

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**AMJAD GALIB AHMAD GNIMAT**

**ANÁLISE DINÂMICA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DO  
CHASSI DE UM TRAILER DESTINADO AO TRANSPORTE DE IDOSOS E  
DEFICIENTES FÍSICOS**

Ilha Solteira  
2023

**AMJAD GALIB AHMAD GNIMAT**

**ANÁLISE DINÂMICA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DO  
CHASSI DE UM TRAILER DESTINADO AO TRANSPORTE DE IDOSOS E  
DEFICIENTES FÍSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira – UNESP  
como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Engenheiro  
Mecânico.

**Orientador:**

Prof. Dr. Márcio Antonio Bazani

Ilha Solteira  
2023

FICHA CATALOGRÁFICA  
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G572a Gnimat, Amjad Galib Ahmad.  
Análise dinâmica pelo método dos elementos finitos do chassi de um trailer destinado ao transporte de idosos e deficientes físicos / Amjad Galib Ahmad Gnimat. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023  
87 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso ( Graduação em Engenharia Mecânica) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Márcio Antonio Bazani

Inclui bibliografia

1. Análise dinâmica. 2. Método dos elementos Finitos. 3. Frequências naturais. 4. Modos de vibrar. 5. Chassi.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**TÍTULO:** Análise dinâmica pelo Método dos Elementos Finitos do chassi de um trailer destinado ao transporte de idosos e deficientes físicos

**ALUNO:** Amjad Galib Ahmad Gnimat

**RA:** 172054711

**Orientador:** Prof. Dr. Márcio Antonio Bazani

**Aprovado ( X ) – Reprovado ( ) pela Comissão Examinadora**

**Nota obtida:** 9,5

**Comissão Examinadora:**

Prof. 

Presidente (Orientador)

**Prof. Dr. Márcio Antonio Bazani**

Prof. 

**Doutorando. Eduardo Preto**

Prof. 

**Prof. Dr. Antonio de Pádua Lima Filho**



*Assinatura do Aluno*

Ilha Solteira (SP), 19 de outubro de 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por todas as oportunidades e conquistas as quais tive, independentemente de suas dimensões.

Em seguida, agradeço a minha família, por todos os aprendizados, convivências e apoio nos momentos mais preocupantes e difíceis, sejam aqueles vividos durante a graduação ou durante a vida como um todo.

Agradeço grandiosamente o professor Márcio Antonio Bazani, pela orientação prestada neste trabalho e toda a atenção e prestatividade que ofereceu, não somente durante a elaboração deste trabalho mas também no decorrer do curso de Engenharia Mecânica.

Deixo meus agradecimentos também ao professor Antonio de Pádua Lima Filho pelo fornecimento do desenho CAD do chassi da Carruagem da Alegria, sem o qual não seria possível a elaboração deste trabalho, e também por toda as aulas lecionadas e aprendizados.

Não menos importante, estendo meus agradecimentos a meus colegas de graduação, pelos bons momentos cultivados e aprendizados, e também a toda equipe da FEIS, que contribuiu fundamentalmente para a minha formação.

*“A vitória não pertence aos mais fortes,  
mas sim aos que a perseguem  
por mais tempo”. Napoleão Bonaparte.*

## Resumo

Em um projeto de engenharia, o estudo e o conhecimento da resposta dinâmica de um sistema é crucial para que se evite que este venha a sofrer comportamentos indesejados, garantindo então que seu desempenho e vida útil não sejam prejudicados, sendo isto possível por meio da análise dinâmica. O Método dos Elementos Finitos permite a obtenção destas informações, possibilitando que a análise dinâmica seja realizada através da análise modal, a qual permite que as frequências naturais e modos de vibrar de uma estrutura sejam determinados, sendo então uma ferramenta computacional de grande importância neste caso, principalmente pelo fato de não requerer que protótipos físicos sejam construídos para a obtenção da resposta dinâmica de uma determinada estrutura, poupando tempo e gastos financeiros. A Carruagem da Alegria, um equipamento construído na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira destinado ao passeio de pessoas idosas e com deficiência física, apresentava o projeto de seu chassi escasso de informações a respeito de seu comportamento dinâmico. Diante disto, no presente trabalho utilizou-se a análise dinâmica pelo Método dos Elementos Finitos a favor do enrobustecimento do projeto do chassi em relação ao conhecimento dinâmico. Pelo software comercial Ansys, a estrutura foi simulada e obteve-se que o chassi sofre o fenômeno da ressonância em duas situações, ou seja, quando o equipamento é carregado com um passageiro em sua parte dianteira e um na parte traseira e também quando carregado com dois passageiros na parte dianteira e um na traseira. Posto isso, um estudo investigativo acerca de modificações estruturais e alteração no material de construção do chassi foi realizado, simulando diversas opções de chassi e executando uma análise comparativa entre os valores de frequências naturais obtidos e a faixa da frequência de excitação mapeável incidente no equipamento. Como resultado, foram obtidas opções de chassi melhores a serem empregadas no equipamento, uma vez que foi possível sair de um chassi tido como indesejado e não recomendado para o projeto da Carruagem da Alegria e por fim chegar em opções mais adequadas, as quais não sofrem com o fenômeno da ressonância.

**Palavras-chave:** Análise dinâmica. Método dos Elementos Finitos. Frequências naturais. Modos de vibrar. Chassi.

## Abstract

In an engineering project, the study and knowledge of the dynamic response of a system is crucial to prevent it from suffering unwanted behaviors, then ensuring that its performance and life cycle are not harmed, this being possible through dynamic analysis. The Finite Element Method allows to obtain this information, making possible dynamic analysis to be performed through modal analysis, which allows to determine the natural frequencies and modes of vibration of a structure, being then a computational tool of great importance in this case, mainly because it does not require physical prototypes to be built to obtain the dynamic response of a given structure, saving time and financial expenses. The Carriage of Joy, an equipment built at the Ilha Solteira School of Engineering intended for the ride of elderly and physically disabled people, had the design of its chassis with little information about its dynamic behavior. Given this, in the present work the dynamic analysis was used by the Finite Element Method to strengthen the dynamic knowledge of chassis design. By Ansys commercial software, the structure was simulated and it was obtained that the chassis suffers the phenomenon of resonance in two situations, that is, when the equipment is loaded with a passenger in its front part and one in the back and also when loaded with two passengers in the front part and one in the back. Then, an investigative study about structural modifications and change in the chassis construction material was performed, simulating different chassis options and performing a comparative analysis between the natural frequency values obtained and the range of the mappable excitation frequency incident on the equipment. As a result, better chassis options were obtained to be used in the equipment, because it was possible to leave out a chassis considered unwanted and not recommended for the Carriage of Joy project and then arrive at more suitable options, which do not suffer from the phenomenon of resonance.

**Keywords:** Dynamic analysis. Finite Element Method. Natural frequencies. Modes of vibration. Chassis.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	- Carruagem da Alegria.....	17
<b>Figura 2</b>	- Esquemático dos benefícios da Carruagem da Alegria e a relação entre si.....	18
<b>Figura 3</b>	- Distribuição da população brasileira por sexo, segundo os grupos de idade.....	19
<b>Figura 4</b>	- Ole Kassow conduzindo um equipamento do projeto <i>Cycling Without Age</i> .....	20
<b>Figura 5</b>	- Parte estrutural da Carruagem da Alegria.....	21
<b>Figura 6</b>	- Assentos da Carruagem da Alegria.....	22
<b>Figura 7</b>	- Triciclo elétrico o qual traciona a Carruagem da Alegria.....	22
<b>Figura 8</b>	- Pitágoras observando os sons dos martelos de uma forjaria.....	24
<b>Figura 9</b>	- Pitágoras em suas experiências com martelos e sinos em seu laboratório.....	24
<b>Figura 10</b>	- Peneira vibratória industrial.....	26
<b>Figura 11</b>	- Colapso da ponte Tacoma Narrows devido a ressonância.....	27
<b>Figura 12</b>	- Sistema massa-mola não amortecido, com um grau de liberdade.....	28
<b>Figura 13</b>	- Diagrama de corpo livre da massa, submetida a um deslocamento positivo.....	29
<b>Figura 14</b>	- Sistema massa-mola com vários graus de liberdade.....	30
<b>Figura 15</b>	- Exemplos de modo de vibrar.....	33
<b>Figura 16</b>	- Exemplo de modelo discretizado.....	34
<b>Figura 17</b>	- Metodologia empregada na análise dinâmica do chassi da Carruagem da Alegria.....	35
<b>Figura 18</b>	- Padrão de simulação proposto pelo Ansys.....	35
<b>Figura 19</b>	- Ambiente <i>DesignModeler</i> , utilizado para importar o desenho CAD do chassi para o Ansys.....	37
<b>Figura 20</b>	- Chassi da Carruagem no ambiente <i>Mechanical</i> do software Ansys.....	40
<b>Figura 21</b>	- Região do chassi da Carruagem da Alegria sinalizada como contendo erro e mensagem de advertência referente ao fato.....	42
<b>Figura 22</b>	- Divisão do chassi em nomenclaturas .....	44
<b>Figura 23</b>	- Primeiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de translação.....	45
<b>Figura 24</b>	- Segundo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de translação.....	45

<b>Figura 25</b>	- Terceiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de translação.....	45
<b>Figura 26</b>	- Quarto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de rotação.....	46
<b>Figura 27</b>	- Quinto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de rotação.....	46
<b>Figura 28</b>	- Sexto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de rotação.....	46
<b>Figura 29</b>	- Sétimo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de flexão.....	47
<b>Figura 30</b>	- Oitavo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, com a ocorrência de torção e rotação.....	47
<b>Figura 31</b>	- Nono modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, com maior oscilação dos apoios diferenciais traseiros em relação às demais oscilações existentes neste modo.....	48
<b>Figura 32</b>	- Décimo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, com torção da região inferior do chassi e oscilação dos eixos diferenciais.....	48
<b>Figura 33</b>	- Décimo primeiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, predominando deformações de torção.....	49
<b>Figura 34</b>	- Décimo segundo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, predominando a oscilação dos eixos diferenciais traseiros.....	49
<b>Figura 35</b>	- Uma das rodas do chassi, cuja conexão com seu eixo diferencial estabelece uma restrição na movimentação do chassi.....	51
<b>Figura 36</b>	- Eixos diferenciais traseiros selecionados como elementos fixos na análise modal de corpo rígido.....	51
<b>Figura 37</b>	- Acoplamento ligado ao chassi da Carruagem da Alegria, para a conexão desta com o elemento responsável por tracioná-la.....	52
<b>Figura 38</b>	- Eixo que interliga a estrutura com o equipamento tracionador selecionado como elemento fixo na análise modal de corpo rígido.....	52
<b>Figura 39</b>	- Fixações existentes no chassi.....	53
<b>Figura 40</b>	- Passageiros dispostos na Carruagem da Alegria.....	53
<b>Figura 41</b>	- Regiões na parte traseira do chassi nas quais é aplicada a massa dos passageiros.....	54
<b>Figura 42</b>	- Regiões na parte dianteira do chassi nas quais é aplicada a massa dos passageiros.....	54

<b>Figura 43</b>	- Primeiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, com a presença de flexão parcial de sua região central.....	56
<b>Figura 44</b>	- Segundo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, sendo verificada a torção de sua região central.....	57
<b>Figura 45</b>	- Terceiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, com a ocorrência de torção em toda a extensão de sua região central.....	57
<b>Figura 46</b>	- Quarto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, sendo presente a torção de sua região central.....	58
<b>Figura 47</b>	- Quinto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, similar ao segundo modo porém com deformações mais acentuadas.....	58
<b>Figura 48</b>	- Sexto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, com a parte dianteira da região central do chassi distinguindo-se por suas deformações.....	59
<b>Figura 49</b>	- Sétimo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, apresentando maior quantidade de elementos deformáveis.....	59
<b>Figura 50</b>	- Oitavo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, destacando-se pela torção da região inferior do chassi.....	60
<b>Figura 51</b>	- Nono modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, ocorrendo a torção de grande parte do chassi.....	60
<b>Figura 52</b>	- Décimo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, com destaque para a maior deformação na parte traseira da região central.....	61
<b>Figura 53</b>	- Décimo primeiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, predominando-se a alta torção da região inferior do chassi.....	62
<b>Figura 54</b>	- Décimo segundo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, coexistindo flexão e torção, respectivamente, da região inferior e região central do chassi.....	62
<b>Figura 55</b>	- Primeira configuração do chassi, em seu formato original (Primeira vista).....	66
<b>Figura 56</b>	- Primeira configuração do chassi, em seu formato original (Segunda vista).....	66
<b>Figura 57</b>	- Segunda configuração do chassi, com a indicação dos travamentos inseridos.....	67
<b>Figura 58</b>	- Terceira configuração do chassi, sinalizando o local da modificação.....	67
<b>Figura 59</b>	- Terceira configuração do chassi, apresentando os reforços inseridos na parte inferior.....	68

<b>Figura 60</b>	- Quarta configuração do chassi, consistindo na combinação da modificação presente na segunda e terceira configuração.....	68
<b>Figura 61</b>	- Configurações do chassi consideradas no estudo das modificações da estrutura.....	69
<b>Figura 62</b>	- Critério para a classificação das frequências naturais obtidas nas simulações.....	72

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	- Autonomias do triciclo elétrico o qual traciona a Carruagem da Alegria.....	23
<b>Tabela 2</b>	- Propriedades dos materiais considerados nas simulações do chassi.....	38
<b>Tabela 3</b>	- Parâmetros da malha utilizada nas simulações.....	39
<b>Tabela 4</b>	- Valores das frequências naturais do chassi obtidas durante a análise modal de corpo livre indicatários de erro na geometria.....	42
<b>Tabela 5</b>	- Valores das frequências naturais do chassi obtidas durante a análise modal de corpo livre após a correção de erro na geometria.....	43
<b>Tabela 6</b>	- Massas aplicadas sobre o chassi da Carruagem da Alegria.....	55
<b>Tabela 7</b>	- Valores das frequências naturais do chassi obtidas durante a análise modal de corpo rígido.....	55
<b>Tabela 8</b>	- Faixa de rotação do motor elétrico empregado no triciclo elétrico e frequência correspondente.....	63
<b>Tabela 9</b>	- Possíveis posições dos passageiros na Carruagem da Alegria e disposições das massas no chassi.....	71

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a primeira configuração do chassi (estrutura original) feita de aço estrutural.....	74
<b>Quadro 2</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a segunda configuração do chassi feita de aço estrutural.....	75
<b>Quadro 3</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a terceira configuração do chassi feita de aço estrutural.....	75
<b>Quadro 4</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a quarta configuração do chassi feita de aço estrutural.....	76
<b>Quadro 5</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a primeira configuração (estrutura original) do chassi feita de alumínio.....	76
<b>Quadro 6</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a segunda configuração do chassi feita de alumínio.....	77
<b>Quadro 7</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a terceira configuração do chassi feita de alumínio.....	77
<b>Quadro 8</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a quarta configuração do chassi feita de alumínio.....	78
<b>Quadro 9</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a primeira configuração (estrutura original) do chassi feita de fibra de carbono.....	78
<b>Quadro 10</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a segunda configuração do chassi feita de fibra de carbono.....	79
<b>Quadro 11</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a terceira configuração do chassi feita de fibra de carbono.....	79
<b>Quadro 12</b>	- Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a quarta configuração do chassi feita de fibra de carbono.....	80

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Ampere
a.C.	Antes de Cristo
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CDC	<i>Center for Disease Control</i>
EUA	Estados Unidos da América
GPa	Gigapascal
Hz	Hertz
Kg	Quilograma
MEF	Método dos Elementos Finitos
m	Metro
mm	Milímetro
OMS	Organização Mundial da Saúde
Pa	Pascal
RPM	Revoluções por Minuto
Unesp	Universidade Estadual Paulista
V	Volt
W	Watt

## LISTA DE SÍMBOLOS

$t$	Tempo
$\vec{F}(t)$	Vetor força
$m$	Massa
$x$	Deslocamento
$\vec{x}$	Vetor deslocamento
$\dot{x}$	Velocidade
$\dot{\vec{x}}$	Vetor velocidade
$\ddot{x}$	Aceleração
$\ddot{\vec{x}}$	Vetor aceleração
$k$	Rigidez
$\omega_n$	Frequência natural
$[m]$	Matriz de massa
$[k]$	Matriz de rigidez
$A, A_0$	Constantes
$x_0$	Valor de $x$ em $t = 0$
$\dot{x}_0$	Valor de $\dot{x}$ em $t = 0$
$\phi_0$	Ângulo de fase
$sen$	Seno
$tg$	Tangente
$\{X\}$	Matriz modal
$Det$	Determinante

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
1.1 A CARRUAGEM DA ALEGRIA.....	17
1.1.1 Origem.....	20
1.1.2 Detalhes técnicos.....	21
1.2 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DAS VIBRAÇÕES.....	23
1.3 ANÁLISE DINÂMICA.....	27
1.3.1 Análise dinâmica de um sistema com um grau de liberdade.....	28
1.3.2 Análise dinâmica de um sistema com vários graus de liberdade.....	30
1.4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	33
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	35
2.1 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA.....	36
2.2 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS E SUAS PROPRIEDADES.....	37
2.3 DEFINIÇÃO DA MALHA.....	39
2.4 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO (SETUP).....	39
2.5 SOLUÇÃO.....	40
<b>3. RESULTADOS</b> .....	41
3.1 ANÁLISE MODAL DE CORPO LIVRE.....	41
3.2 ANÁLISE MODAL DE CORPO RÍGIDO.....	50
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DE MODIFICAÇÕES NO CHASSI.....	65
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	82
<b>5. REFERÊNCIAS</b> .....	85

## 1. INTRODUÇÃO TEÓRICA

### 1.1 A CARRUAGEM DA ALEGRIA

Visando a promoção da saúde e bem estar de pessoas idosas e com deficiência física, tal como deficiência motora e dificuldade na marcha, além de contribuir para a sua inclusão social, foi projetado e construído na Unesp – Câmpus de Ilha Solteira o trailer designado como Carruagem da Alegria, destinado a possibilitar o passeio deste grupo de pessoas em vias públicas e demais locais com vias adequadas e seguras ao trânsito do equipamento. Deste modo, a Carruagem faz-se fundamental em promover a saúde mental de quem a utiliza, uma vez que o passeio em um equipamento similar a Carruagem da Alegria resgata a sensação de liberdade, favorece a melhora da autoestima, do humor e das relações, permitindo um reencontro consigo mesmo, benefícios estes alcançados segundo a terapeuta ocupacional Márcia Nunes, voluntária de um projeto com propósito similar ao da Carruagem da Alegria. Assim, o projeto auxilia no tratamento e redução da probabilidade de ocorrência de doenças, como a depressão, síndrome do pânico e ansiedade. A Figura 1 apresenta o trailer a Carruagem da Alegria.

Figura 1 – Carruagem da Alegria.



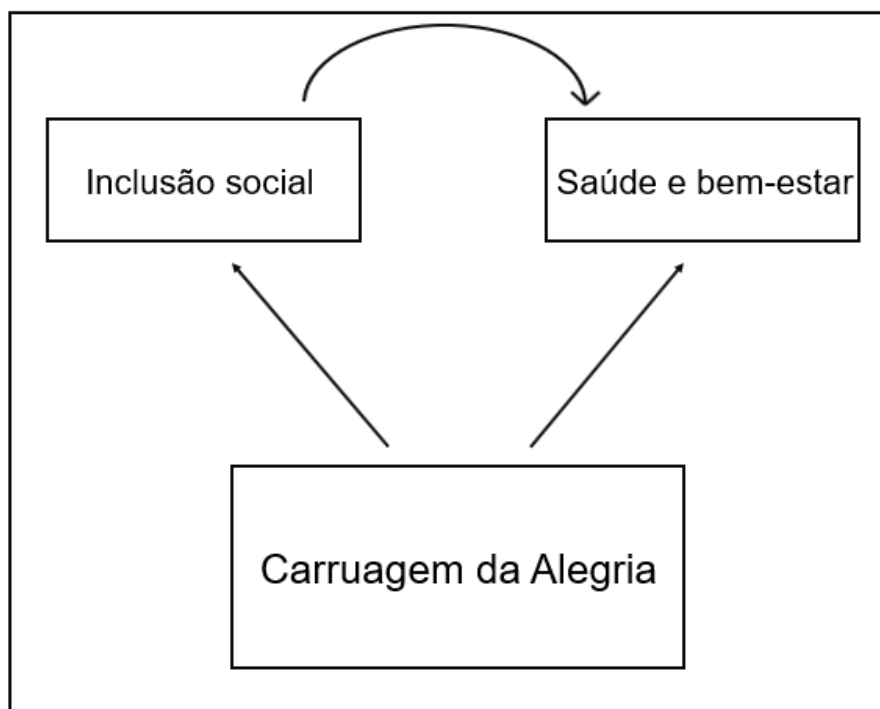
Fonte: Unesp, 2021.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) define saúde mental como um estado de bem-estar em que o indivíduo é capaz de aprimorar as suas habilidades, gerenciar o estresse diário, ser produtivo e contribuir positivamente para a sociedade. Um estudo de 2020 do Centro de Controle e Prevenção de Doenças (CDC, em inglês) dos Estados Unidos identificou que adultos com deficiência sofrem

mais angústia do que os sem deficiência. [1]. Assim, pode-se dizer que além da limitação com a qual as pessoas com deficiência convivem ou até mesmo os idosos, existem os sintomas de condições de saúde mental, que se tornam um desafio extra, principalmente quando não são diagnosticadas ou tratadas. Deste modo, o propósito da Carruagem da Alegria vai de encontro com a tarefa de cuidar dos deficientes e idosos, contribuindo para uma vivência mais agradável e um fortalecimento da saúde mental e bem-estar destas pessoas.

O equipamento não somente beneficia a saúde mental e bem-estar destas pessoas como também auxilia na sua inclusão social, uma vez que realiza o seu transporte de modo a possibilitar a participação destas pessoas em atividades diversas no meio em que convivem. Por sua vez, esta inclusão social alcançada também possui parcela de contribuição na promoção da saúde mental e bem-estar, já que o indivíduo se sentirá bem e acolhido. A Figura 2 esquematiza os benefícios citados que são alcançados pela Carruagem e a relação entre si.

Figura 2 – Esquemático dos benefícios da Carruagem da Alegria e a relação entre si.



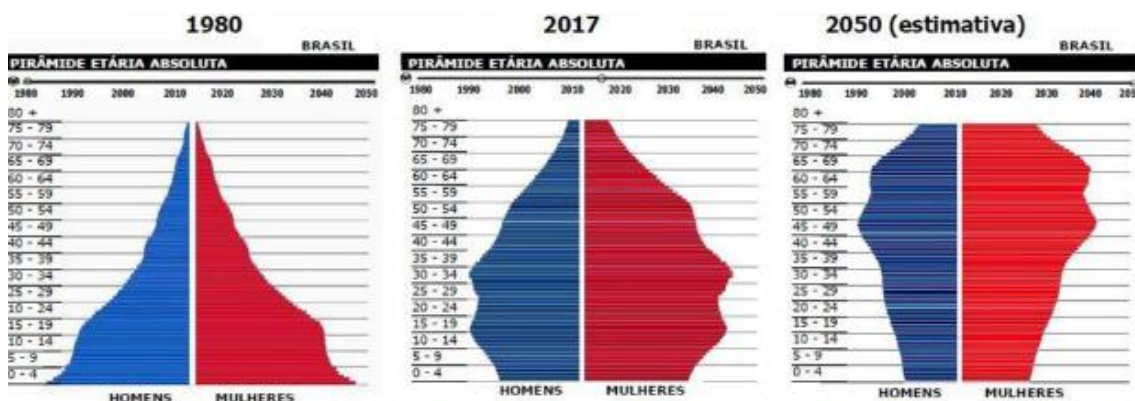
Fonte: Próprio autor.

O Brasil possui mais de 45 milhões de pessoas com algum tipo de deficiência, o que representa 23,92% da população. Deste total, mais de 13 milhões são deficientes físicos. São consideradas pessoas com deficiência aquelas que têm impedimentos de longo prazo de natureza física, mental, intelectual ou sensorial, os quais, em interação com diversas barreiras, podem ter obstruída sua participação plena e efetiva na sociedade em igualdades de condições com as demais pessoas. [3].

Por outro lado, o envelhecimento da população brasileira ocorre de modo intenso e rápido, decorrente da transição demográfica pelo qual o país passa. O número de brasileiros idosos de 60 anos e mais era de 2,6 milhões em 1950 (4,9% do total), passou para 29,9 milhões em 2020 (14% do total) e deve alcançar 72,4 milhões em 2100 (40% do total populacional). O número de brasileiros idosos de 80 anos e mais era de 153 mil em 1950 (0,3% do total), passou para 4,2 milhões em 2020 (2% do total) e deve alcançar 28,2 milhões em 2100 (15,6% do total populacional). [4].

A pirâmide etária brasileira passa por enorme transformação. Na maior parte do século passado a pirâmide tinha uma base larga e um topo muito estreito. Atualmente, a base da pirâmide se estreitou e houve um alargamento do meio da pirâmide. Isto quer dizer que hoje existe uma grande proporção de pessoas em idade ativa e o Brasil vive o período conhecido como bônus demográfico, que é um momento em que a demografia dá um gás para a economia. O encorpamento do topo da pirâmide e o fim definitivo do bônus demográfico vai ocorrer, principalmente, na segunda metade do atual século. [4]. A Figura 3 apresenta a evolução da pirâmide etária do Brasil.

Figura 3 – Distribuição da população brasileira por sexo, segundo os grupos de idade.



Fonte: Luz, 2019.

Conforme ocorre o rápido envelhecimento da população brasileira, este grupo de pessoas fica sujeito a acidentes e doenças degenerativas, reduzindo a probabilidade de saírem de seus lares para passeio, por conta das limitações e dificuldades com as quais passam a conviver. Por este motivo e pela existência de uma grande quantidade de pessoas deficientes, conforme mencionado anteriormente, ganha importância o desenvolvimento de equipamentos acessíveis para este grupo de pessoas, visando contribuir na melhoria da qualidade de suas vidas, através da promoção da sua saúde e bem-estar, além da inclusão social, como por exemplo, o trailer A Carruagem da Alegria.

### 1.1.1 ORIGEM

A inspiração da Carruagem da Alegria foi baseada no movimento *Cycling Without Age* (Pedalar Sem Idade), um projeto fundado na Dinamarca em 2012 por Ole Kassow e atualmente presente em mais de 50 países. Ole Kassow sentiu a necessidade de ajudar aqueles que possuíam mobilidade limitada, no sentido de combater a solidão e seu isolamento, e então desenvolveu uma espécie de riquixá, um tipo de bicicleta cargueira para o transporte de passageiros, permitindo então a retirada de idosos de asilos e suas casas para que estes realizem um passeio. A Figura 4 exhibe Ole Kassow conduzindo um dos equipamentos criados para atender o movimento *Cycling Without Age*.

Figura 4 – Ole Kassow conduzindo um equipamento do projeto *Cycling Without Age*.



Fonte: Maus, 2013.

O movimento possui grande importância pois, segundo a psicóloga Susan Pinker, uma vida solitária é o fator número um responsável por impedir a longevidade e a qualidade de vida. Os pesquisadores Catherine e Alex Haslam descobriram que pessoas com vida social ativa se recuperam mais rapidamente de uma doença em comparação com as pessoas que são solitárias e também que pessoas mais velhas as quais participam de eventos sociais possuem sua memória preservada por mais tempo. *Cycling Without Age* é um movimento que oferece uma solução para algumas das consequências da vida moderna. O projeto combate a solidão e o isolamento social, proporcionando um sentimento de pertencimento à uma comunidade, e promove um estilo de vida mais saudável e ativo através do ciclismo lento, o qual possui um efeito geral positivo em qualquer cidade. Enquanto se pedala em conjunto, experiências são compartilhadas e amizades são construídas, o que beneficia tanto o passageiro quanto o piloto do equipamento e também aqueles que eles encontram no caminho. [14].

### 1.1.2 DETALHES TÉCNICOS

A Carruagem da Alegria consiste em um trailer de chassi composto por perfis de aço, possuindo dois assentos, cuja estrutura é de tubos de alumínio, acomodando até quatro pessoas no total, sendo a parte estrutural do equipamento exibida na Figura 5. Seus assentos são revestidos por junco sintético e compostos por espuma, contando com cinto de segurança. A Figura 6 mostra os assentos do trailer.

Figura 5 – Parte estrutural da Carruagem da Alegria.



Fonte: Unesp, 2021.

Figura 6 – Assentos da Carruagem da Alegria.



Fonte: Unesp, 2021.

O trailer conta com uma rampa para permitir e facilitar a acessibilidade de seus passageiros, caracterizando então o projeto como universal, uma vez que garante a acessibilidade de todas as pessoas. Para incorporar mais segurança ao equipamento e ao passeio, a Carruagem possui um guarda corpo em suas laterais.

É utilizado um triciclo elétrico para tracionar a Carruagem da Alegria, o qual possui motor de 1000 W e foi construído no Câmpus da Unesp de Ilha Solteira, sendo o equipamento apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Triciclo elétrico o qual traciona a Carruagem da Alegria.



Fonte: Unesp, 2021.

O equipamento conta com sistema de freio, constituído por pinças de acionamento hidráulico, presentes em suas quatro rodas. Estas são acionadas por uma manete de moto, enquanto que os freios do triciclo, que são traseiros, são acionados por uma manete de bicicleta. A distribuição do óleo do freio é realizada por um distribuidor, enviando o óleo para as quatro pinças de freio.

Em relação as massas a serem tracionadas pelo triciclo, a Carruagem da Alegria e sua rampa possuem, respectivamente, 154 kg e 17 kg, totalizando então 171 kg. O triciclo possui quatro baterias, de 12 V e 15 A, totalizando então 48 V e 60 A

Aferições da autonomia do triciclo elétrico que traciona o trailer foram realizadas em duas diferentes condições, sendo com a Carruagem vazia e com passageiros (4 pessoas), evidentemente com as baterias totalmente carregadas. A Tabela 1 apresenta as autonomias obtidas.

Tabela 1 – Autonomias do triciclo elétrico o qual traciona a Carruagem da Alegria.

<b>Condição</b>	<b>Autonomia (km)</b>
Trailer vazio (171 kg)	6
4 pessoas (aprox. 500 kg)	2

Fonte: Unesp, 2021.

## 1.2 A importância do estudo das vibrações

As pessoas começaram a se interessar pela vibração quando foram descobertos os primeiros instrumentos musicais, provavelmente apitos ou tambores. Desde então, elas tem aplicado a engenhosidade e investigação crítica ao estudo do fenômeno da vibração. [6]. A origem do desenvolvimento da teoria da vibração encontra-se nos antigos filósofos gregos antes do primeiro milênio antes de Cristo. O primeiro interessante envolvimento de um filósofo grego com um problema de natureza vibratória é registrado em um incidente envolvendo Pitágoras (cerca de 570-497 a.C.), o qual teve sua curiosidade despertada a respeito da diversidade dos sons produzidos pelos martelos de uma forjaria quando ele passava pelo local, como visto na Figura 8. A partir daí, Pitágoras passou a realizar experiências com martelos,

cordas, tubos e placas e criou então o primeiro laboratório de pesquisas em vibrações conhecido, com a Figura 9 apresentando o filósofo grego em seu laboratório.

Figura 8 – Pitágoras observando os sons dos martelos de uma forjaria.



Fonte: Diamorogonas, 1995.

Figura 9 – Pitágoras em suas experiências com martelos e sinos em seu laboratório.



Fonte: Diamorogonas, 1995.

Quando se fala em vibração, refere-se a qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo, podendo também ser designado como oscilação. O balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda dedilhada são exemplos típicos de vibração.

A maioria dos motores de acionamento possuem problemas de vibração devido ao desbalanceamento inerente. O desequilíbrio pode existir devido a falha de projeto ou manutenção incorreta. O desbalanceamento de motores a diesel, por exemplo, pode causar ondas terrestres de potência suficiente para causar incomodo em áreas urbanas. As rodas de algumas locomotivas podem afastar-se mais de um centímetro do trilho em altas velocidades devido ao desbalanceamento. Além disso, as estruturas projetadas para apoiar máquinas centrífugas pesadas como motores e turbinas, ou máquinas alternativas como motores a vapor e a gás e bombas recíprocas, também estão sujeitas a vibrações. Em todas essas situações, a estrutura ou componente da máquina sujeito à vibração pode falhar devido à fadiga do material resultante da variação cíclica da tensão induzida. Além do mais, a vibração causa desgaste mais rápido de peças de máquinas como rolamentos e engrenagens e também gera ruído excessivo. Em máquinas, a vibração pode afrouxar ou soltar elementos de fixação como porcas.

Apesar de seus efeitos danosos, a vibração pode ser utilizada a favor em várias aplicações industriais e de consumo. [6]. Como exemplo, a vibração pode ser benéfica em peneiras, compactadores, máquinas de lavar, escovas de dentes elétricas, brocas odontológicas, massageadores elétricos, ou seja, todos sendo equipamentos vibratórios. A Figura 10 exibe uma peneira vibratória industrial, equipamento onde a vibração se faz de grande importância.

Figura 10 – Peneira vibratória industrial.



Fonte: Facix, 2023.

Cada objeto possui uma frequência natural, também chamada de frequência de ressonância, que consiste em uma característica própria de um sistema. As frequências naturais indicam a taxa de oscilação livre da estrutura, depois de cessada a força que provocou o seu movimento. Em outras palavras, representa o quanto a estrutura vibra quando não há força aplicada sobre ela. A frequência natural é diretamente proporcional à rigidez da estrutura e inversamente proporcional à sua massa, sendo designada por um número real positivo, e cuja unidade mais comum é o Hertz.

Sempre que a frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincidir com a frequência de excitação externa, ocorre um fenômeno conhecido como ressonância, que resulta em deflexões excessivas e falhas. [6]. Ao apresentar ressonância, o sistema tende a oscilar em sua amplitude máxima, sendo que esta tendência depende do quão próxima encontra-se a frequência natural da frequência de excitação. Nestas frequências, mesmo pequenas excitações podem gerar grandes amplitudes de vibração do sistema, e até conduzir ao colapso. [6]. Um exemplo de um clássico caso do potencial destrutivo da ressonância é a quebra de uma taça de cristal somente com a voz. A frequência da voz coincide com a frequência com que a taça tende a vibrar aumentando a amplitude da vibração da taça até que esta chegue ao limite do material e se rompe.

No campo das vibrações, em projetos é necessária muita atenção para este acontecimento. Existem inúmeros casos de falhas de sistemas causados por ressonância e vibração excessiva de componentes e sistemas. Nos EUA, a ponte

Tacoma Narrows, localizada no condado Pierce Washington, colapsou em 1940 quando entrou em ressonância induzida pelo vento, em um dia atípico de ventos no qual era possível observar oscilações com metros de amplitude, com o caso exibido na Figura 11.

Figura 11 – Colapso da ponte Tacoma Narrows devido a ressonância.



Fonte: Fernando e guia, 2023.

### 1.3 ANÁLISE DINÂMICA

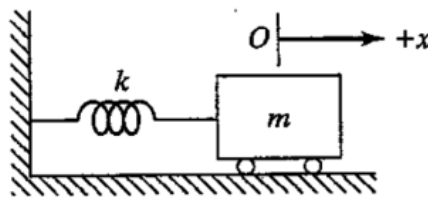
A análise dinâmica refere-se ao processo pelo qual uma estrutura pode ser descrita no âmbito de suas características naturais, ou seja, frequências naturais, taxas de amortecimento e modos de vibração. A importância de se obter tais informações consiste no fato da resposta dinâmica de uma estrutura ser determinada por estas características, sendo então este tipo de análise necessário para a verificação de que o sistema funcionará de modo a cumprir o desempenho esperado e para assegurar-se que o conforto dos usuários não seja comprometido.

Na maior parte dos projetos, a análise dinâmica é fundamental de ser executada. Pode-se citar casos em que a análise dinâmica é cabível em projetos referentes a, por exemplo, fundações de máquinas e equipamentos, estruturas submetidas ao tráfego de veículos ou público, efeito de terremotos e ventos sobre estruturas e desenvolvimento de sistemas destinados a rodagem, tal como o equipamento abordado no presente trabalho.

### 1.3.1 ANÁLISE DINÂMICA DE UM SISTEMA COM UM GRAU DE LIBERDADE

Para um sistema com um grau de liberdade, tomemos como exemplo o clássico caso do sistema massa-mola não amortecido, o qual é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Sistema massa-mola não amortecido, com um grau de liberdade.



Fonte: Rao, 2008.

Suponhamos que uma força resultante  $\vec{F}(t)$  atue sobre a massa  $m$  deslocando-a por uma distância  $\vec{x}(t)$ , a segunda lei do movimento de Newton se apresenta conforme a Equação 1.

$$\vec{F}(t) = \frac{d}{dt} \left( m \frac{d\vec{x}(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

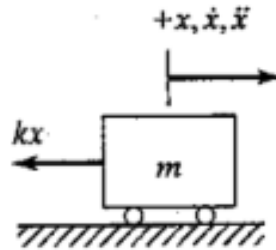
Se a massa  $m$  for constante, essa equação se reduz, obtendo-se então a Equação 2.

$$\vec{F}(t) = m \frac{d^2\vec{x}(t)}{dt^2} = m\ddot{\vec{x}} \quad (2)$$

O movimento possível de ser executado por parte da massa consiste no movimento de translação no sentido horizontal, pelo fato de estar apoiada sobre roletes sem atrito. Ciente disso, quando a massa é deslocada a uma distância  $+x$  em relação à sua posição de equilíbrio estático, a força na mola consiste em  $kx$ . Sendo

assim, o diagrama de corpo livre da massa é representado conforme mostra a Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de corpo livre da massa, submetida a um deslocamento positivo.



Fonte: Rao, 2008.

Realizando a aplicação da Equação 2 para a massa  $m$ , tem-se a equação de movimento vista na Equação 3.

$$F(t) = -kx = m\ddot{x}$$

ou

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (3)$$

A solução da Equação 3 nos fornece o modelo matemático referente ao conceito de frequência natural de um determinado sistema, dado pela Equação 4.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

### 1.3.2 ANÁLISE DINÂMICA DE UM SISTEMA COM VÁRIOS GRAUS DE LIBERDADE

A análise vista para o caso de um sistema com um grau de liberdade pode ser aplicada diretamente a casos de sistemas com vários graus de liberdade. Por exemplo, há uma única equação de movimento para cada grau de liberdade. [6]. Logo, pode-se dizer que a análise dinâmica de um sistema de múltiplos graus de liberdade consiste em uma extensão natural de um sistema com um grau de liberdade. Para muitos sistemas mecânicos e estruturas, mais de uma coordenada se faz necessária para descrever seu movimento e vibração. Assim, o resultado é um sistema com vários graus de liberdade, como o sistema apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Sistema massa-mola com vários graus de liberdade.



Fonte: Picoli, 2014.

Montadas as equações de movimento deste sistema, elas podem ser expressas na forma matricial, como representado na Equação 5.

$$[m]\ddot{\vec{x}} + [k]\vec{x} = \vec{F} \quad (5)$$

onde  $[m]$  e  $[k]$  são denominadas como matrizes de massa e rigidez, respectivamente, e  $\ddot{\vec{x}}$  e  $\vec{x}$  são os vetores aceleração e deslocamento, respectivamente.

Em sua forma mais geral, as matrizes de massa e rigidez são dadas pelas Equações 6 e 7.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

A solução geral da Equação 3 pode ser expressa pela Equação 8.

$$x(t) = A_0 \text{sen}(\omega_n t + \phi_0) \quad (8)$$

onde  $A_0$  e  $\phi_0$  são dados pelas Equações 9 e 10

$$A_0 = A = \left[ x_0^2 + \left( \frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left( \frac{x_0 \omega_n}{\dot{x}_0} \right) \quad (10)$$

sendo  $x_0$  e  $\dot{x}_0$  os valores do deslocamento em  $t = 0$ .

Obtendo-se a segunda derivada a partir da Equação 8, tem-se a Equação 11.

$$\ddot{x}(t) = -\omega_n^2 A_0 \text{sen}(\omega_n t + \phi_0) \quad (11)$$

Substituindo a Equação 8 e 11 na Equação 5, obtém-se a Equação 12.

$$-\omega_n^2 m A_0 \text{sen}(\omega_n t + \phi_0) + k A_0 \text{sen}(\omega_n t + \phi_0) = 0 \quad (12)$$

Que por sua vez, pode ser reescrita como apresentado pela Equação 13, com a designação de  $A_0$  como  $X$ .

$$[k - \omega_n^2 m]\{X\} = 0 \quad (13)$$

A Equação 13 refere-se a um problema de autovalor e autovetor, com o primeiro termo, ou seja,  $[k - \omega_n^2 m]$  consistindo em uma matriz e o segundo termo  $\{X\}$  um vetor. Os autovalores da matriz são os valores de  $\omega_n^2$ , que consistem no quadrado das frequências naturais do sistema. Já os autovetores consistem nos vetores  $X$ , que são as formas de vibrações do sistema, ou seja, as formas qualitativas dele vibrar, também chamadas de modos de vibrar, os quais também serão abordados mais adiante. Para cada autovalor, tem-se um autovetor.

A determinação dos autovalores da matriz da Equação 13 pode ser realizada estabelecendo que seu determinante seja igual a zero, como apresentado na Equação 14.

$$\det (k - \omega_n^2 m) = 0 \quad (14)$$

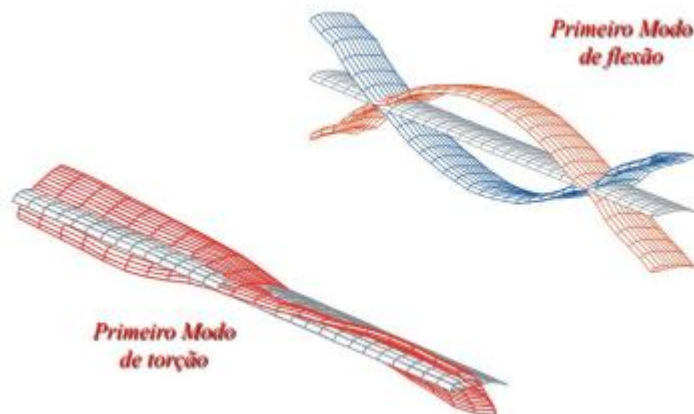
Proveniente da Equação 14, teremos um polinômio de grau  $n$ , o qual possuirá como raízes o quadrado das  $n$  frequências naturais. De posse de tais frequências naturais, é possível obter os modos de vibrar do sistema, ou seja, os autovetores, substituindo cada valor de frequência natural obtida na Equação 13. Assim, cada frequência natural entregará como resultado seu respectivo modo de vibrar associado.

Um modelo real possui um número infinito de frequências naturais. Entretanto, situação contrária ocorre em modelos de elementos finitos, descritos mais adiante. Nestes, existe uma quantidade finita de frequências naturais. E tal quantidade de frequências naturais, nos modelos de elementos finitos, é igual a quantidade de graus de liberdade. Em suma, grau de liberdade consiste no número mínimo de coordenadas independentes que permite definir completamente as posições das partes integrantes de um sistema a qualquer instante, ou seja, todas as partes do sistema [6]. Qualquer ponto livre no espaço possui seis graus de liberdade, sendo três de translação e três de rotação.

Para cada frequência natural, a estrutura possuirá um modo de vibração, termo definido como sendo a forma em que a estrutura vibrará em uma de suas

frequências naturais. Na Figura 15, tem-se esquematizados exemplos de modos de vibração de uma estrutura.

Figura 15 – Exemplos de modo de vibrar.



Fonte: Souza, 2019.

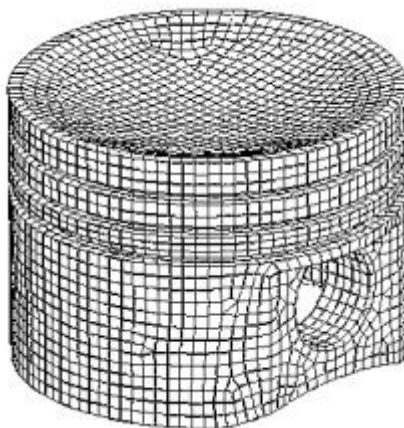
#### 1.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Analiticamente, a resolução de um problema visando descrever um sistema no âmbito de suas características naturais é realizada, em resumo, pela dedução das equações diferenciais (ordinárias ou parciais) do problema em questão com suas respectivas condições de contorno. A solução destas fornece uma família de autovalores e autovetores que são, respectivamente, as frequências naturais e modos de vibração.

Entretanto, muitas vezes tais equações diferenciais são complexas de serem resolvidas de forma analítica, mesmo adotando simplificações na resolução. Com a evolução e a difusão da linguagem de computadores para fazer os modelos numéricos, várias técnicas de soluções numéricas têm sido desenvolvidas para a resolução destes problemas de engenharia. Uma delas consiste no Método dos Elementos Finitos (MEF), uma ferramenta computacional que subdivide o domínio do problema em subdomínios menores, conhecidos por Elementos Finitos. Pode-se afirmar que este método utiliza então o princípio da discretização, devido a esta subdivisão da estrutura em pequenas partes, ou seja, elementos. Estes elementos são ligados entre si por pontos de ligação, os quais são chamados de nós. Assim,

um problema de engenharia complexo é transformado em diversos problemas simples. A Figura 16 apresenta um exemplo de um modelo discretizado.

Figura 16 – Exemplo de modelo discretizado.



Fonte: Carlesso, 2015.

Vale ressaltar que, diferentemente da solução analítica, que possui um modelo matemático que representa qualquer ponto do sistema, a solução pelo MEF oferece uma solução para apenas alguns pontos, e não para a totalidade destes, portanto, tem-se uma resposta aproximada quando utiliza-se o Método dos Elementos Finitos. Porém, apesar disso, diante da complexidade associada à resolução de maneira analítica de determinados problemas, o MEF passa a consistir em uma valiosa fonte de informações a respeito de um problema e grande norteador de decisões a serem tomadas em um projeto.

Atualmente, diversos softwares computacionais disponíveis no mercado utilizam o MEF para realizar vários tipos de análises para a resolução de problemas, simulando por exemplo o escoamento de fluidos, transferência de calor, análises estruturais e análises modais. Para a análise dinâmica realizada neste trabalho, optou-se por utilizar o software Ansys, cuja licença utilizada consiste na licença estudantil.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o software Ansys Workbench Academic Student 2023 R1, uma versão estudantil do Ansys, sendo um software de elementos finitos largamente aplicável em diversas classes de problemas de engenharia, além do desenho CAD do chassi da carruagem para a realização das análises, o qual já se encontrava modelado geometricamente, sendo então fornecido para a elaboração deste trabalho.

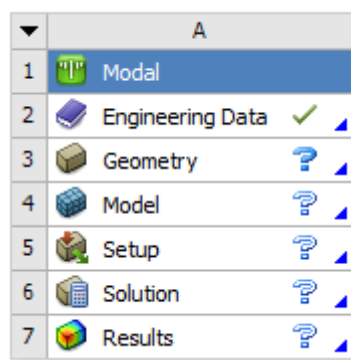
A metodologia utilizada para a execução da análise consistiu, em suma, no seguimento das etapas conforme esquematizado na Figura 17, uma vez que foi adotado o padrão de simulação proposto pelo Ansys, exibido por sua vez na Figura 18.

Figura 17 – Metodologia empregada na análise dinâmica do chassi da Carruagem da Alegria.



Fonte: Próprio autor.

Figura 18 - Padrão de simulação proposto pelo Ansys.



Fonte: Ansys.

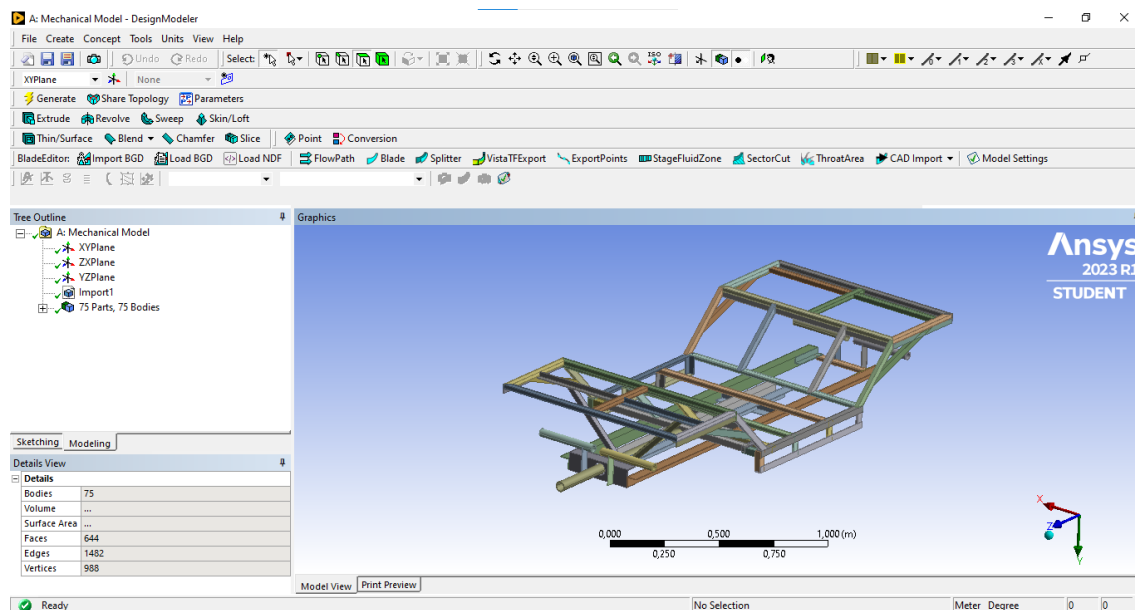
Na sequência de resolução apresentada na Figura 18, o item 1 indica qual análise será realizada. No caso deste trabalho, como o estudo consiste na análise dinâmica com o objetivo de se obter as frequências naturais e modos de vibrar de uma estrutura, o tipo de análise a ser selecionado no Ansys consiste em análise

modal. O item 2, *Engineering Data* (Informações de engenharia), é onde são selecionados parâmetros básicos, como densidade, tensão de escoamento, tensão última e tipos de materiais. Já no item 3, *Geometry* (Geometria), é onde será inserida a geometria a ser simulada, podendo ser desenhada nesta etapa ou importada de outro software. No item 4 *Model* (Modelo), definem-se os parâmetros da malha. O setup, item 5, é onde são definidas as condições que a estrutura estará submetida, como forças, suportes fixados e pontos de massa. No item 6, *Solution* (Solução), ocorre a análise por parte do software das informações presentes nos itens anteriores e resolução das equações matemáticas. Na última etapa da simulação, item 7, é onde são expostos os resultados para o que foi selecionado no item 6, numérica e graficamente. Nesta etapa, é informada a existência de algum problema que impossibilitou a simulação, indicando em qual etapa encontra-se o erro para a sua correção.

## 2.1 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

O primeiro passo para a execução da análise dinâmica consistiu na disposição do modelo CAD do chassi da Carruagem no software. Para isto, existem duas possibilidades, sendo construir o modelo ou importá-lo. Optou-se pela importação do desenho CAD, devido ao fato da existência deste anteriormente ao início do desenvolvimento deste trabalho. Tanto o processo de construção quanto a importação podem ser realizados em três ambientes diferentes possibilitados pelo Ansys, sendo eles o *DesignModeler*, *SpaceClaim* e *Discovery*. Por questão de preferência e por ser suficiente para cumprir o objetivo de importar a geometria, foi utilizado o ambiente *DesignModeler*. A Figura 19 exibe o ambiente *DesignModeler* já com o chassi da Carruagem da Alegria importado. No presente trabalho, modificações estruturais no chassi do equipamento foram realizadas, visando o estudo da obtenção de resultados distintos quanto aos valores de frequências naturais apresentados pelo chassi. Estas modificações estruturais foram realizadas utilizando-se o software SolidWorks, por já existir uma familiaridade com o programa quando deseja-se confeccionar e/ou editar o desenho CAD de uma geometria.

Figura 19 – Ambiente *DesignModeler*, utilizado para importar o desenho CAD do chassi para o Ansys.



Fonte: Ansys.

## 2.2 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS E SUAS PROPRIEDADES

Neste trabalho, foram realizadas diversas simulações considerando materiais distintos, com o intuito de obter frequências naturais com valores diferentes dos originais apresentados pelo chassi do equipamento. A Tabela 2 apresenta as propriedades dos materiais abordados na análise, fornecidas pelo Ansys, sendo estes definidos como participantes das simulações no ambiente *Engineering Data*, sendo ali também extraídas suas propriedades.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais considerados nas simulações do chassi.

	Material		
	Aço estrutural	Alumínio	Fibra de carbono
<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	7850	2770	1800
<b>Módulo de elasticidade (Pa)</b>	2 x 10 <sup>11</sup>	7,1 x 10 <sup>10</sup>	2,3 x 10 <sup>11</sup> <b>(1)</b>
			2,3 x 10 <sup>10</sup> <b>(2)</b>
			2,3 x 10 <sup>10</sup> <b>(3)</b>
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,3	0,33	0,2 <b>(4)</b>
			0,4 <b>(5)</b>
			0,2 <b>(6)</b>
<b>Módulo de cisalhamento (Pa)</b>	7,6923 x 10 <sup>10</sup>	2,6692 x 10 <sup>10</sup>	9 x 10 <sup>9</sup> <b>(7)</b>
			8,2143 x 10 <sup>9</sup> <b>(8)</b>
			9 x 10 <sup>9</sup> <b>(9)</b>
<b>Coefficiente de expansão térmica (°C<sup>-1</sup>)</b>	1,2 x 10 <sup>-5</sup>	2,3 x 10 <sup>-5</sup>	---

Fonte: Ansys.

Nota:

**(1):** Módulo de elasticidade na direção X**(2):** Módulo de elasticidade na direção Y**(3):** Módulo de elasticidade na direção Z**(4):** Coeficiente de Poisson XY**(5):** Coeficiente de Poisson YZ**(6):** Coeficiente de Poisson XZ**(7):** Módulo de cisalhamento XY**(8):** Módulo de cisalhamento YZ**(9):** Módulo de cisalhamento XZ

## 2.3 DEFINIÇÃO DA MALHA

A malha empregada nas simulações consistiu na malha padrão oferecida pelo Ansys, não ocorrendo alterações quanto a seus parâmetros. Sendo assim, os parâmetros referentes a malha utilizada são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da malha utilizada nas simulações.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Quantidade de nós	53945
Quantidade de elementos	20658
Tamanho dos elementos	0,02 m
Diagonal do modelo de malha	2567,7 mm
Ângulo de extensão dos elementos	Grosseiro (91° a 60°)

Fonte: Ansys.

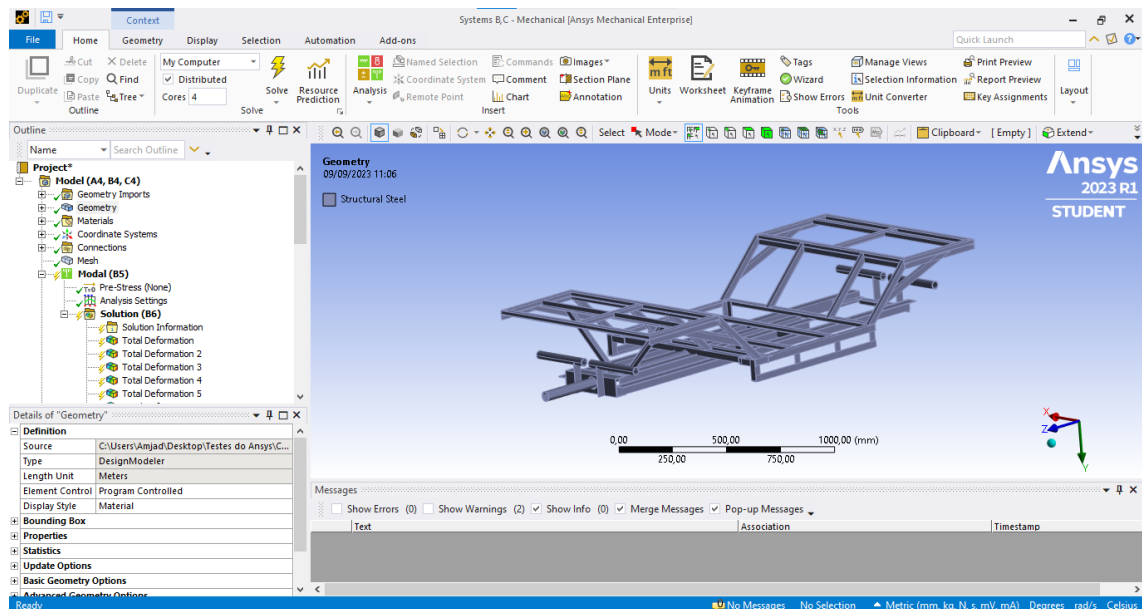
## 2.4. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO (SETUP)

Na etapa de setup, é onde se definem as condições de contorno necessárias para a simulação. No presente trabalho, foram executadas análises modais de corpo livre e de corpo rígido, sendo que para este segundo tipo de análise fez-se necessário possuir ciência de quais as fixações existentes na estrutura, para que no software sejam definidos os elementos da estrutura que possuem movimentação restrita devido a tais fixações. Além disso, na análise modal de corpo rígido foram inseridas também as massas incidentes sobre o chassi simulado, sendo definidos no software os valores de tais massas e os elementos da estrutura que realizam interface com as mesmas.

Ambas as etapas de definição da malha e condições de contorno são realizadas dentro do ambiente *Mechanical* do Ansys, local este em que também são visualizados os resultados entregues pela simulação. Na Figura 20 é apresentado o *Mechanical*, sendo possível visualizar na árvore de projetos, no canto esquerdo, a

presença dos itens *Mesh* e *Analysis Settings*, destinados à definição da malha e condições de contorno.

Figura 20 – Chassi da Carruagem no ambiente *Mechanical* do software Ansys.



Fonte: Ansys.

## 2.5 SOLUÇÃO

Nesta etapa, são observados os resultados entregues pela simulação, ou seja, por ser trabalhada a análise modal no presente trabalho, o Ansys exibe tanto as frequências naturais apresentadas pela estrutura quanto seus modos de vibrar.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 ANÁLISE MODAL DE CORPO LIVRE

Esta seção será iniciada com um resultado demonstrativo da importância da análise modal através do Método dos Elementos Finitos, no que tange a verificação e validação da geometria de um modelo.

Em uma análise modal de corpo livre, pelo fato da possibilidade de um corpo rígido possuir até seis modos de vibração caracterizados como modos de vibrar de corpo rígido, definidos como sendo os modos de vibrar em que a vibração é livre, é permitido então que no máximo as seis primeiras frequências naturais da estrutura consistam em zero ou muito próximas a zero. A vibração livre, resumidamente, ocorre quando o movimento resulta apenas de condições iniciais, não havendo nenhuma causa externa atuando durante o mesmo. Destes seis modos de vibrar, conhecidos como modos de vibrar de corpo rígido, pode-se ter até três modos de translação e até três de rotação.

Em uma análise modal de corpo livre, a estrutura encontra-se completamente livre no espaço, sem o estabelecimento de forças atuantes ou condições de suporte fixo na estrutura. Como exemplos de aplicações em que isto é verificado, pode-se citar o caso de uma aeronave voando, um satélite orbitando no espaço ou um barco flutuando no oceano, por exemplo.

No software, foi configurado para encontrar as doze primeiras frequências naturais, as quais serão analisadas nos resultados deste presente trabalho. Realizando-se a análise modal de corpo livre, obteve-se que as três primeiras frequências naturais consistiram em zero. Entretanto, da quarta frequência natural até a décima segunda, os valores obtidos consistiram em bem próximos a zero, conforme pode ser visto na Tabela 4. Assim, pelo fato da literatura afirmar que um corpo rígido pode possuir no máximo seis frequências naturais consistindo em zero ou próximas a zero e tal fato não foi verificado, esta informação é um indicador de que a geometria do chassi possui erros, e que esta então deve ser corrigida para fornecer resultados condizentes com a realidade.

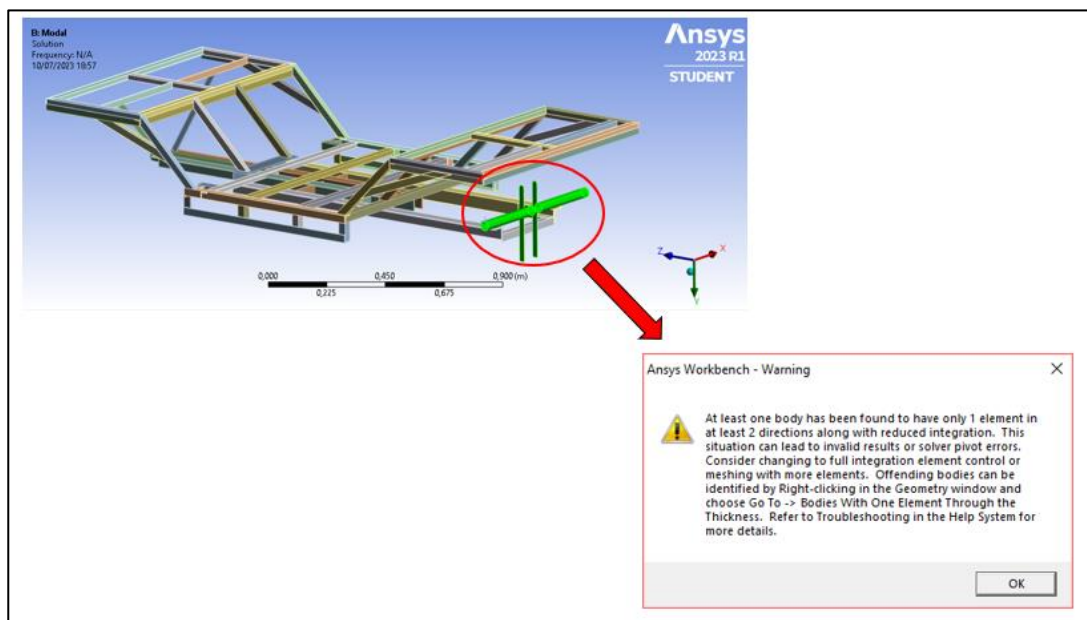
Tabela 4 – Valores das frequências naturais do chassi obtidas durante a análise modal de corpo livre indicadores de erro na geometria.

Modo de vibrar	Frequência (Hz)
1	0
2	0
3	0
4	0,002
5	0,005
6	0,005
7	0,010
8	0,012
9	0,013
10	0,031
11	0,035
12	0,042

Fonte: Próprio autor.

A Figura 21 apresenta a região da estrutura apontada como errônea pelo software e a mensagem de advertência do problema.

Figura 21 – Região do chassi da Carruagem da Alegria sinalizada como contendo erro e mensagem de advertência referente ao fato.



Fonte: Próprio autor.

Sendo assim, com a identificação da região da geometria a qual contém erro e contornando este problema reposicionando as partes do chassi apontadas como dotadas de erro, novamente foi realizada a simulação do chassi. Os novos valores

de frequências naturais obtidos para a estrutura encontram-se na Tabela 5, considerando-se a estrutura confeccionada com aço estrutural. Cabe salientar que o erro apontado pelo software foi advindo da falta de travamento entre as geometrias sinalizadas na figura e o resto da estrutura, fazendo com que estas vibrassem isoladamente, proporcionando valores de frequências naturais e modos de vibrar não correspondentes com a realidade.

Tabela 5 – Valores das frequências naturais do chassi obtidas durante a análise modal de corpo livre após a correção de erro na geometria.

<b>Modo de vibrar</b>	<b>Frequência (Hz)</b>
1	0
2	0
3	0,003
4	0,004
5	0,007
6	0,014
7	4,612
8	8,465
9	15,263
10	16,861
11	19,197
12	19,466

Fonte: Próprio autor.

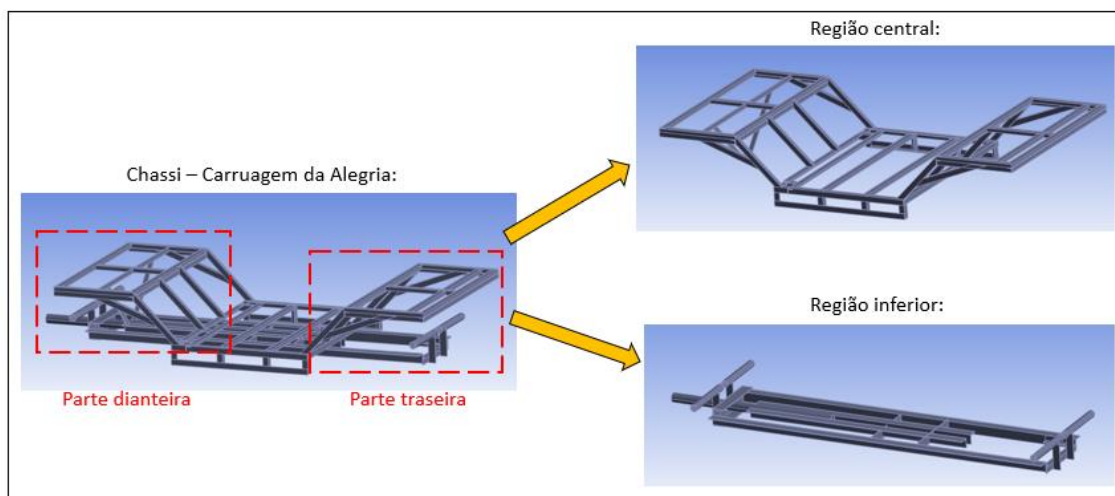
Observa-se que agora, as frequências naturais de valor nulo e próximo a zero limitaram-se às seis primeiras frequências. Portanto, com este fato pode-se afirmar que geometricamente o chassi encontra-se válido. O resultado pode não parecer intuitivo, porém isto é indicatório de que em cada um destes seis modos de vibrar não existe movimento relativo entre os corpos, ou seja, todos movem-se simultaneamente. Tal característica indica que o sistema se move como um corpo rígido.

Cabe novamente ressaltar que tais resultados são referentes a condição em que o chassi encontra-se como corpo livre, e tal acontecimento não ocorre na prática, uma vez que a estrutura apresenta pontos de fixação, não encontrando-se totalmente livre no espaço. Apesar disso, consiste em válido discutir os modos de vibrar associados a esta condição, principalmente aqueles caracterizados por movimentações/distorções mais críticas.

Os modos de vibrar associados às frequências naturais de valor nulo e próximo a zero consistem nos modos de vibrar de corpo rígido do chassi. Analisando-se estes modos de vibrar, nota-se que eles correspondem a modos de vibrar de translação e rotação, ocorrendo somente a movimentação da geometria de forma livre no espaço.

Anteriormente à etapa de apresentação dos modos de vibrar obtidos na simulação, cabe mencionar a nomenclatura adotada para a distinção das regiões do chassi. Neste trabalho, para fins de nomenclatura, a estrutura da Carruagem da Alegria foi dividida em duas regiões principais, sendo elas a região inferior e região central, divisão esta representada na Figura 22. Nesta figura também é identificada qual a parte dianteira e a parte traseira do chassi. A região inferior possui a função principal de servir de apoio para as rodas do chassi, enquanto que a região central suporta os bancos do equipamento e serve de apoio para as chapas empregadas no chassi, inclusive a do piso.

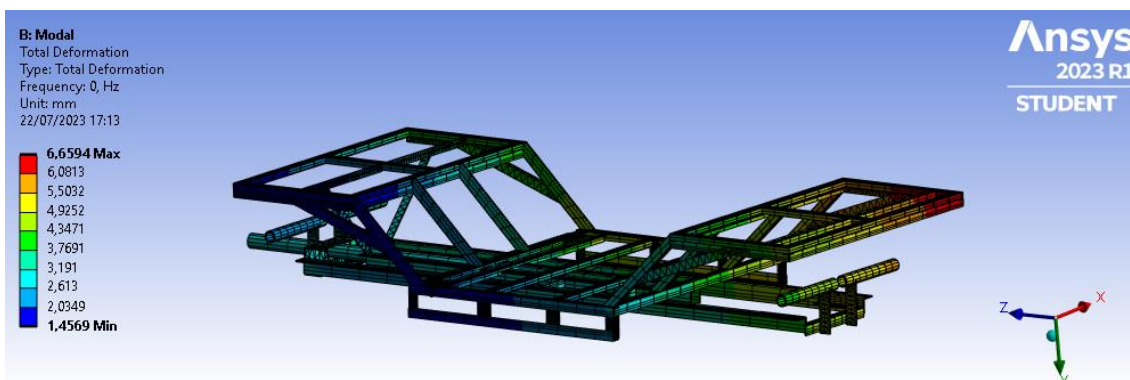
Figura 22 – Divisão do chassi em nomenclaturas.



Fonte: Próprio autor.

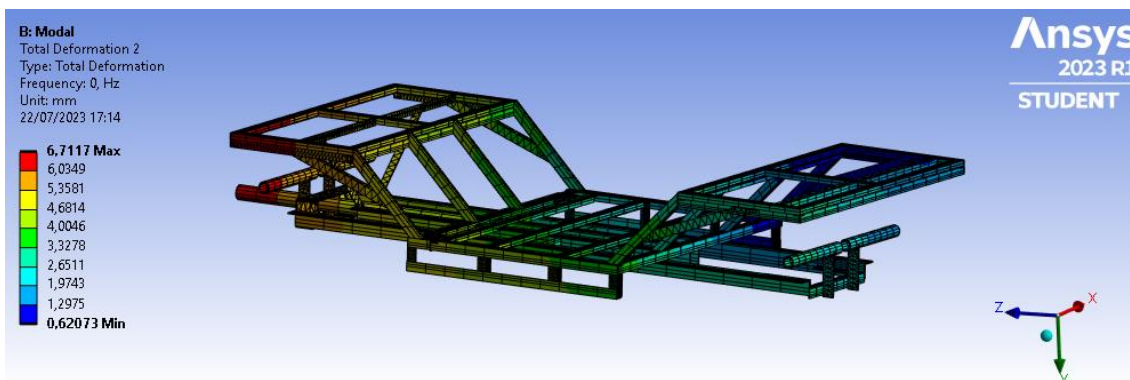
As Figuras 23, 24 e 25 referem-se ao movimento de translação executado pela estrutura, associado, respectivamente, ao primeiro, segundo e terceiro modo de vibrar.

Figura 23 – Primeiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de translação.



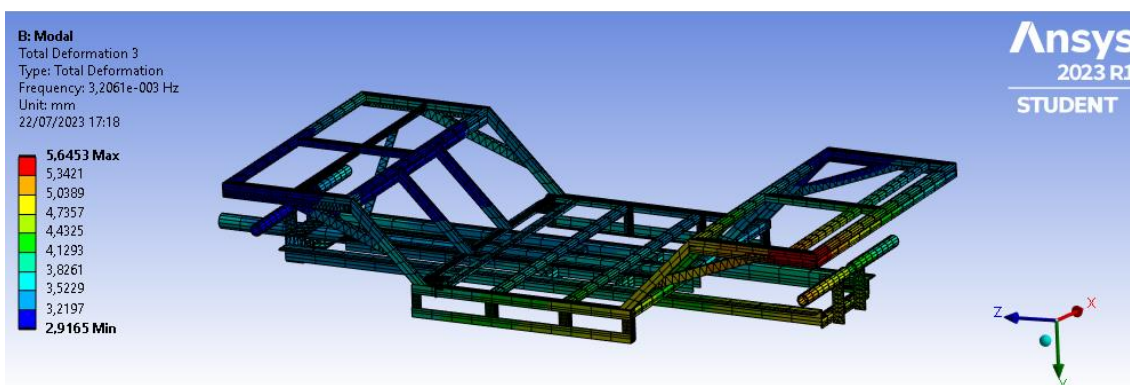
Fonte: Ansys.

Figura 24 – Segundo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de translação.



Fonte: Ansys.

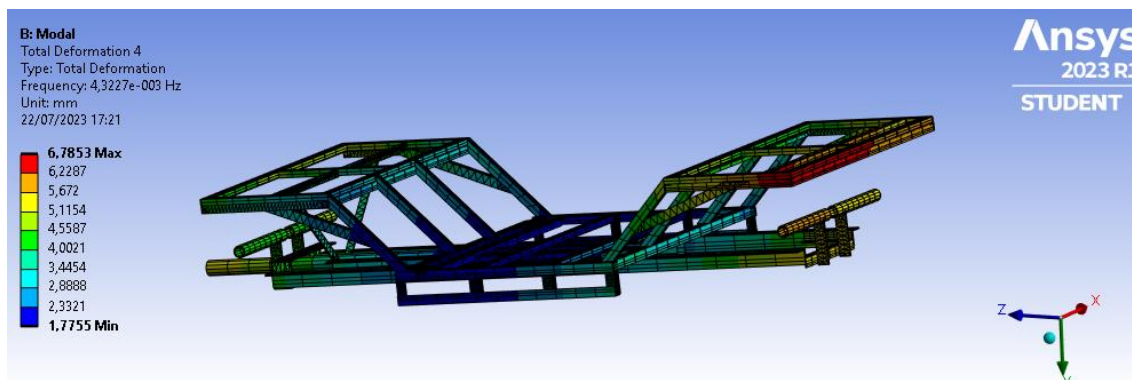
Figura 25 – Terceiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de translação.



Fonte: Ansys.

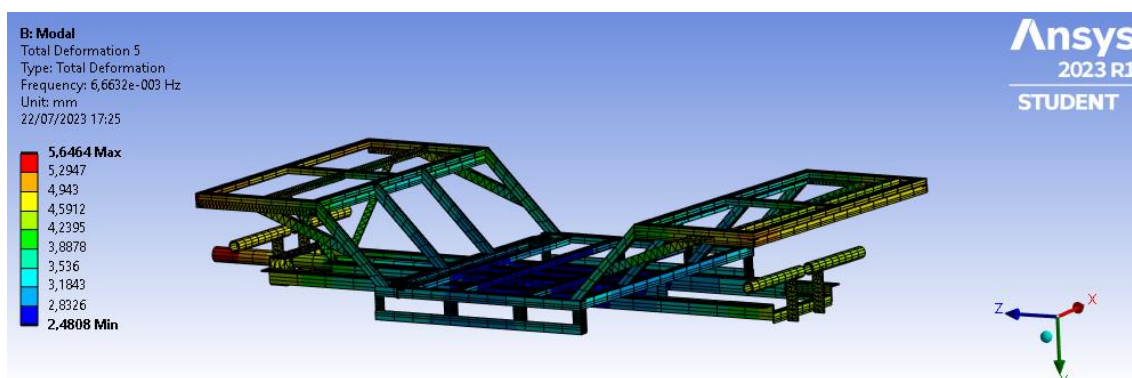
Já as Figuras 26, 27 e 28 referem-se ao movimento de rotação executado pela estrutura, associado, respectivamente, ao quarto, quinto e sexto modo de vibrar.

Figura 26 – Quarto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de rotação.



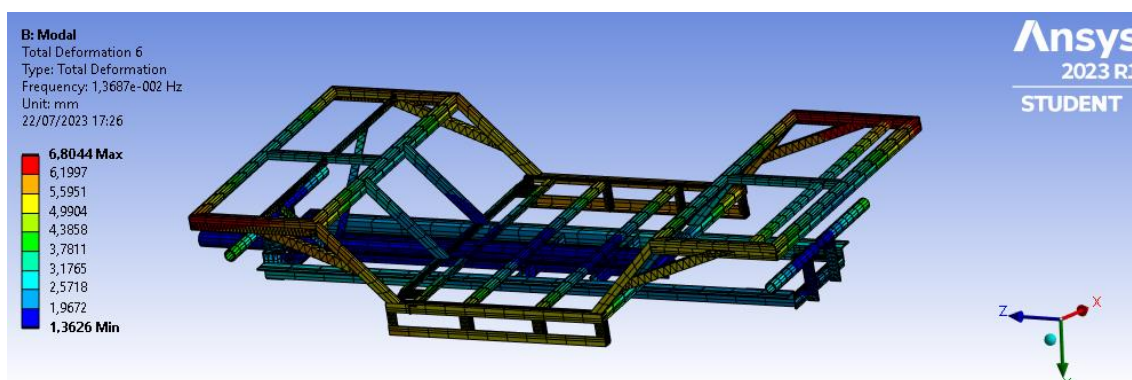
Fonte: Ansys.

Figura 27- Quinto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de rotação.



Fonte: Ansys

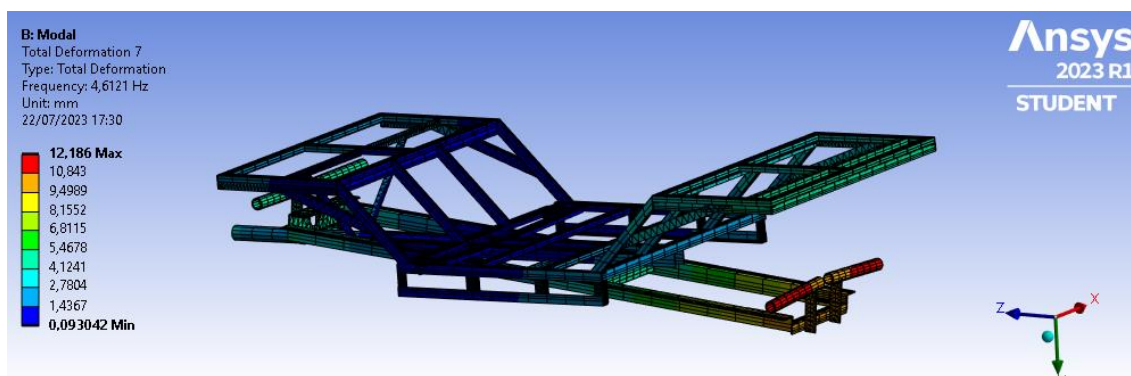
Figura 28 - Sexto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de rotação.



Fonte: Ansys.

Do sétimo modo de vibrar em diante, tem-se movimentações da estrutura consistindo não mais em translação e rotação, mas sim deformações caracterizadas como sendo de flexão e torção. A Figura 29 exibe o sétimo modo de vibrar, onde nele tem-se a flexão da região inferior da estrutura em torno do eixo X do Ansys, no sentido a favor e contrário da região central da estrutura.

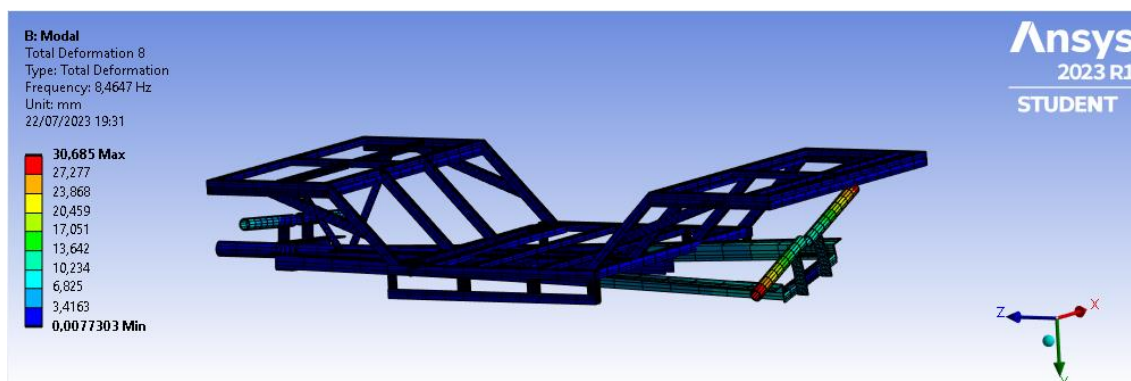
Figura 29 - Sétimo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, caracterizado pelo movimento de flexão.



Fonte: Ansys.

No oitavo modo de vibrar, esta estrutura executa um movimento de torção, em torno do eixo Y do Ansys, sendo observável uma torção com deformação de maior magnitude na região traseira, conforme a Figura 30.

Figura 30 - Oitavo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, com a ocorrência de torção e rotação.

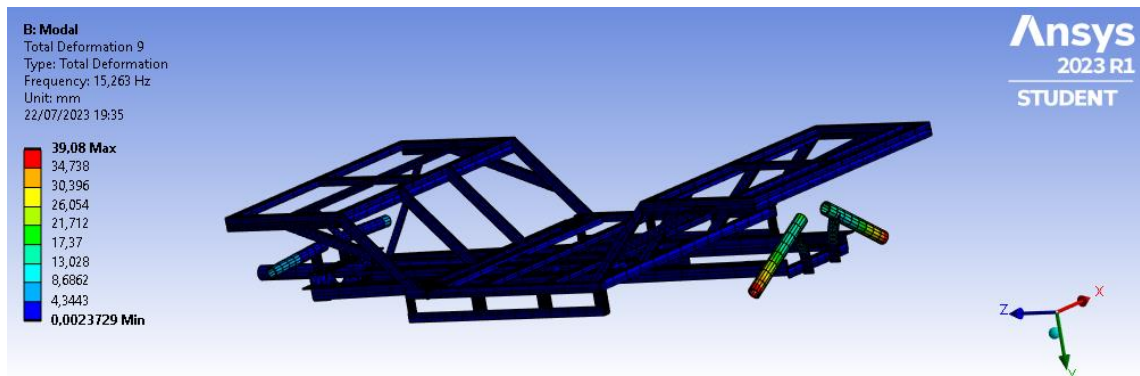


Fonte: Ansys.

O nono modo de vibrar, apresentado na Figura 31, é caracterizado por uma flexão da região inferior do chassi que se mostra como sendo superficial se tomado

como referência o deslocamento dos eixos que servem como fixação para as rodas traseiras, designados como eixos diferenciais traseiros. Estes oscilam grandiosamente, devido a flexão dos elementos que os ligam à região inferior do chassi, chamados de apoios diferenciais.

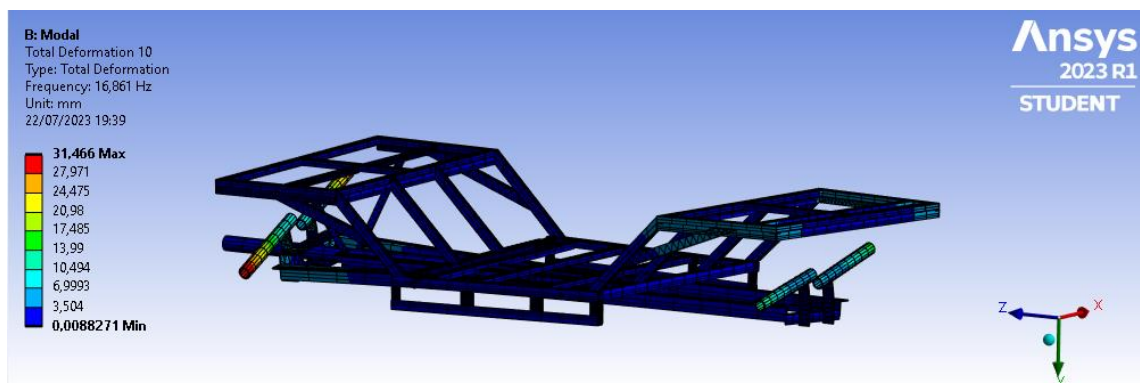
Figura 31 - Nono modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, com maior oscilação dos apoios diferenciais traseiros em relação às demais oscilações existentes neste modo.



Fonte: Ansys.

No décimo modo de vibrar, coexistem dois tipos de movimentos, os quais consistem na torção da região inferior do chassi e a flexão dos apoios dos eixos diferenciais, que por sua vez resulta na oscilação dos eixos diferenciais, como visto na Figura 32.

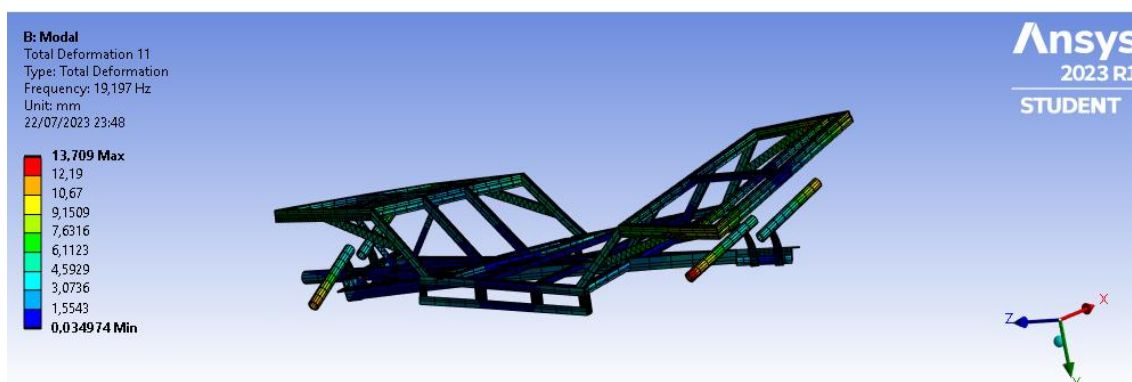
Figura 32 - Décimo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, com torção da região inferior do chassi e oscilação dos eixos diferenciais.



Fonte: Ansys.

O décimo primeiro modo de vibrar, visto na Figura 33 é caracterizado por uma maior quantidade de elementos deformáveis do chassi. Primeiramente, tem-se a deformação da região central do chassi, ocorrendo a torção do piso do chassi e dos elementos de suporte dos assentos. Também tem-se a torção da região inferior da estrutura, deformação semelhante àquela observada no oitavo modo de vibrar. Além disso, os eixos diferenciais também sofrem deformações, movimento este atribuído a mais uma deformação existente, ou seja, a flexão dos apoios diferenciais.

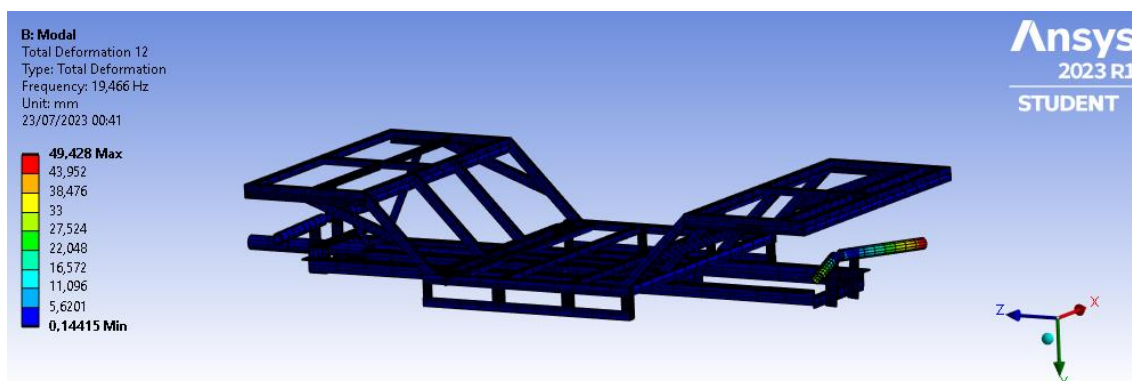
Figura 33 – Décimo primeiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, predominando deformações de torção.



Fonte: Ansys.

No décimo segundo modo de vibrar, tem-se a oscilação dos eixos diferenciais traseiros, executando um movimento de rotação em torno do eixo Y, ocasionados pela torção de seus apoios, sendo visto na Figura 34.

Figura 34 - Décimo segundo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo livre, predominando a oscilação dos eixos diferenciais traseiros.



Fonte: Ansys.

Tal análise dos modos de vibrar fornecidos pela análise modal consistem em fundamentais para o reconhecimento e distinção dos movimentos caracterizados como sendo de flexão ou torção. Movimentos de flexão podem ser prejudiciais se estiverem localizados próximos a juntas soldadas, pois nestes pontos é possível a ocorrência de acúmulo de tensões devido à fragilidade do material de solda. Movimentos de torção também consistem em críticos, principalmente quando afetam a estrutura como um todo, gerando grandes tensões e aumentando as chances de falha por fadiga.

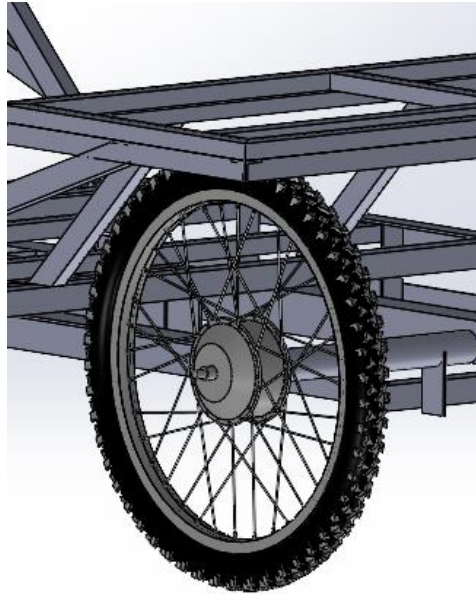
Todos estes resultados entregues pelas simulações, assim como os posteriores resultados exibidos neste trabalho, são fundamentados no método de determinação das frequências naturais e modos de vibrar apresentados na seção 1.3.2, podendo-se então fazer uma analogia a este método para compreender como o software Ansys determina as frequências naturais e modos de vibrar de uma estrutura. Em outras palavras, durante a análise modal o software resumidamente soluciona a equação  $[k - \omega_n^2 m]\{X\} = 0$  de modo a determinar seus autovalores e posteriormente os autovetores, fornecendo então ao usuário os valores de frequências naturais do chassi e os modos de vibrar associados a tais frequências.

### 3.2 ANÁLISE MODAL DE CORPO RÍGIDO

Na engenharia, não é cabível a análise modal de corpo livre para muitas aplicações. Muitos sistemas ou estruturas possuem fixações, impedindo-os de se mover livremente, consistindo então em restritos. Tal acontecimento é verificado para o chassi da Carruagem da Alegria, o qual possui elementos conectados a si que o caracterizam como ausente de livre movimentação. Assim, os resultados fornecidos pela análise modal para a estrutura passam a consistir em mais fiéis à realidade quando consideradas então as condições de fixação no software Ansys. Quando aplicadas tais condições, passa-se a ter uma análise modal não mais de corpo livre, mas sim de corpo rígido.

Como fixações definidas na análise modal de corpo rígido, considerou-se a restrição da movimentação dos eixos diferenciais traseiros e dianteiros, pelo fato de encontrarem-se conectados com as rodas da Carruagem. A Figura 35 apresenta uma das rodas do chassi, fixada em um dos eixos diferenciais.

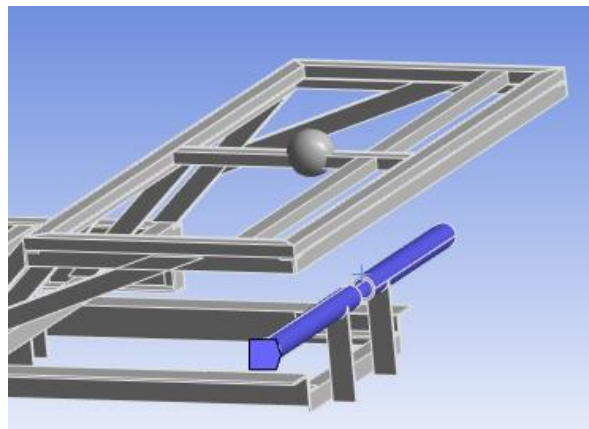
Figura 35 – Uma das rodas do chassi, cuja conexão com seu eixo diferencial estabelece uma restrição na movimentação do chassi.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 36 apresenta um dos conjuntos de eixos diferenciais selecionados no Ansys para consistir em elementos fixos na análise modal de corpo rígido, sendo eles os eixos diferenciais traseiros. Assim como estes, os eixos diferenciais dianteiros também foram selecionados para serem fixos nesta análise.

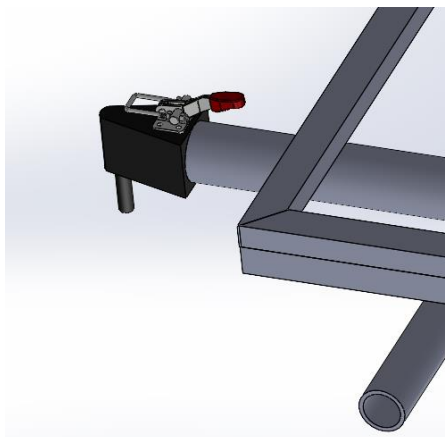
Figura 36 – Eixos diferenciais traseiros selecionados como elementos fixos na análise modal de corpo rígido.



Fonte: Ansys.

Outro elemento responsável por conferir fixação à estrutura consiste no acoplamento empregado para interligar a Carruagem da Alegria com o triciclo elétrico, ou com qualquer outro elemento que a tracione. A Figura 37 esquematiza o emprego do acoplamento no chassi.

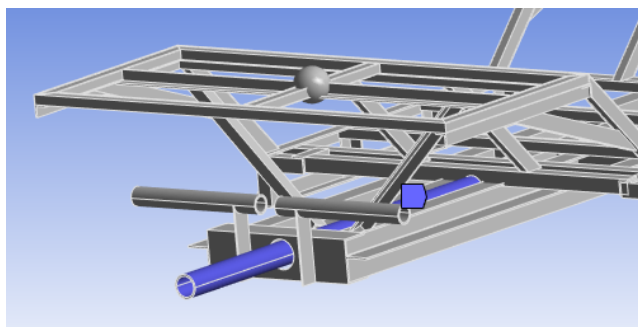
Figura 37 – Acoplamento ligado ao chassi da Carruagem da Alegria, para a conexão desta com o elemento responsável por tracioná-la.



Fonte: Próprio autor.

Sendo assim, ele faz com que o eixo o qual interliga a estrutura com o equipamento tracionador consista em fixo, conforme pode ser visto na Figura 38, que apresenta este eixo selecionado no Ansys para consistir em elemento fixo.

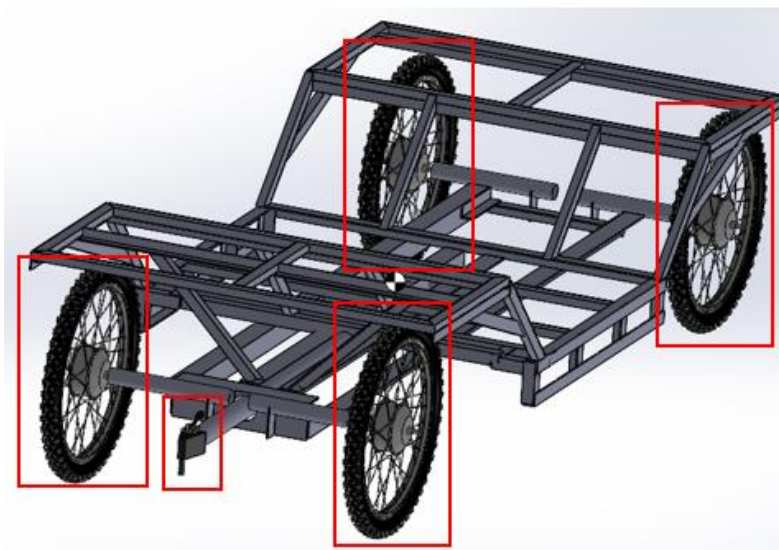
Figura 38 – Eixo que interliga a estrutura com o equipamento tracionador selecionado como elemento fixo na análise modal de corpo rígido.



Fonte: Ansys.

A Figura 39 apresenta todas as fixações que o chassi da Carruagem possui, consistindo então, como citado anteriormente, nas quatro rodas e no acoplamento da estrutura.

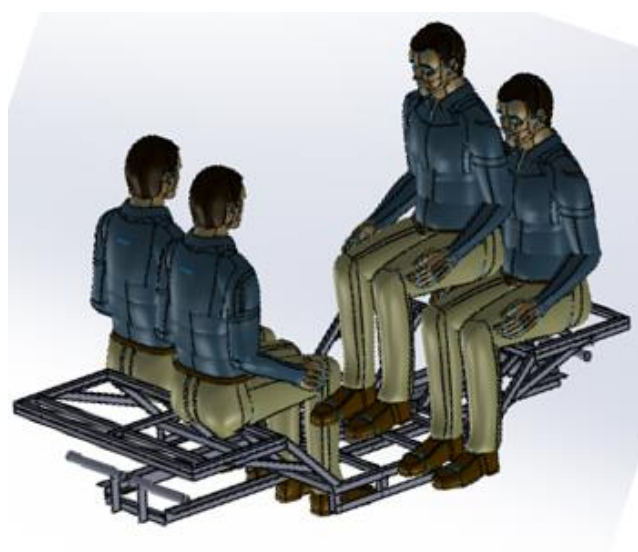
Figura 39 – Fixações existentes no chassi.



Fonte: Próprio autor.

Na análise modal de corpo rígido, outro fator fundamental de ser considerado consiste nas massas as quais a estrutura receberá. Para esta condição de contorno, considerou-se a presença de quatro pessoas durante o passeio na Carruagem da Alegria, cada uma com massa de 75 kg. O local de disposição dos passageiros é tal como exibido na Figura 40, a qual não ilustra os itens da Carruagem como os bancos por exemplo pois possui apenas o intuito de simbolizar a existência e distribuição dos passageiros.

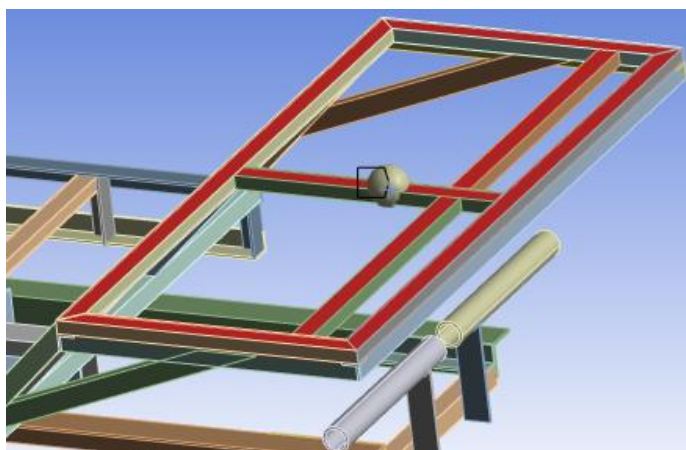
Figura 40 – Passageiros dispostos na Carruagem da Alegria.



Fonte: Próprio autor.

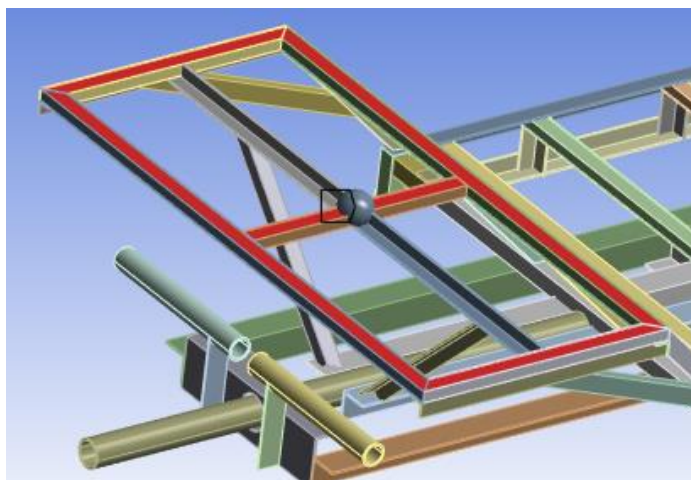
Dado o fato de que os passageiros estarão sentados nos bancos da Carruagem e estes por sua vez encontram-se em contato com as vigas e perfis do chassi, no Ansys o local de aplicação das massas ocorreu nas regiões sinalizadas em vermelho nas Figuras 41 e 42, as quais exibem a parte traseira e dianteira do chassi, respectivamente.

Figura 41 – Regiões na parte traseira do chassi nas quais é aplicada a massa dos passageiros.



Fonte: Ansys.

Figura 42 – Regiões na parte dianteira do chassi nas quais é aplicada a massa dos passageiros.



Fonte: Ansys.

Deste modo, pelo fato dos elementos assinalados nas Figuras 41 e 42 estabelecerem contato com os bancos, estes foram selecionados no Ansys como consistindo em receptores da aplicação da massa dos passageiros. Uma vez que tanto na parte traseira quanto na dianteira a presença será de duas pessoas e cada

uma conforme consideração realizada pesa 75 kg, então cada região receberá massa de 150 kg, valor este inserido no software para cada região. A Tabela 6 apresenta as massas aplicadas sobre o chassi.

Tabela 6 – Massas aplicadas sobre o chassi da Carruagem da Alegria.

<b>Elemento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Massa individual (kg)</b>	<b>Massa total (kg)</b>
Passageiros – Região traseira	2	75	150
Passageiros – Região dianteira	2	75	150

Fonte: Próprio autor.

Com as condições de contorno citadas acima e considerando-se a estrutura confeccionada com aço estrutural, foi executada a análise modal de corpo rígido, com os valores das frequências naturais obtidas para a estrutura apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores das frequências naturais do chassi obtidas durante a análise modal de corpo rígido.

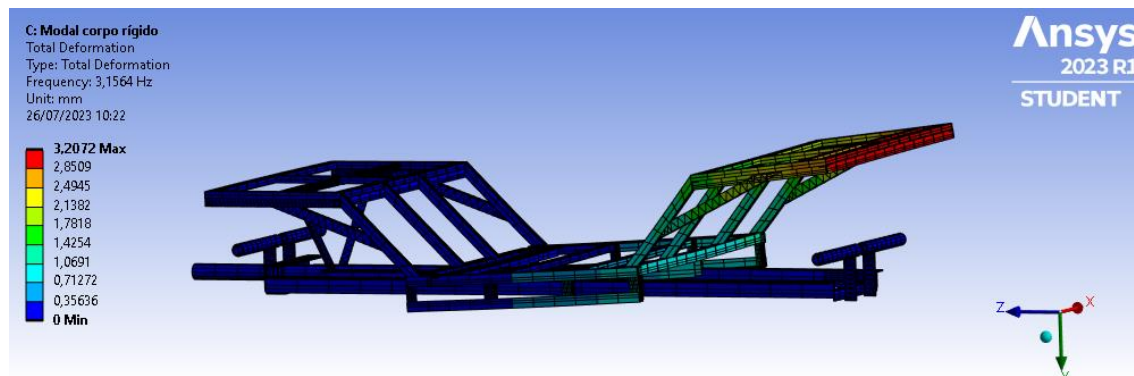
<b>Modo de vibrar</b>	<b>Frequência (Hz)</b>
1	3,156
2	5,412
3	11,952
4	18,460
5	18,629
6	19,478
7	31,811
8	57,634
9	63,830
10	70,026
11	74,879
12	75,760

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que as frequências naturais de valor nulo ou próximo a zero já não se fazem mais existentes quando realizada a análise modal de corpo rígido, ou seja, neste tipo de análise os modos de vibrar de corpo rígido são ausentes. Tal ocorre pelo fato da estrutura não mais encontrar-se completamente livre no espaço, sendo que agora ela possui fixações estabelecidas, as quais provocam a restrição de seus movimentos.

Diferentemente da análise modal de corpo livre, o primeiro modo de vibrar da análise de corpo rígido até o sexto não são mais caracterizados por movimentos de translação/rotação, devido ao fato, conforme citado anteriormente, da presença de restrições no chassi. A Figura 43 exibe o primeiro modo de vibrar referente a análise modal de corpo rígido. Nele, ocorre uma flexão parcial da região central do chassi, com o deslocamento fazendo-se existente somente entre o centro desta região até a sua extremidade traseira, local em que é verificada a deformação de maior magnitude.

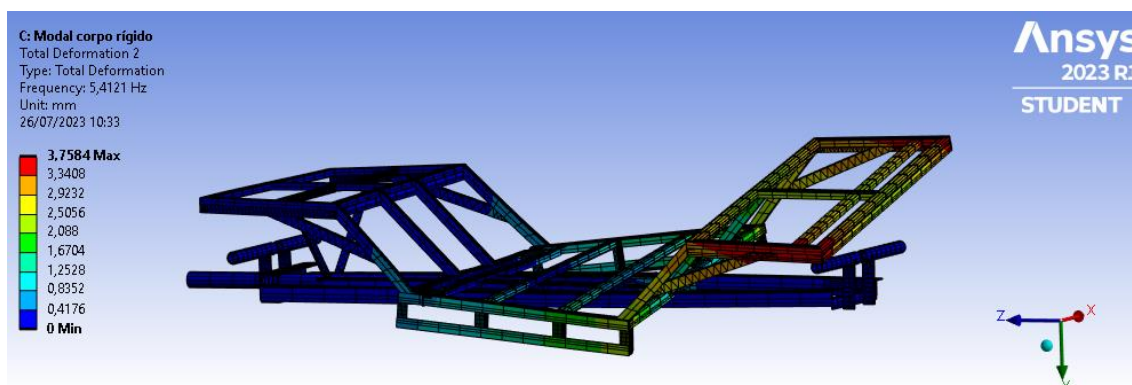
Figura 43 - Primeiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, com a presença de flexão parcial de sua região central.



Fonte: Ansys.

Já no segundo modo de vibrar, a região central sofre uma deformação do tipo torção, sendo que a deformação estende-se um pouco além da zona compreendida entre seu o centro e parte traseira, ocorrendo em menor magnitude na região localizada entre o seu centro e parte dianteira. Tal modo de vibrar é apresentado na Figura 44.

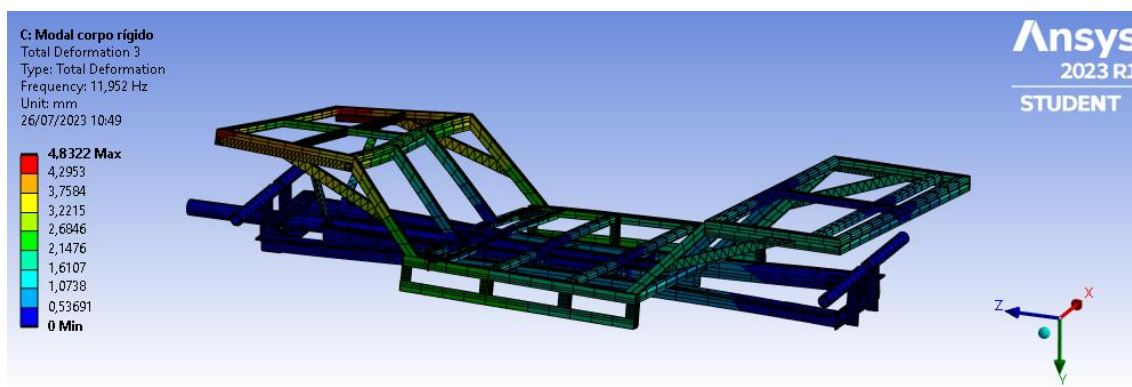
Figura 44 - Segundo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, sendo verificada a torção de sua região central.



Fonte: Ansys.

No terceiro modo de vibrar, exibido na Figura 45, também tem-se a torção da região central do chassi, porém ocorrendo em toda a sua extensão, com deformações sendo verificadas em sua parte traseira, central e dianteira. Diferentemente dos dois modos de vibrar anteriormente abordados, neste modo a deformação máxima é verificada na parte dianteira da região central do chassi.

Figura 45 - Terceiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, com a ocorrência de torção em toda a extensão de sua região central.

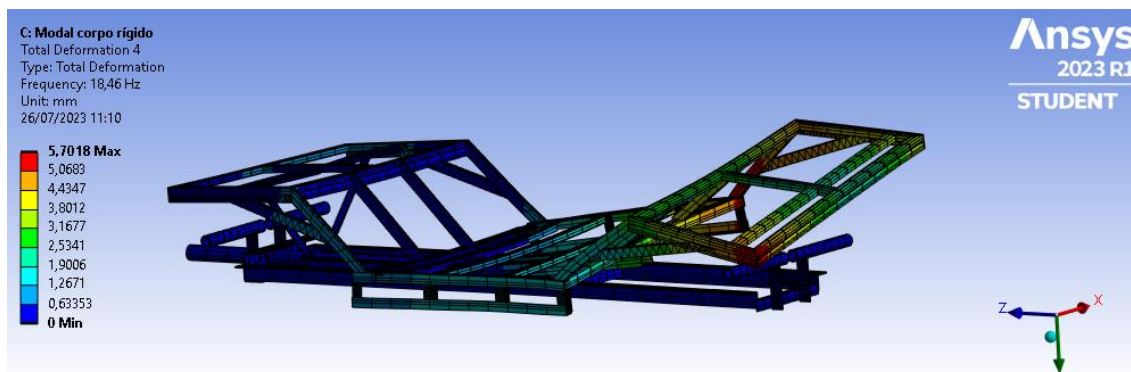


Fonte: Ansys.

O quarto modo de vibrar do chassi na condição de corpo rígido, visto na Figura 46, também é caracterizado por torção da região central, entretanto, com algumas distinções referente a maneira em que sua parte traseira apresenta torção, com um dos lados de seu piso deformando-se mais, executando movimento na direção do

eixo Y do Ansys. Além disso, tem-se uma tênue torção da parte dianteira da região central.

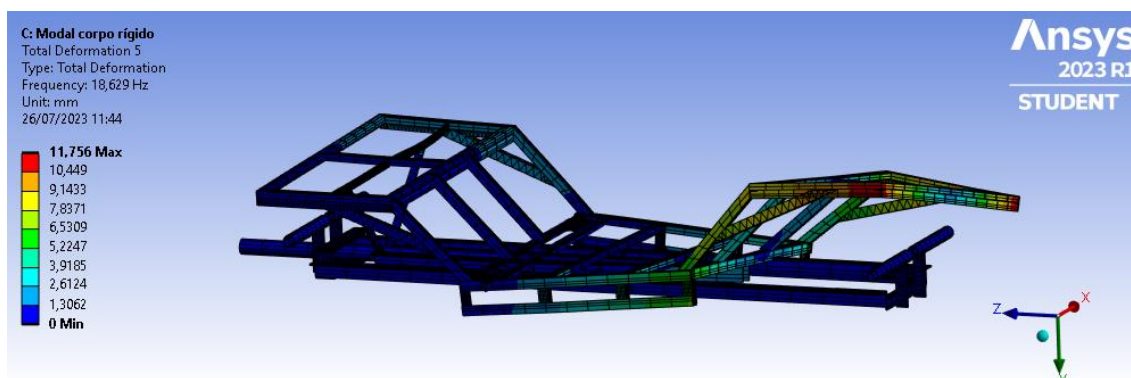
Figura 46 - Quarto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, sendo presente a torção de sua região central.



Fonte: Ansys.

O quinto modo de vibrar assemelha-se ao segundo modo, com a principal zona a qual sofre os efeitos da torção consistindo na porção compreendida entre o centro da região central da estrutura e sua parte traseira. O principal diferencial deste modo em relação ao segundo consiste em deformações de maiores magnitudes, principalmente com uma deformação mais acentuada da região do chassi na qual são apoiados os bancos traseiros. Na Figura 47 é possível visualizar este modo.

Figura 47 - Quinto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, similar ao segundo modo porém com deformações mais acentuadas.

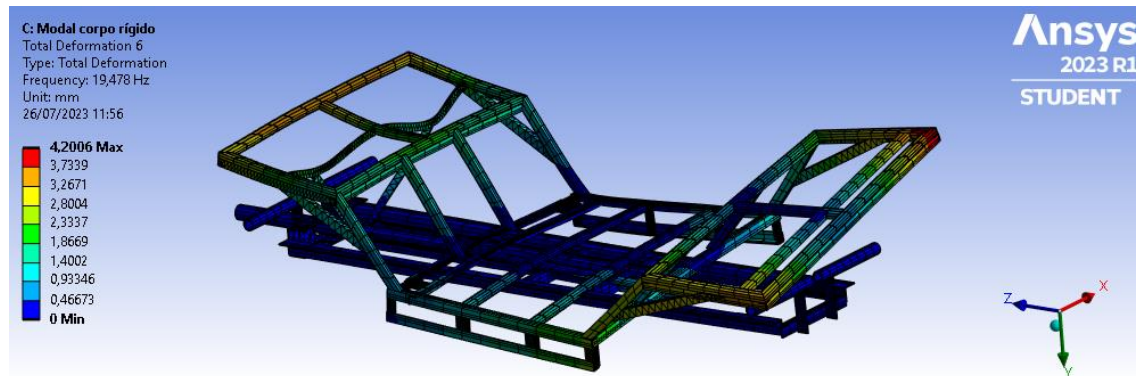


Fonte: Ansys.

Já no sexto modo de vibrar, continua sendo existente a torção da parte traseira da região central, porém a parte dianteira sofre uma deformação com alguns de seus

elementos estruturais deformando-se de maneira peculiar em comparação com os modos de vibrar vistos anteriormente. Tal modo de vibrar é exibido na Figura 48.

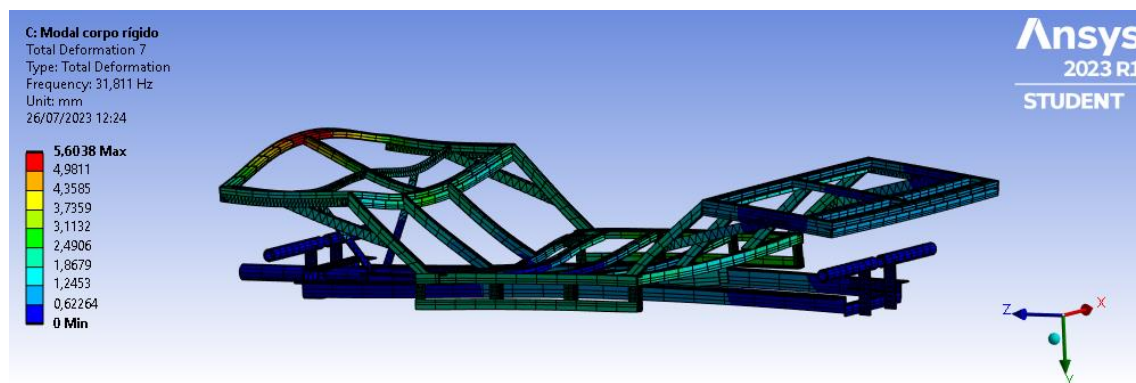
Figura 48 - Sexto modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, com a parte dianteira da região central do chassi distinguindo-se por suas deformações.



Fonte: Ansys.

No sétimo modo de vibrar, observa-se uma maior quantidade de elementos deformáveis no chassi. Neste modo, tanto a região central quanto a região inferior apresentam deformações, esta última em menor intensidade. As vigas do piso do chassi sofrem flexão, provocando a sua deformação de modo a formar um “u”. Cabe destaque a deformação bem mais acentuada que a parte dianteira da região central sofre em comparação com a sua parte traseira. Além disso, a região inferior do chassi também se deforma, apresentando flexão, porém com baixa magnitude. Todas estas características do sétimo modo de vibrar são vistas na Figura 49.

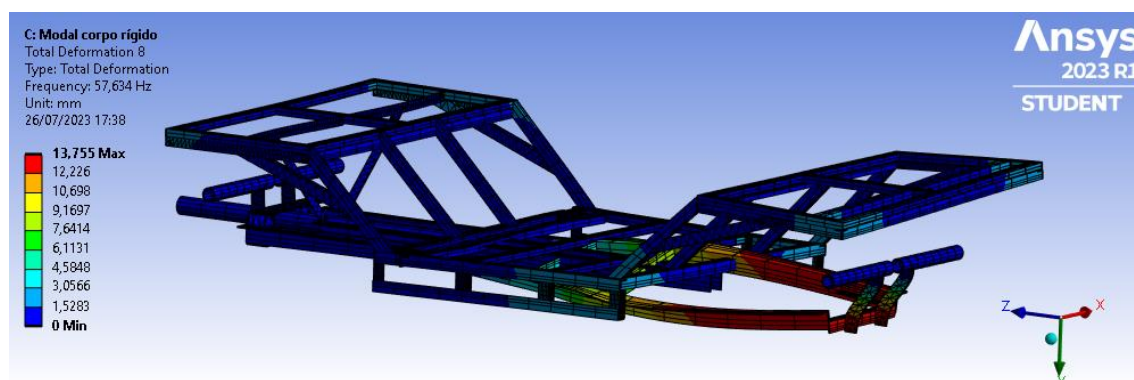
Figura 49 - Sétimo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, apresentando maior quantidade de elementos deformáveis.



Fonte: Ansys.

O oitavo modo de vibrar do chassi é caracterizado pela torção de sua região inferior. Entretanto, tal movimento somente é verificado na região compreendida entre o centro e parte traseira, desta região inferior. Além disso, em menor magnitude se comparado com a deformação anteriormente relatada, neste modo também existe a torção da região central. O que foi exposto a respeito deste modo de vibrar encontra-se presente na Figura 50.

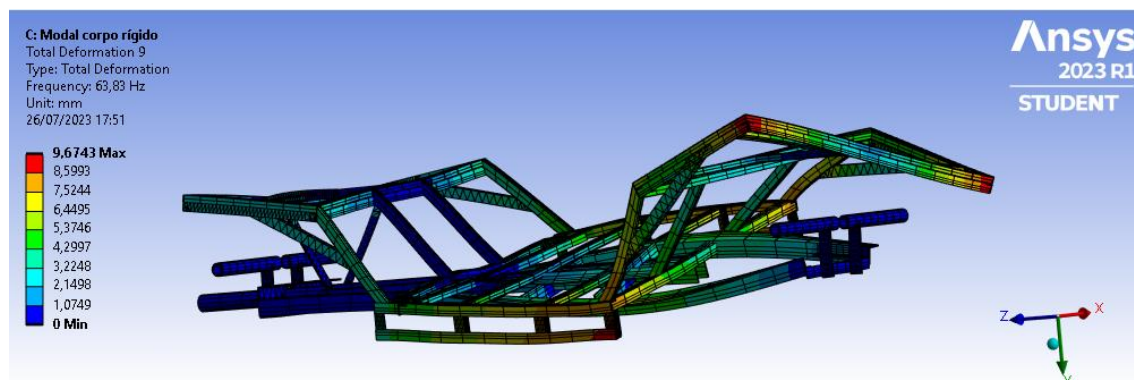
Figura 50 - Oitavo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, destacando-se pela torção da região inferior do chassi.



Fonte: Ansys.

No nono modo de vibrar é observável a torção de boa parcela do chassi, sendo verificada nas partes traseira e dianteira da parte central e também na região inferior, com a ocorrência de deformação de maior magnitude na parte traseira da região central. A Figura 51 exhibe este modo de vibrar.

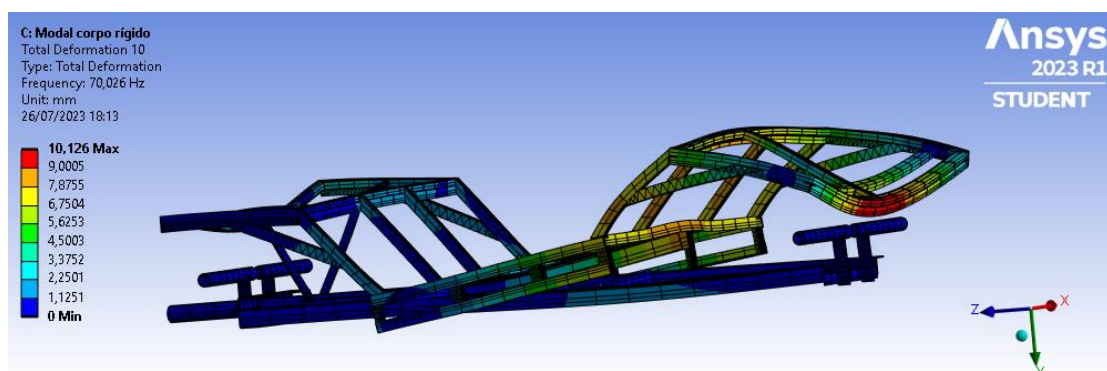
Figura 51 - Nono modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, ocorrendo a torção de grande parte do chassi.



Fone: Ansys.

No décimo modo de vibrar ocorre a deformação da região central do chassi, com maior intensidade em sua parte traseira, ocorrendo então as maiores deformações nas vigas de suporte dos bancos traseiros e na primeira viga transversal do piso, localizada próxima a parte traseira. Em menor intensidade porém fazendo-se existente, é verificada a flexão da região inferior. A Figura 52 apresenta as deformações descritas para este modo de vibrar.

Figura 52 - Décimo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, com destaque para a maior deformação na parte traseira da região central.



Fonte: Ansys.

Já no décimo primeiro modo de vibrar a deformação predominante consiste na torção da região inferior do chassi, a qual chega a atingir um alto valor, de 20,223 mm, caracterizando este modo de vibrar como sendo aquele o qual possui a deformação com maior magnitude. Em paralelo, também ocorre a torção da região central do chassi, porém com menor magnitude se comparada com a deformação verificada na região inferior. Este modo de vibrar pode ser visto na Figura 53.

Figura 53 - Décimo primeiro modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, predominando-se a alta torção da região inferior do chassi.

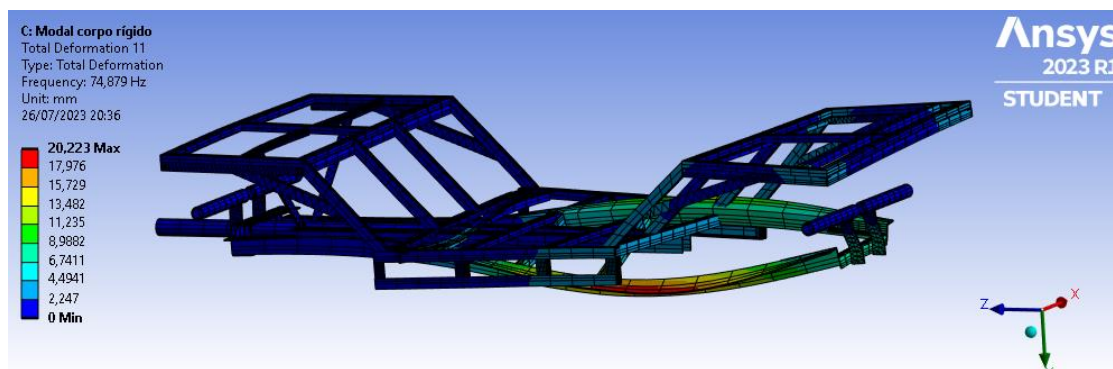
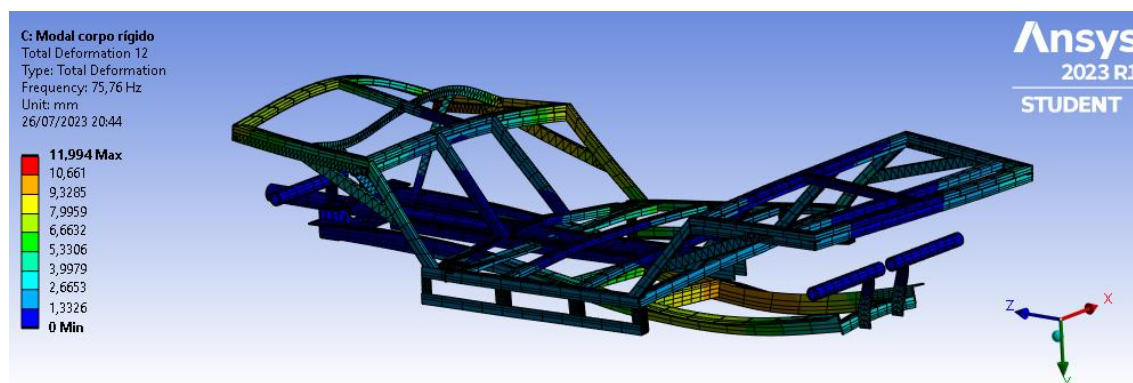


Figura: Ansys.

No décimo segundo modo de vibrar, a região inferior apresenta flexão, coexistindo também a torção da região central, com deformações de maiores magnitudes na parte dianteira. Tal pode ser visualizado na Figura 54.

Figura 54 - Décimo segundo modo de vibrar da estrutura na condição de corpo rígido, coexistindo flexão e torção, respectivamente, da região inferior e região central do chassi.



Fonte: Ansys.

De posse das frequências naturais e modos de vibrar do chassi na condição de corpo rígido, uma vez que esta é a condição em que o chassi se encontrará na prática, faz-se imprescindível uma atenciosa análise comparativa entre estes valores obtidos de frequências naturais e as frequências associadas às fontes de excitação a que o chassi estará submetido, a fim de evitar a ocorrência do fenômeno da ressonância. Este acontecimento consiste em indesejado e projetos em geral são elaborados levando-se em consideração que a ocorrência da ressonância seja evitada, dado o fato de que ela resulta em deformações excessivas, podendo

produzir graves consequências à integridade estrutural do sistema, resultando na falha de componentes e de sistemas como um todo. Como exemplificação do perigo do fenômeno da ressonância, diversas falhas de estruturas como edifícios, pontes, turbinas e asas de aviões foram associadas à ocorrência da ressonância.

Diante disso, a análise modal e o presente trabalho adquirem uma maior importância, tendo em vista a possibilidade de ser realizado o estudo acerca do projeto do chassi da Carruagem da Alegria de modo a analisar a existência da probabilidade de ocorrência da ressonância e, em caso positivo, desdobrar modificações em seu projeto visando evitar este fenômeno. Para isso, inicialmente foi necessário possuir conhecimento sobre as fontes de excitação atuantes na estrutura.

Neste trabalho, foram consideradas as fontes de excitação mapeáveis, ou seja, as fontes de excitação as quais se tem ciência de que elas se fazem presentes todo o tempo ou a maior parte do tempo em que ocorre a utilização da Carruagem da Alegria. Sendo assim, uma das principais fontes de excitação mapeáveis refere-se ao motor elétrico empregado no triciclo que traciona a Carruagem. Este consiste em uma fonte de excitação devido a rotação de seu rotor, o qual é capaz de apresentar uma rotação com frequência compreendida na faixa de 6,9 Hz até 8,12 Hz, uma vez que pode apresentar um giro de 414 rpm até 487 rpm conforme visto na Tabela 8.

Tabela 8 – Faixa de rotação do motor elétrico empregado no triciclo elétrico e frequência correspondente.

	<b>RPM</b>	<b>Hz</b>
<b>Rotação mínima</b>	414	6,9
<b>Rotação máxima</b>	487	8,12

Fonte: Próprio autor.

Outra fonte de excitação que pode se fazer presente durante a utilização do equipamento consiste na excitação causada pelas irregularidades do solo em que a Carruagem transitará. Porém, esta fonte de excitação não será levada em consideração neste trabalho pois não consiste em mapeável, dada a dificuldade em prever a frequência de excitação associada a uma irregularidade, já que esta depende de diversos fatores como por exemplo os aspectos físicos dos desvios do

solo. Além disso, a excitação provocada por uma irregularidade no solo possui atuação puramente momentânea.

Sendo assim, de posse das fontes mapeáveis de excitação e suas frequências incidentes sobre o chassi, uma análise foi realizada visando detectar a coincidência ou proximidade destas frequências de excitação com as frequências naturais do chassi. Os valores de frequências naturais considerados foram aqueles obtidos na simulação de corpo rígido, já que, como dito anteriormente, esta é a condição na qual a estrutura irá se encontrar na prática.

Além das deformações de grandes amplitudes que podem vir a ocorrer quando presenciada a ressonância, as quais são capazes de acarretar em danos estruturais ao chassi, o conforto dos ocupantes fica comprometido. Tal questão referente ao conforto dos passageiros adquire importância muito grande nesta análise. Pelo fato do público alvo da Carruagem da Alegria consistir em idosos e pessoas com deficiência e como este grupo de pessoas em geral é mais sensível, procurou-se tratar a questão da proximidade das frequências excitação com as frequências naturais da estrutura com maior cautela.

Sendo então as frequências de excitação atuantes sobre o chassi compreendidas na faixa de 6,9 Hz até 8,12 Hz, dado o fato da rotação do motor consistir na única fonte de excitação mapeável, como citando anteriormente, uma análise da Tabela 7 permite constatar que nenhuma das frequências naturais do chassi encontra-se dentro do intervalo das frequências de excitação, não havendo então a coincidência das frequências. Entretanto, levando-se em consideração a sensibilidade dos ocupantes do equipamento, pode-se afirmar que as frequências naturais associadas ao 2º e 3º modo de vibrar encontram-se relativamente próximas da faixa das frequências de excitação a ponto de ser cabível neste caso uma alteração no projeto de modo a obter valores de frequências naturais mais distantes da faixa da frequência de excitação de 6,9 Hz até 8,12 Hz, já que a sensibilidade das pessoas idosas e deficientes às vibrações e às deformações causadas por estas é maior.

### 3.3 IMPLEMENTAÇÃO DE MODIFICAÇÕES NO CHASSI

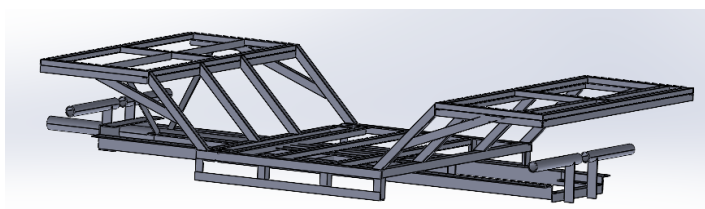
Portanto, decorrente do abordado na seção anterior, ou seja, do tipo de passageiros que a Carruagem da Alegria conterà e com o 2° e 3° modo de vibrar apresentando valores de frequências naturais convenientes de alteração, estudou-se a realização de modificações no projeto do chassi de maneira a afastar o máximo possível as frequências naturais do chassi com as frequências de excitação, já que em muitos projetos, tal como este, no âmbito das vibrações a intenção consiste em evitar a aproximação das frequências de excitação com as frequências naturais, uma vez que quanto maior a diferença entre estes dois tipos de vibrações, menor será a amplitude da vibração.

A primeira abordagem que foi estudada consistiu na modificação da estrutura, onde considerou-se a inclusão e/ou exclusão de elementos estruturais do chassi visando a alteração de sua rigidez. Além disso, isso também acarreta na modificação da massa do chassi, já que envolve a adição/retirada de elementos dotados de massa. Sendo assim, sabendo-se que podemos realizar uma analogia do funcionamento da simulação modal no Ansys com o método de determinação dos autovalores e autovetores da equação  $[k - \omega_n^2 m]\{X\} = 0$  e esta por sua vez envolve os termos de rigidez e massa do sistema, então a mudança na rigidez e massa do sistema surte na alteração dos resultados obtidos para os autovalores e autovetores, portanto, haverá diferença nas frequências naturais e modos de vibrar.

Existem diversas possibilidades quanto a modificações na estrutura da Carruagem. Neste trabalho, foram analisadas quatro configurações diferentes do chassi, para não obter uma demasiada quantidade de valores de frequências naturais a serem analisados no trabalho. A primeira configuração consistiu na estrutura original, sem modificações estruturais, enquanto que as outras três envolveram modificações relacionadas à adição e retirada de travamentos, vigas e perfis. As modificações realizadas foram norteadas a partir da análise das deformações que se fazem presentes no 2° e 3° modo de vibrar, já que as frequências naturais associadas a estes modos consistem nas frequências cujo valor almeja-se alterar. Sendo assim, a adição dos elementos no chassi e a localização destes foi atribuída de modo a reduzir a deformação existente no 2° e 3° modo de vibrar, desempenhando o papel de impedir, ou então pelo menos amenizar, o

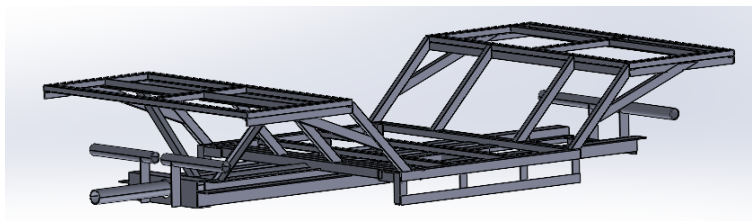
movimento verificado nestes modos de vibrar citados. Posto isso, a seguir são apresentadas as configurações do chassi consideradas no estudo realizado a respeito das modificações na estrutura da Carruagem da Alegria visando a alteração de suas frequências naturais. Todas as configurações da estrutura envolvendo modificações foram obtidas modelando-se o desenho CAD do chassi no software SolidWorks, onde foram construídos os elementos estruturais e também posicionados. As Figuras 55 e 56 exibem a primeira configuração analisada, referente ao chassi original.

Figura 55 – Primeira configuração do chassi, em seu formato original (Primeira vista).



Fonte: Próprio autor.

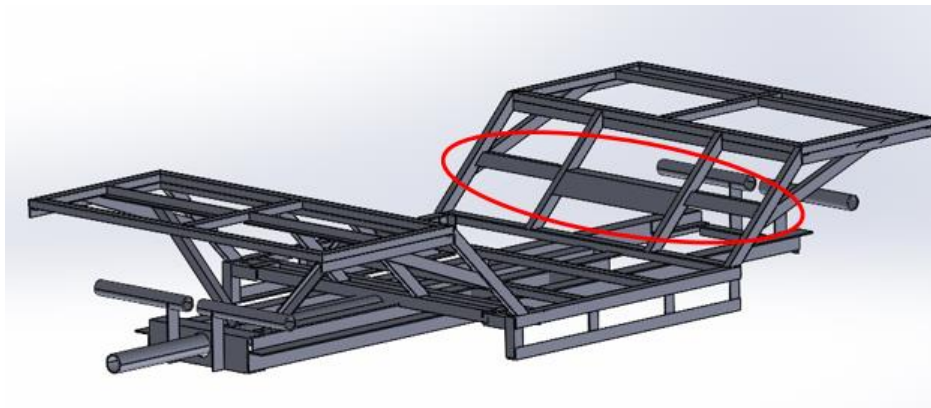
Figura 56 – Primeira configuração do chassi, em seu formato original (Segunda vista).



Fonte: Próprio autor.

Já a Figura 57 é referente à segunda configuração, apresentando a primeira modificação realizada, a qual envolve a inserção de travamentos entre os perfis diagonais dos suportes dos bancos traseiros, conforme indicado.

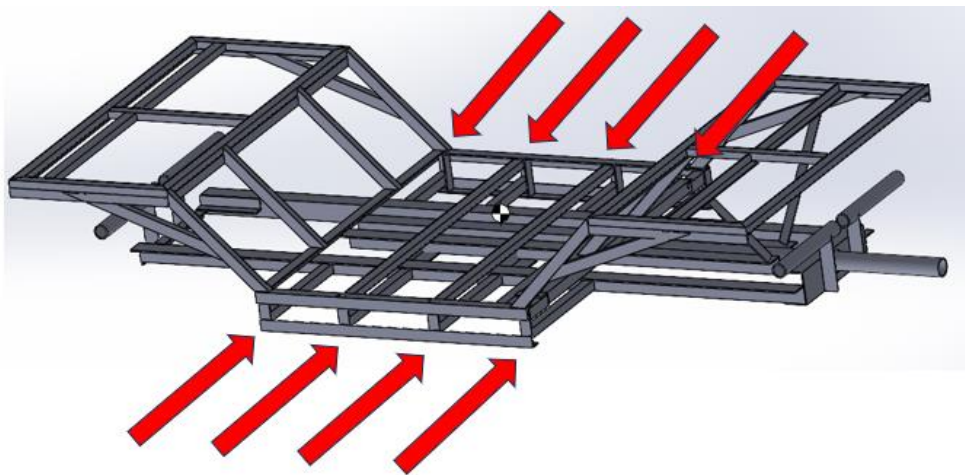
Figura 57 – Segunda configuração do chassi, com a indicação dos travamentos inseridos.



Fonte: Próprio autor.

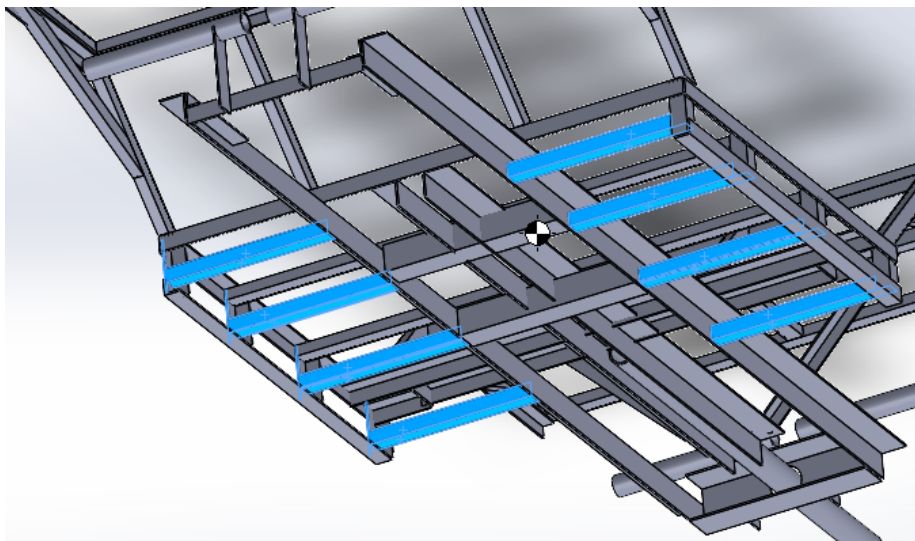
As Figuras 58 e 59 fazem referência à terceira configuração, exibindo a segunda modificação realizada, consistindo na inserção de reforços na parte inferior, conforme indicado.

Figura 58 – Terceira configuração do chassi, sinalizando o local da modificação.



Fonte: Próprio autor.

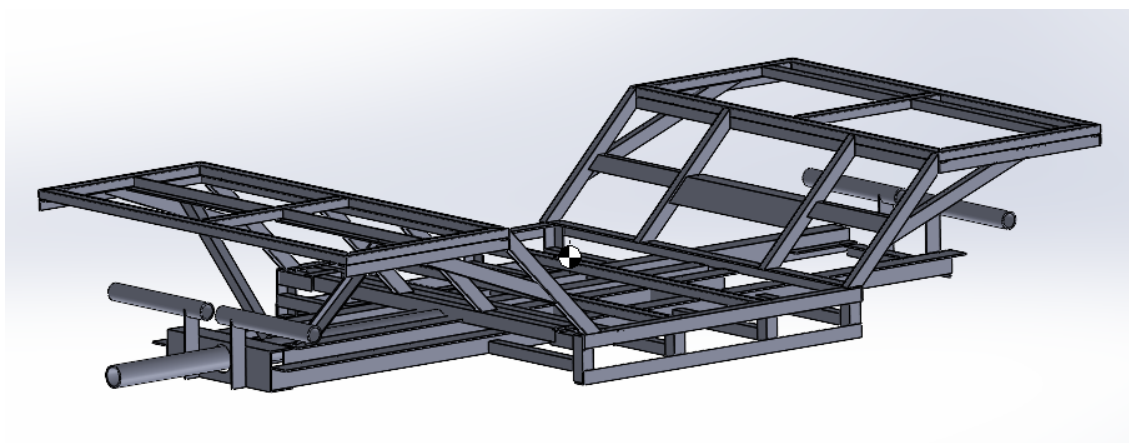
Figura 59 – Terceira configuração do chassi, apresentando os reforços inseridos na parte inferior.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, na Figura 60 é vista a quarta configuração, a qual corresponde a estrutura com ambas as modificações presentes na segunda e terceira configuração, ou seja, com os travamentos entre os perfis diagonais dos suportes dos bancos traseiros e os reforços na parte inferior.

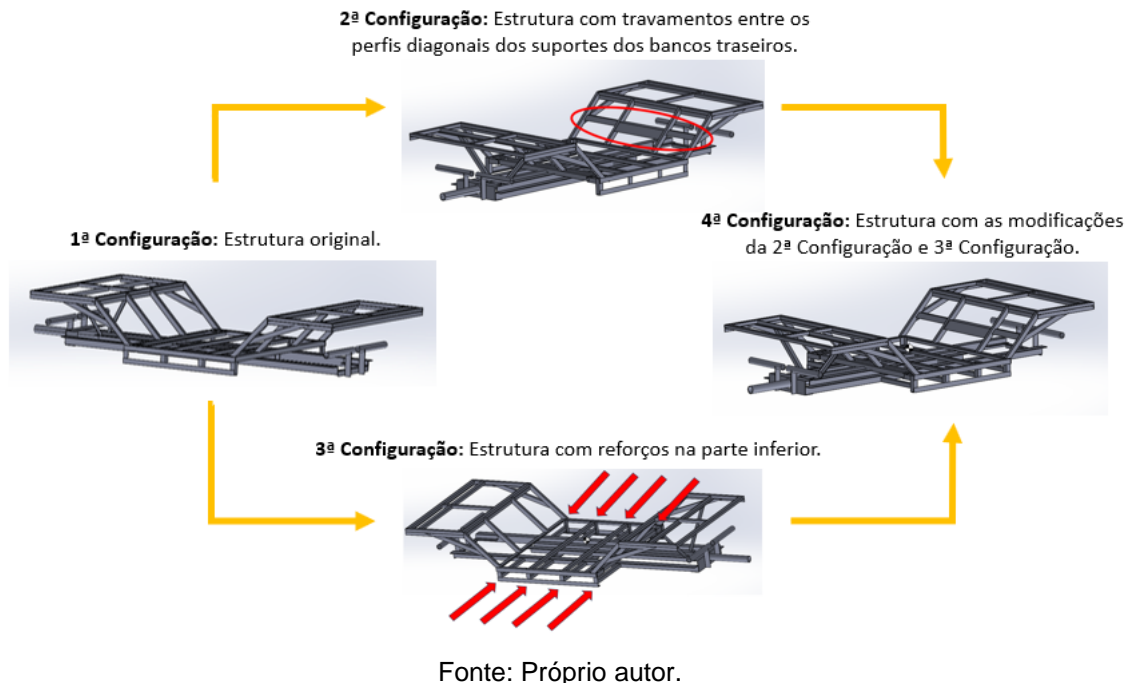
Figura 60 – Quarta configuração do chassi, consistindo na combinação da modificação presente na segunda e terceira configuração.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 61 resume todas as configurações do chassi consideradas nesta parte do trabalho.

Figura 61 – Configurações do chassi consideradas no estudo das modificações da estrutura.



Outra ação que também acarreta na modificação da rigidez da estrutura consiste na alteração do material utilizado para sua confecção. Não somente isto, a substituição do material também reflete na alteração da massa do sistema. Posto isso, foram avaliados, além das quatro configurações do chassi exibidas anteriormente, três tipos de materiais diferentes, ou seja, aço estrutural, alumínio e fibra de carbono com módulo de elasticidade de 230 GPa

Também faz-se de grande valia levar em consideração o passeio na Carruagem da Alegria sem a sua lotação máxima. Pelo fato de existir a possibilidade do equipamento trafegar com menos de quatro ocupantes, é fundamental também considerar a rodagem da estrutura com menos de quatro passageiros durante a análise das modificações a serem realizadas no chassi. Assim, tem-se mais um fator que acarreta na alteração dos valores de frequências naturais, consistindo então na quantidade de passageiros presentes na Carruagem, que pode ser traduzido como a massa incidente no chassi. Como no presente trabalho foi estabelecida a hipótese de que cada ocupante pesa 75 kg e considerando-se que nos passeios da

Carruagem existam no mínimo duas pessoas embarcadas e no máximo quatro, então no estudo das modificações no chassi para a alteração dos valores de suas frequências naturais levou-se em consideração três valores distintos de massas incidentes no chassi do equipamento, sendo de 150, 225 e 300 kg.

Outro fator determinante nas frequências naturais refere-se ao ponto de aplicação das massas. Para as situações em que existirão dois ou três passageiros, tem-se diferentes posições em que estes poderão encontrar-se acomodados na Carruagem. Para o caso em que haverão dois passageiros, é possível que ambos estejam sentados na parte dianteira ou na parte traseira do equipamento. Além disso, é possível também que um ocupante se encontre sentado na parte dianteira e o outro na parte traseira. Já para o caso em que haverão três passageiros, existe a possibilidade de dois estarem sentados na parte dianteira e um na parte traseira e também a possibilidade de dois na parte traseira e um na parte dianteira. A Tabela 9 apresenta todas as possíveis posições dos passageiros na Carruagem e as massas incidentes em cada parte do chassi, considerando que cada ocupante possui 75 kg e que durante os passeios podem existir de duas a quatro pessoas embarcadas no equipamento.

Tabela 9 – Possíveis posições dos passageiros na Carruagem da Alegria e disposições das massas no chassi.

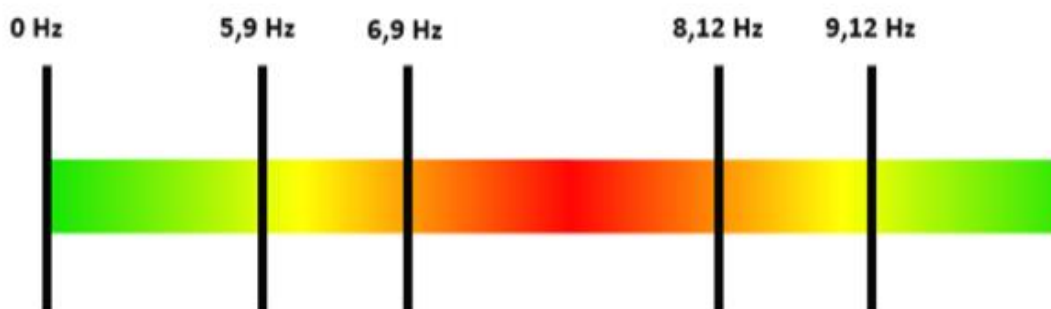
<b>Quantidade de passageiros</b>	<b>Massa total (kg)</b>	<b>Posição dos passageiros</b>	<b>Disposição das massas</b>
2	150	- 1 na parte dianteira	- 75 kg na parte dianteira
		- 1 na parte traseira	- 75 kg na parte traseira
		- 2 na parte dianteira	- 150 kg na parte dianteira
		- 2 na parte traseira	- 150 kg na parte traseira
3	225	- 2 na parte dianteira	- 150 kg na parte dianteira
		- 1 na parte traseira	- 75 kg na parte traseira
		- 1 na parte dianteira	- 75 kg na parte dianteira
		- 2 na parte traseira	- 150 kg na parte traseira
4	300	- 2 na parte dianteira	- 150 kg na parte dianteira
		- 2 na parte traseira	- 150 kg na parte traseira

Fonte: Próprio autor.

Posto isso, a estrutura foi simulada no Ansys em cada condição descrita anteriormente, ou seja, para cada configuração do chassi foi realizada a análise modal aplicando os três materiais abordados (aço estrutural, alumínio e fibra de carbono) e considerando a presença de dois a quatro passageiros na Carruagem, além das diferentes posições em que estes podem encontrar-se sentados. A combinação de todas estas condições resultou em 72 simulações, as quais possuíram analisados os valores de frequências naturais entregues.

Como critério de classificação em relação ao nível de criticidade dos valores obtidos para as frequências naturais, adotou-se a linha de raciocínio conforme a Figura 62, sendo que as frequências com valores enquadrados na zona vermelha foram classificadas como sendo indesejadas, pelo fato de encontrarem-se dentro da faixa das frequências de excitação do chassi, as quais são provenientes da rotação do motor do equipamento, conforme posto anteriormente. Portanto, as simulações do chassi as quais apresentaram frequências naturais inseridas na região vermelha indicam que determinada opção da estrutura não consiste em aceitável, pelo fato da ocorrência da ressonância.

Figura 62 – Critério para a classificação das frequências naturais obtidas nas simulações.



Fonte: Próprio autor.

As frequências naturais cujo valor enquadra-se na zona amarela são frequências que não provocam o fenômeno da ressonância porém encontram-se tão próximas das frequências de excitação a ponto de serem merecedoras de atenção, uma vez que a deformação que se fará presente não é conveniente, pelo fato de prejudicar o conforto dos passageiros, principalmente tratando-se de pessoas idosas

e com deficiência, as quais geralmente possuem maior sensibilidade, além de contribuir para a fadiga dos componentes estruturais do chassi. Neste trabalho, foi considerado que as frequências naturais com valores até 1 Hz a menos que a menor frequência de excitação (6,9 Hz) e com valores até 1 Hz a mais que a maior frequência de excitação (8,12 Hz) estão inseridas na região amarela.

Já para as frequências naturais abaixo de 5,9 Hz e acima de 9,12 Hz, ou seja, frequências externas à área de atenção, estas foram enquadradas na zona verde, não sendo prejudiciais ao conforto dos passageiros da Carruagem da Alegria e ao projeto de seu chassi.

Vale ressaltar que os valores limites das frequências naturais por zona, vistos na Figura 62, foram atribuídos sem a existência de um profundo rigor e estudo técnico, sendo somente para nortear o projeto do chassi diante do caso de existência de valores de frequências naturais dentro das faixas indesejada e merecedora de atenção, desempenhando então muito mais um fator didático para a condução deste trabalho e manipulação de projetos em que há o intuito de realizar uma análise dinâmica.

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas análises modais de corpo rígido no Ansys para cada opção do chassi mencionada anteriormente, aplicada a classificação nos valores das frequências naturais de acordo com o critério de classificação abordado. Portanto, foram consideradas as quatro configurações do chassi apresentadas; os materiais aço estrutural, alumínio e fibra de carbono; a existência de dois a quatro passageiros no equipamento e as diferentes disposições destes no passeio. Inicialmente, a simulação ocorreu considerando o chassi composto por aço estrutural, sendo apresentados nos Quadros 1, 2, 3 e 4 os resultados obtidos para este material, para cada configuração analisada.

Quadro 1 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a primeira configuração do chassi (estrutura original) feita de aço estrutural.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras
Frequência natural (Hz)	4,29	10,90	3,16	4,29	3,16	3,16
	7,16	11,53	5,41	7,16	5,41	5,41
	15,41	13,76	17,98	11,99	15,30	11,95
	19,46	19,56	18,51	18,92	18,49	18,46
	24,10	25,03	30,19	19,54	19,18	18,63
	26,65	31,98	57,62	24,08	26,62	19,48
	41,80	41,86	58,89	31,82	41,72	31,81
	57,66	57,93	66,15	57,66	57,64	57,63
	64,36	64,15	74,68	63,86	64,34	63,83
	73,45	74,81	76,50	72,19	71,59	70,03
	75,13	76,14	82,36	74,93	75,00	74,88
	76,69	79,31	87,95	75,82	76,55	75,76

Fonte: Próprio autor.

Apesar do estudo das modificações na estrutura da Carruagem da Alegria ter sido realizado em face da intenção de afastar as frequências naturais associadas ao 2° e 3° modo de vibrar obtidas na primeira simulação de corpo rígido realizada neste trabalho, a qual considerou o chassi na sua configuração original composto por aço estrutural e carregado com quatro passageiros, os valores das frequências naturais obtidas nesta simulação ao serem classificados de acordo com o critério da Figura 62 consistem como aceitáveis, por estarem enquadrados na zona verde, inclusive as frequências naturais associadas ao 2° e 3° modo de vibrar. Entretanto, por levar em consideração e também simular demais condições de utilização da Carruagem não abordadas na primeira simulação, ou seja, condições em que se considera o carregamento do equipamento com duas e três pessoas, este estudo investigativo das alterações no chassi do equipamento assumiu grande importância ao revelar, conforme visto no Quadro 1, que quando carregado com dois passageiros, sendo um sentado na parte dianteira e outro na parte traseira, e também quando carregado com três passageiros, sendo dois sentados na parte dianteira e um na parte traseira, a aplicação do critério da Figura 62 demanda atenção quanto ao projeto original do chassi. Tal se deve então pela presença de frequências naturais classificadas como indesejadas, por encontrarem-se na zona vermelha, portanto, o chassi encontra-se suscetível a ressonância.

Quadro 2 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a segunda configuração do chassi feita de aço estrutural.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras
Frequência natural (Hz)	5,71	6,32	4,25	5,56	4,24	4,22
	8,85	10,75	6,92	6,63	6,86	6,45
	9,07	14,04	17,78	8,72	8,82	6,78
	15,51	20,60	25,77	11,99	15,28	11,54
	22,59	29,12	27,65	22,49	17,97	17,83
	31,11	30,95	36,24	28,61	31,06	28,56
	35,34	35,04	37,56	30,79	35,24	30,74
	37,44	36,65	38,88	36,58	37,35	36,58
	38,57	38,68	45,42	38,40	38,49	38,37
	39,79	39,61	46,58	39,38	39,72	39,36
	47,54	47,39	50,56	47,27	47,52	47,26
	56,28	56,32	56,28	56,27	56,27	56,27

Fonte: Próprio autor.

Quadro 3 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a terceira configuração do chassi feita de aço estrutural.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras
Frequência natural (Hz)	6,83	17,14	5,01	6,82	5,01	5,01
	12,11	17,78	8,99	12,08	8,98	8,97
	22,89	20,05	23,70	17,34	22,87	17,30
	27,28	28,54	34,44	19,87	23,68	19,85
	30,40	33,21	44,76	30,39	27,28	23,68
	35,43	35,28	57,21	33,04	35,40	33,00
	43,06	46,52	66,04	35,32	42,80	35,30
	64,44	65,09	81,37	64,04	64,31	63,83
	71,76	83,26	84,64	69,58	69,16	66,84
	78,10	91,01	94,68	77,43	77,57	76,91
	89,46	95,45	99,74	88,96	89,40	88,89
	98,41	99,74	111,08	98,18	98,37	98,14

Fonte: Próprio autor.

Quadro 4 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a quarta configuração do chassi feita de aço estrutural.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras
Frequência natural (Hz)	6,32	16,99	5,02	6,32	5,02	5,02
	13,09	17,26	9,83	13,03	9,82	9,81
	22,89	20,04	23,17	17,38	22,86	17,32
	27,25	27,56	35,10	19,87	23,17	19,86
	28,90	33,04	45,53	28,87	27,25	23,16
	36,67	36,55	51,33	32,95	36,64	32,77
	42,48	41,15	65,21	36,51	41,82	36,50
	63,43	65,13	82,70	62,00	61,91	58,73
	64,71	82,86	90,43	63,23	63,18	62,92
	84,90	87,33	91,48	83,68	84,70	83,45
	89,30	91,89	98,46	89,17	88,91	88,81
98,51	103,54	110,94	98,24	98,11	97,86	

Fonte: Próprio autor.

Já nos Quadros 5, 6, 7 e 8 são apresentadas as frequências naturais para as simulações considerando o chassi construído de alumínio.

Quadro 5 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a primeira configuração (estrutura original) do chassi feita de alumínio.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras
Frequência natural (Hz)	2,69	7,53	1,93	2,69	1,93	1,93
	4,65	10,36	3,37	4,65	3,37	3,37
	10,36	12,50	11,69	7,58	10,35	7,57
	15,97	13,21	17,71	11,79	11,68	11,64
	16,47	20,01	30,25	15,89	16,46	11,80
	18,49	25,05	57,99	18,39	18,36	18,25
	27,42	41,82	58,04	20,04	27,41	19,95
	58,07	58,36	66,23	58,07	58,06	58,06
	63,72	63,83	74,88	63,44	63,70	63,43
	69,02	74,92	76,68	68,49	68,11	67,57
	75,05	75,90	82,37	74,93	75,04	74,91
	75,68	78,86	88,05	75,39	75,66	75,37

Fonte: Próprio autor.

Quadro 6 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a segunda configuração do chassi feita de alumínio.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras
Frequência natural (Hz)	3,60	3,85	2,61	3,47	2,60	2,59
	5,49	6,67	4,29	4,06	4,25	3,92
	5,81	13,75	11,52	5,52	5,46	4,20
	9,87	18,65	25,83	7,47	9,70	7,11
	15,56	20,55	27,65	15,31	11,60	11,50
	24,87	30,74	36,10	18,52	24,85	18,31
	30,64	35,05	37,52	30,54	30,62	30,52
	36,35	36,34	38,72	36,31	36,35	36,31
	38,28	38,47	45,19	38,26	38,26	38,25
	39,22	39,47	46,38	39,18	39,21	39,18
	47,28	47,40	49,45	47,20	47,27	47,18
56,21	56,66	56,61	55,45	54,94	54,17	

Fonte: Próprio autor.

Quadro 7 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a terceira configuração do chassi feita de alumínio.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras
Frequência natural (Hz)	4,27	10,71	3,06	4,27	3,06	3,06
	7,67	12,01	5,53	7,65	5,53	5,52
	14,87	17,70	15,09	10,81	14,86	10,78
	16,86	21,26	34,43	12,06	15,06	12,05
	20,55	28,62	44,80	20,06	16,89	15,06
	28,54	35,17	56,01	21,31	28,53	20,86
	35,23	46,01	66,06	35,18	35,22	35,18
	63,62	64,94	81,24	63,22	63,23	62,67
	65,73	82,69	84,62	65,29	64,99	64,71
	76,76	91,20	94,94	76,48	76,55	76,28
	88,90	95,05	99,95	88,69	88,86	88,66
98,30	99,95	111,00	98,21	98,28	98,19	

Fonte: Próprio autor.

Quadro 8 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a quarta configuração do chassi feita de alumínio.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras.
Frequência natural (Hz)	4,28	10,72	3,07	4,28	3,07	3,07
	8,42	12,00	6,11	8,38	6,10	6,09
	14,89	17,06	15,08	10,86	14,87	10,80
	16,87	21,31	35,10	12,06	15,05	12,06
	20,29	27,64	45,47	19,98	16,89	15,05
	28,42	36,36	49,61	21,11	28,41	20,84
	36,41	40,44	65,12	36,35	36,40	36,34
	57,04	64,97	82,69	56,25	55,73	54,90
	62,89	82,69	90,59	62,78	62,78	62,67
	83,15	86,60	91,62	82,63	83,04	82,52
	88,92	91,99	98,28	88,89	88,76	88,74
97,93	103,62	110,91	97,83	97,78	97,69	

Fonte: Próprio autor.

Os Quadros 9, 10, 11 e 12 são referentes às frequências naturais para as simulações considerando o chassi construído de fibra de carbono.

Quadro 9 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a primeira configuração (estrutura original) do chassi feita de fibra de carbono.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras.
Frequência natural (Hz)	1,64	6,75	1,17	1,64	1,17	1,17
	3,26	8,17	2,35	3,25	2,34	2,34
	9,55	10,71	8,77	6,91	8,77	6,90
	12,04	10,94	13,92	10,76	9,55	8,77
	14,15	17,93	34,91	12,08	14,07	10,80
	15,16	20,67	44,37	14,11	15,15	14,03
	24,69	33,91	52,22	17,78	24,68	17,78
	44,17	44,39	56,81	44,16	44,16	44,16
	51,12	51,25	59,58	51,10	51,12	51,09
	58,93	58,91	60,70	58,90	58,93	58,90
	59,68	59,67	80,67	59,67	59,68	59,67
	67,05	83,66	91,87	66,66	65,99	65,60

Fonte: Próprio autor.

Quadro 10 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a segunda configuração do chassi feita de fibra de carbono.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras.
Frequência natural (Hz)	2,13	2,43	1,53	2,07	1,53	1,52
	3,49	4,88	2,85	2,56	2,82	2,49
	3,88	10,22	8,39	3,70	3,47	2,78
	7,52	16,64	20,46	5,62	7,39	5,37
	11,48	17,73	23,63	11,47	8,49	8,47
	22,80	24,35	29,10	16,56	22,78	16,56
	24,42	27,81	31,64	24,38	24,41	24,37
	29,16	29,13	34,22	29,13	29,16	29,13
	31,69	31,69	38,62	31,67	31,69	31,67
	34,44	34,55	42,76	34,42	34,43	34,41
	42,70	42,77	45,67	42,70	42,70	42,70
	47,08	47,07	48,20	47,03	47,07	47,03

Fonte: Próprio autor.

Quadro 11 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a terceira configuração do chassi feita de fibra de carbono.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras.
Frequência natural (Hz)	2,57	8,14	1,83	2,57	1,83	1,83
	5,21	10,83	3,74	5,18	3,74	3,73
	11,53	13,30	11,87	8,33	11,51	8,29
	15,26	18,30	27,97	10,88	11,87	10,88
	16,22	23,60	42,44	16,20	15,27	11,87
	25,18	28,48	53,33	18,19	25,18	18,18
	27,99	38,47	55,31	27,99	27,98	27,98
	52,86	55,81	72,26	52,82	52,80	52,75
	62,98	76,96	89,67	62,48	61,69	61,18
	71,32	89,48	93,88	71,28	71,23	71,19
	89,33	99,31	99,71	89,21	89,32	89,20
	98,77	100,20	103,89	98,61	98,76	98,59

Fonte: Próprio autor.

Quadro 12 – Frequências naturais obtidas durante a análise modal de corpo rígido para a quarta configuração do chassi feita de fibra de carbono.

Massa	150 kg			225 kg		300 kg
Configuração	1 diant. e 1 tras.	2 diant.	2 tras.	2 diant. e 1 tras.	1 diant. e 2 tras.	2 diant. e 2 tras.
Frequência natural (Hz)	2,58	8,14	1,85	2,58	1,85	1,85
	5,82	10,82	4,20	5,77	4,19	4,18
	11,60	12,94	11,76	8,42	11,56	8,33
	15,25	18,34	29,68	10,88	11,76	10,88
	15,90	23,43	42,55	15,87	15,28	11,76
	25,11	29,71	47,28	18,17	25,08	18,17
	29,75	33,53	54,02	29,74	29,74	29,74
	52,52	56,22	80,45	52,36	52,01	51,55
	54,21	85,11	90,96	53,78	53,14	52,96
	80,67	87,43	94,79	80,64	80,52	80,49
	90,78	92,89	97,67	90,47	90,75	90,44
	95,17	96,77	101,35	95,15	95,13	95,12

Fonte: Próprio autor.

Realizadas as modificações no chassi da Carruagem da Alegria e simulando-as no Ansys, atentando-se para diferentes carregamentos na estrutura, ou seja, considerando a presença de dois a quatro passageiros e também levando em consideração as possíveis disposições destes no equipamento, nota-se que, seguindo o critério de classificação da Figura 62, para as modificações abordadas, ou seja, as três modificações estruturais apresentadas neste trabalho, além do chassi em sua configuração original e os três materiais considerados na sua construção (aço estrutural, alumínio e fibra de carbono), foram obtidas algumas condições em que o chassi mesmo carregado com dois a quatro passageiros, considerando-se a variação da posição destes no passeio, não apresenta valores indesejados de frequências naturais, possuindo apenas frequências de valores mercedores de atenção, ou seja, frequências enquadradas na zona amarela.

Assim, cabe citar as opções em que o chassi é visto na sua terceira e quarta configuração quando construído de aço estrutural, na sua quarta configuração quando construído de alumínio e também nas condições em que é visto na sua terceira e quarta configuração quando construído de fibra de carbono. Em todas estas opções citadas, mesmo variando-se a quantidade de passageiros de dois a quatro e a sua disposição no equipamento, não há frequências naturais classificadas como indesejadas. Entretanto, tais condições apresentam valores de frequências

naturais merecedores de atenção, o que não exclui a necessidade de mais esforços sobre estas opções no sentido de afastar estas frequências naturais até a zona considerada como aceitável, seja através da investigação de novos materiais para a construção do chassi ou por meio da implementação de alterações estruturais sobre as configurações apresentadas, sendo válido inclusive o estudo de modificações estruturais novas, ou seja, totalmente distintas daquelas apresentadas neste trabalho.

#### 4. CONCLUSÃO

A elaboração deste trabalho consistiu de grande importância para o projeto do chassi da Carruagem da Alegria. Através da análise dinâmica pelo Método dos Elementos Finitos, foi obtido o comportamento dinâmico da estrutura do equipamento, através da posse de suas frequências naturais e modos de vibrar entregues pelo software Ansys. Além disso, foi possibilitada a investigação da utilidade e relevância da análise dinâmica pelo Método dos Elementos Finitos, que se mostrou de grande destaque, principalmente por dispensar a necessidade de construção de protótipos físicos, otimizando tempo e gastos financeiros, quando existente o interesse em avaliar o comportamento dinâmico de uma possível estrutura de interesse.

Ademais, na análise dinâmica foi visto um tipo de análise muito importante para a validação da geometria da estrutura, ou seja, a análise modal de corpo livre, onde é permitida a interpretação dos valores referentes as seis primeiras frequências naturais de modo a constatar se o modelo CAD encontra-se válido e conseqüentemente adequado para prosseguir com as demais análises que se tem interesse, evitando então obter resultados não condizentes com a realidade ao serem realizadas as simulações.

O estudo realizado no presente trabalho consistiu em muito importante para enrobustecer o projeto, tendo em vista que eram desconhecidas informações a respeito do comportamento dinâmico do chassi, sendo inclusive constatado durante as simulações que o fenômeno da ressonância se faz presente durante casos específicos de utilização da Carruagem, ou seja, no caso em que o equipamento é carregado com dois passageiros sendo um sentado em sua parte dianteira e o outro na traseira e também no caso em que é carregado com três passageiros sendo dois sentados na parte dianteira e um na traseira, considerando-se passageiros com 75 kg. Em tais casos, tem-se a intensificação do processo de fadiga dos elementos que compõem o chassi e também, não menos importante, a ocorrência de desconforto excessivo nos passageiros devido as grandes amplitudes de vibrações, principalmente quando nos recordamos do fato de que os ocupantes da Carruagem da Alegria, em sua grande parte, são pessoas idosas e deficientes.

Diante disso, as modificações implementadas no chassi do equipamento visaram obter opções de chassi em que este não apresentasse frequências naturais indesejadas, ou seja, frequências com valor inserido na faixa da frequência de excitação mapeável. Com isso, foram obtidos resultados positivos para as opções referentes ao chassi na sua terceira e quarta configuração quando construído de aço estrutural, na sua quarta configuração quando construído de alumínio e também na opção em que é visto na sua terceira e quarta configuração quando construído de fibra de carbono. Construído nestas condições, o chassi se encontrará livre do fenômeno da ressonância. Vale ressaltar que tais sugestões de opções de chassi consistem em uma melhoria muito significativa em relação ao chassi original, uma vez que através das propostas de modificações no chassi saiu-se de uma situação indesejada e não recomendada para um projeto, em que a ressonância se fazia presente. Apesar disso, o trabalho desenvolvido consiste em um pontapé inicial referente ao projeto do chassi da Carruagem da Alegria no âmbito dinâmico, sendo ainda cabível desdobrar esforços para obter uma estrutura mais otimizada, já que as opções de chassi apresentadas como sendo opções de melhoria em relação ao chassi original ainda possuem frequências naturais próximas à faixa da frequência de ressonância.

Deste modo, ficam como sugestões para trabalhos futuros a possibilidade de estender o estudo das modificações estruturais no chassi e também levar em consideração a viabilidade da adoção de demais materiais na sua construção de modo a obter todas as frequências naturais com valores tidos como aceitáveis. Com isso, cabe a revisão das faixas de frequências naturais tidas como merecedoras de atenção e aceitáveis, através da consideração de fatores como o grau de refinamento do projeto e custos de projeto e fabricação. É fundamental que as modificações estruturais a serem investigadas levem em consideração a possibilidade de serem implementadas, analisando-se fatores tais como o risco destas modificações impossibilitarem o posicionamento de algum item e/ou sistema no chassi do equipamento.

Também é fundamental atentar-se quanto as alterações que vierem a ser feitas na Carruagem da Alegria tais como a alteração de seu motor ou a inclusão de algum sistema que possa originar frequências de excitação coincidentes com as frequências naturais do seu chassi.

Por fim, também faz-se de grande valia que o aceite nos valores das frequências naturais obtidas somente ocorra após realizada a análise estática, para que o chassi apresente resultados adequados não somente do ponto de vista da análise dinâmica mas também considerando os resultados obtidos na análise estática, sendo fundamental o desenvolvimento em paralelo de ambas as análises.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1]. BROTTTO, T. F. “Saúde mental para pessoas com deficiência”. Psicólogo.Com.br. 2022. Disponível em: <https://www.psicologo.com.br/blog/saude-mental-para-pessoas-com-deficiencia/>. Acesso em: 22 de abril de 2023.
- [2]. Unesp - Universidade Estadual Paulista – Câmpus de Ilha Solteira. University Extension Project: CARRIAGE OF JOY. Youtube. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=t40xbDn9Z8k>. Acesso em: 22 de abril de 2023.
- [3]. 11/10 – Dia da Pessoa com Deficiência Física. Biblioteca Virtual em Saúde. Disponível em: <https://bvsmis.saude.gov.br/11-10-dia-da-pessoa-com-deficiencia-fisica/#:~:text=O%20Brasil%20possui%20mais%20de,13%20milh%C3%B5es%20s%C3%A3o%20deficientes%20f%C3%ADsicos>. Acesso em: 23 de abril de 2023.
- [4]. FIOCRUZ, C. “O envelhecimento populacional compromete o crescimento econômico no Brasil?”. CEE – Centro de Estudos Estratégicos da Fiocruz Antonio Ivo de Carvalho. 2020. Disponível em: <https://cee.fiocruz.br/?q=envelhecimento-populacional-compromete-o-crescimento-economico>. Acesso em: 23 de abril de 2023.
- [5]. LUZ, R. R. “Vantagens da Previdência Complementar para o servidor público e para o RPPS”. SlidePlayer. 2019. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/17556912/>. Acesso em: 23 de abril de 2023.
- [6]. RAO, S. “Vibrações Mecânicas”. 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [7]. ANÁLISE de frequência. Ajuda no SolidWorks. 2016. Disponível em: [https://help.solidworks.com/2016/portuguese-brazilian/solidworks/cworks/c\\_frequency\\_analysis.htm](https://help.solidworks.com/2016/portuguese-brazilian/solidworks/cworks/c_frequency_analysis.htm). Acesso em: 07 de maio de 2023.
- [8]. SOUZA, A. H. R.; SOUZA, L. S. M. “Análise modal numérica de uma estrutura do tipo Baja”. UTFPR. 2019. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/27562/1/CP\\_COEME\\_2019\\_1\\_01.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/27562/1/CP_COEME_2019_1_01.pdf). Acesso em: 07 de maio de 2023.
- [9]. CARLESSO, J. L. “Análise estrutural de um chassi de protótipo de eficiência energética pelo método dos elementos finitos”. UTFPR. 2015. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1K0eFUEpi93trzSM381KFKFUGQm6ciOrO>. Acesso em: 08 de maio de 2023.
- [10]. SILVA, L. G. “Análise estrutural e modal de um chassi de motocicleta”. UFPB. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13399/1/LGS10072018.pdf>. Acesso em: 19 de maio de 2023.
- [11]. PICOLI, R. L. “Aplicação da análise de componentes principais a problemas de engenharia”. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2014. Disponível em: [https://www.ufjf.br/engcomputacional/files/2018/08/Monografia\\_RonaroPicoli.pdf](https://www.ufjf.br/engcomputacional/files/2018/08/Monografia_RonaroPicoli.pdf). Acesso em: 16 de julho de 2023.

- [12]. MOTOR de roda traseira 48V 1000W, 46 polos magnéticos 57,5-59 N.M motor de cubo traseiro de bicicleta elétrica aro de liga de alumínio para cadeiras de rodas. Amazon. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/traseira-magn%C3%A9ticos-traseiro-bicicleta-el%C3%A9trica/dp/B0BCHLSQR2>. Acesso em: 05 de agosto de 2023.
- [13]. MAUS, J. “Cycling without age’ in Copenhagen”. BikePortland. 2013. Disponível em: <https://bikeportland.org/2013/05/31/cycling-without-age-in-copenhagen-87631>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.
- [14]. FIVE step guide to Cycling Without Age. ChangeX. Disponível em: <https://cdn.filestackcontent.com/wiAaTnbSgiSILi4Jvnuh>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.
- [15]. PENEIRAS vibratórias inclinadas. Facix. Disponível em: <https://www.facix.ind.br/peneira-vibratoria-inclinada-venda>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.
- [16]. UNIDADE 1 – Introdução ao estudo das vibrações. Fernando e guia. Disponível em: [https://www.fernandoeguia.com/uploads/6/4/0/5/6405834/unidade1\\_1.pdf](https://www.fernandoeguia.com/uploads/6/4/0/5/6405834/unidade1_1.pdf). Acesso em: 10 de setembro de 2023.
- [17]. FRASES Famosas “Napoleão”. Frasesfamosas. Disponível em: <https://www.frasesfamosas.com.br/buscar-frases/?q=napole%C3%A3o>. Acesso em: 18 de setembro de 2023.