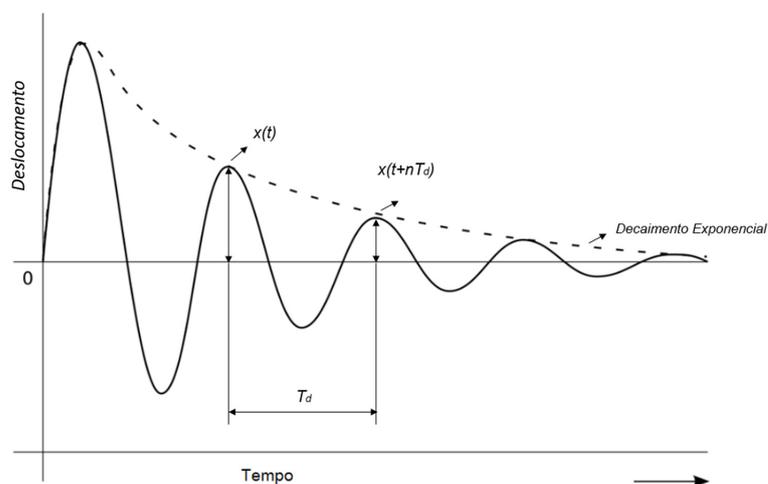
Para cada ensaio foram realizadas cinco repetições com o martelo de impacto, utilizando o critério de aceitação/rejeição baseado na coerência (Equação 2.17). Valores iguais ou próximos a 1 significam uma boa estimativa da FRF do sistema mecânico estudado. Ressalta-se que entre os impactos foi necessário aguardar para que a planta estivesse em repouso novamente.

Os dados de frequência e amplitude foram armazenados e, com o auxílio do software MATLAB, foram traçados os gráficos de Função de Resposta em Frequência, nos quais as frequências naturais do sistema foram determinadas. Para o tratamento dos dados, foi utilizado

um filtro de média móvel (Moving-Average Filter), que suaviza os dados com ruído por meio do janelamento. Para este trabalho, foi utilizado uma janela de comprimento 20 para o ramo ortotrópico e 10 para os ramos plagiotrópicos. Com os dados já tratados, os gráficos de Função de Resposta em Frequência foram plotados e as frequências naturais dos sistemas foram obtidas através de picos representativos selecionados em faixas de frequências específicas, sendo elas: 10 - 20 Hz, 20 - 30 Hz, 30 - 40 Hz, 40 - 50 Hz e 50 - 60 Hz.

Para o estágio de maturação maduro (cereja) foi realizada a determinação da razão de amortecimento do sistema empregando-se o método do decremento logarítmico, o qual nos permite determiná-la experimentalmente medindo quaisquer dois deslocamentos consecutivos e tomando o logaritmo natural de suas amplitudes (VILLIBOR et al., 2016; COELHO et al., 2015b). Segundo Rao (2017), o decremento logarítmico representa a taxa na qual a amplitude de uma vibração amortecida livre diminui, conforme ilustrado na Figura 2.5, a qual ilustra a resposta teórica de um sistema subamortecido, após a aplicação do impulso.

Figura 2.5 – Resposta teórica de decaimento da oscilação de um sistema subamortecido submetido a um deslocamento inicial



Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, para obter as curvas de decaimento da oscilação das plantas de café ao longo do tempo, foi utilizada uma excitação a partir de excitação impulsiva, realizada por meio do martelo de impacto, em que o impacto foi aplicado na base das plantas e a aceleração foi medida por meio de acelerômetros de alta sensibilidade dispostos nos ramos plagiotrópicos das plantas, seguindo o mesmo esquema ilustrado na Figura 2.3. Para cada ensaio foram realizadas três repetições com o martelo de impacto, e entre cada impacto foi necessário aguardar a planta

voltar ao repouso. Ressalta-se que a orientação da excitação foi a mesma da medição das respostas.

A aquisição dos dados de aceleração das plantas de café foi realizada mediante o desenvolvimento de uma rotina no software LabVIEW, a qual gerencia o mesmo sistema de aquisição de dados utilizado anteriormente no experimento. Por meio desta rotina, foi possível armazenar os dados de aceleração no tempo das plantas e, posteriormente, com o auxílio do software MATLAB, foi possível traçar as curvas e determinar as razões de amortecimento dos ramos plagiotrópicos em seus respectivos terços, considerando o estágio de maturação maduro dos frutos.

A relação entre o valor do decremento logarítmico, após n ciclos de oscilação, com a razão de amortecimento do sistema em estudo é representada pela Equação 2.18.

$$\zeta = \frac{1}{2\pi n} * \ln \left(\frac{x(t)}{x(t+nT_d)} \right) \quad (2.18)$$

Onde T_d é o período de oscilação amortecido, $x(t+nT_d)$ é o valor da amplitude após n períodos amortecidos, $x(t)$ é o valor da amplitude inicial, ζ é a razão de amortecimento e n é o número de ciclos utilizado para medição das amplitude.

2.2.3 Análise Estatística dos Dados

Para a avaliação da influência do estágio de maturação da carga pendente de frutos sobre as frequências naturais das plantas de café foi realizado um experimento segundo delineamento inteiramente casualizado, com 15 repetições. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e, posteriormente, à análise de variância considerando um nível de significância de 5% de probabilidade. As médias das variáveis respostas foram estudadas por meio do teste de Tukey à 5% de probabilidade.

As frequências naturais dos ramos plagiotrópicos, obtidas por Análise Modal Experimental, foram avaliadas segundo delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 3 x 2 (posições na planta x estádios de maturação dos frutos), com 15 repetições. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi empregado e, posteriormente, foi realizada a análise de variância com nível de significância de 5%. As médias dos fatores qualitativos foram estudados por meio do teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Para a avaliação da influência da posição na planta sobre as razões de amortecimento das plantas de café foi realizado um experimento segundo delineamento inteiramente casualizado,

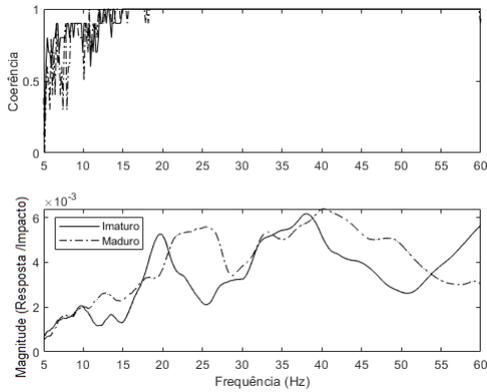
com 15 repetições. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e, posteriormente, a análise de variância considerando um nível de significância de 5% de probabilidade. As médias das variáveis respostas foram estudadas por meio do teste de Tukey à 5% de probabilidade.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa computacional R, versão 4.2.1 (R Core Team, 2022).

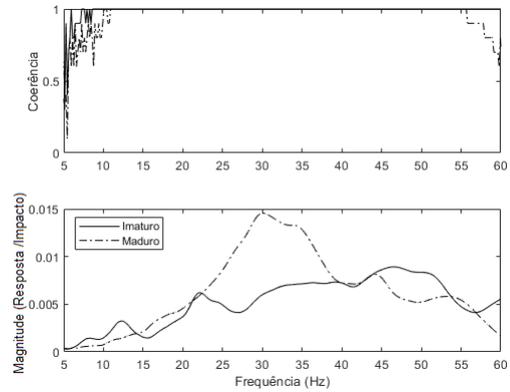
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As frequências naturais das plantas de café foram obtidas por meio de ensaios de análise modal experimental, a partir de excitação impulsiva, e identificadas por meio das Funções de Resposta em Frequência (FRF) com base na amplificação da amplitude de vibração, em cada ponto de aquisição dos acelerômetros. A Figura 2.6 ilustra as FRF's do terço superior dos ramos plagiotrópicos das plantas 11, 12, 15 e 17, respectivamente, para os estádios de maturação maduro e imaturo, acompanhadas das informações de coerência obtidas durante a execução dos ensaios.

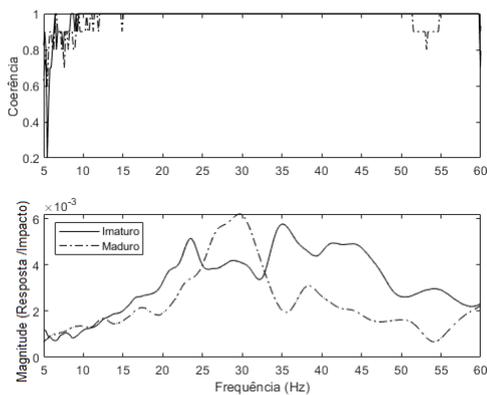
Figura 2.6 – Função de resposta em frequência e coerência para o terço superior dos ramos plagiotrópicos das plantas 11, 12, 15 e 17 para os estádios de maturação maduro e imaturo.



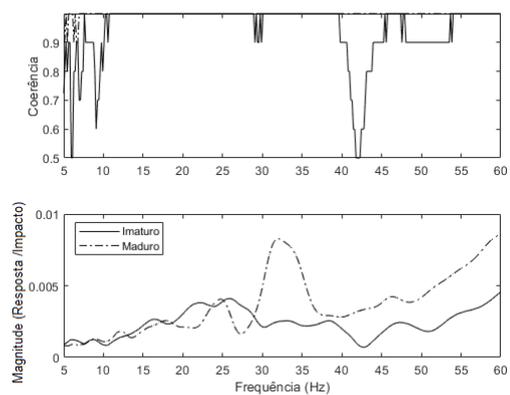
(a) FRF e coerência do ramo plagiotrópico do terço superior da planta 11.



(b) FRF e coerência do ramo plagiotrópico do terço superior da planta 12.



(c) FRF e coerência do ramo plagiotrópico do terço superior da planta 15.



(d) FRF e coerência do ramo plagiotrópico do terço superior da planta 17.

Fonte: Elaborada pelo autor.

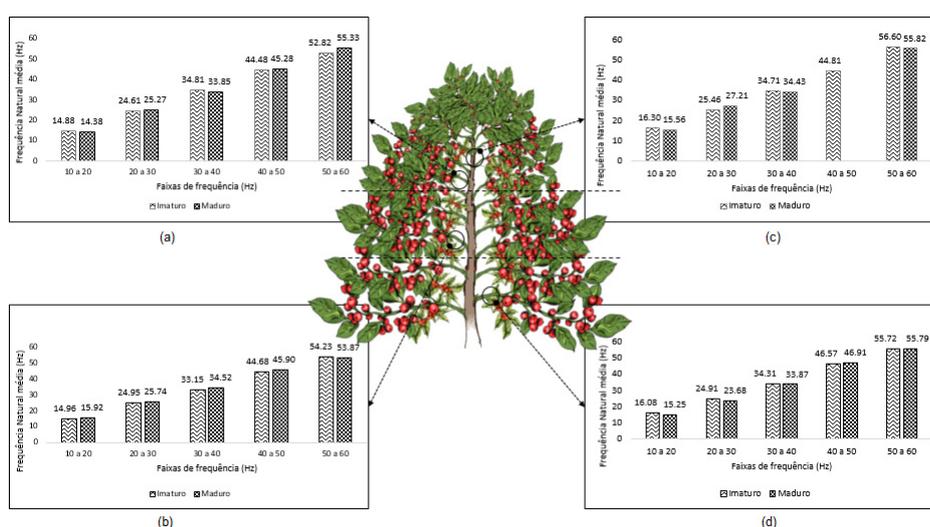
Com base no valor de coerência pode-se inferir sobre a qualidade do teste realizado, visto que esse valor indica se há ruídos entre os sinais do martelo de impacto e do acelerômetro (EWINS, 2009). Para a identificação das frequências nas FRF's, as coerências nos intervalos de interesse foram avaliadas concomitantemente. Verificou-se que a coerência sempre foi superior a 0,8, o que indica que os sinais de resposta entre o martelo de impacto e o acelerômetro foram correlacionados linearmente, sem presença de interferência ou ruído. Como o experimento foi conduzido ao ar livre, em condições de campo, é esperado tal resultado, visto que os fatores externos, como o vento, podem influenciar diretamente na redução do valor da coerência.

Além disso, pode-se observar que a maior incidência de picos de frequência concentrou-se entre 20 e 40 Hz. Para ambos estádios de maturação avaliados, dos terços inferior e médio dos ramos plagiotrópicos, observou-se que os picos de frequência apresentaram maior incidência

na faixa de frequência de 20 a 30 Hz. Já para os ramos plagiotrópicos do terço superior e ortotrópicos, para plantas com predominância de frutos maduros a maior ocorrência de picos de frequência foi observada na faixa de 30 a 40 Hz, enquanto plantas com predominância de frutos imaturos a maior incidência de frutos ocorreu na faixa de 20 a 30 Hz. Adicionalmente, houve também uma maior incidência de picos de frequência para os frutos imaturos do que para os frutos maduros.

Na Figura 2.7 encontram-se apresentados os valores médios de frequência extraídos para cada terço da planta, em cada faixa de frequência analisada, para os ramos plagiotrópicos e para o ramo ortotrópico.

Figura 2.7 – Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, de acordo com a posição na planta, em Hz.



- Legenda: (a) Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, no terço superior do ramo plagiotrópico das plantas.
 (b) Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, no terço superior do ramo ortotrópico das plantas.
 (c) Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, no terço médio do ramo plagiotrópico das plantas.
 (d) Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, no terço inferior do ramo plagiotrópico das plantas.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Velloso et al. (2020a), ao avaliarem a planta de café, variedade Catuaí Vermelho, em laboratório, observaram que a maior incidência de picos de frequência concentrou-se entre 10 e 30 Hz. Cardona et al. (2021) ao avaliarem apenas os frutos de café, encontrou resultados semelhantes, com faixas de frequência com picos ressonantes específicos entre 24 e 45 Hz, onde os frutos maduros apresentaram maiores magnitudes nos parâmetros calculados, para a variedade Castillo. Ambos resultados corroboram com os encontrados neste trabalho.

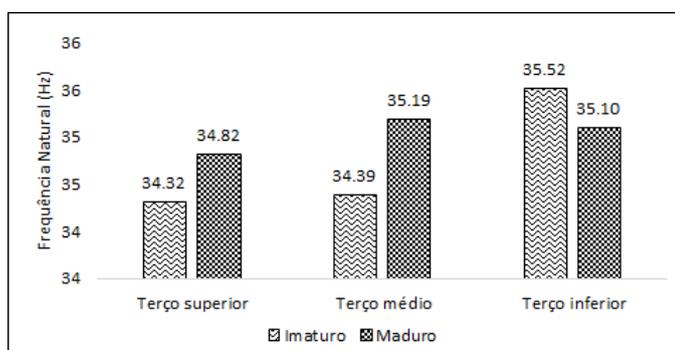
Com o uso do método de elementos finitos estocástico, Coelho et al. (2016) avaliaram o sistema fruto-pedúnculo-ramo do café para os estágios de maturação verde e maduro. A partir dos resultados das simulações, identificou-se frequências naturais entre 14 e 21,3 Hz. Assim como os autores mencionados, os resultados das simulações realizadas no meu estudo mostraram frequências naturais na faixa de 14 a 26 Hz, corroborando com os achados anteriores. Além disso, os autores constataram que a medida que o número de frutos aumenta no ramo os valores das frequências naturais tendem a cair, o que sugere uma concordância entre esses fatores em ambas as pesquisas.

Os resultados obtidos por Tinoco et al. (2014) sobre o sistema fruto-pedúnculo do café arábica, variedade Colombia, são consistentes com os apresentados neste trabalho. Eles identificaram as 20 primeiras frequências naturais e os modos de vibração do sistema, usando o método de elementos finitos em todos os estágios de maturação. Os valores das frequências naturais encontrados, que variaram de 16,33 a 49,43 Hz para os três primeiros modos de vibração, corroboram com os resultados obtidos neste trabalho.

É esperado encontrar uma variação nos resultados entre diferentes autores devido a variações nas propriedades geométricas, físicas e mecânicas das plantas em estudo, já que essas propriedades estão associadas às características do solo, clima e da planta, como idade e variedade, bem como ao seu manejo (COELHO et al., 2016). Porém, os resultados obtidos neste trabalho corroboram com a literatura citada, os quais permitem inferir que para esta forma de transmissão da vibração, nas condições em que o experimento foi realizado, não há possibilidade de se obter seletividade na colheita dos frutos de café, mas sim, uma colheita total dos frutos empregando-se exclusivamente vibrações.

Os valores de frequências naturais médias para cada posição na planta, de acordo com o estágio de maturação, estão apresentados na Figura 2.8. Pode-se observar que independente do terço da planta e o estágio de maturação dos frutos, os valores de frequência natural média encontrados são próximos.

Figura 2.8 – Frequências naturais médias dos ramos plagiotrópicos para cada posição na planta de acordo com o estágio de maturação dos frutos, em Hz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As frequências naturais obtidas experimentalmente foram submetidas a análise de variância com médias apresentadas na Tabela 2.1. Não foram encontradas diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, em diferentes posições na planta e nos diferentes estádios de maturação, para nenhuma das frequências naturais estudadas, para os ramos plagiotrópicos, o que já era esperado, de acordo com os dados que foram apresentados nas Figuras 2.7 e 2.8.

Tabela 2.1 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e maturação sobre a frequência natural dos ramos plagiotrópicos das plantas de café.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados (Hz^2)	Quadrado médio (Hz^2)	F	P-valor
Posição na planta (P)	2	161	80,7	0,428	0,652
Maturação (M)	1	357	356,9	1,894	0,170
P x M	2	31	15,6	0,083	0,921
Resíduo	290	54641	188,4		
Total	295	55190	187,1		

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com o teste apresentado na Tabela 2.1, as médias do fator posição na planta foram estatisticamente iguais, com valores de 35,39, 34,50 e 33,58 Hz para os níveis superior, médio e inferior, respectivamente. Ainda de acordo com a análise, as médias do fator estágio de maturação foram não significativas com valores iguais a 35,62 Hz para o estágio de maturação imaturo e 33,43 Hz para o estágio de maturação maduro, o que tornaria a colheita seletiva de frutos somente por ação de vibrações mecânicas inviável. Tal resultado também foi observado por outros autores (COELHO et al., 2016; VILLIBOR et al., 2016; SILVA et al., 2015; SANTOS et al., 2015; KAZAMA et al., 2021).

Por outro lado, quando a vibração é combinada com o impacto, a colheita seletiva pode ser realizada, pois nota-se que a eficiência do desprendimento dos frutos aumenta à medida que o estágio de maturação progride de verde para maduro (GOMES et al., 2020b). Tal comportamento pode ser explicado devido ao pedúnculo apresentar menor rigidez no estágio de maturação mais avançado dos frutos (COELHO et al., 2015b; TINOCO; PEÑA, 2018; BARROS et al., 2018; JÚNIOR et al., 2018), devido a degradação das paredes celulares dos pedúnculos por atividade enzimática ativada pelo hormônio etileno. A degradação da parede celular torna o pedúnculo frágil reduzindo seu módulo de elasticidade e, conseqüentemente, a força necessária para seu rompimento (COELHO et al., 2015b; FERREIRA JÚNIOR et al., 2020; GOMES et al., 2020b).

Ao avaliar isoladamente a primeira faixa de frequência, as médias do fator posição na planta foram estatisticamente iguais, com valores de 15,95, 15,38 e 14,44 Hz para os níveis inferior, médio e superior, respectivamente. Ainda de acordo com a análise, as médias do fator estágio de maturação foram não significativas com valores iguais a 15,19 Hz para o estágio de maturação imaturo e 15,04 Hz para o estágio de maturação maduro. O mesmo ocorreu ao avaliar isoladamente a segunda, terceira e quinta faixas de frequências, em que as médias do fator posição na planta foram estatisticamente iguais e as médias do fator estágio de maturação foram não significativas.

No entanto, ao avaliar a quarta faixa de frequência, que varia de 40 à 50 Hz, o fator posição na planta apresentou efeito significativo sobre a frequência natural, conforme está apresentado na Tabela 2.2. Os desdobramentos desse efeito estão apresentados na Tabela 2.3, e por meio dele, nota-se que o valor de frequência natural para o terço inferior dos ramos plagiotrópicos é maior em relação ao terço médio e superior.

Tabela 2.2 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e maturação sobre a quarta faixa de frequência (40 à 50 Hz) dos ramos plagiotrópicos das plantas de café.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados (Hz^2)	Quadrado médio (Hz^2)	F	P-valor
Posição na planta (P)	2	46,9	23,464	3,686	0,0317*
Maturação (M)	1	9,5	9,507	1,493	0,2271
PxM	2	1,4	0,717	0,113	0,8938
Resíduo	53	337,4	6,366		
Total	58	395,3	6,815		

Legenda: * - As médias diferem entre si ao nível de significância de 5%.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2.3 – Desdobramentos da quarta faixa de frequência natural (40 à 50 Hz) para a posição na planta sobre a frequência natural, em Hz.

Posição na planta	Frequência natural média (Hz)
TI	46,94101 a
TM	44,98476 b
TS	44,95913 b

Legenda: Médias seguidas das mesmas letras são estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Kazama et al. (2021) ao avaliarem uma metodologia para colheita seletiva de café, cultivar Catuaí 99, incluindo configurações ótimas de colhedora em cada zona de manejo, observaram que a colheita do terço superior do cafeeiro primeiro rendeu melhor qualidade de bebida e menos café de varredura. Isso ocorre devido ao fato de que o terço superior de uma planta de café apresenta variabilidade espacial diferente em relação aos terços médio e inferior. Estes resultados evidenciam a importância de considerar a heterogeneidade da planta ao realizar a colheita seletiva, contribuindo para aprimorar tanto a qualidade quanto a eficiência do processo.

Além disso, no terço superior os frutos não são sombreados por outras plantas, e os ramos por serem mais novos, apresentam poucas folhas, proporcionando uma maior exposição dos frutos à luz solar, fazendo com que ocorra a aceleração do amadurecimento dos frutos e permitindo que eles se desprendam precipitadamente dos ramos (SANTINATO et al., 2015; SANTINATO et al., 2019). Como neste trabalho não foi encontrada diferença significativa entre os valores de frequência natural dos terços superior e médio, a realização da colheita desses

terços primeiro, pode produzir resultados positivos, conforme foi encontrado por Kazama et al. (2021).

Ao realizar a caracterização das plantas de café em relação ao comprimento médio dos ramos plagiotrópicos entre os diferentes terços da planta, observou-se que no terço inferior, o comprimento médio dos ramos plagiotrópicos foi de 474,28 mm, enquanto no terço médio foi de 636,23 mm. Já no terço superior, observou-se o maior comprimento médio, de 693,73 mm. Esses dados demonstram uma heterogeneidade no desenvolvimento dos ramos plagiotrópicos ao longo da planta de café, com uma tendência de crescimento progressivamente maior do terço inferior para o terço superior.

Ao avaliar o terço inferior das plantas de café, é possível observar, que ele apresenta ramos plagiotrópicos com maior comprimento médio do que aqueles localizados na parte superior da planta. A maior rigidez, devido características morfológicas de lenho adulto, podem influenciar nos valores de frequência natural média do ramo (VALE; DIAS; SANTANA, 2010; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 2005; VELLOSO et al., 2020b). Tais fatores nos mostram o porquê de os valores das frequências naturais obtidas para o terço inferior apresentar diferença significativa com médias superiores em relação às demais posições na planta.

Assim como nos ramos plagiotrópicos, ao submeter as frequências naturais encontradas experimentalmente para o terço superior dos ramos ortotrópicos à análise de variância, não foram encontradas diferenças significativas, ao nível de significância de 5% para os diferentes estádios de maturação, conforme está apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito do fator maturação sobre a frequência natural dos ramos ortotrópicos para o terço superior das plantas de café.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados (Hz^2)	Quadrado médio (Hz^2)	F	P-valor
Maturação (M)	1	2	1,88	0,012	0,913
Resíduo	59	9170	155,43		
Total	60	9172	157,31		

Fonte: Elaborada pelo autor.

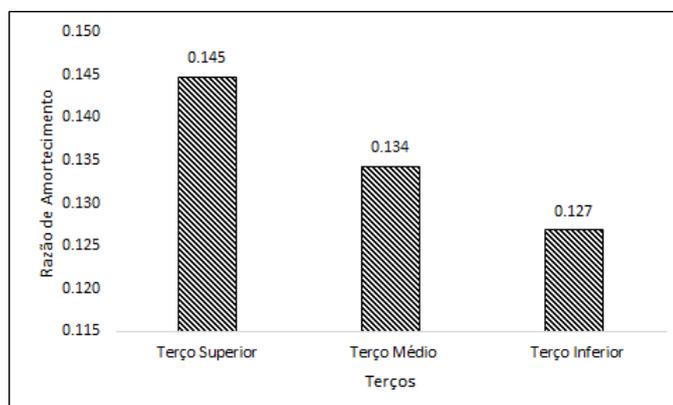
De acordo com o teste apresentado na Tabela 2.4, as médias do fator estágio de maturação foram não significativas com valores iguais a 31,66 Hz para o estágio de maturação imaturo e 32,05 Hz para o estágio de maturação maduro, reforçando que é possível a realização da colheita total, mas não seletiva, dos frutos do café através de aplicação de vibração ao ramo

ortotrópico das plantas. Os resultados encontrados para o ramo ortotrópico foram próximos aos dos ramos plagiotrópicos, comportamento similar foi observado em outros trabalhos disponíveis na literatura (COELHO et al., 2016; VILLIBOR et al., 2016; SILVA et al., 2015; SANTOS et al., 2015; KAZAMA et al., 2021).

Se o objetivo da colheita for realizar a derricha total dos frutos em apenas uma operação, as máquinas e os dispositivos de derricha, ao utilizarem uma faixa de frequência próxima a faixa de ressonância do sistema, serão capazes de atingir ambos estádios de maturação dos frutos e realizar a derricha total dos mesmos, visto que a partir dos resultados obtidos neste trabalho, os fatores estágio de maturação dos frutos e posição na planta se mostraram não dependentes tanto para os ramos plagiotrópicos quanto para o ramo ortotrópico.

Posteriormente, foi realizado uma avaliação da razão de amortecimento dos ramos plagiotrópicos das plantas de café, encontrados por meio do método de decremento logarítmico, para o estágio de maturação maduro. A interação entre a posição na planta sobre a razão de amortecimento se mostrou não significativa ao nível de 5% de significância. Os valores da razão de amortecimento médios para cada posição na planta, para o estágio de maturação maduro, de acordo com o teste estão apresentados na Figura 2.9. Os valores encontrados para a razão de amortecimento indicam que os ramos plagiotrópicos se comportam como um sistema subamortecido, pois apresentou valores entre 0 e 1 (RAO, 2017), como é observado também para outras culturas, como a macaúba (VILLAR et al., 2016; VELLOSO et al., 2017) e a uva (COETZEE; LOMBARD, 2013).

Figura 2.9 – Razão de amortecimento média dos ramos plagiotrópicos em relação a posição na planta para o estágio de maturação maduro dos frutos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar dos valores da razão de amortecimento não apresentarem uma diferença significativa em relação aos terços das plantas de café, pode-se observar um decréscimo em seu valor ao se avaliar do terço superior para o terço inferior.

Coelho et al. (2015b) estudaram o sistema fruto-pedúnculo do café e encontraram valores de razão de amortecimento iguais a 0,09 para o estágio de maturação maduro (cereja) para os pedúnculos, e para o ramo plagiotrópico encontrou-se razão de amortecimento com valor médio 0,02. Enquanto Villibor et al. (2016) ao avaliarem a razão de amortecimento para o sistema fruto-pedúnculo do café, em condições laboratoriais, por meio de vídeos digitais de alta velocidade, encontraram o valor de 0,126 para o estágio de maturação maduro. Além disso, em ambos trabalhos, os autores também observaram que não houve diferença significativa entre os valores da razão de amortecimento para os estádios de maturação maduro e imaturo. Estes resultados corroboram com o resultado encontrado neste trabalho para os ramos plagiotrópicos.

Aristizabal et al. (2003) obtiveram, a partir do método de decremento logarítmico, valores entre 0,08 e 0,1 para razão de amortecimento do sistema tronco-ramo-folhas do cafeeiro. Além disso, os autores concluíram que as folhas do cafeeiro favorecem o amortecimento de excitações provocadas na planta.

Os resultados obtidos neste estudo, com valores não significativos entre diferentes posições dos ramos plagiotrópicos e ramo ortotrópico, podem ser considerados importantes parâmetros de regulação das colhedoras. Pois, de acordo com FERREIRA JÚNIOR et al. (2020), o ajuste adequado de frequência e amplitude de vibração das hastes das colhedoras impactam na eficiência de derriça do café, reduzem custos de repasse, diminuem a desfolha de plantas, favorecem a colheita seletiva e, conseqüentemente, reduzem os custos finais da operação da colheita.

2.4 CONCLUSÃO

Nas condições em que o trabalho foi executado, apesar dos desafios experimentais, foi possível caracterizar o comportamento dinâmico das plantas de café nos diferentes terços e estádios de maturação, por meio de análise modal experimental, em condições de campo. Com base nos resultados obtidos, podemos chegar às seguintes conclusões:

- Os valores de frequências naturais não apresentam diferenças significativas ao longo da planta e para os diferentes estádios de maturação avaliados.

- As razões de amortecimento nos ramos plagiotróficos localizados nos terços inferiores, médios e superiores, com frutos predominantemente maduros, não apresentam diferenças significativas. Cujos valores obtidos foram de 0,145, 0,134 e 0,127 para os terços superior, médio e inferior, respectivamente.

3 CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DA TRANSMISSIBILIDADE DE VIBRAÇÃO E DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DAS PLANTAS DE CAFÉ EM CONDIÇÕES DE CAMPO

3.1 INTRODUÇÃO

O uso de tecnologias, equipamentos e processos apropriados para a colheita do café é um fator extremamente importante para os produtores, pois contribui para a redução de custos e a obtenção de maiores retornos econômicos, já que o preço do café está diretamente associado a sua qualidade de bebida. Quando os frutos são colhidos no estágio de maturação maduro (cereja), eles apresentam compostos voláteis que são responsáveis pelo sabor e aroma característicos do café, apresentando uma composição química adequada, o que eleva a qualidade de bebida do café (SAATH et al., 2012; PIMENTA; ANGÉLICO; CHALFOUN, 2018; PEREIRA et al., 2010; BORGES; JORGE; NORONHA, 2002; FAGAN et al., 2011).

A colheita dos frutos de café pode ser realizada de forma manual, mecanizada ou semi-mecanizada, e sua escolha irá depender tanto do nível tecnológico do produtor quanto da topografia do terreno. Porém, sabe-se que a utilização de sistemas mecanizados nas lavouras de café possibilita uma maior eficiência nas operações, proporcionando viabilidade técnica e econômica aos produtores, refletindo assim, em maiores rendimentos (LANNA; REIS, 2012; CUNHA et al., 2016; TAVARES et al., 2015; SILVA et al., 2010; SILVEIRA et al., 2020).

A mecanização de processos, em especial da colheita, é considerada fundamental para a redução dos custos e melhoria da eficiência, visto que esta etapa é considerada a que demanda o maior tempo e o maior custo na cadeia produtiva do café (SILVA et al., 2010; SANTOS et al., 2010a; SANTOS et al., 2010b; COELHO et al., 2015a). A colheita mecanizada do café utiliza o princípio de vibrações mecânicas, o qual baseia-se na transferência de energia mecânica para o sistema fruto-pedúnculo, sendo capaz de promover o destacamento dos frutos dos pedúnculos. Ela é considerada eficiente quando há a máxima derriça de frutos sem causar danos às plantas. (SILVA et al., 2013; SANTINATO et al., 2015; KAZAMA et al., 2021; TAVARES et al., 2019; SANTINATO et al., 2019).

Todavia, apesar dos grandes avanços no âmbito da colheita mecanizada, ainda existem dificuldades em relação à realização da colheita seletiva, onde busca-se colher apenas frutos no estágio de maturação maduro, deixando os frutos no estágio de maturação imaturo na planta. A colheita mecanizada seletiva de café proporciona lotes mais homogêneos, com maior uniformi-

dade de maturação, favorecendo o processo de pós-colheita e permitindo melhor qualidade final do produto. As maiores dificuldades encontradas nesse processo está relacionada a não uniformidade de maturação dos frutos e as diferentes características arquitetônicas da planta (SILVA et al., 2010; SILVA et al., 2015; FERREIRA JÚNIOR et al., 2020; JÚNIOR et al., 2018). Afim de melhorar o processo, faz-se necessário conhecer o comportamento dinâmico do sistema de colheita, definindo combinações apropriadas entre os parâmetros frequência, amplitude e tempo de vibração (COELHO et al., 2015a; SANTOS et al., 2010a, 2010a; CUNHA et al., 2016).

Além disso, a forma como a vibração é transmitida aos frutos do café influencia diretamente a eficiência da colheita, pois quando a planta é submetida a vibração forçada, a sua resposta se torna mais complexa, devido à presença dos esforços dinâmicos. Logo, outros fatores são necessários para a compreensão do comportamento dinâmico do sistema. Um parâmetro que pode auxiliar nesse entendimento é a transmissibilidade de vibração (GOMES et al., 2020b; VILLIBOR et al., 2019).

A transmissibilidade de vibração é um parâmetro que influencia diretamente na eficiência e na seletividade da colheita mecanizada de café, sendo importante para o desenvolvimento de novos dispositivos de colheita e definição de faixas de trabalho favoráveis à colheita seletiva dos frutos (RAO, 2017; GOMES et al., 2020a). Gomes et al. (2020b) avaliaram a transmissibilidade média de vibração em amostras do sistema fruto-pedúnculo-ramo de café contendo frutos verdes e maduros. Os autores identificaram que as amostras que continham frutos cerejas apresentaram maior transmissibilidade de vibração quando comparadas àquelas contendo frutos verdes.

Villibor et al. (2019) analisaram a resposta dinâmica do sistema fruto-pedúnculo do café por meio de modelagem de corpos flexíveis. As simulações foram realizadas para estudar as forças e torques na ligação entre o fruto e o pedúnculo do café, a energia transmitida e a força resultante no fruto. A maior diferença na energia transmitida entre os estádios de maturação foi observada na frequência de 26,67 Hz associada às amplitudes de 10,00 e 15,00 mm, indicando uma faixa de trabalho que poderia ser favorável ao desprendimento seletivo dos frutos do café.

A transmissibilidade também foi estudada em outras culturas, como a uva (PEZZI; CAPRARA, 2009) e a laranja (CASTRO-GARCIA et al., 2020a). Pezzi e Caprara (2009) verificaram que a frequência que é transmitida à planta tem um efeito significativo nas perdas de rendimento e nos níveis de qualidade das uvas colhidas. Castro-Garcia et al. (2020a) verificaram que a presença de frutos nos ramos reduziu a transmissibilidade da aceleração. Os autores

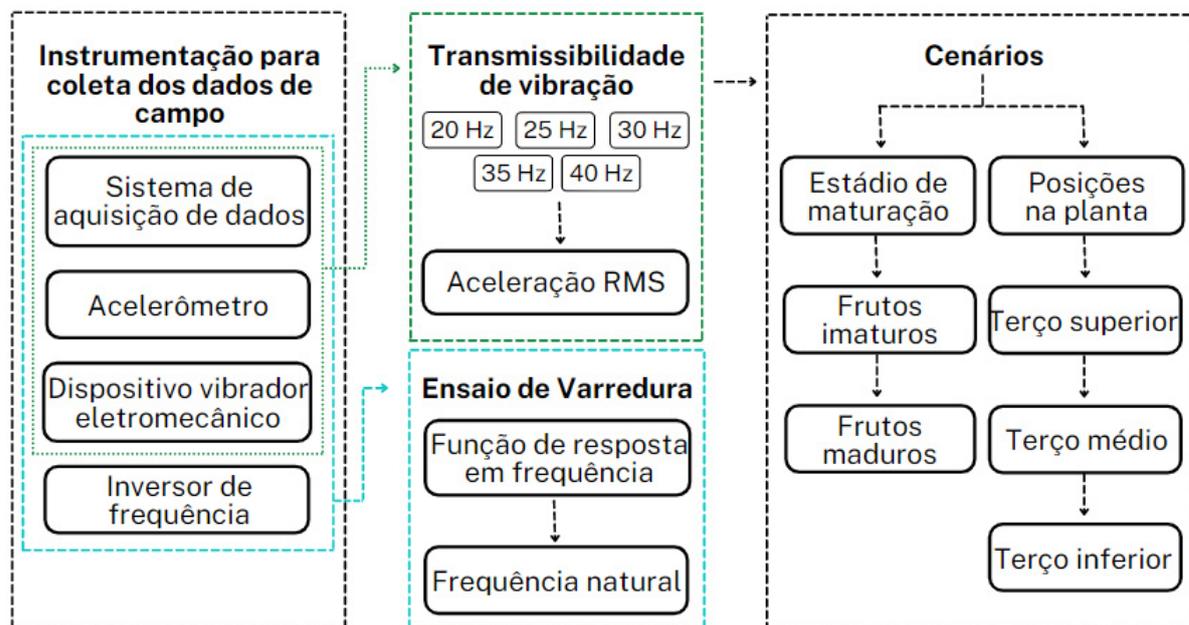
ainda relatam que com a presença de folhas nos ramos, observou-se uma alteração da primeira frequência natural, além do amortecimento presente no sistema reduzir drasticamente a transmissibilidade de aceleração.

Desta forma, este trabalho teve o objetivo de determinar a transmissibilidade de vibração das plantas de café arábica variedade Catuaí Vermelho, em condições de campo, submetidas à excitação harmônica, considerando diferentes frequências de excitação, em diferentes posições ao longo das plantas e considerando os estádios de maturação imaturo e maduro. Adicionalmente, avaliou-se o comportamento dinâmico das plantas de café por meio de ensaios de varredura de frequências, considerando os diferentes cenários relacionados à planta e os estados de maturação dos frutos.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

A seguir, será apresentada a metodologia para a determinação da transmissibilidade de vibração nas plantas de café a partir da indução de vibrações mecânicas por meio de um dispositivo vibrador eletromecânico. Adicionalmente, também será apresentada a metodologia para a realização dos ensaios de varredura de frequências de 0 a 60 Hz, a partir do dispositivo vibrador eletromecânico, com o objetivo de avaliar a resposta dinâmica das plantas a partir de uma fonte de excitação harmônica sob forma de onda senoidal. A Figura 3.1 sistematiza a metodologia proposta para o trabalho.

Figura 3.1 – Metodologia proposta para o trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.1 Caracterização da Área Experimental

Para a realização do experimento, utilizou-se uma área de 2,17 hectares da Fazenda Cedro, localizada em Nazaré de Minas, na qual existe o cultivo do café arábica Catuaí Vermelho que está ilustrado na Figura 3.2. A fazenda fica localizada no distrito de Nepomuceno, sul de Minas Gerais, a uma altitude de 809 m, latitude 21°05'S, longitude 45°18'W e possui cerca de 28 hectares. As plantas apresentavam altura média de 3,10m.

Em relação a técnica empregada para a condução da lavoura, utiliza-se a poda de esqueletamento, que consiste em cortar na lateral da planta, no sentido de baixo para cima, nas extremidades dos ramos plagiotrópicos, próximos ao ramo ortotrópico do cafeeiro, deixando-os com comprimento médio de 20 a 30 cm, promovendo assim, a abertura da lavoura e renovação das hastes produtivas (SILVA et al., 2016). Devido a bienalidade presente na cultura do café, a poda conduzida na fazenda é realizada de maneira cíclica, empregando-se ela em um ano e deixando o ano posterior apenas para desenvolvimento vegetativo, fazendo com que tenha crescimento de ramos novos para futura produção. Dessa forma, esse ciclo se repete a cada dois anos.

Figura 3.2 – Área de estudo do experimento



Fonte: Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-21.09187715,-45.31430399,806.41122996a,725.36893088d,35y,257.39536682h,0t,0r>>

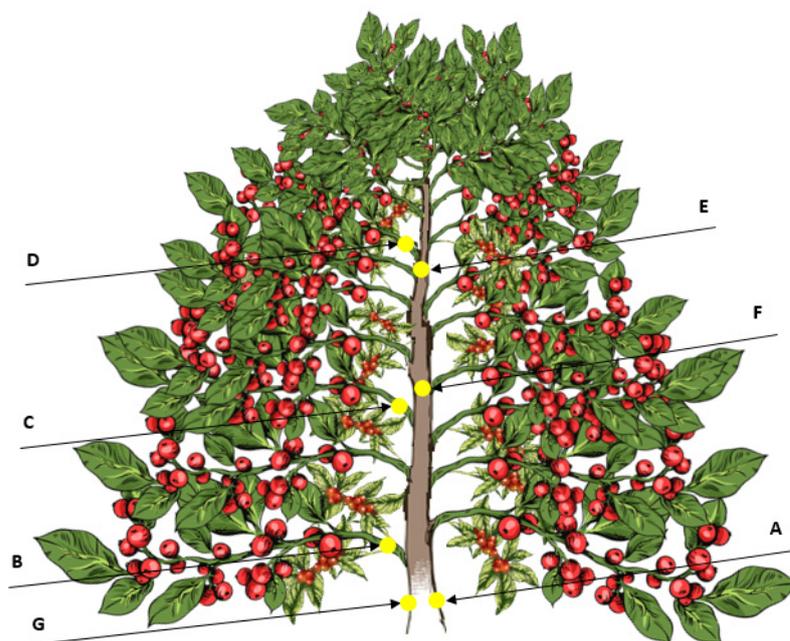
Para realização deste trabalho, avaliou-se 15 plantas de café com carga pendente de frutos em dois estádios de maturação, imaturo e, predominantemente maduro. Os ensaios foram conduzidos no campo durante a safra do ano de 2022, sendo realizados seguindo a evolução do estágio maturação dos frutos. Afim de caracterizar a arquitetura da planta, os ensaios foram realizados considerando diferentes posições na mesma, sendo eles: terço inferior, médio e superior. Adicionalmente, as plantas foram caracterizadas quanto a massa dos frutos nos diferentes estádios de maturação avaliados.

3.2.2 Transmissibilidade de Vibração e Varredura de Frequência em Plantas de Café

Para a determinação da transmissibilidade de vibração, foram induzidas vibrações mecânicas para obtenção dos valores de aceleração (RMS) ao longo das plantas de café.

A excitação nas plantas de café se deu por meio de um dispositivo vibrador eletromecânico, o qual induziu vibração harmônica sob forma de onda senoidal. As respostas dinâmicas foram determinadas a partir de acelerações obtidas por acelerômetros dispostos na planta. Ressalta-se que a orientação da excitação foi a mesma da medição das respostas. Na Figura 3.3 é apresentada uma representação esquemática de uma planta de café, na qual os pontos de excitação e de resposta encontram-se indicados.

Figura 3.3 – Esquema da planta de café, em condições de campo, com a indicação do ponto de excitação do vibrador eletromecânico (A) e dos pontos de leitura do acelerômetro (B, C, D, E, F e G).



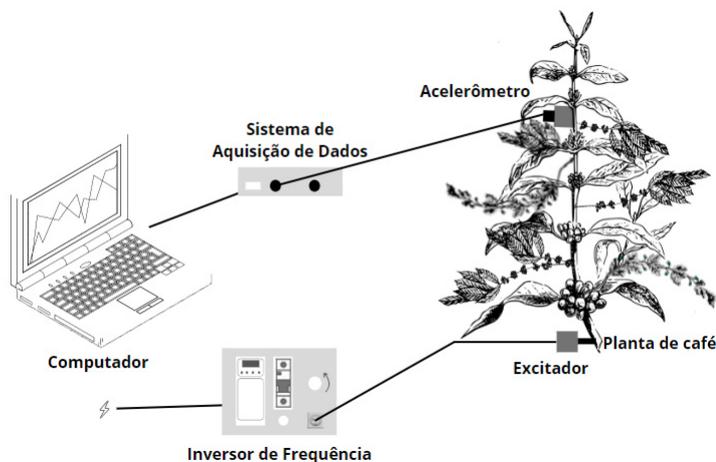
Legenda: Ponto A: ramo ortotrópico na base das plantas. Ponto B: ramo plagiotrópico do terço inferior da planta. Ponto C: ramo plagiotrópico do terço médio da planta. Ponto D: ramo plagiotrópico do terço superior da planta. Ponto E: ramo ortotrópico do terço superior da planta. Ponto F: ramo ortotrópico do terço médio da planta. Ponto G: ramo ortotrópico do terço inferior da planta.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O dispositivo vibrador eletromecânico foi fixado no ponto A, com o auxílio de abraçadeiras de nylon. Ao longo da planta, a resposta à excitação foi obtida a partir de acelerômetros, fixados com o auxílio de fita adesiva, em 6 pontos distintos: E, F, G, D, C e B.

O dispositivo eletromecânico de vibração foi controlado por um inversor de frequência, o qual permitiu o controle e a configuração das diferentes frequências de excitação a serem empregadas nesse trabalho. A faixa útil de frequência de operação do vibrador eletromecânico é de 0 a 60 Hz. O esquema da montagem experimental está ilustrado na Figura 3.4 bem como as principais características dos acelerômetros a serem utilizados no experimento estão dispostas na Tabela 3.1.

Figura 3.4 – Desenho esquemático da montagem experimental proposta para o trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3.1 – Principais características técnicas dos acelerômetros utilizados nos ensaios para a determinação da transmissibilidade de vibração

Modelo	Sensibilidade (mV/g)
	99,5
352C33	97,4
	98,5
	106
602D01	109
	110

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os locais onde foram determinadas as respostas da planta por meio de acelerômetros, foram raspados com o intuito de evitar efeitos de amortecimento na leitura de vibração da planta pelo acelerômetro.

Uma rotina para aquisição de dados de aceleração foi desenvolvida com o auxílio do software LabVIEW. Essa rotina gerenciou o sistema de aquisição de dados da National Instruments, composto por um chassi NI cDAQ-9174 e dois módulos iguais, NI 9234, com oito canais, que realizaram a leitura das medições dos acelerômetros e retornaram com as amplitudes de aceleração ao longo do tempo.

As faixas de trabalho para a avaliação da transmissibilidade de vibração foram escolhidas com base nos trabalhos realizados por Velloso et al. (2020a), Villibor et al. (2019) e Gomes et al. (2020a). As frequências de vibração analisadas foram de 20, 25, 30, 35 e 40 Hz.

Os sinais obtidos pelos sensores foram coletados a uma frequência de amostragem, seguindo o teorema de Nyquist, o qual orienta que a frequência de amostragem seja igual ou

superior a duas vezes a maior frequência do espectro em estudo. Baseado nisso, os dados foram coletados considerando-se uma taxa de amostragem mínima de 400 Hz, durante um intervalo de 15 s. Para cada ensaio, foram realizadas 3 repetições com o vibrador eletromecânico, em cada uma das frequências. Ressalta-se que entre as repetições foi necessário aguardar até que a planta estivesse em repouso novamente.

Os dados de aceleração em função do tempo foram processados, através de uma rotina desenvolvida no software LabVIEW, para se obter o valor RMS (Root Mean Square) de aceleração, de acordo com a Equação 3.1, tanto para a excitação quanto para a resposta nas plantas (Figura 3.3).

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ddot{x}_i^2} \quad (3.1)$$

Onde A_{RMS} é a aceleração RMS (aceleração eficaz), N é o número de picos e \ddot{x}_i é o valor de aceleração correspondente à cada pico.

Dessa forma, a transmissibilidade foi determinada pela fração da aceleração ao longo da planta (representada pelos pontos B, C, D e F) com a aceleração imposta na base na planta (representada pelo ponto G), de acordo com a Equação 3.2.

$$T_i = \frac{X_i}{Y} \quad (3.2)$$

Onde T_i é a transmissibilidade de aceleração em cada ponto i aferido da planta, X_i é a aceleração aferida em cada ponto i da planta e Y é a aceleração aferida na base da planta (Figura 3.3).

Adicionalmente, ensaios de varredura de frequências foram realizados, a partir de uma fonte de excitação harmônica sob forma de onda senoidal. Para tal, foi utilizado um vibrador eletromecânico controlado por um inversor de frequência, o qual apresenta faixa útil de frequência de 0 a 60 Hz. O local onde aconteceu a excitação por meio do vibrador eletromecânico e onde foram determinadas as respostas da planta por meio de acelerômetros foram os mesmos ilustrados na Figura 3.3. Ressalta-se que a orientação da excitação foi a mesma da medição das respostas.

Para a aquisição dos dados de aceleração, foi utilizada a rotina desenvolvida anteriormente, para a determinação da transmissibilidade de vibração, no software LabVIEW. Os dados foram coletados considerando-se uma taxa de amostragem mínima de 600 Hz, considerando o

critério de amostragem de Nyquist. Para cada ensaio, foram realizadas 3 repetições com o vibrador eletromecânico. Ressalta-se que entre as repetições foi necessário aguardar até que a planta estivesse em repouso novamente.

Posteriormente, os dados no domínio do tempo foram transformados para o domínio da frequência a partir da Transformada Rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform), por meio do software MATLAB. Os espectros de frequência foram plotados, permitindo a análise espectral do comportamento dinâmico da planta de café, em que as frequências características (ressonantes) do sistema foram determinadas. Não foi possível utilizar nenhum filtro para o tratamento dos dados, pois cada planta apresentou um comportamento distinto, e portanto, informações importantes no sinal poderiam ser suprimidas.

3.2.3 Análise Estatística dos Dados

A transmissibilidade de vibração, no ramo ortotrópico e ramos plagiotrópicos, foi estudada a partir de um experimento segundo delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial $3 \times 2 \times 3$ (posição na planta \times estágio de maturação \times frequência de excitação), com 15 repetições. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk e análise de variância, considerando-se um nível de significância de 5% de probabilidade. As médias dos fatores qualitativos foram estudadas por meio do teste de Tukey à 5% de probabilidade. As médias dos fatores quantitativos foram estudados por meio de análise de regressão em que os modelos foram determinados por meio do seu coeficiente de determinação, significância dos coeficientes e análise de falta de ajustamento.

A varredura de frequências, no ramo ortotrópico e ramos plagiotrópicos, foi estudada a partir de um experimento segundo delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 3×2 (posição na planta \times estágio de maturação), com 15 repetições. Os dados referentes às frequências características foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk e análise de variância, considerando-se um nível de significância de 5% de probabilidade. As médias dos fatores qualitativos foram estudadas por meio do teste de Tukey à 5% de probabilidade. As médias dos fatores quantitativos foram estudados por meio de análise de regressão em que os modelos foram determinados por meio do seu coeficiente de determinação, significância dos coeficientes e análise de falta de ajustamento.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa computacional R, versão 4.0.5 (R Core Team, 2022).

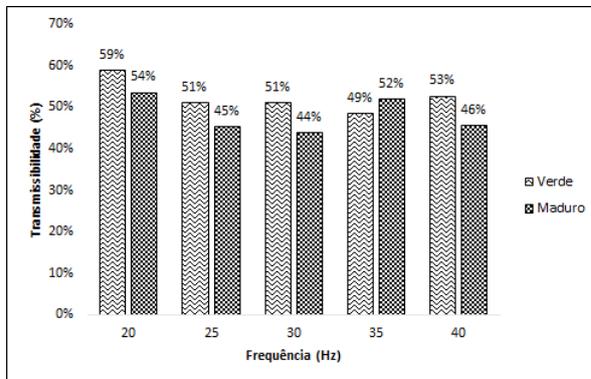
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As transmissibilidades de vibração foram obtidas por meio da indução de vibrações mecânicas sobre as plantas de café, por meio dos valores de acelerações (RMS), em cada ponto de aquisição dos acelerômetros em relação ao ponto inicial, no ramo ortotrópico na base das plantas, conforme apresentado na Figura 3.3.

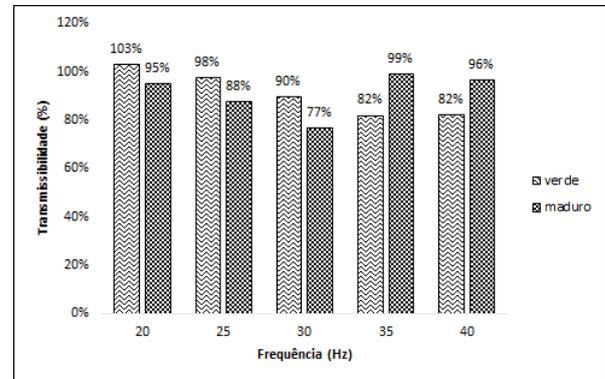
Na Figura 3.5 estão apresentados os valores de transmissibilidade média em função dos fatores frequência e estágio de maturação para os ramos plagiotrópicos do terço superior, médio e inferior e para os ramos ortotrópicos do terço superior e médio, respectivamente. As frequências de vibração analisadas foram de 20, 25, 30, 35 e 40 Hz. Pode-se observar que a frequência de 20 Hz apresentou o maior valor de transmissibilidade, para ambos os estádios de maturação, nos diferentes terços das plantas.

Nota-se ainda, que há uma tendência de o valor da transmissibilidade diminuir na faixa de 25 a 30 Hz e voltar a aumentar aos 35 Hz, para os estádios de maturação estudados e independentemente da posição na planta. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato da frequência de ressonância das plantas não estar próxima a essa faixa de frequência (COELHO et al., 2016; FERREIRA JÚNIOR et al., 2020; GOMES et al., 2020a; VILLIBOR et al., 2019; VELLOSO et al., 2020a).

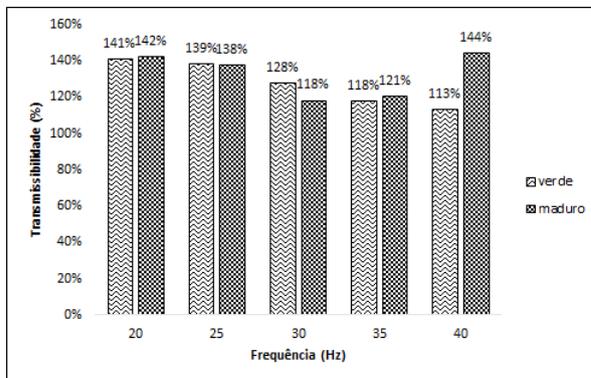
Figura 3.5 – Transmissibilidade de vibração média observada para as plantas de café para cada frequência de vibração avaliada.



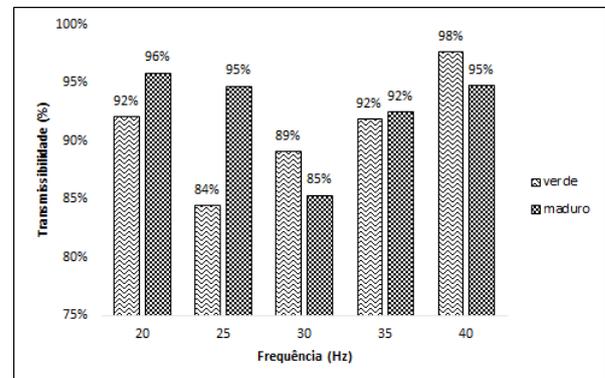
(a) Ramo plagiotrópico do terço superior.



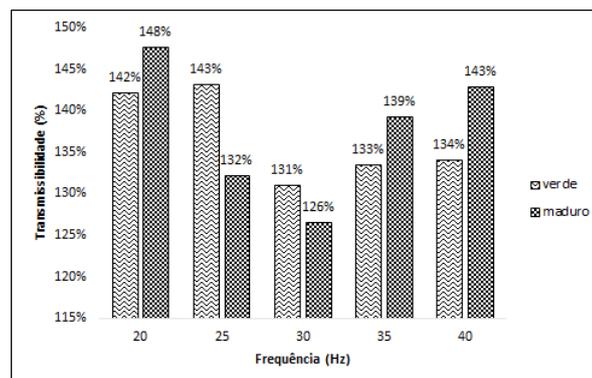
(b) Ramo plagiotrópico do terço médio.



(c) Ramo plagiotrópico do terço inferior.



(d) Ramo ortotrópico do terço superior.



(e) Ramo ortotrópico do terço médio.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores da transmissibilidade de vibração dos ramos plagiotrópicos obtidos experimentalmente foram submetidas a análise de variância para avaliação dos fatores posição na planta e estágio de maturação, cujas médias estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e estágio de maturação sobre a transmissibilidade de vibração dos ramos plagiotrópicos das plantas de café.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Posição na planta (P)	2	47,703	23,851	60,929	0,000
Maturação (M)	1	0,001	0,001	0,002	0,966
P x M	2	0,167	0,083	0,214	0,808
Resíduo	444	173,811	0,391		
Total	449	221,682	24,335		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Não foram encontradas diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, nos diferentes estádios de maturação, para os ramos plagiotrópicos, o que era esperado, de acordo com os resultados apresentados nas Figuras 3.5(a), 3.5(b) e 3.5(c). Quando observadas, as médias do valores de transmissibilidade para os terços avaliados em ambos estádios de maturação das plantas de café (Figuras 3.5(a), 3.5(b) e 3.5(c)), nota-se um comportamento bastante similar, o qual pode ter contribuído para que a diferença entre as médias não fosse significativa.

Como as frequências naturais das plantas de café contendo frutos imaturos e maduros não diferenciaram significativamente nesse trabalho, o mesmo era esperado em relação ao valor de transmissibilidade. Resultado similar foi observado por Tinoco et al. (2014), cuja primeira frequência natural para os frutos imaturos foi de 18,56 Hz e para os frutos maduros foi de 17,01 Hz. Santos et al. (2015) encontraram um valor médio de 23,20 Hz para a primeira frequência de ressonância natural de frutos imaturos e e 19,90 Hz para os frutos maduros de café.

No entanto, o fator posição na planta foi significativo, conforme resultados apresentados na Tabela 3.3. Pode-se observar que o valor de transmissibilidade diminui ao longo da planta, sendo que o terço inferior dos ramos plagiotrópicos apresentou valores superiores em relação ao terço médio, que também apresentou valores superiores ao terço superior. Porém, tal comportamento era esperado, devido ao ponto de excitação das plantas ser em seu terço inferior.

Tabela 3.3 – Desdobramento da transmissibilidade sobre o fator posição na planta para os ramos plagiotrópicos.

Posição na planta	Transmissibilidade
TI	1,300 a
TM	0,909 b
TS	0,503 c

Legenda: Médias seguidas das mesmas letras são estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os menores valores de transmissibilidade observados nos ramos plagiotrópicos dos terços médio e superior em relação ao terço inferior, podem ser justificados pela distância do ponto de excitação da planta e também pela presença de amortecimento existente nas mesmas, já que alguns autores (COELHO et al., 2015b; SANTOS et al., 2015; VILLIBOR et al., 2016) consideraram o café como um sistema subamortecido.

O fator frequência de vibração tem sido amplamente estudado em trabalhos que avaliam a colheita onde o princípio de vibrações mecânicas é utilizado, pois tal fator está relacionado com a energia que será transmitida a planta por meio da máquina, com o objetivo de se realizar o desprendimento dos frutos, refletindo assim, sua importância no processo da colheita mecanizada (OLIVEIRA et al., 2007; SANTOS et al., 2010a; SANTOS et al., 2010b; COELHO et al., 2016; FERREIRA JÚNIOR et al., 2020; GOMES et al., 2020a).

Portanto, para avaliação da frequência de vibração e estágio de maturação, os valores da transmissibilidade de vibração obtidas experimentalmente para os ramos plagiotrópicos foram submetidos a análise de variância, cujas médias estão apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores frequência de vibração e estágio de maturação sobre a transmissibilidade de vibração dos ramos plagiotrópicos das plantas de café.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Frequência de vibração (FV)	4	1,164	0,291	0,583	0,675
Maturação (M)	1	0,001	0,001	0,001	0,970
FV x M	4	0,831	0,208	0,416	0,797
Resíduo	440	219,686	0,499		
Total	449	221,682			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Não foram encontradas diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, nos diferentes fatores de frequência bem como nos estádios de maturação, para os ramos plagiotrópicos. No entanto, ainda assim, foi realizado o desdobramento da transmissibilidade sobre o fator frequência de vibração, expressado na Tabela 3.5, onde podem ser observados os valores para cada frequência de vibração, independentemente do estágio de maturação dos frutos nas plantas de café.

Tabela 3.5 – Desdobramento da transmissibilidade sobre o fator frequência de vibração para os ramos plagiotrópicos.

Frequência de vibração (Hz)	Transmissibilidade
20	0,9890333 a
25	0,9298667 a
30	0,8453889 a
35	0,8663778 a
40	0,8903333 a

Legenda: Médias seguidas das mesmas letras são estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Resultado similar foi encontrado por Gomes et al. (2020a), ao avaliarem a transmissibilidade média de vibração em amostras do sistema fruto-pedúnculo-ramo do café contendo frutos verdes e maduros. Os experimentos foram realizados com cafés arábica, variedade Caturá Vermelho, as amostras foram submetidas aos níveis de frequência de vibração de 20, 30 e 40 Hz e induzidas ao ramo com impacto de hastes de fibra de vidro rígidas movendo-se em amplitude constante 2 mm. A frequência de 20 Hz apresentou a maior transmissibilidade, devido ao fato da frequência natural do sistema ser próxima a este valor. Além disso, foi observado que as amostras que continham frutos cerejas apresentaram maior transmissibilidade de vibração quando comparadas àquelas contendo frutos verdes.

Villibor (2012), ao avaliar a transmissibilidade de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café, trabalhando com baixas frequências, observou que para as faixas coincidentes com as frequências naturais do sistema, próximas a 20 Hz, em ambos estádios de maturação, maiores valores de transmissibilidade de vibração foram observados.

Ao analisar a massa média dos frutos de café, verificou-se valores de 1,05g e 1,343g para frutos imaturos e maduros, respectivamente. Logo, os ramos com os frutos maduros, apresentam uma massa média maior em relação ao imaturos. Como os ramos plagiotrópicos de café não alteram a rigidez com as variações de maturação dos frutos, um ramo que tenha maior

massa sofrerá maior deflexão durante um movimento vibratório. Maiores deflexões implicam em maiores acelerações, garantindo assim uma maior transmissibilidade da energia de vibração (GOMES et al., 2020a).

Porém, a transmissibilidade média obtida para os ramos plagiotrópicos de frutos maduros não apresentou diferença significativa em relação aos frutos imaturos. Tal resultado pode ser justificado pela presença de frutos do café, bem como as folhas, os quais podem ter contribuído para a redução do valor da transmissibilidade de vibração, visto que Castro-Garcia et al. (2020b) ao estudarem sobre a colheita mecânica de citros, concluíram que a presença dos frutos não modifica a resposta de frequência de ramos, mas reduz a transmissibilidade da aceleração, especialmente em baixas frequências. Já as folhas proporcionam um efeito duplo, por um lado, um notável amortecimento da vibração e, por outro, uma modificação da resposta de frequência para baixas frequências.

A partir destes resultados pode-se inferir que uma colheita total dos frutos seria viável em termos de transmissibilidade de vibração. Porém, vale ressaltar que outros fatores como frequência, amplitude e forma de transmissão da vibração são essenciais para a obtenção do comportamento desejado (GOMES et al., 2020a; TINOCO et al., 2014).

Assim como nos ramos plagiotrópicos, ao submeter os valores de transmissibilidade de vibração encontrados experimentalmente para os terços superior e médio dos ramos ortotrópicos à análise de variância, não foram encontradas diferenças significativas, ao nível de significância de 5% para os diferentes estádios de maturação, conforme está apresentado na Tabela 3.6. Tal resultado já era esperado, devido aos dados que foram apresentados nas Figuras 3.5(d) e 3.5(e).

Tabela 3.6 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e estágio de maturação sobre a transmissibilidade de vibração dos ramos ortotrópicos das plantas de café.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Posição na planta (P)	1	15,429	5	62,813	0,000
Maturação (M)	1	0,012	3	0,049	0,825
P x M	1	0,001	2	0,004	0,952
Resíduo	296	72,706	4		
Total	299	88,148	1		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao avaliar o fator posição na planta sobre a transmissibilidade nos ramos ortotrópicos, o mesmo apresentou resultado similar ao encontrado nos ramos plagiotrópicos, apresentando-se

como significativo, cujo desdobramento está apresentado na Tabela 3.7. Pode-se observar que o valor de transmissibilidade diminui ao longo da planta, sendo que o terço médio dos ramos plagiotrópicos apresentou valores superiores em relação ao terço superior.

Tabela 3.7 – Desdobramento da transmissibilidade sobre o fator posição na planta para os ramos ortotrópicos.

Posição na planta	Transmissibilidade
TM	1,372 a
TS	0,918 b

Legenda: Médias seguidas das mesmas letras são estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para avaliar a frequência de vibração e estágio de maturação sobre os valores da transmissibilidade de vibração obtidas experimentalmente para os ramos ortotrópicos, os dados foram submetidos a análise de variância, cujas médias estão apresentadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores frequência de vibração e estágio de maturação sobre a transmissibilidade de vibração dos ramos ortotrópicos das plantas de café.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Frequência de vibração (FV)	4	0,456	0,291	0,377	0,825
Maturação (M)	1	0,012	0,001	0,0397	0,842
FV x M	4	0,074	0,208	0,0615	0,993
Resíduo	290	87,606	0,499		
Total	299	88,148			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Não foram encontradas diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, no fator frequência bem como no estágio de maturação, para os ramos ortotrópicos. Porém, para as médias de transmissibilidade no fator frequência (Tabela 3.9), em ambos estágios de maturação dos frutos na plantas de café, pode-se observar que a frequência de 20 Hz apresentou uma média superior em relação as demais, assim como nos ramos plagiotrópicos. Isso ocorre devido ao fato da frequência natural do sistema ser próxima a este valor, portanto ao ser excitado nessa frequência, sistema sofre o efeito de ressonância (RAO, 2017; GOMES et al., 2020b; JÚNIOR et al., 2018; TINOCO et al., 2014; VELLOSO et al., 2020a).

Nota-se também, que os valores de transmissibilidade observados na Tabela 3.9 para os ramos ortotrópicos são superiores em relação aos valores encontrados para os ramos plagiotrópicos, o que pode ser justificado pela excitação ocorrer diretamente nos ramos ortotrópicos.

Tabela 3.9 – Desdobramento da transmissibilidade sobre o fator frequência de vibração para os ramos ortotrópicos.

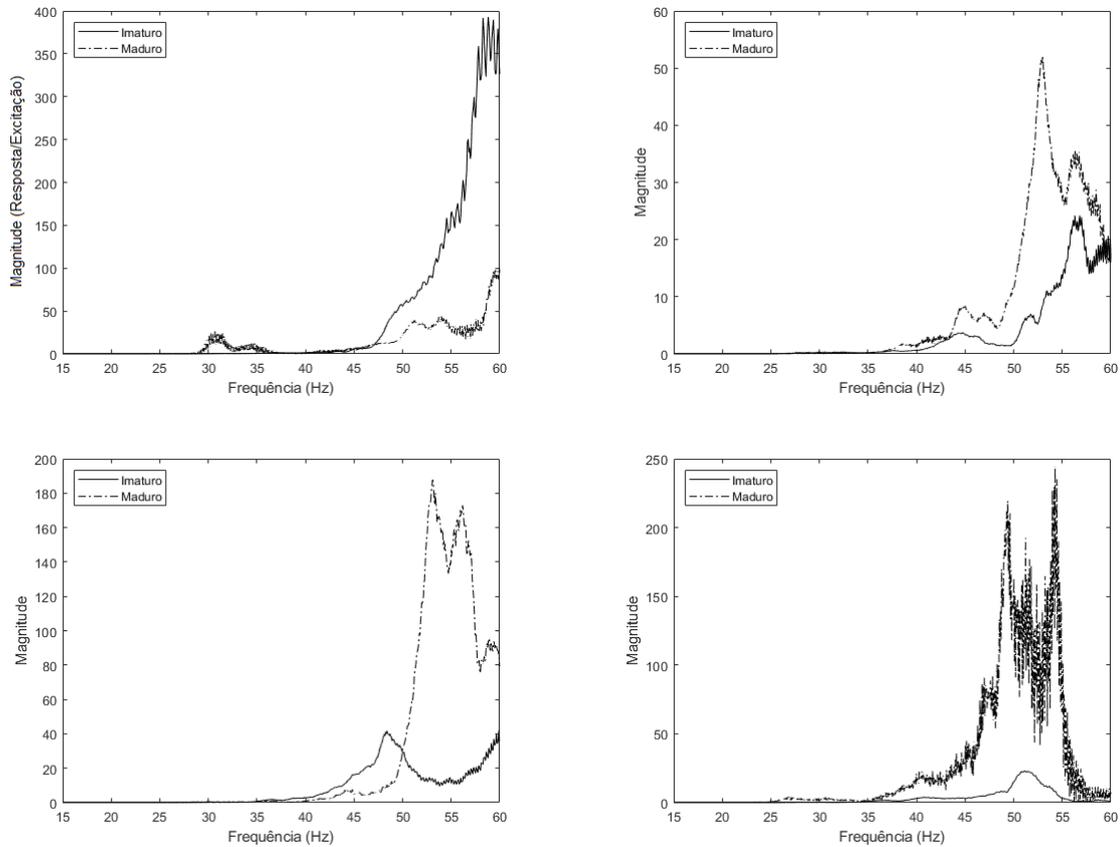
Frequência de vibração (Hz)	Transmissibilidade
20	1,194200 a
25	1,136117 a
30	1,079500 a
35	1,142650 a
40	1,173233 a

Legenda: Médias seguidas das mesmas letras são estatisticamente iguais pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por último, as frequências naturais das plantas de café foram obtidas por meio da indução de vibrações mecânicas sobre as plantas, a partir de uma fonte de excitação harmônica sob forma de onda senoidal, variando de 0 a 60 Hz, nos ramos ortotrópicos e plagiotrópicos (Figura 3.3). A Figura 3.6 ilustra as FRF's do terço superior dos ramos plagiotrópicos das plantas 4, 11, 12 e 15, respectivamente, para os estádios de maturação maduro e imaturo.

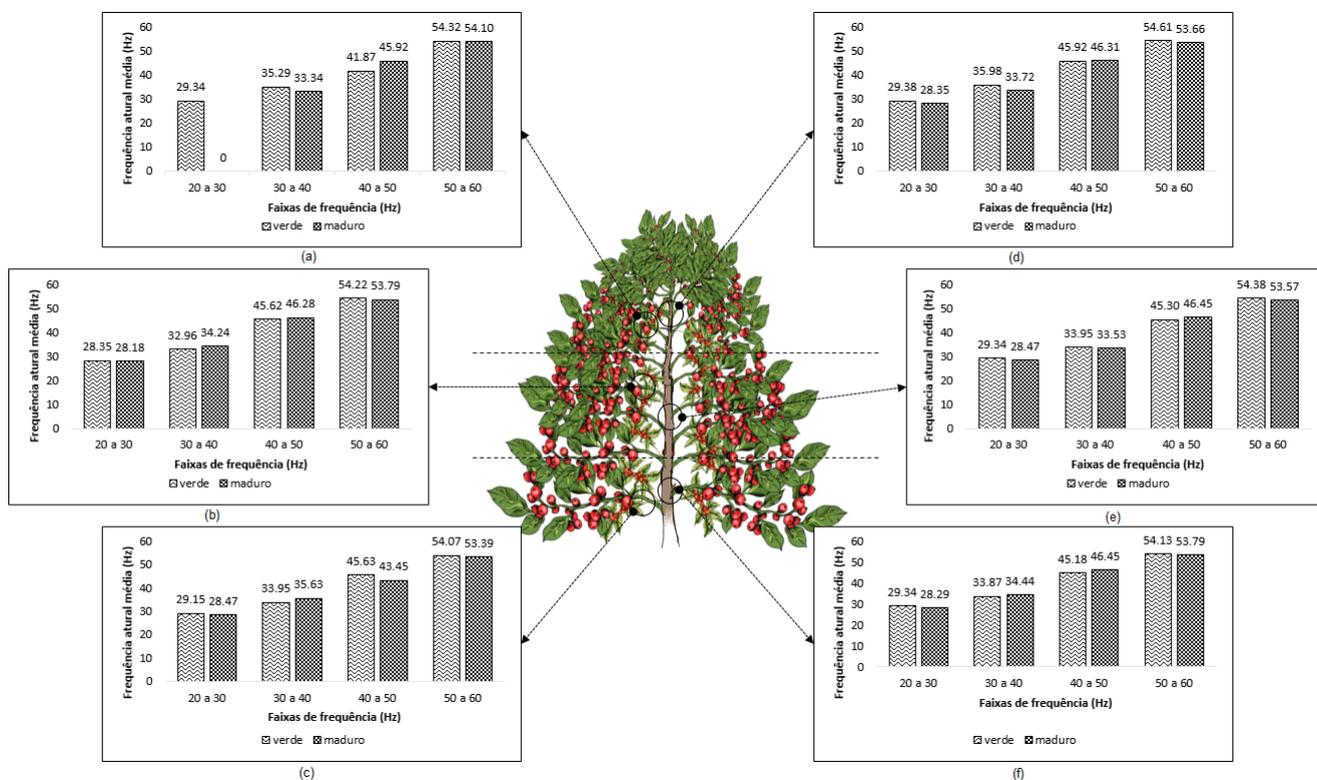
Figura 3.6 – Função de resposta em frequência para o terço superior dos ramos plagiotrópicos das plantas 4, 11, 12 e 15 para os estádios de maturação maduro e imaturo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar que a maior incidência de picos de frequência concentrou-se acima de 40 Hz, independente dos estádios de maturação avaliados. Adicionalmente, observa-se também uma maior amplitude nos picos de frequência para os frutos maduros do que para os frutos imaturos. Na Figura 3.7 encontram-se apresentados os valores médios de frequência extraídos para cada terço da planta, em cada faixa de frequência analisada, para os ramos plagiotrópicos e ortotrópicos.

Figura 3.7 – Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência advindas dos ensaios de varredura de frequência, de acordo com a posição na planta, em Hz.



- Legenda: (a) Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, no terço superior do ramo plagiotrópico das plantas.
 (b) Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, no terço médio do ramo plagiotrópico das plantas.
 (c) Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, no terço inferior do ramo plagiotrópico das plantas.
 (d) Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, no terço superior do ramo ortotrópico das plantas.
 (e) Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, no terço médio do ramo ortotrópico das plantas.
 (f) Frequências naturais médias para cada estágio de maturação, obtidas a partir de Funções de Resposta em Frequência, no terço inferior do ramo ortotrópico das plantas.

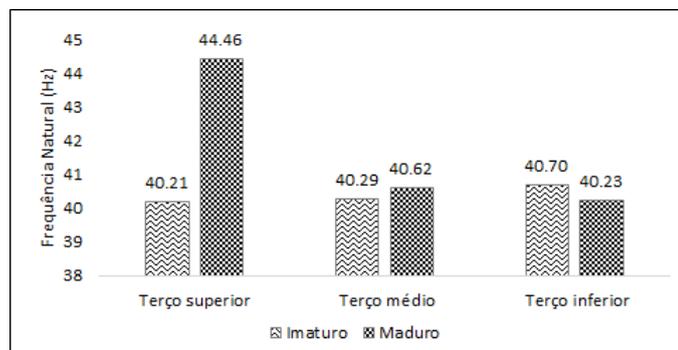
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de frequências naturais médias dos ramos plagiotrópicos e ortotrópicos para cada posição na planta, de acordo com o estágio de maturação, estão apresentados nas Figuras 3.8 e 3.9, respectivamente. Pode-se observar que independente da posição na planta e o estágio de maturação dos frutos, os valores de frequência natural média encontrados são próximos.

Coelho et al. (2017) encontram a frequência natural do sistema fruto-pedúnculo a partir da análise da curva de transmissibilidade, em que foi feito um ensaio de varredura de frequên-

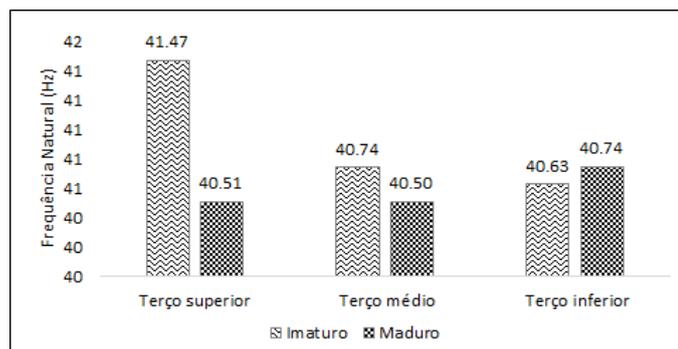
cias, onde o sistema fruto-pedúnculo e o ramo ortotrópico foram excitados em uma faixa de 10 a 30 Hz. O valor da frequência natural diminuiu conforme o estágio de maturação evoluiu e os resultados ficaram entre 14,11 e 20,59 Hz para o sistema fruto-pedúnculo e 14,57 e 19,45 Hz para o ramo ortotrópico. Nota-se que também não houve diferença entre os valores de frequência natural encontrados pelos autores em relação as diferentes partes das plantas avaliadas nesse estudo.

Figura 3.8 – Frequências naturais médias dos ramos plagiotrópicos para cada posição na planta de acordo com o estágio de maturação dos frutos, em Hz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.9 – Frequências naturais médias dos ramos ortotrópicos para cada posição na planta de acordo com o estágio de maturação dos frutos, em Hz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As frequências naturais obtidas experimentalmente foram submetidas a análise de variância com médias apresentadas nas Tabelas 3.10 e 3.11. Não foram encontradas diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, em diferentes posições na planta e nos diferentes estádios de maturação, para nenhuma das frequências naturais estudadas, para os ramos plagiotrópicos e ortotrópicos, o que já era esperado, de acordo com os dados que foram apresentados nas Figuras 3.8 e 3.9.

Gomes et al. (2020b) avaliaram amostras de ramos de café contendo frutos nos estádios verdes e maduros, submetidas a diferentes frequências (20, 30, 40 e 50 Hz) e amplitudes (0,002, 0,003 e 0,004 m). Além disso, foi avaliada a forma de transmissão das vibrações aos frutos, sendo as vibrações transmitidas às amostras com ou sem impacto das hastes de fibra de vidro. Os autores observaram que houve uma maior eficiência de desprendimento com o aumento da frequência e amplitude de vibração devido à maior energia mecânica imposta ao fruto.

Tabela 3.10 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e maturação sobre a frequência natural dos ramos plagiotrópicos das plantas de café, obtidas por meio da varredura de frequência.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados (Hz^2)	Quadrado médio (Hz^2)	F	P-valor
Posição na planta (P)	2	35,7	17,85	0,302302	0,73950
Maturação (M)	1	1	1	0,017453	0,89505
P x M	2	5	2,5	0,042716	0,95819
Resíduo	173	10221,51	59,084		
Total	178	10263,4	57,66		

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com o teste apresentado na Tabela 3.10, as médias do fator posição na planta foram estatisticamente iguais, com valores de 47,03, 47,89 e 48,05 Hz para os níveis superior, médio e inferior, respectivamente. Ainda de acordo com a análise, as médias do fator estágio de maturação foram não significativas com valores iguais a 47,57 Hz para o estágio de maturação imaturo e 47,71 Hz para o estágio de maturação maduro.

Tabela 3.11 – Resultado da análise de variância para o estudo do efeito dos fatores posição na planta e maturação sobre a frequência natural dos ramos ortotrópicos das plantas de café, obtidas por meio da varredura de frequência.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados (Hz^2)	Quadrado médio (Hz^2)	F	P-valor
Posição na planta (P)	2	23,4	11,70	0,21854	0,80392
Maturação (M)	1	18,7	18,7	0,34885	0,55556
P x M	2	10,4	5,2	0,09727	0,90736
Resíduo	167	8954,7	53,621		
Total	172	9007,3	52,368		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao avaliar os dados apresentados na Tabela 3.11, as médias do fator posição na planta foram estatisticamente iguais, com valores de 48,88, 48,29 e 47,99 Hz para os níveis superior,

médio e inferior, respectivamente. Ainda de acordo com a análise, as médias do fator estágio de maturação foram não significativas com valores iguais a 48,72 Hz para o estágio de maturação imaturo e 48,06 Hz para o estágio de maturação maduro.

Santos et al. (2015) desenvolveram um modelo tridimensional em elementos finitos do sistema fruto-pedúnculo do café, para a determinação das frequências naturais e modos de vibração para os diferentes graus de maturação do sistema. O resultado da frequência natural encontrado para o modo de vibração em contra-fase, tanto para os grãos de maturação verde e cereja, foi superior a 40 Hz, corroborando com os resultados encontrados neste trabalho por meio dos ensaios de varredura. Os autores acrescentam ainda, que as frequências naturais são dependentes do aspecto geométrico, físico, das propriedades mecânicas e da condição de maturação do fruto.

Observa-se que tanto para os ramos plagiotrópicos quanto para os ramos ortotrópicos, não é possível colher seletivamente os frutos puramente pela ação de vibrações mecânicas, sem que haja a aplicação de algum impacto juntamente as plantas. Tal resultado também foi observado por outros autores (GOMES et al., 2020b; JÚNIOR et al., 2018; COELHO et al., 2016; VILLIBOR et al., 2016; SILVA et al., 2015; SANTOS et al., 2015; KAZAMA et al., 2021). Adicionalmente, Villibor et al. (2016) ao determinarem os parâmetros modais do sistema fruto-pedúnculo do café por meio de técnicas de processamento de imagens, classificaram o sistema como subamortecido e constataram ainda que, na faixa da primeira frequência natural teve sobreposição de faixas de ressonância entre os estádios de maturação cereja e verde, dificultando assim a colheita seletiva do café apenas por aplicação de vibração mecânica.

3.4 CONCLUSÃO

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

- Os valores de frequências naturais, obtidos pela análise de varredura, não apresentam diferenças significativas ao longo da planta e para os diferentes estádios de maturação avaliados.
- Os valores de transmissibilidade de vibração não apresentam diferenças significativas ao longo da planta e para os diferentes estádios de maturação avaliados.
- A maior magnitude de transmissibilidade de vibração foi obtida em uma frequência próxima às frequências naturais das plantas de café.

- Foi possível caracterizar o comportamento dinâmico das plantas de café nos diferentes terços e estádios de maturação, embora existiram desafios experimentais, por meio de ensaios de varredura de frequência, em condições de campo.

4 CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar o comportamento dinâmico das plantas de café submetidas a vibração forçada, considerando cargas pendentes de frutos em diferentes estádios de maturação. Para isso, foram utilizados ensaios de análise modal experimental e de varredura de frequências, bem como excitações harmônicas avaliando diferentes frequências de excitação, para determinação de suas propriedades modais e transmissibilidade de vibração do sistema, em condições de campo.

Desta forma, nas condições em que os experimentos foram realizados, pode-se concluir que:

- A utilização de ensaios de varredura de frequência, em condições de campo, permitiu a caracterização do comportamento dinâmico das plantas de café nos diferentes terços e estádios de maturação, apesar dos desafios experimentais existentes.
- Ao avaliar as Funções de Resposta em Frequência obtidas através da por meio de técnicas de análise modal experimental, observa-se que maior incidência de picos de frequência concentrou-se na faixa de frequência de entre 20 a 40 Hz. E através das Funções de Resposta em Frequência obtidas por meio de ensaios de varredura de frequência indução de vibrações mecânicas, observa-se que a maior incidência de picos de frequência concentrou-se acima de 40 Hz.
- Os valores de frequências naturais, obtidas por meio da análise modal e pela análise de varredura de frequências, embora tenham sido utilizado diferentes meios de excitação, não apresentaram diferenças significativas ao longo da planta e para os diferentes estádios de maturação avaliados.
- As razões de amortecimento dos ramos plagiotrópicos das plantas de café com frutos predominantemente maduros, também não apresentaram diferenças significativas relativas aos terços superiores, médios e inferiores, sendo eles 0,145, 0,134 e 0,127, respectivamente.
- Para a transmissibilidade de vibração, também não foi encontrado diferenças significativas ao longo da planta e para os diferentes estádios de maturação avaliados, porém a frequência de 20 Hz apresentou maior transmissibilidade de vibração em relação as de-

mais frequências induzidas, visto que este valor está próximo às frequências naturais das plantas de café.

- Com base nos parâmetros modais encontrados neste trabalho, observa-se que colher os frutos seletivamente apenas mediante aplicação de vibração nas plantas seria uma operação difícil, já que não foi observado diferenças significativas para os diferentes estádios de maturação e devido a sobreposição de valores de frequência para ambos estádios avaliados.

REFERÊNCIAS

- AIELLO, G.; VALLONE, M.; CATANIA, P. Optimising the efficiency of olive harvesting considering operator safety. **Biosystems Engineering**, Elsevier, v. 185, p. 15–24, 2019.
- ALVES, E. A.; COSTA, J. N.; SANTOS, J. C. F. Procedimentos de colheita do café. **Embrapa Rondônia-Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E)**, In: MARCOLAN, AL; ESPINDULA, MC (Ed.). Café na Amazônia. Brasília, DF . . . , 2015.
- ARISTIZABAL, I. et al. Mechanical harvest of coffee applying circular and multidirectional vibrations. **Transactions of the ASAE**, v. 46, 03 2003.
- AVITABILE, P. **Modal testing: a practitioner's guide**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.
- BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N.; SILVA, F. M. d. Desempenho operacional de derrçadores mecânicos portáteis, em diferentes condições de lavouras cafeeiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 9, n. 1, p. 129–132, 2005.
- BARROS, M. de et al. Use of classifier to determine coffee harvest time by detachment force. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 366–370, 05 2018.
- BORGES, F. B.; JORGE, J. T.; NORONHA, R. Influência da idade da planta e da maturação dos frutos no momento da colheita na qualidade do café. **Food Science and Technology**, SciELO Brasil, v. 22, p. 158–163, 2002.
- CANAL RURAL. **Café: tecnologia de colheita em montanha traz ganho de 770 milhões de reais**. 2021. <<https://www.canalrural.com.br/noticias/agricultura/cafe/cafe-derricadeira-costal-colheita-montanha/>>. 21 jul. 2021.
- CARDONA, C. I. et al. Vibrations analysis of the fruit-pedicel system of coffea arabica var. castillo using time–frequency and wavelets techniques. **Applied Sciences**, v. 11, n. 19, 2021. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/19/9346>>.
- CARVALHO, C. d. et al. Cultivares de café: origem, características e recomendações. **Brasília: Embrapa Café**, v. 334, 2008.
- CARVALHO, E. de A.; MAGALHÃES, R. R.; SANTOS, F. L. Geometric modeling of a coffee plant for displacements prediction. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 57–63, 2016. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816991630045X>>.
- CASTRO-GARCIA, S. et al. The contribution of fruit and leaves to the dynamic response of secondary branches of orange trees. **Biosystems Engineering**, v. 193, p. 149–156, 2020. ISSN 1537-5110. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511020300593>>.
- CASTRO-GARCIA, S. et al. The contribution of fruit and leaves to the dynamic response of secondary branches of orange trees. **Biosystems Engineering**, v. 193, p. 149–156, 2020. ISSN 1537-5110. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511020300593>>.
- CASTRO-GARCÍA, S.; BLANCO-ROLDÁN, G. L.; GIL-RIBES, J. A. Frequency response of pinus pinea l. for selective cone harvesting by vibration. **Trees**, Springer, v. 25, n. 5, p. 801–808, 2011.

- COELHO, A. L. d. F. et al. Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 19, p. 286–292, 2015b.
- COELHO, A. L. d. F. et al. Dynamic behavior of the coffee fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. Editora UFLA, 2016.
- COELHO, A. L. de F. et al. Detachment efficiency of fruits from coffee plants subjected to mechanical vibrations. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, p. 406–412, 2015a.
- COELHO, A. L. de F. et al. Dynamic test for determining the elastic modulus of coffee fruit-stem-branch system. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, p. 579–586, 2017.
- COETZEE, C. J.; LOMBARD, S. G. The destemming of grapes: Experiments and discrete element modelling. **Biosystems engineering**, Elsevier, v. 114, n. 3, p. 232–248, 2013.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café, safra 2022, primeiro levantamento**. 2022. <<https://www.conab.gov.br/>>. 19 abr. 2022.
- CUNHA, J. P. B. et al. Viabilidade técnica e econômica de diferentes sistemas de colheita do café. **Coffee Science**, v. 11, n. 3, p. 417–426, 2016.
- ERDOGAN, D. et al. Mechanical harvesting of apricots. **Biosystems engineering**, Elsevier, v. 85, n. 1, p. 19–28, 2003.
- EWINS, D. J. **Modal testing: theory, practice and application**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- FAGAN, E. B. et al. Efeito do tempo de formação do grão de café (*coffea sp*) na qualidade da bebida. **Biosci. j.(Online)**, p. 729–738, 2011.
- FERREIRA JÚNIOR, L. de G. et al. Dynamic behavior of coffee tree branches during mechanical harvest. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, p. 105415, 2020. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919320824>>.
- GOMES, E. Q. et al. Transmissibility of coffee fruit-peduncle-branch systems submitted to vibration induced by impact. **Dyna**, 2006, Revista DYNA, v. 87, n. 214, p. 61–65, 2020a.
- GOMES, E. Q. et al. Effect of the impact of rigid rods on coffee fruit detachment efficiency by mechanical vibrations. **Coffee Science - ISSN 1984-3909**, v. 15, p. e151747, 2020b. Disponível em: <<http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1747>>.
- INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. **Relatório sobre o Mercado de Café (2020/2021)**. 2022. <<http://www.ico.org/>>. 19 abr. 2022.
- JÚNIOR, L. d. G. F. et al. Characterization of the coffee fruit detachment force in crop subjected to mechanized harvesting. **Coffee Science**, v. 13, n. 1, p. 71–79, 2018.
- KAZAMA, E. H. et al. Methodology for selective coffee harvesting in management zones of yield and maturation. **Precision Agriculture**, Springer, v. 22, n. 3, p. 711–733, 2021.

- KROLING, C. et al. Rendimento de derrçadoras portáteis na colheita de cultivares de café arábica. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 9., 2015, Curitiba. Consórcio . . . , 2015.
- LANNA, G. B. M.; REIS, R. P. Influência da mecanização da colheita na viabilidade econômico-financeira da cafeicultura no sul de minas gerais. **Coffee Science**, v. 7, n. 2, p. 110–121, 2012.
- MAIA, N. M. M.; SILVA, J. M. M. e. **Theoretical and Experimental Modal Analysis**. [S.l.]: Research Studies Press Ltd., 1997.
- MEIROVITCH, L. **Fundamentals of vibrations**. [S.l.]: Waveland Press, 2010.
- MESQUITA, C. d. et al. Manual do café: colheita e preparo (coffea arabica l.). **Belo Horizonte: EMATER-MG**, p. 1–56, 2016.
- MESQUITA, C. M. d. et al. Manual do café: distúrbios fisiológicos, pragas e doenças do cafeeiro (coffea arabica l.). **Belo Horizonte: EMATER-MG**, p. 22–42, 2016.
- OLIVEIRA, E. d. et al. Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, SciELO Brasil, v. 42, p. 827–831, 2007.
- PEREIRA, M. C. et al. Multivariate analysis of sensory characteristics of coffee grains (coffea arabica l.) in the region of upper paranaíba. **Acta Scientiarum. Agronomy**, SciELO Brasil, v. 32, n. 4, p. 635–641, 2010.
- PEREIRA, M. R. et al. Modeling and simulation of the dynamic behavior of the macaw palm fruit-rachilla system. **SIMULATION**, v. 98, n. 4, p. 307–320, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/00375497211043798>>.
- PEZZI, F.; CAPRARA, C. Mechanical grape harvesting: Investigation of the transmission of vibrations. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 3, p. 281–286, 2009. ISSN 1537-5110. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511009001214>>.
- PIMENTA, C. J.; ANGÉLICO, C. L.; CHALFOUN, S. M. Challenges in coffee quality: Cultural, chemical and microbiological aspects. **Ciência e Agrotecnologia**, SciELO Brasil, v. 42, p. 337–349, 2018.
- R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2022. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- RAO, S. **Mechanical Vibrations**. [S.l.]: Pearson Education, Incorporated, 2017. ISBN 9780134361307.
- REVISTA CULTIVAR. **Cafeicultores aumentam lucro com colheita mecanizada seletiva**. 2021. <<https://www.grupocultivar.com.br/noticias/cafeicultores-aumentam-lucro-com-colheita-mecanizada-seletiva>>. 12 jul. 2021.
- SAATH, R. et al. Alterações na composição química e sensorial de café (coffea arabica l.) nos processos pós-colheita. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 27, 09 2012.
- SANDERS, K. Orange harvesting systems review. **Biosystems Engineering**, Elsevier, v. 90, n. 2, p. 115–125, 2005.

- SANTINATO, F. et al. Número de operações mecanizadas na colheita do café. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 45, p. 1809–1814, 2015.
- SANTINATO, F. et al. Operational cost of mechanized harvesting of first-crop coffee. **Australian Journal of Crop Science**, Southern Cross Journals, v. 13, n. 9, 2019. ISSN 1835-2693. Disponível em: <<https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.757603682738079>>.
- SANTOS, F. L. et al. Frequency and amplitude of vibration on coffee harvesting. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 14, n. 4, p. 426–431, 2010a.
- SANTOS, F. L. et al. Analysis of the coffee harvesting process using an electromagnetic shaker. **Acta Scientiarum. Agronomy**, SciELO Brasil, v. 32, n. 3, p. 373–378, 2010b.
- SANTOS, F. L. et al. Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 37, n. 1, p. 11–17, 2015.
- SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Café: colheita e pós-colheita**. Brasília, 2017.
- SILVA, F. C. d. et al. Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiros ao longo do período de colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, SciELO Brasil, v. 34, p. 468–474, 2010.
- SILVA, F. C. d. et al. Efficiency of coffee mechanical and selective harvesting in different vibration during harvest time. **Coffee Science**, v. 10, n. 1, p. 56–64, 2015.
- SILVA, F. C. d. et al. 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. d.; SALVADOR, N.; PÁDUA, T. d. S. **Café: mecanização da colheita**. 2002.
- SILVA, V. A. et al. Recuperação de cultivares de café submetidas ao esqueletamento aos quatro anos e meio de idade. Editora UFLA, 2016.
- SILVEIRA, L. et al. Colheita do café de qualidade: Custo e retorno para os produtores da região de mantiqueira de minas-mg. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 35, n. 3, p. 437–446, 2020. Disponível em: <<https://200.145.140.50/index.php/energia/article/view/4048>>.
- SOBREIRA, F. M. et al. Rendimento de derriçadoras portáteis na colheita de cultivares de café arábica. Embrapa Café, 2015.
- SOLA-GUIRADO, R. R. et al. Assessment of aerial and underground vibration transmission in mechanically trunk shaken olive trees. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 49, n. 3, p. 191–197, 2018.
- SOUZA, C. et al. Desempenho de derriçadora portátil de frutos do cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, v. 25, 12 2005.
- SOUZA, F. d. F. et al. Características das principais variedades de café cultivadas em rondônia. Porto Velho: Embrapa Rondônia, p. 21, 2004.

- SOUZA, V. H. S. et al. Evaluation of the interaction between a harvester rod and a coffee branch based on finite element analysis. **Computers and electronics in agriculture**, Elsevier, v. 150, p. 476–483, 2018.
- TAVARES, T. d. O. et al. The times, movements and operational efficiency of mechanized coffee harvesting in sloped areas. **PloS one**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 14, n. 5, p. e0217286, 2019.
- TAVARES, T. d. O. et al. Qualidade do recolhimento mecanizado do café. **Coffee Science**, v. 4, n. 4, p. 455–463, 2015.
- TINOCO, H. A. et al. Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of coffea arabica l. var. colombia estimating its geometrical and mechanical properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 108, p. 17–27, 2014.
- TINOCO, H. A.; PEÑA, F. M. Harmonic stress analysis on coffea arábica l. var. colombia fruits in order to stimulate the selective detachment: A finite element analysis. **SIMULATION**, v. 94, n. 2, p. 163–174, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0037549717738068>>.
- TRUGILHO, P.; LIMA, J.; MENDES, L. Influência da idade nas características do eucalipto. **Revista da Madeira, Curitiba**, v. 15, n. 92, p. 82–88, 2005.
- VALE, A. T. d.; DIAS, Í. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, SciELO Brasil, v. 20, p. 137–145, 2010.
- VELLOSO, N. S. et al. The finite element method applied to agricultural engineering: A review. **Current Agriculture Research Journal**, Enviro Research Publishers, v. 6, n. 3, p. 286–299, 2018.
- VELLOSO, N. S. et al. Modal properties of coffee plants via numerical simulation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 175, p. 105552, 2020.
- VELLOSO, N. S. et al. Physical and mechanical properties of the wood of coffee trunks and branches. **Coffee Science - ISSN 1984-3909**, v. 15, p. e151753, Dec. 2020. Disponível em: <<http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1753>>.
- VELLOSO, N. S. et al. Mechanical properties of the macaw palm fruit-rachilla system. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, SciELO Brasil, v. 47, p. 218–225, 2017.
- VILLAR, F. M. d. M. et al. Elasticity modulus and damping ratio of macaw palm rachillas. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 47, 2016.
- VILLAR, F. M. d. M. et al. Modal properties of fruit-rachilla system of the macaw palm. **PLOS ONE**, Public Library of Science, v. 16, n. 1, p. 1–9, 01 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237291>>.
- VILLIBOR, G. P. **Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de derriça de café**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.
- VILLIBOR, G. P. et al. Determination of modal properties of the coffee fruit-stem system using high speed digital video and digital image processing. **Acta Scientiarum. Technology**, Universidade Estadual de Maringá, v. 38, n. 1, p. 41–48, 2016.

VILLIBOR, G. P. et al. Dynamic behavior of coffee fruit-stem system using modeling of flexible bodies. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 166, p. 105009, 2019.