



VICTOR HUGO SILVA SOUZA

**INVESTIGAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE A
HASTE DE UMA COLHEDORA E O RAMO
DE UM CAFEIEIRO UTILIZANDO
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

LAVRAS – MG

2017

VICTOR HUGO SILVA SOUZA

**INVESTIGAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE A HASTE DE UMA
COLHEDORA E O RAMO DE UM CAFEIEIRO UTILIZANDO
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

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

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães

Orientador

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos

Coorientador

LAVRAS – MG

2017

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

Souza, Victor Hugo Silva.

Investigação da interação entre a haste de uma colhedora e o
ramo de um cafeeiro utilizando modelagem computacional / Victor
Hugo Silva Souza. - 2017.

91 p. : il.

Orientador(a): Ricardo Rodrigues Magalhães.

Coorientador(a): Fábio Lúcio Santos.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Mecanização. 2. Colheita de café. 3. Simulação numérica. I.
Magalhães, Ricardo Rodrigues. II. Santos, Fábio Lúcio. III. Título.

VICTOR HUGO SILVA SOUZA

**INVESTIGAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE A HASTE DE UMA
COLHEDORA E O RAMO DE UM CAFEIEIRO UTILIZANDO
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

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

APROVADA em 12 de dezembro de 2017.

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos
Prof. Dr. Henrique Leandro Silveira
Prof. Dr. Alexandre Carlos Eduardo

UFLA
UFLA
UFSJ

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

LAVRAS – MG

2017

*Aos meus pais,
Irineu de Souza Junior e Dulce Helena Silva.*

*Às minhas irmãs,
Larissa Silva Souza
Sylvia Elaine de Souza
Claudia Fernanda de Souza.*

*À minha esposa,
Maria Cristina de Souza Silva.*

*Ao meu filho,
Luiz Guilherme Silva Souza.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre presente em nossas vidas.

Aos meus pais, pelo amor, pelo carinho, pela amizade e apoio incondicionais, mesmo distantes, sempre me incentivaram.

À minha irmã Larissa, em especial, pelo apoio fundamental para a conclusão de meu mestrado e pelo amor dedicado.

Às minhas irmãs Sylvia e Claudia pelo amor, atenção e distrações necessárias.

À minha esposa pelo apoio e companheirismo no meu dia-a-dia e o amor demonstrado todos os dias.

Ao meu filho por tornar meus dias mais especiais, cheios de luz e encanto.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Engenharia (DEG) e, em especial, à Engenharia Agrícola, pela oportunidade e condições oferecidas durante o mestrado e à Engenharia de Controle e Automação, pela disponibilização das máquinas utilizadas nas simulações.

Ao meu orientador e amigo, Professor Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães, pela orientação, ensinamento e ajuda constante no trabalho, em especial.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Fábio Lúcio Santos, pelo apoio e ajuda na realização deste trabalho.

Aos alunos, George da iniciação científica, Alexandre do mestrando e André do doutorado, pelo auxílio imprescindível na modelagem e simulação.

Aos membros da banca de defesa.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma para o alcance deste objetivo, meu sincero MUITO OBRIGADO!

RESUMO

No passado, a validação da solução de problemas na indústria era obtida, quase em sua totalidade, por meio de testes experimentais. Atualmente, programas comerciais de simulação numérica vêm contribuindo, de maneira significativa, na redução destes testes e, conseqüentemente, reduzindo tempo e custos no desenvolvimento de novos produtos. Considerando as dificuldades para modelar estruturas biológicas, como o ramo do café, o objetivo deste trabalho foi a avaliação do comportamento mecânico da interação entre a haste da colhedora e o ramo cafeeiro por vibração, usando modelagem computacional. Para isso, realizou-se a modelagem da haste da colhedora e do ramo cafeeiro, por meio do software comercial Solidworks[®] e, posterior, simulações numéricas via Método dos Elementos Finitos para análise de tensões e deslocamentos no software Ansys[®] versão 14.5. Ensaios experimentais foram realizados, a partir de amostras da haste de uma colhedora e com ramos de cafeeiro da cultivar Catuaí Vermelho, variedade IAC 144, no intuito de validar os resultados das simulações numéricas. Os resultados encontrados na simulação para o deslocamento e aceleração foram, respectivamente, 0,225 mm e 43,342 m/s². Já os resultados obtidos no ensaio experimental, para o deslocamento e aceleração, foram de 0,293 mm e 41,982 m/s². Com isto, foram validadas as simulações numéricas, o que pode contribuir para o direcionamento de novas pesquisas científicas, na criação e desenvolvimento de novas tecnologias para o sistema de colheita mecanizada de café, utilizando modelagem computacional.

Palavras-chave: Mecanização. Colheita de café. Simulação numérica.

ABSTRACT

In the past, a validation of problem solving in the industry was obtained, almost entirely, through experimental tests. Currently there is no new product development. Considered as difficulties to model biological structures, such as the coffee branch, the objective of this work was evaluated by the mechanical behavior of the interaction between a stem of the harvester and the coffee branch by vibration, using computational modeling. To do this, perform a model of the harvester platform and the coffee branch through commercial software Solidworks® and subsequent numerical simulations via the Finite Element Method for analysis of stresses and displacements without Ansys® software version 14.5. Experimental tests were carried out from samples of a stem of a harvester and with coffee tree branches of Catuaí Vermelho variety IAC 144, with no intention to validate the results of the numerical simulations. Results found in the simulation for the displacement and acceleration were, respectively, 0.225 mm and 43.342 m/s². Already results were obtained in the experimental test for the displacement and acceleration of 0.293 mm and 41.982 m/s². With this, they were validated as numerical simulations, which may contribute to the direction of new scientific research, in the creation and development of new technologies for the mechanized coffee harvesting system, using computational modeling.

Keywords: Mechanization. Coffee harvest. Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Colhedora tipo acoplada – Jacto “Kokinha”	20
Figura 2 - Colhedora de arrasto – Jacto KTR 3500.	21
Figura 3 - Colhedora autopropelida com ensacamento – Jacto K3.	22
Figura 4 - Colhedora autopropelida com mecanismo de descarga - Jacto K 3500.....	23
Figura 5 - Arquitetura de um cafeeiro.....	24
Figura 6 - (a) Ramo ortotrópico; (b) Ramo plagiotrópico.....	25
Figura 7 - Escala para determinação de estádios fenológicos do café arábica.	26
Figura 8 - Diagrama esquemático de um fruto de café.....	27
Figura 9 - Discretização da planta de café.....	30
Figura 10 - Distribuição de tensões em uma planta de café.....	30
Figura 11 - Análise estática estrutural em uma colhedora de café.	31
Figura 12 - Modelagem do cafeeiro e da colhedora.....	33
Figura 13 - Geometria geral da pressão de sucção nos dutos e na caixa do depósito da máquina recolhadora	34
Figura 14 - Distribuição de tensão equivalente no final da simulação na árvore 1 a (a) 180cpm e (b) 230 cpm.....	36
Figura 15 - Resultados de tensões de Von Mises via MEF.....	37
Figura 16 - a) Sistema de varetas da colhedora Jacto K3 e b) Garra da derriçadora portátil	40
Figura 17 - Volume de café colhido em função da variação de vibração	41
Figura 18 - Processo de desfolha em função da variação da vibração.	41
Figura 19 - Eficiência de derriça em função da variação da vibração	42
Figura 20 - Volume de café caído no chão em função da variação da vibração.....	42

Figura 21 - Efeito da frequência de vibração sob a eficiência de derriça diferentes graus de maturação.....	44
Figura 22 - Diferentes modos de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café.....	45
Figura 23 - Engaste do ramo de café na base móvel da máquina vibradora.....	46
Figura 24 - Valores médios do deslocamento vertical em hastes de 570 mm de comprimento.....	47
Figura 25 - Valores médios para módulo de elasticidade do fruto e pedúnculo e força de desprendimento do fruto, em ambos os estádios de maturação.....	48
Figura 26 - Redução da geometria do cafeeiro	50
Figura 27 - Corte extrudado do ramo do cafeeiro.	51
Figura 28 - Geometria final do ramo do cafeeiro.....	51
Figura 29 - Geometria final da haste da colhedora.....	52
Figura 30 - Modelo computacional da árvore cafeeira.	52
Figura 31 - (a) Malha com geometria tetraédrica e (b) Malha com geometria hexaédrica.....	54
Figura 32 - (a) Malha de 8 mm e (b) Malha de 2 mm com o o ponto comparado	55
Figura 33 - Análise de convergência do ramo cafeeiro simulado para malha tetraédrica.	57
Figura 34 - Criação da malha do ramo cafeeiro e da haste	58
Figura 35 - Gravidade incluída no modelo simulado.....	59
Figura 36 - Engaste do ramo cafeeiro	59
Figura 37 - Movimentação da haste da colhedora.....	60
Figura 38 - Movimentação senoidal da haste da colhedora	61

Figura 39 - (a)Ramo cafeeiro antes do desbaste e b) Ramo cafeeiro após o desbaste.....	62
Figura 40 - Haste da colhedora em fibra de vidro e resina epóxi.....	63
Figura 41 - (a) Adaptação do cabeçote de colheita e (b) Acoplamento ensaio experimental.....	63
Figura 42 - (a) Esquema do aparato experimental e (b) Simulação.....	65
Figura 43 - Seleção da melhor parte do sinal de um dos ramos de café.....	67
Figura 44 - RMS da aceleração das amostras dos ramos de café.....	68
Figura 45 - RMS do deslocamento das amostras dos ramos de café.....	69
Figura 46 - Deslocamento total no ramo de café.....	69
Figura 47 - Sinal do deslocamento na simulação.....	70
Figura 48 - Sinal do deslocamento no ensaio experimental.....	71
Figura 49 - Deslocamento do ramo cafeeiro na simulação e no ensaio experimental.....	72
Figura 50 - Tensões de von Mises.....	73
Figura 51 - Sinal da tensão de von Mises na simulação.....	74
Figura 52 - Sinal da aceleração na simulação.....	76
Figura 53 - Sinal da aceleração no ensaio experimental.....	77
Figura 54 - Aceleração na simulação e no ensaio experimental.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas utilizadas na simulação no da haste da colhedora.	53
Tabela 2 - Propriedades mecânicas utilizadas na simulação do ramo do cafeeiro.	54
Tabela 3 - Resultados das análises para os diferentes tamanhos de malha na geometria tetraédrica.....	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	JUSTIFICATIVA	16
3	HIPÓTESE	17
4	OBJETIVOS	18
4.1	Objetivo geral	18
4.2	Objetivos específicos.....	18
5	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
5.1	Colhedora de café.....	19
5.2	A planta de café.....	23
5.3	Métodos numéricos aplicado à cafeicultura	28
5.4	Modelagem Tridimensional.....	32
5.5	A importância do estudo da vibração na colheita de café.....	38
5.6	Desprendimento dos frutos de café por vibração dos ramos.....	45
6	MATERIAL E MÉTODOS.....	49
6.1	Localização do experimento	49
6.2	Obtenção dos modelos geométricos para fins de simulação	49
6.3	Propriedades mecânicas utilizadas nas simulações	53
6.4	Análise de convergência de malha	54
6.5	Geração dos modelos de elementos finitos	57
6.6	Simulação numérica da interação entre colhedora e cafeeiro.....	58
6.7	Ensaio experimental	62
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
7.1	Processamento dos dados experimentais.....	66
7.2	Resultados das simulações numéricas.....	69
8	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma atividade de extrema importância para o cenário socioeconômico brasileiro e mundial. O Brasil é o maior produtor mundial de café, com produção estimada em 43,65 milhões de sacas, segundo a COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB, 2017). A produção global de café, para safra 2016/2017, foi estimada em 151,6 milhões de sacas pela ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ (OIC, 2017). A produção do café brasileiro está concentrada nos estados de Minas Gerais (com mais de 50% da produção nacional), seguido por Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia, Paraná, Rio de Janeiro, Goiás, Mato Grosso e Amazonas (CONAB, 2017).

A transformação do processo produtivo do café surgiu com trabalhos pioneiros e pesquisas em mecanização da lavoura cafeeira, com ênfase nas operações de colheita, na avaliação da produtividade e no custo operacional. Com a evolução da informática e da capacidade de processamento, outros processos mais complexos puderam ser avaliados.

Com o desenvolvimento da capacidade de processamento dos computadores, as simulações numéricas têm se tornado mais completas e com aplicações diversas, atingindo vários ramos da engenharia e outras áreas. Na indústria agrícola, já é possível prever via simulação numérica, não somente o comportamento mecânico das máquinas, mas também identificar possíveis tensões e deformações sofridas pelas árvores e frutos, por exemplo, provenientes de vibrações das colhedoras de café.

Existem vários programas comerciais de análise numérica, para este fim, que são programas de elementos finitos com capacidade de simular falhas em componentes, amplamente utilizados na indústria e no meio acadêmico. Entretanto estes programas são considerados de alto consumo de memória dos

computadores, necessitando estações de trabalho específicas para este fim, além de exigir mão de obra qualificada, para a realização das simulações, fazendo com que esse tipo de ferramenta seja mais utilizada por grandes empresas de máquinas agrícolas.

A utilização destes programas em novas aplicações, o aprimoramento dos modelos existentes, juntamente com a evolução constante dos computadores podem contribuir para a redução do tempo gasto, em simulações numéricas, o que é de grande interesse tecnológico e científico.

O propósito deste trabalho visa ao estudo baseado em modelo da interação entre a haste de uma colhedora e o ramo plagiotrópico de um cafeeiro, utilizando o Método dos Elementos Finitos para a avaliação do comportamento mecânico de ambos, durante o processo da colheita mecanizada de café por vibrações mecânicas.

2 JUSTIFICATIVA

Considerando pesquisas realizadas na área, existem poucos estudos que possibilitam simular o comportamento mecânico de materiais biológicos, como o ramo cafeeiro e sua interação com as hastes da colhedora. A colheita mecanizada do café requer um ajuste ideal entre frequência, amplitude e tempo de vibração, para que ocorra a derriça dos frutos sem causar uma desfolha excessiva e quebras dos ramos.

Apesar de trabalhos já realizados, os conhecimentos acerca da simulação da planta de café e das estruturas de uma colhedora foram realizados separadamente, portanto avaliar a interação entre essas duas estruturas é de extrema importância para a complexidade deste sistema. Este conhecimento traz subsídios, para a visualização de possíveis tensões e deformações sofridas pela interação da haste da colhedora com o ramo cafeeiro antes mesmo da avaliação realizada em campo.

Resultados de simulações numéricas, utilizando a modelagem tridimensional de ramo cafeeiro e hastes de colhedora podem contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias na área. Com isso, o meio industrial pode ser beneficiado com melhorias no processo de colheita mecanizada de café e o meio acadêmico beneficiado por novas pesquisas em simulações de materiais biológicos.

Por se tratar de um trabalho sobre o MEF com novas aplicações, este projeto tem potencial para gerar publicações de artigos em periódicos de relevância científica e conferências de âmbito nacional e internacional, o que também justifica a sua realização do ponto de vista científico.

3 HIPÓTESE

O entendimento do comportamento mecânico pela interação entre a haste da colhedora e o ramo cafeeiro, a partir de diferentes vibrações mecânicas, é fundamental para a prevenção e desenvolvimento de máquinas e equipamentos de colheita eficientes do café.

O objetivo principal deste trabalho foi a avaliação do comportamento mecânico da interação entre a haste da colhedora e o ramo cafeeiro por vibração.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi a avaliação do comportamento mecânico da interação entre a haste da colhedora e o ramo cafeeiro por vibração.

4.2 Objetivos Específicos

Estabeleceram-se como objetivos específicos:

- a) Entender os princípios mecânicos do comportamento de uma haste de colhedora e um ramo cafeeiro.
- b) Gerar uma forma de contato entre a haste de colhedora e um ramo cafeeiro eficaz para a simulação.
- c) Realizar simulações numéricas para prever deformação total e a tensão de equivalente (von Mises) da interação entre haste de colhedora e um ramo cafeeiro.
- d) Realizar as validações das simulações numéricas com partes das estruturas reais avaliadas.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

5.1 Colhedoras de Café

O desenvolvimento da primeira colhedora de café de que se tem conhecimento, aconteceu, ao final da década de 70, a partir da invenção do imigrante japonês Shunji Nishimura, que criou uma máquina que revolucionou a colheita de café e fez com que o Brasil se transformasse no maior produtor mundial de café (MURAKAMI, 2017). As máquinas colhedoras de café existentes no mercado são do tipo acoplado ao trator, de arrasto e autopropelidas.

Na colhedora do tipo acoplada, o mecanismo de junção é realizado no engate de três pontos de um trator e o seu acionamento pela tomada de potência do trator (TDP), além de ter um rodado de apoio para sustentação (Figura 1). Possui somente um conjunto de hastes vibratórias, operando apenas de um dos lados da planta por passada. A derriça é realizada sempre por igual, independentemente do alinhamento dos cafeeiros, graças ao ajuste lateral do conjunto vibratório. Por meio de um mecanismo de inclinação lateral, consegue operar mesmo em terrenos inclinados. O ajuste da altura de trabalho possibilita a derriça em cafeeiros dos mais variados portes (SILVEIRA, 1990).

Figura 1: Colhedora tipo acoplada – Jacto “Kokinha”.



Fonte: Jacto Máquinas Agrícolas S.A. (2017).

A colhedora de arrasto opera a cavaleiro (em torno das linhas das plantas), fazendo a derriça no chão, tracionada por trator, sendo fixada nos três pontos e acionada pela tomada de potência (Figura 2). Seus dois conjuntos, com dezenas de hastes vibratórias, entram em contato com os ramos dos cafeeiros para derriçar os grãos e são acionados pelo sistema hidráulico. Graças a um sistema independente das rodas, a colhedora de arrasto pode ser operada em terrenos com desnível lateral. Este tipo de colhedora apresenta sistema independente do trator para comandos, regulagens e altura de colheita e vibração, que são executados por um operador auxiliar, situado na parte superior do pórtico (SILVEIRA, 1990).

Figura 2: Colhedora de arrasto – Jacto KTR 3500.



Fonte: Jacto Máquinas Agrícolas S.A. (2017).

Na colhedora autopropelida há um envolvimento de toda a planta pela máquina, caminhamento contínuo e vibração dos ramos do cafeeiro, visando à derrça e a seu posterior recolhimento, limpeza e ensacamento (Figura 3). Possui estrutura em pórtico, com altura e largura suficientes para trabalhar plantas de, no máximo, 2,10 m de altura e diâmetro da copa de 1,40 a 1,80 m. Acionada por um motor diesel, colocado na parte superior da estrutura, assemelha-se a um trator de “pernas altas”, com os componentes de colheita instalados no interior do seu pórtico. A máquina opera “a cavaleiro” sobre a linha das plantas, envolvendo-as totalmente (GADANHA JÚNIOR et al, 1991).

Figura 3: Colhedora autopropelida com ensacamento – Jacto K3.



Fonte: Jacto Máquinas Agrícolas S.A. (2017).

Colhedoras autopropelidas mais recentes possuem um sistema de descarga total dos frutos, em que não é necessário que a operação de colheita seja interrompida para efetuar a descarga do café armazenado (Figura 4). Essa solução proporciona redução de tratores e carretas que acompanhariam a colheita.

Figura 4: Colhedora autopropelida com mecanismo de descarga – Jacto K 3500.



Fonte: Jacto Máquinas Agrícolas S.A. (2017).

5.2 A Planta de Café

A planta de café, segundo a classificação botânica, pertence à família das Rubiaceas, gênero *Coffea*, que engloba um número diverso de espécies, sendo as mais conhecidas no mundo as espécies de Café arábica (*Coffea arábica*) e Café robusta ou conilon (*Coffea canephora*) (CARVALHO,1946; BERTHAUD e CHARRIER,1988; DAVIS et al., 2006). O cafeeiro é uma planta de porte arbustivo ou arbóreo, de caule lenhoso, lignificado, reto e quase cilíndrico (Figura 5).

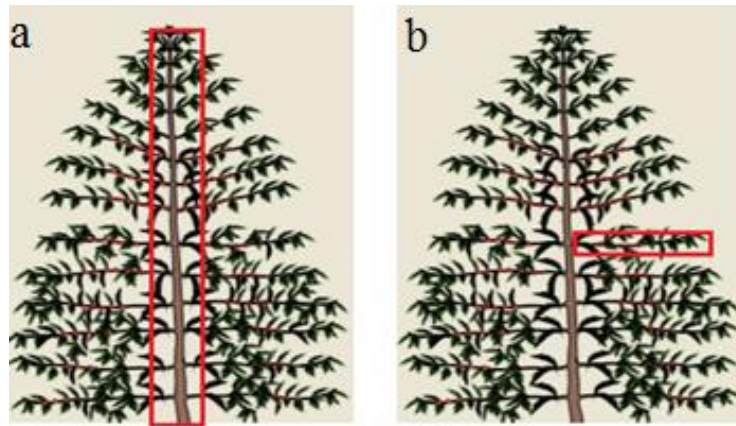
Figura 5: Arquitetura de um cafeeiro.



Fonte: Do autor (2017).

Os ramos são dimórficos, cujo dimorfismo é relacionado à direção dos ramos ortotrópicos, que formam as hastes ou troncos (Figura 6). Os ramos laterais, produtivos saem dessas hastes, crescem na horizontal e são chamados ramos plagiotrópicos (MATIELLO et al., 2010).

Figura 6: (a) Ramo ortotrópico; (b) Ramo plagiotrópico.



Fonte: Adaptado de Implantações de Cafezais – EMATER-MG (2016).

As gemas florais de *Coffea arabica* L. se desenvolvem, principalmente, nos ramos laterais denominados plagiotrópicos (Figura 7), crescidos na estação anterior e, com menor frequência nos ramos ortotrópicos. As gemas originam os botões florais, de pedúnculos curtos, formando um conjunto compacto recoberto por um cáliculo formado por dois pares de bractéolas, o qual se denomina glomérulo (DEDECCA, 1957). Nas axilas de cada folha aparecem de quatro a cinco glomérulos, raramente em maior número, sendo protegidos por estípulas interpeciolares (MOENS, 1968).

Figura 7: Escala para determinação de estádios fenológicos do café arábica.

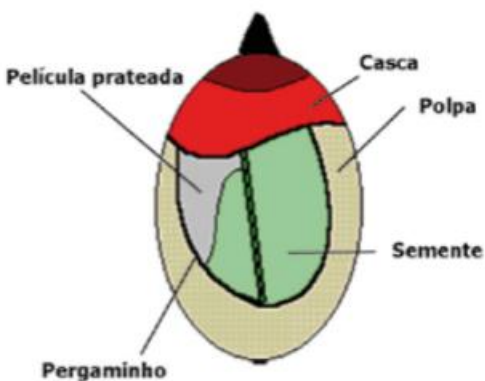


Fonte: Pezzopane et al. (2003).

O fruto do cafeeiro é uma drupa elipsóide que possui exocarpo (casca), endocarpo coriáceo (pergaminho) e dois lócus com dois endosperma (sementes), envolvidas pelo espermoderma (película prateada)

(Figura 8). O exocarpo é a camada mais externa, que, quando madura, pode ser vermelha ou amarela, conforme a cultivar. O mesocarpo é mucilaginoso aquoso e açucarado, estando entre a casca e o pergaminho, que é coriáceo e duro para proteção da semente (CASTRO; MARRACCINI, 2006).

Figura 8: Diagrama esquemático de um fruto de café.



Fonte: Silva et al. (2013a).

O pedúnculo é a parte que sustenta a flor ou o fruto. Dessa forma, a partir do conhecimento das propriedades modais do sistema fruto-pedúnculo, pode-se empregar níveis de frequência e amplitude adequados para a realização da colheita seletiva ou total dos frutos (SANTOS et al., 2010).

Ao final do ciclo produtivo, têm-se as etapas decisivas: colheita, secagem e processamento. Durante estas etapas, deve-se ter cuidado, para que não se perca ou prejudique a qualidade do produto obtido, durante o

ano de cultivo. Depois de processados adequadamente, os frutos são consumidos na forma de efusão.

5.3 Métodos numéricos aplicados à cafeicultura

A agroindústria cafeeira vem descobrindo as vantagens e benefícios de se conhecer os recursos computacionais de simulação numérica, uma tecnologia que a cada dia mais se multiplica nos departamentos de engenharia de empresas de pequeno e grande porte.

O aumento do consumo de café, em contraste com a indisponibilidade de mão-de-obra para a colheita manual, gera a necessidade da mecanização da colheita. Neste cenário, destaca-se a simulação numérica, que pode ser usada na predição do comportamento mecânico das máquinas e, também, de cafeeiros. Simulações numéricas, auxiliadas por modelos de elementos finitos, são cada vez mais comuns para a predição do comportamento mecânico de materiais metálicos, não metálicos e materiais biológicos, auxiliando a produção e o desenvolvimento de máquinas agrícolas (HUEBNER et al, 2011; NILNONTA et al, 2012; LI et al, 2013). Programas de simulação numérica podem antecipar resultados de testes físicos e gerar relatórios com resultados satisfatórios. Portanto a simulação numérica é uma ferramenta básica para engenheiros e pesquisadores que tratam diretamente de problemas voltados para a indústria e, também, para o ensino e pesquisa.

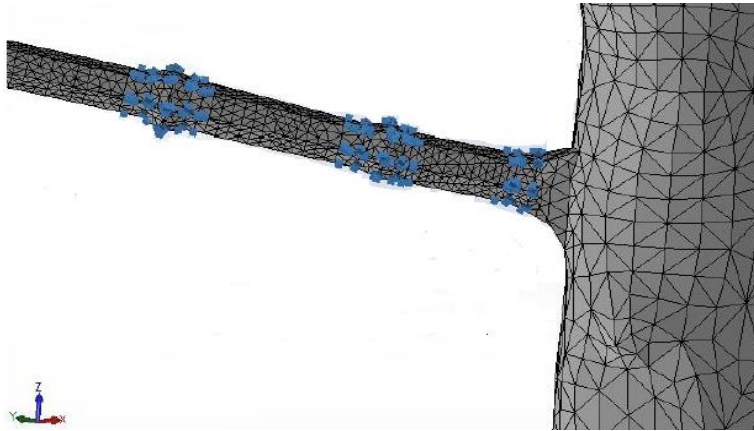
A análise numérica é de fundamental importância pela limitação de soluções por meio de métodos analíticos clássicos e pela complexidade

de detalhes geométricos e do comportamento tridimensional de tensões mecânicas atuantes em regiões difíceis de serem analisadas por meio analítico. Bishop (1999) afirma que, independente da situação a qual um componente é submetido por cargas cíclicas, ele pode ser analisado, a partir do uso de técnicas de elementos finitos, as quais podem gerar resultados ainda que na fase de concepção do projeto.

Verifica-se que quanto mais completa a análise desejada maior será o grau de complexidade e, conseqüentemente, maior a dificuldade de se obter uma solução adequada. Porém, com o avanço e popularização dos recursos computacionais, cientistas e engenheiros passaram a ter acesso a equipamentos com alta capacidade de processamento, os quais aliados ao aprimoramento dos métodos numéricos, permitiram a elaboração de programas computacionais que possibilitam análises numéricas baseadas em modelos CAD (*Computer Aided Design*).

Dentre os métodos numéricos existentes, destaca-se o MEF, que consiste na subdivisão (discretização) de pequenas áreas ou volumes de um corpo (Figura 9), denominada malha de elementos finitos (KNIGHT, 1993). Para o caso tridimensional, a malha é formada por pequenos volumes (elementos) com geometrias pré-definidas, geralmente elementos tetraédrico ou hexaédrico e que são conectados por nós em um sistema de coordenadas tridimensional.

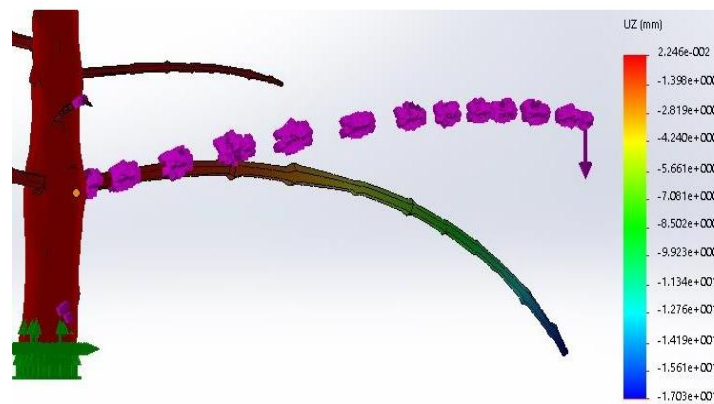
Figura 9: Discretização da planta de café.



Fonte: Adaptado de Carvalho, Magalhães e Santos (2016).

A partir da estrutura discretizada, podem-se calcular deslocamentos, deformações e tensões no modelo inteiro (Figura 10), como em Carvalho, Magalhães e Santos (2016).

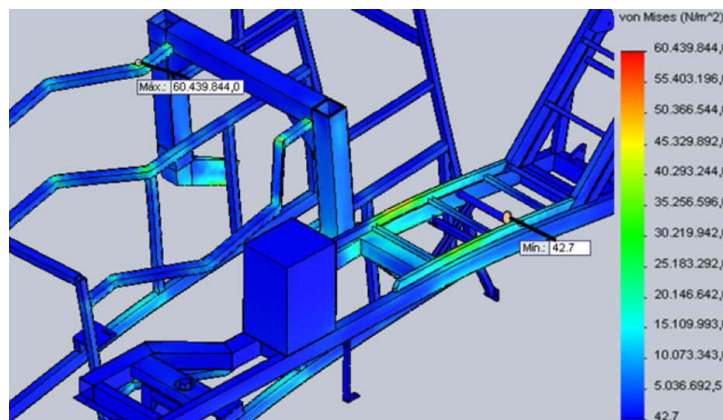
Figura 10: Distribuição de tensões em uma planta de café.



Fonte: Carvalho, Magalhães e Santos (2016).

Os primeiros relatos de utilização do MEF deu-se pela indústria aeroespacial (TURNER et al., 1956). Com o aumento da capacidade de processamento de computadores/estações de trabalho e redução no custo dos mesmos, a aplicação dos elementos finitos tornou-se comum em diversas áreas da engenharia, principalmente em acústica (TAKESHI et al., 2014), térmica (BOFANG, 2014) e dinâmica (LEE et al., 2012; NGUYEN-THOI et al., 2014). Na engenharia agrícola, o MEF pode ser utilizado como ferramenta de simulação no comportamento mecânico de frutas e verduras (PIOTR; PIECZYWEK, 2014), na mecanização da colheita (MAGALHÃES et al., 2006) e, também, na análise estrutural (Figura 11) de máquinas e implementos agrícolas (SILVA; SILVA; MAGALHÃES, 2014).

Figura 11: Análise estática estrutural em uma colhedora de café.



Fonte: Silva, Silva e Magalhães (2014).

Outros métodos numéricos também vêm sendo aplicados na engenharia agrícola, como o Método de Elementos de Contorno

(MURASE, 1983; D'ALFONSO, 1997; ASHRAFI; KASRAEI; FARID, 2008) e que pode ser utilizado em conjunto com o MEF e em outras aplicações (NG; CHEUNG; XU, 1990). Mais especificamente, existem vários trabalhos publicados para a determinação de propriedades mecânicas do café (CHANDRASEKAR; VISWANATHAN, 1999; FILGUEIRAS et al., 2000; MARIJA et al., 2012; OLUKUNLE; AKINNULLI, 2012; NEDOMOVÁ et al., 2013). Em razão disso, surge a necessidade de novas pesquisas na área para identificar possíveis soluções na interação entre colhedora e cafeeiro, utilizando o MEF.

5.4 Modelagem Tridimensional

A modelagem computacional pode ser definida como sendo a representação computacional de uma ideia, um objeto, um evento, um processo ou sistema, ou seja, é a atividade humana de construir modelos no computador, utilizando recursos de representação e simplificação oferecidos pela máquina, com o objetivo de alcançar algum benefício específico (OLIVEIRA, 2015).

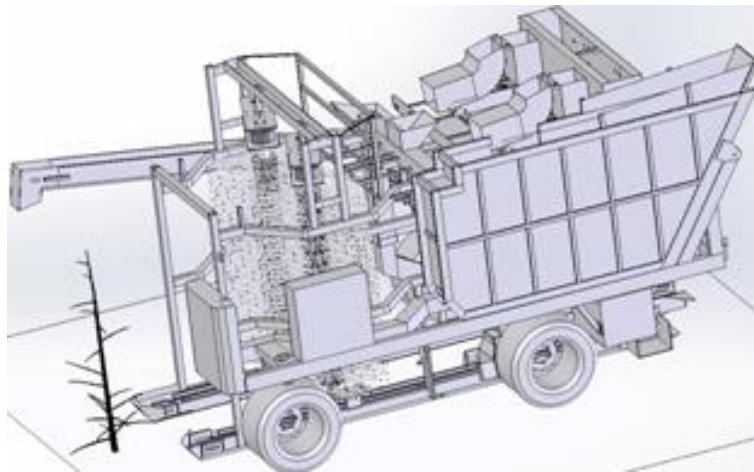
Um modelo computacional pode gerar resultados de forma otimizada, os quais levariam muito tempo para serem gerados, por meio de cálculos manuais e isso se deve ao alto poder computacional atual (OGBORN; MILLER, 1994). Algumas tecnologias, utilizadas na engenharia, são o CAD (*Computer-Aided Design*) e o CAE (*Computer-Aided Engineering*).

Computer Aided Design (CAD) é definido, segundo Callicott (2001), como um sistema computacional utilizado para a criação,

modificação, análise ou otimização de projetos. Esses sistemas computacionais podem ser hardware e software que desempenham funções específicas requeridas pelos usuários. O hardware, que compõe o CAD, é, basicamente, composto por computador, placas gráficas e determinados equipamentos periféricos. Já os softwares CAD são constituídos por programas que realizam a implementação gráfica no sistema. Além disso, pode ser composto por outros programas como facilitador das funções de engenharia.

Existem algumas possibilidades de modelagem de geometrias complexas, como, por exemplo, a interação entre a planta de café e uma colhedora (Figura 12). No entanto isto requer alto custo computacional, em razão da complexidade de todos os modelos geométricos envolvidos.

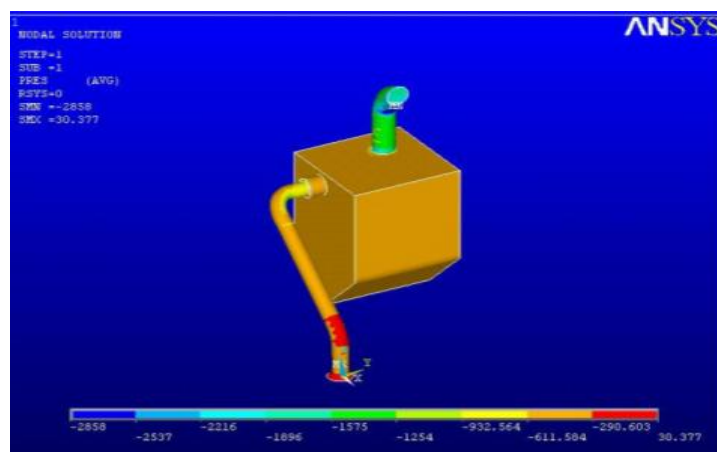
Figura 12: Modelagem do cafeeiro e da colhedora.



Fonte: Do autor (2017).

Magalhães et al. (2006), com o objetivo de desenvolver um modelo matemático, por meio do MEF, para otimizar o projeto de máquina recolhadora de frutos de café no terreiro, utilizou-se da modelagem e identificou faixas de pressão que dificultariam o transporte pneumático dos frutos de café em alguns pontos da máquina (Figura 13).

Figura 13: Geometria geral da pressão de sucção nos dutos e na caixa do depósito da máquina recolhadora.

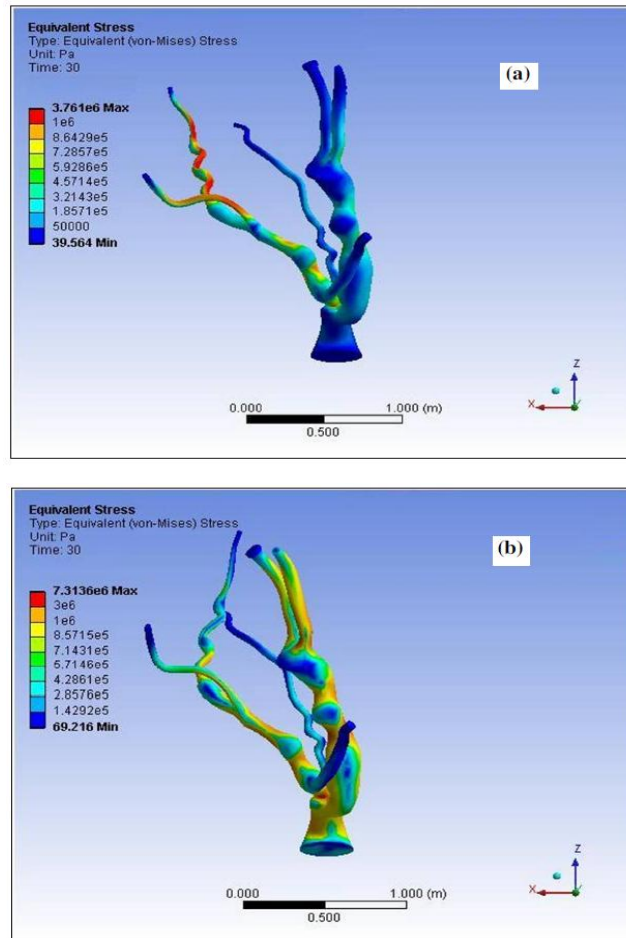


Fonte: Magalhães (2006).

Savary et al. (2010), ao avaliar uma estrutura de simulação, para prever a interação entre a árvore e o agitador de copa usando MEF, fez uso de um experimento de campo conduzido em três árvores de citrus e um agitador de copa desenhado por tractor a 180 e 230 ciclos por minuto (cpm). Os dados de aceleração foram utilizados para a validação da simulação. Neste estudo, as árvores foram modeladas usando o SolidWorks® e simuladas usando ANSYS®. A força de entrada foi

estimada usando a aceleração de pontos nas hases do agitador de copa. As propriedades mecânicas da madeira do citrus foram determinadas sob a suposição de que é de natureza isotrópica. As três árvores de citrus foram modeladas, e os dados de aceleração da simulação foram comparados com os dados experimentais. Observou-se, também, que tanto para os dados experimentais como para os dados de simulação no ANSYS® a tensão equivalente e a aceleração resultante foram maiores para a frequência mais alta do que para a frequência mais baixa (Figura 14).

Figura 14: Distribuição de tensão equivalente no final da simulação na árvore 1 a (a) 180cpm e (b) 230 cpm.

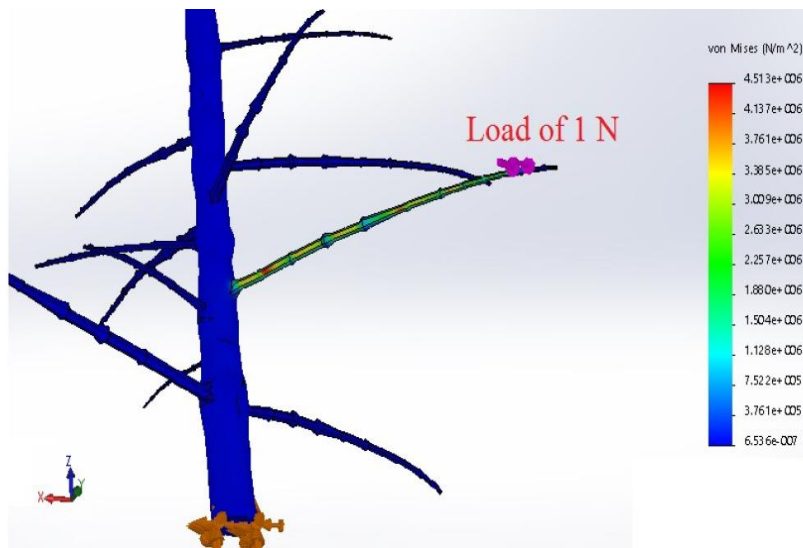


Fonte: Savary et al. (2010).

Carvalho, Magalhães e Santos (2016), utilizando o MEF para a avaliação do comportamento mecânico de um cafeeiro, que pode apresentar problemas de desfolhamento e quebra excessiva de ramos,

durante a colheita manual, mecanizada e semimecanizada, comprovaram que, por meio dos resultados das simulações numéricas, utilizando a modelagem tridimensional de um cafeeiro, foi possível prever tensões, deformações e deslocamentos de tronco e galhos. Com isso, o meio industrial pode ser beneficiado com melhorias, no processo de colheita do café e o meio acadêmico, por novas pesquisas em simulações de materiais biológicos (Figura 15).

Figura 15: Resultados de tensões de von Mises via MEF.



Fonte: Carvalho, Magalhães e Santos (2016).

Entre os softwares de modelagens, alguns se destacam, tais como: o Blender[®] que é utilizado no processo de modelagem, o Zbrush[®] que possui funcionalidades para realizar o tratamento de imagens computacionais, o SolidWorks[®] (CAD), utilizado para desenvolvimento e

criação de modelos tridimensionais e o Ansys[®] utilizado em simulações numéricas.

5.5 Importância do estudo da vibração na colheita do café

A maioria das atividades humanas envolve o princípio da vibração. Ao ouvir, os tímpanos vibram e, ao enxergar, as ondas de luz sofrem vibrações. Outras funções como a respiração e a fala também estão ligados aos movimentos de vibração. A princípio, os estudiosos da área de vibração destinaram suas pesquisas, para entenderem os fenômenos naturais e ao desenvolvimento de teorias matemáticas, para descrever a vibração de sistemas físicos. Investigações na área de vibrações vêm sendo realizadas, principalmente na engenharia, como exemplo, no projeto de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas e sistemas de controle (RAO, 2009).

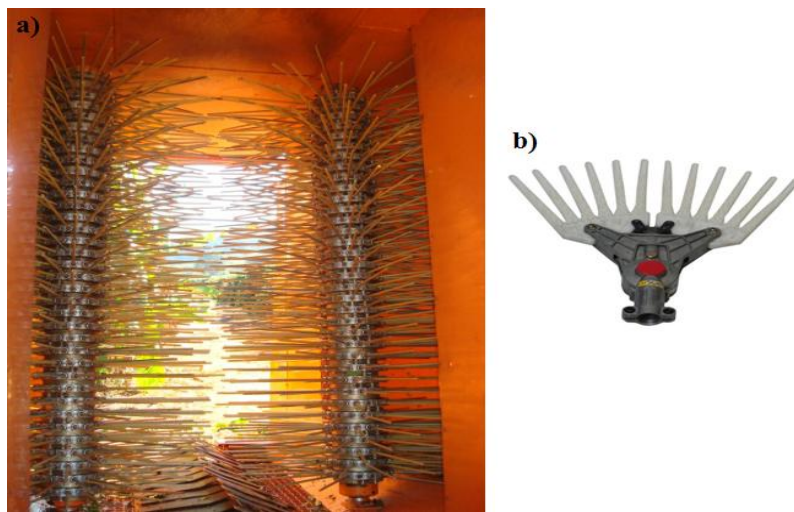
A estrutura ou componentes de uma máquina sujeitos à vibração podem falhar por fadiga do material resultante da variação cíclica da tensão induzida. Em máquinas, a vibração pode prejudicar o funcionamento de elementos de fixação, como porcas e parafusos. Quando a frequência natural de vibração de uma máquina coincide com a frequência de excitação, ocorre o fenômeno de ressonância, que resulta em falhas no equipamento. Por esse motivo, testes envolvendo vibrações tornaram-se procedimento padrão no projeto e desenvolvimento da maioria dos sistemas de engenharia (RAO, 2009).

Apesar de seus efeitos negativos, a vibração pode ser aplicada de maneira positiva em várias situações cotidianas, como por exemplo, a

vibração em esteiras transportadoras, peneiras, compactadores, máquinas de lavar, brocas odontológicas e relógios, todos equipamentos vibratórios. Além disso, máquinas empregadas para a colheita mecanizada de culturas, como café, damasco, laranja, pistache, oliva e uva, utilizam o princípio de vibrações mecânicas (ERDOGAN et al., 2003; SANDERS, 2005; SESSIZ; OZCAN, 2006; SOUZA; QUEIROZ; RAFULL, 2006; Polat et al., 2007; PEZZI; CAPRAVA, 2009; SANTOS et al., 2015).

As máquinas propostas para a colheita do café, independentemente de seu tamanho, utilizam o princípio da vibração para realizar a derriça do fruto (Figura 16), tendo-se revelado um procedimento eficiente durante a operação de colheita. A vibração mecânica é um dos princípios mais usados em máquinas para colheita mecânica de frutos. Equipamentos que utilizam esse princípio fazem a remoção dos frutos, por meio da associação adequada entre frequência e amplitude de vibração (SESSIZ; ÖZCAN, 2006).

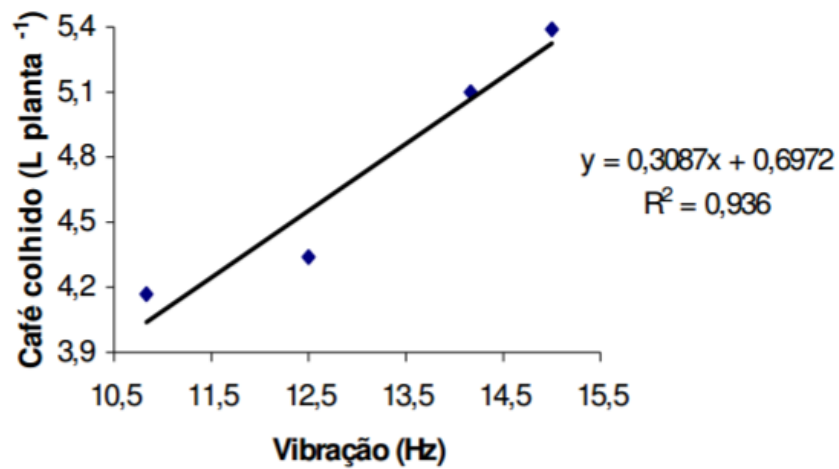
Figura 16: a) Sistema de varetas da colhedora K3 e b) Garra da derrçadora portátil.



Fonte: Do autor (2017).

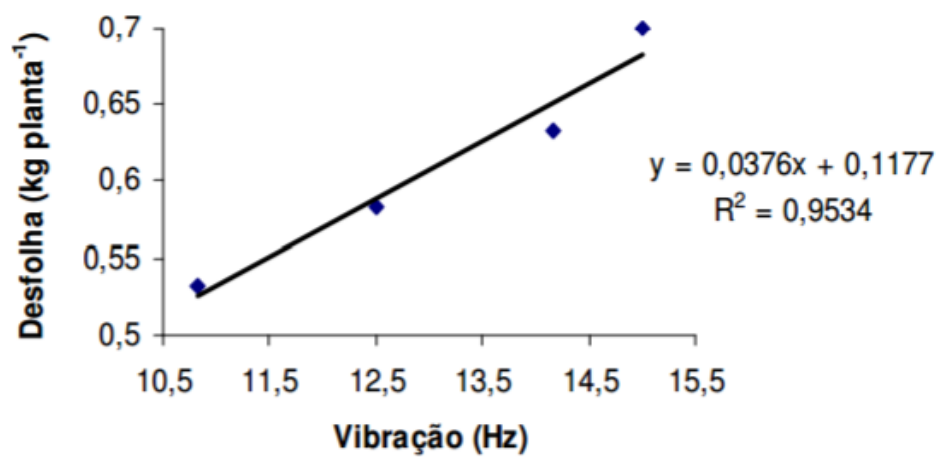
Oliveira et al. (2007), ao avaliar a influência da frequência de vibração das hastes e da velocidade de deslocamento da colhedora no processo de colheita mecanizada do café, realizou ensaios com duas passadas da colhedora, definidos em função do índice de frutos verdes na planta. A primeira passada foi realizada com média de 30% de verde; a velocidade foi fixada em torno de $0,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, variando-se as frequências de 10,83; 12,50; 14,17 a 15 Hz. Concluiu-se que, na primeira passada, o volume de café colhido (Figura 17), a desfolha (Figura 18) e a eficiência de derriça (Figura 19) foram 29,25%, 31,12% e 31,85%, respectivamente, superiores na maior vibração. Com relação ao volume de café caído no chão, observou-se (Figura 20) que, na primeira passada, não houve influência direta da vibração das hastes.

Figura 17: Volume de café colhido em função da variação de vibração.



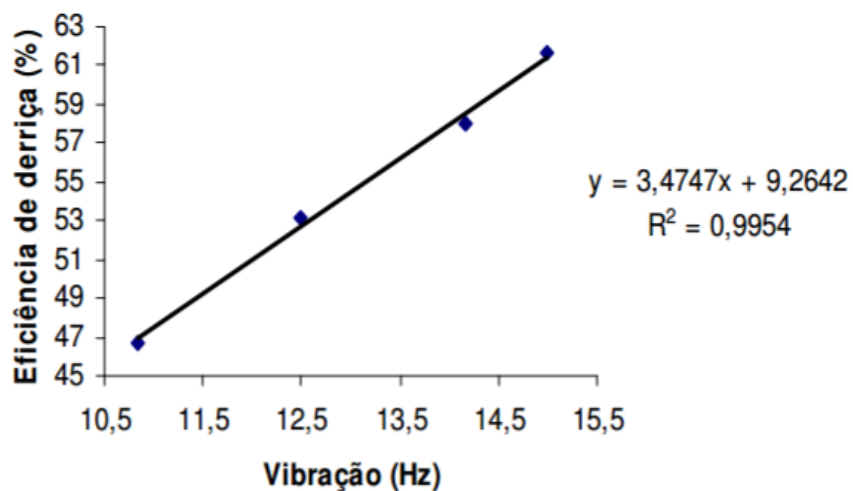
Fonte: Oliveira et al. (2007).

Figura 18: Processo de desfolha em função da variação da vibração.



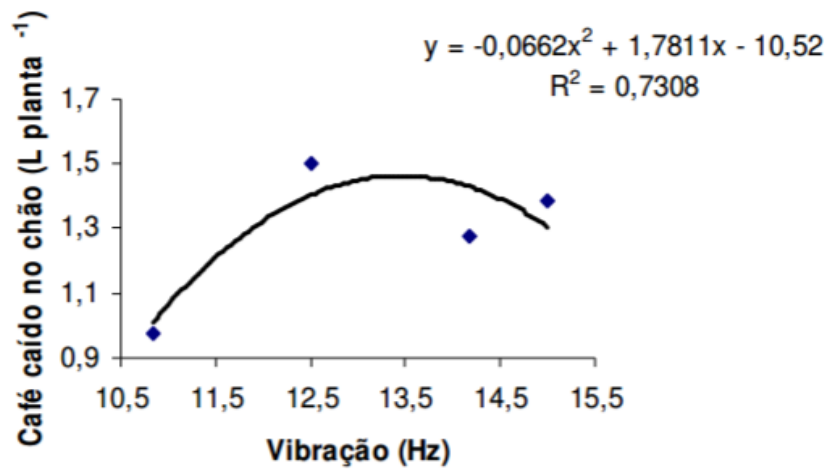
Fonte: Oliveira et al. (2007).

Figura 19: Eficiência de derriça em função da variação da vibração.



Fonte: Oliveira et al. (2007)

Figura 20: Volume de café caído no chão em função da variação da vibração.



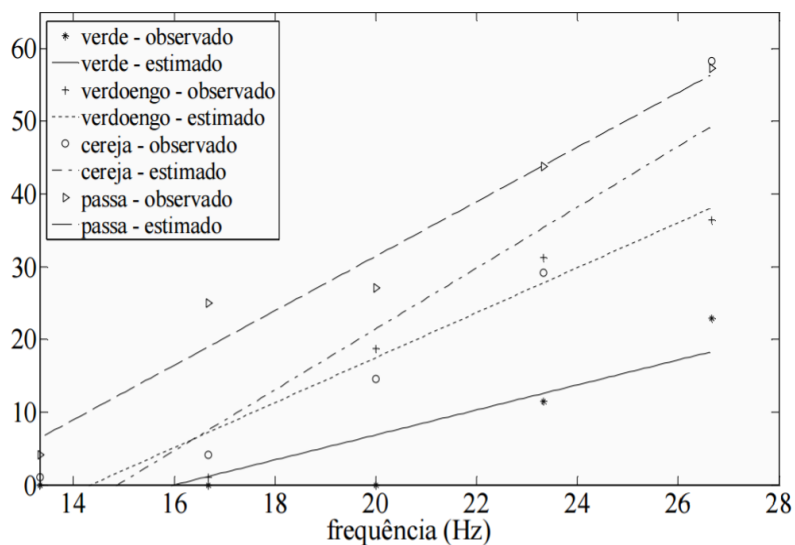
Fonte: Oliveira et al. (2007).

A colheita mecanizada por vibrações mecânicas exige uma combinação ótima dos parâmetros de frequência, amplitude e tempo de vibração, o que permitirá maior eficiência no desprendimento dos frutos, além de promover uma desfolha menor e quebra de ramos. A determinação desses parâmetros pode ser realizada, a partir do estudo do comportamento dinâmico da planta a ser colhida (Ciro, 2001; Santos et al., 2010)

Santos et al. (2010), estudando o efeito localizado de fatores como frequência, amplitude e grau de maturação dos frutos, realizaram ensaios de vibração em laboratório, utilizando um excitador eletromagnético com amplitudes na faixa de 3,75 a 7,50 mm e frequências na faixa de 13,33 a 26,67 Hz. Os resultados mostraram que a frequência de 26,67 Hz apresentou uma eficiência maior de derriça para os frutos cereja e a amplitude de 7,5 mm indicou maior eficiência de derriça.

Para todos os graus de maturação, ocorreu aumento na eficiência de derriça à medida em que se aumentou a frequência de vibração (Figura 21), contudo pode-se ressaltar que a média de eficiência de derriça, para os frutos cereja, foi superior à média dos frutos verdolengos e verdes, para frequências de vibração acima de 16,67 Hz, o que é interessante para o procedimento de colheita seletiva; observa-se, ainda, que as maiores médias de eficiência de derriça foram obtidas para os frutos passas.

Figura 21: Efeito da frequência de vibração sob a eficiência de derrça nos diferentes graus de maturação.



Fonte: Santos et al. (2010).

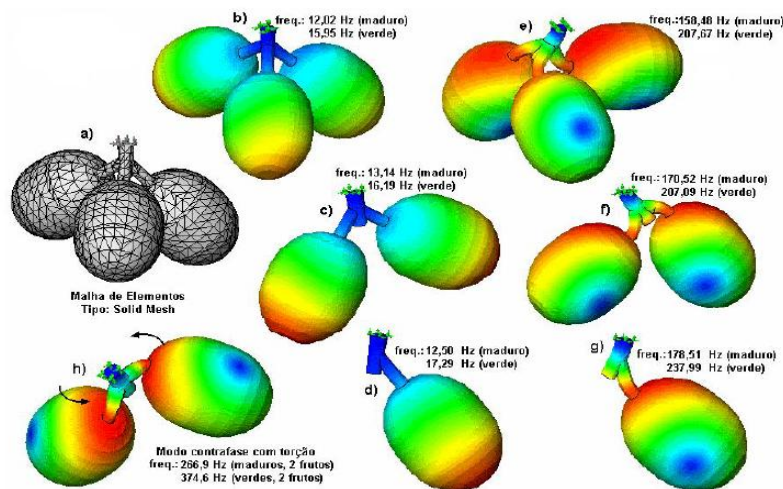
Do mesmo modo, Du (2012) evidencia que, juntamente às forças vibracionais, podem ser aplicados impactos como outra estratégia para derrça dos frutos, a fim de induzir uma força de desprendimento suficiente para destacá-los da planta.

Quanto maior a carga de café maior será a exigência de “energia” da máquina, para derrçar os frutos (SANTINATO et al., 2014), por isso que, dependendo da carga pendente, deve-se ajustar a colhedora quanto à vibração das hastes e à velocidade operacional.

5.6 Desprendimento dos frutos de café por vibração dos ramos

Rodríguez et al. (2005) realizou uma análise dos modos de vibração do sistema fruto-pedúnculo visando à colheita seletiva, utilizando modernas ferramentas CAD 3D e o método de análise por elementos finitos. Deste modo, foi possível determinar a frequência natural para o desprendimento de frutos verdes e maduros. Os resultados obtidos mostraram que o modo de vibração em oposição de fase apresenta grande potencial para a realização da colheita seletiva. Os valores de frequência calculados para esse modo são bem superiores aos empregados nas máquinas que fazem a colheita de café por vibração (Figura 22).

Figura 22: Diferentes modos de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café.



Fonte: Rodríguez et al. (2005).

Silva et al. (2010) afirmam que a força de desprendimento dos frutos verde e cereja difere entre cultivares e ao longo do período de maturação. Ainda, segundo esses autores, essa diferença na força entre os estádios de maturação verde e cereja pode ser um parâmetro para o gerenciamento da colheita.

Guedes (2011) relata que, para o aperfeiçoamento de máquinas destinadas à colheita do café, é necessário o conhecimento prévio de detalhes relativos às propriedades mecânicas, geométricas e dinâmicas dos frutos e da planta. Afirma, também, que a realização de testes experimentais em laboratório, utilizando máquinas apropriadas, para analisar o comportamento do sistema fruto-pedúnculo-ramo, pode auxiliar o dimensionamento e o projeto de máquinas de colheita (Figura 23).

Figura 23: Engaste do ramo de café na base móvel da máquina vibradora.



Fonte: Guedes (2011).

Avaliando a eficiência de colheita mecanizada em oito progênies, de acordo com a força de tração necessária para o desprendimento dos frutos, Silva et al. (2013b) concluíram que há diferença significativa entre as progênies avaliadas tanto na força de desprendimento como na eficiência de colheita e que a eficiência de colheita está relacionada, diretamente, com a força de desprendimento dos frutos maduros na planta.

Ferreira Júnior (2014), avaliou a vibração das hastes derrçadoras de uma colhedora de café automotriz, a fim de conhecer o comportamento dinâmico em termos de amplitude e frequência de vibração e os efeitos sobre a colheita e obteve resultados de deslocamento da haste (Figura 24).

Figura 24: Valores médios do Deslocamento Vertical em hastes de 570 mm de comprimento.

Freio (Kgf)	Vibração (ciclos.min ⁻¹)	Deslocamento Horizontal (mm)
10	750	3,7 a
12	750	13,0 b
8	750	35,3 c
10	850	3,3 a
8	850	7,7 b
12	850	14,0 c
12	950	16,0 a
8	950	44,3 b
10	950	45,3 b

Médias seguidas de mesma letra não diferenciaram entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Fonte: Ferreira Júnior (2014).

Coelho et al. (2015) determinaram as propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. As dimensões foram determinadas, por meio de processamento de imagens; as massas e os volumes mensurados, utilizando-se balança e proveta, respectivamente. Os módulos de elasticidade foram determinados, por meio de ensaios mecânicos de compressão, tração e flexão, para os frutos, pedúnculos e ramos, respectivamente. Segundo os autores, as dimensões e a massa dos frutos apresentaram tendência de aumento à medida em que seu estágio de maturação evoluiu. Os módulos de elasticidade dos frutos e dos pedúnculos, no estágio de maturação verde, foram superiores aos valores para o estágio de maturação cereja (Figura 25).

Figura 25: Valores médios para módulo de elasticidade do fruto e pedúnculo e força de desprendimento do fruto, em ambos os estádios de maturação.

Estádio de maturação	MEF	MEP	FDF (N)
	(MPa)		
Verde	15,82 A	3,91 A	8,37 A
Cereja	2,93 B	2,26 B	4,88 B

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a nível de 0,05 de probabilidade

MEF - Módulo de elasticidade do fruto, MEP - Módulo de elasticidade do pedúnculo, FDF - Força de desprendimento do fruto

Fonte: Coelho et al. (2015).

Portanto, prever as características mecânicas e a força de desprendimento do sistema fruto-pedúnculo-ramo pode auxiliar, para uma adequada regulagem da colhedora, gerando menor desgaste do equipamento, menos danos na planta e maior eficiência na colheita.

6 MATERIAL E MÉTODOS

6.1 Localização do experimento

As etapas, para a realização deste trabalho, foram realizadas no Departamento de Engenharia (DEG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

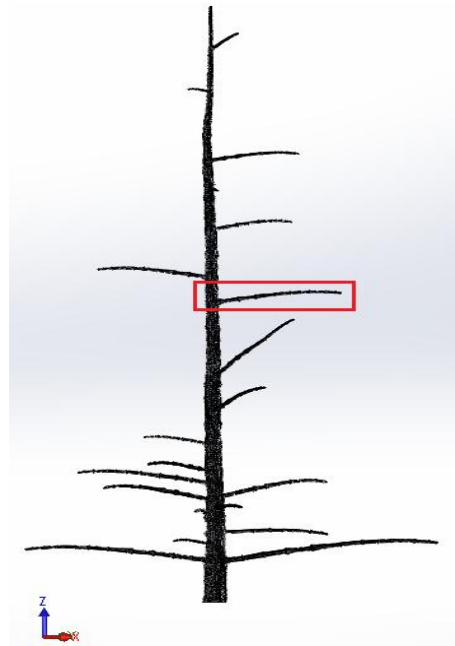
A primeira etapa envolveu a modelagem da haste da colhedora e do ramo do cafeeiro, por meio do software comercial Solidworks® e, posteriormente, simulação numérica via MEF para análise de tensões e deformações, por meio do software Ansys®, versão 14.5.

A segunda etapa envolveu ensaios experimentais, a partir de amostras da haste de uma colhedora e com ramos de cafeeiro, no intuito de validar os resultados das simulações numéricas.

6.2 Obtenção dos modelos geométricos para fins de simulação

Para a modelagem do ramo do cafeeiro, foi feita uma adaptação do modelo utilizado em Carvalho, Magalhães e Santos (2016), reduzindo a geometria da planta inteira a somente um ramo plagiotrópico (Figura 26). Essa modificação foi necessária para simplificação do modelo de CAD com o objetivo de compreender o comportamento dinâmico, durante a interação da haste da colheita com o ramo cafeeiro, no processo de colheita por vibrações mecânicas.

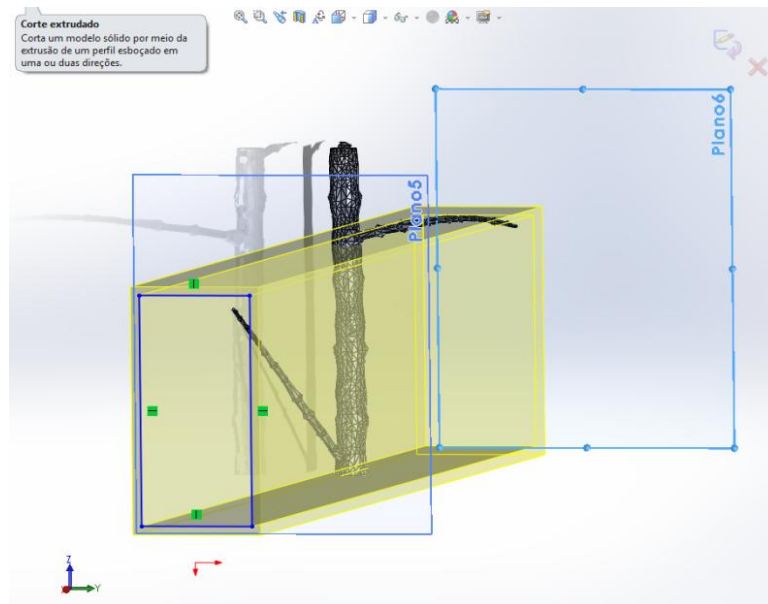
Figura 26: Redução da geometria do cafeeiro.



Fonte: Do autor (2017).

Para realizar a extração do modelo geométrico do ramo, após a importação da geometria da planta no Solidworks®, foram criados planos paralelos e utilizando a ferramenta corte extrudado (Figura 27), que realiza o corte da estrutura delimitada entre os planos criados, para realizar o corte da região mediana da planta, reduzindo-a somente a um ramo plágiotrópico.

Figura 27: Corte extrudado do ramo do cafeeiro



Fonte: Do autor (2017).

Após realização dos cortes extrudados e algumas simplificações no modelo, a geometria final do ramo plagiotrópico do cafeeiro, utilizada nas simulações, pode ser vista por meio da Figura 28.

Figura 28: Geometria final do ramo do cafeeiro.



Fonte: Do autor (2017).

Para a modelagem da haste da colhedora, foi utilizada como referência uma haste de 570 mm de comprimento e 13 mm de diâmetro, a qual, também, foi modelada no software Solidworks® (Figura 29).

Figura 29: Geometria final da haste da colhedora.



Fonte: Do autor (2017).

Após a criação e aperfeiçoamento dos modelos separadamente, foi realizada a montagem das estruturas, no software Ansys® (Figura 30), para a avaliação dinâmica da interação entre as partes em simulação computacional.

Figura 30: Geometria final das estruturas uma próxima a outra.



Fonte: Do autor (2017).

6.3 Propriedades mecânicas utilizadas nas simulações

Para a realização da simulação da interação do ramo do cafeeiro e a haste da colhedora, foi importada a geometria final realizada no Solidworks® e realizou-se a análise estrutural.

Ainda, no software Ansys®, foi utilizada a biblioteca de materiais, personalizada para a haste da colhedora (Tabela 1), que teve como material a fibra de vidro (Epoxi E Glass Wet). Para o ramo cafeeiro, foi criado um novo material na biblioteca do Ansys® (Madeira cafeeira), considerando o material linear, homogêneo e isotrópico, para fins de simplificação do modelo, conforme as propriedades encontradas experimentalmente no trabalho de Carvalho, Magalhães e Santos (2016), conforme Tabela 2.

Tabela 1: Propriedades mecânicas utilizadas na simulação da haste da colhedora.

Material	Coefficiente de Poisson	Módulo de Elasticidade (MPa)	Densidade (kg . m ⁻³)
Fibra de vidro (Epoxi E Glass Wet)	Direção XY – 0,28	Direção X - 35000	1850
	Direção YZ – 0,40	Direção Y - 9000	
	Direção XZ – 0,26	Direção Z - 9000	

Fonte: Ansy (2017).

Tabela 2: Propriedades mecânicas utilizadas na simulação do ramo do cafeeiro.

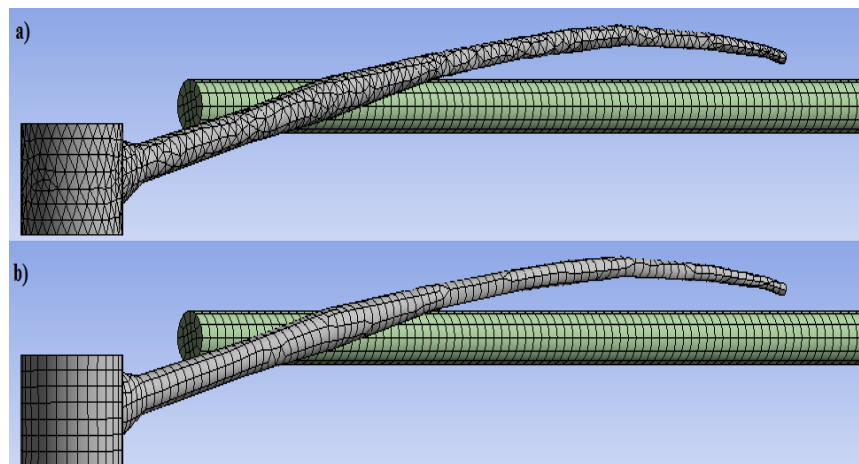
Material	Coefficiente de Poisson	Módulo de Elasticidade (MPa)	Densidade ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Madeira cafeeira	0,37	2041,5	607

Fonte: Adaptado de Carvalho, Magalhães e Santos (2016).

6.4 Análise de convergência de malha

Para verificar a confiabilidade da análise numérica, um estudo de convergência de malha foi realizado, para o ramo do cafeeiro, considerando dois tipos de malhas (geometria hexaédrica e geometria tetraédrica), conforme Figura 31.

Figura 31: (a) Malha com geometria tetraédrica e (b) Malha com geometria hexaédrica.



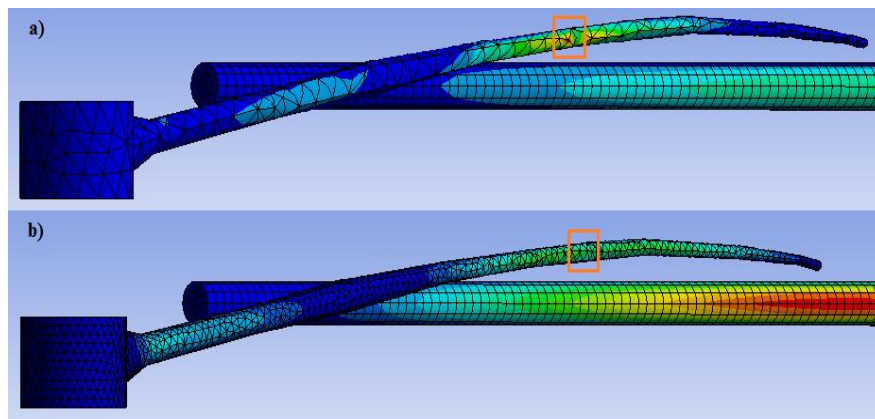
Fonte: Do autor (2017).

Para realizar a análise de convergência de malha, foram seguidas as seguintes etapas:

- a) Criou-se uma malha usando o menor número possível de elementos e analisou-se o modelo.
- b) Recriou-se a malha com uma distribuição de elementos mais refinada, reanalisou-se e comparou-a com os resultados da malha anterior.
- c) Continuou-se a aumentar a densidade da malha e reanalisou-se o modelo até que os resultados fossem convergentes de forma satisfatória.

A convergência foi determinada comparando-se sempre o mesmo ponto da estrutura analisada, e a diferença pode ser vista na Figura 32.

Figura 32: (a) Malha de 8 mm e (b) Malha de 2 mm com o ponto comparado.



Fonte: Do autor (2017).

Na Tabela 3, são apresentados os valores do tamanho da malha utilizada na geometria tetraédrica, da tensão máxima, o número de nós e número de elementos em cada um dos modelos analisados. Pode-se

verificar, na Tabela 3, que, ao modificar o refinamento da malha, foi obtido uma redução do número de nós e elementos do modelo inicial, sem acarretar em uma grande variação dos valores de tensão obtidos no último passo da análise.

Outro ponto relevante é a diminuição no tempo gasto em cada simulação, pois, em malhas pequenas, como por exemplo, a de 2 mm, o tempo de simulação é muito elevado em função do maior detalhamento nos cálculos decorrente de um maior número de nós e elementos presentes.

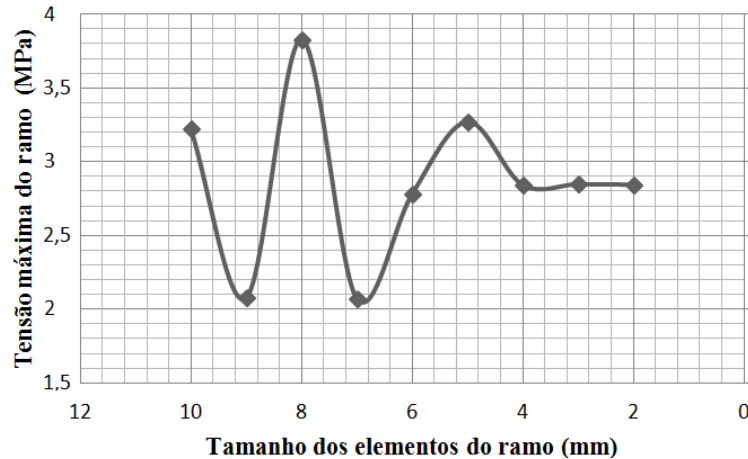
Tabela 3: Resultados das análises para os diferentes tamanhos de malha na geometria tetraédrica.

Malha (mm)	Tensão (MPa)	Nº Nós	Nº Elementos
2	2,8462	87508	51645
3	2,8491	37996	17524
4	2,8446	25492	9219
5	3,2721	20797	6216
6	2,7807	18836	5001
7	2,0768	17862	4423
8	3,8296	17239	4046

Fonte: Do autor (2017).

Na geometria hexaédrica, com base na variação do tamanho dos elementos e verificando-se a tensão máxima, não foi possível verificar convergência. Para a geometria tetraédrica, variando-se o tamanho dos elementos (Figura 33), foi possível verificar que a convergência da malha ocorreu em elementos a partir de 4 mm, obtendo-se tensão máxima na ordem de 2,84 MPa.

Figura 33: Análise de convergência do ramo cafeeiro simulado para malha tetraédrica.



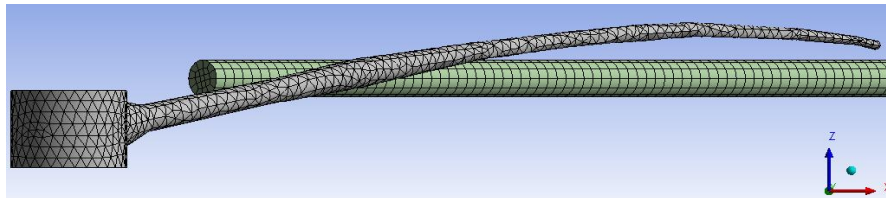
Fonte: Do autor (2017).

6.5 Geração dos modelos de elementos finitos

Após realizada análise de convergência de malha do ramo, foram geradas as malhas dos elementos finitos no software Ansys® (Figura 34). Com isso, foi definido como modelo do ramo cafeeiro a forma tetraédrica contendo 10.440 nós e 6.195 elementos. Para o modelo da haste da colhedora, os elementos foram definidos pelo método de varredura (*sweep*), que gera automaticamente uma malha hexaédrica, quando possível e, em seguida, enche as regiões mais difíceis de capturar com malhas não estruturadas, realizando a "varredura" da estrutura analisada, usadas para manter a alta precisão da malha ao mesmo tempo em que reduzem a contagem de células da malha. A malha da haste da colhedora teve um

total 15.052 nós e 3.024 elementos, gerando um total de 25.492 nós e 9.219 elementos nas duas estruturas analisadas.

Figura 34: Criação da malha do ramo cafeeiro e da haste.



Fonte: Do autor (2017).

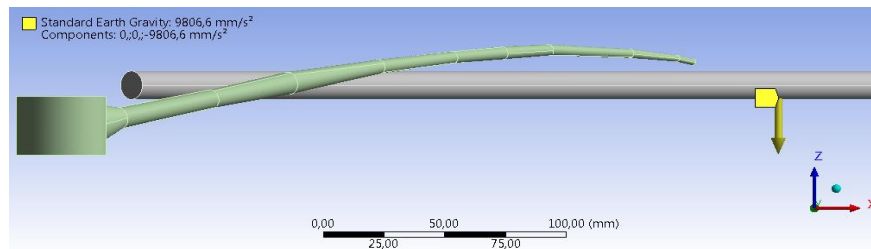
6.6 Simulações numéricas da interação entre colhedora e cafeeiro

A análise realizada no Ansys[®] foi a estrutural transitória (*Transient Structural*), a qual é usada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura sob a ação de qualquer carga dependente do tempo geral. Foi utilizada para determinar os deslocamentos, tensões e forças que variam no tempo em uma estrutura, pois responde a qualquer carga transitória, em que a escala de tempo do carregamento é tal que os efeitos de inércia ou amortecimento são considerados importantes.

As condições de contato estabelecidas no Ansys[®] para as estruturas analisadas foram contato sem fricção, em virtude da ausência de dados do coeficiente de atrito das estruturas e pelo fato do contato ocorrer de maneira rápida, com um comportamento de contato simétrico, em que não ocorre penetração dos corpos.

Algumas condições foram estabelecidas como a inserção de gravidade em todos os corpos presentes (Figura 35).

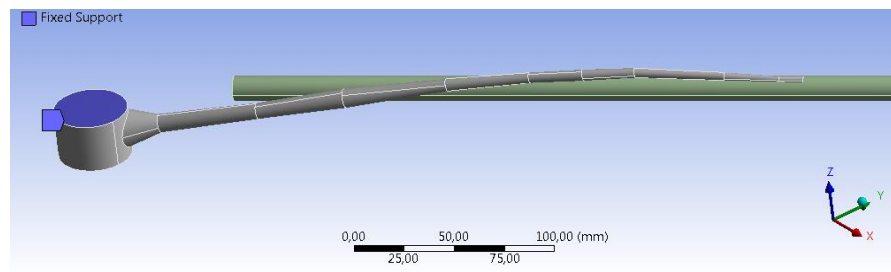
Figura 35: Gravidade incluída no modelo simulado.



Fonte: Do autor (2017).

O engaste do ramo do cafeeiro foi feito no plano de corte do ramo ortotrópico, para representar a planta de café fixa ao chão por suas raízes e as outras estruturas da planta, ficando o ramo plagiotrópico livre para avaliar as deformações (Figura 36).

Figura 36: Engaste do ramo cafeeiro.

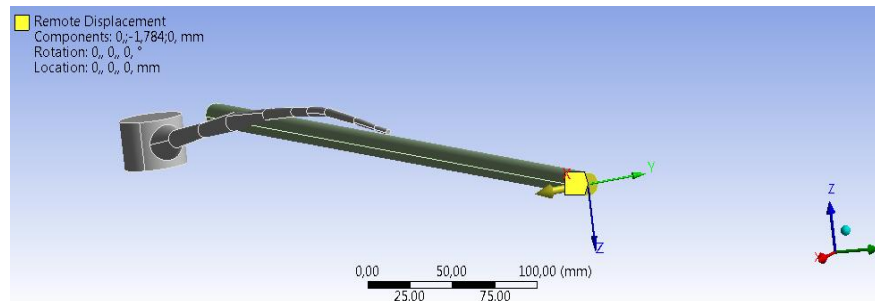


Fonte: Do autor (2017).

Para a movimentação da haste da colhedora, foi inserida uma coordenada local no centro da circunferência do diâmetro da haste, que, por meio (Equação 1), realizou-se a movimentação do modelo da haste

para que o mesmo tocasse o modelo do ramo, ocorrendo a interação geométrica entre os dois modelos (Figura 37).

Figura 37: Movimentação da haste da colhedora.



Fonte: Do autor (2017).

A movimentação da haste da colhedora ocorreu, por meio da Equação (1), considerando a amplitude = 2 mm, $\pi = 3,14$, frequência = 30,8 Hz e tempo = 0,3 s, resultando em um movimento ondulatório representado na Figura 38.

$$y = A \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (1)$$

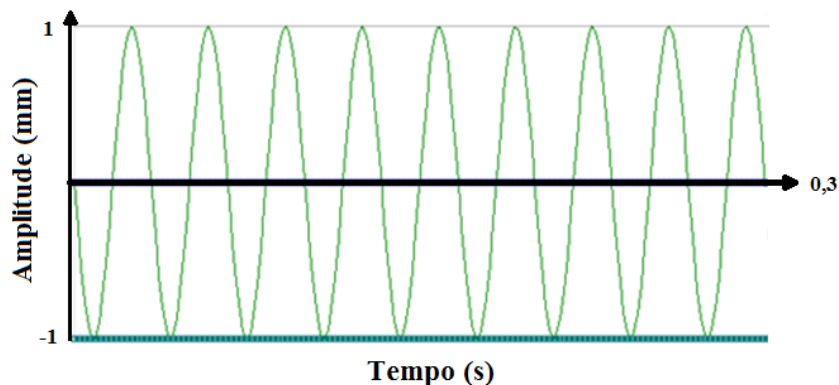
em que:

A= amplitude (mm);

f= frequência (Hz);

t= tempo (s);

Figura 38: Movimentação senoidal da haste da colhedora.



Fonte: Do autor (2017).

A amplitude de 2 mm foi utilizada, pois foi a menor amplitude em que ocorreu o contato entre a haste da colhedora e o ramo cafeeiro. A frequência de 30,8 Hz foi utilizada em função da determinação desse valor no ensaio experimental. Já o tempo de 0,3 segundos foi utilizado por ser o maior tempo possível sem que aumentasse exageradamente o tempo de processamento da simulação.

Em uma análise de múltiplos passos, que consiste em uma análise transitória linear ou não-linear, usam-se múltiplos passos, para satisfazer as regras de integração do tempo transitório (que, normalmente, ditarão um passo mínimo de tempo de integração para uma solução precisa). Para isso, considerou-se o total mínimo e o máximo de subpassos, em um tempo determinado, fazendo com que ocorram interações de equilíbrio (convergência) em cada subpasso. O número mínimo foi de 1200 subpassos e o número máximo foi de 1500 subpassos. Esse foi o maior

número possível sem que aumentasse exageradamente o tempo de simulação e a capacidade de memória.

6.7 Ensaio experimental

Foram coletadas 20 amostras de ramos plagiotrópicos de café, cultivar Catuaí Vermelho, variedade IAC 144, de uma lavoura com 9 anos, plantada no espaçamento 0,80 por 3,50 m. Das amostras, foram retiradas folhas, frutos e reduziu-se o tamanho do comprimento a 350 mm, ficando apenas o ramo, para representar fielmente a modelagem realizada no computador (Figura 39).

Figura 39: a) Ramo cafeeiro antes do desbaste e b) Ramo cafeeiro após o desbaste.



Fonte: Do autor (2017).

Foi utilizada uma haste de colhedora, em fibra de vidro e resina epóxi, com alta resistência à quebra e rompimento, que proporciona maior rigidez e melhor desempenho na derriça dos grãos, com espessura de 12,4

mm e 570 mm de comprimento, similar à modelada no computador (Figura 40).

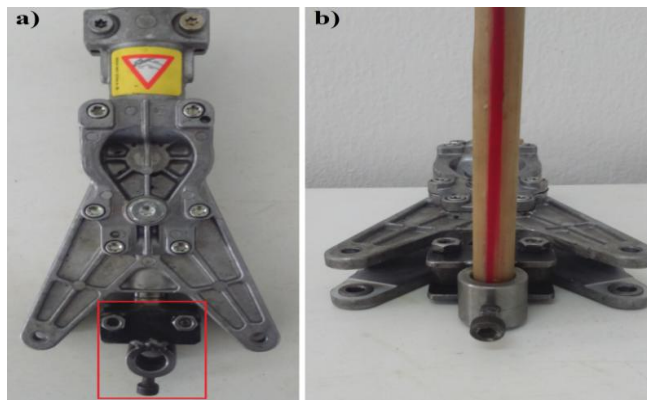
Figura 40: Haste da colhedora em fibra de vidro e resina epóxi.



Fonte: Do autor (2017).

Como fonte de excitação, foi utilizada uma derrçadora portátil Stihl® Ka 85 R, com motor 2 tempos a gasolina, com 25,4 cilindrada (cm³), 0,95 / 1,3 potência (kW), com seu cabeçote de colheita adaptado para receber a haste da colhedora (Figura 41).

Figura 41: (a) Adaptação do cabeçote de colheita e (b) Acoplamento da haste ao cabeçote de colheita adaptado.



Fonte: Do autor (2017).

Para aquisição dos dados, usou-se um equipamento de aquisição da National Instruments, composto por chassi cDAC 9174, com acessos para montagem de módulos de medição.

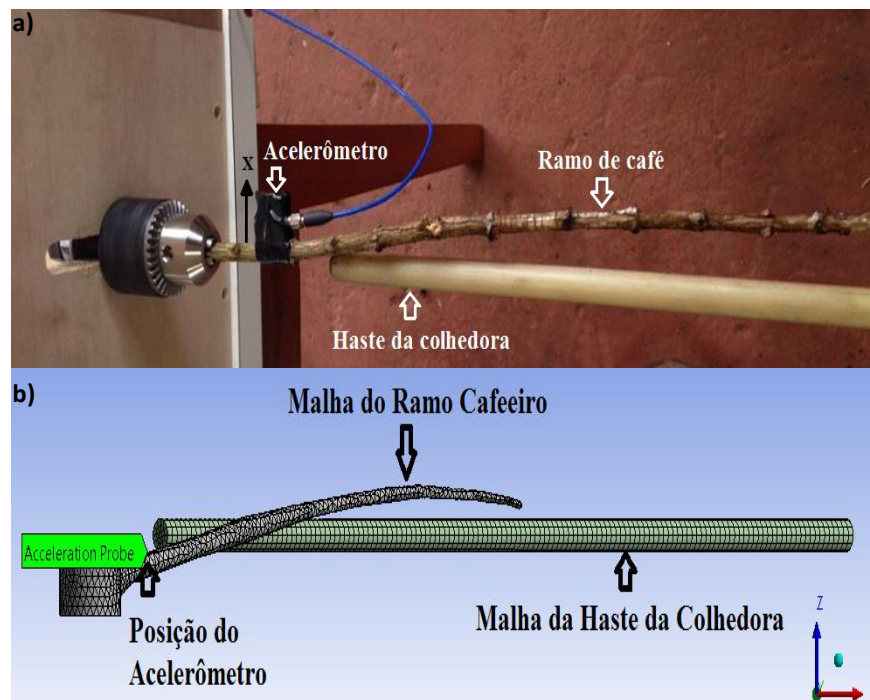
Para a medição do sinal de vibração, foi utilizado um módulo NI 9234, o qual é um módulo de aquisição de sinal dinâmico de quatro canais para realizar medições de alta precisão, medições com sensores Piezoelétrico Integrado Eletrônico (IEPE).

Os sinais de aceleração foram obtidos, por meio de um transdutor piezoelétrico de aceleração (acelerômetro), da marca PCB Piezotronics, com faixa de frequência variando de 0,5 a 10000 Hz e com elemento de detecção cerâmico.

Todo o sistema foi configurado pelo software comercial LabVIEW®, que é um software de engenharia de sistemas criado especificamente, para aplicações que envolvam teste, medição e controle, com rápido acesso ao hardware e a informações obtidas a partir dos dados.

No ramo plagiotrópico do cafeeiro foi instalado o acelerômetro, que obtia o sinal da aceleração unidimensional (eixo x), com sistema configurado a uma taxa de aquisição de 600 Hz e o tempo de coleta padronizado em 60 segundos. O ramo do cafeeiro foi fixado em um mandril, para assemelhar-se à fixação na planta, a haste vibratória da colhedora foi colocada em contato com o ramo do café, distante 30 mm do acelerômetro e o funcionamento da máquina foi mantido em uma mesma aceleração em todas as análises dos ramos cafeeiros. Todo aparato experimental foi montado o mais próximo dos cenários simulados (Figura 42).

Figura 42: (a) Esquema do aparato experimental e (b) Simulação.



Fonte: Do autor (2017).

Para se determinar o período e a frequência de vibração da haste da colhedora, foi instalado o acelerômetro na extremidade livre da haste da colhedora, que foi a parte da estrutura que teve maior contato com o ramo cafeeiro. O sistema foi configurado com a mesma taxa de aquisição de 600 Hz e o tempo de coleta menor, padronizado em 8 segundos. Os dados de aceleração, gerados no ramo cafeeiro e na haste da colhedora, foram salvos para posterior processamento.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Processamento dos dados experimentais

O ensaio experimental foi realizado, no mesmo dia da coleta dos ramos plagiotrópicos do café, para evitar que o ramo perdesse umidade e ocorresse o enrijecimento do material, prejudicando assim os dados gerados.

Um ponto importante foi levado em consideração, o peso do acelerômetro (5 gramas) não influenciou a relação do peso do ramo de café. Outro ponto levado em consideração foi a instalação do acelerômetro próximo à extremidade fixa, para minimizar ainda mais esse efeito do peso do acelerômetro.

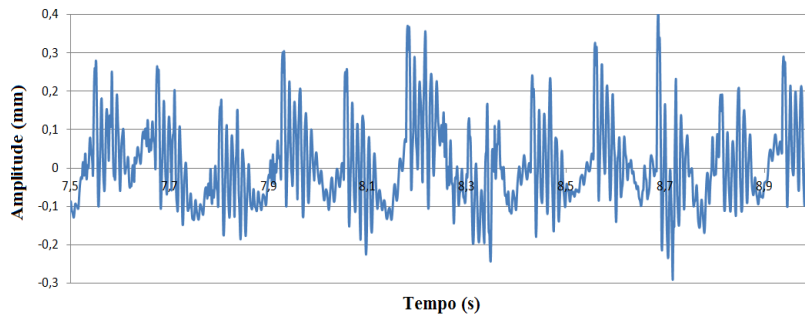
Após aquisição dos dados, foi realizada a análise, no intuito de avaliar o período e a frequência de vibração da haste da colhedora. Para determinar o período, foram gerados valores da aceleração, no decorrer do tempo e foram amostrados 100 pontos do gráfico, dos quais se pode encontrar um período médio de 0,0324s. Para se determinar a frequência, calculou-se o inverso do período, chegando-se a um valor de 30,8 Hz.

A amplitude média da haste da colhedora encontrada experimentalmente foi de 7,714 mm, valores próximos aos analisados por Santos et al. (2010), que avaliaram amplitudes na faixa de 3,75 a 7,50 mm e frequências na faixa de 13,33 a 26,67 Hz. Valores de amplitudes diferentes foram analisados por Oliveira (2009), que avaliou amplitudes de 20,30 e 40 mm em frequências de 15, 17 e 19 Hz. Ferreira Junior (2014),

para a haste de 570 mm, encontrou deslocamentos horizontais de 86,7 mm, para uma frequência de 15,8 Hz e regulagem de freio de 8 kgf.

Para determinar o valor quadrático médio (RMS) da aceleração e do deslocamento, foram excluídas 4 amostras de ramos que tiveram valores fisicamente impossíveis, obtendo-se um total de 16 amostras de ramos de café. Além disso, um refinamento do sinal de aceleração coletado foi realizado, utilizando-se somente uma parte do sinal repetido de cada amostra, para a realização dos cálculos, como pode ser visto na Figura 43.

Figura 43: Seleção da melhor parte do sinal de um dos ramos de café.



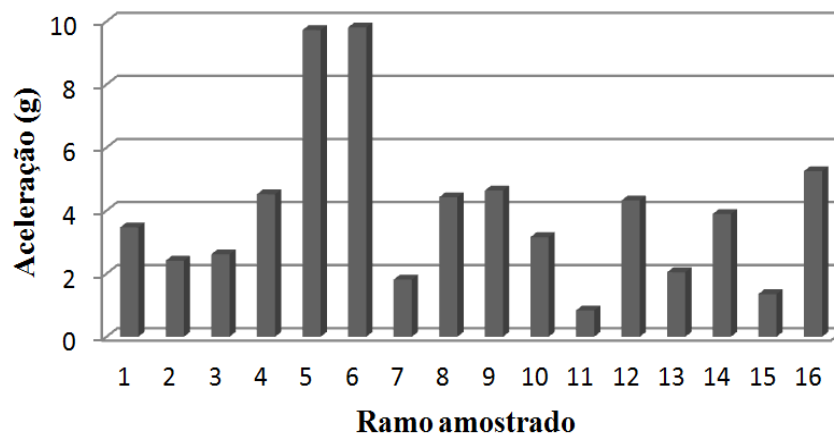
Fonte: Do autor (2017).

O cálculo do RMS da aceleração e do deslocamento, para todas as amostras dos ramos de café, foram realizado a partir da Equação 2.

$$x(rms) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad (2)$$

O RMS das 16 amostras dos ramos de café quanto à sua aceleração estão apresentados na Figura 44 e sua média foi estimada em 4,2812 g.

Figura 44: RMS da aceleração das amostras dos ramos de café.



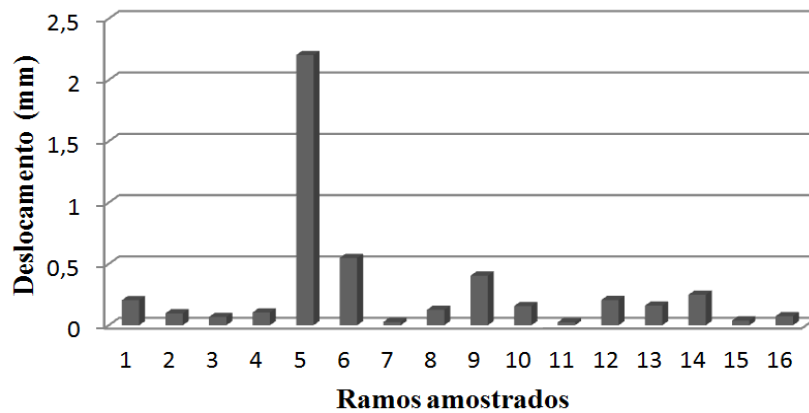
Fonte: Do autor (2017).

Com o cálculo da integral dupla (Equação 3), determinou-se o deslocamento desses ramos.

$$\int a(t) dt = v(t) \quad e \quad \iint a(t) dt = s(t) \quad (3)$$

Portanto, calculou-se o valor RMS das 16 amostras dos ramos de café em relação a seu deslocamento (Figura 45) e sua média foi estimada em 0,2930 mm.

Figura 45: RMS do deslocamento das amostras dos ramos de café.

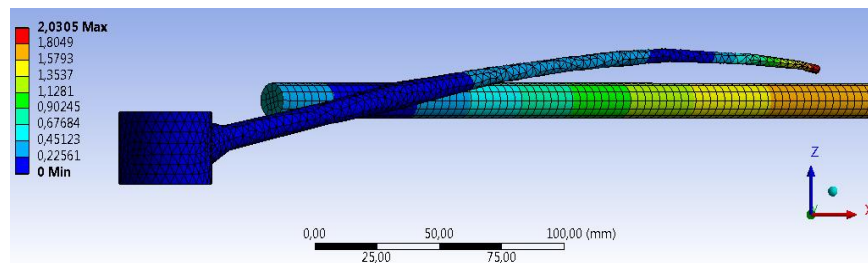


Fonte: Do autor (2017).

7.2 Resultados das simulações numéricas

Como esperado, o deslocamento simulado no ramo foi nula na parte próxima à fixação, 0,225 mm na parte média do ramo e o maior deslocamento encontrado foi de 2,030 mm na extremidade livre do ramo (Figura 46).

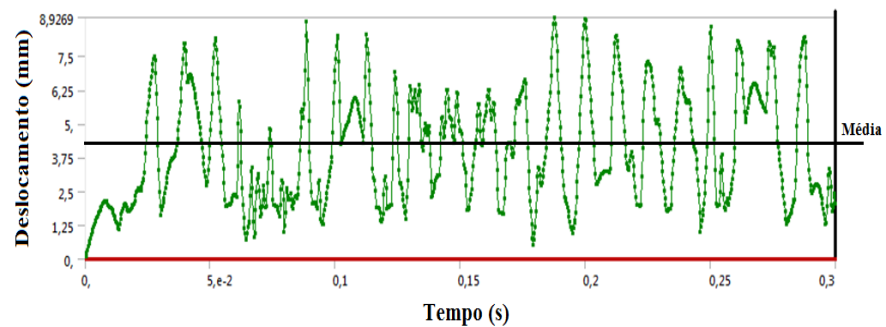
Figura 46: Deslocamento total no ramo de café.



Fonte: Do autor (2017).

O sinal do deslocamento encontrado pela interação da haste da colhedora com o ramo cafeeiro na simulação foi gerado, considerando o deslocamento (em mm) do ramo e no tempo total de 0,3 segundos (Figura 47).

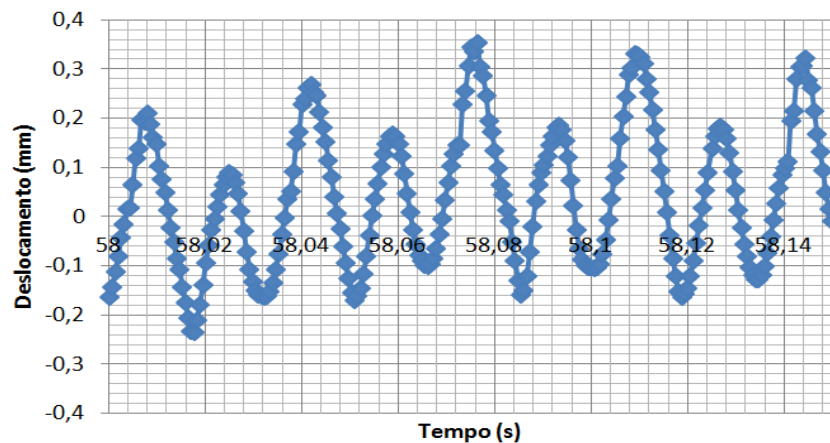
Figura 47: Sinal do deslocamento na simulação.



Fonte: Do autor (2017).

O sinal do deslocamento sofrido pela interação do ramo cafeeiro com a haste da colhedora, no ensaio experimental, foi considerando uma pequena parte do sinal de um dos ramos amostrados, obtendo-se a deformação e o tempo na faixa de 58 a 58,15 segundos, ou seja, um tempo de apenas 0,15 segundos (Figura 48). Os sinais, nas demais faixas, foram parecidos, com períodos bem definidos, sendo suprimidos por questão de espaço e para uma melhor visualização do detalhamento do sinal.

Figura 48: Sinal do deslocamento no ensaio experimental.

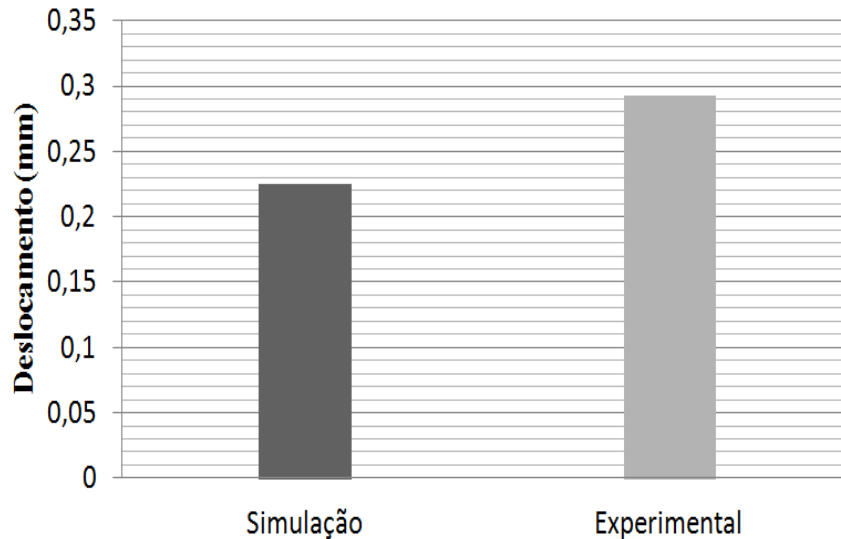


Fonte: Do autor (2017).

O sinal do deslocamento encontrado pela interação da haste da colhedora e o ramo cafeeiro na simulação difere do sinal do ensaio experimental, em função da diferença dos sistemas de coordenadas. Outro fator que pode ter influenciado essa diferença é que, na simulação, consideram-se os deslocamentos sofridos pela haste da colhedora e o ramo cafeeiro, diferente do ensaio experimental que considerou o deslocamento sofrido somente no ramo cafeeiro.

Os resultados encontrados na simulação para o deslocamento do ramo foram próximos aos encontrados na validação experimental, que apresentou valores de deslocamento de 0,293 mm, na parte média do ramo, a simulação apresentou valores 23,2% menores em relação ao ensaio experimental (Figura 49).

Figura 49: Deslocamento do ramo cafeeiro na simulação e no ensaio experimental.



Fonte: Do autor (2017).

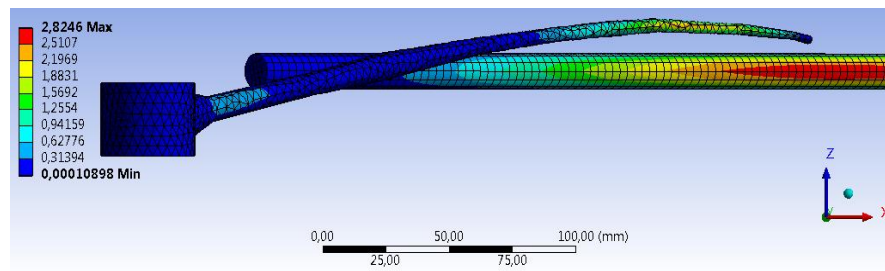
As diferenças entre resultados simulados e os resultados observados, da ordem de 23,2%, pode ser explicada em virtude do cálculo da integral dupla da aceleração, para se determinar o deslocamento gerar erros de aproximação numérica.

Apesar dessas aproximações numéricas, a diferença de 23,2% entre o resultado simulado e o resultado observado foi considerado satisfatório, comparando os valores de deslocamento encontrados por Carvalho, Magalhães e Santos (2016), que, considerando os valores de deslocamento dos experimentos, observaram uma diferença em torno de 20% no ramo mais curto, enquanto o ramo mais longo apresentou uma diferença em torno de 54%, comparados com as simulações.

Essas diferenças nos resultados podem ser explicadas também pela variabilidade das propriedades físicas do sistema, uma vez que a resposta da planta de café depende diretamente das propriedades físicas (Santos et al., 2015). Esse comportamento foi descrito por outros autores, como no sistema do fruto, durante o estudo de plantas de café (Ciro, 2001; Tinoco et al., 2014).

A tensão de von Mises encontrada foi da ordem de 0,0001 MPa na parte próxima da fixação do ramo, 0,941 MPa na parte média do ramo e a maior tensão foi de 2,510 MPa na parte final do ramo (Figura 50).

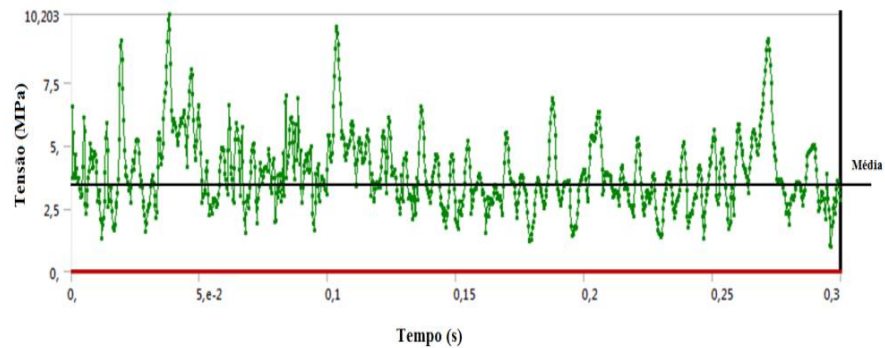
Figura 50: Tensões de von Mises.



Fonte: Do autor (2017).

O sinal da tensão de von Mises ocorrido pela interação do ramo cafeeiro com a haste da colhedora na simulação foi gerado considerando o tempo total de 0,3 segundos (Figura 51).

Figura 51: Sinal da tensão de von Mises na simulação.



Fonte: Do autor (2017).

Savary et al. (2010) avaliou a tensão sofrida por uma planta de citrus e verificou valores de 3,54 MPa para uma frequência de 3 Hz e de 4,15 MPa para uma frequência de 3,83 Hz.

Santos et al. (2015), avaliando as tensões de von Mises, na região de ligação entre o fruto e o caule, para frequências de ressonância, obtiveram maior tensão de von Mises na região de anexo entre o fruto e o caule. A tensão média na região de anexo entre o fruto verde e o caule foi de 7,18 MPa para uma frequência de 3,35 Hz. A tensão média na região de anexo entre o fruto maduro e o caule foi de 3,39 MPa para uma frequência de 2,62 Hz. Ambos os resultados obtidos foram para café da cultivar de Catuaí Vermelho.

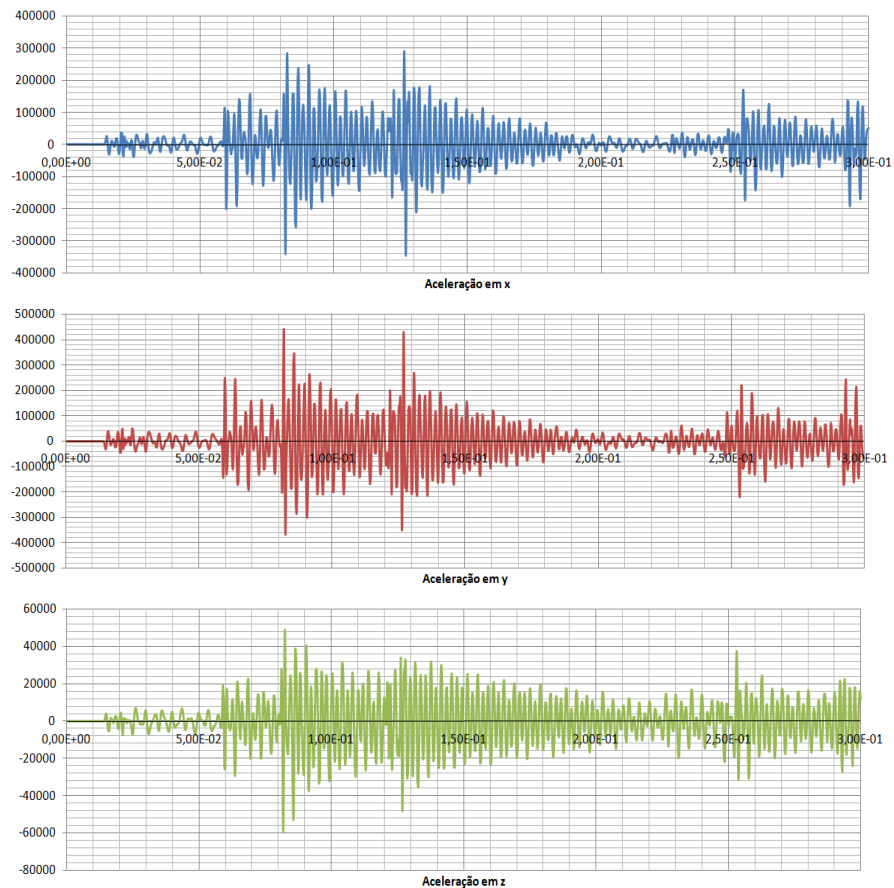
Os autores Carvalho, Magalhães e Santos (2016), ao realizarem uma análise de convergência de malha, usando a mesma carga (1N) e escolhendo o valor máximo de estresse sofrido pelo ramo de café obtiveram valores aproximados de 2,85 MPa, para uma malha de 6,7 mm e de 3,55 MPa, para uma malha de 2 mm. Valores próximos aos encontrados

na simulação da interação da haste da colhedora e do ramo cafeeiro, que teve valor de 2,510 MPa, utilizando uma malha de 4 mm.

O ponto estipulado para medição da máxima aceleração na simulação, foi o mesmo ponto em que foi instalado o acelerômetro na parte da validação experimental (Figura 42). Na simulação, a aceleração total máxima no ponto estipulado foi de 43,342 m/s².

O sinal da aceleração decorrente da interação do ramo cafeeiro com a haste da colhedora na simulação foi gerado considerando a aceleração em g (na direção x, y e z) e o tempo de 0,3 segundos (Figura 52).

Figura 52: Sinal da aceleração na simulação.

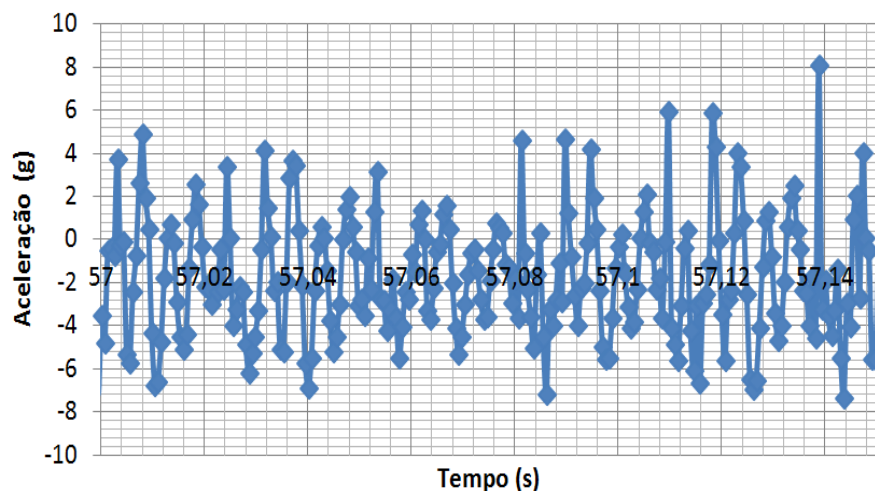


Fonte: Do autor (2017).

Para o sinal da aceleração coletado, a partir da interação do ramo cafeeiro com a haste da colhedora nos experimentos, foi considerada apenas uma pequena parte do sinal de um dos ramos amostrados, considerando a aceleração (g) e o tempo na faixa de 57 a 57,15 segundos, ou seja, um tempo total de 0,15 segundos (Figura 53). Os sinais, nas

demais faixas, foram parecidos, com períodos bem definidos, sendo suprimidos por questão de espaço e para uma melhor visualização do detalhamento do sinal.

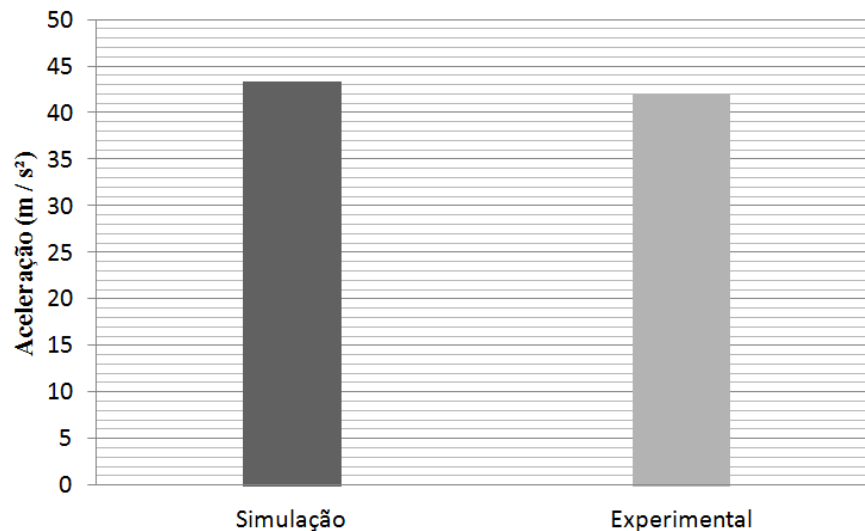
Figura 53: Sinal da aceleração no ensaio experimental.



Fonte: Do autor (2017).

Os resultados encontrados na simulação para a aceleração foram próximos aos encontrados no ensaio experimental, que apresentou valores de aceleração de 41,982 m/s²; a simulação apresentou valor 3,14% maior que o ensaio experimental (Figura 54). Uma menor diferença de valores, da ordem de 3,14%, pode ser explicada em virtude da medição direta da aceleração, sendo os resultados mais próximos.

Figura 54: Aceleração na simulação e no ensaio experimental.



Fonte: Do autor (2017).

Savary et al. (2010) verificou que, na colheita com um agitador de copa nas frequências de 3 e 3,83 Hz, a aceleração sofrida pela planta de citrus foi de 15,22 m/s² e 12,0 m/s² respectivamente. Na aceleração sofrida pela planta de café, esse valor é maior, pois a colhedora de café opera em maior frequência, fazendo com que a aceleração seja maior do que a encontrada na planta de citrus.

Em resumo, a diferença entre os resultados encontrados nas simulações numéricas para o deslocamento (23,2%) e para aceleração (3,14%), foram próximos aos resultados encontrados no ensaio experimental, o que torna satisfatório o uso do MEF para este tipo de aplicação.

8 CONCLUSÕES

Considerando as dificuldades para modelar estruturas biológicas, como o ramo do café, a metodologia de modelagem, empregada neste trabalho, para gerar a estrutura da haste da colhedora e do ramo de um cafeeiro, foi adequada para caracterizar o evento.

Com o presente trabalho, foi possível compreender os princípios mecânicos do comportamento de uma haste de colhedora e um ramo cafeeiro e gerou-se uma forma de contato entre a haste da colhedora e um ramo cafeeiro eficaz para a simulação.

Os resultados das simulações de deslocamento e aceleração da interação entre a haste da colhedora e o ramo cafeeiro permitiram o estudo e a compreensão do seu comportamento dinâmico no processo de colheita por vibrações mecânicas.

O resultado da simulação da tensão de von Mises entre a haste da colhedora e o ramo cafeeiro permitiram o entendimento e o esclarecimento da distribuição de tensões, no ramo cafeeiro, durante o processo de colheita por vibrações mecânicas.

Com isso, conclui-se que o método de modelagem tridimensional e os programas de simulação numérica utilizados podem possibilitar a geração de modelos virtuais, com base em objetos reais, com uma precisão satisfatória.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se simular a interação da haste da colhedora com a planta de café inteira e até mesmo com os frutos, visto que estes sofrem maiores impactos durante a derriça.

Este trabalho mostrou-se importante no âmbito científico pelo fato de que publicações envolvendo simulações de estruturas biológicas, como o ramo de café, ainda é incipiente. Isso pode contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias e as indústrias agrícolas podem se beneficiar de melhorias no processo de colheita mecânica do café.

REFERÊNCIAS

ANSYS Inc. **Ansys Workbench, version 14.5**. Canonsburg: Ansys Inc., 2012. Conjunto de programas. 1 CD-ROM. 2017.

ASHRAFI, H.; KASRAEI, M.; FARID, M. Boundary element formulation to modeling the viscoelastic constitutive behavior of agricultural structures. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 37.,2008, Fox do Iguaçu. **Anais...** Fox do Iguaçu: ASABE, 2008.

BERTHAUD, J.; CHARRIER, A. Genetic resources of Coffea. In:CLARKE, R. J.; MACRAE, R. **Coffee:Aronomy**. London: Elsevier Applied Science, 1988. V4, p. 1-42.

BISHOP, N.W.M. Vibration fatigue analysis in the finite element environment. ENCUESTRO DEL GRUPO ESPAÑOL DE FRACTURA, 16., 1999, Spain. **Proceeding...** Spain:[s.n.], 1999.p.1-16.

BOFANG, Z. Finite Element Method for Computing Temperature Field. **Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete**. Oxford:Tsinghua University Press, 2014, cap. 10, p.185-203.

CALLICOTT, N. **Computer-aided manufacture in architerture**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 192p.

CARVALHO, A. Distribuição geográfica e classificação botânica do gênero *Coffea* com referencia especial à espécie Arabic. **Separata dos Boletins da Superintendencia dos Serviços do Café**, São Paulo, p.226-230, 1946.

CARVALHO, E. A. ; MAGALHAES, R.R. ; ANDRADE, F. R. Predição do Comportamento Estrutural de um cafeeiro utilizando o Método dos Elementos Finitos. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 44., 2015, São Paulo. São Pedro: CONBEA, 2015.

CARVALHO, E. A. ; MAGALHAES, R.R. ; SANTOS, F. L. Geometric modeling of a coffee Plant for displacents prediction. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 123, p. 57-63, 2016.

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

CELIK, H.K.; RENNIE, A.E.W.; AKINCI, I. Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. **Journal of Food Engineering**, London, v.104, n. 2, p. 293-298, May 2011.

CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of cofee. **Journal of Agricultural Engineering Research**. New Delhi, v.73, n. 3, p.227-234, July 1999.

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

COELHO, A. L. F et al. Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.3, p.286-292, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: café**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017. 98p.

D'ALFONSO, T.H.; KAMATH, S.; PURI, V.M. Agricultural and biological engineering applications of the boundary element method. **Applied Engineering in Agriculture**, Saint Joseph, v. 13, n. 2, p. 273-281, 1997.

DAVIS, A. P. et al. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**, London, v. 152, n. 4, p. 465-512, Dec. 2006.

DEDECCA, D. M. Anatomia e desenvolvimento ontogenético de *Coffea arabica* L. variedade *Typica* Cramer. **Bragantia**, Campinas, v. 16, n único, p. 315-366, 1957.

DU, X. Dynamic responses of sweet cherry trees under vibratory excitations. **Biosystems Engineering**, London, v. 111, n. 3, p. 305-314, Mar. 2012.

ERDOGAN, D. et al. Mechanical Harvesting of Apricots. **Biosystems Engineering**, London, v.85, n. 1, p.19-28, May 2003.

FERREIRA JÚNIOR, L.G. **Análise de Vibração das Hastes de uma Colhedora de Café**. 2014. 91 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

FILGUEIRAS, W.H. et al. Modelagem da planta e café por elementos finitos para estudos de colheita por vibração. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Anais...** Brasília: Embrapa Café, 2000, p. 1095-1098..

GADANHA JÚNIOR, C.D. et al. **Máquinas e Implementos Agrícolas do Brasil**. São Paulo: IPT/IBICT, 1991. 468p.

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

HUEBNER, K. H. et al. **The finite element method for engineers**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 744p.

KNIGHT, C. E. **The finite element method in mechanical design**. Boston: PWS-Kent Publishing Company, 1993. 326 p.

LEE, J.H. et al. Vibrational and dynamic analysis of C60 and C30 fullerenes using FEM. **Computational Materials Science**, New York, v. 56, 2012, p. 131-140, Apr. 2012.

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

MAGALHAES, A. C. et al. Modelagem de máquina pneumática recolhadora de frutos de café em terreiro usando análise por elementos finitos. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 483-492, maio/ago. 2006.

MARIJA, R. J. et al. Changes of physical properties of coffee beans during Roasting. **Acta Periodica Technologica**. Oxford, v.43, p. 21-31, Jan. 2012.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de Café no Brasil**: manual de recomendações. Rio de Janeiro: SARC/PROCAFE, 2010. 548 p.

MESQUITA, C. M. et al. **Manual do café: implantação de cafezais Coffea arábica L.** Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016. 50 p..

MOENS, P. Investigaciones morfológicas, ecológicas y fisiológicas sobre cafetos. **Turrialba: revista interamericana de ciências agrícolas**, San José, v. 18, n. 3, p. 209-233, 1968.

MURAKAMI, S. Nippo no Brasil. **Nippo-Brasil**, São Paulo, maio 2017. Disponível em : <http://www.nippo.com.br/campo/historia/index.php>> . Acesso em: 18 abr. 2017.

MURASE, H.; KOYAMA, S.; NAKASAKU, S. Application of the boundary element method to agricultural engineering problems: Microcomputer implementation of BEM [the boundary element method]. **Bulletin of the University of Osaka Prefecture. Series B. Agriculture and Biology**, Sakai, v. 35, p. 29-34, 1983.

NEDOMOVÁ, S. et al. Strength of coffee beans under static and dynamic loading. **Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, Brno, v. 61, n. 3, p. 743-749, May 2013.

NG, S. F.; CHEUNG, M. S.; XU, T. A combined boundary element and finite element solution of slab and slab-on-girder bridges. **Computers & Structures**, v.37, n.6, p. 1069-1075, 1990.

NGUYEN-THOI, T. et al. A smoothed coupled NS/nES-FEM for dynamic analysis of 2D fluid–solid interaction problems. **Applied Mathematics and Computation**, New York, v. 232, p. 324-346, Apr. 2014.

NILNONTA et al. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. **Food and Bioproducts Processing**, Rugby, v.90, n. 2, p. 341-350, Apr. 2012.

OGBORN, J.; MILLER, R. Computacional issues in modelling. In: HAVEY, M. et al. (Ed.). **Learning with artificial worlds: computer based modelling in the curriculum**. London: he Falmer Press, 1994. Chap. 5, p. 33-38.

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

OLIVEIRA, M. V. M. de. **Desenvolvimento e avaliação de um dispositivo para derriça de café**. 2009. 137 p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

OLIVEIRA, R. R. de. **A utilização da modelagem computacional no processo de ensino e aprendizagem de tópicos de física através da**

metodologia de módulos educacionais: uma investigação no ensino médio. 2015. 286 p. Tese (Doutorado em Educação) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

OLUKUNLE, O. J.; AKINNULI, B. O. Investigating some engineering properties of coffee seeds and beans. **Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences**, Elmsford, v. 3, n. 5, p. 743-747, 2012.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ - OIC. **Relatório sobre o mercado de Café:** Janeiro 2017, Brasília: Embrapa, 2017. 5 p.

PARCHOMCHUK, P., COOKE, J. R. Vibratory fruit harvesting an experimental analysis of fruit-stem dynamics. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, v. 15, n. 4, p. 598-603, 1971.

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

PEZZOPANE, J.R.M. et al. Escala para avaliação de estádios fenológicos do cafeeiro Arábica. **Bragantia**, v. 62, n. 3, p.499-505, 2003.

PIOTR, M.; PIECZYWEK, A. Z. Finite element modelling of the mechanical behaviour of onion epidermis with incorporation of nonlinear

properties of cell walls and real tissue geometry. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 123, p. 50-59, Feb. 2014.

POLAT, R. et al. Mechanical harvesting of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 79, p. 1131-1135, Apr. 2007.

RAO, S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2009, 424 p.

RODRÍGUEZ, A. M. et al. Análise modal do sistema fruto-pedúnculo de café. In: SIMPOSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4., 2005, Londrina. Anais... Brasília: Embrapa Café, 2005, p. 1-5.

SANDERS, K. F. Orange harvesting systems review. **Biosystems Engineering**, London, v. 90, n. 2, p.115-125, Feb. 2005.

SANTINATO, F. et al. Análise quali-quantitativa da operação de colheita mecanizada de café em duas safras. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 4, p.495-505, out./dez. 2014.

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

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

SANTOS, F. L. et al. Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 37, n. 1, p. 11-17, jan./mar. 2015.

SAVARY, S.K.J.U. et al. Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. Transaction of the ASAE, Saint Joseph, v. 53, n. 5, p. 1373-1381, 2010.

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

SILVA, E.P.; SILVA, F.M.; MAGALHAES, R.R. Application of Finite Elements Method for Structural Analysis in a Coffee Harvester. **Engineering**, London, v. 6, n. 3, p. 138-147, Mar. 2014.

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

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

SILVA, J. S. et al . **Produção de Café Cereja Descascado** – equipamentos e custo de processamento. Brasília: Embrapa, 2013a. 16 p. (Comunicado Técnico 4).

SILVEIRA, G. M. da. **As máquinas para colheita e transporte**. São Paulo: Globo, 1990. 184 p.

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

TAKESHI, O. et al. A finite-element method using dispersion reduced spline elements for room acoustics simulation. **Applied Acoustics**, Barking, v. 79, p. 1-8, May 2014.

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**, New York, vol. 108, p.17-27, Oct. 2014.

TURNER, M.J. et al. Stiffness and deflection analysis of complex structures. **Journal of the Aeronautical Sciences**, Easton, v. 23, n. 9, p. 805-823, 1956.