



DAVIDSON SILVEIRA E SILVA

**MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE UM CAFEIEIRO POR
ELEMENTOS FINITOS UTILIZANDO ESCANEAMENTO 3D
E ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL**

**LAVRAS – MG
2023**

DAVIDSON SILVEIRA E SILVA

**MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE UM CAFEIEIRO POR ELEMENTOS FINITOS
UTILIZANDO ESCANEAMENTO 3D E ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL**

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

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães

Orientador

Prof. Dr. Fabio Lúcio Santos

Coorientador

**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).**

Silva, Davidson Silveira e.

Modelagem e validação de um cafeeiro por elementos finitos
utilizando escaneamento 3D e análise modal experimental /
Davidson Silveira e Silva. - 2023.

74 p. : il.

Orientador(a): Ricardo Rodrigues Magalhães.

Coorientador(a): Fábio Lúcio Santos.

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

Bibliografia.

1. método dos elementos finitos. 2. propriedades mecânicas e
dinâmicas. 3. colheita de café. I. Magalhães, Ricardo Rodrigues. II.
Santos, Fábio Lúcio. III. Título.

DAVIDSON SILVEIRA E SILVA

**MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE UM CAFEIEIRO POR ELEMENTOS FINITOS
UTILIZANDO ESCANEAMENTO 3D E ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL**

**FINITE ELEMENT MODELING AND VALIDATION OF A COFFEE PLANT USING
3D SCANNING AND EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS**

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

APROVADA em 06 de outubro de 2023.

Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães UFLA
Dr. Henrique Leandro Silveira UFLA
Dra. Nara Silveira Velloso UFS
Dr. Evandro Pereira da Silva UNILAVRAS
Dr. Sandro Pereira da Silva UFLA

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

Prof. Dr. Fabio Lúcio Santos
Coorientador

**LAVRAS-MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus e a Nossa Senhora por renovarem minhas forças e ânimo a cada dia desta jornada.

Quero estender meus agradecimentos a toda a minha família, em especial aos meus pais, Hamilton e Mirian, que sempre me incentivaram a buscar a melhoria e a acreditar no poder transformador do estudo, independentemente dos obstáculos que surgissem. À minha notável esposa, Mariana, que desempenhou um papel fundamental ao longo dessa jornada, sendo um sólido alicerce que me amparou nos momentos de dificuldades, ofereceu auxílio em várias frentes e esteve sempre presente com compreensão, amor e parceria.

Quero estender também minha gratidão ao Ricardo, que me orientou com sabedoria, paciência e alegria, transmitindo valiosos ensinamentos durante todo esse período. Também desejo agradecer ao Fabio Lucio, pela coorientação, paciência e confiança e todos os ensinamentos.

Agradeço de coração a todos os professores do curso de Engenharia Mecânica, com um reconhecimento especial à equipe de Fabricação, composta por Filipe, Joelma e Sandro. Eles não apenas foram meus mentores acadêmicos, mas também amigos, sempre prontos a oferecer ajuda com solicitude e a disponibilizar os laboratórios e espaços que se revelaram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Minha gratidão à Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, que proporcionaram o ambiente propício para o desenvolvimento deste projeto.

Por fim, quero expressar minha eterna gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, fizeram parte deste capítulo da minha vida. Suas contribuições e apoio foram inestimáveis e jamais serão esquecidos.

“As dificuldades fortalecem a mente, assim como o trabalho faz com o corpo.”

Sêneca

RESUMO

O café é um dos produtos mais importantes na economia brasileira, sendo o país o maior exportador do grão do mundo. Estudos voltados para simulações nas etapas de colheita mecanizada tem sido de grande interesse, tanto na academia quanto na agroindústria. Neste sentido, este trabalho tem como principal objetivo obter um modelo computacional dos ramos, empregando técnicas de escaneamento e validação experimental através de análise modal. Para isso, ramos de um cafeeiro Catuaí Vermelho foram escaneados e simulados computacionalmente para obtenção de um modelo computacional que represente o comportamento estático e dinâmico dos ramos. Previamente foi realizada a avaliação de quanto o modelo escaneado foi representativo aos dados obtidos experimentalmente. A massa específica e o módulo de elasticidade dos ramos selecionados foram obtidas em laboratório e utilizadas também como parâmetros para as simulações. Para a obtenção dos resultados de análises estática e modal, os modelos geométricos dos ramos foram simulados via Método dos Elementos Finitos (MEF). A validação do procedimento adotado deu-se por meio de experimentos, os quais certificaram que os três primeiros modos de vibração dos ramos ensaiados foram similares, observando-se desvios variando entre 2 e 20%. A análise estatística adotada indicou tendência de comportamento similar entre os ramos simulados e os resultados experimentais. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que é possível prever o comportamento dinâmico e estático de ramos de um cafeeiro a partir do escaneamento tridimensional e simulações numéricas via MEF. Isto pode ser considerado um avanço tecnológico, uma vez que normalmente são obtidos modelos simplificados por coordenadas geométricas.

Palavras-chave: MEF. Propriedades dinâmicas. Colheita de café. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Coffee is one of the most significant products in the Brazilian economy, with the country being the world's largest coffee exporter. Studies focused on simulations in the stages of mechanized harvesting have been of great interest, both in academia and in the agro-industry. In this context, the primary objective of this work is to obtain a computational model of coffee branches, employing scanning techniques and experimental validation through modal analysis. To achieve this, branches of a Red Catuai coffee plant were scanned and computationally simulated to obtain a computational model representing the static and dynamic behavior of the branches. Prior to this, an evaluation was performed to assess how representative the scanned model was compared to experimentally obtained data. The specific mass and elasticity modulus of the selected branches were obtained in the laboratory and used as parameters for the simulations. To obtain the results of static and modal analyses, the geometric models of the branches were simulated using the Finite Element Method (FEM). Validation of the adopted procedure was carried out through experiments, which confirmed that the first three vibration modes of the tested branches were similar, with deviations ranging from 2 to 20%. The adopted statistical analysis indicated a tendency of similar behavior between the simulated branches and the experimental results. Based on the results obtained, it was concluded that it is possible to predict the dynamic and static behavior of coffee branches through three-dimensional scanning and numerical simulations using FEM. This can be considered a technological advancement, as simplified models based on geometric coordinates are typically used.

Keywords: FEM. Dynamic properties. Coffee harvesting. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1 - Esquema da distribuição dos galhos de um cafeeiro.	15
Figura 2 - Comparação entre os sistemas de colheitas.	18
Figura 3 - Engenharia convencional x engenharia reversa.	19
Figura 4 - Digitalização ponto-a-ponto.	20
Figura 5 - Escaneamento com varredura a laser.	21
Figura 6 - Representação de um modelo tridimensional dividido em elementos conectados por nós.	27

SEGUNDA PARTE

Fig. 1 - Fluxograma de atividades.	48
Fig. 2 - Processo de digitalização do ramo plagiotrópico do cafeeiro.	48
Fig. 3 - Modelo computacional obtido após a digitalização dos ramos.	49
Fig. 4 - Corpo de prova utilizado na validação do escaneamento.	50
Fig. 5 - Corpo de prova submetido à força no ensaio computacional de tração.	51
Fig. 6 - Configuração de coleta de dados. O acelerômetro está encaixado no meio do ramo e a vibração é feita com o martelo de impacto.	52
Fig. 7 - a) Máquina de ensaios universal e ramo posicionado e b) ramo sob tração.	53
Fig. 8 - Corpo de prova submetido a análise de tração na máquina universal. O QR code direciona para o vídeo do corpo de prova sofrendo tração até o seu rompimento.	54
Fig. 9 - a) Ensaio de tração (rosa) e secante (vermelho) e b) Dados experimentais e regressão.	55
Fig. 10 - Malha utilizada nas simulações computacionais da validação do corpo de prova. O QRcode direciona para o link do vídeo da simulação realizada.	56
Fig. 11 - Convergência da malha obtida para o corpo de prova.	56
Fig. 12 - Falhas do modelo a) experimental e b) da simulação. O local do colapso foi o mesmo para o corpo de prova (c) e para o modelo (d).	58
Fig. 13 - Mapa de cores de desvio do R1.	60
Fig. 14 - Mapa de cores de desvio do R2.	60
Fig. 15 - Mapa de cores de desvio do R3.	61
Fig. 16 - Convergência de R1 de acordo com o tamanho dos elementos.	62
Fig. 17 - Convergência de R2 de acordo com o tamanho dos elementos.	63
Fig. 18 - Convergência de R3 de acordo com o tamanho dos elementos.	64
Fig. 19 - Primeiro ramo plagiotrópico, R1.	65
Fig. 20 - Espectro de FRF com filtro passa-alta (5 dB) para R1.	65
Fig. 21 - Segundo ramo plagiotrópico, R2.	66
Fig. 22 - Espectro de FRF com filtro passa-alta (5 dB) para R2.	66
Fig. 23 - Terceiro ramo plagiotrópico, R3.	67
Fig. 24 - Espectro de FRF com filtro passa-alta (5 dB) para R3.	67
Fig. 25 - Análise de vibração do R1 a) simulação b) experimental. Os QRcodes direcionam para links de vídeos da simulação e ensaios experimentais no ramo R1.	68
Fig. 26 - Análise de vibração dos ramos R2 a) simulação b) experimental. Os QRcodes direcionam para links de vídeos da simulação e ensaios experimentais no ramo R2.	69
Fig. 27 - Análise de vibração do R3 a) simulação b) experimental. Os QRcodes direcionam para links de vídeos da simulação e ensaios experimentais no ramo R3.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa específica e estatística dos ramos.....	57
Tabela 2 - Dados estatísticos do modelo de R1.....	60
Tabela 3 - Dados estatísticos do modelo de R2.....	61
Tabela 4 - Dados estatísticos do modelo de R3.....	61
Tabela 5 - Dados de convergência de malha de R1.....	62
Tabela 6 - Custo computacional R1.	63
Tabela 7 - Dados de convergência de malha de R2.....	63
Tabela 8 - Custo computacional R2.	63
Tabela 9 - Dados de convergência de malha de R3.....	64
Tabela 10 - Custo computacional R3.	64
Tabela 11 - Percentual de diferença das frequências naturais obtidas entre os dados obtidos por Santos e Scinocca (2023) e o presente trabalho.	68
Tabela 12 - Comparação das frequências naturais em Hz dos resultados experimentais e simulados para R1, R2 e R3.	70
Tabela 13 - Frequências naturais obtidas por Santos e Scinocca (2023).	70
Tabela 14 - Teste à normalidade (Shapiro-Wilk).	71
Tabela 15 - Teste t para amostras emparelhadas.	71
Tabela 16 - Coeficiente de determinação (R e R ²) e equação de regressão linear medidas de ajustamento do modelo.	71

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	O café e a economia	14
2.2	Morfologia do cafeeiro	14
2.3	Colheita do café.....	16
2.3.1	Mecanização da colheita	17
2.4	Engenharia reversa e digitalização	19
2.5	Modelo CAD.....	25
2.6	Método dos Elementos Finitos.....	26
2.7	Propriedades mecânicas de cafeeiros.....	28
2.8	Análise modal.....	30
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	34
	REFERÊNCIAS	35
	SEGUNDA PARTE - ARTIGO	41

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo, tendo no ano de 2022 uma safra de 50,9 milhões de sacas produzidas e de 39,8 milhões de sacas de 60 quilos exportadas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2023). Mesmo com variedade nos tipos de relevo e clima em seu território, o cultivo do grão é distribuído entre os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo, Bahia, Rondônia, Paraná, Rio de Janeiro, Goiás, Mato Grosso, Amazonas e Pará (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2017). Essa diversidade resulta em variedades de sabores, agradando os mais variados consumidores. A colheita do café, inicialmente, era realizada de forma manual, mas com o desenvolvimento de tecnologias, tornou-se quase exclusivamente mecanizada, embora uma parte do trabalho ainda dependa da força humana (SANTINATO *et al.*, 2015).

As colhedoras comumente empregadas aplicam vibrações nos galhos, utilizando a energia cinética para o desprendimento dos grãos. Esse processo, porém, pode ser danoso às plantas, causando quebras dos ramos, desfolha e a colheita de grãos ainda em estágio de maturação, fatores que comprometem a longevidade e consequente produção do cafeeiro nos anos seguintes (SOUZA *et al.*, 2023). Sendo assim, tem-se focado em estudos no sentido de preservação das árvores e otimização do processo, com a correta regulagem das máquinas durante a colheita (FERREIRA JÚNIOR *et al.*, 2020). Com o crescente avanço dos computadores e softwares, os trabalhos envolvendo simulações numéricas têm ganhado atenção, principalmente na indústria agrícola.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta utilizada em diversas áreas da Engenharia, para a previsão, por modelos matemáticos, da resposta dos mais variados sistemas de interesse pela subdivisão da superfície em geometrias simplificadas (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2005). Para que o MEF possua boa acurácia, deve-se tomar especial cuidado na obtenção do sistema modelado. A utilização de scanners 3D é uma opção atual e que vem apresentando bons resultados, uma vez que se consegue digitalizar toda a superfície do material em estudo, incluindo geometrias variadas e imperfeições, como é o caso de plantas ou frutas (SILVA, Flávio *et al.*, 2010; ZHAO *et al.*, 2019).

Além disso, a obtenção das propriedades físico mecânicas do cafeeiro é de grande importância para o desenvolvimento de máquinas eficientes (COELHO *et al.*, 2015). Elas estão intimamente ligadas com as análises das vibrações sentidas pela planta a partir das colhedoras, servindo como parâmetros para a aplicação da vibração correta. Nesse sentido, as análises modais são extremamente importantes, sendo que permite obter as frequências naturais da

árvore, avaliando o seu comportamento perante perturbações vibratórias (CARVALHO; MAGALHÃES; SANTOS, 2016; VELLOSO *et al.*, 2020).

Em razão do grande interesse tecnológico e econômico envolvendo a colheita mecanizada do café, estudos envolvendo escaneamento e simulações numéricas ainda requer aprofundamentos.

1.1 Objetivo principal

Obter modelos tridimensionais de ramos de um cafeeiro e realizar simulações numéricas para fins de predição do comportamento estático e dinâmicos dos ramos.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o processo de escaneamento tridimensional de ramos plagiotrópicos de uma planta de café;
- Obter resultados de simulação estática e dinâmica a partir dos modelos escaneados dos ramos;
- Comparar resultados experimentais e simulados para fins de validação da metodologia empregada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O café e a economia

O café está há muitos séculos sendo comercializado mundialmente, desde os primórdios tem importância econômica muito grande. As primeiras sacas, oriundas da Guiana Francesa, foram trazidas por Francisco de Melo Palheta, desembarcando no Brasil em 1727, na cidade de Belém – PA (ainda sob o nome de província do Grão-Pará). O seu plantio, porém, desenvolveu-se no interior dos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro, onde prosperou, principalmente, no vale do Paraíba (CARVALHO *et al.*, 2017).

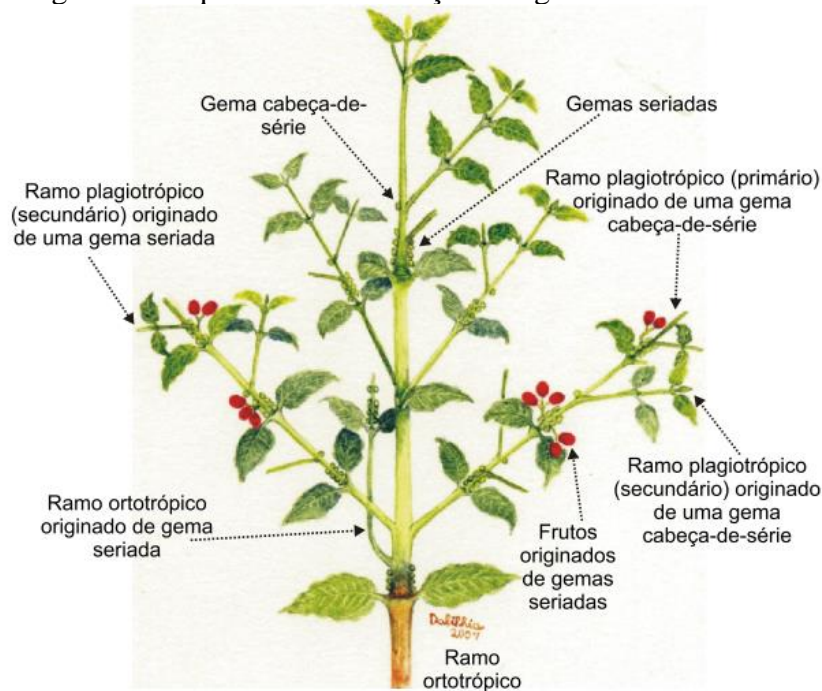
O café é um dos mais importantes e valiosos produtos agrícolas nacionais cujo mercado cresceu e se consolidou ao longo de todo o século XX, sendo um movimento conduzido pelos países produtores. Em 2020, o Brasil contribuiu com cerca de 35,27% do mercado internacional, no total de 58,21 milhões de sacas produzidas e é o maior produtor mundial do grão do café, seguido do Vietnã com produção de 30,48 milhões de sacas e da Colômbia, que produziu 14,1 milhões de sacas (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION, 2020).

Com isto, o Brasil participa ativamente para a formação dos preços no mercado externo desta *commodity*, por se tratar do maior produtor mundial. No início do século XX o Brasil já chegou a ser responsável por 75% da produção do café consumido mundialmente (CUNHA *et al.*, 2010). Além disto, a cafeicultura nacional é um dos setores econômicos que mais contribui decisivamente para o Produto Interno Bruto (PIB), gerando empregos diretos e indiretos, além de contribuir com a renda do trabalhador rural (ALFONSI *et al.*, 2019).

2.2 Morfologia do cafeeiro

A árvore do café arábica é uma planta do tipo dicotiledônea perene de tamanho variável. A sua estrutura física é bem característica, possuindo dois tipos de galhos, os ortotrópicos, que crescem verticalmente, e os plagiotrópicos, que crescem horizontalmente em diferentes orientações, em relação ao tronco principal, conforme Figura 1. Os ramos primários dão origem a ramos secundários, que por sua vez se dividem em ramos terciários e que também se ramificam para formar ramos quaternários. Com o crescimento do cafeeiro, em seus ramos ortotrópicos e plagiotrópicos estão presentes também as gemas, são regiões compostas por células que receberem estímulos hormonais das plantas, desenvolvendo as suas estruturas vegetativas e reprodutivas (AYALEW, 2014).

Figura 1 - Esquema da distribuição dos galhos de um cafeeiro.



Fonte: Carvalho (2008).

Nestas gemas, destaca-se a gema apical, que é responsável pelo crescimento e evolução do ramo ortotrópico principal, que se desenvolve verticalmente. As gemas que se localizam nas axilas foliares, geralmente com o número de cinco a seis gemas, são as gemas seriadas, que a primeira gema é chamada de gema cabeça de série, e as demais são gemas seriadas. Na gema cabeça de série, originam-se os ramos plagiotrópicos, enquanto as gemas seriadas podem originar novos ramos ortotrópicos ladrões, que são ramos normalmente eretos, e além de roubar energia dos outros ramos, também impedem a entrada do sol, e sendo que estas gemas já nos internódios dos ramos plagiotrópicos de primeira ordem, geram ramos e frutos, e as gemas cabeça de série, na mesma condição, somente novos ramos de ordem maior (BATISTA, 2010; CARVALHO, 2008).

Quando as plantas se encontram em fase adulta, as folhas normalmente serão encontradas somente nos ramos plagiotrópicos, originadas das gemas, e em pares, em um mesmo plano, mas em posições contrárias entre si. O tamanho destas estruturas foliares varia de 12 a 24 cm e seu formato é ondulada nas suas extremidades, de forma elíptica e com poucas variações entre as variedades de plantas e são as responsáveis pela fotossíntese (BATISTA, 2010). Estas folhas são revestidas por uma cutícula, que tem como função reduzir a perda espontânea de água, proteger a folha em si contra danos mecânicos e que, por característica,

dificulta a absorção de produtos normalmente usados nos cultivares de café como reposição de nutrientes, herbicidas, fungicidas, entre outros (CARVALHO, 2008).

Estudos desenvolvidos por Coelho *et al.* (2015) mostraram que as interações entre os diferentes organismos de uma mesma planta, como frutos e folhas influenciam no momento de colheita e, portanto, devem ser melhor entendidos em termos de suas propriedades geométricas, físicas e mecânicas. Este tipo de estudo pode proporcionar informações para se obter modelos mais próximos do sistema físico real e um melhor entendimento da interação do equipamento com o cafeeiro em um processo de colheita.

2.3 Colheita do café

Os cultivares de café são um tipo de cultura agrícola de longa duração, já bem dominado e bastante difundido com boas práticas que, geralmente, não apresenta grandes dificuldades para os produtores. Porém, os pontos de estrangulamento são cruciais na definição do custo de produção do café e na operação de colheita (PAULO *et al.*, 2016).

O processo de colheita do café deve ser iniciado quando a maior parte dos frutos estiver madura e é uma operação complexa, pois é constituído por uma sequência de operações, como na colheita manual que a sequência é arruação, derriça, varrição, recolhimento, abanação e transporte (OLIVEIRA *et al.*, 2007c). No processo de arruação, realiza-se a limpeza na base e no entorno do cafeeiro para a remoção de terra solta, ervas daninhas e quaisquer tipos de detritos, sendo que esses devem ser retirados e alinhados nas ruas de café. O processo de derriça consiste na retirada do fruto do cafeeiro, dispostos sobre o chão já limpo, ou um pano posicionado sob o cafeeiro. A varrição é o processo de amontoar e retirar o café que ficou sobre o solo, sendo que na derriça realizada sobre o solo, a varrição tem que ser feita antes, mas para a derriça sobre o pano, será realizada depois. O recolhimento é o processo de juntar o café varrido ou derriçado, seguido do processo de abanação, no qual o café varrido ou derriçado é separado das folhas, ramos, gravetos, entre outras sujeiras. Finalmente o processo de transporte é aquele no qual se faz a retirada do café já recolhido para o terreiro de café, onde se iniciam as operações de pós-colheita (SILVA; SALVADOR; PÁDUA, 1999).

Quando comparada a outras culturas, a colheita do café oferece desafios na sua execução devido a fatores intrínsecos da planta, como o seu formato, a desuniformidade de maturação dos grãos e o seu grau de hidratação, os quais dificultam a mecanização das operações (OLIVEIRA *et al.*, 2007c). Ela também pode ser diferenciada pelo tipo de mecanização utilizados, e estes também definem a ordem do processo e o sistema de colheita. Segundo

Carvalho Júnior *et al.* (2003) os tipos de colheita podem ser classificados em manual, semimecanizado e mecanizado.

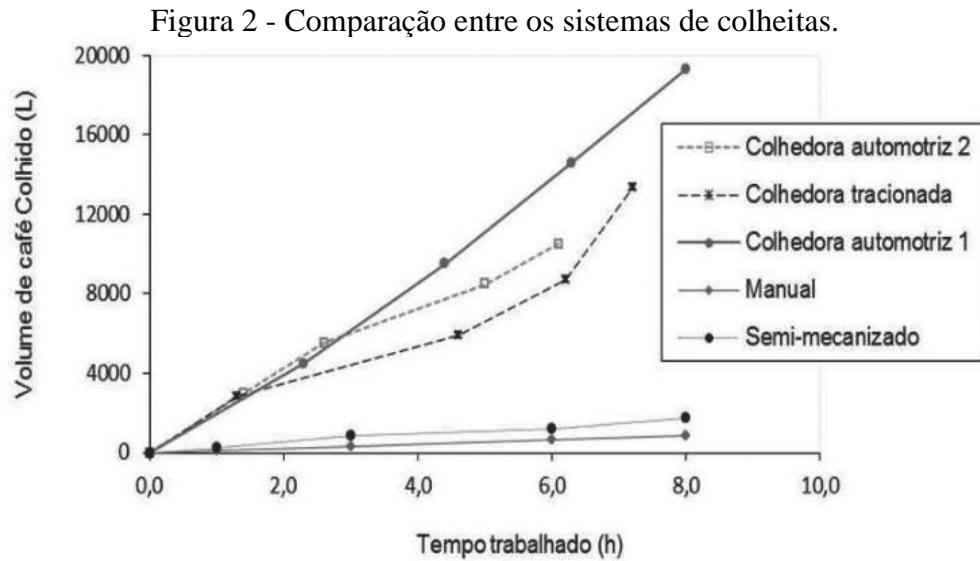
O sistema manual é considerado o mais convencional por ainda ser muito empregado. Nesse tipo de colheita, todos os processos com exceção do transporte, são realizados a partir de mão-de-obra manual, o que demanda uma grande quantidade de trabalhadores, este processo não tem sido tão viável, dada a escassez de mão-de-obra e elevado custo onde se adotado a mecanização a redução pode chegar a 62,36% (OLIVEIRA *et al.*, 2007a; SANTINATO *et al.*, 2015).

No sistema semimecanizado, tem-se a utilização intercalada de serviços manuais e de máquinas para a execução das operações de colheita. É um sistema que pode variar muito, desde apenas uma única operação mecanizada até quase a sua totalidade. Já no sistema mecanizado, considera-se que todas as operações do processo de colheita são realizadas por máquinas e são costumeiras em grandes propriedades terrificadas desde que possuam topografia adequada (BARBIERE, 2011; CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2003; PAULO *et al.*, 2015).

O desempenho econômico de máquinas agrícolas é estimado pelos custos operacionais, que se dividem entre fixos e variáveis. E ainda, a mecanização do processo aumenta a rapidez e eficiência da operação, implicando em uma maior qualidade do produto e na redução de perdas no processo, diminuindo consideravelmente o custo de produção da saca de café (PAULO *et al.*, 2016).

2.3.1 Mecanização da colheita

O desempenho econômico de máquinas agrícolas é estimado pelos custos operacionais, que se dividem entre fixos e variáveis. E ainda, a mecanização do processo aumenta a rapidez e eficiência da operação, implicando em uma maior qualidade do produto e na redução de perdas no processo, diminuindo consideravelmente o custo de produção da saca de café. A produtividade do sistema mecanizado foi comparada com outros métodos de sistema de colheita manuais e semimecanizados, expressas em volume por horas efetivamente trabalhadas no turno de trabalho, conforme apresentado na Figura 2. A partir disso, observa-se que o processo de colheita semimecanizada possui uma produtividade 64% maior do que o manual e ainda que a colheita mecanizada apresenta rendimento muito superior aos demais.



Fonte: Paulo *et al* (2016).

Com isso, muitos estudos têm sido realizados no intuito de melhorar o processo das colheitas mecanizadas. Nos anos de 1975 e 1976 foram feitos os primeiros estudos nesse sentido, nos quais um trator agrícola funcionou como fonte-motriz de vibração afim de levantar parâmetros de derrça, frequência e amplitude de vibração para avaliação da transmissão de energia à planta (NOGUEIRA *et al.*, 1975). Apesar dos benefícios da implementação de máquinas agrícolas na redução de custos e no aumento da eficiência nas operações de colheita, o produtor deve-se atentar aos possíveis danos às plantas (OLIVEIRA *et al.*, 2020). A desfolha é um dos principais danos causados ao cafeeiro durante a utilização das colhedoras, fazendo com que a planta demande energia para a recomposição das suas folhas, ao invés de produzir frutos, estressando-a e diminuindo a sua longevidade (OLIVEIRA *et al.*, 2007b). Contudo, o avanço tecnológico das últimas décadas tem buscado melhorias na colheita dos grãos com a preocupação da manutenção da integridade das plantas (SANTINATO *et al.*, 2015).

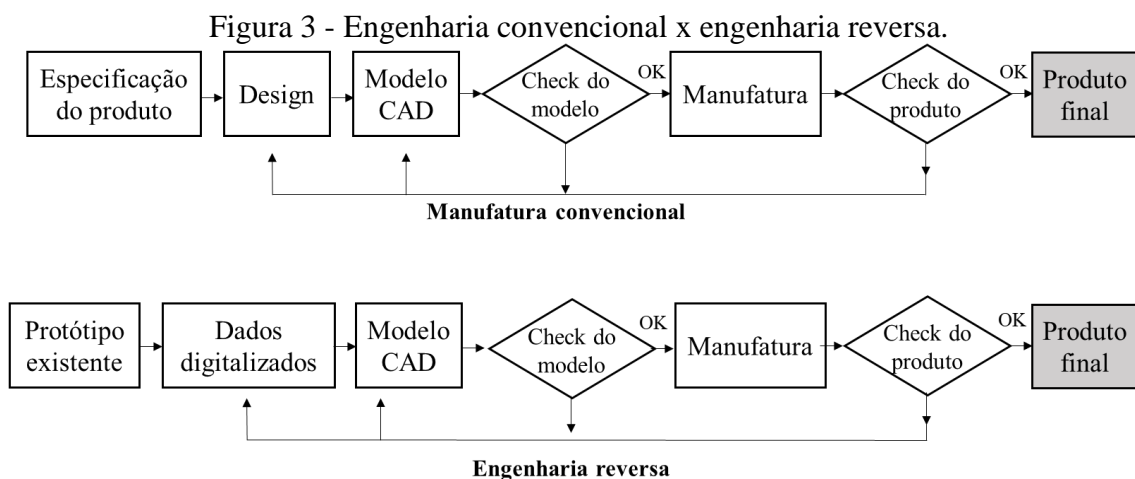
Durante o processo de colheita mecanizada, ocorre o contato das hastes da colhedora com a planta, transmitindo vibração para que os grãos se desprendam dos galhos e caiam. (SOUZA *et al.*, 2023). Entretanto, a eficiência dessas máquinas é afetada pelas condições da lavoura, bem como pela sua regulagem. A questão das floradas dispersas, por exemplo, resultam na desuniformidade da maturação dos frutos na época da colheita. Plantas de tamanhos diferentes e teores de umidade elevados também são características que comprometem a eficiência das colhedoras, sendo assim, são necessários ajustes para cada condição de colheita (FERRAZ *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2023).

O uso de simulações na previsão do comportamento mecânico das máquinas e dos cafeeiros tem sido uma opção interessante nesse cenário. Carvalho, Magalhães e Santos (2016) modelaram e realizaram simulações numéricas de plantas de *Coffea arabica L.*, aliados a testes experimentais, para a avaliação do seu comportamento mecânico utilizando o Método dos Elementos Finitos, (MEF). Apesar de ser um estudo inicial, foi apresentado um modelo tridimensional do cafeeiro com resultados relevantes para esse tipo de aplicação. Em conjunto com estes estudos, Souza *et al.* (2018) desenvolveram uma simulação também através do MEF da interação de um ramo plagiotrópico e uma colhedora, além de um experimento para a comprovação da potencialidade do uso do método para o fim de interação de equipamento com o ramo.

2.4 Engenharia reversa e digitalização

A Engenharia Reversa (ER) é uma técnica que tem como característica partir de um modelo físico, para a obtenção de um modelo digital (SOUZA; ULBRICH, 2009).

Enquanto para Ingle (1994), a ER é compreendida como um processo desmontagem do produto, visando determinação do modo que o projeto foi desenvolvido. Ainda segundo Puntambekar, Jablowkow e Sommer (1994), a ER, por ser tratar de um processo inverso partindo do modelo físico e terminando no arquivo do tipo *Computer-aided design* (CAD), inicialmente indicando ser o oposto da engenharia convencional. Porém os dois conceitos globais da engenharia são muito similares, onde a principal diferença consiste no protótipo já existente nos métodos de ER são substituídos por especificações de produto engenharia convencional como mostra a Figura 3.



Fonte: Adaptado de Lima (2003).

De acordo com os estudos de Souza e os de Puntambekar, Jablokow e Sommer, a ER se divide em duas etapas, que são a digitalização de um produto e a construção de um modelo CAD com os dados obtidos da digitalização (SOUZA; ULBRICH, 2009; PUNTAMBEKAR; JABLOKOW; SOMMER, 1994). Existe um consenso na literatura (ALVES; ALMEIDA, 2020; LIMA, 2003; PUNTAMBEKAR; JABLOKOW; SOMMER, 1994) que aponta que o processo inicial, ou seja, a digitalização, se dá em dois tipos:

- a) digitalização ponto a ponto: Definida como uma varredura no objeto escaneado por dados de coordenadas num arquivo de pontos. Por se tratar de um método demorado, por ter uma tomada de dados ponto-a-ponto, realizado através do toque de uma sonda de escaneamento de contato ou também chamada de probe, no modelo como mostrado na Figura 4, sua aplicação é mais impactada quando implementado a escaneamento de objetos complexos ou com alta exigência de exatidão na reprodução (VINARUB; KAPOOR, 1992).

Figura 4 - Digitalização ponto-a-ponto.



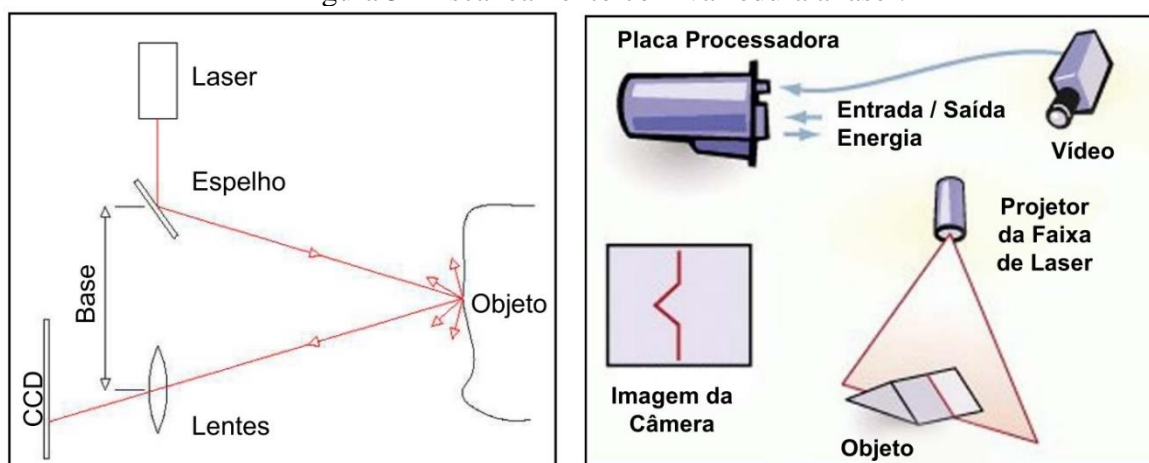
Fonte: [//www.faro.com/pt-BR/Resource-Library/Article/understanding-portable-measurement-arms](http://www.faro.com/pt-BR/Resource-Library/Article/understanding-portable-measurement-arms)

- b) digitalização por nuvem de pontos: Digitalização por nuvem de pontos é o método de captura de ponto simultâneos, muito rápido e com alta precisão, evidentemente relacionada ao equipamento a se utilizar. O método de digitalização por nuvem de pontos mais usado é o *time-of-flight*, ou tempo de voo.

O *time-of-flight* utiliza o princípio da triangulação, onde um curto impulso elétrico emite um diodo semiconductor de laser para que emita um pulso de luz, que atravessa uma lente e gera um fino raio laser. Quando ele atinge o modelo a ser digitalizado, retorna para a o sensor receptor e o intervalo de tempo entre a transmissão e recepção do pulso é utilizado para o cálculo de posição do ponto, utilizando a velocidade da luz como uma constante (LIMA, 2003).

A varredura a laser é baseada neste princípio, onde o equipamento gera um ponto ou uma faixa de laser que é registrado por uma câmera CCD (Figura 5). O ângulo de incidência do laser é registrado e a base é conhecida a partir de parâmetros de calibração, então com posse destas informações, a distância entre o objeto e o equipamento é mensurada geometricamente pelo tamanho de sua base calibrada e o ângulo de incidência do laser (BOEHLER; HEINZ; MARBS 2002).

Figura 5 - Escaneamento com varredura a laser.



Fonte: Lima (2003).

Para Souza e Ulbrich, o processo de digitalização se subdivide em cinco etapas, sendo elas (SOUZA; ULBRICH, 2009):

- a) aquisição de dados;
- b) registro de referências no modelo;
- c) criação de malha;
- d) retrabalho de malha;
- e) suavização da malha.

A aquisição de dados ocorre durante o processo de digitalização pelo qual várias tomadas de pontos são realizadas, e, quando o ângulo de atuação do equipamento não cobre todo o modelo, outra tomada de pontos é necessária. O resultado desta etapa é uma densa nuvem de pontos formada por várias tomadas em diferentes ângulos de visão.

O registro de referências no modelo é responsável por criar os registros que possibilitem a combinação dos pontos levantados. O mínimo de registros necessários para juntar duas tomadas de digitalização consiste em três pontos. O objetivo da captura destas referências é fornecer informações para fazer o alinhamento entre as camadas digitalizadas.

A criação de uma malha triangular única é realizada após todas as tomadas de pontos serem alinhadas. Assim, é iniciado um processo de união e de redução de regiões sobrepostas.

Na etapa de retrabalho da malha, fecham-se lacunas e eliminam-se ruídos. Em muitos casos, a sobreposição das camadas pode conter regiões de difícil acesso, impedindo a captura de pontos ou furos de processo, que não são necessários para a construção do modelo.

E por fim, na suavização da malha, erros dimensionais, como ruídos (falhas), erros de calibração e registro, podem ser eliminados sem destruir a geometria do objeto. Para isso, a malha deve passar pela etapa de suavização, a qual consiste em construir a malha considerando um desvio médio entre os pontos que fazem parte de uma determinada região.

Na literatura, encontram-se algumas variações do processo, como o proposto por Karbacher *et al* (2001), que é mais extenso e complexo, onde estabelece primeiro cinco etapas para a digitalização e em um segundo momento são tratados os dados digitalizados, como descrito a seguir:

a) aquisição de dados: imagens de vários ângulos do objetos são obtidas para adquirir toda a superfície do objeto, estas imagens consistem em coordenadas triplas (x,y,z) dispostos numa matriz;

b) registro da superfície: as vistas são transformadas em um sistema de coordenadas comum e são alinhadas umas com as outras. Primeiro, elas são alinhadas em pares interativa e grosseiramente. Então, um segundo cálculo minimiza os desvios restantes em todas as vistas;

c) reconstrução da malha: as vistas são unidas em um modelo simples do objeto. A descrição da superfície é criada usando uma malha de triângulos. A ordem original dos dados é perdida, resultando em dados dispersos;

d) nova malha suavizada: uma nova representação da nuvem de pontos é criada a partir dos vértices de triângulos e das orientações de direção. Erros dimensionais, como ruídos (falhas), erros de calibração e registro, podem ser eliminados sem destruir a geometria do objeto. Para isso, a malha deve passar pela etapa de suavização. A suavização consiste em reconstruir a malha considerando um desvio médio entre os pontos que fazem parte de uma determinada região;

e) reconstrução de cores: em alguns sistemas, é possível reconstruir as cores do objeto digitalizado. Nestes sistemas, para cada imagem de alcance capturada existe um mapa de textura e cores.

A superfície do objeto é reconstruída a partir de múltiplos registros imagens de alcance. Se o sensor estiver calibrado, as imagens consistem em uma matriz de coordenadas triplas $x_{n,m} = [x, y, z]T_{n, m}$. A superfície do objeto pode ser amostrada de forma incompleta e a densidade de amostragem pode variar, mas deve ser a mais alta possível. Além disso, o objeto pode ter forma arbitrária, e o campo de visão pode até conter vários objetos. As etapas a seguir são executadas para transformar esses dados em uma única malha de triângulos curvos ou planos:

- a) criação da malha: devido à estrutura tipo matriz das imagens de alcance, é fácil transformar separadamente cada uma delas em malhas triangulares com os pontos de dados como vértices. Para cada vértice uma normal é calculada a partir das normais dos triângulos circundantes;
- b) primeira suavização: para utilizar o máximo possível das informações amostradas, a suavização de erros de medição, como ruído e *aliasing*, é feita antes do afinamento da malha;
- c) primeiro afinamento da malha: a mesclagem de malhas densas geralmente requer muita memória, de modo que a redução da malha deve ser realizada com antecedência. O erro de aproximação permitido deve ser escolhido o menor possível, pois idealmente o desbaste deve ser feito apenas no final da tubulação do processo;
- d) adição/união: as malhas de diferentes visualizações são mescladas por pares usando operações de malha locais, como inserção de vértices, ponte de lacunas e crescimento de malha (ver a Fig. 3). Inicialmente, uma imagem mestre é escolhida. As outras visualizações são mescladas nele sucessivamente. Apenas são inseridos os vértices que não causam nenhum artefato topológico (por exemplo, triângulos invertidos) e que são necessários para manter o erro de aproximação abaixo de um determinado limite;
- e) suavização final: devido a erros de calibração e registro, as malhas não combinam perfeitamente. Assim, após a fusão, a malha geralmente é distorcida e precisa ser suavizada novamente;
- f) afinamento final da malha: o afinamento da malha é continuado até que o erro de aproximação dado seja alcançado. Para fins de desbaste também é realizada uma classificação das superfícies de acordo com as características de curvatura;
- g) fechar furos e lacunas (buracos): normalmente, faltam dados devido a efeitos de sombreamento ou porque não é possível adquirir a superfície completa do objeto. Isso

causa buracos e lacunas na malha reconstruída que são preenchidas com triângulos planos. Os novos triângulos são refinados por um novo esquema de subdivisão para integrá-los perfeitamente aos dados medidos;

- h) otimização topológica da malha: o desbaste geralmente causa distribuições desajeitadas dos vértices, de modo que ocorrem triângulos alongados. A otimização de malha geométrica move os vértices ao longo da superfície curva para produzir uma triangulação mais equilibrada;
- i) otimização de malha topológica: finalmente, a triangulação de superfície é reorganizada usando operações de troca de arestas, a fim de otimizar determinados critérios. Normalmente, o erro de interpolação é minimizado.

E ainda sobre digitalização, Várady, Martin e Cox (1997) observaram que existem alguns tipos de problemas que podem ser enfrentados ao praticar digitalização com relação aos dados obtidos. Estes problemas são referentes a calibração, precisão, acessibilidade, oclusão, fixação, vistas múltiplas, ruídos (falhas) e dados incompletos, distribuição estatística do modelo e superfície de acabamento.

- a) calibração: é essencial para um sistema baseado em medidas. Erros podem acontecer por desvios e distorções nas lentes, desalinhamentos e problemas similares. Todos os sensores devem ser calibrados para que se possa determinar parâmetros de precisão com pontos da câmera e orientações, e para modelar e conceder dados dentro dos limites de tolerância de erros sistêmicos;
- b) acessibilidade: limitação de operação de digitalização, são locais que não são facilmente acessados por configuração do equipamento ou pela topologia do modelo. Normalmente, exige mais de uma vista para contornar, mais pode haver locais que não seja possível ser digitalizado, como por exemplo furos;
- c) oclusão: bloqueio da digitalização por sombra ou obstrução. Problema característico de escaneamento ótico;
- d) fixação: a fixação se torna um problema análogo a oclusão, pois é comum ter que fixar o modelo físico antes de escanear, resultando em os fixadores também se integrarem aos dados do modelo digitalizado. Para contornar este problema, usualmente pode se fazer múltiplas digitalizações, o que pode introduzir um maior nível de erro aos dados da digitalização;
- e) ruídos (falhas): eliminação de dados incorretos ou ruídos é uma tarefa difícil. Estes podem ser gerados de diversos modos, com por exemplo vibrações externas, reflexos, entre outros. Existem diferentes filtros desenvolvidos que podem ser usados, mais a

questão mais importante é se deve ser eliminado o ruído antes, durante ou depois do processo de criação do modelo digitalizado. Em algumas vezes, o ruído não deve ser eliminado por completo;

- f) distribuição estatística: se trata de que toda e qualquer modelo que é digitalizado representa uma amostragem de uma população. Então quando ER produz um modelo, deve se considerar a tolerância, que que justificaria a digitalização de múltiplos modelos e definido por meio de média estatística. Contudo, é inviável na maior parte das vezes nos processos de ER, por conter somente um modelo para o processo de digitalização;
- g) superfície de acabamento: o tipo de superfície do modelo também é uma questão importante. Revestimento dos materiais também e macies também pode influenciar drasticamente no processo de aquisição de dados de digitalização.

Ainda, foi proposto por Várady, Martín e Cox (1997), um modelo de digitalização perfeita, no qual um objeto estaria flutuando em um cenário tridimensional onde todas as direções seriam acessíveis. Nesse caso, os dados seriam capturados por um único sistema de coordenadas com elevada precisão e sem a necessidade de filtrar os ruídos.

Os campos de atuação da digitalização são diversos, estando presente, por exemplo, nas áreas da saúde, engenharia, de materiais, meio ambiente e agricultura. Nesta última, a digitalização já vem sendo utilizada, promissora, em análises de textura e irregularidades do solo (MORAIS *et al.*, 2020; XINGMING *et al.*, 2021), na avaliação de podas de árvores frutíferas (WESTLING; UNDERWOOD; BRYSON, 2021), na avaliação de pomares (ROSELL *et al.*, 2009) dentre outras. A digitalização se faz uma ferramenta de grande importância nas possibilidades de simulações que podem ser realizadas sem o gasto com materiais e na possibilidade de previsão de comportamentos de estruturas que não são acessíveis fisicamente (LI *et al.*, 2013).

Dada a sua importância, diversos tipos de simulações já vêm sendo utilizadas nos estudos do café, por exemplo, no que diz respeito a sua colheita. Neste caso, podem-se estabelecer relações entre as vibrações mecânicas das máquinas colhedoras e do sistema fruto-pedúnculo de acordo com a maturação (SANTOS *et al.*, 2015), ou, em relação à própria árvore.

2.5 Modelo CAD

O modelo CAD (*Computer Aided Design*) é um sistema de desenho assistido por computador iniciado em 1957, pelo Patrick Hanratty, considerado o pai do CAD/CAM, mais que conceitos gráficos 3D só se popularizaram em 1988 com o surgimento do AUTOCAD R10

(PELISSER *et al.*, 2021). Com esta tecnologia, através do modelo CAD gerado, é possível partir para instruções posteriores de usinagem converter material bruto no projetado (LIMA, 2003).

A criação do modelo CAD, a partir da nuvem de pontos gerados pela digitalização, deve observar a quantidade de pontos a serem utilizados neste processo, contudo, essa quantidade está associada a complexidade da captura de dados.

Dados simples necessitam de menos pontos de ancoramento do que no caso dos dados complexos, variando de 10% a dados simples e complexos exigindo até 70% de ancoramento dos pontos da nuvem de pontos. A escolha dos pontos é outro cuidado a se observar para a modelagem do CAD, por exemplo, o procedimento de escolher os nós de fronteira culminam em garantir que nenhuma informação adicional possa ser gerada quando os dados forem processados (PIEGL; TILLER, 2001).

2.6 Método dos Elementos Finitos

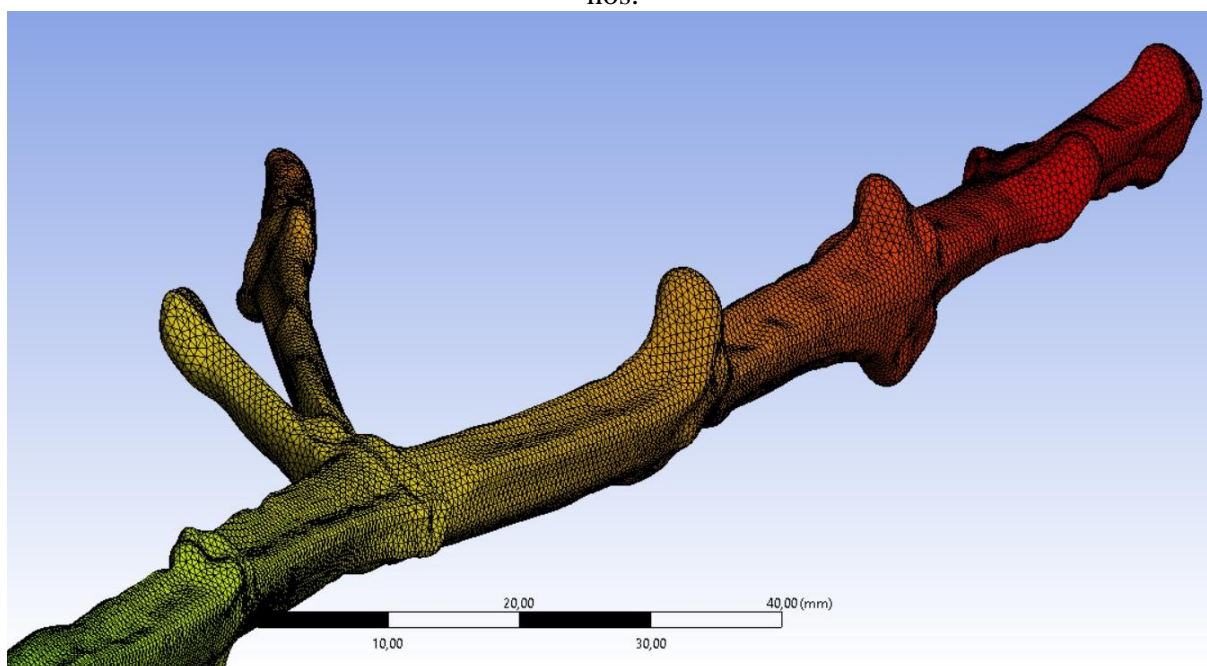
As soluções analíticas são aquelas dadas por uma expressão matemática que produz os valores das quantidades desconhecidas desejadas em qualquer local de um corpo e, portanto, são válidas para um número infinito de locais no corpo. No decorrer do seu desenvolvimento e fundamentação, englobando os estudos dos fenômenos físico-matemáticos, em sua maioria, são descritos em termos de equações diferenciais parciais ou ordinárias. Entretanto, quando se lida com geometrias complexas, por exemplo, tridimensionais, objeto de exploração comum na engenharia em geral, a abordagem clássica para o estudo desses fenômenos, dificilmente, converge em resultados precisos, e, geralmente, não é possível obter soluções matemáticas analíticas. Sendo assim, a utilização de métodos numéricos, como o método dos elementos finitos, se faz necessária para soluções aceitáveis (NORRIE, 1987).

O início do desenvolvimento do método de um sistema de elementos finitos como um sistema que pudesse lidar com esse tipo de desafio teve início na década de 1940, com trabalhos voltados a engenharia estrutural, ainda como estrutura 1D (HRENNIKOFF, 1941; MCHENRY, 1943). Courant (1943), entretanto, propôs configurar a solução de tensões de forma variacional e em seguida, introduziu funções de interpolação (ou forma) por partes sobre sub-regiões triangulares, que compõem toda a região, como um método para obter soluções numéricas aproximadas. Por muitos anos, esse método não foi conhecido e, somente mais tarde, com o desenvolvimento do método dos elementos finitos, ele foi creditado como o precursor do método, que se desenvolveu até meados da década de 1950. Porém, por serem cálculos de

grande dificuldade de resolução manual, popularizou-se novamente com o advento da computação digital de alta velocidade.

Segundo Fish e Belytschko (2008), o MEF é um método numérico usado para resolver equações diferenciais parciais (do inglês, *partial differential equation*, PDE,) que surgem em vários campos da engenharia e da ciência. A ideia básica do método é simplificar o domínio do problema em subdomínios menores de comportamento bem definido, os chamados, elementos, nos quais o PDE pode ser aproximado por uma equação mais simples com um número finito de incógnitas. Esses elementos são conectados entre si por pontos, ou nós, gerando a malha de elementos finitos, conforme Figura 6. Essas equações mais simples são montadas em um sistema de equações lineares, envolvendo as etapas de discretização, aproximação, montagem e solução, utilizando métodos numéricos para obter uma solução aproximada para o problema original (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2000).

Figura 6 - Representação de um modelo tridimensional dividido em elementos conectados por nós.



Fonte: Do autor (2023)

A precisão do MEF depende do número de elementos e de nós, além do tamanho e dos tipos de elementos da malha, pois quanto menor for a dimensão dos elementos e maior a sua quantidade na malha, maior será a precisão nos resultados. O MEF tem sido empregado na solução de problemas em diversas áreas da engenharia, como em questões de condução de calor (WU *et al.*, 2023), rachaduras de estruturas (ZHOU *et al.*, 2023), análises de microestruturas de materiais (VERMA; SAXENA, 2023), para estudos de impactos em produtos agrícolas

(CHAVOSHI *et al.*, 2023; GUAN; LI; ZHOU, 2023), dentre outras, inclusive em trabalhos na área de mecanização de colheitas (CHAVOSHI *et al.*, 2023; MELO; SANTOS; SCINOCCA, 2023).

Xie *et al.* (2018) utilizaram o MEF, baseado em parâmetros experimentais, para a simulação da colheita de cana de açúcar, cuja mecanização é difícil, por danificar bastante o produto no processo. Com isso, definiu-se valores máximos de estresse que a cana de açúcar poderia sofrer quando colhida, a partir da resposta do modelo utilizado, podendo ser utilizado como base para o desenvolvimento desse tipo de colheita. Nesse sentido, simulações numéricas via MEF da colheita de café também tem sido proposto. Velloso e colaboradores utilizaram o MEF em estudos das propriedades modais de cafeeiros (VELLOSO *et al.*, 2020) bem como Carvalho e colaboradores (2016), que combinaram testes experimentais, modelagem do cafeeiro com as simulações numéricas.

A utilização do MEF nos mais diversos tipos de solução de problemas só foi possível com o constante desenvolvimento computacional com a evolução dos softwares utilizados para as simulações. Atualmente, são diversas as opções, entre os quais ABAQUS, COSMOS, PATRAN, NASTRAN, ALGOR, STRUDL e CAEPIPE, MARC e ALTAIR HYPERWORKS. Esses softwares contêm ferramentas que permitem a modelação e simulação de muitos fenômenos, estruturas e materiais. Divide-se o seu funcionamento em etapas ou módulos, onde se destacam aspectos como a geometria do modelo, tipos de elementos, atribuição de propriedades do material e geração da malha para definir os nós e uniões entre os elementos. Em seguida, são atribuídas as condições a que o modelo está submetido, como forças, pressões, restrições de movimento e temperatura; e por fim, é realizada uma análise dos resultados obtidos para os nós e/ou elementos e para o modelo em geral, obtendo dados por meio de tabelas e gráficos, de acordo com o tipo de geometria e as condições de carga a que um material é submetido.

2.7 Propriedades mecânicas de cafeeiros

A mecanização da colheita de café está diretamente relacionada com a diminuição dos custos de operação, além do aumento na velocidade e, conseqüentemente, na eficiência da colheita. Aspectos como a arquitetura do cafeeiro e o grau de maturação dos grãos influenciam diretamente no resultado, sendo que o fruto maduro (cereja) é o ponto ideal, ao contrário dos verdes (SILVA, Flávio *et al.*, 2010). Essa questão leva à necessidade de uma colheita seletiva, que é considerada bem executada quando o máximo de grãos maduros foi obtido, sem a

necessidade de recolheita, e com a manutenção da integridade das plantas (SOUZA *et al.*, 2005). Nesse sentido, para a obtenção de máquinas cada vez mais eficientes, o estudo e compreensão da planta em si se faz necessário, uma vez que existem diferenças nas forças exigidas para desprender um fruto verde ou um maduro (SILVA, Flávio *et al.*, 2010).

Com o avanço dos estudos via simulação computacional, é necessário fornecer à modelo os parâmetros de entrada referentes às propriedades físicas, mecânicas e geométricas do sistema de estudo. Isso é determinante no sucesso da simulação, uma vez que os fatores variam dentro do próprio sistema, por exemplo, a geometria se altera de um componente para o outro, influenciando na massa e gravidade, ou então, métodos de processamento de uma matéria-prima podem levar a falta de homogeneidade do produto, resultando em mudanças nas propriedades mecânicas dele, como no módulo de Young, razão de Poisson ou propriedades físicas como na massa específica (WU *et al.*, 2016).

Em relação ao cafeeiro, existem mudanças significativas na flexibilidade do caule com o passar dos anos, bem como em influências na força de desprendimento do grão maduro, refletindo na redução no módulo de elasticidade (FERREIRA JÚNIOR *et al.*, 2016; TINOCO; PEÑA, 2018; VILLIBOR *et al.*, 2019). Carvalho *et al.* (2016) obtiveram, experimentalmente, a razão de Poisson, o módulo de Young e a massa específica de um cafeeiro para usar como *input* e gerar um modelo de elementos finitos. Apesar de utilizar de aproximações nas propriedades mecânicas do material, considerando-o um material linear, homogêneo e isotrópico, o modelo foi suficiente para prever deslocamentos em ramos específicos, como esperado.

Em Ciro (2001), foram estudadas as propriedades físicas, geométricas e mecânicas de sistemas fruto-galho nos estágios de maturação de cereja vermelha, meio maduras e verdes para determinar as frequências naturais de vibração nessas três condições. Para isso, foram obtidos modelos teóricos de diferentes graus de liberdade e concluiu-se que as frequências naturais são dependentes das propriedades físico-mecânicas do sistema, sendo que elas diminuem conforme o grau de maturidade da fruta aumenta.

Apesar de que estudos envolvendo propriedades mecânicas de plantas e frutos possam fornecer informações a respeito da estabilidade e resistência da planta, é interessante também compreender a resposta dinâmica dela sob a ação de forças externas, por exemplo, as vibrações causadas por máquinas ou então os ventos aos quais estão sujeitas. Para tal, o estudo das vibrações naturais das plantas pela análise modal é bastante utilizado, como já iniciados experimentalmente, por Ferreira Júnior *et al* (2020). Nesse trabalho, foram instrumentados cultivares de café para entender a interação das colhedoras com o cafeeiro, em termos de

frequência, amplitude e vibração. Os parâmetros de regulação da colhedora foram alterados, e realizou-se a aquisição de dados da resposta dinâmica da planta, concluiu-se que os fatores de regulação de freio e frequência das máquinas também influenciaram na resposta dinâmica dos ramos. Dessa forma, o avanço na compreensão das propriedades dinâmicas direciona para a evolução e idealização de equipamentos colhedores com mais eficiência.

2.8 Análise modal

Para Avitabile (2017), a análise modal é o estudo do caráter dinâmico de um sistema, que é definido independentemente das cargas aplicadas e da resposta. Cada um dos modos de um sistema tem uma certa frequência, com um amortecimento particular e, mais importante, a deformação característica que a estrutura sofrerá dada uma excitação em sua frequência natural.

Quando forças externas são aplicadas ao sistema, é possível descrevê-lo por meio de uma representação matricial, onde equações diferenciais com diversos graus de liberdade são empregadas, de acordo com o modelo apresentado na Equação 1.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

na qual, $\{F\}$ é o vetor de força, $[m]$ é a matriz de massa, $[c]$ é a matriz de amortecimento, $[k]$ é a matriz de rigidez, e $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$ e $\{\ddot{x}\}$ são os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração, respectivamente.

Nos casos de vibração livre e não amortecida, pode-se simplificar a Eq. 1, resultando na Equação 2, a qual representa a condição de vibração natural de um sistema.

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Pode-se denominar o estado de vibração natural como modos naturais ou ainda, modos de vibração e as frequências de vibração como frequências naturais do sistema. Considerando as vibrações livres como harmônicas, podem-se obter os autovalores e os autovetores reorganizando o sistema que representa o deslocamento do sistema, resultando na Equação 3.

$$\{x\} = \{\varphi\}_i e^{j\omega_i t} = \{\varphi\}_i (\cos\omega_i t + i\sin\omega_i t) \quad (3)$$

Na qual, $\{\varphi\}_i$ representa o autovetor associado a i -ésima frequência natural do sistema, ω_i corresponde a frequência angular (unidade rad.s^{-1}) e t está associado ao tempo (s).

É possível determinar as frequências naturais e os modos de vibração ao resolver o problema dos autovalores e autovetores. Isso envolve derivar a Equação 3 em relação ao tempo, e então substituir esse resultado na Equação 2, obtendo-se a Equação 4, que é um problema de autovalor (HUEBNER *et al.*, 2010).

$$(-\omega^2[m] + [k])\{\varphi\}_i = \{0\} \quad (4)$$

Essa equação apresenta uma solução não trivial somente se o determinante da matriz $(-\omega^2[m] + [k])$ for igual a zero (BOYCE; DIPRIMA, 2010; ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2005).

Assim, o φ autovetor é um vetor que descreve a forma ou o padrão das oscilações do sistema associado a um determinado autovalor. No contexto da equação objetivo da equação característica é encontrar os valores de λ que fazem com que o determinante de seja igual a zero. Esses valores são os autovalores do sistema, representando as frequências naturais de vibração e são representados pela Equação 5:

$$\det(-\omega^2[m] + [k]) = 0 \quad (5)$$

Assim, uma vez que se tenham encontrado os autovalores (os valores de ω^2) que satisfazem a condição de autovalor, possibilita determinar os autovetores, substituindo-os na equação 4. Os Autovetores são as soluções associadas e correspondem a os modos de vibração do sistema. Por fim usualmente as frequências são expressas em função de ciclos por segundo, ou Hz e sua conversão é realizada através da Equação 6:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (6)$$

Assim, $\{\phi\}_i$ é o modo de vibração correspondente ao f_i , onde formas modais são os padrões de deformação em uma certa frequência natural.

Em softwares comerciais, a análise modal é considerada um subconjunto envolvendo o MEF, que se concentra, especificamente, no comportamento das estruturas em termos de suas frequências naturais, formas de modo e razões de amortecimento. A análise modal é usada para determinar como uma estrutura vibra ou se deforma quando é submetida a forças externas, e pode ser usada para identificar as frequências e modos críticos que são mais propensos a causar falhas ou danos à estrutura (EWINS, 2001).

A obtenção dessas frequências naturais pode ser realizada experimentalmente, aplicando na estrutura uma força de frequência e magnitude conhecidas em alguns pontos. A partir dos sinais de resposta, pode-se estimar as funções de resposta em frequência (FRF). Além disso, podem-se utilizar técnicas de excitação moderna que, aliadas aos desenvolvimentos recentes da teoria da análise modal, permitem mecanismos de excitação mais elaborados. A excitação pode ser de uma banda de frequência selecionada, senoidal escalonada, transitória, aleatória ou ruído branco. Geralmente, é medido por um transdutor de força no ponto de condução, enquanto a resposta é medida por acelerômetros ou outras sondas. Ambos os sinais de excitação e resposta são alimentados em um analisador que computa os dados de FRF (SILVA, 2005). Aplicando-se algoritmos de extração de parâmetros, as características modais da estrutura são identificadas, o que é de grande importância, por exemplo, no desenvolvimento de processos de colheita mecanizada, ao se estudar um sistema fruto-galho (CARVALHO; MAGALHÃES; SANTOS, 2016; MELO; SANTOS; SCINOCCA, 2023).

O conhecimento da ação de cargas sobre um sistema pode fornecer informações a respeito do deslocamento e deformação da estrutura, por exemplo, a de um galho. Isso auxilia na determinação das direções de deformação e se elas estão nos limites aceitáveis. Entretanto, em outros casos, apenas essa análise estática do sistema não representa a resposta perante fatores dinâmicos, como vibrações causadas por colhedoras. A partir delas, pode-se identificar as frequências naturais do sistema e como ele se comporta em diferentes frequências de excitação, além de se compreender fatores como capacidade de amortecimento, atrito e resistência a fadiga, quando colocados em operação (EWINS, 2001). As análises modais estáticas e dinâmicas são comumente utilizadas nos estudos de estruturas, mas também se mostraram úteis na agricultura, como na investigação de danos mecânicos de produtos agrícolas. Quando associados ao uso de modelagem numérica, podem determinar a distribuição de estresse e tensão em frutas e vegetais, por exemplo, uma vez que é possível considerar a complexidade da geometria nesses sistemas (CHAVOSHI *et al.*, 2023).

A obtenção dos modelos geométricos tridimensionais é outra questão importante, sendo que, quanto mais realista, melhor a representação do sistema de estudo. A digitalização

tridimensional pela utilização de um scanner é uma possibilidade, pois permite a captura dos dados da superfície do sistema de estudo para a obtenção de modelos virtuais 3D (SILVA, Fábio *et al.*, 2010). Aliado a isso, o rápido desenvolvimento da modelagem por engenharia reversa tornou-se uma ferramenta poderosa em fornecer modelos precisos de produtos de formas irregulares, como é o caso de frutas, legumes, plantas e suas estruturas, para a simulação via MEF (CARVALHO; MAGALHÃES; SANTOS, 2016; ZHAO *et al.*, 2019).

Os trabalhos que exploram as propriedades modais de cafeeiros ainda são incipientes. Carvalho *et al.* (2016) focou na modelagem de um cafeeiro escaneado para análises estáticas, por simulação numérica, obtendo um modelo representativo do sistema real por engenharia reversa. Já Velloso *et al.* (2020) comparou as propriedades modais teóricas, de um modelo pré-obtido, com os resultados experimentais, auxiliando a elucidar o comportamento dinâmico da planta.

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para a obtenção dos dados de geometria, o escaneamento tridimensional foi utilizado, uma vez que possibilita a obtenção de geometrias complexas e representativas ao modelo real. Essa técnica, aliada ao MEF, mostrou-se eficiente, uma vez que foi realizada validação do método de digitalização inicial. Com isso, foi demonstrado o potencial dessa abordagem em aplicações industriais, uma vez que a tensão média simulada apresentou variação de 12,47% em relação aos resultados experimentais, e a deformação diferiu em 0,02%.

Além disso, foram obtidas as frequências naturais de vibração experimentais de 3 ramos (R1, R2 e R3) que, quando comparado com outros estudos, obtiveram resultados com desvios variando entre 29 e 76%. Estes valores elevados de porcentagem refletem na importância da obtenção de modelos geométricos fiéis à realidade, uma vez que geralmente trabalhos nesta área utilizam modelos construídos diretamente via softwares, enquanto o presente trabalho utilizou o escaneamento 3D das geometrias analisadas.

Em termos de convergência de malha, as análises foram previamente realizadas no sentido de assegurar a confiabilidade dos resultados. As dimensões dos elementos nos ramos do cafeeiro foram, 5, 1, 0,5 e 0,25 mm, optando-se pela dimensão de 0,25 mm.

Por fim, ao comparar os resultados das frequências obtidas experimentalmente e computacionalmente, houve divergências nas frequências naturais para o Ramo 1 (R1), com diferenças percentuais de -20,022%, -2,187% e -23,166% para as três primeiras frequências, respectivamente. No caso do Ramo 2 (R2), as divergências foram de 7,018%, 7,340% e -9,881%, respectivamente. E, para o Ramo 3 (R3), as divergências foram de -15,583%, -9,193% e 2,620% para as três primeiras frequências, respectivamente. Entretanto, ao analisar os testes de variância, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre os dados de frequência nas duas metodologias adotadas (simulada e experimental).

Os resultados obtidos por meio deste trabalho podem representar significativo avanço tecnológico para o desenvolvimento, aperfeiçoamento e otimização de colhedoras de café, uma vez que foi possível prever o comportamento estático e dinâmico dos ramos de um cafeeiro a partir do escaneamento tridimensional e simulações numéricas.

REFERÊNCIAS

- ALFONSI, W. M. V. Período de incubação da ferrugem do cafeeiro. **Summa Phytopathologica**, v. 45, n. 2, p. 134–140, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0100-5405/187216>
- ALVES, T. P.; ALMEIDA, A. G. S. Manufatura aditiva na fabricação de peças de reposição: uma alternativa para manutenção de equipamentos médico-hospitalares. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 4, p. 1–18, 2020.
- AVITABILE, P. *Modal Testing: A Practitioner's Guide*. 1st. ed. Chennai: Wiley, 2017.
- AYALEW, B. Effect of shade levels and rates of nitrogen fertilizer on morpho-physiological performance of different coffee cultivars (*Coffea arabica* L.). Dissertação (Mestrado em Ciência em Horticultura) - Jimma University, Jimma, 2014.
- BARBIERE, M. *et al.* Tipos de mecanização das lavouras e processamento pós-colheita do café no município de Muzambinho/MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 37º, 2011, Poços de Caldas. **Anais [310]**. Poços de Caldas: Embrapa Café, 2011.
- BATISTA, L. A. Características morfofisiológicas de cafeeiros *Coffea arabica* L. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- BOEHLER, W.; HEINZ, G.; MARBS, A. The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. **Cipa2001**, n. 1, p. 430–436, 2002.
- CARVALHO, A. C. *et al.* Panorama e importância econômica do café no mercado internacional de commodities agrícolas: uma análise espectral. **Agroecossistemas**, v. 9, n. 2, p. 223–249, 2017. Disponível em: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18542/ragros.v9i2.5003>
- CARVALHO, C. H. S. de. *Cultivares de café*. 1. ed. Brasília: Embrapa, 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.008>
- CARVALHO JÚNIOR, C. *et al.* Influência de diferentes sistemas de colheita na qualidade do café (*Coffea arabica* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 5, p. 1089–1096, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542003000500017>
- CHAVOSHI, E. *et al.* Determination of dynamic deformation behavior of Golden Delicious apple using finite element method and its validation by scanning electron microscopy. **Scientia Horticulturae**, v. 307, n. May 2022, p. 111531, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111531>
- CIRO, H. J. Coffee harvesting I: Determination of the natural frequencies of the fruit stem system in coffee trees. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 17, p. 475–479, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.6464>

COELHO, A. L. F. *et al.* Determination of geometric, physical and mechanical properties of coffee fruit-stem-branch system. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 286–292, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p286-292>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Primeiro levantamento da safra 2023 de café indica uma produção de 54,94 milhões de sacas**. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4890-primeiro-levantamento-da-safra-2023-de-cafe-indica-uma-producao-de-54-94-milhoes-de-sacas#:~:text=A primeira estimativa para a,50%2C9 milhões de sacas.>

COURANT, R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. **Bulletin of the American Mathematical Society**, v. 49, n. 1, p. 1–23, 1943.

CUNHA, D. A. *et al.* Integração e transmissão de preços no mercado internacional de café arábica. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 4, p. 515–542, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-20032010000400002>

EWINS, D. J. *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. 2nd. ed. Hertfordshire: RSP Ltda, 2001.

FERRAZ, G. A. e S. *et al.* Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 1, p. 76–89, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-011-9223-8>

FERREIRA JÚNIOR, L. G. *et al.* Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras. **Ciência Rural**, v. 46, n. 2, p. 273–278, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141679>

FERREIRA JÚNIOR, L. G. *et al.* Dynamic behavior of coffee tree branches during mechanical harvest. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, 2019, p. 105415, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105415>

FISH, J., BELYTSCHKO, J. *A first course in finite elements*. 1st ed. West Sussex: Wiley, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.5860/choice.45-3218>

GUAN, X.; LI, T.; ZHOU, F. Determination of bruise susceptibility of fresh corn to impact load by means of finite element method simulation. **Postharvest Biology and Technology**, v. 198, p. 112227, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112227>

HRENNIKOFF, A. Solution of Problems of Elasticity by the Framework Method. **Journal of Applied Mechanics**, v. 8, n. 4, p. A169–A175, 1941. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4009129>

INC., T. M. *MATLAB version: 9.13.0 (R2022b)*. Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks Inc., 2022. Disponível em: <https://www.mathworks.com>

INGLE, K. A. *Reverse engineering*. 1st. ed. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 1994.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. Producción total por países exportadores. 2020. Disponível em: [https://www.ico.org/historical/1990 onwards/PDF/1a-total-production.pdf](https://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf)

KARBACHER, S. *et al.* Processing range data for reverse engineering and virtual reality. **Proceedings of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling**, p. 314–321, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IM.2001.924467>

LI, Z. *et al.* Internal mechanical damage prediction in tomato compression using multiscale finite element models. **Journal of Food Engineering**, v. 116, n. 3, p. 639–647, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.016>

LIMA, Cristiane Brasil. **Engenharia reversa e prototipagem rápida estudos de casos engenharia reversa e prototipagem rápida estudos de casos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MCHENRY, D. A. Lattice analogy for the solution of stress problems. **Journal of the Institution of Civil Engineers**, v. 21, n. 2, p. 59–82, 1943. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/ijoti.1943.13967>

MELO, W. W. A.; SANTOS, F. L.; SCINOCCA, F. Modal analysis of the coffee fruit-peduncle-branch system coffee fruit-peduncle-branch system. **Smart Agricultural Technology**, v. 4, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100217>

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Café no Brasil e Ementário do Café**, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira>.

MORAIS, P. A. O. *et al.* A computer-assisted soil texture analysis using digitally scanned images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 174, p. 105435, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105435>

NOGUEIRA, V. S. *et al.* Estudos de colheita de café com derriçadeiras vibratórias portáteis. *In: Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras*, 3, 1975, Curitiba. **Anais[...]**. Rio de Janeiro: IBC, p. 239-242, 1975.

NORRIE, D. H. A first course in the finite element method. 4th. ed. Boston: Thomson, 1987.

OLIVEIRA, B. R. *et al.* Speed and rotation variations in gathering coffee machine. **Bioscience Journal**, v. 36, n. 1, p. 61–67, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n1a2020-42194>

OLIVEIRA, E. *et al.* Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 6, p. 827–831, 2007a. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2007000600009>

OLIVEIRA, E. *et al.* Influência da colheita mecanizada na produção cafeeira. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1466–1470, 2007b. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-84782007000500041>

- OLIVEIRA, E. *et al.* Influência da vibração das hastes e da velocidade de deslocamento da colhedora no processo de colheita mecanizada do café. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 3, p. 714–721, 2007c. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000400014>
- PAULO, J. *et al.* Viabilidade técnica e econômica de diferentes sistemas de colheita do café. **Coffee Science**, v. 11, n. 3, p. 417-426, 2016.
- PELISSER, C. *et al.* CAD/CAE/CAM aplicados ao layout, design e modelagem industrial: uma revisão. **E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial**, v. 14, n. 1, p. 63–74, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.18624/etech.v14i1.1143>
- PIEGL, L. A.; TILLER, W. Parametrization for surface fitting in reverse engineering. **Computer-Aided Design**. v. 33, p. 593–603, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(00\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00103-2)
- PUNTAMBEKAR, N. V.; JABLOKOW, A. G.; SOMMER, H. J. Unified review of 3D model generation for reverse engineering. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v. 7, n. 4, p. 259–268, 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0951-5240\(94\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0951-5240(94)90015-9)
- ROSELL, J. R. *et al.* Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 9, p. 1505–1515, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.04.008>
- SANTINATO, F. *et al.* Number of mechanical operations in the coffee harvest. **Ciência Rural**, v. 45, n. 10, p. 1809–1814, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140801>
- SANTOS, F. L. *et al.* Simulação do comportamento dinâmico do sistema fruto-pedúnculo do café empregando o método de elementos finitos. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 37, n. 1, p. 11–17, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i1.19814>
- SILVA, C. W. Modal analysis. 1st. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.
- SILVA, Flávio C. *et al.* Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiros ao longo do período de colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 468–474, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-70542010000200028>
- SILVA, Fábio P. *et al.* A digitalização tridimensional móvel e sua aplicação no design de produto. **Design e Tecnologia**, v. 1, n. 01, p. 60, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.23972/det2010iss01pp60-65>
- SILVA, F. M.; SALVADOR, N.; PÁDUA, T. de S. Café: mecanização da colheita. *In:* Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 1999, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Poços de Caldas: Embrapa Café, p. 281–329, 1999.
- SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: princípios e aplicações. 2 ed. São Paulo: Artliber, 2009.

SOUZA, C. M. A. *et al.* Desempenho de derrçadora portátil de frutos do cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 791–800, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-69162005000300026>

SOUZA, G. S. *et al.* Mechanized harvesting of conilon coffee plants using a self-propelled machine. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 140–148, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n2p140-148>

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**, v. 150, p. 476–483, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.020>

TEAM, R. C. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, 2021. Disponível em: <https://www.r-project.org/>

The Jamovi Project. Disponível em: <https://www.jamovi.org>

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>

VÁRADY, T.; MARTIN, R. R.; COX, J. Reverse engineering of geometric models - An introduction. **CAD Computer Aided Design**, v. 29, n. 4, p. 255–268, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0010-4485\(96\)00054-1](https://doi.org/10.1016/s0010-4485(96)00054-1)

VELLOSO, N. S. *et al.* Modal properties of coffee plants via numerical simulation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, p. 105552, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105552>

VERMA, A.; SAXENA, R. K. A model to determine the damage parameters for microstructure of DP590 steel using coupled finite element method and Teacher-Learner based optimization. **Materials Today: Proceedings**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.047>

VILLIBOR, G. P. *et al.* Dynamic behavior of coffee fruit-stem system using modeling of flexible bodies. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 166, 2018, p. 105009, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105009>

VINARUB, E.; KAPOOR, N. Reverse engineering “a new definition for the nineties”. *In: Robotics & Design Inc*, Dayton, 1992. **Anais [...]**. Dayton: IEEE, p. 1213–1219, 1992.

WESTLING, F.; UNDERWOOD, J.; BRYSON, M. A procedure for automated tree pruning suggestion using LiDAR scans of fruit trees. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 187, p. 106274, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106274>

WU, C. T. *et al.* The polygonal finite element method for solving heat conduction problems. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, v. 155, p. 935–947, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.07.024>

WU, J. *et al.* Dynamic computation of flexible multibody system with uncertain material properties. **Nonlinear Dynamics**, v. 85, n. 2, p. 1231–1254, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2757-6>

XIE, L. *et al.* Optimisation and finite element simulation of the chopping process for chopper sugarcane harvesting. **Biosystems Engineering**, v. 175, p. 16–26, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.08.004>

XINGMING, Z. *et al.* Measuring surface roughness of agricultural soils: Measurement error evaluation and random components separation. **Geoderma**, v. 404, p. 115393, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115393>

ZHAO, J. *et al.* FEM explicit dynamics simulation and NIR hyperspectral reflectance imaging for determination of impact bruises of *Lycium barbarum* L. **Postharvest Biology and Technology**, v. 155, p. 102–110, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.05.024>

ZHOU, L. *et al.* The enriched finite element method-virtual crack closure technique for cracked structures. **Thin-Walled Structures**, v. 187, 2022, p. 110756, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110756>

ZIENKIEWICZ, O.; TAYLOR, R.; ZHU, J. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 6. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. *The Finite Element Method, The basics*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

Modelagem e validação de um cafeeiro por elementos finitos utilizando escaneamento 3D e análise modal experimental

Artigo redigido conforme normas da revista *Computers and Electronics in Agriculture*

RESUMO

O café tem significativa importância econômica para o Brasil, que é o maior exportador mundial desse produto. O principal foco deste trabalho é a obtenção de um modelo computacional dos ramos, empregando técnicas de escaneamento e validação experimental através de análise modal para entendimento do seu comportamento em razão de suas propriedades dinâmicas e mecânicas. Para isso, as principais propriedades mecânicas dos ramos, como massa específica e módulo de elasticidade foram obtidas em laboratório e usadas como parâmetros de entrada para as simulações. Modelos geométricos foram obtidos por meio de escaneamento tridimensional e analisados via Método dos Elementos Finitos (MEF) no sentido de prever o comportamento estático e dinâmico dos ramos. A validação da metodologia empregada se deu por meio de testes experimentais de vibração e aplicação de carga estática. Resultados de frequências de vibração obtidas nos ramos apresentaram variações entre simulações e testes experimentais na ordem de 2% a 20%, sendo que a análise estatística não encontrou diferenças significativas. Os resultados demonstram indicativos importantes na predição do comportamento estático e dinâmico de ramos plagiotrópicos de um cafeeiro a partir de escaneamento tridimensional. Isto pode ser considerado um avanço tecnológico na área, uma vez que normalmente são obtidos modelos simplificados por coordenadas geométricas para a obtenção dos modelos.

Palavras-chave: escaneamento, simulação numérica, propriedade dinâmica, cultivo de café

INTRODUÇÃO

O café brasileiro é mundialmente apreciado, uma vez que a diversidade de climas, relevos, altitudes e latitudes onde os cafeeiros são cultivados favorecem a obtenção de diversos tipos de grãos, atendendo às demandas nacionais e estrangeiras, além, do favorecimento de *blends* (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2017). O país é o maior produtor e exportador, sendo que, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento, CONAB, o Brasil produziu 50,9 milhões e exportou 39,8 milhões de sacas de 60 quilos em 2022 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2023). Dada essa produção elevada, os procedimentos de colheita do grão necessitaram de aprimoramento, substituindo, na medida do possível, a mão de obra humana pela mecanizada.

Dentre as máquinas utilizadas no processo, aquelas que vibram as hastes da planta mostraram-se eficientes para produtos agrícolas, como azeitonas e nozes, sendo também empregadas na colheita do café (OLIVEIRA *et al.*, 2007; SOUZA *et al.*, 2018). Porém, dependendo do tempo de aplicação de vibração no cafeeiro, pode levar a quebras de galhos e/ou o estresse da planta com danos na sua estrutura, como é o caso da desfolha, que compromete a produção de grãos subsequentes, pois a planta utilizará das suas reservas energéticas para repor as folhas perdidas, ao invés dos frutos (OLIVEIRA *et al.*, 2007). Para a manutenção da integridade do cafeeiro, deve-se aplicar à máquina os parâmetros de vibração na frequência e no tempo suficientes para que os frutos se soltem sem ocasionar danos aos galhos (VELLOSO *et al.*, 2020).

Com o avanço na modelagem e simulação computacional, métodos numéricos têm sido empregados para o estudo de sistemas dinâmicos, como o Método dos Elementos Finitos, MEF, que já vem sendo aplicado em estudos de engenharia agrícola. Li, Andrews e Wang (2017) desenvolveram um modelo capaz de estimar a resposta de tomates às forças aplicadas e assim, determinar a influência do manejo pós colheita em danificar os frutos. O MEF é um método prático para a resolução de sistemas complexos, uma vez que simplifica o problema e reduz o número de equações pela medição dos efeitos locais de nós pontuais. Ao subdividir (discretizar) o domínio em elementos geométricos menores, a chamada malha de elementos finitos, sua solução é representada por funções contínuas nos nós de cada elemento, a qual é mensurada para representar todo o problema do domínio regional (ZULKIFLI *et al.*, 2020). Pela modelagem de plantas, como um cafeeiro, por exemplo, pode-se aplicar o MEF afim de avaliar o seu comportamento dinâmico quando vibração é aplicada durante a colheita mecanizada.

Nesse sentido, é fundamental que se estude a interação entre a planta e colhedora, como o comportamento estático e dinâmico dos galhos plagiotrópicos e ortotrópicos, visando compreender quais seriam as frequências, cargas e amplitudes necessárias para desprender o fruto de café sem danificar o cafeeiro. E esse tipo de análise modal das propriedades do sistema fruta-galho é crucial no desenvolvimento da mecanização agrícola (CARVALHO; MAGALHÃES; SANTOS, 2016). Ferreira Júnior *et al.* (2020) estudaram o deslocamento do galho do cafeeiro, em termos vibracionais, e, ao processar os sinais obtidos, foi possível estimar os deslocamentos dinâmicos realizados pelos galhos no momento da colheita.

No que diz respeito às simulações, quanto mais próximo o modelo do sistema real, mais acurada será a sua representatividade, sendo o uso da engenharia reversa uma grande aliada, por ser tratar de um processo inverso partindo do modelo físico e terminando no arquivo do tipo Computer-aided design, CAD (PUNTAMBEKAR; JABLOKOW; SOMMER, 1994). A prática de escaneamento é uma solução interessante, uma vez que a geração de modelos virtuais 3D expressa com grande acurácia a geometria de um objeto, especialmente, de elementos orgânicos, que possuem variações, inclusive, dentro de mesmas espécies (HERRÁEZ *et al.*, 2016). O uso de imagens obtidas por escaneamento vem sendo descrito para análises de textura de solos (MORAIS *et al.*, 2020), estudo de danos em frutas (TIAN *et al.*, 2017) e aplicado a estudos do cafeeiro (CARVALHO; MAGALHÃES; SANTOS, 2016).

Neste trabalho, foram extraídas experimentalmente propriedades físicas e mecânicas dos ramos, e procedeu-se à digitalização, seguida da sua reconstrução computacional e subsequente submissão a análises dinâmicas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Tal procedimento foi conduzido com o propósito de comparar as propriedades dinâmicas calculadas com aquelas obtidas experimentalmente. O objetivo primordial consistiu em contribuir para o aperfeiçoamento de modelos computacionais mais robustos, com vistas a impulsionar o desenvolvimento de máquinas agrícolas de maior precisão e eficácia.

Background teórico

Quando forças externas são aplicadas ao sistema em análise, é possível descrevê-lo por meio de uma representação matricial, onde equações diferenciais com diversos graus de liberdade são empregadas, de acordo com o modelo apresentado na Equação 1.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

na qual, $\{F\}$ é o vetor de força, $[m]$ é a matriz de massa, $[c]$ é a matriz de amortecimento, $[k]$ é a matriz de rigidez, e $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$ e $\{\ddot{x}\}$ são os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração, respectivamente.

Nos casos de vibração livre e não amortecida, pode-se simplificar a Eq. 1, resultando na Equação 2, a qual representa a condição de vibração natural de um sistema.

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Pode-se denominar o estado de vibração natural como modos naturais ou ainda, modos de vibração e as frequências de vibração como frequências naturais do sistema. Considerando as vibrações livres como harmônicas, podem-se obter os autovalores e os autovetores reorganizando o sistema que representa o deslocamento do sistema, resultando na Equação 3.

$$\{x\} = \{\varphi\}_i e^{j\omega_i t} = \{\varphi\}_i (\cos\omega_i t + i\sin\omega_i t) \quad (3)$$

Na qual, $\{\varphi\}_i$ representa o autovetor associado a i -ésima frequência natural do sistema, ω_i corresponde a frequência angular (unidade $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) e t está associado ao tempo (s).

É possível determinar as frequências naturais e os modos de vibração ao resolver o problema dos autovalores e autovetores. Isso envolve derivar a Equação 3 em relação ao tempo, e então substituir esse resultado na Equação 2, obtendo-se a Equação 4, que é um problema de autovalor (HUEBNER *et al.*, 2010).

$$(-\omega^2[m] + [k])\{\varphi\}_i = \{0\} \quad (4)$$

Essa equação apresenta uma solução não trivial somente se o determinante da matriz $(-\omega^2[m] + [k])$ for igual a zero (BOYCE; DIPRIMA, 2010; ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2005).

Assim, o φ autovetor é um vetor que descreve a forma ou o padrão das oscilações do sistema associado a um determinado autovalor. No contexto da equação objetivo da equação característica é encontrar os valores de λ que fazem com que o determinante de seja igual a

zero. Esses valores são os autovalores do sistema, representando as frequências naturais de vibração e são representados pela Equação 5:

$$\det(-\omega^2[m] + [k]) = 0 \quad (5)$$

Assim, uma vez que se tenham encontrado os autovalores (os valores de ω^2) que satisfazem a condição de autovalor, possibilita determinar os autovetores, substituindo-os na equação 4. Os Autovetores são as soluções associadas e correspondem a os modos de vibração do sistema. Por fim usualmente as frequências são expressas em função de ciclos por segundo, ou Hz e sua conversão é realizada através da Equação 6:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (6)$$

Assim, $\{\phi\}_i$ é o modo de vibração correspondente ao f_i , onde formas modais são os padrões de deformação em uma certa frequência natural.

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta e seleção do ramo

Os cafeeiros utilizados tinham doze anos de idade e quatro de repoda, pertencente à família Rubiaceae, gênero *Coffea arabica* LCatuaí-Vermelho (IAC 144), foi disponibilizado pelo Núcleo de Estudos em Cafeicultura, NECAF UFLA, e coletado em junho de 2023.

Coletaram-se três ramos do terço médio de cafeeiros aleatórios pelo processo de serragem entre o ramo ortotrópico e os plagiotrópicos. Preservaram-se o pedúnculo e o início da estrutura foliar para fidelização do escaneamento, possibilitando a remontagem do ramo e das suas folhas nas posições e ângulos originais.

A Figura 1 ilustra o fluxo de atividades e experimentos realizados.

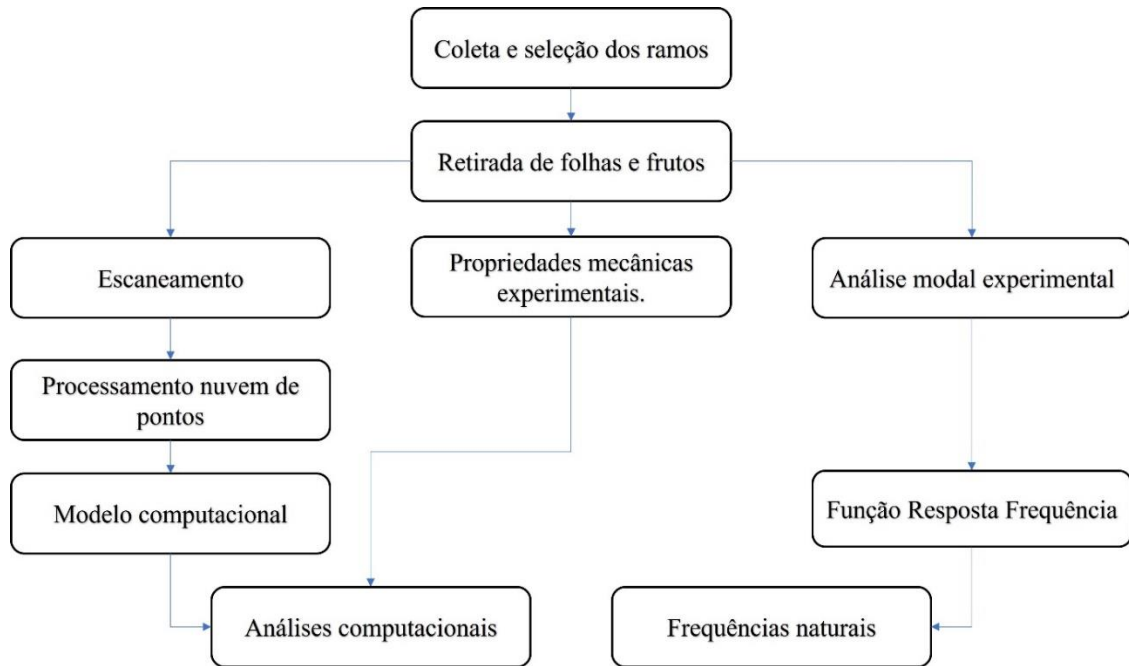


Fig. 1 - Fluxograma de atividades.

Escaneamento dos ramos plagiotrópicos

Os frutos e folhas foram removidos e a digitalização se deu conforme Figura 2. Os ramos foram fixados em uma morsa de bancada, e utilizando um braço de medição 3D portátil FARO Quantum FaroArm® Series com 7 eixos, associado a um scanner QUANTUMS SCANARM HD do tipo *plug and play* que possui uma precisão de $25\ \mu\text{m}$ e capacidade de aquisição máxima de 1,2 milhões de pontos por segundo.

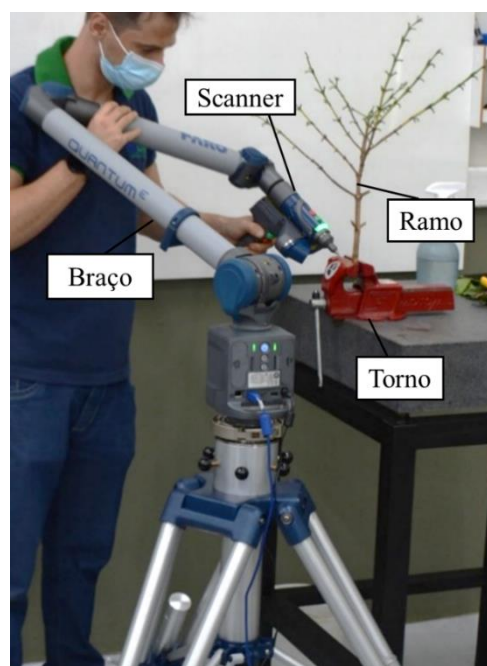


Fig. 2 - Processo de digitalização do ramo plagiotrópico do cafeeiro.

Para a digitalização, foi utilizado o software Polyworks MS 2022[®]. O arquivo gerado englobou todas as malhas digitalizadas, as quais foram tratadas posteriormente. Os escaneamentos foram salvos com diferentes números para os respectivos galhos.

Após a digitalização dos ramos, todas as malhas geradas foram retrabalhadas utilizando o software Polyworks Modeler[®], para retirada de imperfeições e lacunas oriundos do processo de digitalização. O resultado foi um arquivo de modelo de superfície do tipo poligonal conhecido como *Standard Triangle Language* (STL), conforme Figura 3.

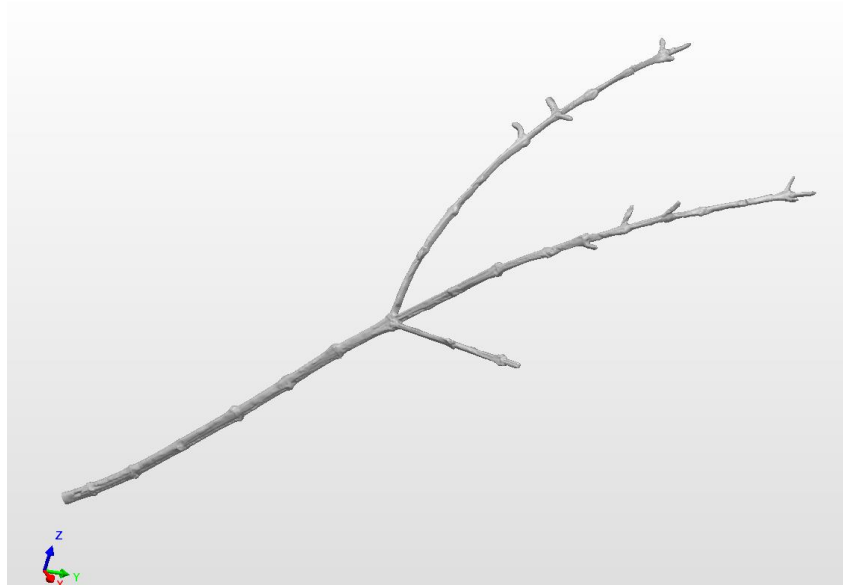


Fig. 3 - Modelo computacional obtido após a digitalização dos ramos.

Validação da metodologia de escaneamento

Para a validação da metodologia de obtenção do modelo a partir de scanner, foi utilizado um corpo de prova obtido do ramo ortotrópico. Apesar do ensaio ser do tipo não padronizado, O corpo de prova foi cortado e trabalhado até que se obtivesse um aspecto conforme apresentado na Figura 4, para garantir sua fixação no equipamento de ensaio. Em seguida, o corpo de prova foi escaneado, utilizando o software PolyWorks Inspector[®], gerando uma nuvem de pontos que, após tratamento via software PolyWorks Modeler[®], obteve-se um modelo poligonal do tipo STL, que após retrabalhado, gerou-se em arquivo CAD do tipo *Initial Graphics Exchange Specification*, ou IGES, pelo mesmo software, sendo o este utilizado para as simulações.

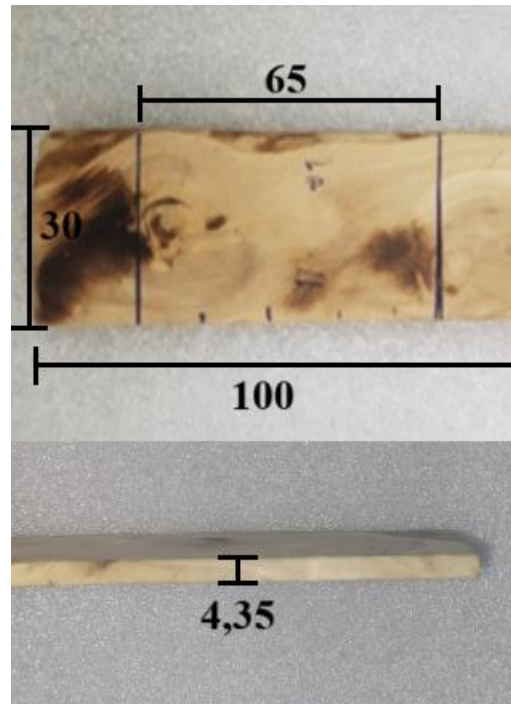


Fig. 4 - Corpo de prova utilizado na validação do escaneamento.

O corpo de prova foi submetido a um ensaio de tração utilizando a máquina de ensaios universal, modelo EMIC 23-20, fabricada pela Instron®, equipada com célula de carga máxima de 20 kN, com pré-carga de 20 N e avanço de 1 mm/min, até o rompimento. Os resultados desse ensaio foram utilizados para a identificação experimental do módulo de elasticidade e como dados de entrada para a simulação estática.

A massa específica do corpo de prova foi obtida pela relação apresentada na Equação 5. A massa foi obtida experimentalmente utilizando uma balança marca Gehaka AG200, precisão de 0,0001 g, e o volume, através do modelo poligonal no software Polyworks Modeler®.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

As propriedades físico mecânicas do material obtidas experimentalmente foram utilizadas como parâmetros de entrada para o software Ansys® versão 14.5 nas simulações estáticas de tensão e deformação.

Para as simulações no modelo do corpo de prova, foram realizados os ensaios computacionais de tração. Para tal, utilizaram-se os mesmos parâmetros do ensaio de tração experimental; onde a força final correspondeu a 4620 N, em um tempo total de 216 segundos. O coeficiente de Poisson utilizado foi determinado por Velloso *et al.* (2020), por se tratar de

corpo de prova oriundo de um ramo ortotrópico de madeira cafeeira, com o valor de 0,25. Considerou-se o corpo de prova como material isotrópico, limitado à deformação nos eixos transversais, e dos eixos rotacionais. Fixou-se a base e aplicou-se a força no topo do corpo de prova, conforme Figura 5.

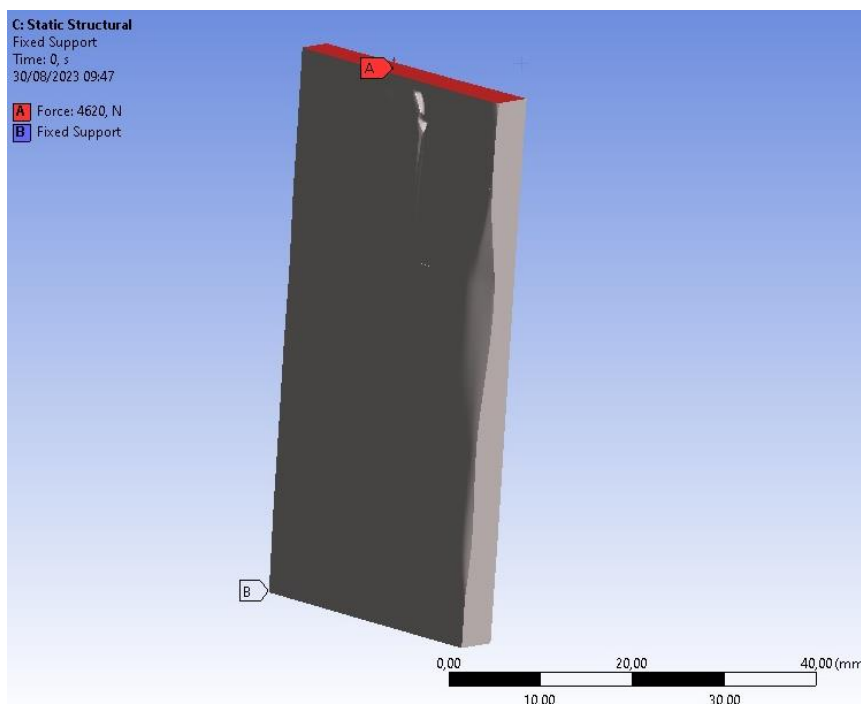


Fig. 5 - Corpo de prova submetido à força no ensaio computacional de tração.

Após a execução da simulação, procedeu-se à análise de convergência de malha com o propósito de assegurar a estabilidade numérica dos resultados e mitigar as oscilações decorrentes das características de discretização da malha.

Análise Modal Experimental

Após o escaneamento, foram realizadas as análises de vibração utilizando um martelo de impacto marca PCB Piezotronics™, modelo PCB 086C03 com sensor de força e um acelerômetro da marca PCB Piezotronics™, modelo PCB 352c33, a massa do acelerômetro representa menos de 10% da massa do sistema, conforme a Figura 6. Para coleta dos dados de aceleração advindos do acelerômetro e do martelo de impacto utilizou-se um módulo de aquisição da marca National Instruments™, modelo NI cDAQ-9174. Os resultados foram processados no software LabView®, utilizando pacote *Sound and Vibration* e MATLAB (2022) versão estudantil, para extração de parâmetros de função de resposta em frequência.



Fig. 6 - Configuração de coleta de dados. O acelerômetro está encaixado no meio do ramo e a vibração é feita com o martelo de impacto.

Na sequência, os ramos foram particionados e trabalhados para que seu perfil fosse quadrado com 4 mm de arestas, e comprimento no mínimo 5 vezes sua aresta. Os ensaios de tração foram realizados para definir o módulo de elasticidade (módulo de Young) através da lei de Hooke, um dos princípios fundamentais da mecânica dos materiais, que descreve a relação linear entre a tensão (força aplicada por unidade de área) e a deformação (variação relativa de comprimento) de um material do qual essa relação é expressa pela equação 6:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (6)$$

Onde:

σ = Tensão aplicada ao material (em pascal, Pa);

E = Módulo de elasticidade do material, também conhecido como módulo de Young (em Pa);

ε = Deformação ou alongamento relativo do material (uma medida adimensional).

A lei de Hooke é fundamental na determinação experimental do módulo de elasticidade, pois permite calcular esse parâmetro a partir de medições precisas de tensão e deformação em um material sob carga.

O ensaio foi realizado na máquina de ensaios universal, modelo EMIC 23-20, fabricada pela Instron®, equipada com célula de carga máxima de 20 kN, Figura 7a. Este equipamento trabalha em conjunto com o software BLUEHILL. Na máquina, os ramos foram posicionados paralelos às fibras, fixadas por garras nas extremidades e submetidas a carregamento na região central, conforme apresentado na Figura 7b.

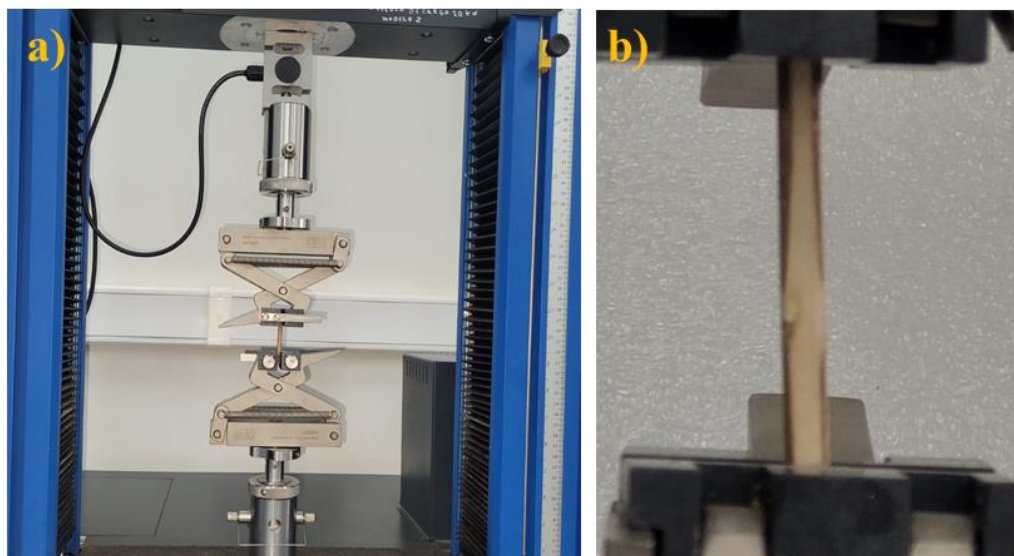


Fig. 7 - a) Máquina de ensaios universal e ramo posicionado e b) ramo sob tração.

Foram aplicadas pré-carga de 20 N para tensionamento e posicionamento garantindo que as folgas de garra e o corpo-de-prova estejam bem ajustados, a uma taxa de deslocamento de 10mm/min com duração de tempo correspondente à saída da linearidade, após ruptura do corpo de prova.

A massa específica da madeira foi obtida pelo método de imersão de Arquimedes, também com os pedaços dos ramos.

Modelagem, análise de convergência e simulação

Para o processamento da análise dinâmica do modelo foi utilizado o programa Ansys versão 14.5. Foram inseridas as propriedades mecânicas experimentais do material e o coeficiente de Poisson da literatura de 0,09 (VELLOSO *et al.*, 2020). Com isso, realizou-se a simulação extraindo os modos de vibração e suas respectivas frequências.

A convergência da malha foi obtida pelo seu refinamento, baseado no percentual de diferença em relação ao resultado da malha anterior.

Validação do método de escaneamento

O corpo de prova do material, recolhido de um ramo ortotrópico de um cafeeiro, foi submetido a um teste de tração experimental. Os dados experimentais, incluindo a carga aplicada e a deformação resultante, foram cuidadosamente registrados e tratados para estabelecer as propriedades físicas do material. Um modelo numérico tridimensional do mesmo corpo de prova foi criado utilizando escaneamento 3D, técnicas de correção de malha e, também, as propriedades mecânicas do material. As condições de carregamento e restrições foram replicadas conforme o teste experimental.

Como parâmetros da simulação, foram utilizados os dados de força e tempo, obtidos pela máquina de ensaio universal, conforme montagem apresentada na Figura 8, e os resultados de tensão e deslocamento foram comparados.



Fig. 8 - Corpo de prova submetido a análise de tração na máquina universal. O QR code direciona para o vídeo do corpo de prova sofrendo tração até o seu rompimento.

Considerando o material isotrópico, o carregamento e as restrições empregadas no teste experimental foram então reproduzidos no modelo numérico, visando à recriação virtual das condições reais. O coeficiente de Poisson utilizado na simulação foi o encontrado na literatura, disponibilizado por Velloso *et al.* (2020) definido em 0,25 para ramos ortotrópicos e 0,09 para ramos Plagiotrópicos. O corpo de prova em questão apresentou uma massa específica de 780

kg/m³. O teste de tração realizado revelou uma tensão máxima de 37,642 MPa e um deslocamento máximo de 4,755 mm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Validação do processo de escaneamento tridimensional

O módulo de elasticidade foi determinado a partir da reta de inclinação secante à curva (tracejada em vermelho), que relaciona a tensão em função da deformação específica, Figura 9a. Essa reta foi definida com base nos pontos situados a 10 e 50% da resistência à tração, paralela às fibras, seguindo as diretrizes prescritas pela norma técnica 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de 1997 (NBR 7190: PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1997). A realização do ensaio de tração permitiu a inferência do módulo de elasticidade do material, sendo sua estimativa calculada em 447,89 MPa.

Na análise das propriedades mecânicas, tanto as simulações numéricas quanto os testes experimentais, identificaram um comportamento elástico-linear. onde o gráfico de tensão versus deformação pode ser considerado linear, com R^2 de 0,99713, como mostrado na Figura 9b.

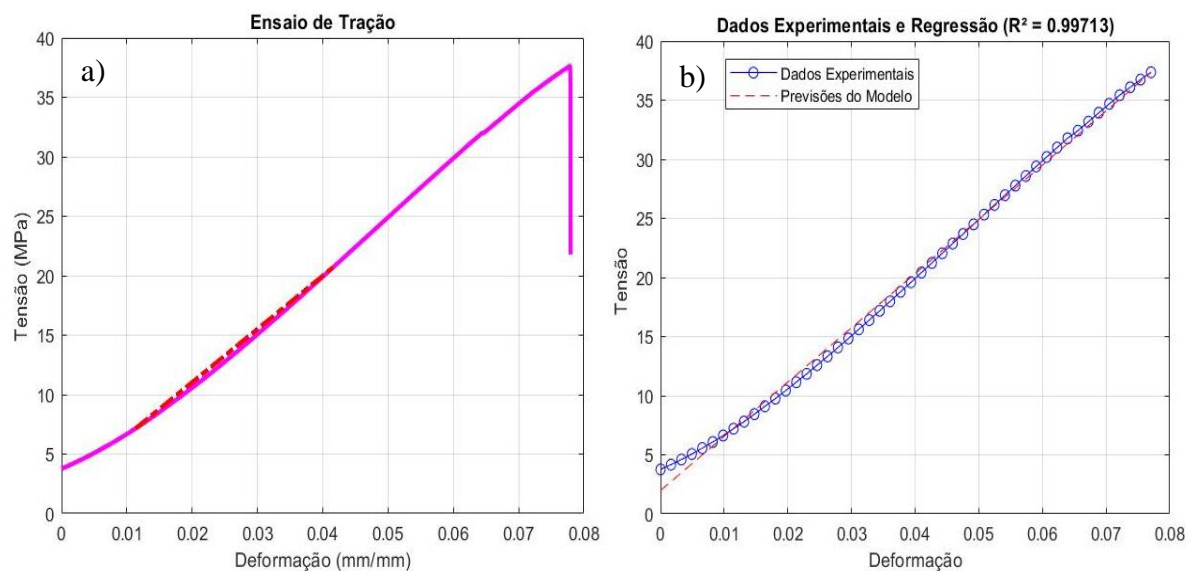


Fig. 9 - a) Ensaio de tração (rosa) e secante (vermelho) e b) Dados experimentais e regressão.

Quanto a simulação computacional, considerando como entrada dos dados, aqueles encontrados experimentalmente, obtiveram-se tensão média de 43,006 Mpa, com tensão máxima de 144,94 Mpa e deslocamento máximo de 4,7425 mm.

A malha utilizada nas simulações computacionais de validação do corpo de prova está apresentada na Figura 10.

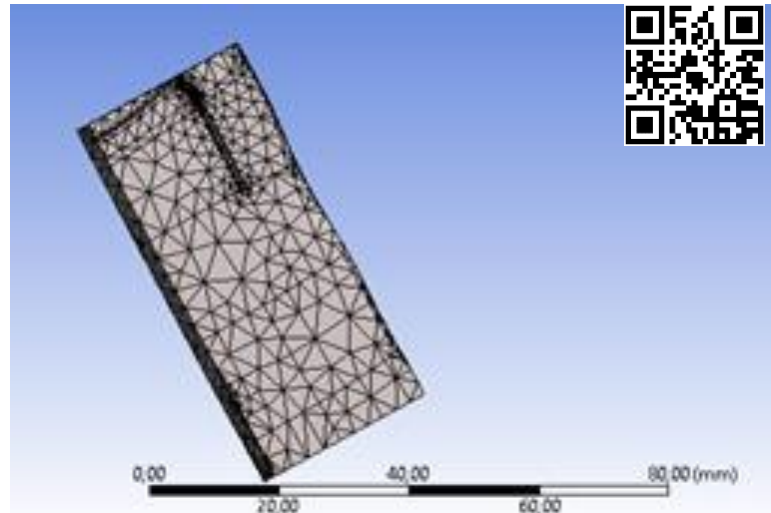


Fig. 10 - Malha utilizada nas simulações computacionais da validação do corpo de prova. O QRcode direciona para o link do vídeo da simulação realizada.

Considerando a tensão equivalente, os resultados convergiram a partir de 113.347 elementos, apresentando o coeficiente de determinação de 98,2%, conforme Figura 11.

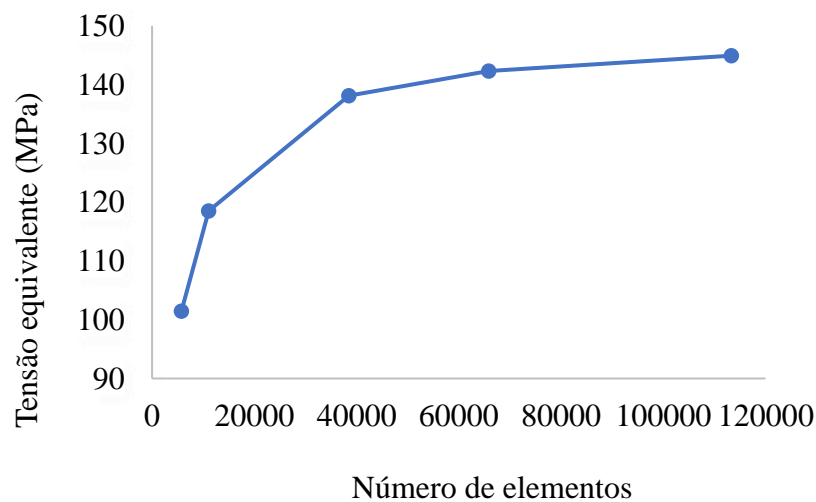


Fig. 11 - Convergência da malha obtida para o corpo de prova.

Com isso, pode-se concluir que a malha converge para um resultado satisfatório, mostrando uma tensão média com variação de 12,47% do resultado experimental, e apenas 0,02% na deformação.

A simulação foi executada em um notebook Dell G15 5111, com processador 11th Geração Intel(R) Core (TM) i5-11400H com frequência de 2.70GHz, 24 Gb de memória ram,

com frequência de 3200 Mhz, e placa de vídeo Nvidia RTX 3050. A simulação estática utilizou 0.77GB de memória ram, com uso de 2.8 Gb do disco, e completando a simulação em 03 minutos e 51 segundos.

Um modelo simplificado foi testado para aferir o custo computacional do modelo escaneado, o qual este apenas se difere por ser um modelo planificado, utilizando de modelagem para retirada das imperfeições, como nós da madeira, inserções e outros defeitos do material. Nesse, a utilização de memória ram foi de 0.34 Gb, e o espaço de disco utilizado foi 0.7 gb, com tempo de finalização de 1 minuto e 10 segundos.

Assim, fica claro que a adição das características do material impacta diretamente no custo computacional, onde a utilização de memória foi 57,34% superior, e o espaço em disco utilizado foi de 72,50% superior ao modelo simplificado, contudo, um modelo simplificado não foi capaz de demonstrar o resultado satisfatório, como o modelo baseado no escaneamento, utilizando como parâmetros os dados dos resultados experimentais.

A variação de tensão pode ser atribuída ao processo de escaneamento, que revela as imperfeições presentes no material. Essas imperfeições resultam em pontos de concentração de tensão. Esse efeito pode ser observado tanto no modelo experimental (Fig. 12b), como no modelo simulado (Figura 12a). O local do colapso do corpo de prova experimental (Fig. 12c) foi o mesmo que apresentou a máxima tensão (Fig. 12d).

Propriedades físicas e mecânicas dos ramos utilizados nas simulações

Os dados de massa específica dos ramos e o estudo estatístico estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Massa específica e estatística dos ramos.

Ramos	Média	Valor Mínimo	Valor Máximo	Coefficiente de Variação (%)
1	795,31	750	840	5,14
2	896,33	695	1.340	31,40
3	722,67	533,33	940	24,79

A massa específica média obtida por Velloso *et al.* (2020) para os ramos plagiotrópicos apresentou valor médio de 1036,33 kg/m³, A fim de compreender a amplitude na qual a média populacional genuína poderia residir, aplicou-se um intervalo de confiança com um nível de confiança de 95%. Conseqüentemente, os cálculos delinearam um intervalo estimado entre 840,88 e 1.237,78 kg/m³, intervalo que compreende basicamente todos os dados encontrados, enquanto Coelho *et al.* (2015) também conduziram um estudo de propriedades, sendo que a

métrica observada apresentou valor médio de massa específica de 900 kg/m^3 e desvio padrão de 110 kg/m^3 , e delinearam um intervalo estimado entre $681,4$ e $1.118,6 \text{ kg/m}^3$, para a verdadeira média, o que também compreende a maior parte dos dados encontrados neste presente estudo.

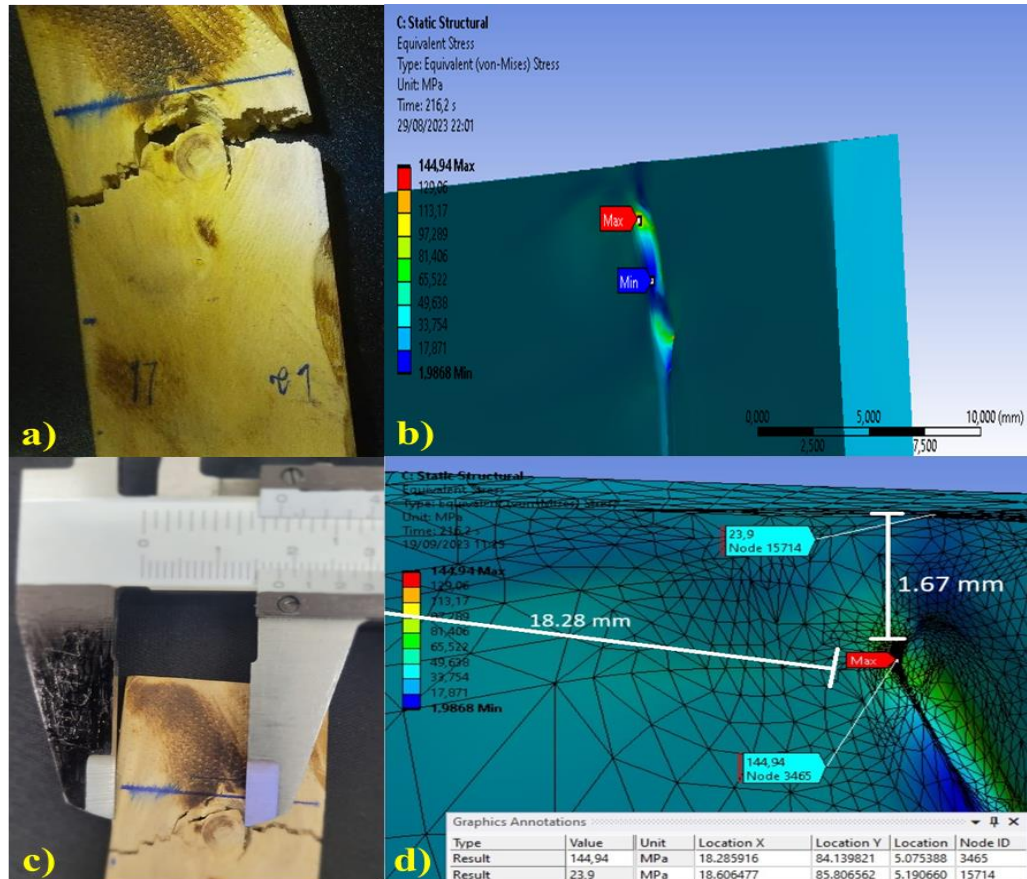


Fig. 12 – Falhas do modelo a) experimental e b) da simulação. O local do colapso foi o mesmo para o corpo de prova (c) e para o modelo (d).

O módulo de elasticidade encontrado foi $655,52 \text{ MPa}$ para o R1, $600,63 \text{ MPa}$ para o R2 e $580,40 \text{ MPa}$ para o R3, e em comparação a outros estudos, como em Velloso *et al.* (2020) a média do módulo de elasticidade obtida para estes ramos plagiotrópicos se apresentou com $507,72 \text{ MPa}$, enquanto Carvalho *et al.* (2016) apresentou o valor de $2041,5 \text{ MPa} \pm 326,1$, entretanto neste, não houve diferenciação entre ramos ortotrópicos e plagiotrópicos, e a amostra se fez do ramo ortotrópico da planta, com ensaio de compressão, o que pode explicar a grande variação do resultado para o presente estudo.

Devido à inerente complexidade na determinação precisa do coeficiente de Poisson, foi utilizado um valor previamente documentado na literatura científica, conforme relatado por Velloso *et al.* (2020), que estabeleceram o valor de $0,09$ para os ramos. A escolha em adotar

um valor pré-existente da literatura é devido à complexidade na obtenção direta do coeficiente de Poisson de um material ou componente específico, além de exigir recursos financeiros significativos, o que inviabilizou tal procedimento. Além disso, valores de coeficiente de Poisson podem variar dependendo das condições de teste e das características do material, tornando a estimativa baseada em literatura, uma alternativa prática.

Para efetuar a validação de convergência de malha do modelo, as malhas em questão foram submetidas a análises na terceira frequência natural. Esse procedimento foi adotado com a finalidade de determinar a convergência dos resultados em relação aos dados obtidos por meio de simulações numéricas. Um processo iterativo foi implementado, consistindo na comparação sucessiva dos resultados obtidos em cada iteração, com o intuito de alcançar uma convergência satisfatória. Isso atesta a confiabilidade dos resultados, garantindo que eles estejam em consonância com os parâmetros de interesse.

Modelagem, análise de convergência e simulação dos ramos

Modelagem tridimensional dos ramos

A modelagem dos três ramos foi executada com auxílio de equipamento Faro arm, e o processamento do escaneamento pelos softwares Polyworks inspector e Polyworks Modeler, do qual gerou arquivos do tipo STL, com alta representatividade frente ao modelo real. Os dados dos modelos estão apresentados por ramo, conforme Figuras 13 a 15 e Tabelas 2 a 4, e apresenta o número de pontos coletados em cada modelo no escaneamento e os dados estatísticos de desvios com tolerância máxima de 0,5 mm após o processamento para conversão em modelo IGES.

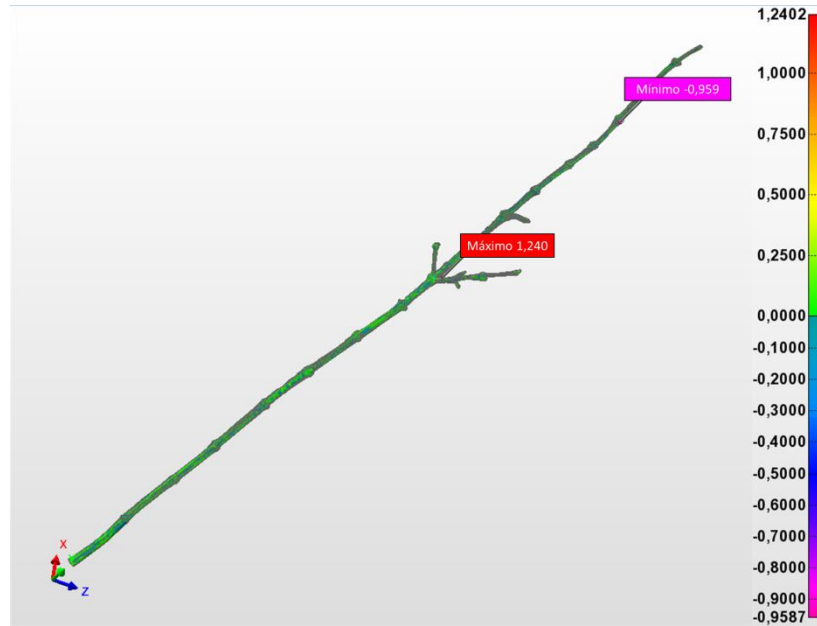


Fig. 13 - Mapa de cores de desvio do R1.

Tabela 2 - Dados estatísticos do modelo de R1.

Nº de pontos	363.288
Desvio médio	0,022 mm
Desvio padrão	0,064 mm
Superfície fora de tolerância	0,265%

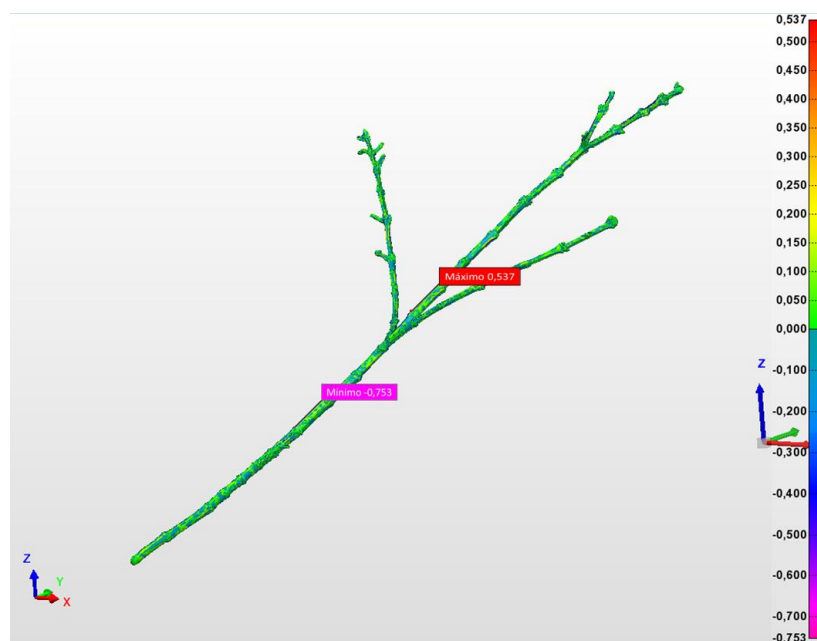


Fig. 14 - Mapa de cores de desvio do R2.

Tabela 3 - Dados estatísticos do modelo de R2.

Nº de pontos	386.746
Desvio médio	0,006 mm
Desvio padrão	0,061 mm
Superfície fora de tolerância	0,004%

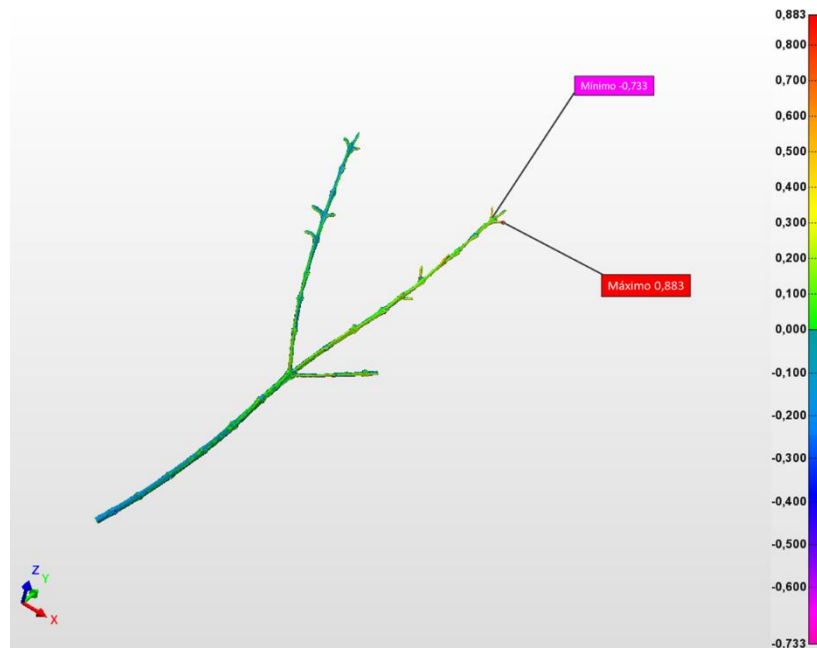


Fig. 15 -Mapa de cores de desvio do R3.

Tabela 4 - Dados estatísticos do modelo de R3.

Nº de pontos	212.432
Desvio médio	0,086 mm
Desvio padrão	0,147 mm
Superfície fora de tolerância	0,708%

Análise de convergência de malha dos ramos

No exemplar R1, quando utilizados elementos com dimensão de 5 mm, observou-se uma frequência natural de vibração de 25,953 Hz, empregando uma malha composta por 2.472 elementos. No entanto, ao realizar um refinamento com elementos de 1 mm, a frequência diminuiu para 24,414 Hz, resultando em uma diminuição de 2,16%. É importante destacar que esse refinamento foi realizado a partir de um aumento significativo no tamanho da malha, que cresceu em mais de 420%. Já para elementos com dimensões iguais a 0,5 mm, obteve-se uma frequência de 25,396 Hz, com diminuição de 0,073%, em relação à anterior. Entretanto, essa melhoria na resolução veio acompanhada de um aumento substancial na massa específica da

malha, que aumentou em 424,90%. Um refinamento adicional para elementos de 0,25 mm resultou em uma frequência de 24,38 Hz, com diminuição de 0,020%, porém, a massa específica da malha aumentou consideravelmente, atingindo um incremento de 420,34%. O mesmo procedimento foi adotado para os ramos R2 e R3. Os aspectos de convergência dos ramos R1, R2 e R3 estão apresentados nas Tabelas 5, 7 e 9 e nas Figuras 16 a 18.

O custo computacional fica evidente conforme Tabelas 6, 8 e 10, evidenciando o aumento significativo com o refinamento de malha:

a) ramo R1

Tabela 5 - Dados de convergência de malha de R1.

Tamanho dos elementos de malha (mm)	Número de elementos de malha	3º modo de vibração (Hz)	Coefficiente de variação (%)
5	2.472	24,953	
1	129.449	24,414	2,16
0,5	679.582	24,396	0,073
0,25	3.536.191	24,390	0,024

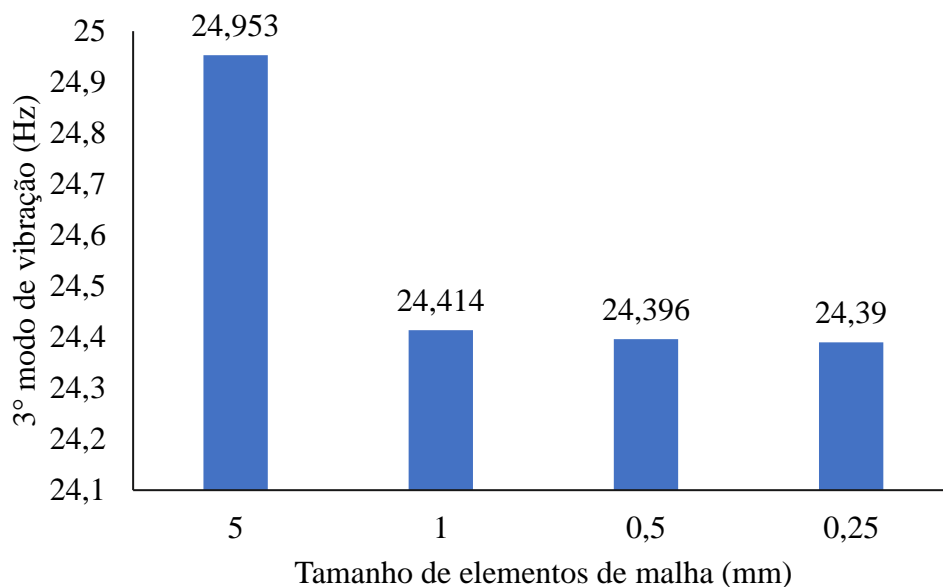


Fig. 16 - Convergência de R1 de acordo com o tamanho dos elementos.

Tabela 6 - Custo computacional R1.

Tamanho dos elementos de malha (mm)	Número de elementos de malha	Memória utilizada (Gb)	Disco utilizado (Gb)	Tempo
5	2.472	0,16	0	00:04
1	129.449	7.25	0.9	00:26
0,5	679.582	4.27	5.8	05:00
0,25	3.536.191	17.73	37.7	35:40

b) ramo R2

Tabela 7 - Dados de convergência de malha de R2.

Tamanho dos elementos de malha (mm)	Número de elementos de malha	3º modo de vibração (Hz)	Coefficiente de variação (%)
5	13.838	9,9884	
1	194.101	10,112	1,23%
0,5	1.780.485	10,1	0,11%
0,25	5.224.086	10,111	0,10%

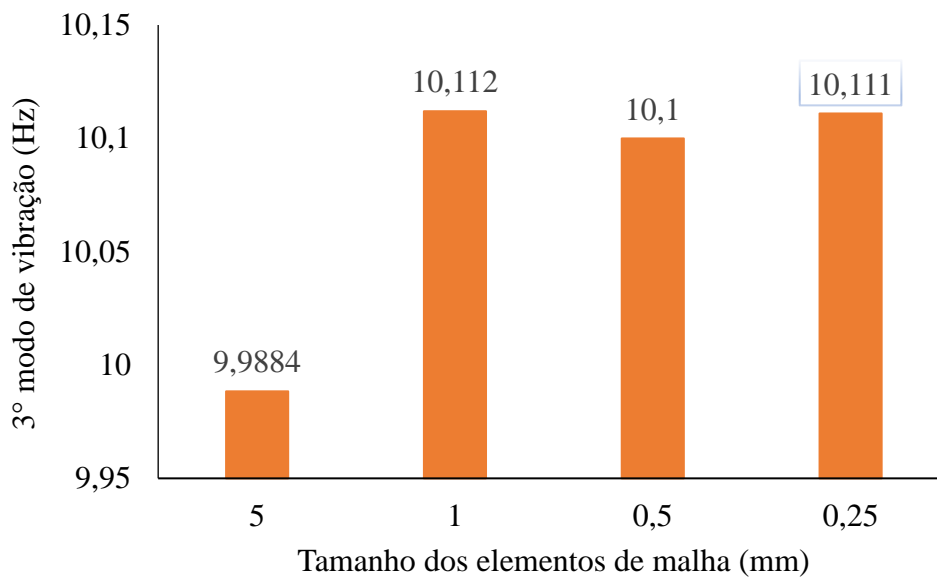


Fig. 17 - Convergência de R2 de acordo com o tamanho dos elementos.

Tabela 8 - Custo computacional R2.

Tamanho dos elementos de malha (mm)	Número de elementos de malha	Memória utilizada (Gb)	Disco utilizado (Gb)	Tempo
5	13.838	0,16	0	00:04
1	194.101	2,16	6.5	01:40
0,5	1.780.485	12.98	19.5	40:28
0,25	5.224.086	26.36	47.5	29:55

c) ramo R3

Tabela 9 - Dados de convergência de malha de R3.

Tamanho dos elementos de malha (mm)	Número de elementos de malha	3º modo de vibração (Hz)	Coefficiente de variação (%)
5	7.989	15,405	
1	148.244	15,353	0,33%
0,5	800.462	15,363	0,060%
0,25	3.345.365	15,444	0,52%

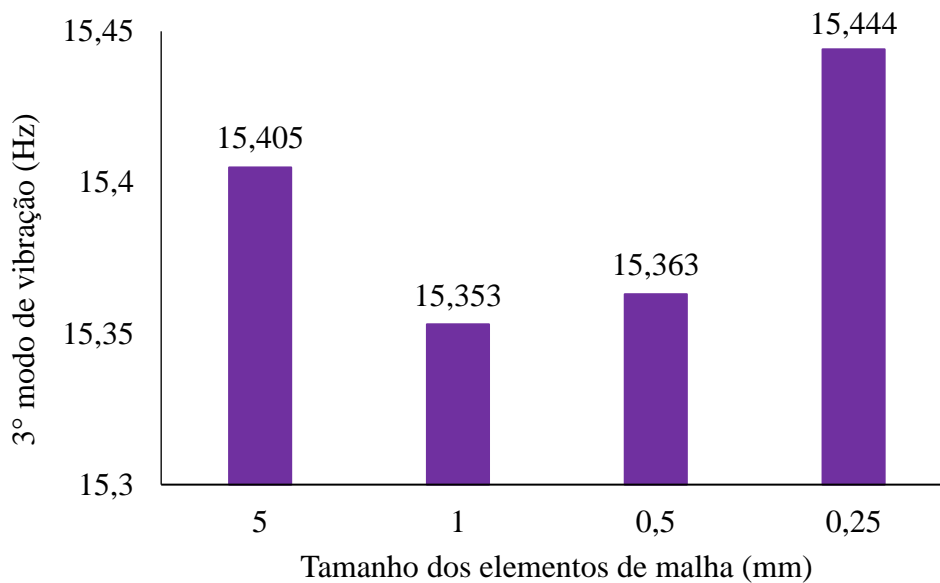


Fig. 18 - Convergência de R3 de acordo com o tamanho dos elementos.

Tabela 10 - Custo computacional R3.

Tamanho dos elementos de malha (mm)	Número de elementos de malha	Memória utilizada (Gb)	Disco utilizado (Gb)	Tempo
5	7.989	0,43	0,1	00:03
1	148.244	8,26	1,0	00:26
0,5	800.462	4,67	6,4	04:49
0,25	3.345.365	19,94	28,1	26:58

Os resultados de convergência de malha dos ramos atestam a necessidade de um equilíbrio entre resolução e eficiência computacional ao realizar refinamentos de malha em simulações com o MEF. Contudo, é possível notar que todos os resultados convergem, sem discrepâncias significativas, especialmente devido à considerável variabilidade da geometria, e, que as respostas convergem satisfatoriamente, com coeficientes de variação baixos.

Análise Modal Experimental dos ramos

A partir da análise das Funções de Resposta em Frequência, FRF, foram determinadas as frequências naturais do sistema, para o primeiro ramo (R1), Figura 19. Os dados obtidos da FRF passaram por um pré-processamento, pela conversão da magnitude para a escala de decibéis (dB) e a aplicação de um filtro passa-alta, para destacar as frequências com amplitudes mais elevadas, enquanto atenuava as frequências cuja amplitude estava abaixo do limiar de 5 dB.



Fig. 19 -Primeiro ramo plagiométrico, R1.

Os dados processados foram então representados graficamente, conforme Figura 20, desconsiderando os dados com coerência inferior a 80%, e os picos representativos foram identificados utilizando o software MATLAB®. Entretanto, observou-se uma irregularidade na curva da FRF após o terceiro pico, com a ausência de picos proeminentes. Nesse contexto, optou-se pela seleção das três primeiras frequências naturais, correspondentes aos três picos iniciais identificados.

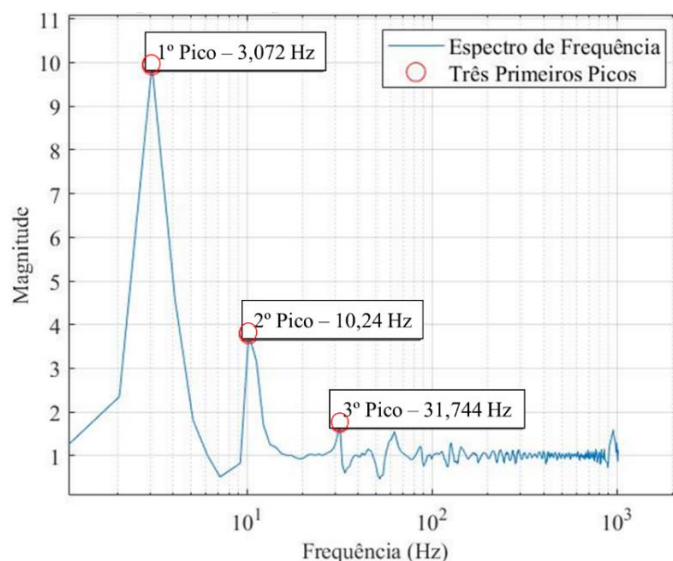


Fig. 20 - Espectro de FRF com filtro passa-alta (5 dB) para R1.

No que se refere ao segundo ramo (R2), a geometria divergiu da geometria do R1, e, conseqüentemente, em diferenças nas suas frequências naturais. Notavelmente, o R2 apresentou dois ramos plagiotrópicos de segunda ordem, conforme Figura 21.



Fig. 21 - Segundo ramo plagiotrópico, R2.

Também se observou uma irregularidade na curva a partir também do terceiro pico como mostrado no gráfico da Figura 22.

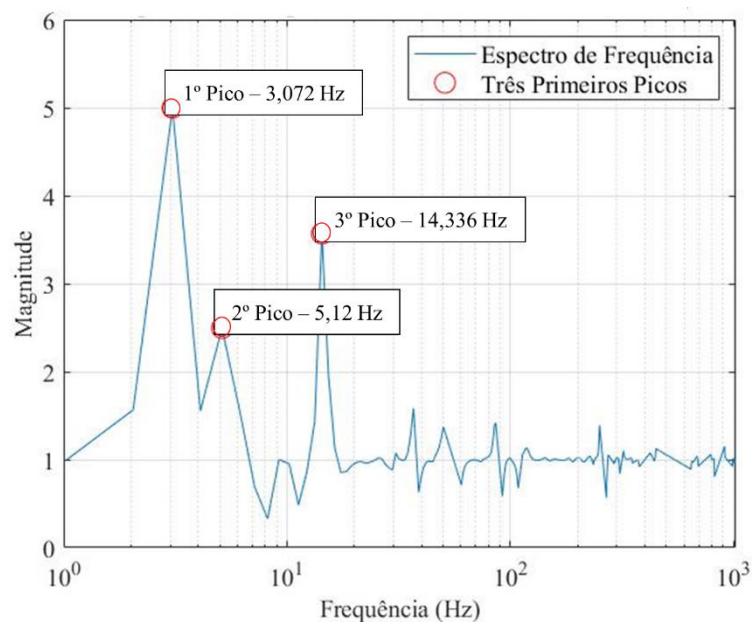


Fig. 22 - Espectro de FRF com filtro passa-alta (5 dB) para R2.

O ramo 3 (R3) também possuía dois ramos plagiotrópicos de segunda ordem, onde um havia sofrido uma fratura antes da sua retirada do cafeeiro, e a resposta obtida das FRF estão apresentadas nas Figuras 23 e 24, respectivamente.



Fig. 23 - Terceiro ramo plagiotrópico, R3.

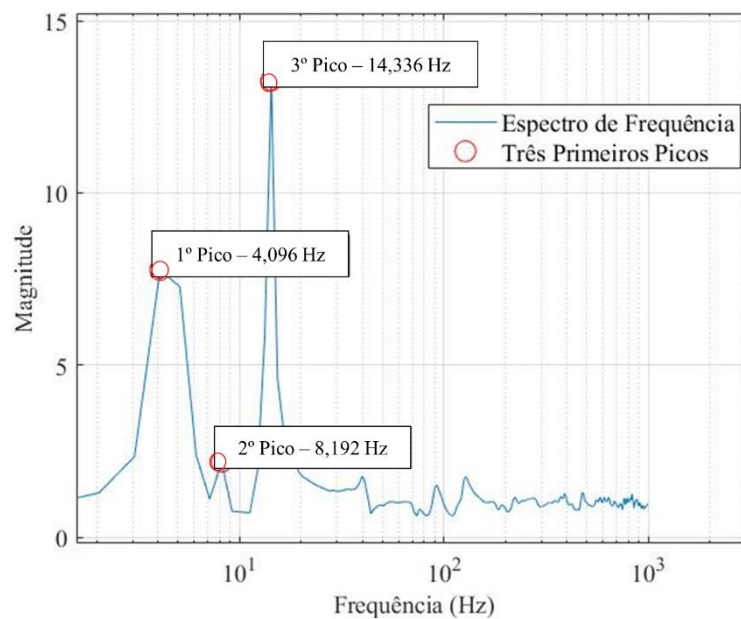


Fig. 24 - Espectro de FRF com filtro passa-alta (5 dB) para R3.

O processo de aquisição das FRF envolveu a aplicação de impactos na parte central do ramo de interesse, seguindo um critério de aceitação/rejeição com base na coerência obtida, a partir de 10 impactos efetivos. A coerência é uma métrica que quantifica a relação entre a potência do sinal de resposta e a potência do sinal de entrada. Em essência, ela pode ser comparada ao coeficiente de correlação, porém aplicado no domínio da frequência, e serviu como uma medida da presença de ruído nos sinais adquiridos.

Vale ressaltar que, devido à utilização de apenas um acelerômetro durante o processo de aquisição, os dados obtidos estão relacionados às frequências no eixo vertical. Essa abordagem permite avaliar a resposta do sistema em relação às excitações em frequências específicas, contribuindo para a caracterização das propriedades dinâmicas dos ramos em questão.

Melo, Santos e Scinocca (2023) determinaram as frequências utilizando a metodologia de obtenção de dados similar, para o qual obteve, nos três primeiros modos para os ramos médios, as frequências naturais de 6,40 Hz, 21,63 Hz e 44,93 Hz. As diferenças relativas entre

as frequências obtidas para os três primeiros modos de vibração estão apresentadas na Tabela 11, e a diferença entre as frequências naturais pode ser explicada pela obtenção da geometria dos ramos. Enquanto Melo, Santos e Scinocca (2023) utilizou modelos obtidos de imagens por coordenadas, este trabalho obteve as imagens pelo escaneamento.

Tabela 11 - Percentual de diferença das frequências naturais obtidas entre os dados obtidos por Santos e Scinocca (2023) e o presente trabalho.

	Santos e Scinocca (2023)	R1	R2	R3
1º modo	6,40	3,072 - 52%	3,072 - 52%	4,096 - 36%
2º modo	21,63	10,240 - 52%	5,120 - 76%	8,192 - 62%
3º modo	44,93	31,744 - 29%	14,336 - 68%	14,336 - 68%

Simulações computacionais dos ramos

No caso do ramo R1 (Figura 25), a primeira frequência natural apresentou diferença percentual negativa de -20,022%, a segunda frequência de -2,19%, e a terceira frequência, de -23,17%, em relação aos valores obtidos experimentalmente.

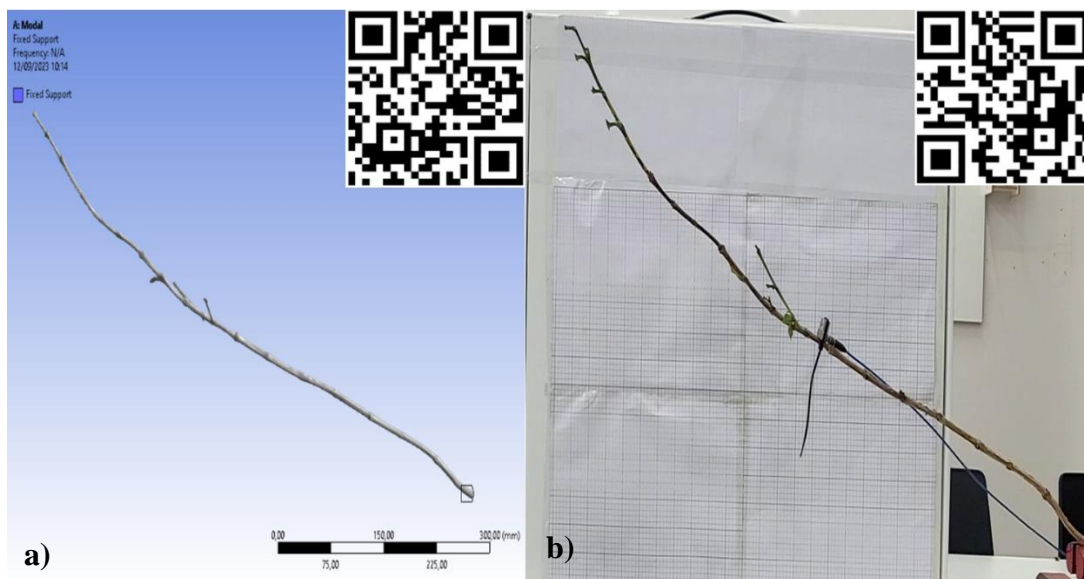


Fig. 25 - Análise de vibração do R1 a) simulação b) experimental. Os QRcodes direcionam para links de vídeos da simulação e ensaios experimentais no ramo R1.

As análises do ramo R2 (Figura 26). A primeira frequência natural apresentou diferença percentual positiva de 7,018%, a segunda frequência de 7,34%, e a terceira frequência de -9,88%, em comparação com os resultados experimentais.

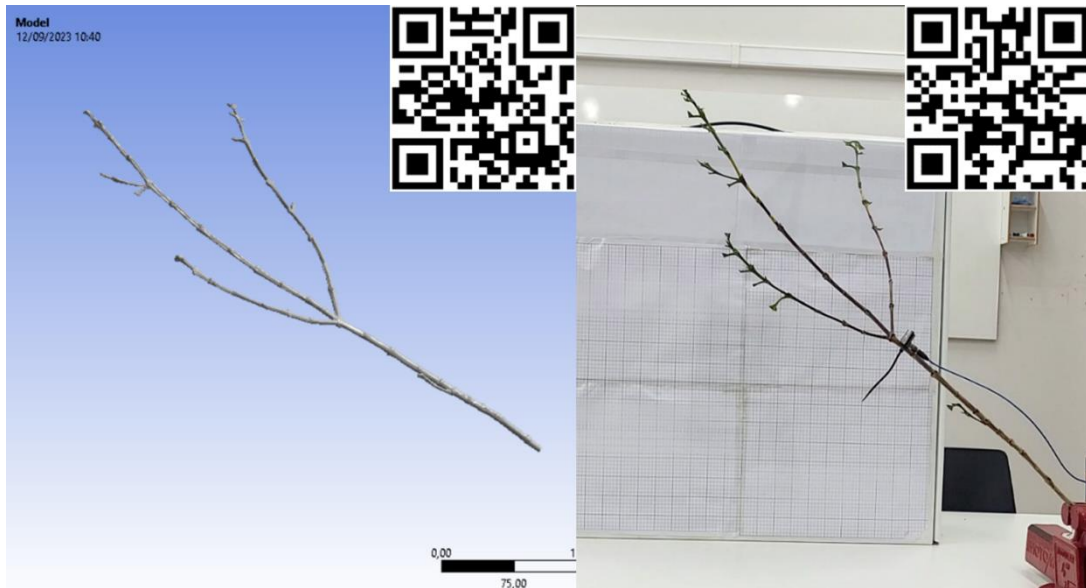


Fig. 26 - Análise de vibração dos ramos R2a) simulação b) experimental. Os QRcodes direcionam para links de vídeos da simulação e ensaios experimentais no ramo R2.

Já em relação ao ramo R3 (Figura 27), a primeira frequência natural apresentou diferença percentual de -15,58%, a segunda frequência de -9,19%, e a terceira frequência de 2,62%, em relação aos valores experimentais.

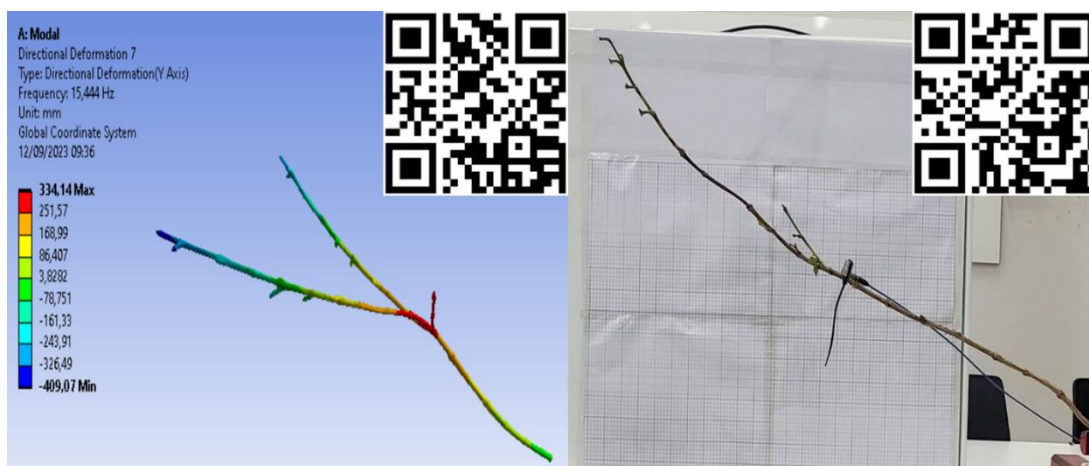


Fig. 27 - Análise de vibração do R3a) simulação b) experimental. Os QRcodes direcionam para links de vídeos da simulação e ensaios experimentais no ramo R3.

Os resultados das frequências experimentais (exp.) em comparação com os resultados computacionais (comp.) dos ramos estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Comparação das frequências naturais em Hz dos resultados experimentais e simulados para R1, R2 e R3.

Frequência natural	R1 -Comp.	R1 – Exp.	R2 -Comp.	R2 – Exp.	R3 -Comp.	R3 – Exp.
w1	2,4569	3,072	3,2876	3,072	3,4577	4,096
w2	10,016	10,24	5,4959	5,12	8,3464	9,192
w3	24,39	31,744	14,336	15,908	14,713	14,336

Em estudos conduzidos por Santos e Scinocca (2023), as frequências naturais para os ramos sem folhas e sem frutos foram definidas conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Frequências naturais obtidas por Santos e Scinocca (2023).

Posição na planta	Frequência natural média (Hz)		
	ω_{n1}	ω_{n2}	ω_{n3}
Superior	6,45	20,48	43,73
Médio	4,92	15,98	36,15
Inferior	5,72	18,12	48,13

Melo, Santos e Scinocca (2021) consideraram uma única geometria, da qual os dados de propriedades mecânicas foram alterados e novamente simulados. Esse fato explica como os resultados de frequências naturais divergiram em relação aos dados do presente estudo. A frequência natural pode ser também influenciada pela rigidez e massa da geometria, uma vez que a rigidez é diretamente proporcional e a massa inversamente proporcional às frequências naturais. Com isso, é possível compreender que, para o ramo R1, por exemplo, no qual todos os resultados foram inferiores ao experimental, poderia se diminuir a massa, aproximando-se as frequências obtidas via simulação dos dados experimentais. O ajuste de módulo de rigidez também seria uma opção, que poderia ser um pouco menor para mitigar essa diferença.

Apesar de apenas as três primeiras frequências estavam muito evidenciadas, ao analisar os resultados experimentais, podem-se observar frequências relativas a outros modos vibracionais quando plotados os dados brutos, com ápices de frequências menos protuberantes e se apresentaram na simulação como pertencentes aos outros modos, e foram observadas em simulação computacional.

Neste sentido, A análise de normalidade Shapiro-Wilk, o Teste t de student e teste de coeficiente de determinação R^2 foram realizados correlacionando os grupos de dados referentes a estes modos obtidos de forma computacional em comparação com os resultados experimentais, para os ramos R1, R2 e R3, respectivamente, está apresentada nas Tabelas 14 a 16 (TEAM, 2021; THE JAMOVI PROJECT, 2023). A partir destes dados, foi possível observar

que o valor do F calculado foi menor do que o tabelado, sendo assim, a hipótese nula é aceita e pode-se dizer estatisticamente que não há diferenças significativas entre os grupos.

Tabela 14 - Teste à normalidade (Shapiro-Wilk).

Experimental		Simulado	W	p
R1	-	R1	0,888	0,190
R2	-	R2	0,845	0,109
R3	-	R3	0,885	0,248

Nota: um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade.

Tabela 15 - Teste t para amostras emparelhadas.

Experimental	Simulado		Estatística	Graus de Liberdade	p
R1	R1	t Student	0,843	8	0,424
R2	R2	t Student	1,166	6	0,288
R3	R3	t Student	0,822	6	0,443

Nota: $H_a \mu_{\text{Medida 1}} - \mu_{\text{Medida 2}} \neq 0$.

Tabela 16 - Coeficiente de determinação (R e R²) e equação de regressão linear medidas de ajustamento do modelo.

Modelo	R	R ²	Equação de regressão linear
R1	0,988	0,977	$f(x) = -6,07x + 1,04$
R2	0,981	0,962	$f(x) = 1,154x + 0,866$
R3	0,974	0,949	$(x) = -0,793x + 1,083$

CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo contribuir com o entendimento dos ramos plagiotrópicos do café e suas propriedades dinâmicas, utilizando geometrias com alta fidelidade, advindas de escaneamento, o que proporcionou resultados interessantes.

A validação do método de escaneamento inicial, mostrou o potencial que a metodologia proposta pode oferecer. Se bem dimensionado, pode-se reproduzir bem a realidade, na qual a tensão média simulada obteve variação de 12,47% do resultado experimental, e de apenas 0,02% na deformação.

O método de escaneamento também se mostrou uma metodologia eficiente para o desenvolvimento de geometrias complexas, uma vez que a geometria final apresentou desvios médios na casa dos décimos de milímetros, garantindo a alta fidelidade ao exemplar real.

Em relação aos ramos estudados, houve diferenças entre as frequências naturais obtidas pela simulação e experimentalmente. R1 obteve diferenças percentuais de - 20,022%, -2,19% e -23,17% para a primeira, segunda e terceira frequências, respectivamente. R2, de 7,018%, 7,34% e -9,88% para a primeira, segunda e terceira frequências, respectivamente. E R3, de -15,58%, -9,19% e 2,62%, referente às três primeiras frequências, respectivamente. Entretanto, pelos testes de variância, apesar destas diferenças, não existiram diferenças estatísticas entre os dados de frequência e seus modos experimentais e computacionais.

Os resultados obtidos por meio deste trabalho podem representar significativo avanço tecnológico para o desenvolvimento, aperfeiçoamento e otimização de colhedoras de café, uma vez que foi possível prever o comportamento estático e dinâmico dos ramos de um cafeeiro a partir do escaneamento tridimensional e simulações numéricas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, à CAPES, Processo 88881.708828/2022-01 ao CNPQ e FAPEMIG.

Referências

BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno. 9th. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.008>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Primeiro levantamento da safra 2023 de café indica uma produção de 54,94 milhões de sacas, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4890-primeiro-levantamento-da-safra-2023-de-cafe-indica-uma-producao-de-54-94-milhoes-de-sacas#:~:text=A primeira estimativa para a,50%2C9 milhões de sacas.>

FERREIRA JÚNIOR, L. G.; SILVA, F. M.; FERREIRA, D. D.; SOUZA, C. E. P. de; PINTO, A. W. M.; BORGES, F. E. de M. Dynamic behavior of coffee tree branches during mechanical harvest. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 173, p. 105415, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105415>

HERRÁEZ, J.; MARTÍNEZ, J. C.; COLL, E.; MARTÍN, M. T.; RODRÍGUEZ, J. 3D modeling by means of videogrammetry and laser scanners for reverse engineering. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 87, p. 216–227, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.005>

HUEBNER, K. H.; DEWHIRST, D. L.; SMITH, D. E.; BYROM, T. G. *The Finite Element Method for Engineers*. 4th. Ed, 2010.

LI, Z.; ANDREWS, J.; WANG, Y. Mathematical modelling of mechanical damage to tomato fruits. *Postharvest Biology and Technology*, v. 126, p. 50–56, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.12.001>

MELO, W. W. A.; SANTOS, F. L.; SCINOCCA, F. Modal analysis of the coffee fruit-peduncle-branch system coffee fruit-peduncle-branch system. *Smart Agricultural Technology*, v. 4, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100217>

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, *Café no Brasil e Ementário do Café*, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira>.

MORAIS, P. A. O.; SOUZA, D. M.; MADARI, B. E.; DE OLIVEIRA, A. E. A computer-assisted soil texture analysis using digitally scanned images. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 174, p. 105435, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105435>

NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

OLIVEIRA, E.; DA SILVA, F. M.; SALVADOR, N.; FIGUEIREDO, C. A. P. Influência da vibração das hastes e da velocidade de deslocamento da colhedora no processo de colheita mecanizada do café. *Engenharia Agrícola*, v. 27, n. 3, p. 714–721, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000400014>

PUNTAMBEKAR, N. V.; JABLOKOW, A. G.; SOMMER, H. J. Unified review of 3D model generation for reverse engineering. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, v. 7, n. 4, p. 259–268, 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0951-5240\(94\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0951-5240(94)90015-9)

SOUZA, V. H. S.; SANTOS, A. A. R.; COSTA, A. L. G.; SANTOS, F. L.; MAGALHÃES, R. R. Evaluation of the interaction between a harvester rod and a coffee branch based on finite element analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 150, p. 476–483, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.020>

TEAM, R. C. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, 2021. Disponível em: <https://www.r-project.org/>

THE JAMOVI PROJECT. Disponível em: <https://www.jamovi.org>

TIAN, K. P.; SHEN, C.; LI, X. W.; HUANG, J. C.; CHEN, Q. M.; ZHANG, B. Mechanical properties and compression damage simulation by finite element for kiwifruit. *International Agricultural Engineering Journal*, v. 26, n. 4, p. 193–203, 2017.

VELLOSO, N.; RODRIGUES MAGALHÃES, R.; LÚCIO SANTOS, F.; ASSIS REZENDE SANTOS, A. Modal properties of coffee plants via numerical simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 175, p. 105552, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105552>

ZIENKIEWICZ, O.; TAYLOR, R.; ZHU, J. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 6. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.

ZULKIFLI, N.; HASHIM, N.; HARITH, H. H.; MOHAMAD SHUKERY, M. F. Finite element modelling for fruit stress analysis - A review. *Trends in Food Science and Technology*, v. 97, p. 29–37, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.029>