



MARIANA RIBEIRO PEREIRA

**SIMULAÇÃO DOS SISTEMAS FRUTO-RÁQUILA DA
MACAÚBA EM DIFERENTES PLATAFORMAS DE
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

LAVRAS – MG

2019

MARIANA RIBEIRO PEREIRA

**SIMULAÇÃO DOS SISTEMAS FRUTO-RÁQUILA DA MACAÚBA EM DIFERENTES
PLATAFORMAS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Artigo apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do componente curricular PRG332 – Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Prof. DSc. Fábio Lúcio Santos

Orientador

LAVRAS – MG

2019

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por essa conquista.

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

Ao meu irmão pelo incentivo.

Aos meus avós pelas orações.

Ao meu namorado pela paciência e companheirismo.

Aos meus amigos pelo apoio.

Ao meu orientador Prof. Fábio Lúcio Santos pela disposição, amizade e ensinamentos.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia pela oportunidade de realizar um sonho.

RESUMO

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa de florestas tropicais que se destaca pelo grande potencial para a produção de óleo, que, posteriormente poderá ser utilizado para a produção de biodiesel. Por se tratar de uma cultura rústica, a geração de conhecimento e tecnologia que contribuam para o seu desenvolvimento é fundamental. Um dos maiores gargalos dessa cultura é o processo de colheita de seus frutos, e acredita-se que a mesma possa ser realizada por vibrações mecânicas, o que torna importante a determinação das propriedades modais do sistema fruto-ráquila. A determinação de tais parâmetros é possível utilizando o Método dos Elementos Finitos desde que exista um modelo que represente com acurácia o sistema fruto-ráquila em estudo. Neste contexto, esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento de diferentes modelos do sistema fruto-ráquila da macaúba em diferentes plataformas de análise numérica, afim de esmar a influência das mesmas nos resultados da análise. Para isso, desenvolveu-se um modelo de uma viga cujos resultados analíticos foram contrastados com os resultados numéricos obtidos em cada software. Posteriormente, foram criados dois modelos do sistema fruto-ráquila e as simulações numéricas foram realizadas para análise das frequências naturais em ambos softwares, *Autodesk Fusion 360* e *Ansys Workbench 2019 R1*. A partir das simulações foi possível observar que à medida em que a geometria se torna complexa, os resultados obtidos em cada software para as frequências naturais do sistema fruto-ráquila da macaúba se tornam divergentes, apresentando um desvio relativo percentual elevado. Porém, a validação do modelo torna-se fundamental, independente da plataforma de análise, para que o mesmo possa prever o comportamento dinâmico do sistema e novas tecnologias para a mecanização da colheita possam ser desenvolvidas e otimizadas.

Palavras-chave: Mecanização Agrícola, Simulação Numérica, Análise Modal Numérica.

ABSTRACT

The macaw palm (*Acrocomia aculeata*) is a native palm tree from tropical rainforests that becomes the largest oil producing potential, which is later used for biodiesel production. Because it is a rustic culture, a generation of knowledge and technology that contributes to its development is fundamental. One of the biggest limitations in this crop is its fruit harvesting process, which it can be performed by mechanical vibrations, that becomes it important the determination of the modal properties of the fruit rachilla system. The determination of such parameters is possible using the Finite Element Method, that there is a reliable model that represents the system under study. In this context, this work was developed in order to evaluate the behavior of different models of the macaw palm fruit rachilla system in different numerical analysis platforms, in order to evaluate their influence on the analysis results. To this end, it was developed a beam model whose analytical results were contrasted with the numerical results used in each software. Subsequently, two fruit rachilla system models were created and as numerical simulations were performed to analyze natural frequencies in both Autodesk Fusion 360 and Ansys Workbench 2019 R1 softwares. From the simulations, it was possible to observe that as the geometry becomes complex, the results obtained in each software for the natural frequencies of the macaw palm fruit rachilla systems, presenting a high relative percentage deviation. However, the validation of the model becomes fundamental, independent of the analysis platform, so that it can predict the dynamic behavior of the system and new technologies for harvest mechanization can be developed and optimized.

Keywords: Agricultural Mechanization, Numerical Simulation, Numerical Modal Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Viga esbelta	10
Figura 2.2 – Modelos do sistema fruto-ráquila da macaúba	14
Figura 2.3 – Modelos geométricos 1 e 2 discretizados com elementos tetraédricos de 10 nós através do software Fusion 360.	16
Figura 2.4 – Modelo geométrico discretizado com elementos tetraédricos de 10 nós através do software Ansys Workbench.	16
Figura 3.1 – Modo de vibração pendular do sistema fruto-ráquila	19
Figura 3.2 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando o módulo de elasticidade da ráquila para o modelo 1	21
Figura 3.3 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando a massa específica da ráquila para o modelo 1	21
Figura 3.4 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando a massa específica do fruto para o modelo 1	22
Figura 3.5 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando o módulo de elasticidade da ráquila para o modelo 2	24
Figura 3.6 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando a massa específica da ráquila para o modelo 2	25
Figura 3.7 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando a massa específica do fruto para o modelo 2	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros numéricos da viga	11
Tabela 2.2 – Propriedades Mecânicas do Sistema Fruto-Ráquila do acesso BD27	15
Tabela 2.3 – Propriedades Mecânicas do Sistema Fruto-Ráquila do acesso BGP35	15
Tabela 3.1 – Frequências Naturais da viga engastada-livre	18
Tabela 3.2 – Erro relativo das frequências naturais da viga engastada-livre nas plataformas de simulação	18
Tabela 3.3 – Frequências naturais do sistema fruto-ráquila para os acessos BD27 e BGP35 obtidas através do modelo 1	20
Tabela 3.4 – Erro relativo das frequências naturais do modelo 1 do sistema fruto-ráquila em cada software para os acessos BD27 e BGP35	20
Tabela 3.5 – Frequências naturais do sistema fruto-ráquila para os acessos BD27 e BGP35 obtidas através do modelo 2	23
Tabela 3.6 – Erro relativo das frequências naturais do modelo 2 do sistema fruto-ráquila em cada software para os acessos BD27 e BGP35	23

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1	Análise das plataformas de simulação	10
2.2	Sistema Fruto-Ráquila da Macaúba	13
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
3.1	Análise das plataformas de simulação	18
3.2	Sistema fruto-ráquila da macaúba	19
4	CONCLUSÃO	28
	REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

O alto nível de desenvolvimento dos países tem acarretado o aumento do uso de combustíveis fósseis nas últimas décadas, o que pode ocasionar o esgotamento das reservas no longo prazo. Além disso, segundo o Ministério do Meio Ambiente, a queima de combustíveis fósseis é responsável por emitir o maior volume de gases do efeito estufa. Mediante esse cenário, a utilização de biocombustíveis e o desenvolvimento de tecnologias para o seu uso vem sendo difundidas em todo o mundo (CASTELLANELLI, 2008).

Várias culturas emergiram como potenciais soluções para a produção em grande escala de óleo vegetal, dentre as quais destacam-se o babaçu, o pinhão manso, o dendê, a canola e a macaúba (FLEXOR, 2010).

A macaúba é uma cultura rústica, pouco explorada e apresenta alto potencial para a produção de biodiesel. Atualmente, a colheita é realizada pela catação manual dos frutos maduros que caem no chão, em sistemas, na sua grande maioria, extrativistas. No entanto, com o processo de domesticação atual desta planta, começa o surgimento de grandes áreas implantadas especificamente para uma exploração mais intensiva. Não existem tecnologias para sua colheita, portanto, faz-se necessário desenvolver novas tecnologias para torná-la comercialmente rentável aos produtores agrícolas.

Uma das opções de colheita da macaúba é por vibração mecânica (GRUPIONI, 2018), que apesar de seus efeitos negativos em determinados sistemas, pode ser aplicada de maneira positiva em máquinas para a colheita mecanizada, como é visto em culturas de café, damasco, laranja, pistache, oliva e uva (SOUZA, 2017).

A colheita utilizando vibrações mecânicas é afetada por fatores relacionados à máquina e pela própria planta. Desta forma, para se aplicar algum sistema mecanizado utilizando o princípio de vibrações mecânicas, na colheita da macaúba, faz-se necessário o conhecimento das propriedades modais do sistema fruto-ráquila, como as frequências naturais e os modos de vibração.

Essas propriedades podem ser obtidas por meio de ferramentas computacionais, que apresentam como vantagem o menor custo e a rapidez para obtenção dos resultados. Uma das ferramentas computacionais utilizadas é o método dos elementos finitos, que em vez de resolver o problema para todo o corpo contínuo em uma única operação, formula as equações para cada elemento finito e as combinam para obter a solução de todo o corpo (LOGAN, 2011).

A escolha do software de elementos finitos para a análise de vibração é um aspecto importante na determinação da qualidade e precisão dos resultados, pois cada software possui pacotes diferentes com recursos diferentes que podem originar resultados diferentes (NEUPANE, 2014).

Mediante isto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento de diferentes modelos do sistema fruto-ráquila da macaúba em diferentes plataformas de simulação computacional, afim de relatar a influência das mesmas nos resultados da análise.

2 MATERIAL E MÉTODOS

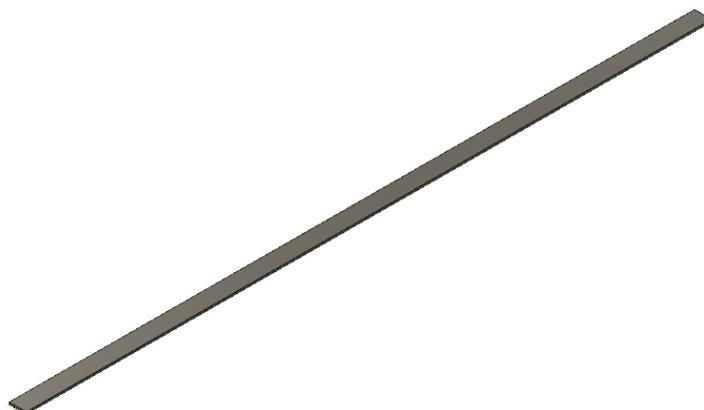
A seguir, será descrito a análise das plataformas de simulação utilizando o modelo de uma viga para a validação das plataformas de simulação e, posteriormente, dois modelos do sistema fruto-ráquila. Na primeira análise é possível comparar os resultados das frequências naturais de ambos softwares com um modelo numérico, com o objetivo de ilustrar a conexão existente entre eles. A partir do resultado positivo da primeira análise, em que as frequências naturais da viga são concordantes em ambas abordagens, é possível avançar para a segunda, em que um modelo numérico de solução não se aplica para a determinação das frequências naturais, visto a complexidade da geometria. Nesta análise são avaliados dois modelos do sistema fruto-ráquila, em ambos os softwares, afim de comparar se os resultados serão próximos à medida em que a geometria se torna complexa.

2.1 Análise das plataformas de simulação

Para comparar os resultados das frequências naturais por meio do estudo numérico (Método dos Elementos Finitos) com o estudo analítico se faz necessário a criação de um modelo mais simples, o qual possa ser solucionado em ambas metodologias.

Para tal, o modelo escolhido foi o de uma viga esbelta, representado na Figura 2.1, cujos parâmetros numéricos estão descritos na Tabela 2.1. O modelo geométrico da viga foi desenvolvido no software Fusion 360 a partir dos parâmetros numéricos descritos.

Figura 2.1 – Viga esbelta



Fonte: Autor

Tabela 2.1 – Parâmetros numéricos da viga

Descrição	Parâmetro	Valor numérico	Unidade
Comprimento	L	1	m
Largura	b	25,4	mm
Espessura	h	3,175	mm
Densidade do material	ρ	2710	kg/m ³
Módulo de elasticidade	E	69	GPa
Número de elementos na discretização	n	20	–
Amortecimento	C	0	Ns/m

Fonte: Autor

O estudo analítico foi realizado para o elemento de viga (Euler-Bernoulli), com dois graus de liberdade por nó (translação vertical e rotação) em condição engastada-livre.

Para a determinação das frequências naturais de uma viga pelo estudo analítico, utilizou-se a metodologia de Blevins (BLEVINS, 1979). Esta metodologia considera que as vigas são uniformes ao longo do vão, são compostas por um material elástico linear, homogêneo e isotrópico, são delgadas, apresentam deformações normais ao eixo da viga indeformado, suas seções planas permanecem planas, nenhuma carga axial é aplicada a ela e o centro geométrico da seção transversal dela coincide com o centro de massa. Sendo assim, por meio das condições de contorno, as frequências naturais de uma viga são dadas pela Equação 2.1.

$$f_i = \lambda_i^2 / 2\pi L^2 * \left(\frac{EI}{m}\right)^2; \quad i = 1, 2, 3... \quad (2.1)$$

Em que f_i é frequência natural da viga em Hz, lambda é um parâmetro adimensional que é uma função das condições de contorno aplicadas à viga, L é o comprimento da viga e m é a massa por unidade de comprimento da viga (kg/m).

Para uma condição engastada-livre da viga, temos:

$$\lambda_1 = 1.87510407$$

$$\lambda_2 = 4.69409113$$

$$\lambda_3 = 7.85474744$$

$$\lambda_4 = 10.99554073$$

$$\lambda_5 = 14.13716839$$

Com estes valores e os parâmetros numéricos da viga descritos na Tabela 2.1, as cinco primeiras frequências naturais foram determinadas, através da Equação 2.1.

Empregando-se o Método dos Elementos Finitos, as frequências naturais da viga (autovalores), bem como os respectivos modos de vibração (autovetores) foram obtidos a partir da formulação e solução dos problemas de autovalor e autovetor por meio dos softwares Ansys Workbench e Fusion 360.

A modelagem foi realizada considerando-se um sistema com múltiplos graus de liberdade, que pode ser representado pela Equação 2.2.

$$[M]\ddot{x} + [K]x = \{F\} \quad (2.2)$$

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

Os parâmetros modais são obtidos por meio da análise de vibração livre, portanto deve-se considerar $\{F\} = \{0\}$, obtendo a Equação 2.3, que descreve a vibração livre do sistema multi-graus de liberdade.

$$[M]\ddot{x} + [K]x = \{0\} \quad (2.3)$$

Esse sistema de equações apresenta uma solução geral representada pela Equação 2.4.

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{st} \quad (2.4)$$

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

Substituindo a Equação 2.4 e sua derivada segunda na Equação 2.3, obtém-se a Equação 2.5.

$$([M]s^2 + [K])\{X\}e^{st} = \{0\} \quad (2.5)$$

Como e^{st} não se anula, tem-se a Equação 2.6.

$$([M]s^2 + [K])\{X\} = \{0\} \quad (2.6)$$

Para encontrar uma solução diferente da trivial, é necessário que a inversa da matriz $([M]s^2 + [K])$ não exista. Para não existir a inversa de uma matriz é necessário que o determinante dessa seja nulo, como mostra a Equação 2.7.

$$\det([M]s^2 + [K]) = 0 \quad (2.7)$$

A solução da expressão resultante da expansão deste determinante resultará nos autovalores do sistema que, por sua vez, correspondem às frequências naturais. Substituindo cada um dos autovalores na equação 2.6 obtém-se os autovetores associados, que são os modos próprios do sistema (RAO, 2011).

Na etapa de discretização da geometria, foi realizado o teste de convergência nos softwares *Ansys Workbench* e *Fusion 360*, a fim de avaliar o tipo de malha. Para isso, fixou-se uma variação de 5% em relação a frequência natural encontrada a cada iteração. Logo, a geometria foi discretizada com 21 elementos hexaédricos de 10 nós e 260 nós.

Na etapa de modelagem, foram utilizadas as informações referentes às propriedades mecânicas, físicas e geométricas da viga. Foi aplicado em uma das extremidade da viga um apoio fixo, restringindo integralmente o local de aplicação, retirando todas os graus de liberdade.

A partir dos resultados das frequências naturais, foi avaliado qual o erro relativo das mesmas em relação à plataforma de análise e ao modelo analítico conforme Equação 2.8 e Equação 2.9, respectivamente.

$$E = \frac{Fusion - Ansys}{Ansys} * 100 \quad (2.8)$$

$$E = \frac{Numrico - Analtico}{Analtico} * 100 \quad (2.9)$$

2.2 Sistema Fruto-Ráquila da Macaúba

Para a construção do modelo foram utilizados parâmetros geométricos e físicos provenientes dos cachos de macaúba coletados por Villar (2016) no Banco de Germoplasma (BAG) da Universidade Federal de Viçosa – UFV, localizado na fazenda experimental em Araponga, Minas Gerais. As palmeiras são provenientes dos acessos Abaeté/MG (BD27) e Mirandópolis/SP (BGP35).

Cada acesso conta com 10 ráquilas possuindo apenas um fruto em sua extremidade. Existem informações sobre as características geométricas de cada um deles, porém para a construção do modelo foi utilizado a média, tanto para o diâmetro do fruto quanto para o diâmetro da ráquila, cujos valores são de 41,14 e 3,74 *cm*, respectivamente. As ráquilas possuem 15 *cm* de comprimento, porém quando foram realizados os experimentos para a determinação da frequência experimental, VILLAR (2016) utilizou 2 *cm* para o engaste; logo, para o modelo, foi padronizado um comprimento de 13 *cm*. O fruto está preso à ráquila na extremidade oposta ao engaste, e para o modelo foi considerado uma distância de 9,75 *cm*.

A partir dos parâmetros geométricos foi possível a simulação de dois modelos através do software da Autodesk, o FUSION 360, os quais estão ilustrados na Figura 2.2. Em ambos os modelos o fruto é cilíndrico e sua união com a ráquila apresenta formato cônico, havendo mudanças apenas em relação à ráquila. No primeiro, a ráquila, assim como o fruto, é perfeitamente cilíndrica e, no segundo, a ráquila possui deformações ao longo de dois planos.

Figura 2.2 – Modelos do sistema fruto-ráquila da macaúba



Fonte: Autor

Os parâmetros de entrada para a modelagem e simulação computacional do sistema fruto-ráquila para o acesso BD27 e BGP35 estão listados na Tabela 2.2 e Tabela 2.3, respectivamente. Cada acesso conta com 10 ráquilas possuindo apenas um fruto em sua extremidade e existem informações sobre as propriedades mecânicas de cada um deles.

Tanto para as ráquilas quanto para os frutos foi utilizado um coeficiente de Poisson de 0,37 e 0,30 respectivamente.

Para a união do fruto com a ráquila, considerou-se um módulo de elasticidade cem vezes maior que o da ráquila, com o intuito de induzir um comportamento de corpo rígido no sistema e sua massa específica foi igual à da ráquila, variando de acordo com cada amostra. Essa aproximação foi feita porque devido ao seu tamanho reduzido, não foi possível realizar as medidas e os ensaios para que valores reais pudessem ser utilizados.

Tabela 2.2 – Propriedades Mecânicas do Sistema Fruto-Ráquila do acesso BD27

	Ráquila		Fruto
	$\rho(kg/m^3)$	$E(MPa)$	$\rho(kg/m^3)$
1	0,453	184,9	1,127
2	0,573	244,9	1,121
3	0,487	218,3	1,132
4	0,549	255,8	1,119
5	0,631	239,7	1,122
6	0,750	290,1	1,149
7	0,485	282,2	1,115
8	0,423	286,2	1,120
9	0,555	201,5	1,117
10	0,534	184,9	1,126

Fonte: (VILLAR, 2016)

Tabela 2.3 – Propriedades Mecânicas do Sistema Fruto-Ráquila do acesso BGP35

	Ráquila		Fruto
	$\rho(kg/m^3)$	$E(MPa)$	$\rho(kg/m^3)$
1	0,598	297,6	0,570
2	0,742	150,2	1,053
3	0,780	168,5	1,089
4	0,550	160,1	1,043
5	0,712	148,0	1,056
6	0,618	136,9	1,125
7	0,689	250,1	1,116
8	0,685	136,4	1,106
9	0,748	194,7	1,126
10	0,624	297,6	1,085

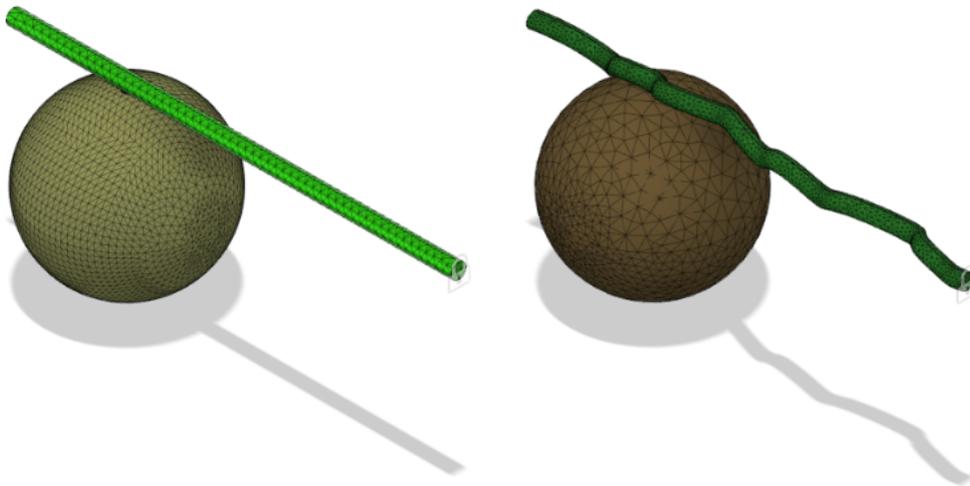
Fonte: (VILLAR, 2016)

Para o fruto foi considerado um valor alto para o módulo de elasticidade, sendo igual a $222000MPa$, porque devido à não-linearidade de seus materiais constituintes torna-se inviável descobrir tal propriedade.

Na etapa de discretização da geometria, foi realizado o teste de convergência nos softwares *Ansys Workbench* e *Fusion 360*, a fim de avaliar o tipo de malha. Para isso, fixou-se uma variação de 5% em relação à frequência natural encontrada a cada iteração.

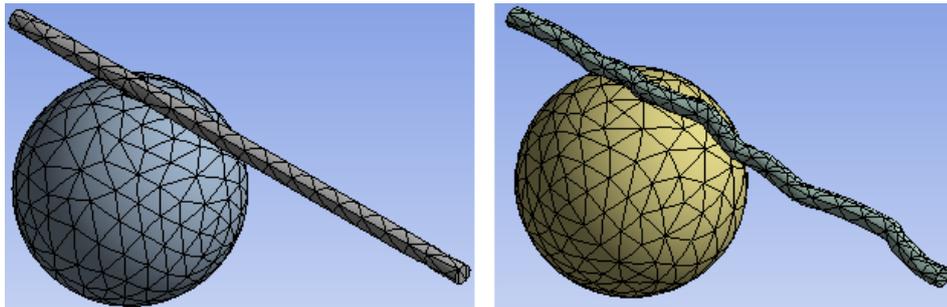
A discretização dos modelos no software *Fusion 360* apresentou uma malha com 92165 nós e 62778 elementos para o modelo 1, o modelo 2 possui 59083 elementos e 38593 nós (Figura 2.3). Já no software *Ansys Workbench*, o modelo 1 possui 2807 nós e 1269 elementos e o modelo 2 possui 3222 nós e 1875 elementos (Figura 2.4), onde o tipo de elemento é o tetraédrico com 10 nós em ambos modelos.

Figura 2.3 – Modelos geométricos 1 e 2 discretizados com elementos tetraédricos de 10 nós através do software Fusion 360.



Fonte: Autor

Figura 2.4 – Modelo geométrico discretizado com elementos tetraédricos de 10 nós através do software Ansys Workbench.



Fonte: Autor

Na etapa de modelagem, foram utilizadas as informações referentes às propriedades mecânicas, físicas e geométricas, bem como foram definidas as condições de contorno e os parâmetros de solução. Na simulação o sistema fruto-ráquila foi considerado engastado na extremidade oposta ao fruto e a ráquila e o fruto estão ligados com a união por meio de um contato fixo.

As propriedades modais dos sistemas fruto-ráquila foram obtidas com base nos modelos desenvolvidos, considerando-se o estágio de maturação imaturo, utilizando o algoritmo Block Lanczos para determinação dos autovalores e autovetores em ambos os softwares.

O algoritmo de Block Lanczos é uma variação clássica do algoritmo de Lanczos, em que as recursões do modelo são desenvolvidas utilizando um bloco de vetores ao invés de um vetor simples. Para extrair o número de autovalores requisitados, este método emprega uma

estratégia automatizada de troca combinada com a checagem de sequência de Sturm (ANSYS, 2019).

A partir dos resultados das frequências naturais, foi avaliado qual o erro relativo de cada modelo e em cada acesso em relação à plataforma de análise, de acordo com a Equação 2.8.

A fim de identificar quais parâmetros tiveram maior influência na determinação das frequências naturais, foi realizada análise de sensibilidade para os três parâmetros utilizados como entrada. A análise foi realizada variando cada parâmetro (módulo de elasticidade e massa específica) em $\pm 20\%$ em relação ao valor médio de cada acesso. Foram determinadas as frequências naturais para cada condição simulada na análise de sensibilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados da análise das plataformas de simulação utilizando o modelo de uma viga e, posteriormente, dois modelos do sistema fruto-ráquila da macaúba. Também serão apresentados os resultados da análise de sensibilidade realizada para os dois modelos do sistema fruto-ráquila da macaúba.

3.1 Análise das plataformas de simulação

Na Tabela 3.1 são apresentadas as frequências naturais correspondentes encontradas para a viga de forma analítica e numérica em ambos softwares.

Tabela 3.1 – Frequências Naturais da viga engastada-livre

$f_N [Hz]$		
Modo Analítico	Ansys Workbench	Fusion 360
2,588	2,713	2,624
16,219	16,761	16,500
45,413	46,755	46,530
88,991	92,194	92,180
147,109	130,170	130,600

Fonte: Autor

Na Tabela 3.2 são apresentados os erros relativos dos valores das frequências naturais encontradas de forma analítica e numérica em ambos softwares e os valores encontrados a partir das duas plataformas de análise numérica.

Tabela 3.2 – Erro relativo das frequências naturais da viga engastada-livre nas plataformas de simulação

Erro Relativo [%]		
Modo Analítico x Ansys	Modo Analítico x Fusion	Ansys x Fusion
4,8	1,4	-3,3
3,3	1,7	-1,6
2,9	2,5	-0,5
3,6	3,6	0,0
-11,5	-11,2	0,3

Fonte: Autor

Das Tabelas 3.1 e 3.2, é nítida a concordância entre a abordagem analítica e numérica em ambos os softwares. As pequenas discrepâncias justificam-se pelas características de cada formulação. Os elementos sólidos (como o hexaédrico), ao contrário dos elementos estruturais

(elemento de viga), não são baseados em teorias dimensionalmente reduzidas. Os primeiros, que reproduzem o contínuo, tendem a fornecer a solução real quando o tamanho dos elementos tende a zero. A formulação analítica de viga representa um modelo estrutural com uma simplificação dimensional de um sistema que é, estritamente falando, tridimensional. No entanto, como os resultados mostram, para este modelo muito simples, os valores são muito concordantes.

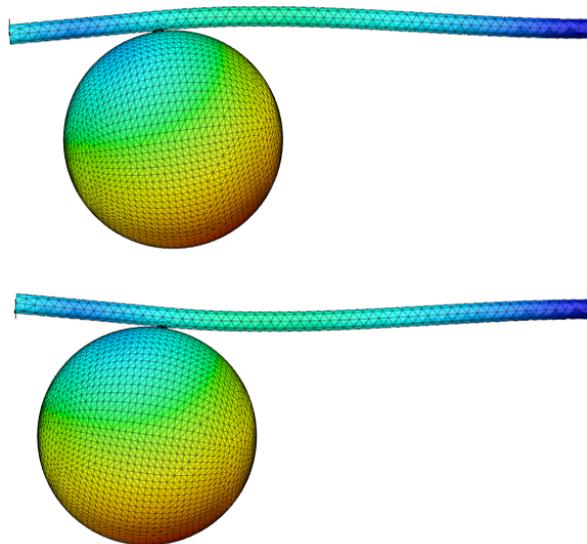
Da Tabela 3.2, é nítida a concordância da abordagem numérica nos softwares Fusion 360 e Ansys Workbench, visto que o erro relativo entre os valores de frequência natural encontrados em cada um foi baixa. Logo, é possível avaliar o sistema fruto-ráquila da macaúba em ambas plataformas.

Vale ressaltar que o método analítico de solução é bastante limitado e não se aplica a sistemas complexos de engenharia. A simulação com um sistema mecânico simples, como a viga, serviu, no entanto, para ilustrar a conexão entre os métodos analítico e numérico e também para mostrar que ambos os softwares apresentam resultados próximos.

3.2 Sistema fruto-ráquila da macaúba

As frequências naturais de interesse a serem avaliadas são as que estão associadas ao modo de vibração pendular, representado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Modo de vibração pendular do sistema fruto-ráquila



Fonte: Autor

Na Tabela 3.3 são apresentadas as frequências naturais correspondentes encontradas de forma numérica para os acessos BD27 e BPG35 em ambos softwares para o modelo 1.

Na Tabela 3.4 são apresentados os valores dos erros relativos da frequência natural obtida no software Fusion 360 em relação ao software Ansys Workbench.

Tabela 3.3 – Frequências naturais do sistema fruto-ráquila para os acessos BD27 e BGP35 obtidas através do modelo 1

$f_N [Hz]$			
BD27		BGP35	
Ansys Workbench	Fusion 360	Ansys Workbench	Fusion 360
8,528	9,237	15,708	16,010
9,838	9,453	8,218	8,608
9,563	9,999	8,559	8,977
10,410	10,890	8,530	8,933
10,062	10,530	8,147	8,619
10,935	11,530	7,594	7,965
10,955	11,450	10,304	10,770
11,010	11,500	7,644	8,004
9,248	9,688	9,050	9,567
8,824	9,239	11,348	11,870

Fonte: Autor

Tabela 3.4 – Erro relativo das frequências naturais do modelo 1 do sistema fruto-ráquila em cada software para os acessos BD27 e BGP35

Erro Relativo [%]	
Acesso BD27	Acesso BGP35
8,3	1,9
-3,9	4,7
4,6	4,9
4,6	4,7
4,6	5,8
5,4	4,9
4,5	4,5
4,4	4,7
4,8	5,7
4,7	4,6

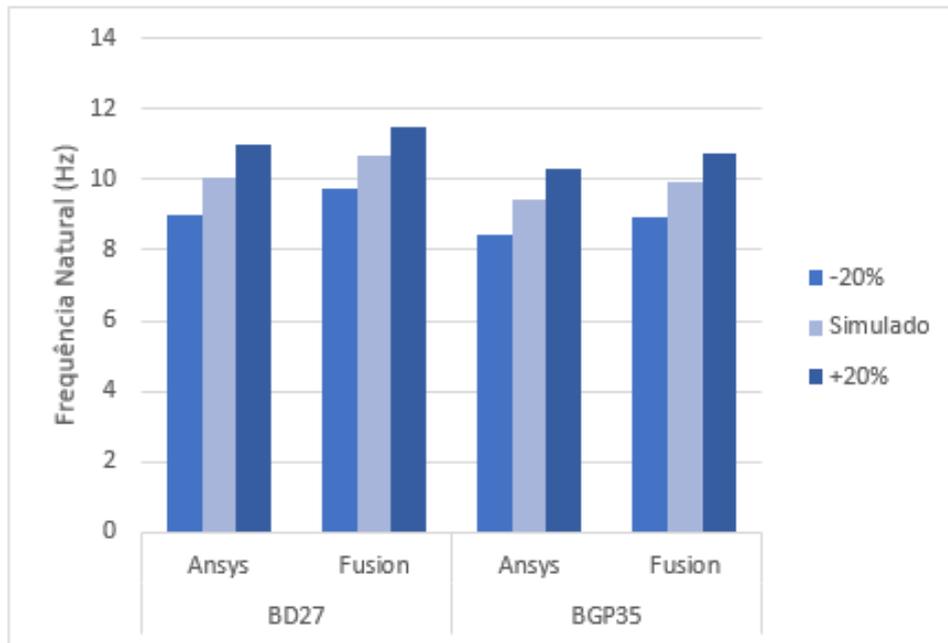
Fonte: Autor

Das Tabelas 3.3 e 3.4, é nítida a concordância da abordagem numérica em ambos os softwares, visto que o erro relativo entre os valores de frequência natural encontrados em cada um foi baixa. As pequenas discrepâncias justificam-se pelas características de cada simulação, como a discretização do modelo, por exemplo.

Na análise de sensibilidade foram variados o módulo de elasticidade da ráquila (Figura 3.2), a massa específica da ráquila (Figura 3.3) e a massa específica do fruto (Figura 3.4)

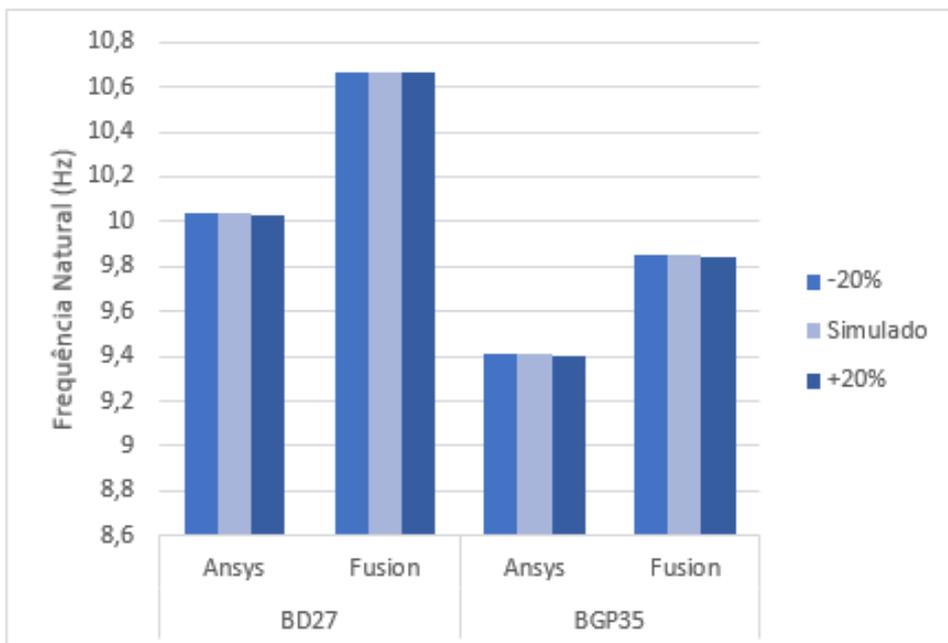
do sistema fruto-ráquila da macaúba. Os parâmetros foram variados em $\pm 20\%$ e foram analisados individualmente variando um a um em relação ao valor obtido através da simulação utilizando valores médios de cada acesso.

Figura 3.2 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando o módulo de elasticidade da ráquila para o modelo 1



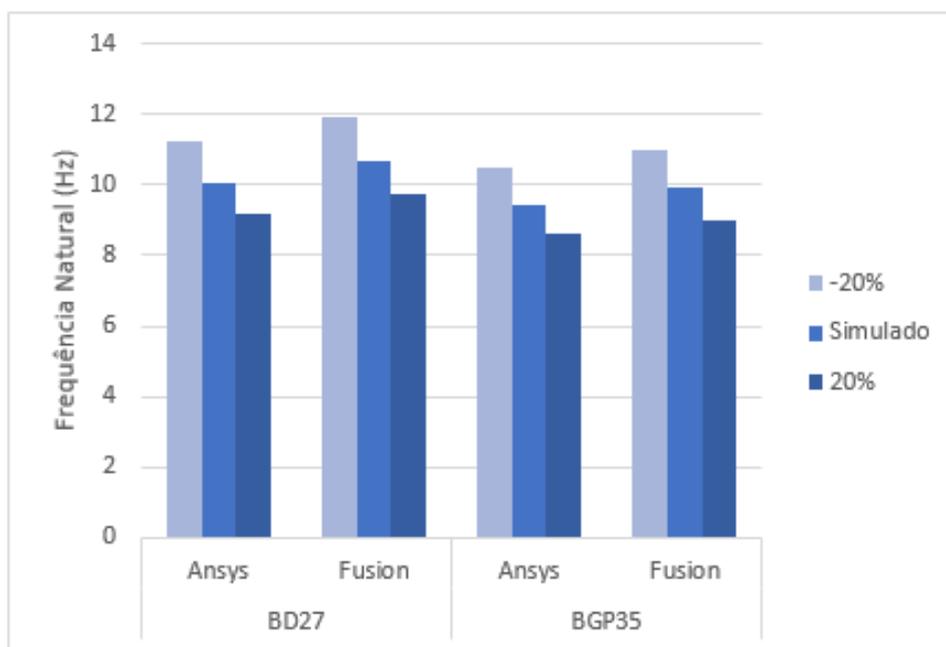
Fonte: Autor

Figura 3.3 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando a massa específica da ráquila para o modelo 1



Fonte: Autor

Figura 3.4 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando a massa específica do fruto para o modelo 1



Fonte: Autor

A partir da análise de sensibilidade verificou-se que frequência natural do sistema é diretamente proporcional à rigidez, relacionada à geometria e módulo de elasticidade, e inversamente proporcional à massa, que está relacionada com a densidade (RAO, 2011). Portanto, quando houve diminuição da massa específica do fruto, a frequência natural resultante foi maior e quando houve aumento do módulo de elasticidade da ráquila, a frequência fundamental resultante também foi maior.

A massa específica da ráquila apresenta o mesmo comportamento da massa específica do fruto, já que está relacionada a massa do sistema, porém sua variação implica em uma mudança insignificante no valor da frequência natural.

O mesmo comportamento para a análise de sensibilidade de ambos parâmetros foi observado por Villar (2016) e por Velloso (2016) para os ensaios do sistema fruto-ráquila da macaúba, no estágio de maturação verde, em variações de $\pm 20\%$ e de $\pm 30\%$, respectivamente.

Na Tabela 3.5 são apresentadas as frequências naturais encontradas de forma numérica para os acessos BD27 e BGP35 para em ambos softwares para o modelo 2. Na Tabela 3.6 são apresentados os valores do erro relativo da frequência natural obtida no software Fusion 360 em relação ao software Ansys Workbench.

Tabela 3.5 – Frequências naturais do sistema fruto-ráquila para os acessos BD27 e BGP35 obtidas através do modelo 2

$f_N[Hz]$			
BD27		BGP35	
Ansys Workbench	Fusion 360	Ansys Workbench	Fusion 360
8,664	20,220	15,426	35,760
8,570	23,300	8,072	18,780
8,068	21,200	8,406	19,570
8,771	23,840	8,377	19,530
8,466	23,020	8,006	18,620
9,184	24,990	7,459	17,390
9,241	25,090	10,119	23,560
9,298	25,230	7,507	17,480
7,791	21,180	8,888	20,690
7,437	20,210	11,145	25,960

Fonte: Autor

Tabela 3.6 – Erro relativo das frequências naturais do modelo 2 do sistema fruto-ráquila em cada software para os acessos BD27 e BGP35

Erro Relativo [%]	
Acesso BD27	Acesso BGP35
133,8	131,8
171,9	132,7
162,8	132,8
171,8	133,1
171,9	132,7
172,1	133,1
171,5	132,8
171,3	132,8
171,8	132,8
171,7	132,9

Fonte: Autor

Das Tabelas 3.5 e 3.6, é possível observar a discordância da abordagem numérica em ambos os softwares, visto que o erro relativo entre os valores de frequência natural encontrados em cada acesso foi extremamente alta.

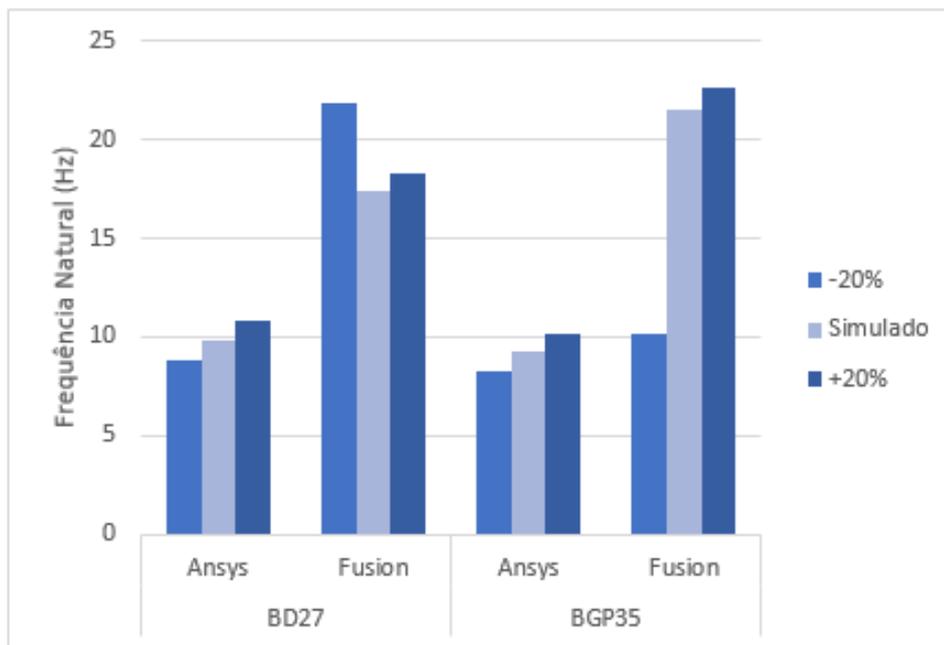
Neupane (2014) ao analisar uma placa retangular com furo central, sujeita a uma carga de tração sobre uma de suas faces finais, concluiu que os resultados através da solução numérica e analítica em diferentes plataformas foram semelhantes, onde o software Ansys apresentou um erro relativo de 0,82% em relação ao valor obtido numericamente. Posteriormente, ao analisar um gancho rotatório, que consiste em duas partes (base e núcleo do gancho), ao aplicar uma força descendente em uma superfície do núcleo do gancho, observou que os resultados numé-

ricos obtidos através da solução analítica para tensão e pressão não foram semelhantes entre si. A diferença no resultado, segundo o autor, deve-se aos critérios de convergência padrão do programa. O autor relata também, que o resultado pode ser obtido de forma semelhante usando o mesmo tamanho de malha e os mesmos critérios de convergência para cada código do método de elementos finitos.

O valor elevado dos desvios relativos percentuais da frequência natural do sistema fruto-ráquila encontrados para o modelo 2 pode ser justificado então, pela diferença do tamanho de malha, embora tenha utilizado os mesmos critérios de convergência para cada software.

Assim como no modelo 1, também foi feita uma análise de sensibilidade para o modelo 2, em que variou o módulo de elasticidade da ráquila (Figura 3.5), a massa específica da ráquila (Figura 3.6) e a massa específica do fruto (Figura 3.7) do sistema fruto-ráquila da macaúba. Os parâmetros foram variados em $\pm 20\%$ e foram analisados individualmente variando um a um em relação ao valor obtido através da simulação utilizando valores médios de cada acesso.

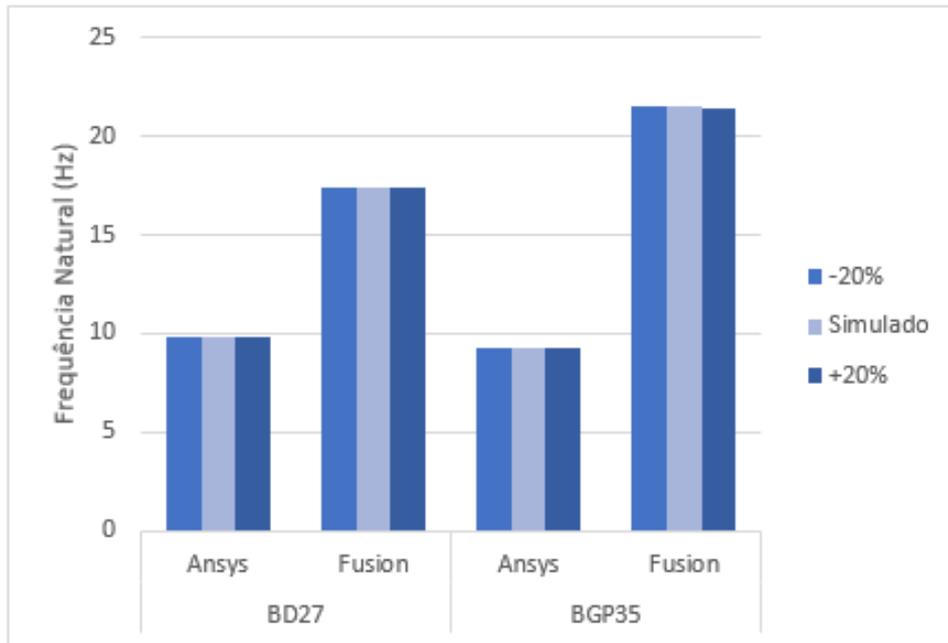
Figura 3.5 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando o módulo de elasticidade da ráquila para o modelo 2



Fonte: Autor

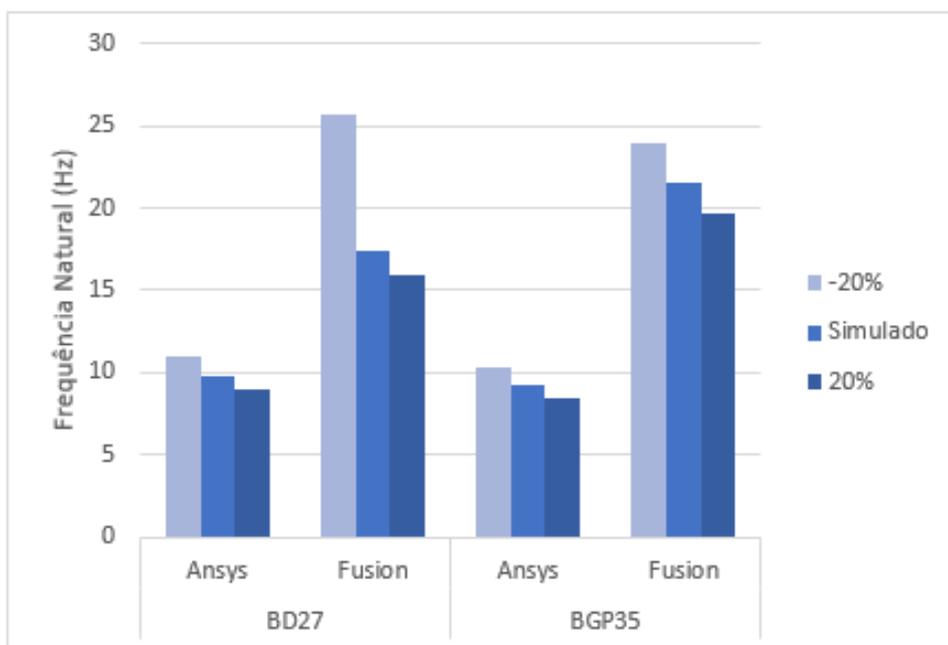
O modelo 2 apresentou o mesmo comportamento que o modelo 1, quando houve diminuição da massa específica do fruto, a frequência natural resultante foi maior e quando houve aumento do módulo de elasticidade da ráquila, a frequência fundamental resultante também foi maior. A massa específica da ráquila apresenta o mesmo comportamento visto no modelo 1, onde sua variação implica em uma mudança insignificativa no valor da frequência natural.

Figura 3.6 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando a massa específica da ráquila para o modelo 2



Fonte: Autor

Figura 3.7 – Valores de frequências naturais resultantes da análise de sensibilidade variando a massa específica do fruto para o modelo 2



Fonte: Autor

Portanto, em estudos futuros, deve-se preocupar com o módulo de elasticidade da ráquila, o qual apresentou um coeficiente de variação elevado ao ser considerado como elástico

e isotrópico em testes feitos por Villar (2016), visto que o modelo se mostrou sensível a este parâmetro.

Através da Figura 3.5 é possível observar que para o acesso BD27 no Software Fusion 360, a frequência natural não se comportou como esperado. Talvez essa variação possa estar associada à malha, a qual para esse determinado cenário deveria, talvez, ter um refinamento diferenciado.

Ao comparar os resultados da análise de sensibilidade do modelo 1 com o modelo 2, quando a massa específica do fruto é alterada, há uma variação significativa nos valores das frequências naturais em ambas as plataformas de análise. Os modelos também foram sensíveis ao módulo de elasticidade da ráquila, apresentando o mesmo comportamento em ambas plataformas de análise. Em relação à massa específica da ráquila, tanto o modelo 1 quanto o modelo 2, não foram sensíveis, independente da plataforma de análise.

Santos et al. (2015) concluíram em seu trabalho que as frequências naturais dos sistemas fruto-pendúnculo do café dependem das propriedades geométricas, físicas, mecânicas e das condições de maturação do fruto. Assim como no sistema fruto-pendúnculo do café, uma variação na geometria do sistema fruto-ráquila da macaúba também influencia diretamente no comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila. Isso deve ocorrer, pois, as frequências naturais variam de acordo com a rigidez do sistema, que por sua vez é determinada através de sua geometria, e da distribuição de massa no sistema (VILLAR, 2016).

Tal comportamento pode ser observado através dos resultados encontrados em ambos softwares quando houve a mudança da geometria, passando do modelo 1 para o modelo 2, sendo mais expressivo no software Fusion 360.

Através das propriedades mecânicas do sistema fruto-ráquila da macaúba apresentados nas Tabelas 2.2 e 2.3 e no trabalho feito por Villar (2016), é possível observar que existe uma grande variação em suas propriedades ao analisar acessos distintos e também dentro de um mesmo acesso.

Como os modelos foram sensíveis às variações de propriedades geométricas e mecânicas, e em sistemas biológicos, como o café (SANTOS et al., 2015), por exemplo, essa variação é muito grande, torna-se fundamental a validação dos modelos, independentemente da plataforma a ser utilizada, para que eles possam prever o comportamento dinâmico do sistema e evitar a análise e a utilização de dados enganosos (GRAY et al., 2008), visto que o estudo e o enten-

dimentos desses sistemas são fundamentais para o projeto de máquinas eficientes e otimizadas para a colheita dos frutos.

A partir de um modelo com precisão satisfatória em descrever o comportamento dinâmico do sistema, pode-se contribuir para o direcionamento de novas pesquisas científicas, na área de mecanização agrícola, o que contribuirá para o desenvolvimento de novas tecnologias, para os sistemas mecânicos de colheita e otimização dos sistemas já existentes, beneficiando de forma direta o setor industrial e o meio agrícola (CARVALHO, 2016).

4 CONCLUSÃO

A escolha correta de um modelo que represente com acurácia o sistema fruto-ráquila da macaúba para estimar as frequências naturais, independente da plataforma utilizada para a simulação, é primordial para se obter resultados corretos, visto que a cultura da macaúba apresenta diversidade em suas propriedades mecânicas e geométricas. Mediante a validação do modelo evita-se a análise e a utilização de dados enganosos, tornando-se possível prever o comportamento dinâmico e desenvolver/otimizar projetos de máquinas para a colheita.

A partir das simulações foi possível observar que à medida em que a geometria se torna complexa, os resultados obtidos em cada software para as frequências naturais do sistema fruto-ráquila da macaúba se tornam divergentes, apresentando um desvio relativo percentual elevado.

Neste contexto, em estudos futuros, deve-se preocupar em utilizar o mesmo tamanho de malha sem que o critério de convergência seja divergente em ambos softwares, afim de obter resultados próximos independente da plataforma de simulação utilizada.

A partir da análise de sensibilidade foi possível observar que os parâmetros de maior influência na estimativa de frequências naturais são o módulo de elasticidade da ráquila e a massa específica do fruto.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. **Eigenvalue and Eigenvector Extraction**. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v191/ans_thry/thy_tool13.html%23eltblocklanc>. Acesso em: 30 out. 2019.
- BLEVINS, R. D. **Formulas for natural frequency and mode shape**. Nova York: Van Nostrand Reinhold Co, 1979.
- CARVALHO, E. D. A. **PROTOCOLO PARA DIGITALIZAÇÃO E MODELAGEM DE CAFEEIRO PARA FINS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, MG, 2016.
- CASTELLANELLI, C. A. **Estudo da viabilidade de produção do biodiesel, obtido através do óleo de fritura usado, na cidade de Santa Maria – RS**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008.
- FLEXOR, G. O programa nacional de produção e uso de biodiesel: avanços e limites. **Observatório de Políticas Públicas para a Agricultura**, n. 30, p. 1 – 4, 2010.
- GRAY, H. et al. Experimental validation of a finite element model of a human cadaveric tibia. **Journal of biomechanical engineering**, v. 130, p. 031016, 07 2008.
- GRUPIONI, C. M. d. F. Development and evaluation of operational performance of macaw fruits semi-mechanized harvester by means mechanical vibrations principle. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 2, p. 497 – 510, 2018.
- LOGAN, D. L. **A first course in the finite element method**. [S.l.]: Cengage Learning, 2011.
- NEUPANE, D.
Comparison of some FEM codes in static analysis — University of Applied Sciences, 2014.
- RAO, S. S. **Mechanical vibrations. Fifth edition**. University of Miami: Prentice Hall, 2011. 1084 p.
- SANTOS, F. L. et al. Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 37, n. 1, p. 11 – 17, 2015.
- SOUZA, V. H. S. **INVESTIGAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE A HASTE DE UMA COLHEDORA E O RAMO DE UM CAFEEIRO UTILIZANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa, 2017.
- VELLOSO, N. S. **Propriedades físicas e comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba (Acrocomia aculeata)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa, 2016.
- VILLAR, F. M. de M. **Propriedades físicas, geométricas, mecânicas e modais do sistema fruto-ráquila da macaúba**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Viçosa, 2016.