

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

**ELIAS MORAIS DA SILVA JUNIOR**

**ANÁLISE ESTÁTICA DE UM CICLO-RICKSHAW ADAPTADO**

**Ilha Solteira  
Outubro de 2024**

**ELIAS MORAIS DA SILVA JUNIOR**

**ANÁLISE ESTÁTICA DE UM CICLO-RICKSHAW ADAPTADO**

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  
Outubro de 2024**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586a Silva Júnior, Elias Morais da.  
Análise estática de um ciclo-rickshaw adaptado / Elias Morais da Silva Júnior.  
-- Ilha Solteira: [s.n.], 2024  
40 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso ( Graduação em Engenharia Mecânica) -  
Universidade Estadual Paulista UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,  
2024

Orientador: Márcio Antônio Bazani

Inclui bibliografia

1. Ciclo-rickshaw. 2. Estática. 3. Inventor.

**ATA DE DEFESA**

**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 estática de um ciclo-rickshaw adaptado

Aluno: Elias Morais da Silva Junior

RA: 171052731

Orientador: Marcio Antonio Bazani

Aprovado ( X ) – Reprovado ( ) pela Comissão Examinadora

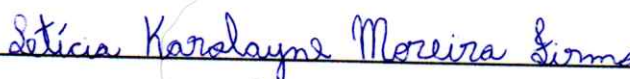
Nota obtida: 9.0

Comissão Examinadora:

Prof. \_\_\_\_\_

  
Presidente (Orientador)

Prof. \_\_\_\_\_



Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CARLINEIA MARCIANA DOS SANTOS PEREIRA  
Data: 31/10/2024 21:40:51-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. \_\_\_\_\_

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ELIAS MORAIS DA SILVA JUNIOR  
Data: 30/10/2024 17:17:25-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP) 30 de Outubro de 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à UNESP Ilha Solteira, universidade pública.

Aos professores do curso de engenharia mecânica e principalmente ao professor Márcio Antonio Bazani por me orientar na execução deste trabalho.

Agradeço à minha família, irmã e avó, em especial à minha mãe, Flaudiméia, e meu pai, Elias, por acreditarem e apoiarem durante toda a minha graduação.

Aos amigos que tanto me suportaram e apoiaram nessa caminhada, sobretudo aos amigos de curso por compartilharem as longas noites de estudo, juntos chegamos até aqui.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise estrutural de um ciclo-rickshaw adaptado utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) no software Inventor. O objetivo é avaliar a resistência e segurança do chassi sob diferentes condições de carga, garantindo sua integridade para uso em vias públicas. A metodologia envolveu a modelagem tridimensional do chassi, definição do material (aço AISI 1020), e a simulação das tensões de Von Mises e deslocamentos. Os resultados mostraram que o chassi apresenta um fator de segurança de 15, muito acima do mínimo estabelecido de 1,5, o que garante sua robustez e segurança. O estudo conclui que a estrutura está apta para suportar as cargas previstas, sem necessidade de modificações significativas no design.

**Palavras chave:** Ciclo-rickshaw, Simulação, Inventor.

## **ABSTRACT**

This work presents a structural analysis of an adapted cycle rickshaw using the Finite Element Method (FEM) in the Inventor software. The objective is to assess the strength and safety of the chassis under different loading conditions, ensuring its integrity for public road use. The methodology involved the three-dimensional modeling of the chassis, material definition (AISI 1020 steel), and simulation of Von Mises stresses and displacements. The results showed that the chassis has a safety factor of 15, far above the minimum required of 1.5, ensuring its robustness and safety. The study concludes that the structure can withstand the predicted loads, with no significant design modifications needed.

**Keywords:** Ciclo-rickshaw, Simulation, Inventor.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Grandes obras de engenharia estrutural .....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 2 – Ciclo-rickshaw .....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 3 - Estado plano de tensão .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4 – Exemplo de aplicação do Método de Elementos Finitos.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 5 – Metodologia para simulação .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 6 - Objeto de estudo.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 7 – Vista Isométrica do Chassi.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 8 – Malha aplicada ao projeto .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 9 – Forças aplicadas para análise .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 10 – Tensão de Von Mises.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 11 – Fator de segurança – Vista Isométrica superior .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 12 – Fator de segurança – Vista lateral .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 14 – Deslocamento em Y .....</b>	<b>37</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Coordenadas do centro de massa do corpo composto
$\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$	Coordenadas do centro de massa de cada parte composta do corpo.
$J_0$	Momento de inércia polar
$I_x, I_y, I_z$	Momentos de inércia
$V$	Força cortante
$W$	Carregamento
$M$	Momento fletor
$\sigma$	Tensão normal
$c$	Distância entre o eixo e o ponto mais afastado
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$Q$	Produto da distância do eixo ao centróide da área de interesse pela área onde a tensão é calculada
$t$	Largura da seção na qual a tensão deve ser calculada
$E$	Limite de escoamento
$\varepsilon$	Deformação
$\sigma_{esc}$	Tensão de escoamento
$\sigma_{VM}$	Tensão de Von Mises
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\theta$	Ângulo de deslocamento
$\theta'$	Ângulo após cisalhamento

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>12</b>
2.1.1. OBJETIVO GERAL .....	12
2.1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO .....	12
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
3.1.1. ANÁLISE ESTRUTURAL.....	13
3.1.2. CENTRO DE MASSA.....	15
3.1.3. MOMENTO DE INÉRCIA .....	15
3.1.4. FORÇA CORTANTE E MOMENTO FLETOR.....	16
3.1.5. TENSÕES.....	16
3.1.6. FLEXÃO .....	17
3.1.7. CISALHAMENTO .....	17
3.1.8. LEI DE HOOKIE.....	18
3.1.9. ESTADO PLANO DE TENSÃO .....	18
3.1.10. CRITÉRIO DE FALHA .....	20
3.1.11. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	22
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>26</b>
4.1.1. LEVANTAMENTO GEOMÉTRICO .....	27
4.1.2. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL NO INVENTOR .....	28
4.1.3. DEFINIÇÃO DO MATERIAL .....	29
4.1.4. GERAÇÃO DA MALHA .....	30
4.1.5. CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	31
4.1.6. CARGA TOTAL APLICADA .....	32
<b>5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
5.1.1. SIMULAÇÃO DA TENSÃO MÁXIMA DE FLEXÃO .....	33
5.1.2. CRITÉRIO DE FALHA.....	34
5.1.3. DESLOCAMENTO MÁXIMO NO CHASSI .....	36
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>40</b>

## 1. Introdução

No seu influente livro "História da Resistência dos Materiais", o renomado engenheiro Stephen Timoshenko (1878-1972) traça um minucioso relato do desenvolvimento teórico em torno do comportamento das estruturas ao longo dos séculos.

A Engenharia Estrutural, embora tenha suas origens de maneira empírica, é intrinsecamente ligada aos magníficos monumentos que marcam a história da humanidade como ilustrado na figura 1. Desde as majestosas pirâmides do antigo Egito até os imponentes templos, estradas, pontes e fortificações da Grécia e de Roma antiga, cada construção conta uma parte da evolução dessa disciplina crucial (Martha, 2017).

**Figura 1 – Grandes obras de engenharia estrutural**



**Fonte:** Timoshenko, S. (1983)

Ao analisarmos essas maravilhas arquitetônicas, podemos perceber não apenas o avanço técnico, mas também o profundo conhecimento intuitivo dos engenheiros e construtores da época. Suas habilidades e compreensão prática dos princípios fundamentais da resistência dos materiais são evidentes, mesmo em uma era anterior ao desenvolvimento de teorias formais.

“O início da formalização teórica da Engenharia Estrutural é atribuído à

publicação do livro *Duas Ciências*, de Galileu, em 1638, que deu origem a todo o desenvolvimento da ciência desde o século 17 até os dias de hoje” (MARTHA, 2017).

O surgimento das simulações computacionais na década de 1950 marcou um ponto crucial na engenharia, possibilitando uma abordagem revolucionária para o projeto e análise de estruturas. Esta inovação trouxe consigo uma estabilidade sem precedentes, permitindo a otimização e validação de projetos mesmo antes da construção da geometria física.

Como observado por Baladez (2016), os primeiros simuladores computacionais surgiram principalmente para atender às necessidades militares da época, operando em computadores de grande porte e baixa velocidade. No entanto, ao longo dos anos, com o avanço da tecnologia, esses simuladores se tornaram mais acessíveis e eficientes, culminando em sua ampla adoção em diversos setores.

Atualmente, as simulações computacionais são amplamente utilizadas em projetos industriais e acadêmicos, desempenhando um papel fundamental na análise de uma ampla variedade de estruturas. Desde o projeto de chassis e reboques até a otimização de bicicletas e ciclo-rickshaws, essas ferramentas oferecem uma maneira precisa e econômica de avaliar o desempenho e a segurança de diferentes projetos estruturais.

Os ciclo-rickshaws, uma forma de transporte icônica, têm suas origens na Índia por volta da década de 1940. Surgiram como uma resposta às necessidades de deslocamento em áreas urbanas densamente povoadas, oferecendo uma alternativa acessível e prática aos meios de transporte convencionais.

Nesse sistema, os passageiros são acomodados em um assento elevado localizado na parte traseira do veículo, enquanto um condutor pedala na dianteira, impulsionando o ciclo-rickshaw através do movimento das pedaladas conforme ilustra a figura 2. Esta configuração única não apenas permite uma locomoção ágil em ruas estreitas e congestionadas, mas também promove uma interação próxima entre os passageiros e o ambiente ao seu redor.

Além de sua presença marcante na Índia, os ciclo-rickshaws também são encontrados em muitos outros países ao redor do mundo, cada um com sua própria variação e nomenclatura. Conhecidos por uma variedade de termos,

como táxi de bicicleta, velotaxi, pedicab, bikecab, cyclo, beca, becak, trisikad ou trishaw, esses veículos refletem a diversidade cultural e a adaptabilidade desse meio de transporte (Yamaguti, 2019).

**Figura 2 – Ciclo-rickshaw**



**Fonte:** (Yamaguti, 2019).

Ainda segundo Yamaguti (2019), no final dos anos 2000, os ciclo-rickshaws enfrentaram proibições em várias cidades devido ao congestionamento de tráfego que provocavam. Apesar dessas restrições, eles permanecem como uma presença significativa em muitas das principais cidades ao redor do mundo, com uma predominância particular nas regiões do sul, sudeste e leste da Ásia.

Esses veículos tornaram-se parte integrante da paisagem urbana em países como Índia, Bangladesh, Tailândia e Indonésia, onde oferecem um meio de transporte acessível e flexível para os residentes e visitantes. No entanto, sua popularidade muitas vezes é acompanhada por controvérsias relacionadas ao congestionamento de ruas estreitas e ao desafio de integração com o tráfego urbano.

Apesar das críticas, os ciclo-rickshaws recebem apoio de ambientalistas devido à sua natureza não poluente. Em um momento em que a preocupação com a poluição do ar e as mudanças climáticas está em ascensão, esses veículos oferecem uma alternativa eco-friendly aos meios de transporte motorizados, contribuindo para a redução das emissões de carbono e a melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas.

## **2. Justificativa**

A motivação deste trabalho é apresentar uma metodologia para a validação numérica da análise estrutural de um ciclорickshaw adaptado, visando garantir a segurança de todos os passageiros. Por este motivo, foi implementado o uso de análises estruturais em elementos finitos desta estrutura, visando garantir a sua integridade.

Além disso, é importante ressaltar que, em um cenário onde a tecnologia desempenha um papel cada vez mais central, a realização de análises estruturais tornou-se uma etapa indispensável no desenvolvimento de novos produtos. Esse aspecto é particularmente relevante em projetos de alta tecnologia, onde a garantia da integridade estrutural não apenas atende aos requisitos regulatórios, mas também é fundamental para a confiança dos consumidores e o sucesso comercial do produto.

Dentro desse contexto, a utilização de análises por elementos finitos oferece uma abordagem sistemática e precisa para avaliar o desempenho estrutural do ciclорickshaw adaptado. Ao simular virtualmente as condições de carga e aplicar modelos matemáticos complexos, podemos antecipar comportamentos e identificar potenciais problemas antes mesmo da fabricação do veículo. Isso não apenas economiza tempo e recursos, mas também aumenta significativamente a segurança do produto final.

Por fim, cada vez mais o desenvolvimento de novos produtos passa por necessariamente ter uma análise estrutural para que se obtenha sua homologação principalmente em projetos de alta tecnologia. Integrar análises estruturais avançadas em todo o ciclo de desenvolvimento de produtos não só garante a conformidade com os padrões de segurança, mas também promove a excelência em design e desempenho. Essa abordagem é fundamental para assegurar não apenas a integridade estrutural dos produtos, mas também a confiança dos clientes e o sucesso no mercado.

### **2.1.1. Objetivo geral**

O objetivo deste projeto é realizar simulações computacionais no software Inventor para analisar a estrutura dos componentes de um ciclорickshaw adaptado, assegurando sua integridade e segurança. Essa abordagem permite

investigar o comportamento dos materiais sob diferentes cargas e tensões, identificando potenciais falhas e otimizando o design dos componentes. As simulações possibilitam prever o desempenho em condições reais de uso, contribuindo para a durabilidade do veículo. Além disso, o uso de métodos de análise avançados ajuda a minimizar custos de prototipagem física e acelera o processo de desenvolvimento. Através dessa metodologia, buscamos não apenas atender aos padrões de segurança, mas também garantir eficiência e sustentabilidade no design do ciclorickshaw.

Adicionalmente, as simulações oferecem uma plataforma para testar diferentes materiais e configurações, permitindo uma seleção mais informada para o projeto. Isso resulta em um ciclorickshaw que não só atende às necessidades funcionais, mas também é mais leve e econômico. Com essa abordagem inovadora, visamos contribuir para a mobilidade urbana sustentável e acessível, promovendo um transporte mais ecológico e eficiente.

### **2.1.2. Objetivo específico**

- Modelar componentes estruturais do ciclorickshaw adaptado, desenvolvido na UNESP de Ilha Solteira;
- Realizar simulações pelo método de elementos finitos;
- Identificar os pontos críticos na estrutura;
- Analisar a integridade da estrutura afim de definir se está apta ou não a trafegar em vias públicas.

## **3. Referencial Teórico**

### **3.1.1. Análise estrutural**

Na busca por resultados estáticos e dinâmicos, a análise estrutural desempenha um papel crucial no projeto de estruturas. Esta fase envolve a idealização do comportamento da estrutura, buscando compreender e prever como ela responderá às diversas condições de carga. Para isso, são aplicados conceitos que exploram os campos de tensão, deformação e deslocamento na estrutura.

Ao aplicar os princípios da análise estrutural, os engenheiros buscam não apenas garantir a estabilidade da estrutura, mas também otimizar seu

desempenho e segurança. Isso envolve a consideração cuidadosa de fatores como materiais utilizados, geometria da estrutura e as cargas às quais ela estará sujeita ao longo de sua vida útil.

Um dos aspectos fundamentais da análise estrutural é a determinação dos esforços internos e externos que atuam sobre a estrutura, tais como as cargas aplicadas e as reações de apoio. Essa análise detalhada permite aos engenheiros compreenderem as forças que agem dentro da estrutura e projetá-la de forma a resistir a essas cargas de maneira eficaz.

Além disso, a análise estrutural também aborda questões relacionadas às tensões, deslocamentos e deformações da estrutura. Esses parâmetros são essenciais para avaliar a integridade estrutural e garantir que a estrutura seja capaz de suportar as demandas impostas sobre ela ao longo do tempo, seja devido a cargas estáticas ou dinâmicas. Em última análise, uma análise estrutural abrangente é fundamental para garantir que as estruturas projetadas sejam seguras, duráveis e eficientes em sua função.

Segundo Martha (2017), a análise estática é caracterizada por cargas constantes ao longo do tempo, proporcionando um quadro claro das condições de equilíbrio, compatibilidade entre deslocamentos e deformações, além de avaliar o comportamento dos materiais que compõem a estrutura em estudo. Nesse contexto, a análise estática concentra-se nas reações de apoio, torção, rotação, tração e nas forças internas que atuam na estrutura.

Essa abordagem é essencial para garantir a estabilidade e segurança das estruturas sob diferentes condições de carga, permitindo aos engenheiros entenderem como as forças atuam e como os materiais respondem a essas forças ao longo do tempo. A análise estática é frequentemente utilizada na concepção e verificação de estruturas civis, como edifícios, pontes e estruturas de suporte.

Para realizar uma análise estática eficaz, é crucial considerar cuidadosamente as propriedades dos materiais utilizados na construção da estrutura, bem como as condições de contorno e as restrições impostas pelos apoios. Além disso, é importante avaliar o comportamento da estrutura sob diferentes tipos de carga, como cargas verticais, horizontais e momentos.

Em resumo, a análise estática fornece uma base sólida para o projeto e a avaliação de estruturas, garantindo que elas sejam capazes de suportar as

demandas impostas sobre elas ao longo de sua vida útil, com segurança e eficiência.

### 3.1.2. Centro de massa

O centro de massa de um componente é o ponto onde toda a massa do corpo pode ser considerada concentrada. No caso do chassi de um veículo, trata-se de um corpo composto, ou seja, formado por diversos componentes com geometrias conhecidas. Isso permite que o corpo seja dividido em partes, facilitando a determinação do centro de massa. A Equação 1 ilustra o cálculo desse centro de massa (HIBBELER, 2011).

$$\bar{x} = \frac{\sum \tilde{x}_i m}{\sum m}; \bar{y} = \frac{\sum \tilde{y}_i m}{\sum m}; \bar{z} = \frac{\sum \tilde{z}_i m}{\sum m}. \quad (1)$$

### 3.1.3. Momento de inércia

Para calcular a tensão e a flambagem, é fundamental determinar o momento de inércia da área dos componentes que estão sujeitos a carregamentos. Essa propriedade é específica da seção em análise. Os momentos de inércia podem ser calculados conforme as equações 2 e 3:

$$I_x = \int_A y^2 dA \quad (2)$$

$$I_y = \int_A x^2 dA \quad (3)$$

Para o momento no eixo z, temos o momento de inércia polar, o qual é definido da seguinte forma:

$$J_0 = \int_A r^2 dA = I_x + I_y \quad (4)$$

Temos o resultado obtido na Equação 4, pois  $r^2 = x^2 + y^2$ , (HIBBELER, 2011).

### 3.1.4. Força cortante e momento fletor

Quando são aplicados carregamentos em estruturas, geram-se esforços internos, como a força cortante (ou forças de cisalhamento) e o momento fletor. Esses parâmetros variam ao longo do comprimento da viga. Em projetos estruturais, é fundamental conhecer o momento máximo e a força cortante máxima, bem como os locais em que esses valores ocorrem. Uma maneira eficaz de facilitar essa análise é por meio de diagramas, utilizando um método gráfico que representa os valores de força cortante e momento fletor ao longo do eixo longitudinal da viga. (HIBBELER, 2010)

Para calcular a força cortante é necessário realizar uma integração do carregamento em relação ao eixo longitudinal da viga. Como mostra as equações 5 e 6:

$$\frac{dV}{dx} = -w \quad (5)$$

$$V = \int -w dx \quad (6)$$

O momento fletor, equação 7, também pode ser calculado da mesma maneira, mas integrando a força cisalhante conforme é expresso abaixo:

$$\frac{dM}{dx} = V$$

$$M = \int V dx \quad (7)$$

Happian-Smith (2002) afirma que o chassi pode ser tratado como uma viga bidimensional, pois a estrutura é simétrica ao longo do seu eixo longitudinal. Dessa forma, é possível calcular e representar graficamente a força cortante e o momento fletor que atuam sobre a estrutura.

### 3.1.5. Tensões

A análise de tensões é fundamental na engenharia estrutural, pois permite avaliar como as estruturas se comportam sob diferentes carregamentos. A flexão

e o cisalhamento são dois dos principais modos de deformação que podem ocorrer. A flexão, por exemplo, resulta em tensões que variam ao longo da seção da viga, levando a concentrações de tensões que precisam ser monitoradas para evitar falhas. Já o cisalhamento é crítico em componentes como vigas e lajes, onde forças transversais podem causar falhas significativas se não forem adequadamente calculadas. A compreensão dessas forças é essencial para garantir que a estrutura resista às cargas aplicadas, mantendo sua integridade e segurança.

Além disso, a Lei de Hooke é uma base importante na análise de tensões, pois relaciona a tensão e a deformação de materiais elásticos. Essa relação é crucial para determinar o comportamento dos materiais sob carga e para projetar estruturas que atendam a requisitos específicos de desempenho. O estado plano de tensão, que considera as tensões em duas dimensões, é outra ferramenta vital para simplificar a análise, especialmente em estruturas complexas. Essa abordagem permite que os engenheiros entendam como as tensões se distribuem ao longo da seção da estrutura, facilitando o projeto e a avaliação de sua capacidade de suportar cargas. Em resumo, a análise de tensões é essencial para garantir a segurança e a eficiência das estruturas, permitindo uma melhor compreensão de como elas reagem aos carregamentos impostos

### **3.1.6. Flexão**

A tensão de flexão ocorre quando uma força é aplicada a uma viga, resultando em uma curvatura que provoca tensões internas. Essa tensão é máxima nas fibras externas da viga, variando linearmente de acordo com a distância do eixo neutro, onde a tensão é zero. O cálculo da tensão de flexão é essencial para garantir que a estrutura suporte as cargas sem falhar. A fórmula utilizada para determinar a tensão de flexão é representada pela equação 8:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (8)$$

### **3.1.7. Cisalhamento**

A tensão de cisalhamento ocorre quando forças transversais são aplicadas a um material, causando deslocamentos paralelos nas suas seções. Essa tensão

é especialmente crítica em vigas e lajes, onde a força cortante pode levar a falhas estruturais.

A análise das tensões de cisalhamento é essencial para garantir que as estruturas suportem as forças aplicadas sem comprometer sua integridade. Assim, compreender essas tensões é vital para um projeto seguro e eficiente.

A equação 9 a seguir exhibe a fórmula da tensão de cisalhamento:

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (9)$$

### 3.1.8. Lei de hookie

Os materiais submetidos a ensaios de tração ou compressão permitem a elaboração do diagrama tensão-deformação, que revela uma relação linear entre esses dois parâmetros. Isso significa que um aumento na tensão aplicada ao corpo de prova resulta em um aumento proporcional na deformação experimentada. Esse comportamento elástico foi inicialmente analisado por Robert Hooke, que formulou a famosa Lei de Hooke. Essa relação linear é válida até o limite elástico do material, onde ele retorna à sua forma original após a remoção da carga. Compreender essa relação é fundamental para o projeto e a análise de estruturas, garantindo que os materiais se comportem de maneira previsível sob carga. (HIBBELER, 2010).

A equação 10 que descreve a lei de Hooke é definida da seguinte maneira:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (10)$$

### 3.1.9. Estado plano de tensão

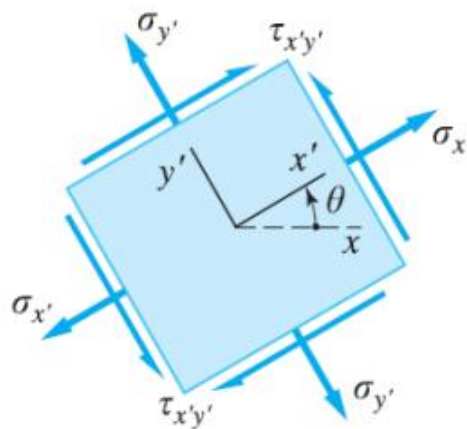
O estado plano de tensão é uma condição em que as tensões atuantes em um material são consideradas em duas dimensões, ou seja, as tensões são analisadas em um plano, enquanto a terceira dimensão é desconsiderada ou considerada irrelevante. Essa abordagem simplifica a análise de tensões em estruturas, permitindo que engenheiros e projetistas tratem problemas complexos de forma mais gerenciável.

No estado plano de tensão, as tensões normais ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) e as tensões de

cisalhamento ( $\sigma_{xy}$ ) são analisadas em um plano específico. Essa configuração é especialmente útil em placas, lajes e outros elementos estruturais que são mais longos em uma direção. As relações de transformação de tensões podem ser utilizadas para calcular como as tensões se distribuem em diferentes orientações, ajudando a identificar pontos críticos e a dimensionar adequadamente os elementos estruturais. (HIBBELER, 2010)

A figura 3 exibe o estado plano de tensão, com as tensões normais e de cisalhamento orientados a um ângulo  $\theta$ .

**Figura 3 - Estado plano de tensão**



**Fonte: Material de Apoio - P2.pdf (usp.br)**

Utilizando o sistema cartesiano de eixos coordenados, é possível determinar as equações do estado plano de tensões. Ao aplicar as equações de equilíbrio de forças, conseguimos formular as expressões para as tensões normais e de cisalhamento. Essa abordagem permite uma análise mais precisa das condições de carregamento e das respostas dos materiais em diferentes direções. As equações de 11 à 13 representam as expressões para as diferentes direções.

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} * \cos(2\theta) + \tau_{xy} * \text{sen}(2\theta) \quad (11)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} * \cos(2\theta) - \tau_{xy} * \text{sen}(2\theta) \quad (12)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} * \text{sen}(2\theta) + \tau_{xy} * \text{cos}(2\theta) \quad (13)$$

Para determinar a tensão normal máxima e mínima no plano, basta derivar as equações 8 e 9 em relação a  $\theta$  e igualar o resultado a zero, obtém-se a equação 14:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (14)$$

O procedimento para determinar a tensão de cisalhamento máxima no plano, é o mesmo da tensão normal onde deriva-se a equação 10 em relação a  $\theta$  e a iguala a zero obtendo a equação 15.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (15)$$

### 3.1.10. Critério de falha

Os elementos estruturais e os componentes de máquinas são meticulosamente concebidos para garantir que o material que os constitui, se dúctil, não sofra deformações excessivas sob a influência dos carregamentos previstos (BUFFONI, 2017). Isso implica uma análise minuciosa das forças envolvidas, desde cargas estáticas até dinâmicas, considerando também as possíveis variações ao longo do tempo de operação.

A escolha dos materiais é crucial, buscando não apenas a resistência adequada, mas também a capacidade de absorver energia sem falhar catastróficamente. Além disso, é essencial considerar fatores ambientais, como a exposição a agentes corrosivos, que podem comprometer a integridade dos componentes ao longo do tempo.

Essa abordagem integrada vai além da simples resistência do material, contemplando aspectos como durabilidade e vida útil dos equipamentos. Por isso, além de selecionar os materiais mais adequados, os engenheiros também buscam otimizar o design, distribuindo as cargas de forma eficiente e minimizando pontos de concentração de tensão.

Adicionalmente, testes rigorosos são realizados para validar o desempenho dos componentes sob condições simuladas de operação, garantindo que atendam aos requisitos de segurança e confiabilidade. Assim, ao projetar elementos estruturais e componentes de máquinas, a preocupação vai além da simples funcionalidade, estendendo-se para garantir a integridade operacional e a segurança dos sistemas em uso.

Um método comumente analisado é por meio da tensão de Von mises o qual é utilizado para materiais dúcteis, ou seja, o material sofre deformações antes de sofrer uma ruptura, ao contrário dos materiais frágeis que sofrem fratura repentina. Esse critério de falha é denominado critério da máxima energia de distorção, pois a falha do material ocorre apenas quando a energia relacionada à deformação do corpo, sob carregamento multiaxial, excede a energia de distorção de um corpo de prova submetido a um ensaio uniaxial como representado pela equação 16. Essa abordagem permite avaliar a resistência do material em situações complexas, garantindo uma análise mais robusta do seu comportamento sob diferentes condições de carga. (CURY, 2015)

$$\bar{U}_{triaxial} > \bar{U}_{tração} \quad (16)$$

A densidade de energia de distorção de um elemento sujeito a um estado triaxial de tensões é definido de acordo com a equação 17:

$$\bar{U}_{mult} = \frac{(1+\nu)}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (17)$$

Sabendo que, no caso da tração, temos um carregamento uniaxial, podemos considerar que as tensões adicionais são nulas, e a tensão principal será denominada tensão de Von Mises. (CURY, 2015)

Operando com as equações 16 e 17, obtemos a equação 18 do estado triaxial de tensões ou, simplesmente, a tensão de Von Mises.

$$\sigma_{vm} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Segundo Happian-Smith et al (2002), na condição mais extrema de carga estática, a tensão não deverá ultrapassar 67% da tensão de escoamento do material, logo o coeficiente de segurança mínimo aceito é de 1,5, conforme representa a equação 19.

$$\sigma \leq \sigma_e/1,5 \quad (19)$$

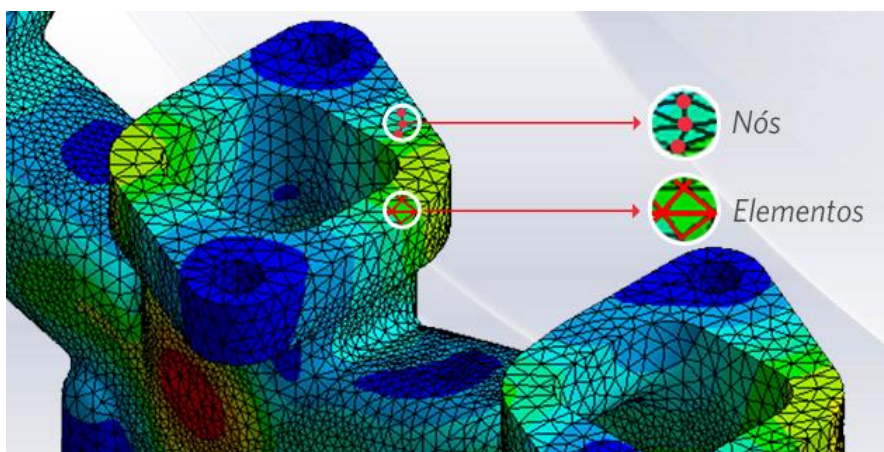
Se a estrutura satisfizer os requisitos da Eq. (1) significa que passa na condição de integridade. Se a estrutura sofrer pequenos deslocamentos, significa que ela passou da condição de rigidez. Idealmente, a estrutura satisfaz duas condições (BRASIL, 2008).

As simulações computacionais são ferramentas indispensáveis na engenharia moderna, permitindo uma análise precisa e econômica de sistemas complexos antes de qualquer construção física. Essas simulações utilizam programas avançados de Engenharia Assistida por Computador (CAE), como o Método dos Elementos Finitos (MEF), para modelar e prever o comportamento de estruturas e materiais sob diversas condições de operação. O MEF, em particular, é fundamental na engenharia estrutural, pois possibilita a realização de análises detalhadas em estruturas como pontes, edifícios, veículos e componentes mecânicos (SILVA, 2014; BARROS, 2002).

### **3.1.11. Método dos Elementos Finitos**

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica que se baseia na discretização de um sólido em pequenos elementos de malha, simplificando a análise ao permitir que cada parte do sólido seja considerada separadamente como ilustrado pela figura 4. (SILVA, 2014). Esse método é utilizado para determinar o estado de tensão e deformação de um sólido sob ação de cargas externas, garantindo que a resposta de cada elemento seja compatível com a dos elementos adjacentes através de iterações (BARROS, 2002). A precisão dessa análise depende da qualidade da malha gerada e do modelamento realizado, o que influencia diretamente os resultados da simulação (BARROS, 2002).

**Figura 4 – Exemplo de aplicação do Método de Elementos Finitos**



**Fonte:** < [Método dos Elementos Finitos: o que é? \(esss.com\)](http://esss.com)>

A aplicação do MEF não se limita a pontes e edifícios; ele é amplamente utilizado em diversos campos da engenharia, como a aeroespacial, automotiva e naval. No setor aeroespacial, por exemplo, o MEF é empregado no projeto e análise de componentes críticos, como asas de aeronaves e estruturas de foguetes, garantindo sua integridade e desempenho sob diferentes condições de voo e carga (LOTTERMANN, 2014). Já na engenharia automotiva, o MEF é essencial para otimizar o design de veículos, avaliando a resistência e rigidez das estruturas para garantir a segurança dos ocupantes em caso de colisão (SILVA, 2014).

A simulação computacional, quando integrada ao MEF, proporciona uma compreensão abrangente do comportamento estrutural de um sistema. Essa integração é particularmente importante em projetos complexos, onde múltiplos fatores devem ser considerados para garantir a segurança e a eficácia da estrutura final (PEREIRA, 2016). Por exemplo, ao projetar uma ponte, os engenheiros precisam avaliar como a estrutura responderá a diferentes tipos de carga, como peso dos veículos, ventos fortes e possíveis tremores de terra. O MEF permite que essas análises sejam realizadas de forma detalhada e precisa, garantindo que a ponte será segura e eficiente ao longo de sua vida útil (BARROS, 2002).

Além de sua aplicação em projetos estruturais, o MEF é uma ferramenta valiosa no desenvolvimento de novos materiais e processos de fabricação. Ao simular o comportamento de materiais sob diferentes condições de carga e

temperatura, os engenheiros podem prever o desempenho e a durabilidade dos materiais antes mesmo de serem produzidos em larga escala. Isso permite a otimização dos materiais e processos, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento, além de minimizar o risco de falhas durante a produção e a vida útil do produto (PEREIRA, 2016).

Em projetos de engenharia civil, o MEF é amplamente utilizado para validar a eficácia, segurança e desempenho das estruturas (LOTTERMANN, 2014; PEREIRA, 2016). A simulação por MEF permite aos engenheiros identificar possíveis pontos de falha e realizar ajustes no design antes que a construção física comece. Isso não apenas economiza tempo e recursos, mas também aumenta a confiabilidade das estruturas construídas, garantindo que elas atendam às especificações de segurança e desempenho exigidas (BARROS, 2002).

No campo da engenharia mecânica, o MEF é essencial para a análise de componentes mecânicos complexos, como engrenagens, eixos e suportes estruturais. Através de simulações, os engenheiros podem avaliar como esses componentes irão se comportar sob cargas operacionais e determinar se eles são capazes de suportar as tensões e deformações previstas (SILVA, 2014). Isso é crucial para garantir que os componentes não falhem durante a operação, o que poderia resultar em paradas inesperadas ou até mesmo em acidentes graves (PEREIRA, 2016).

A engenharia automotiva é outro campo onde o MEF desempenha um papel fundamental. Ao projetar novos veículos, os engenheiros utilizam o MEF para otimizar a estrutura do chassi, garantindo que ele seja leve, mas suficientemente rígido para proteger os ocupantes em caso de colisão (SILVA, 2014). Essa análise detalhada permite que os fabricantes desenvolvam veículos que não apenas atendam aos padrões de segurança, mas também ofereçam melhor desempenho e eficiência de combustível (PEREIRA, 2016).

Na engenharia naval, o MEF é utilizado para projetar cascos de navios e outras estruturas marítimas, garantindo que elas possam resistir às forças extremas do oceano, como ondas e correntes. A simulação dessas condições em um ambiente controlado permite que os engenheiros façam ajustes no design para melhorar a estabilidade e a durabilidade das embarcações, reduzindo o risco de falhas catastróficas no mar (LOTTERMANN, 2014).

A evolução das tecnologias de simulação, incluindo o MEF, tem permitido que os engenheiros realizem análises mais detalhadas e precisas. Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores e a sofisticação dos algoritmos de simulação, agora é possível modelar e analisar sistemas mais complexos em menos tempo (PEREIRA, 2016). Isso não só acelera o processo de desenvolvimento de novos produtos e estruturas, mas também melhora a qualidade e a segurança dos mesmos (BARROS, 2002).

A integração das simulações computacionais com outras tecnologias avançadas, como a Inteligência Artificial (IA) e a Internet das Coisas (IoT), está transformando a maneira como os engenheiros abordam o design e a análise de estruturas. Sensores IoT instalados em estruturas reais podem fornecer dados em tempo real sobre o desempenho da estrutura, que podem ser usados para ajustar as simulações e prever falhas antes que ocorram (PEREIRA, 2016). Por sua vez, algoritmos de IA podem analisar esses dados e sugerir melhorias no design, antecipando problemas e otimizando o desempenho do sistema ao longo de sua vida útil (LOTTERMANN, 2014).

As simulações computacionais, especialmente quando combinadas com o MEF, também desempenham um papel crucial na prevenção de desastres. Ao modelar cenários extremos, como terremotos, inundações ou explosões, os engenheiros podem prever como uma estrutura reagiria a essas condições e implementar medidas de segurança que minimizem o risco para vidas humanas e ativos materiais (SILVA, 2014). Essa capacidade de antecipação é essencial para o planejamento de infraestruturas críticas, como usinas nucleares, barragens e pontes (BARROS, 2002).

Além disso, o MEF é utilizado para otimizar processos de fabricação, permitindo que os engenheiros simulem e ajustem os parâmetros de produção antes de iniciar a fabricação em larga escala (PEREIRA, 2016). Isso pode incluir a análise de processos de moldagem, usinagem e soldagem, garantindo que os produtos atendam aos padrões de qualidade exigidos e minimizando o desperdício de material (LOTTERMANN, 2014).

O MEF também tem um papel importante na análise de falhas de componentes em serviço. Ao simular como uma peça falha sob diferentes condições, os engenheiros podem identificar as causas raiz das falhas e desenvolver soluções para melhorar o design e a durabilidade dos componentes

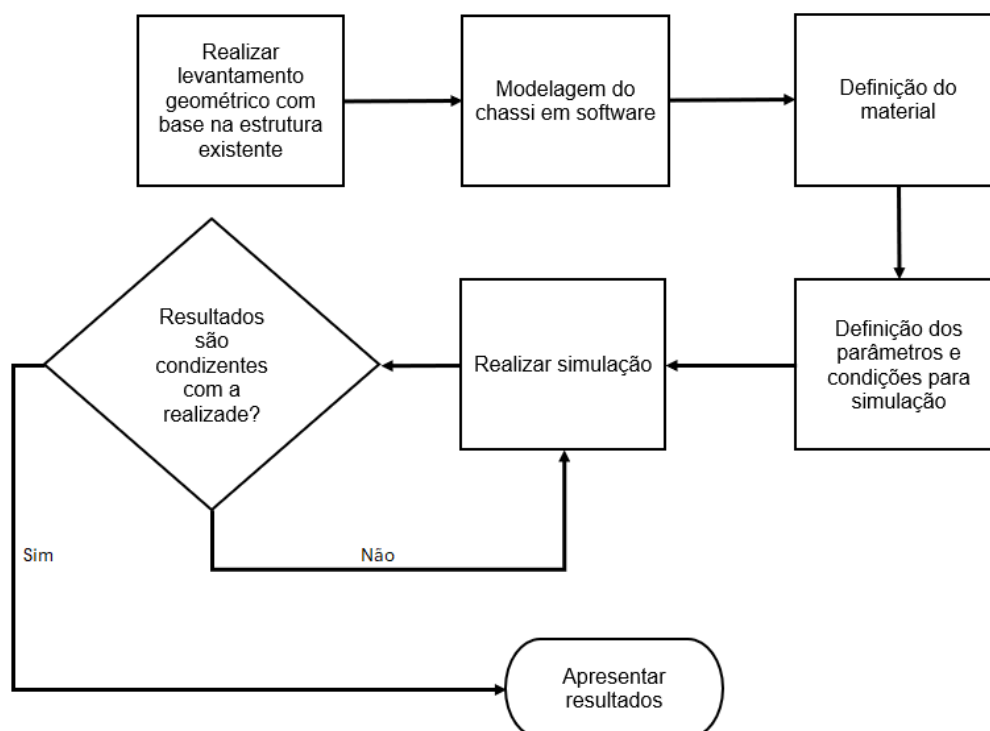
(BARROS, 2002). Isso é particularmente útil em indústrias como a aeroespacial e a automotiva, onde a confiabilidade dos componentes é crucial para a segurança (PEREIRA, 2016).

Em suma, o MEF desempenha um papel essencial em todas as fases do ciclo de vida de um produto ou estrutura, desde o projeto inicial até a validação e otimização finais (SILVA, 2014). Sua capacidade de fornecer uma análise detalhada e precisa do comportamento estrutural faz dele uma ferramenta indispensável para engenheiros em diversos campos da engenharia (BARROS, 2002). A combinação do MEF com simulações computacionais avançadas permite que os engenheiros abordem problemas complexos de forma eficiente e segura, contribuindo para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis em uma ampla gama de aplicações (LOTTERMANN, 2014).

Com o avanço contínuo das tecnologias de simulação e a crescente demanda por projetos mais eficientes e sustentáveis, o MEF continuará a ser uma ferramenta essencial para engenheiros em todo o mundo (PEREIRA, 2016). Seja na construção de novas infraestruturas, na otimização de veículos ou na prevenção de desastres, o MEF e as simulações computacionais estão destinados a desempenhar um papel central na engenharia do futuro, garantindo que as estruturas e produtos desenvolvidos sejam não apenas funcionais, mas também seguros e sustentáveis (SILVA, 2014; BARROS, 2002).

#### **4. Metodologia**

Nesta parte do trabalho, são descritas as escolhas feitas para a realização deste estudo, com uma apresentação dos motivos por trás de cada decisão. A Figura 5 mostra um diagrama do fluxo seguido para a modelagem e simulação do chassi. Primeiramente, foi escolhido o modelo de referência para o estudo, sendo realizado um levantamento geométrico utilizando fita métrica e paquímetro. Após essa etapa, o chassi foi desenhado no software Inventor.

**Figura 5 – Metodologia para simulação**

**Fonte** - Próprio autor

Com o chassi modelado, foram definidos o material, os parâmetros e as condições para a simulação. Em seguida, foi realizada a simulação estrutural para determinar se o chassi está apto para trafegar em vias públicas. Por fim, os resultados das simulações foram apresentados, indicando se o chassi está apto para uso ou não.

#### 4.1.1. Levantamento geométrico

Nesta primeira fase, foi fundamental obter as dimensões precisas do chassi, que serviriam como base para a modelagem no software. Para isso, foram utilizados instrumentos como paquímetro e fita métrica, garantindo medições detalhadas. Além disso, fotos do chassi foram tiradas para auxiliar na verificação e referência visual durante o processo de modelagem. A Figura 6 apresenta o chassi que foi tomado como referência para este estudo, ilustrando a estrutura que serviu de base para as etapas subsequentes do trabalho.

**Figura 6 - Objeto de estudo**

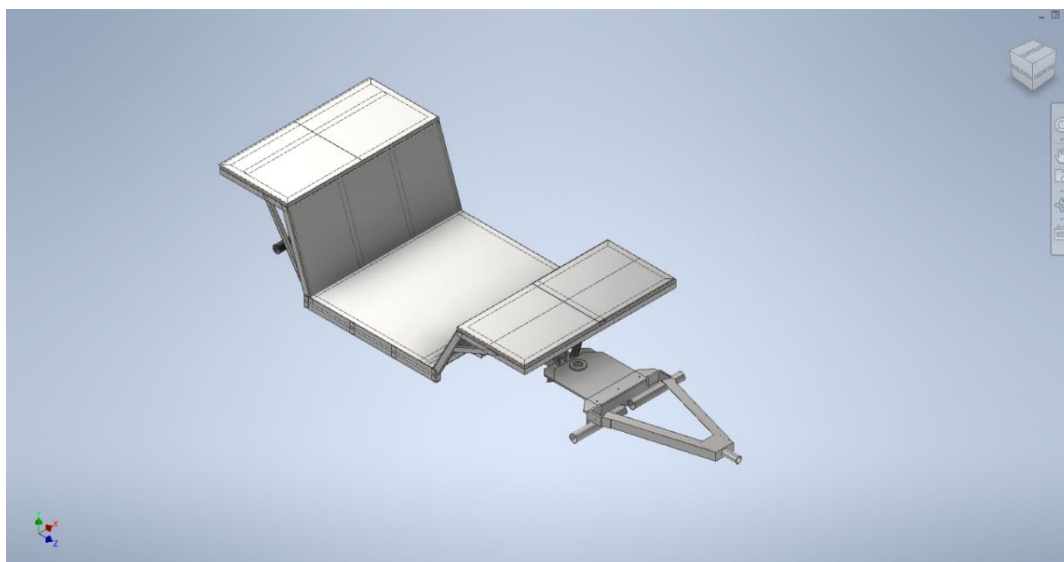


**Fonte -** Próprio autor

#### **4.1.2. Modelagem tridimensional no Inventor**

Após o levantamento dimensional, o chassi foi modelado utilizando o software CAD Inventor. A Figura 7, apresentada abaixo, mostra o chassi já modelado em vista isométrica.

**Figura 7 – Vista Isométrica do Chassi**



**Fonte -** Próprio autor

Durante a modelagem, foi decidido não incluir os suportes e as ligações de suspensão e carroceria, uma vez que esses elementos não eram necessários para as simulações realizadas. O foco do estudo está nas propriedades

mecânicas do chassi como um todo, analisando como ele se comporta ao ser submetido aos esforços previamente definidos.

#### **4.1.3. Definição do material**

A escolha do material para a fabricação do chassi é influenciada por fatores cruciais, como o propósito específico do chassi e o custo envolvido. Esses elementos determinam as propriedades mecânicas desejadas, incluindo resistência, durabilidade e peso, que variam conforme a aplicação. Uma ampla variedade de ligas de aço pode ser empregada, desde as de alta qualidade, como cromo-molibdênio e cromo-níquel, até os aços de baixo carbono. Entre esses, o aço AISI 1020 destaca-se por sua popularidade entre construtores e especialistas em carros de corrida, devido ao seu equilíbrio ideal entre desempenho e custo (COSTIN; PHIPPS, 1961).

No Brasil, o preço das ligas de aço de maior qualidade tende a ser significativamente mais elevado, o que torna o custo um fator decisivo na escolha do material. Em categorias amadoras de veículos, o aço AISI 1020 é amplamente utilizado na construção de gaiolas de proteção automotiva, devido à sua acessibilidade e desempenho satisfatório. A seleção desse material para a simulação do chassi foi baseada não apenas na facilidade de encontrá-lo no mercado e no seu custo mais baixo, mas também por ser o material mais amplamente utilizado para essa aplicação específica, conforme mencionado anteriormente.

Portanto, o material escolhido para este estudo foi o aço AISI 1020 laminado a frio, que oferece um limite de escoamento ligeiramente superior ao do aço AISI 1020 laminado a quente. A Tabela 1 a seguir apresenta as propriedades mecânicas deste material, conforme fornecidas pelo software Inventor.

**Tabela 1 – Propriedades do aço 1020 utilizado para simulação**

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	205000	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0,29	N/A
Módulo de cisalhamento	80000	N/mm <sup>2</sup>
Massa específica	7870	kg/m <sup>3</sup>
Resistência de tração	420	N/mm <sup>2</sup>
Limite de escoamento	350	N/mm <sup>2</sup>

**Fonte:** INVENTOR (2023)

Além das vantagens econômicas e de disponibilidade, o aço AISI 1020 laminado a frio oferece características mecânicas que o tornam particularmente adequado para aplicações em chassi de veículos, especialmente em categorias amadoras. O processo de laminação a frio confere ao aço uma estrutura mais fina e densa, resultando em uma maior resistência à tração e um limite de escoamento mais elevado em comparação ao aço laminado a quente. Essas propriedades são essenciais para garantir que o chassi possa suportar as tensões e deformações impostas durante o uso, proporcionando uma combinação ideal de resistência e flexibilidade, que é crucial para a segurança e a longevidade da estrutura do veículo.

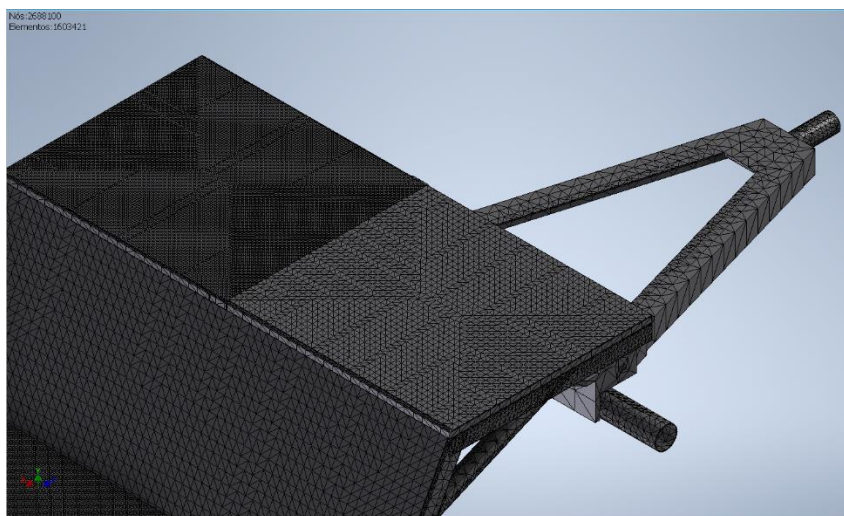
Outro aspecto importante a ser considerado é a facilidade de fabricação e de manutenção associada ao aço AISI 1020. Este material é conhecido por sua boa soldabilidade e usinabilidade, permitindo que as peças sejam fabricadas com precisão e que eventuais reparos possam ser realizados com facilidade. Além disso, o aço AISI 1020 possui uma boa resistência à fadiga, o que é particularmente importante em veículos que estão sujeitos a repetidas cargas cíclicas. Essa característica contribui para a durabilidade do chassi, reduzindo a necessidade de manutenção frequente e aumentando a confiabilidade do veículo ao longo do tempo.

#### **4.1.4. Geração da Malha**

Após a definição do material a ser utilizado na simulação, o próximo passo é a geração da malha, que consiste em dividir a estrutura em elementos e nós para a análise detalhada. Tanto a análise numérica do chassi quanto a modelagem

da estrutura foram realizadas utilizando o módulo de simulação do software Inventor. Nesse módulo, foi gerada a malha de elementos de viga, como ilustrado na Figura 8. O recorte A apresenta uma visão ampliada dessa malha, destacando a estrutura em seus elementos individuais. A qualidade e a densidade dessa malha são cruciais para garantir a precisão dos resultados da simulação, pois permitem uma representação detalhada do comportamento mecânico do chassi sob diferentes condições de carga.

**Figura 8 – Malha aplicada ao projeto**



**Fonte - Próprio autor**

#### **4.1.5. Condições de contorno**

Para garantir a precisão e a estabilidade na análise estrutural do chassi, foi adotada a estratégia de utilizar o eixo onde se encontra a roda como ponto de fixação em todos os graus de liberdade. Esse procedimento é essencial para simular com exatidão as condições reais de operação do veículo, uma vez que o eixo da roda é um dos principais elementos de conexão entre o chassi e o sistema de suspensão (DIXON, 2009).

Ao fixar o chassi no eixo da roda, todas as seis componentes de movimento - três de translação (ao longo dos eixos X, Y e Z) e três de rotação (em torno desses eixos) - são restringidas. Isso significa que o chassi, nesse ponto, não pode se mover nem girar, replicando a condição de travamento que ocorre na prática quando o chassi está conectado ao eixo e, por sua vez, à suspensão e às rodas (BURTON, 2013).

Essa fixação é crítica para a correta distribuição das forças durante a

simulação. Como o eixo da roda é o ponto através do qual as cargas dinâmicas do terreno são transmitidas para o chassi, a fixação em todos os graus de liberdade permite que a simulação capture com precisão as tensões e deformações que o chassi experimenta durante a operação normal do veículo. Sem essa fixação completa, a simulação poderia resultar em movimentos não realistas ou inadequados, comprometendo a validade dos resultados (PUHN, 2001).

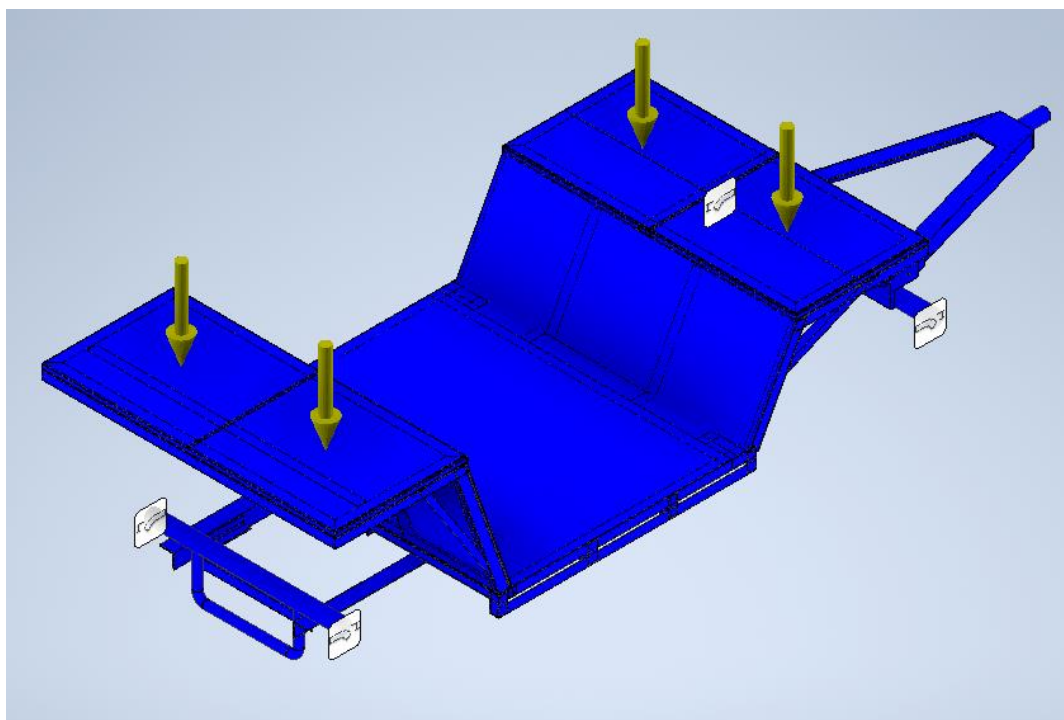
Além disso, essa abordagem de fixação permite que outras análises, como as de torção e flexão do chassi, sejam realizadas de forma mais precisa, uma vez que o comportamento do chassi em relação ao eixo da roda é fundamental para entender como ele responderá a cargas diversas. Portanto, a utilização do eixo onde se encontra a roda como ponto de fixação em todos os graus de liberdade é uma prática recomendada para obter uma análise estrutural robusta e confiável do chassi (SMITH, 2015).

#### **4.1.6. Carga total aplicada**

Após a definição dos pontos de fixação do chassi, foi determinada a carga a ser utilizada na simulação da tensão máxima de flexão. De acordo com a norma *ABNT NBR 14761: Assentos Plásticos e Metálicos*, para cargas estáticas, A norma requer que os assentos sejam testados para suportar uma carga estática mínima de 1600 N (cerca de 163 kgf), aplicada na área central do assento e nos pontos mais crítico. Logo, considerando que este chassi é projetado para transportar quatro adultos, a carga de 1600N foi distribuída e aplicada em quatro pontos específicos da estrutura, correspondentes às posições dos assentos. A Figura 9 a seguir mostra a localização exata dessas forças aplicadas, evidenciando como elas afetam o comportamento estrutural do chassi sob condições realistas de carga.

Essa abordagem permite uma análise precisa da resistência e durabilidade do chassi, assegurando que a estrutura possa suportar o peso dos ocupantes com segurança. Ao concentrar as forças nos pontos onde os assentos estão fixados, a simulação reflete de forma fiel as condições que o chassi enfrentará em uso real, permitindo ajustes e otimizações necessárias no design para garantir desempenho e segurança ideais.

**Figura 9 – Forças aplicadas para análise**



**Fonte - Próprio autor**

## **5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

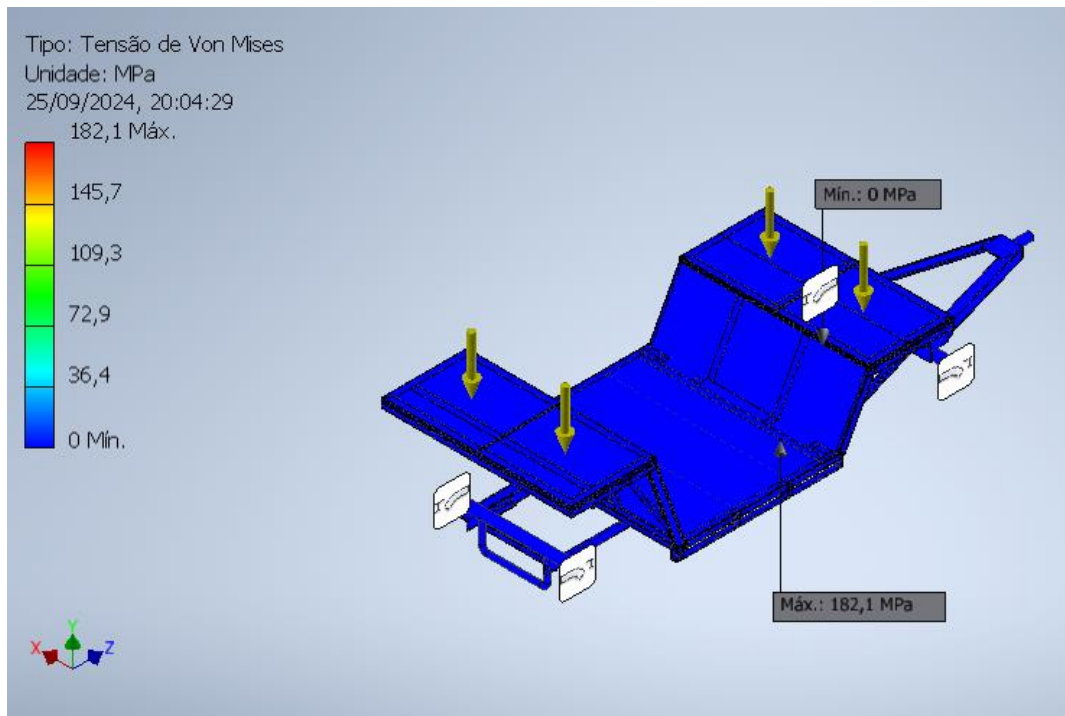
Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos parâmetros definidos na seção anterior e fornece uma análise detalhada de suas implicações para o andamento do projeto. Através da interpretação dos dados gerados, será possível avaliar a eficácia das escolhas realizadas, identificar possíveis ajustes necessários e compreender como esses resultados influenciam as etapas subsequentes do desenvolvimento. Esta análise crítica é fundamental para garantir que o projeto siga uma trajetória otimizada, atendendo aos requisitos de desempenho, segurança e custo estabelecidos inicialmente.

### **5.1.1. Simulação da tensão máxima de flexão**

Primeiramente, foi realizada a simulação da tensão de von mises do chassi utilizando o módulo de simulação do Inventor. A Figura 10 apresenta os resultados iniciais dessa análise. Nesta figura, as tensões distribuídas ao longo do chassi são representadas em uma escala de cores em MPa (MegaPascal), permitindo uma visualização clara das áreas mais críticas. A localização exata do ponto onde ocorreu a maior tensão no chassi também é destacada, facilitando

a identificação das zonas de maior esforço.

**Figura 10 – Tensão de Von Mises**



**Fonte -** Próprio autor

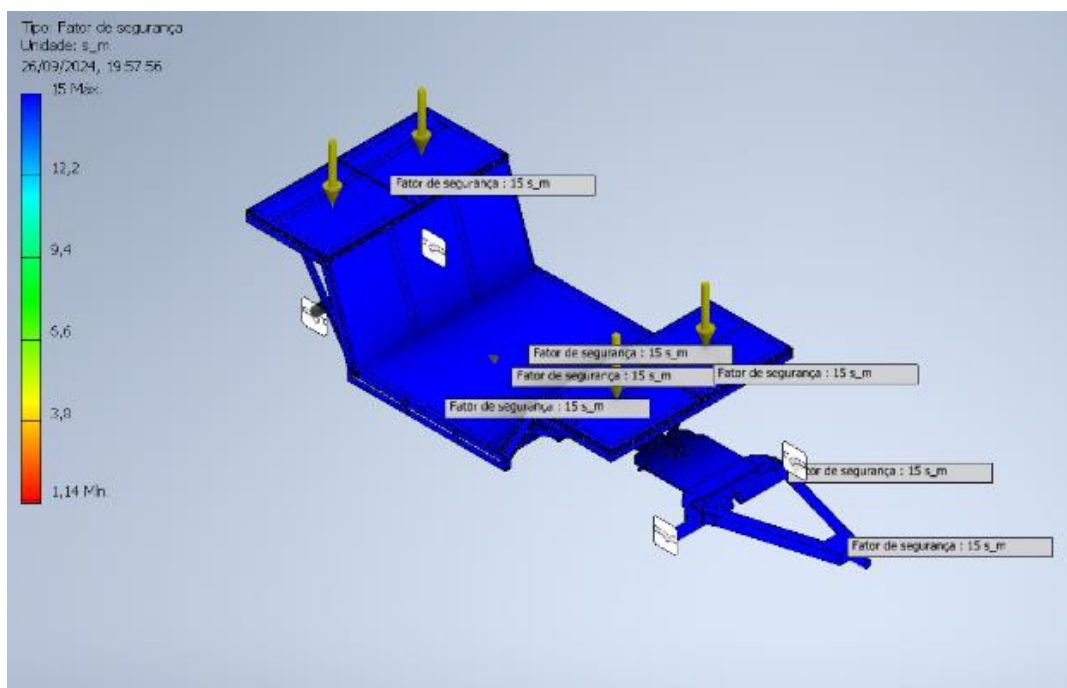
Pode-se observar que, a estrutura não possui pontos nas quais necessita-se de maior atenção. A escala de cores nos permite observar que a estrutura foi superdimensionada, evitando pontos críticos. Caso houvesse pontos destacados em vermelho, onde a tensão ultrapassaria o limite de escoamento do material de 350 MPa, o chassi estaria sujeito a deformação plástica. Isso indica que, nessas regiões, o material começaria a sofrer alterações permanentes em sua estrutura, comprometendo a integridade do chassi. A simulação também revela que o ponto de maior tensão atingido foi de 182,1 MPa, um valor que se enquadra dentro do limite de escoamento, sinalizando a não necessidade de reforço ou reavaliação do design para evitar possíveis falhas estruturais sob condições de operação realistas.

### 5.1.2. Critério de Falha

O fator de segurança é um parâmetro essencial para garantir a integridade estrutural de qualquer projeto. No caso do chassi analisado, conforme mostra a figura 11 o fator de segurança obtido nas simulações foi de 15, enquanto o mínimo estabelecido para o projeto é de 1,5. Isso significa que a estrutura é

capaz de suportar até 15 vezes a carga prevista sem sofrer falhas, o que oferece uma margem de segurança significativa em relação ao valor mínimo exigido como ilustram as figuras 11 e 12.

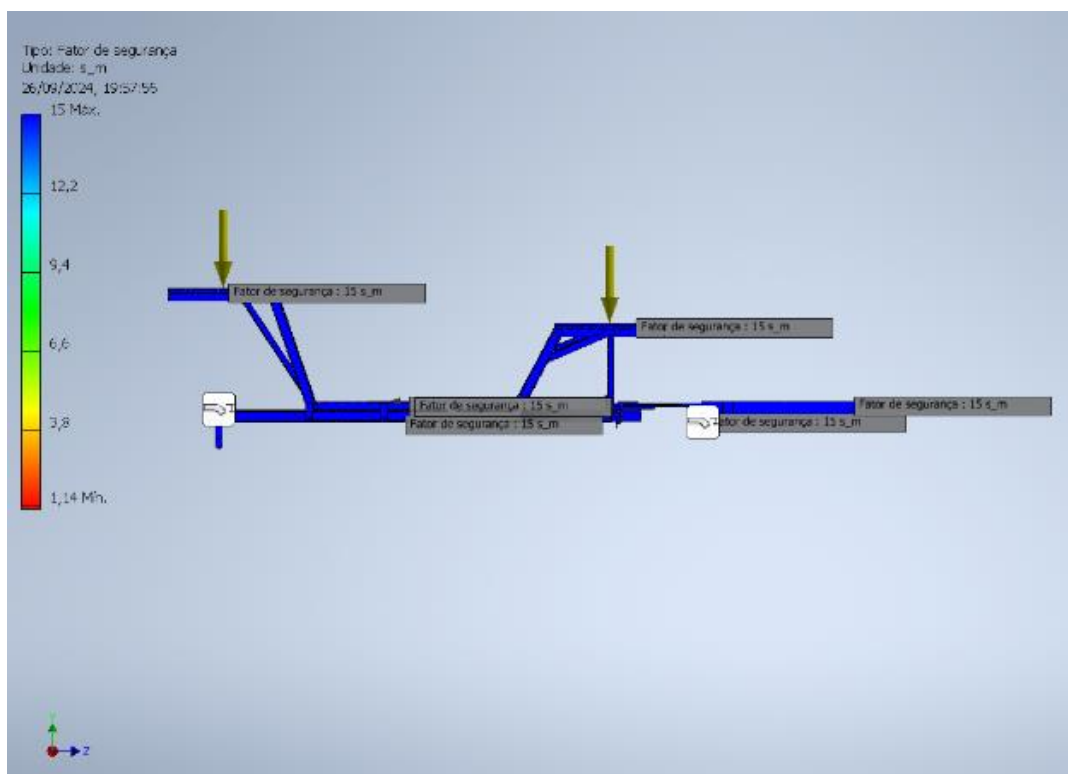
**Figura 11 – Fator de segurança – Vista Isométrica superior**



**Fonte -** Próprio autor

Portanto, o fator de segurança apresentado é bastante alto (15), estando acima do mínimo estabelecido de 1,5, de acordo com a norma ABNT NBR 8800, demonstrando que a estrutura foi desenvolvida de forma extremamente conservadora, com materiais mais espessos do que o necessário, oferecendo uma proteção considerável contra falhas estruturais. Isso garante que o chassi possa operar de forma eficiente e segura, minimizando os riscos de falhas e a necessidade de manutenções frequentes, além de garantir a segurança dos ocupantes e a durabilidade do veículo em diversas condições de uso.

**Figura 12 – Fator de segurança – Vista lateral**



**Fonte -** Próprio autor

É crucial interpretar os resultados da simulação com cautela e atenção aos detalhes fornecidos pelo programa. Muitas vezes, o software pode apresentar inconsistências e pontos críticos gerados automaticamente devido a vínculos artificiais inseridos na malha ou na geometria, que não correspondem à realidade física do modelo. Esses fatores podem levar a interpretações errôneas dos resultados, sugerindo tensões ou deformações em locais onde, de fato, não deveriam ocorrer. Portanto, é essencial revisar cuidadosamente o modelo, identificar possíveis problemas de malha ou configurações inadequadas e garantir que a simulação reflita fielmente as condições reais da estrutura.

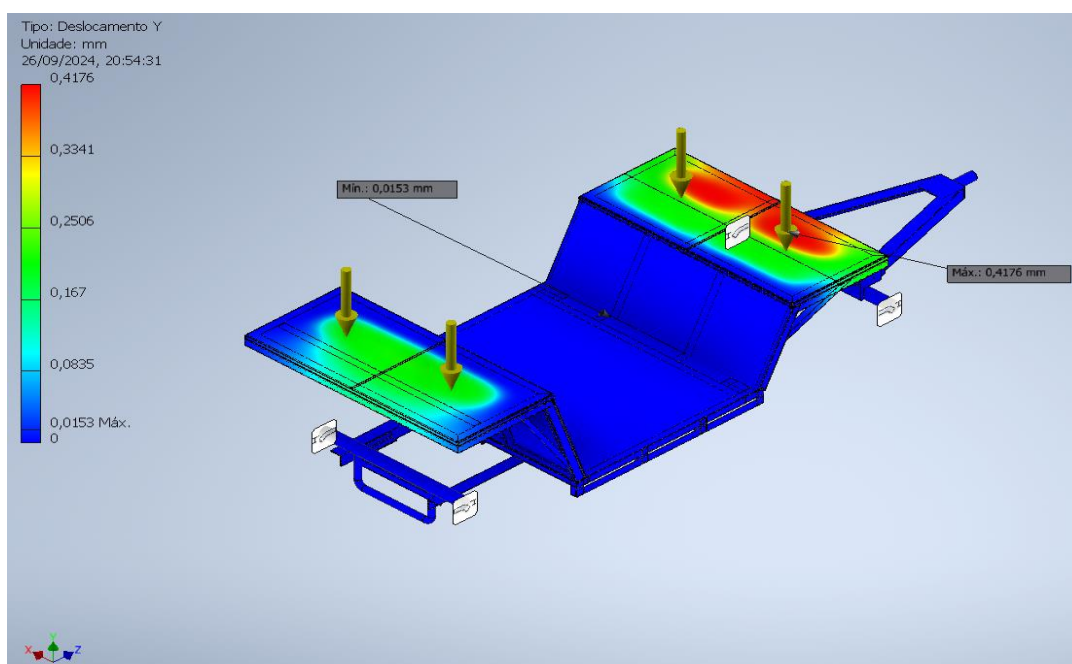
### 5.1.3. Deslocamento máximo no chassi

Outra simulação importante realizada foi a análise dos deslocamentos gerados pela aplicação da carga ao longo do chassi. A Figura 13 ilustra esses deslocamentos utilizando um sistema de cores, permitindo uma visualização clara das deformações distribuídas pela estrutura. À direita da figura, é apresentada uma legenda que indica, em milímetros, os valores dos

deslocamentos registrados durante a simulação. A Figura 14 também destaca o ponto de deslocamento máximo ocorrido no chassi, fornecendo informações cruciais para avaliar a flexibilidade e a rigidez da estrutura sob carga. Esses resultados são essenciais para garantir que o chassi mantenha sua integridade e desempenho, mesmo quando submetido às condições mais extremas.

O deslocamento máximo foi observado nos tubos centrais do chassi, com um valor de 0,41 mm. Esse dado indica que a região dos assentos do chassi é a mais suscetível a deformações sob a carga aplicada. Além disso, a análise revela que a média de deslocamento em todo o chassi é de aproximadamente 0,01 mm.

**Figura 13 – Deslocamento em Y**



**Fonte - Próprio autor**

Esses valores são indicativos do comportamento geral da estrutura e são fundamentais para avaliar se o chassi possui a rigidez necessária para manter sua forma e funcionalidade durante o uso. A identificação dessas áreas críticas permite que ajustes sejam feitos para melhorar a distribuição de carga e minimizar as deformações, garantindo a longevidade e segurança do chassi.

## 6. CONCLUSÃO

A análise estrutural realizada no presente trabalho permitiu avaliar a integridade e a segurança de um ciclo-rickshaw adaptado, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) como ferramenta principal de simulação. A metodologia adotada, que incluiu a modelagem tridimensional no software Inventor, a definição do material como aço AISI 1020 e a simulação das tensões de Von Mises, proporcionou uma visão detalhada do comportamento da estrutura sob diferentes condições de carga.

Os resultados obtidos indicam que o chassi possui um fator de segurança de 15, valor muito superior ao mínimo estabelecido de 1,5. Esse alto valor do fator de segurança demonstra que a estrutura é extremamente robusta e estável, garantindo que o ciclo-rickshaw possa suportar as cargas previstas com uma ampla margem de segurança. Isso reforça a confiabilidade do projeto e a viabilidade do uso do chassi em condições reais, sem o risco de falhas estruturais ou deformações plásticas em seu material.

Além disso, a simulação mostrou que os deslocamentos ocorridos no chassi estão dentro dos limites aceitáveis para esse tipo de veículo, o que indica que a rigidez estrutural da peça foi adequadamente dimensionada. Dessa forma, o ciclo-rickshaw projetado atende aos requisitos de segurança e desempenho estabelecidos para sua operação, assegurando não apenas a segurança dos ocupantes, mas também a longevidade da estrutura em condições de uso repetitivo.

A aplicação do Método dos Elementos Finitos mostrou-se eficiente para prever e analisar os possíveis pontos críticos da estrutura, permitindo a visualização precisa das tensões e deformações. Essa abordagem é essencial para otimizar o design, uma vez que possibilita que ajustes possam ser feitos de maneira antecipada, antes mesmo da construção física do protótipo.

O estudo conclui que o chassi projetado e analisado está apto para operar em vias públicas com segurança, sem a necessidade de modificações significativas no design. No entanto, recomenda-se que futuras análises sejam realizadas para avaliar a resposta do ciclo-rickshaw em situações extremas, como impacto ou vibrações contínuas, o que proporcionaria uma avaliação ainda mais detalhada da durabilidade e do desempenho da estrutura ao longo do

tempo.

Por fim, a adoção do MEF e de ferramentas de simulação avançadas, como o software Inventor, demonstrou ser uma prática eficaz e acessível para validar projetos de engenharia, garantindo que as estruturas desenvolvidas sejam seguras, funcionais e eficientes. Estudos futuros podem focar em explorar diferentes materiais e configurações estruturais, bem como em realizar simulações mais complexas, que levem em conta fatores como a fadiga e o envelhecimento dos materiais, para otimizar ainda mais o ciclo-rickshaw e outras aplicações semelhantes.

Para futuros estudos, seria interessante realizar análises complementares considerando diferentes cenários de carga dinâmica e condições de operação, como impacto e vibrações contínuas, que simulam o uso em vias com pavimentos irregulares. Esse tipo de análise ajudaria a entender o comportamento do ciclo-rickshaw em condições mais severas e realistas, além de proporcionar uma avaliação mais detalhada sobre a durabilidade e resistência à fadiga da estrutura. Outra possibilidade seria a inclusão de diferentes materiais na simulação, como ligas de aço de maior resistência ou até materiais compostos, o que permitiria verificar a viabilidade de reduzir o peso do chassi, mantendo ou até aumentando o fator de segurança.

Adicionalmente, a realização de testes experimentais em um protótipo físico do ciclo-rickshaw poderia validar as simulações computacionais e trazer dados mais precisos para ajustes no design. Para otimizar a ergonomia e o conforto dos passageiros, futuras pesquisas poderiam explorar configurações alternativas para os assentos e a distribuição de carga. A implementação de sensores em pontos críticos da estrutura também seria uma melhoria significativa, pois possibilitaria monitorar a resposta do chassi em tempo real durante o uso, fornecendo insights valiosos para a manutenção preventiva e a extensão da vida útil do veículo.

## 7. Bibliografia

- ABNT. (2008). *ABNT NBR 14761: Assentos Plásticos e Metálicos*.
- ABNT, B. A. (2008). *Projeto de Estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, NBR 8800*. Rio de Janeiro.
- BALADEZ, F. (2016). *O passado, o presente e o futuro dos simuladores*. FaSci-Tech.
- BUFFONI, S. (2017). *Critérios de falha*. Fonte: Universidade Federal Fluminense: <http://www.professores.uff.br/salete/wp-content/uploads/sites/111/2017/08/aula141.pdf>
- BURTON, D. C. (2013). *Principles and Analysis*. SAE International.
- COSTIN, Michael;PHIPPS, David. (1961). *Racing and sports car chassis design*. Londres: Batsford.
- CURY, A. (2015). *Notas de aula: Critérios de falha*. Juiz de Fora,: DMAC/UFJF – Notas de aula do curso de engenharia mecânica.
- DIXON, J. C. (2009). *Suspension Geometry and Computation*. John Wiley & Sons.
- HAPPIAN-SMITH, J. (2002). *An Introduction to Modern Vehicle Design*. Woburn.
- HIBBELER, R. (2011). *Estática: mecânica para engenharia*. São Paulo: Pearson Prentice Hall,.
- HIBBELER, R. (2011.). *Estática: mecânica para engenharia*. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- LOTTERMANN, J. P. (2014). *Projeto estrutural de chassi tipo gaiola para veículos minibaja: análise numérica e experimental*. Brasília: Universidade de Brasília.
- MARTHA, L. F. (2017). *Análise de estruturas*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- PEREIRA, C. N. (2016). *Análise estrutural estática por elementos finitos de um chassi veicular tipo spaceframe*. Catalão: Universidade Federal de Goiás.
- PUHN, F. (2001). *How to Make Your Car Handle*. HPBooks.
- SILVA, F. J. (2014). *Projeto de melhoria de um chassi tubular para um veículo de competição Single Seater*. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- SMITH, W. F. (2015). *Foundations of Materials Science and Engineering*.

McGraw-Hill.

Timoshenko, S. (1983). *History of strength of materials: with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures*. Nova York: Dover Publications.

YAMAGUTI, K. (2019). *Sistema de transporte na Índia*. Fonte: <https://www.brasileiraspelomundo.com/sistema-de-transporte-na-india-1503122510>