

ANÁLISE MODAL DE CORPO LIVRE EM UM CHASSI DE AÇO 1020

BILK, Matheus Henrique¹

TRAIANO, Denner²

RESUMO: O projeto foi desenvolvido com base em três pilares: modelagem do chassi, realização da análise modal e armazenamento das informações para consultas futuras. Para a modelagem do chassi foi necessário a realização da medição do chassi juntamente com processamento de imagem com o software imagem. Com os dados dimensionais foi realizado o modelo 3D no software Fusion 360 e posteriormente exportado para o software Ansys Workbench, onde o modelo foi tratado, sendo definido as características do material e de malha para a realização da análise modal. Foram realizadas a simulações de 21 modos de vibrar para analisar a faixa de interesse, sendo verificado a necessidade do incremento de rigidez no sentido longitudinal do chassi juntamente com a aproximação das excitações do motor com a frequência natural da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Elementos finitos, modelagem 3D, refinamento de malha, análise modal, frequências naturais.

ABSTRACT: The project was based on three pillars: chassis modeling, modal analysis, and the storage of information for future reference. To model the chassis, it was necessary to measure the structure and process the images using the ImageJ software. With the dimensional data obtained, a 3D model was created in Fusion 360 and later exported to Ansys Workbench, where the model was prepared and assigned material and mesh characteristics for the modal analysis. A total of 21 vibration modes were simulated to evaluate the frequency range of interest, which confirmed the need to increase the longitudinal stiffness of the chassis and highlighted the proximity between the engine excitation frequencies and the structure's natural frequencies.

KEYWORDS: Finite elements; 3D modeling; Mesh refinement; Modal analysis; Natural frequencies.

1 INTRODUÇÃO

O programa Off Road da Campo Real foi proposto como forma de integração e desenvolvimento dos estudantes de Engenharia Mecânica no ano de 2025, o chassi havia sido construído no ano anterior e por conta disso não possuía o modelo tridimensional disponível e conseqüentemente impedia a análise modal da geometria, necessária para identificar as faixas de vibrações naturais e formas de vibrar de cada modo analisado.

A estrutura analisada esta sujeito a conversão da energia potencial para a cinética e da cinética para a potencial, ela está suscetível a sofrer vibrações mecânicas (RAO, 2009). O chassi pode vibrar de duas formas, livre ou forçada, os estímulos livres são decorrentes de uma excitação pontual, como o pneu passando por um buraco, e os estímulos forçados ocorrem devido a um estímulo

¹ Graduando(a) de Engenharia Mecânica no Centro Universitário Campo Real.
engm_matheusbilk@camporeal.edu.br

² Graduado em Manutenção Industrial. Mestrado/Especialização em Engenharia Mecânica. Professor no Centro Universitário do Campo Real. prof_dennertraiano@camporeal.edu.br

constante, como um motor em funcionamento (BALACHANDRAN, 2009; INMAN, 2013).

No sistema analisado ocorre a perda gradual da energia, seja pelas características do material ou pelo atrito da massa com fatores externos, obedecendo ao conceito de forças não conservativas (INMAN, 2013; RAGAB, 1999; HALLIDAY, 2015). Os materiais e geometrias podem apresentar diferentes tipos de respostas aos esforços cíclicos gerados em sua estrutura, fazendo com que as vibrações possam ser subamortecidas, amortecidas, superamortecidas ou criticamente amortecidas (HIBBELER, 2011; RAO 2009; CALLISTER, 2020; HALLIDAY 2009).

As vibrações geradas no chassi podem coincidir com a do material, com isso a energia se acumula e ocorre o efeito de ressonância, essa condição faz com que o coeficiente de amortecimento (ζ) vá para próximo de 0, intensificando o efeito da ressonância gradativamente, fazendo com que a amplitude da oscilação no regime permanente tenda ao infinito (INMAN, 2013; GEORGI, 1993). O coeficiente de amortecimento próximo de zero causa o colapso devido a maior transferência de energia mecânica (MOBLEY, 2001; HIBBELER, 2011; HALLIDAY, 2009; KING, 2018).

As faixas vibracionais ressoantes devem ser evitadas em qualquer estrutura, essas faixas vibracionais estão presentes dentro da análise modal, que tem como objeto trazer como retorno as frequências naturais, modos de vibrar e amortecimento (BI 2018; WANG 2016; HE, 2004), sendo uma das principais tecnologias para definir e otimizar as estruturas nos últimos séculos (HE, 2004; WANG 2016).

Os estudos modais realizados no início do século XIX eram dependentes das soluções manuais das equações diferenciais ordinárias que descrevem o comportamento dinâmico das estruturas. No século XX, 1965 representa o marco da computarização das análises modais devido a criação do algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT), que possuía um baixo custo computacional permitindo a incorporação da técnica em ferramentas CAE, Computer-Aided Engineering tools, como é o caso dos elementos finitos (HE, 2004; KERSCHEN, 2006; FANG, 2023).

O método dos elementos finitos (MEF) é utilizado amplamente em análises estruturais dos mais diversos tipos sem a necessidade de testes destrutivos (Filho, 2008). O MEF é uma ferramenta que discretiza problemas e apresenta soluções numericamente aproximada através de malhas e nós, o que gera o nome de elementos finitos, onde geometrias complexas são descritas por geometrias simples

conectadas entre si por nós representando o sistema como um todo (SOUZA, 2014; FURTADO, 2024).

Os nós que constituem o método dos elementos finitos, são a representação de um ponto qualquer em um objeto que deve obedecer ao princípio do meio contínuo permitindo a criação de um ponto geométrico que possui volume igual a zero definido por um limite derivativo infinitesimal, devido a condição apresentada se torna possível a representação dos fenômenos físicos a partir das equações diferenciais ordinárias e parciais (SHAMEY, 2014; MALVERN, 1969; VALLIAPPAN, 2001).

A junção dos pontos que possuem volume que tendem a 0 constituem a malha, e possuem a função de segregar a estrutura analisada, de tal forma que as condições de contorno sejam satisfeitas (BITTENCOURT, 2011). A relação do sistema teórico discretizado pela malha deve possuir um número de graus de liberdade suficiente para que a simulação represente o comportamento aproximado do real (FILHO, 2008).

A obtenção de resultados coerentes no método dos elementos finitos, para a solução de qualquer problema, apresenta uma solução matematicamente aproximada, isso ocorre devido a aproximação do espaço funcional, que apresenta caráter infinito, através da interpolação do espaço finito pelo meio da malha de controle (DÍEZ, 2000; LIU, 2009).

O refinamento da malha é fundamental para que a estimativa de erro entre o método e a solução analítica reduza, esta ação pode ser baseada na mudança da posição dos nós, no aumento da ordem polinomial ou na alteração do tamanho dos elementos, sendo a combinação dessas técnicas uma opção viável, sendo necessário a convergência dos resultados conforme o refino para a comprovação de uma boa malha (NOVOTNY, 1998; BATHE, 2014).

O presente trabalho tem como objetivo criar um modelo tridimensional semelhante ao chassi construído utilizando o Fusion 360, levando em consideração o tamanho, a espessura de 2 mm e 3 mm e o material das tubulações definindo as frequências naturais do sistema, o local de maior fragilidade e as direções das vibrações, levando em conta a utilização de um motor toyama TE150-XP e uma velocidade de 30 km/h, com pneu 195/65 utilizando o plugin de análise modal em um corpo livre juntamente com as ferramentas de deformação e coordenadas presentes no Ansys.

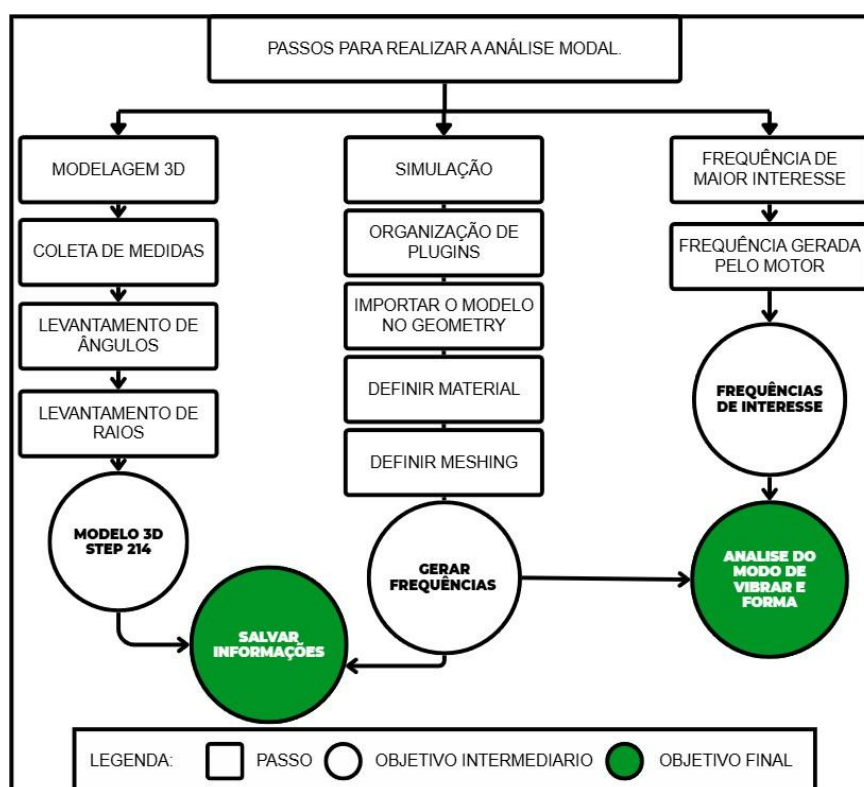
O desenvolvimento do modelo e da simulação trarão como resultado a visualização das frequências naturais, definindo se a geometria estudada necessita de reforços estruturais, afim mitigando a possibilidade de falha por fadiga e de reforços

desnecessários na estrutura, esses resultados serão salvos em um local de comum acesso para possibilitar a verificação e reutilização das informações pelo grupo participante do programa Offroad da Campo Real, assim contribuindo para o avanço do projeto nas áreas práticas e teóricas.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada garante o avanço controlado do processo e a repetibilidade das análises, garantindo a confiabilidade da simulação através de um método com processo definido e objetivos claros. Levando em conta as influências do preparo da geometria analisada e a necessidade da criação de um ambiente virtual alinhado com o objetivo da simulação. Na Figura 1 é apresentado o resumo dos passos definidos e a sequência da coleta de dados.

Figura 1 – Metodologia em fluxograma



Fonte: Autor (2025).

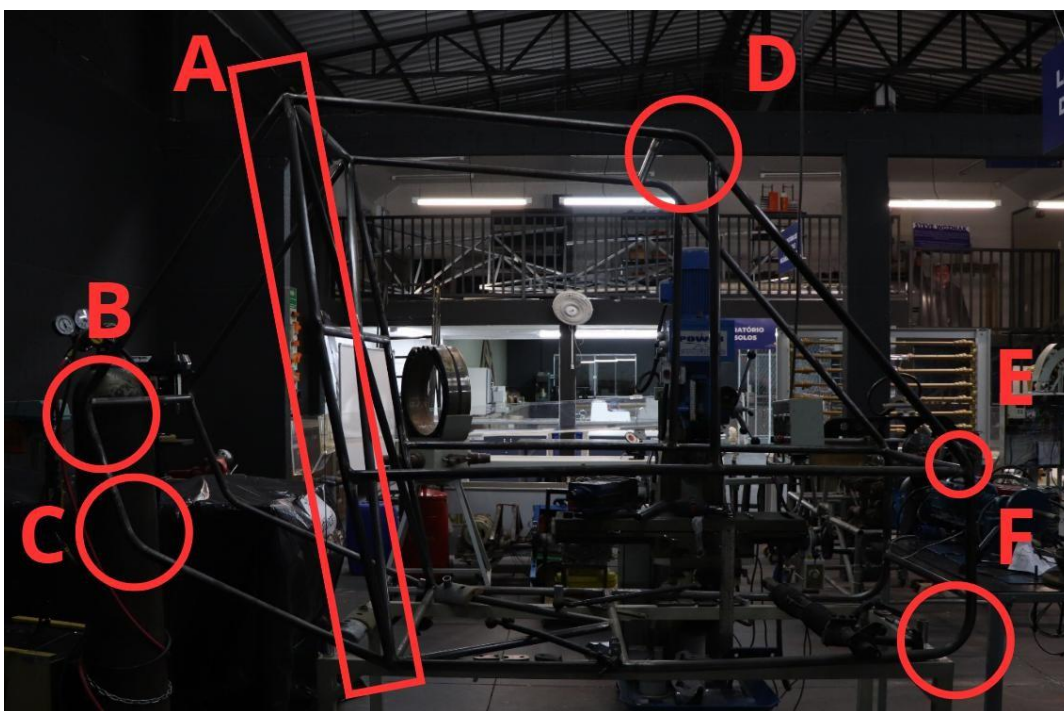
A repetibilidade das simulações e clareza nos passos utilizados para chegar nos valores obtidos é fundamental para o propósito do trabalho, evitando erros e

validando o modelo. As informações que serão armazenadas servem para o suporte das futuras equipes, assim auxiliando na continuidade de estudos dentro do projeto e permitir a análise crítica para mudanças estruturais futuras e simulações subsequentes.

2.1 MODELAGEM 3D

Para realização do modelo 3D foram extraída as principais medidas do chassi no laboratório utilizando a ferramenta trena, levando em consideração o centro da tubulação, após a obtenção das dimensões lineares foi mapeado os ângulos e raios do chassi, apresentado na Figura 2.

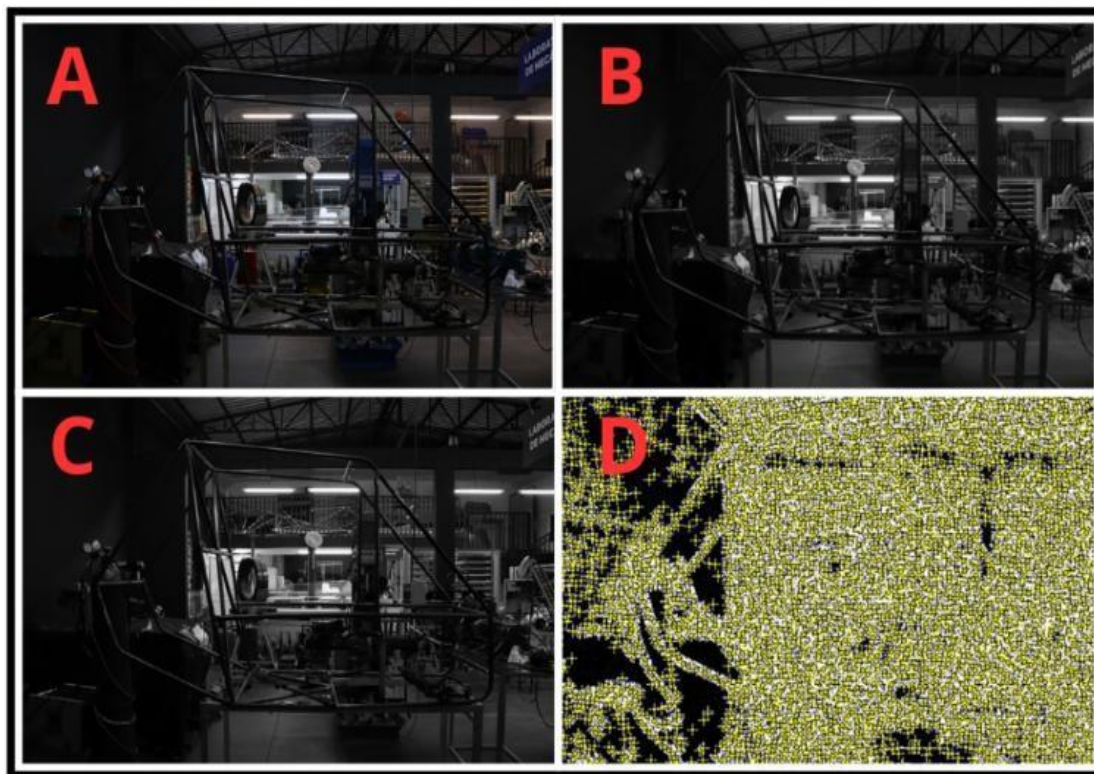
Figura 2 – Ângulos e raios



Fonte: Autor (2025).

Para a obtenção dos ângulos e raios foi utilizado os artifícios presentes no software ImageJ, utilizando a imagem presente na Figura 2. O tratamento da imagem foi feito com os recursos 32 bits, Sharpen, Find Edges e Maximun, devido à dificuldade de separa o fundo (ambiente) da estrutura analisada. A Figura 3 representa os quatro recursos em ordem de execução de A até D.

Figura 3 – Tratamento de imagem

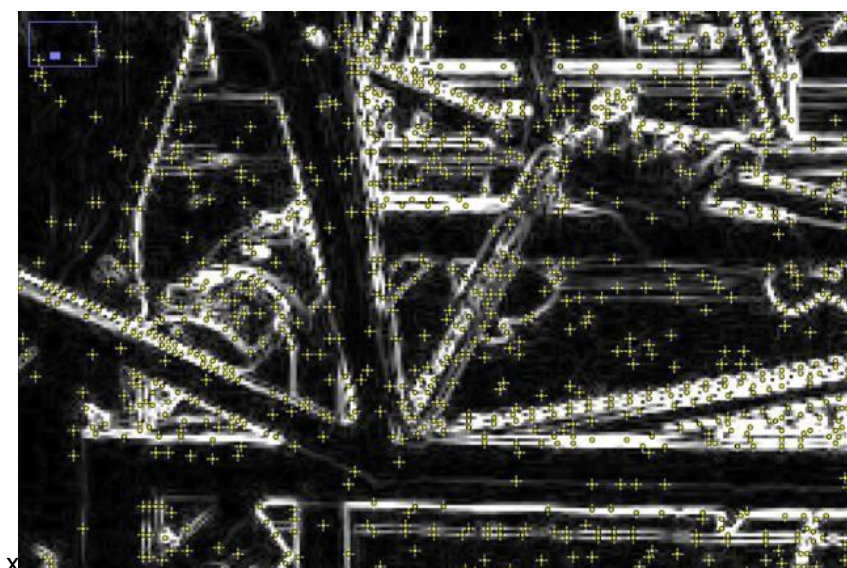


Fonte: Autor (2025).

O primeiro recurso utilizado para a criação da imagem foi a mudança para 32 bits, item A, aumentando a profundidade da imagem intensificando o Sharpen, item B, que acentua os contrastes de branco e preto permitindo a melhor visualização e preparando a imagem para o uso do Find Edges, item C, que destaca os lugares que possuem mudança de coloração brusca permitindo maior eficiência no Maximun, item D, marca os lugares de maior claridade.

Como a ferramenta “Maximun” marca todos os pontos de luz destacados, muitos pontos de luz foram marcados como mostrada no item D da Figura 3, sendo necessário aproximar para o ponto de interesse para que houvesse nitidez na imagem, permitindo a utilização das ferramentas de medição de ângulo apresentado na Figura 4 abaixo.

Figura 4- Aproximação do ponto analisado



Fonte: Autor (2025).

Os pontos que visualmente condizem com a extremidade da tubulação foram escolhidos as linhas que condizem com a maior intensidade de luz, sendo medido os ângulos formados entre dois pontos que pertencem a mesma reta, esses foram medidos através da ferramenta line e measure, sendo realizadas 10 medições em 10 pares diferentes, sendo 5 realizadas em um lado e 5 no outro. Os valores obtidos estão organizados e apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Média dos ângulos obtidos

Item	Ângulo
1	103,85
2	104,66
3	102,47
4	103,36
5	103,45
6	103,69
7	103,63
8	102,9
9	103,64
10	104,04
Média	103,57

Fonte: Autor (2025).

O ângulo usado para definir a parte A da Figura 2 é de 103,57. Em sequência foi extraído os raios presentes no modelo físico, destacados nos itens B, C, D, E e F

da Figura 2, para isso foi definido a distância real por pixel para a utilização do Measure, baseando-se em medidas conhecidas no chassi, resultando em uma escala de 0,5278 pixels = 1mm real. Sendo utilizado a ferramenta “Oval” como mostrado logo abaixo na tabela 2.

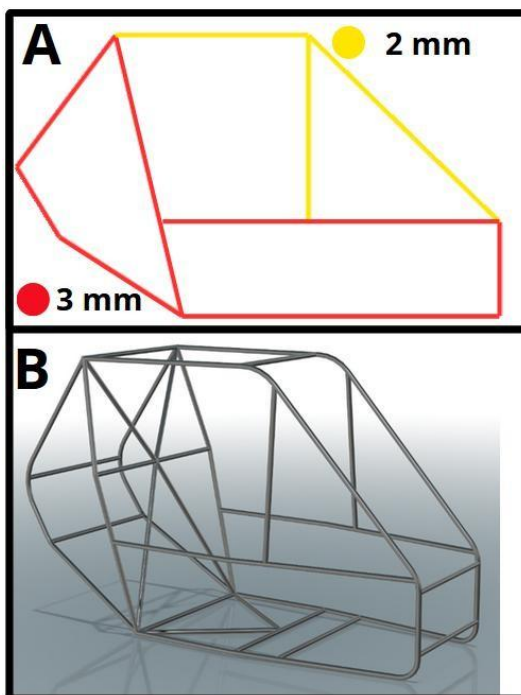
Tabela 2 – Raios obtidos

Curva	Raio
B	224
C	140
D	230
E	150
F	90

Fonte: Autor (2025).

A modelagem das estruturas tubulares foi levada em consideração o diâmetro externo de 1 polegada, e duas espessuras distintas em diferentes regiões do veículo, com sua base e cofre do motor possuindo 3 mm e o restante do veículo sendo construído com tubos de 2 mm. Com as informações obtidas pelo software Imagej foi criado o frame 3D através das medidas do chassi. Condição e modelagem ilustrada pela Figura 5 pelas letras A e B respectivamente.

Figura 5 – tubulação e projeto tridimensional

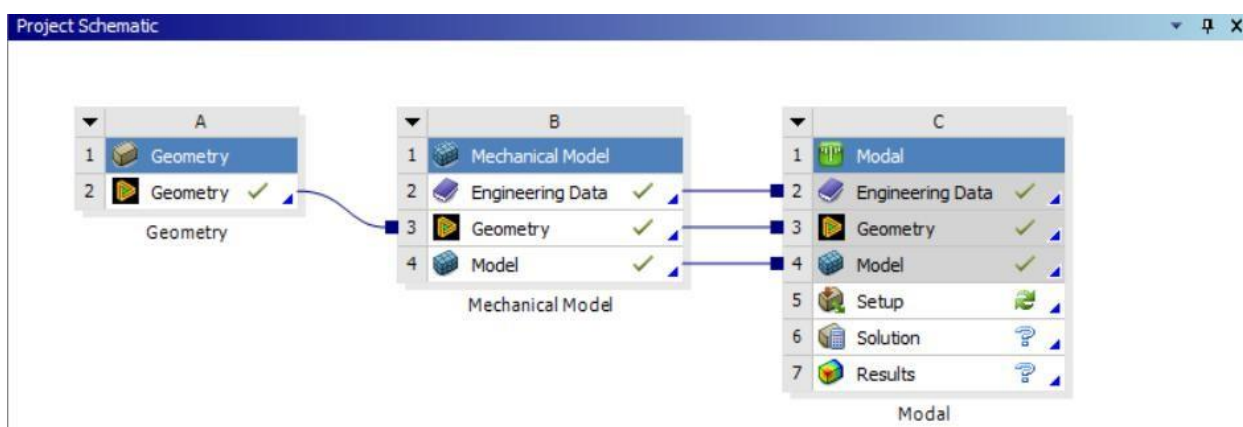


Fonte: Autor (2025).

2.2 SIMULAÇÃO

O ambiente de simulação foi criado no software Ansys workbench 2025 R2, sendo importado três plugins, Geometry (A), Mechanical Model (B) e por fim o plugin modal (C). O Geometry está contido dentro do Mechanical Model e ambos estão contidos dentro da análise modal, a separação dos plugins se enquadra em uma boa pratica a fim de evitar erros e agilizar a utilização da geometria para outros plugins de análise, gerando assim o as ligações vistas na Figura 6.

Figura 6 – Plugins para a simulação

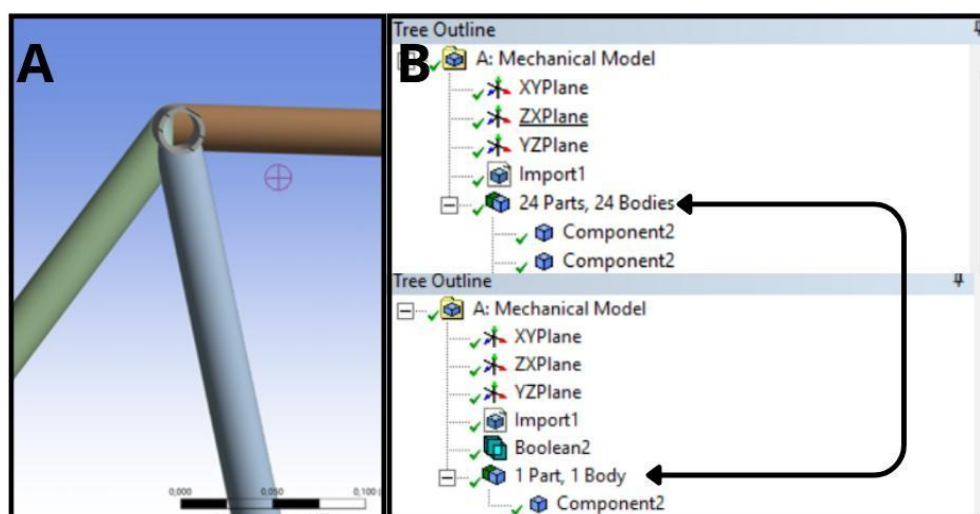


Fonte: Autor (2025).

Devido a abordagem apresentada na Figura 6, cada item representa um passo preparatório para a simulação. O plugin Geometry (A) definiu o modelo tridimensional, o plugin Mechanical Model (B) definiu o material e a malha, seguindo para o plugin modal (C) que gerou as informações das vibrações e modos de vibrar com base nas informações de A e B. A organização utilizada permite que as alterações realizadas em um plugin passe para os outros plugins em forma de cascata.

Após a organização dos plugins, foi realizada a importação do modelo geométrico para o software, sendo utilizada a extensão STEP 214, como recomendada pela Ansys. A Figura 7 apresenta o modelo que foi interpretado corretamente como oco (A), porém apresenta a presença de diversos corpos, o que pode gerar algum erro por parte do software, problema resolvido com a ferramenta Boolean (B), gerando a junção e permitindo a análise do chassi.

Figura 7 – Tubulação oca e tratamento de corpos com Boolean

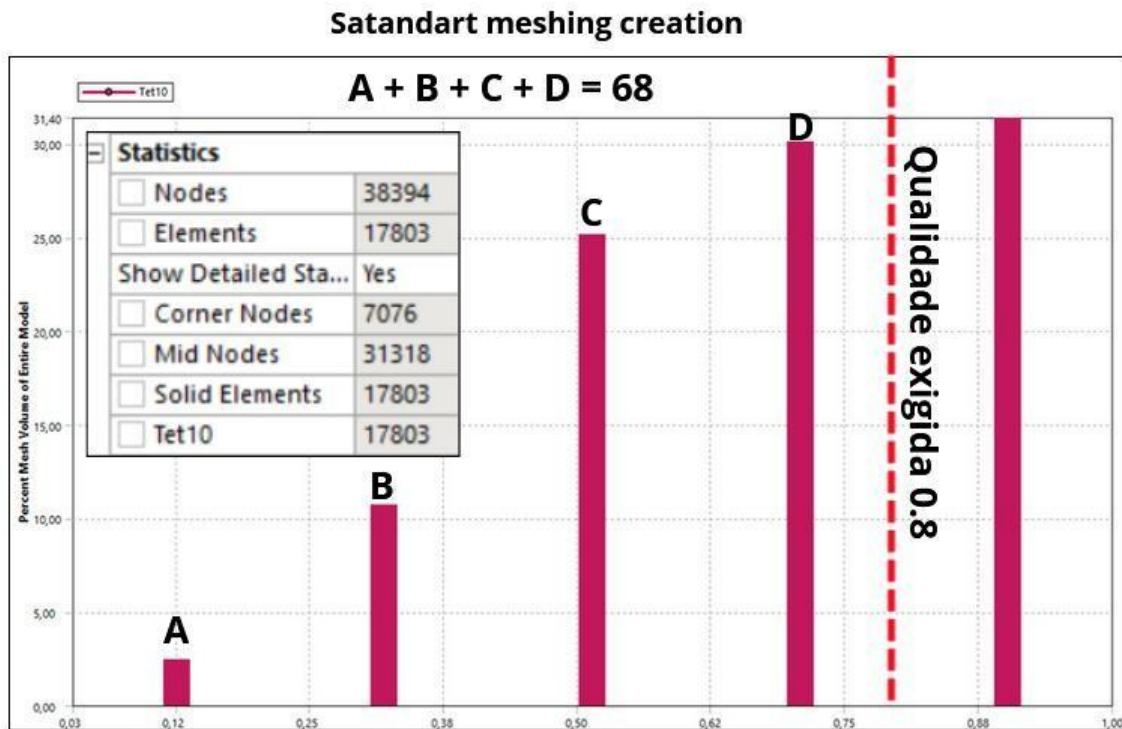


Fonte: Autor (2025).

Na criação do meshing foi utilizado uma malha triangular, este tipo de elemento pode apresentar menor eficiência em tubulações quando comparado com o elemento quadrilátero, devido sua menor complexidade estrutural. O modelo triangular foi escolhido devido sua usabilidade e bom comportamento com o software Ansys, que tende a ter mais facilidade para geração automática de malhas desta natureza e quando apresenta boa qualidade geométrica gera valores confiáveis.

A qualidade dos elementos triangulares da malha criada foi medida utilizando a ferramenta Qualidade dos Elementos, ela retorna valores de zero (0) a um (1), o valor de um (1) indica um elemento de boa qualidade e zero (0) um elemento com baixa qualidade. Para análise da qualidade da malha foi definido que o 80% dos elementos devem possuir resultados acima de 0,8. A primeira malha foi realizada com as configurações padrões do software, onde 68% dos elementos representam baixa qualidade geométrica, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Qualidade dos elementos com as configurações padrões

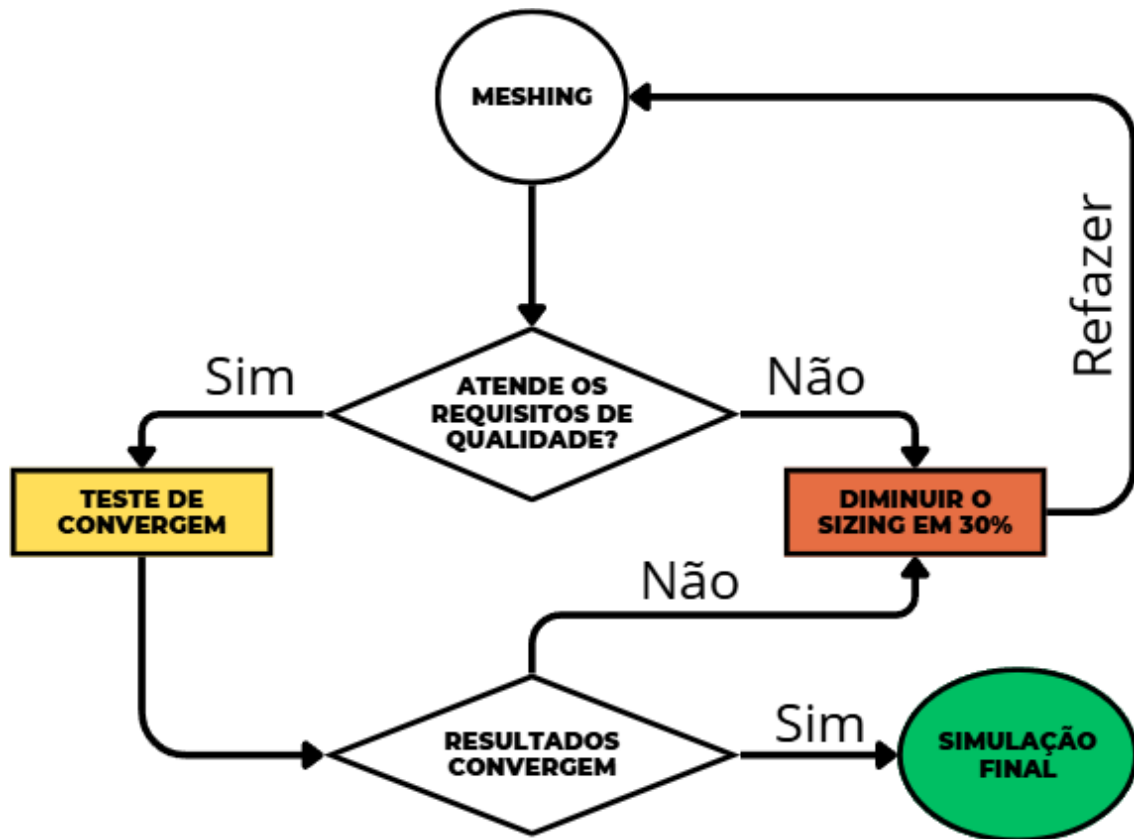


Fonte: Autor (2025).

A qualidade da malha está diretamente relacionada ao tamanho dos elementos que a constituem, o recurso que controla o tamanho das geometrias finitas do modelo é o próprio sizing. Para atingir as especificações de qualidade da malha foi realizada a redução das geometrias com o recurso adequado. Para manter o controle do método utilizado foi definida uma regra, que toda vez que a malha fique fora do padrão de qualidade, será realizado uma redução em seu tamanho de 30%, para que seja encontrado o melhor tamanho de malha através da redução gradual. Com o tamanho definido a malha passara pelo processo de convergência de resultados.

O processo de convergência garante que a malha está retornando valores iguais, aumentando a confiabilidade dos resultados. A convergência, consiste em uma nova redução da malha, diminuindo seu tamanho em 5%, 10% e 15%, esta redução é realizada para comparar os resultados da simulação. A malha está suficientemente refinada caso os valores gerados possuam uma diferença de 1% em relação ao tamanho dos elementos escolhidos no primeiro passo, exemplificado na Figura 9.

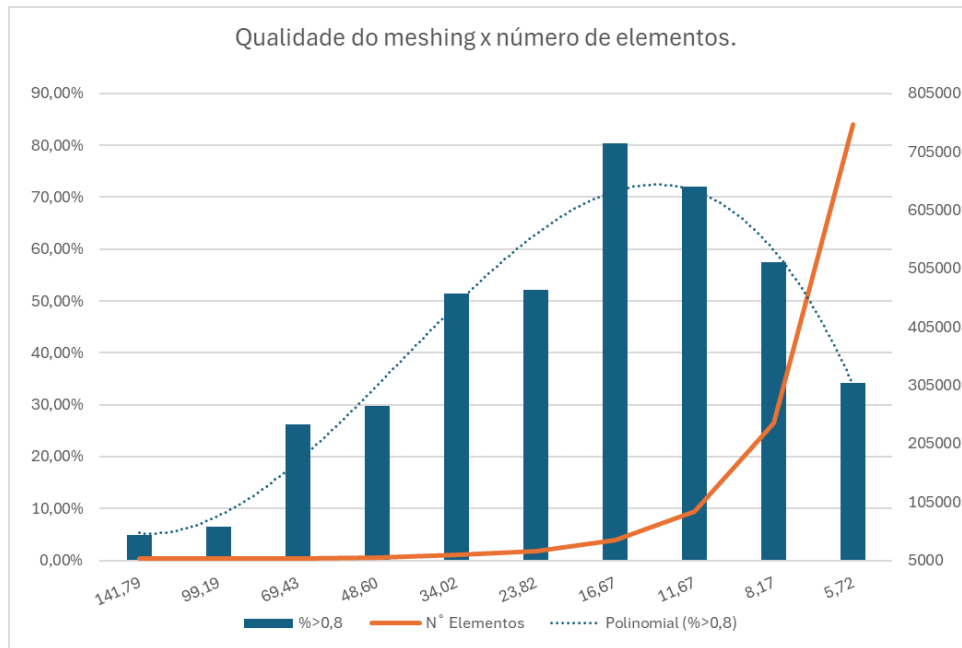
Figura 9 – Metodologia para o uso da ferramenta sizing



Fonte: Autor (2025).

Seguindo o fluxograma como forma de metodologia para a formação do meshing foi possível verificar o comportamento da malha conforme a configuração do sizing e os impactos na quantidade de elementos presentes no modelo. Os valores foram plotados em um gráfico com três eixos, o vertical localizado na esquerda indica a porcentagem de elementos dentro da meta da qualidade, o segundo localizado na vertical da direita representa a quantidade de elementos e o eixo horizontal o tamanho do sizing, apresentados na Figura 10.

Figura 10– Resultados do sizing



Fonte: Autor (2025).

A qualidade (Coluna azul) e a quantidade de elementos presentes no modelo criado (Linha Laranja), a obtenção da meta foi obtida com a malha de sizing igual a 16,67 mm e com o número de elementos menor que 105 mil, valor reduzido quando comparado com malhas mais finas e de menor qualidade. A convergência foi testada com o sizing configurado nos valores de 15,83 mm, 15,00 mm e 14,16 mm, ou seja, uma redução de 5%, 10% e 15%, após isso comparada com a configuração de sizing igual a 16,67 mm organizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Diferença percentual no método de convergência de resultados

Modo de vibrar	refino 5%	refino 10%	refino 15%
7°	0,36%	0,53%	0,51%
8°	0,09%	0,22%	0,16%
9°	0,42%	0,73%	0,70%

Fonte: Autor (2025).

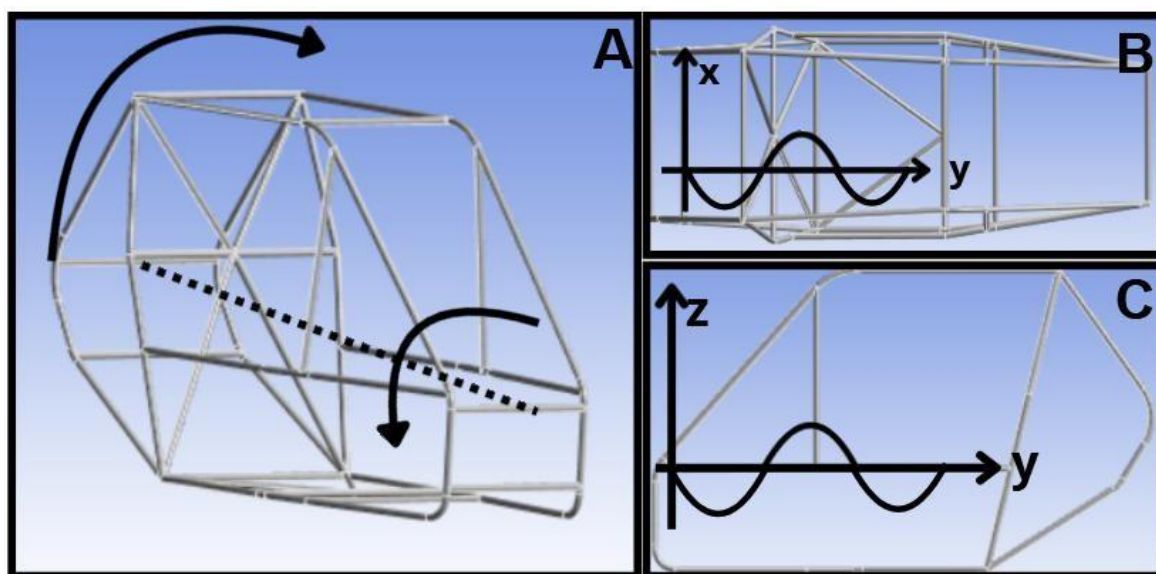
Os valores das simulações realizadas com o tamanho dos elementos de 15,83 mm, 15,00 mm e 14,16 mm geraram resultados muito próximos, com a diferença máxima de 0,73%, isto significa que os valores obtidos tiveram 99,27% de fidelidade,

definindo a malha como suficientemente refinada, permitindo assim a continuidade do processo de simulação.

2.3 VIBRAÇÃO DE INTERESSE.

As vibrações geradas foram classificadas com base na direção da onda, podendo ser torcional, ou seja, a propagação da energia ocorre em um sentido de rotação horário e anti-horário em diferentes partes do chassi, a segunda forma será axial, com sua amplitude no eixo X, se difundindo pelos eixos XY e a vibração longitudinal, com sua amplitude no eixo Z, que se propaga pelos eixos YZ, cada forma está representada na Figura 11, A, B e C respectivamente.

Figura 11 – Classificação das formas de vibrar



Fonte: Autor (2025).

As frequências geradas pelo motor podem variar conforme a aceleração, sendo o ponto de interesse o de maior excitação possível, devido ao estresse gerado por essa condição na estrutura, o modelo de motor utilizado é o TE150-XP, desenvolvido pela empresa Toyama, ao verificar no manual é encontrada a rotação máxima de 3600 RPM em aceleração, ou seja, 60 Hz, sendo considerada a frequência de interesse desse trabalho.

A segunda frequência a ser considerada é a gerada pelos pneus na estrutura, sendo desconsiderado possíveis vibrações forçadas ocasionadas pelo ambiente,

desbalanceamento, qualidade da borracha e sulcos presentes no pneu. Levando em conta a roda de 15 polegadas mais o pneu com o perfil 195/65, foram realizadas as contas necessárias para obter o diâmetro, a circunferência, a velocidade de 30 km/h em m/s e pôr fim a frequência da roda em Hz, na Tabela 4 é apresentado as fórmulas e padrões.

Tabela 4 – fórmulas utilizadas

Item	Fórmula
Diâmetro total	$(Aro * 25,4) + 2 * \text{Altura do perfil}$
Circunferência	$\pi * \text{Diâmetro total}$
Velocidade em m/s	30 km/h -> 8,33 metros / segundos
Frequência	Velocidade/Circunferência

Fonte: Autor (2025).

Aplicando os valores, as rodas transmitem uma excitação de 4,2 Hz, o conjunto roda e pneu não possui uma geometria perfeita, a excitação se torna uma aproximação. Outro ponto de grande importância são os harmônicos, ou seja, múltiplos da frequência causada pela roda, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Harmônicos gerados pela roda

Harmônico	Frequência
1	4,2
2	8,4
3	12,6
4	16,8
5	21
6	25,2
7	29,4
8	33,6
9	37,8
10	42
11	46,2
12	50,4
13	54,6
14	58,8
15	63
16	67,2

Fonte: Autor (2025).

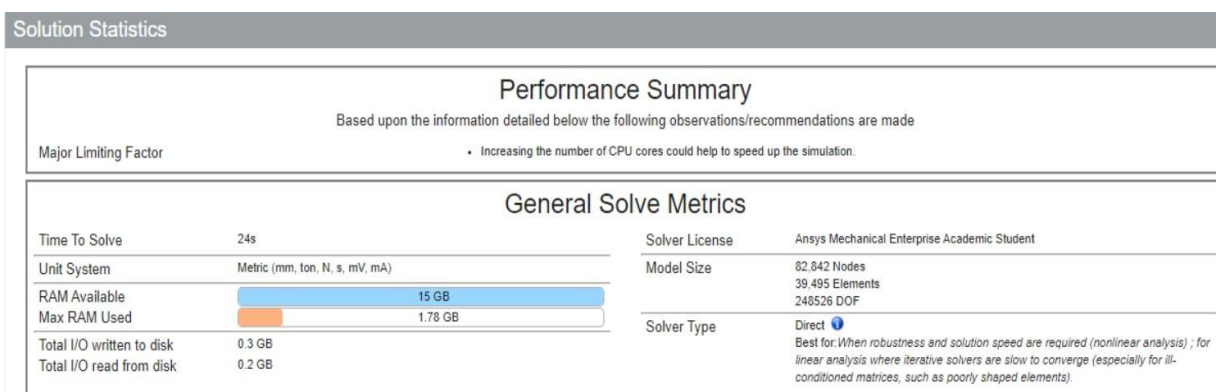
Os 16 harmônicos medidos apresentam resultados que englobam os possíveis valores de interesse, sendo o principal deles a faixa apresentada pelos harmônicos

13 e 14, que se aproximam dos 60 Hz. Esses harmônicos estão na aproximação de um pneu perfeito, podendo haver variações em sua frequência, sendo importante a consideração de valores próximos.

3 RESULTADO E DISCUSSÕES

A malha gerada foi obtida através de processos controlados e seguiu uma metodologia, gerando uma malha com baixo custo computacional, sendo gerados 39.495 elementos e 82.842 nós, valores que geram um baixo custo computacional mesmo utilizando o tipo de solução direto. Para a conclusão foi necessário apenas 1,78 gigabites de RAM e concluindo as simulações em 24 segundos, como mostra o relatório na Figura 12.

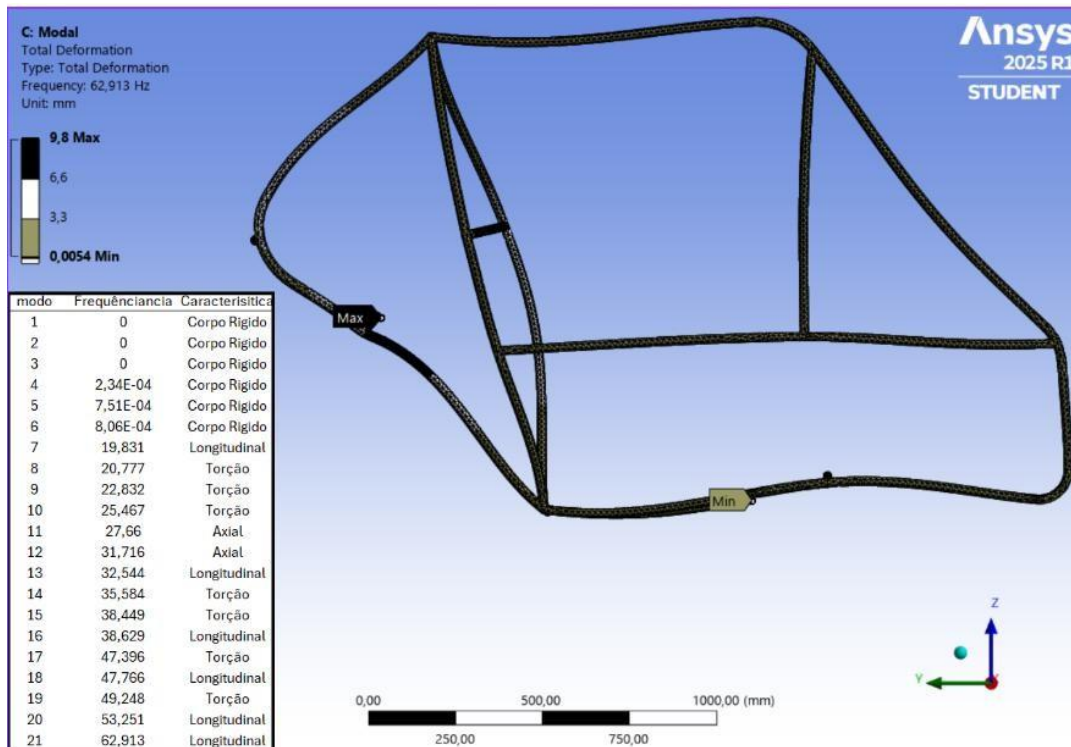
Figura 12 – Estatísticas da solução



Fonte: Autor (2025).

Os resultados da simulação realizada no Workbench 2025 R1 buscaram encontrar as frequências próximas da faixa de excitação de interesse para o projeto, sendo encontradas 7 (sete) reações que correspondem ao movimento vibratório de torção, nos modos 8, 9, 10, 14, 15, 17 e 19, temos 6 (seis) faixas longitudinais, geradas pelos modos 7, 13, 16, 18, 20 e 21, por fim, 2 (duas) faixas axiais, geradas pelos modos 11 e 12, representando o menor índice de ocorrências, como mostrado no canto inferior esquerdo da Figura 13.

Figura 13 – Tabela de vibrações e comportamento estrutural em frequência de 62,9 HZ



Fonte: Autor (2025).

Ao simular a vibração de maior interesse, que corresponde ao modo de vibrar 21, apresenta uma frequência de 62,91 Hz, ou seja, é o modo de vibrar que mais se aproxima das frequências geradas pelo motor de 60 Hz e pelo décimo quarto harmônico produzido pelas rodas, o resultado da amplitude de onda normalizada tem seu valor máximo no bloco do motor e vibra em sentido longitudinal.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.

O trabalho atingiu o resultado esperado, permitindo mapear o projeto original do chassi, criar uma malha e metodologia detalhada para refino dos elementos e realizar a visualização do comportamento da estrutura nas excitações de interesse, além de manter todas as informações acessíveis para as futuras equipes do projeto Offroad da Campo Real, apoiando alterações estruturais e simulações posteriores.

A análise modal de corpo livre mostrou que a vibração de 60 Hz gerada pelo motor pode sim criar o efeito de ressonância, pois está frequência se encontra próxima da frequência natural do chassi, no vigésimo primeiro modo de vibrar (62,91 Hz), junto a isso temos a intensificação da amplitude das ondas causadas pelos harmônicos 13, 14 e 15 das rodas.

A maioria das faixas vibracionais trazem o retorno de torção, esse comportamento é natural devido à natureza tubular da estrutura, porém à proximidade das vibrações longitudinais e de torção podem indicar uma possível falta de rigidez no chassi, esse fenômeno ocorre em três pares, nos modos de vibrar 15 e 16 (38,449 Hz e 38,629 Hz), 17 e 18 (47,396 Hz e 47,766 Hz) e por fim no par 19 e 20 (49,248 Hz e 53,251 Hz).

Os dados mostram um problema de rigidez no sentido longitudinal do chassi, devido ao comportamento da estrutura ao ser excitada pelo motor, juntamente com as vibrações torcionais e longitudinais próximas. O efeito das características encontradas acarreta uma fadiga acelerada e possíveis falhas críticas, sendo necessário implementar um sistema de amortecimento que seja capaz de aumentar a rigidez e alterar a sua frequência natural para faixas seguras, além de reduzir as amplitudes das ondas mitigando os efeitos vibracionais no chassi.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN RAGAB; SALAH ELDIN BAYOUMI. **Engineering solid mechanics : fundamentals and applications**. Estados Unidos: Crc Press, 1999.
- AVELINO ALVES FILHO. **Elementos finitos : a base da tecnologia CAE**. 2º ed. São Paulo: Editora Érica, 2008.
- BALAKUMAR BALACHANDRAN; MAGRAB, E. B. **Vibrations**. 1º ed. Australia ; Clifton Park, N.Y.: Cengage Learning, 2009.
- BATHE, K.-J. **Finite Element Procedures**. S.L.: S.N, 2014.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering : an introduction**. 10º ed. Hoboken, Nj Wiley, 2020.
- DÍEZ, P.; HUERTA, A. Error estimation for adaptive computations of shell structures. **Revue Européenne des Éléments Finis**, v. 9, n. 1-3, p. 49–66, 2000. Acesso em: 18/10/2025.
- FANG, H.; JI, Y.; LI, S.; LIU, H.; WANG, D. RHES: Development of real-time health evaluation system based on human pulse signal utilizing PVDF/PDMS arch-type piezoelectric sensor. **Measurement**, v. 224, n. 113856, p. 113856, 2023. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224123014203>>.

FURTADO, F. M.; FERREIRA, A. C.; SILVA; et al. Simulação dos Efeitos de Tensão nos Silos pelo Método dos Elementos Finitos através do programa computacional SAP 2000. **Revista Brasileira de Filosofia e História**, v. 13, n. 3, p. 3789–3820, 2024. Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas (GVAA). Disponível em: <<https://gvaa.com.br/revista/index.php/RBFH/article/view/10848>>. Acesso em: 18/10/2024.

GALLEGO-JUÁREZJ. A.; GRAFF, K. F. **Power ultrasonics applications of high-intensity ultrasound**. Amsterdam Elsevier/Wp, Woodhead Publ, 2015.

GEORGI, H. **The physics of waves**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1993.

HALLIDAY, D. **Fundamentals of physics**. John Wiley, 2015.

HIBBELER, R. C. **Dinâmica : mecânica para engenharia**. 12º ed. São Paulo (Sp): Pearson Prentice Hall, 2011.

INMAN, D. J. **Engineering vibration**. Boston, Mass.: Pearson, 2013.

JIMIN HE; ZHI-FANG FU. **Modal analysis**. Oxford [U.A.] Butterworth-Heinemann, 2004.

KERSCHEN, G.; WORDEN, K.; VAKAKIS, A. F.; GOLINVAL, J.-C. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 3, p. 505–592, 2006. Acesso em: 20/3/2021.

KING-HAY, Y. **Basic finite element method as applied to injury biomechanics**. London Academic Press, 2018.

LÁSZLÓ PETER KOLLAR; TARJÁN, G. **Mechanics of civil engineering structures**. Duxford, United Kingdom ; Cambridge, Ma: Woodhead Publishing, 2021.

LIJING WANG. **Performance testing of textiles : methods, technology and applications**. Duxford, Uk: Woodhead Publishing Is An Imprint Of Elsevier, 2016.

LIU, G. R. **Meshfree Methods**. CRC Press, 2009.

MALVERN, L. E. **Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium**. Prentice Hall, 1969.

MARCO LÚCIO BITTENCOURT. **Análise computacional de estruturas**. Editora Unicamp, 2011.

NOVOTNY, A. A.; FANCELLO, E. A. Um refinamento h , p e hp adaptativo na análise de flexão de placas semi-espessas. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño em Ingeniería**, v. 14, p. 20–48, 1998.

R KEITH MOBLEY. **Plant engineer's handbook**. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001.

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. 4^o ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SHAMEY, R.; ZHAO, X. **Modelling, Simulation and Control of the Dyeing Process**. Elsevier, 2014.

SOUZA, L. A. S.; SOUZA, S. T. M. APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA DETERMINAÇÃO DA CARGA LIMITE DE ELEMENTOS ESTRUTURAIIS DE ALTO DESEMPENHO. **Blucher Mechanical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 4836–4845, 2014. São Paulo: Editora Edgard Blücher. Acesso em: 20/11/2025.

VALLIAPPAN, S.; KHALILI, N. **Computational Mechanics**. Elsevier Science, 2001.

ZHUMING BI. **Finite element analysis applications : a systematic and practical approach**. Amsterdam: Academic Press, 2018.