

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

ANDREOS HELLER PEREIRA DE ARAÚJO

ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA POR ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI  
TIPO MULTITUBULAR DE UM CARRO DE CORRIDA DE ARRANCADA

JARAGUÁ DO SUL

Fevereiro, 2022

ANDREOS HELLER PEREIRA DE ARAÚJO

ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA POR ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI  
TIPO MULTITUBULAR DE UM CARRO DE CORRIDA DE ARRANCADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Doutor Alexandre Galiotto

JARAGUÁ DO SUL

Fevereiro, 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Araújo, Andreos Heller Pereira de  
Análise Estrutural Estática Por Elementos Finitos de um Chassi Multitubular de Carro de Corrida de Arrancada / Andreos Heller Pereira de Araújo ; orientação de Alexandre Galiotto. Jaraguá do Sul, SC, 2022.

59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .

Inclui Referências

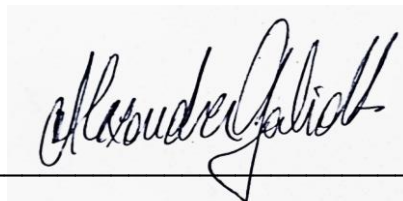
1. Chassi Multitubular. 2. Flexão Vertical. 3. Rigidez Torcional.
4. Método de Elementos Finitos. I. Galiotto, Alexandre. II. Instituto Federal de Santa Catarina.
- . III. Título.

ANDREOS HELLER PEREIRA DE ARAUJO

ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA POR ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI  
DE CARRO DE CORRIDA DE ARRANCADA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em  
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de  
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo  
indicada.

Jaraguá do Sul, 11 de fevereiro de 2022



Prof. Alexandre Galiotto, Doutor.

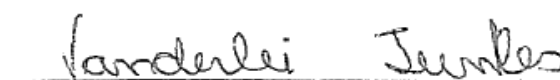
Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Me. Eduardo Cardoso Castaldo

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau



Prof. Vanderlei Junkes, Me.

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao orientador deste trabalho, Professor Alexandre Galiotto, pela atenção e paciência.

Agradeço aos professores do IFSC pelos ensinamentos passados nesses últimos anos.

Agradeço aos professores Eduardo Castaldo e Vanderlei Junkes pela atenção disponibilizada para avaliar o trabalho apresentado.

Quer você acredite que consiga fazer uma coisa ou não,  
você está certo.

Henry Ford

## RESUMO

A rigidez torcional e a rigidez a flexão vertical, são as principais propriedades que definem se um chassi está apto ou não a ser utilizado em um veículo. Os cálculos para definir e estimar essas propriedades são complexos, extensos e iterativos, muitas vezes sujeitos a erros ou desvios. Computadores possibilitaram que cálculos e simulações dessas propriedades sejam realizadas de forma mais rápida e próxima ao real, diminuindo assim o custo de engenharia. Neste trabalho, foram realizados o modelamento e a simulação de um chassi multitubular de um veículo para corridas de arrancada, para determinar a sua tensão máxima de flexão vertical e sua rigidez torcional longitudinal. A modelagem do chassi foi realizada através do *software Solidworks* e para a simulação foi empregada a ferramenta *Solidworks Simulation* utilizando o método de elementos finitos. Como primeiro resultado, em relação a tensão máxima de flexão vertical do chassi, foram detectados pontos que necessitaram de reforço. Após modificação de projeto, os resultados ficaram dentro dos limites das propriedades do material de fabricação do chassi. Após determinadas as tensões de flexão vertical, foi realizada uma simulação para calcular a rigidez torcional do chassi, que após propostas de melhoria, foi estimada em 2270,6 Nm/grau.

Palavras-Chave: Chassi multitubular. Flexão vertical. Rigidez torcional. Método de Elementos Finitos.

## **ABSTRACT**

Torsional stiffness and vertical bending stiffness are the main properties that define whether or not a chassis is suitable for use in a vehicle. The calculations to define and estimate these properties are complex, extensive and iterative, often subject to errors or deviations. Computers have made it possible for calculations and simulations of these properties to be performed faster and closer to the real, thus reducing the engineering cost. In this work, the modeling and simulation of a multitube chassis of a drag racing vehicle were carried out to determine its maximum vertical bending stress and its longitudinal torsional stiffness. The chassis modeling was performed using Solidworks software and the Solidworks Simulation tool was used for the simulation using the finite element method. As a first result, in relation to the maximum vertical bending stress of the chassis, points were detected that needed reinforcement. After design modification, the results were within the limits of the material properties of the chassis fabrication. After determining the vertical bending stresses, a simulation was performed to calculate the torsional stiffness of the chassis, which after proposals for improvement, was estimated at 2270.6 Nm/degree.

**Keywords:** Multitube chassis. Vertical bending. torsional stiffness. Finite Element Method.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de uma torção longitudinal.....	17
Figura 2 - Representação da flexão vertical sobre o veículo.....	18
Figura 3 - Representação da flexão lateral sobre o chassi .....	18
Figura 4 - Representação de um carregamento de proa e ré .....	19
Figura 5 - Chassi submetido a flexão .....	20
Figura 6 - Flexão torcional em um chassi.....	21
Figura 7 - Diagrama do cálculo da rigidez torcional do chassi .....	23
Figura 8 - Chassi tipo Escada de um 1958 Lister-Jaguar.....	24
Figura 9 - Chassi tipo cruciforme.....	25
Figura 10 - Chassi multitubular ou Spaceframe .....	26
Figura 11 - Diferença entre vigas trianguladas e não-trianguladas .....	26
Figura 12 - Chassi monobloco de um carro popular.....	27
Figura 13 - Simulação utilizando MEF .....	29
Figura 14 - Metodologia para simulação do chassi .....	30
Figura 15 - Chassi de referência para o estudo .....	31
Figura 16 - Chassi modelado no SolidWorks .....	32
Figura 17 - Dimensões dos tubos que formam o chassi .....	32
Figura 18 - Malha de elemento de viga .....	34
Figura 19 - Condições de fronteira aplicadas ao chassi para simulação da tensão de flexão máxima .....	35
Figura 20 - Concentração da carga no chassi.....	36
Figura 21 - Distribuição de carga sobre o chassi .....	37
Figura 22 - Condições de fronteira para simulação da rigidez torcional.....	38
Figura 23 - Eixo dianteiro do chassi .....	39
Figura 24 - Distribuição das forças para simulação da flexão torcional.....	40
Figura 25 - Distribuição das forças e condição de fronteira para simulação da flexão torcional do chassi.....	41
Figura 26 – Tensões de flexão resultantes.....	42
Figura 27 - Resultado dos deslocamentos pelo chassi .....	43
Figura 28 - Dimensões dos tubos centrais .....	44
Figura 29 - Tubos com novas dimensões.....	45
Figura 30 - Distribuição de tensão sobre o chassi após modificação.....	46
Figura 31 - Distribuição dos deslocamentos sobre o chassi após as modificações ..	47
Figura 32 - Distribuição dos deslocamentos no chassi .....	48
Figura 33 - Deslocamentos nas regiões de aplicação das forças .....	48
Figura 34 - Rigidez torcional de diferentes veículos.....	49
Figura 35 - Localização das vigas adicionadas ao chassi na parte dianteira .....	50
Figura 36 - Localização das vigas adicionadas ao chassi no assoalho e traseira.....	51
Figura 37 - Condições utilizadas para a nova simulação da torção do chassi .....	52
Figura 38 - Deslocamentos nas regiões de aplicação das forças .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do aço AISI 1020 utilizado para simulação .....	33
Tabela 2 - Qualidade da malha.....	34
Tabela 3 - Grandezas consideradas para o cálculo do peso do veículo.....	36
Tabela 4 – Qualidade da malha para simulação da flexão torcional.....	41
Tabela 5 - Qualidade da malha.....	45

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAE – Engenharia Auxiliada por Computador

CAD – Desenho Assistido por Computador

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

MEF – Método de Elementos Finitos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$  – Deflexão Angular

T – Momento torçor

K – Rigidez Torcional

F – Força

L - Distância

N – Newton

$\text{N/mm}^2$  – Newton por Milímetro Quadrado

$\text{kg/m}^3$  – Quilograma por Metro Cúbico

kg – Quilograma

$\text{m/s}^2$  – Metro por Segundo ao Quadrado

Mpa – MegaPascal

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 Objetivo geral.....	14
1.2 Objetivo específico .....	14
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 Propriedades de um chassi .....	16
2.1.1 Cargas atuantes em um chassi veicular.....	17
2.1.2 Resistência e rigidez mecânica .....	19
2.1.3 Rigidez a flexão vertical .....	20
2.1.4 Rigidez torcional.....	21
2.1.5 Cálculo da rigidez torcional de um chassi .....	22
2.2 Principais tipos de chassis.....	23
2.2.1 Tipo escada.....	23
2.2.2 Chassi cruciforme.....	24
2.2.3 Chassi multitubular ou <i>spaceframe</i> .....	25
2.2.4 Construção unitária ou monobloco.....	27
2.3 Métodos de análise estrutural de um chassi.....	27
2.3.1 Método de elementos finitos .....	28
2.3.2 SolidWorks Simulation .....	29
3 MODELAGEM DO CHASSI E METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO.....	30
3.1 Levantamento geométrico .....	31
3.2 Modelagem tridimensional em Solidworks.....	31
3.3 Definição do material .....	33
3.4 Geração da Malha .....	33
3.5 Condições de fronteira para simulação da tensão máxima de flexão .....	34
3.6 Carga total aplicada .....	35
3.7 Divisão da carga sobre o chassi .....	36
3.8 Rigidez torcional .....	37
3.8.1 Condições de fronteira para simulação .....	38
3.8.2 Carga aplicada ao chassi .....	38
3.8.3 Geração da malha.....	41
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	42
4.1 Simulação da tensão máxima de flexão .....	42
4.2 Deslocamento máximo no chassi .....	43
4.3 Análise dos resultados e propostas de melhoria.....	43
4.3.1 Propostas de melhoria .....	44
4.3.2 Geração da malha.....	45
4.4 Simulação da tensão máxima de flexão após proposta de melhoria .....	46
4.5 Deslocamento máximo no chassi após proposta de melhoria .....	46
4.6 Rigidez torcional .....	47
4.6.1 Proposta de melhoria para aumentar a rigidez torcional do chassi .....	49
5 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	56

## 1 INTRODUÇÃO

É de comum acordo que veículos automotores revolucionaram a maneira como o ser humano se locomove pelo globo. Antes uma viagem que levaria meses, agora é realizada em dias através desse tipo de veículo. Sendo assim, se torna indispensável nos dias de hoje para locomoção de nossa espécie e no transporte de cargas. Desta forma, estudos e análises das estruturas veiculares são fundamentais para trazer segurança aliada à um bom desempenho do veículo.

A competição também, através dos tempos, tem se mostrado uma grande aliada da inovação e do aperfeiçoamento tecnológico já que a maior parte dos grandes saltos tecnológicos da sociedade contemporânea ocorreram em tempos de guerra, como por exemplo, a telefonia e a internet. Numa competição de carros, não é diferente. Carros que sofrem um ganho de potência, acerto de suspensão, diminuição de peso, entre outras características que visam melhor dirigibilidade e velocidade do veículo, são colocados a prova neste tipo de competição, e após serem vitoriosos, essas mesmas modificações são utilizadas nos carros comuns ou de passeio para servir a sociedade.

Estes tipos de veículos podem ser divididos em várias partes como: motor, suspensões, eixos, carcaças, direção, transmissão e não menos importante, a peça que une e sustenta todas essas partes, é o chassi. Este trabalho tem como objeto de estudo um chassi de carro de corrida de arrancada.

Resumidamente, o chassi deve suportar e juntar as partes que formam um veículo, conectando-as. Pode-se dizer que o chassi é a espinha dorsal de um carro, o que dá estrutura à um veículo. Este deve ter uma elevada rigidez à flexão e a torção para que possa suportar todos seus esforços sem desvios, no intuito de manter uma condução precisa, leveza para reduzir a inércia e a resistência ao rolamento, e uma boa resistência para absorver as demais solicitações (LOPES, 2014).

Por conta disso, quanto mais rígida for a estrutura de um veículo, melhor será o seu potencial de desempenho dinâmico. Desse modo, a busca por estruturas veiculares cada vez mais rígidas é uma preocupação constante da indústria automobilística, trazendo análises cada vez mais complexas (HAPPIAN-SMITH, 2002).

Diante de problemas cada vez mais complexos, o uso de Engenharia Auxiliada por Computador (CAE), se torna indispensável. Com ferramentas deste tipo, pode-se

simular o desempenho desse tipo de estrutura, possibilitando melhorias antes mesmo de sua construção, economizando tempo e investimento.

Em vista disso, diferentemente das estruturas simples, regulares e estáticas que podem ter parâmetros como carregamentos, tensões e deformações calculadas de maneira simples, estas complexas estruturas veiculares, que estão submetidas a diferentes tipos de solicitações simultâneas, devem ser analisadas usando técnicas de discretização de sistemas. Uma destas técnicas é chamada de Método de Elementos Finitos ou MEF (OLIVEIRA, 2007).

O MEF se baseia na discretização e subdivisão de um domínio do objeto em análise em pequenas partes, denominadas de elementos. Desta forma, é possível que se transforme um problema de alta complexidade na soma de diversos problemas com grau de complexidade menor (PEREIRA, 2016).

### **1.1 Objetivo geral**

Modelar, analisar e determinar a tensão máxima de flexão vertical e a rigidez torcional de um chassi do tipo multitubular de um carro de corrida de arrancada, apontando se o chassi comporta estes esforços de flexão e torção exercidas sobre a estrutura, através do Método de Elementos Finitos via simulação em software CAD.

### **1.2 Objetivo específico**

- Pesquisar e descrever quais as principais propriedades que devem ser levadas em conta ao projetar um chassi de carro de corrida.
- Modelar em software CAD um chassi multitubular utilizado para corridas tendo como referência o chassi físico.
- Definir os parâmetros de entrada do chassi como material, contato de componentes e/ou acessórios de fixação, restrições, cargas e malhas de MEF.
- Realizar a simulação e obter os valores de tensão máxima de flexão e rigidez torcional do chassi.
- Se necessário, propor modificações e realizar ajustes. Por fim, apresentar resultados.





## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Desde a primeira patente de um veículo automotor, feita por Carl Friederich Benz, em 1886, o automóvel traz consigo diversos avanços tecnológicos em sua bagagem. Avanços realizados, na maioria das vezes, em competições que promovem um estímulo para este desenvolvimento.

Carros que são modificados e aperfeiçoados são colocados à prova neste tipo de competição, e após serem vitoriosos, essas mesmas modificações são utilizadas nos carros comuns do mercado em geral.

Uma das estruturas fundamentais dos veículos é o chassi, que é responsável por unir todas as outras partes do veículo em conjunto, suportando todas as demais peças.

Desta forma, neste capítulo, será dada uma visão geral sobre qual definição de chassi e suas formas, suas propriedades e seus tipos. Além disso, será abordado quais são os métodos de simulação utilizados para aferir um chassi.

### 2.1 Propriedades de um chassi

Segundo o dicionário Aurélio, a palavra **chassi**, entre outros significados, quer dizer “Quadro de aço onde estão montados os órgãos necessários à locomoção de um veículo, de um vagão, sobre qual é montada a respectiva carroceria”.

Idealmente, o propósito de um chassi de carro é conectar todas as partes integrantes do veículo com os pneus sem que sua estrutura ceda a forças de flexão e torção. Este deve ser capaz de suportar todos seus componentes e ocupantes do veículo e deve absorver todos os carregamentos sem desvio (COSTIN; PHIPPS, 1961).

Pode-se dizer que o chassi é a espinha dorsal de um carro, o que dá estrutura à um veículo. Este deve ter uma elevada rigidez à flexão e à torção para que possa suportar seus esforços, mantendo uma condução precisa, importante para um controle preciso do carro, mantendo-o firmemente em contato com a pista (LOPES, 2014).

Portanto, no próximo capítulo será abordado de que forma os esforços da pista em que o veículo está sujeito atuam no chassi, mostrando as principais forças envolvidas em cada esforço.

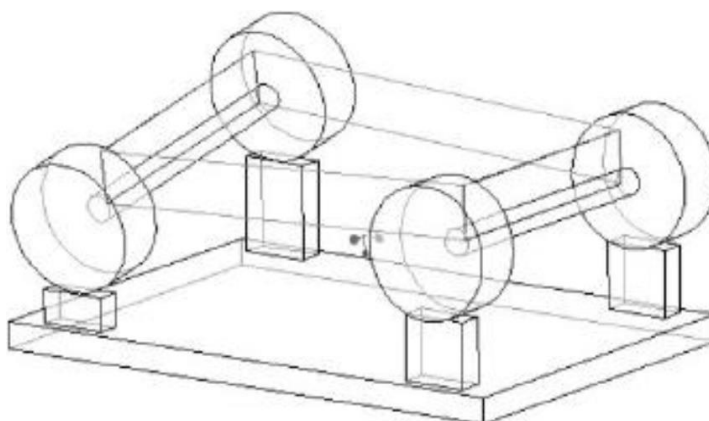
### 2.1.1 Cargas atuantes em um chassi veicular

De acordo com Riley e George (2002), o primeiro passo ao projetar o chassi de um veículo, é entender os diferentes carregamentos que atuam sobre a estrutura.

As principais forças ou carregamentos atuantes em um chassi são:

- Torção longitudinal;

Figura 1 - Representação de uma torção longitudinal

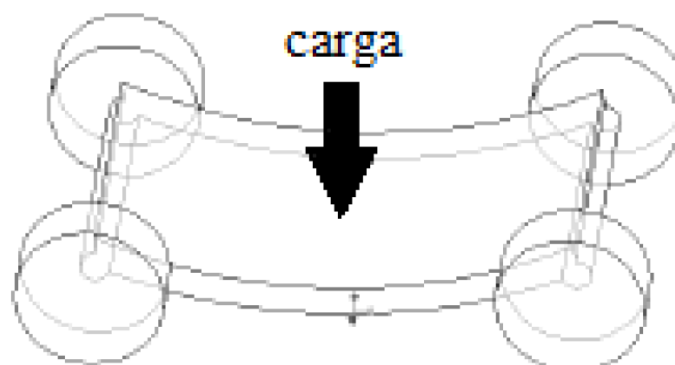


Fonte: Riley; George (2002). Adaptado.

As cargas de torção longitudinal resultam de cargas aplicadas atuando em um ou dois cantos opostos do veículo conforme a Figura 1. A carga torcional e a deformação associada da estrutura e peças da suspensão podem afetar o manuseio e o desempenho do veículo. A resistência à deformação torcional geralmente é citada como rigidez em newton-metro por grau. Este é geralmente considerado o primeiro ponto determinante para o desempenho de um chassi para carro de corrida (RILEY; GEORGE, 2002).

- Flexão vertical

Figura 2 - Representação da flexão vertical sobre o veículo

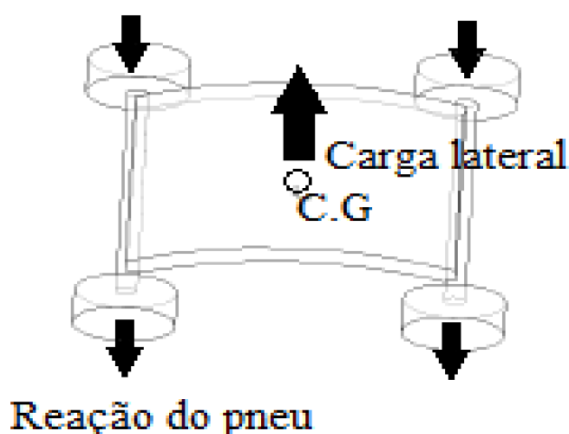


Fonte: Riley; George (2002). Adaptado.

O peso do motorista e dos componentes montados ao chassi, como o motor e outras partes, são carregadas em flexão através do chassi do veículo conforme a Figura 2. As reações são suportadas pelos eixos (RILEY; GEORGE, 2002).

- Flexão lateral

Figura 3 - Representação da flexão lateral sobre o chassi

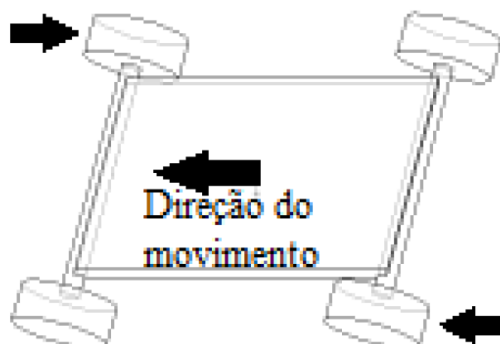


Fonte: Riley; George (2002). Adaptado.

Conforme a Figura 3, cargas de flexão lateral são induzidas na estrutura do veículo por vários motivos, como a curvatura da estrada, vento lateral e as forças centrífugas causadas pelas curvas. As forças laterais irão atuar ao longo do comprimento do carro e irão ser resistidas nos pneus. Isso causa uma carga lateral e uma flexão resultante (RILEY; GEORGE, 2002).

- Carregamento de proa e ré

Figura 4 - Representação de um carregamento de proa e ré



Fonte: Riley; George (2002). Adaptado.

Forças para frente e para trás aplicadas às rodas opostas causam esse tipo de deformação. Estas forças podem ser causadas por variações verticais no pavimento ou pela reação da estrada ao dirigir o carro para frente. Estas forças tendem a distorcer o quadro em um paralelogramo conforme mostra a Figura 4 (RILEY; GEORGE, 2002).

Definido estes carregamentos, os principais carregamentos a serem levados em consideração para o projeto de uma estrutura satisfatória de chassi devem ser a torção longitudinal e a flexão vertical. A flexão lateral e o carregamento de proa e ré requerem atenção ao projetar os pontos de montagem da suspensão da estrutura, mas são menos significantes para a estrutura no geral. (HAPPIAN-SMITH, 2002)

### 2.1.2 Resistência e rigidez mecânica

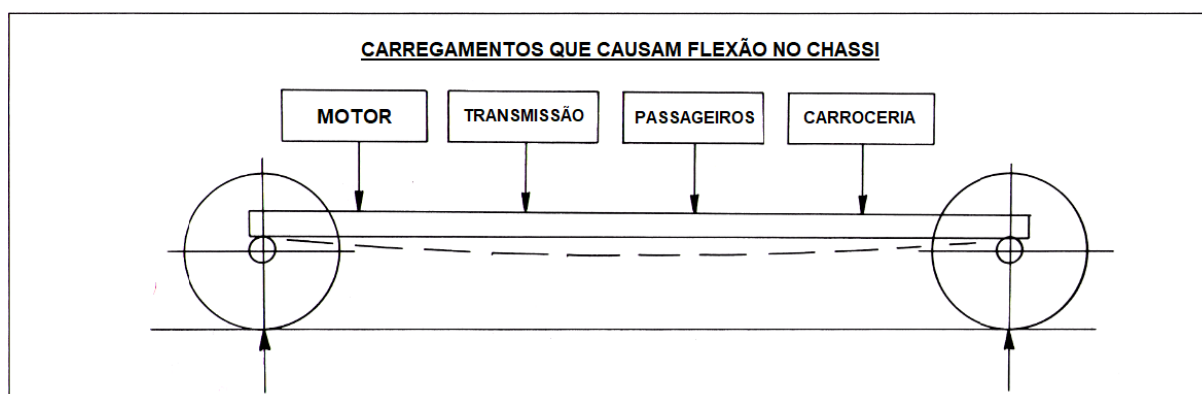
Projetar um chassi rígido deve ser um exercício de aplicação de estrutura básica ao projeto. Cada parte do chassi deve ser analisada determinando qual a melhor forma de mantê-lo rígido. Considerando que a maior parte dos carregamentos em um chassi incidem sobre as suspensões dianteiras e traseiras, a rigidez entre esses dois pontos deve ser alta. É também importante ressaltar que aqui está sendo descrito rigidez e não resistência mecânica. A rigidez se refere a quanto algo pode flexionar ao ser carregado. Resistência mecânica refere-se a quanto algo pode deformar antes de quebrar. (HERB, 1993)

Sendo assim, os dois principais carregamentos em um chassi, a flexão vertical e a torção longitudinal, serão abordadas adiante nos próximos capítulos.

### 2.1.3 Rigidez a flexão vertical

Rigidez à flexão refere-se a quanto o chassi flexiona quando solicitado no centro e suportado pelas extremidades. O peso do motor, transmissão, passageiros e carroceria, todos causam flexão ao chassi. A Figura 5 apresenta como se dão esses esforços sobre o chassi.

Figura 5 - Chassi submetido a flexão



Fonte: Herb (1993). Adaptado.

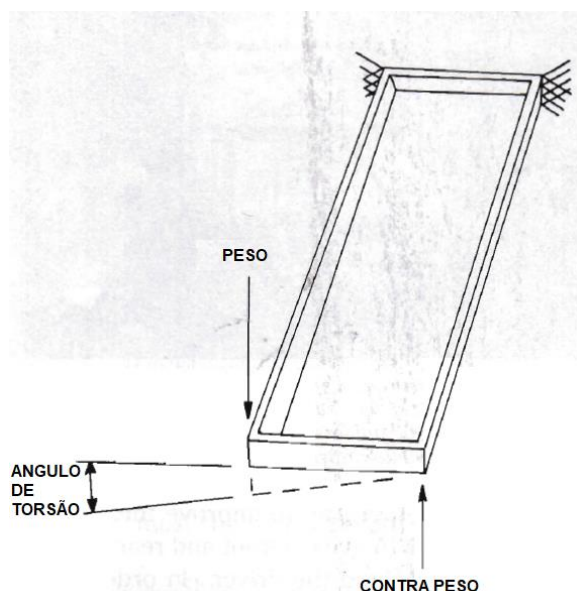
Para o passageiro do carro, a rigidez à flexão é determinada pelos limites aceitáveis de deflexão verificados pela abertura das portas laterais. Se há deflexão excessiva, então as portas do carro não fecham corretamente, ou seja, o alinhamento das travas das portas fica de tal forma que a porta não é aberta ou fechada facilmente (HAPPIAN-SMITH, 2002).

Projetar um chassi que tenha uma boa rigidez a flexão vertical não é difícil e a maioria dos carros não tem problema de deflexão com este tipo de carregamento. É possível projetar uma estrutura que é suficientemente forte, mas ainda insuficientemente rígida. Para análise da flexão vertical, deve ser analisado o gráfico de tensões por todo chassi, buscando pontos onde essa tensão ultrapassa a tensão máxima de escoamento do material, evitando quaisquer deformações sobre as vigas do chassi (HERB, 1993; HAPPIAN-SMITH, 2002).

### 2.1.4 Rigidez torcional

A Figura 6 apresenta como se dá uma torção longitudinal em um chassi. A rigidez torcional refere-se a quanto o chassi flexiona quando é carregado de forma que uma das rodas da suspensão dianteira é levantada e a outra roda é carregada na direção oposta, enquanto a suspensão traseira do veículo está fixa no mesmo nível. Esta é uma condição em que o veículo é submetido a cada esquina, ou seja, é de suma importância (HERB, 1993).

Figura 6 - Flexão torcional em um chassi



Fonte: Herb (1993). Adaptado.

Uma rigidez torcional aceitável pode ser avaliada para critérios específicos através de algumas fórmulas matemáticas que serão apresentadas no próximo capítulo, enquanto podem ser utilizados outros critérios baseado na experiência e no desenvolvimento do projeto. Para comparação, no critério matemático, um carro popular de médio porte, tipo sedan, completo, deve ter uma rigidez torcional entre 8000 e 10000 Nm/grau. Isto é, quando medido sobre onde são fixados os eixos das rodas do veículo (HAPPIAN-SMITH, 2002).

Se a rigidez torcional é baixa, a percepção do motorista é de que a parte frontal do veículo aparenta chacoalhar, movendo-se para cima e para baixo. Outro problema prático que pode ser visualizado são as portas não fechando adequadamente ao estacionar o carro em um solo irregular por exemplo com uma roda em cima do meio

rio de uma calçada.

### 2.1.5 Cálculo da rigidez torcional de um chassi

Riley e George (2002) explicam que a rigidez torcional do chassi pode ser calculada dividindo o momento torçor aplicado ao chassi pela sua deflexão angular. A Equação 1 apresenta como se dá esse cálculo, sendo K (rigidez torcional), T (momento torçor e  $\alpha$  (deflexão angular).

Equação 1 - Cálculo da rigidez torcional

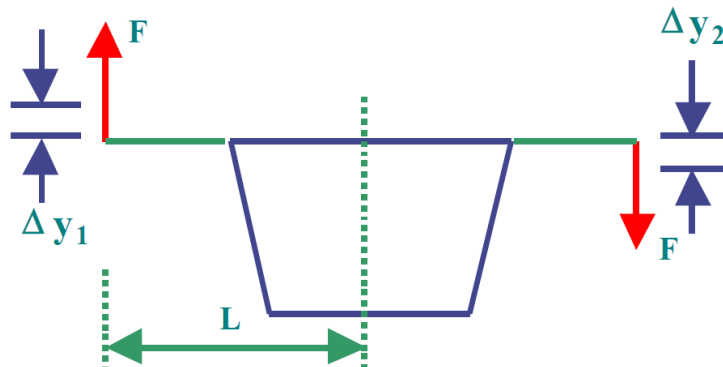
$$K = \frac{T}{\alpha}$$

$$K = \frac{FL}{\tan^{-1} \left[ \frac{(\Delta y1 + \Delta y2)}{2L} \right]}$$

Fonte: Riley; George (2002)

Riley e George (2002) também mostram na Figura 7 que o torque definido é o produto da força F e a distância L do ponto de aplicação da força para o centro do chassi. A deflexão é considerada como sendo o ângulo formado a partir do centro do carro para a posição da extremidade após o torque exercido. Ainda afirmam que a razão de ambas as deflexões estarem na Equação 2 se dá, devido ser tomada a média entre as deflexões da esquerda e da direita para gerar uma estimativa mais acurada. Cada uma das deflexões é representada na equação como  $\Delta y1$  e  $\Delta y2$ .

Figura 7 - Diagrama do cálculo da rigidez torcional do chassi



Fonte: Riley; George (2002)

## 2.2 Principais tipos de chassis

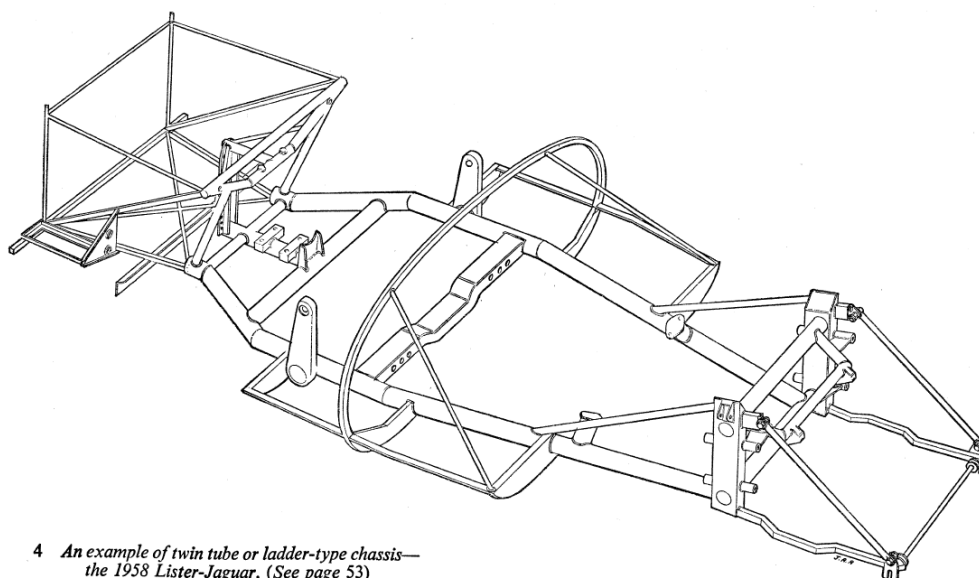
Diferentes tipos de chassi lidam diferentemente com cada tipo de carregamento. Neste capítulo, serão abordados os principais tipos de chassi e suas aplicações práticas.

### 2.2.1 Tipo escada

Os primeiros veículos automotores eram construídos com uma estrutura/chassi como se fossem degraus de uma escada no qual eram posicionados a carroceria contendo os assentos dos passageiros. Os primeiros *designs* geralmente não tinham teto, ou seja, o corpo do veículo não dava nenhuma proteção contra as variações climáticas enquanto os modelos mais recentes proveram essa proteção através de teto, portas, etc. (HAPPIAN-SMITH, 2002).



Figura 8 - Chassi tipo Escada de um 1958 Lister-Jaguar



4 *An example of twin tube or ladder-type chassis—the 1958 Lister-Jaguar. (See page 53)*

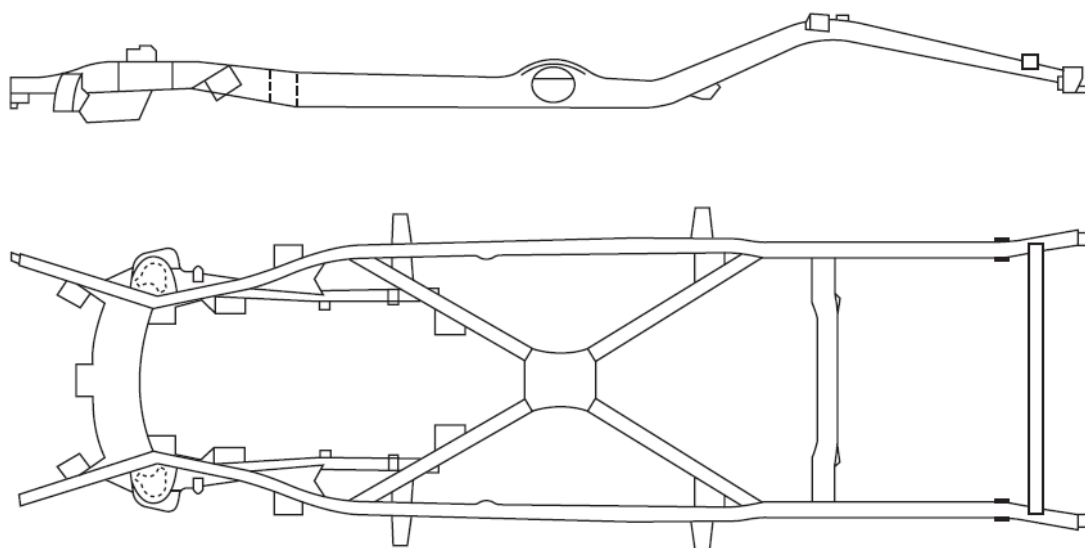
Fonte: Costin; Phipps (1965)

Esta é uma das formas mais simples de construção de um chassi. O chassi tipo escada mais simples é formado por dois tubos paralelos de largo diâmetro com reforços laterais ou diagonais, ou uma mistura de ambos, com diâmetros iguais ou menores do que as vigas paralelas conforme mostra a Figura 8. Esses reforços provêm tanto uma maior rigidez torcional como também dão suporte aos componentes principais e secundários. O tipo de material mais comum utilizado para esse tipo de chassi é aço com baixo carbono e o principal método de construção é através de soldagem a gás. (COSTIN; PHIPPS, 1961)

### 2.2.2 Chassi cruciforme

É possível projetar uma estrutura para suportar cargas de torção onde nenhum elemento da estrutura está sujeito a um momento torçor. O chassi cruciforme mostrado na figura 9 é feito de duas vigas retas e terá apenas cargas de flexão aplicadas às vigas. Esse tipo de quadro apresenta boa rigidez torcional, desde que a junta central seja projetada de maneira satisfatória. Deve-se notar que a flexão máxima ocorre na junta, portanto, o projeto da junta torna-se crítico (HAPPIAN-SMITH, 2002).

Figura 9 - Chassi tipo cruciforme



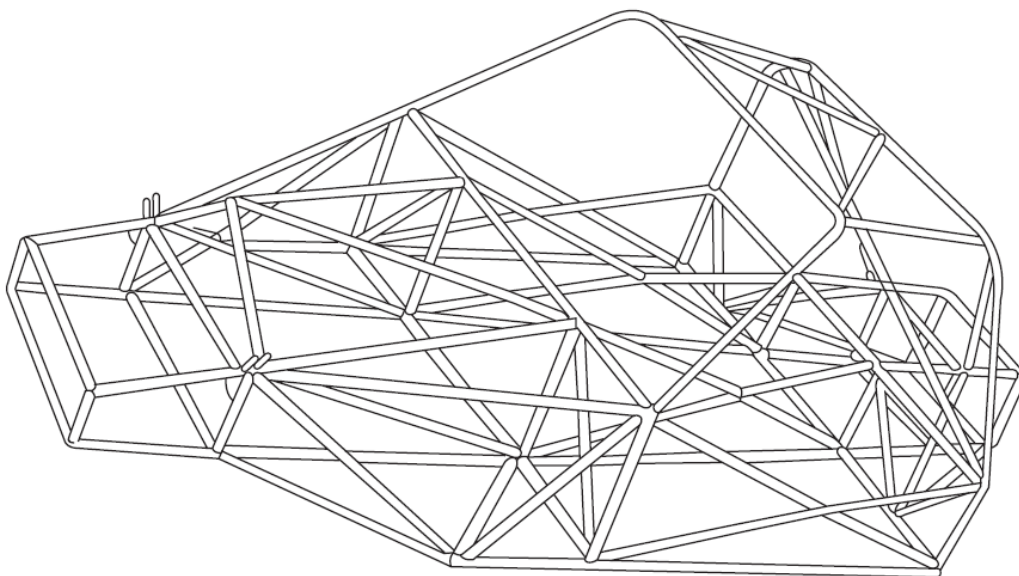
Fonte: Happian-Smith (2002)

Combinar as propriedades da estrutura cruciforme com as da estrutura da escada auxilia na obtenção de boas propriedades de flexão e de torção. As vigas transversais na frente e traseira não apenas auxiliam no transporte do momento torçor, mas auxiliam no transporte das cargas laterais dos pontos de montagem da suspensão (HAPPIAN-SMITH, 2002).

### 2.2.3 Chassi multitubular ou *spaceframe*

Os chassis descritos nos dois itens anteriores são todos essencialmente bidimensionais, ou seja, sua profundidade é muito menor do que seu comprimento e largura. Adicionar profundidade a um chassi aumenta sua rigidez a flexão e a torção consideravelmente (HAPPIAN-SMITH, 2002). Chassis tridimensionais do tipo multitubular ou *spaceframe* têm sido utilizados por especialistas em carros de corrida. A Figura 10 mostra um exemplo de chassi multitubular.

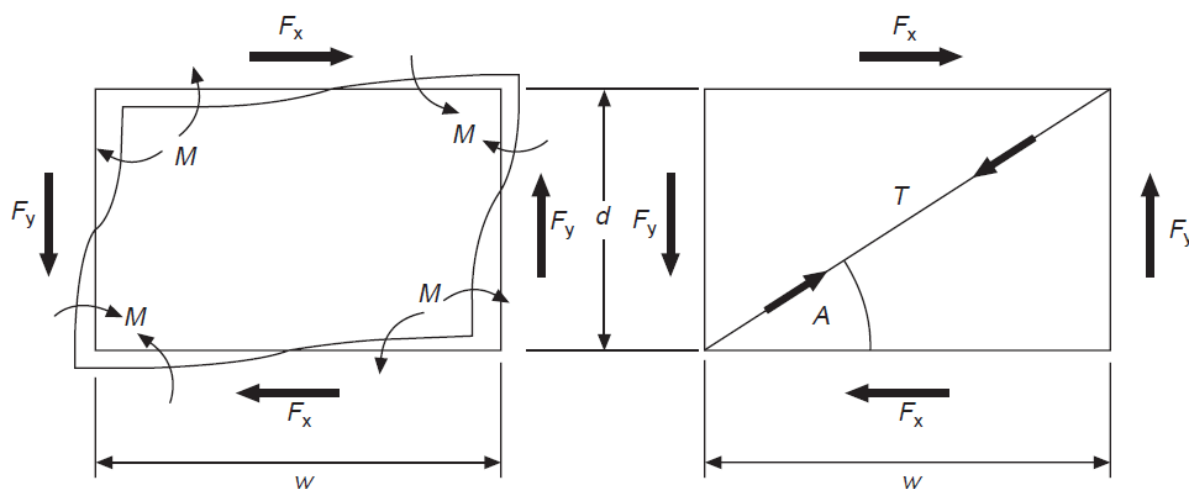
Figura 10 - Chassi multitubular ou Spaceframe



Fonte: Happian-Smith (2002)

Neste tipo de estrutura deve-se garantir que todos os planos estejam totalmente triangulados para que os elementos de viga sejam carregados essencialmente em tração ou compressão. A Figura 11 apresenta a diferença entre elementos de viga triangulados em contraste com elementos de viga não triangulados. A rigidez do conjunto é provida pelo membro diagonal, e que sem ele o retângulo aberto estaria muito mais sujeito a deformações (HAPPIAN-SMITH, 2002).

Figura 11 - Diferença entre vigas trianguladas e não-trianguladas



Fonte: Happian-Smith (2002)

#### 2.2.4 Construção unitária ou monobloco

Atualmente, os carros modernos de produção em larga escala são quase exclusivamente produzidos através de prensagem de uma chapa de aço com pontos soldados para formar uma estrutura integral. Esta é uma estrutura em que seus componentes fazem o papel tanto de estrutura para o carro, como dão forma ao veículo. Um típico chassi monobloco é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Chassi monobloco de um carro popular



Fonte: Burba (2015)

Conforme descrito anteriormente, a profundidade de uma estrutura, como por exemplo o chassi multitubular, podem melhorar sua rigidez à flexão e à torção. Na estrutura monobloca integral não é diferente: toda sua profundidade juntamente com sua estrutura lateral e o teto são feitos para contribuir para uma maior rigidez geral do veículo. No entanto, este tipo de chassi só é viável economicamente se feito em larga escala devido a necessidade de ferramental específico que necessita de alto investimento para sua construção.

### 2.3 Métodos de análise estrutural de um chassi

Antes do auxílio de computadores, a análise de problemas de meios contínuos, ou seja, análise de estruturas contínuas, era realizada através da resolução de sistemas de equações de derivadas parciais que regessem o fenômeno, onde comumente recorria-se a séries de Fourier. Devido à alta complexidade, estes procedimentos eram aplicáveis somente a meios contínuos homogêneos e estruturas

de geometria simples. (PEREIRA, 2016)

Dessa forma, a análise estava sujeita a muitos desvios, desde equívocos conceituais até erros de cálculos. O tempo gasto nesse tipo de problema era muito grande, levando muitas vezes a projetos superdimensionados ou subdimensionados.

A adoção de programas computacionais para simulação contribuiu para a redução de tempo e custos associados ao desenvolvimento de protótipos, testes, dentre outras demandas aplicadas dentro da engenharia. Para tanto, foi criado um método para análise de estruturas em computador chamado de método de elementos finitos ou MEF. (SOUZA, 2015)

### 2.3.1 Método de elementos finitos

O método de elementos finitos (MEF), atualmente, é indispensável na engenharia de diversos tipos de análises em diferentes tipos de campos. Na engenharia mecânica, por exemplo, a análise dos deslocamentos e tensões em um sólido sujeito a ações externas é de ampla importância no projeto e dimensionamento de estruturas, como pontes, prédios, casas entre outros. (PEREIRA, 2016)

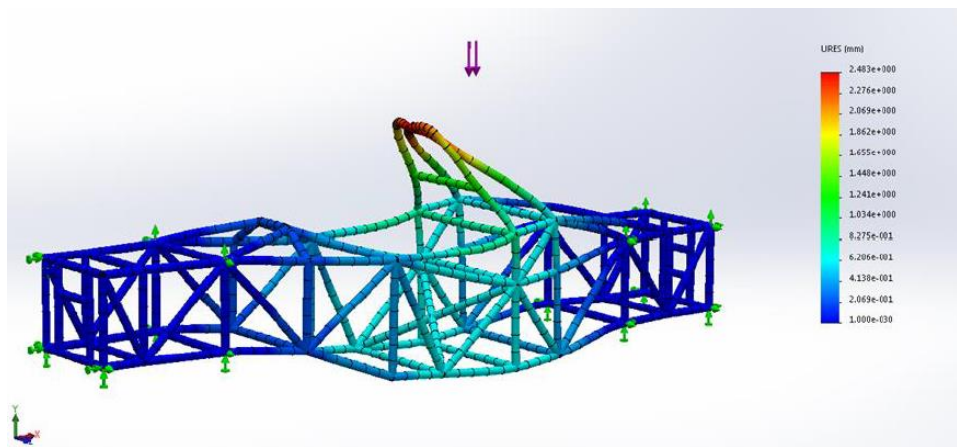
Este método baseia-se na discretização e subdivisão de um domínio do objeto em análise em pequenas partes, denominadas de elementos, conservando mesmas propriedades e características do meio original. Desta forma, é possível que se transforme um problema de alta complexidade na soma de diversos problemas com grau de complexidade menor. Em outras palavras, o sólido em análise é dividido em várias partes menores chamadas de elementos de malha e cada elemento é analisado separadamente, simplificando os cálculos. (SILVA, 2014)

Os elementos finitos pertencem a um conjunto mais amplo denominado de malha, da qual fazem parte os elementos que caracterizam o sistema físico, conectados através de pontos, denominados pontos nodais ou nós. (SILVA, 2014)

Como exemplo, a competição SAE Baja que ocorre em São Paulo, reúne diversas universidades do país para exibição de projetos e protótipos para uma competição, e para que esse tipo de encontro seja viável, toda validação da eficácia, segurança e desempenho de suas estruturas é simulada virtualmente através do MEF. (LOTTERMANN, 2014; PEREIRA, 2016)

A Figura 13 mostra um desses chassis sendo simulados utilizando o MEF pela ferramenta do software *Solidworks*: o *Solidworks Simulation*.

Figura 13 - Simulação utilizando MEF



Fonte: Silva (2014)

### 2.3.2 SolidWorks Simulation

O simulador do *Solidworks* usa o MEF para calcular deslocamentos de componentes e tensões sob cargas internas e externas. Este simulador reconhece a geometria exata durante o processo de formação da malha. Quanto maior a aproximação da malha à geometria do produto, mais corretos serão os resultados dessa análise. A abordagem a fazer, para casos em que a geometria se mantém no regime linear elástico, é utilizando análise de tensão linear.

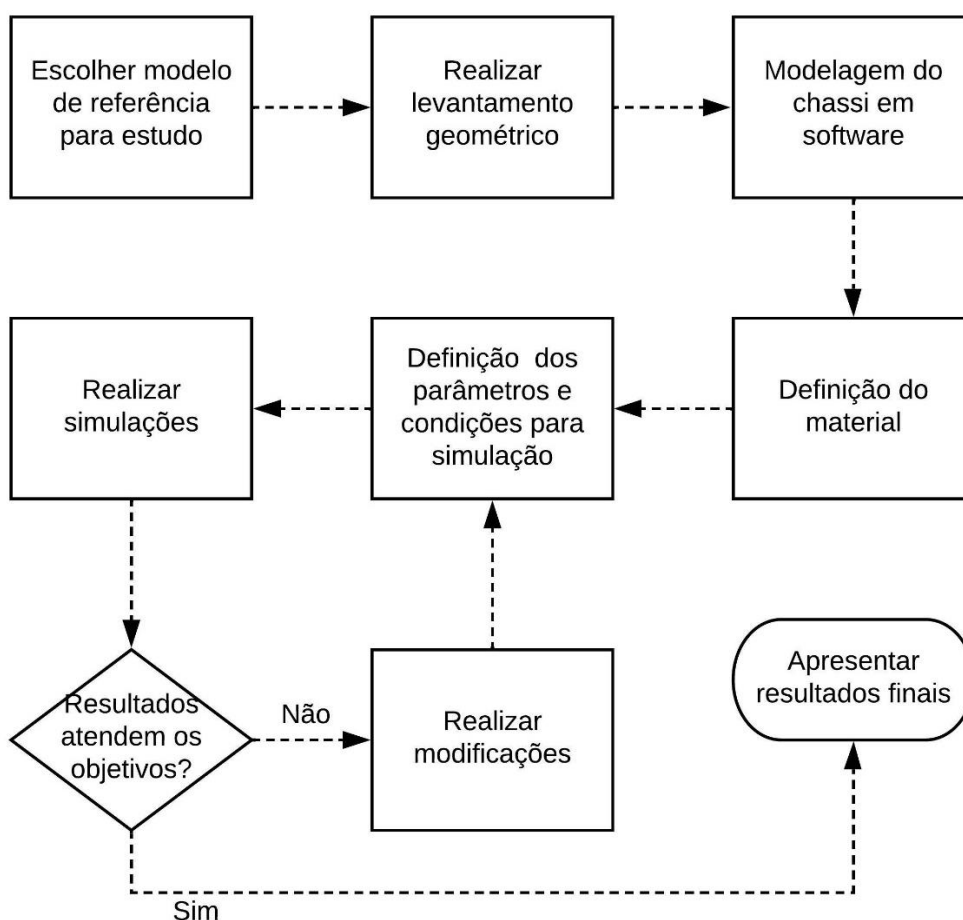
O programa *SolidWorks* tem por base o critério de Von Mises para o cálculo numérico. Este critério é baseado na teoria de Von Mises-Hencky, também conhecida como teoria da energia de corte ou teoria da energia de distorção máxima. De acordo com esta teoria, um material dúctil começa a escoar num local onde a tensão de von Mises iguala o limite de tensão de escoamento. (SILVA, 2014)

### 3 MODELAGEM DO CHASSI E METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

Nesta parte do trabalho é descrito como se deram as escolhas para realização deste estudo, apresentando os motivos de cada escolha. A figura 14 mostra um diagrama do fluxo que foi seguido para modelagem e simulação do chassi. Primeiramente foi escolhido o modelo de referência para o estudo, realizando um levantamento geométrico medido através de fita métrica e paquímetro. Após esta etapa, desenhou-se o chassi em software. O software escolhido para a simulação foi o *Solidworks*, devido já ter-se familiaridade com o software, já que no curso de graduação tem-se até mesmo disciplinas de desenhos com este software.

Modelado o chassi, foi definido o material, parâmetros, e condições para a simulação. Desta forma, após realizada a simulação, foram discutidos os resultados analisando a necessidade de modificações no projeto. Ao final, os resultados das simulações são apresentados, definindo se o chassi está apto para uso ou não.

Figura 14 - Metodologia para simulação do chassi



Fonte: O autor (2022)

### 3.1 Levantamento geométrico

O objeto de estudo deste trabalho tem como referência um chassi que também serve como gaiola de proteção para o piloto, para carro de arrancada, tipo multitubular. Este chassi pertencia a um carro de arrancada, modelo Karmann Ghia, 1965, marca Volkswagen.

Nesta primeira fase, foi necessário tirar as medidas das dimensões do chassi, para ter como base para modelagem em software. Para tirar as medidas, foi utilizado paquímetro e fita métrica, além de fotos do chassi. Na Figura 15 é apresentado o chassi tomado como referência neste estudo. As principais medidas do chassi são:

- Altura: 1 m
- Largura: 1,7 m
- Comprimento: 2,7 m

Figura 15 - Chassi de referência para o estudo



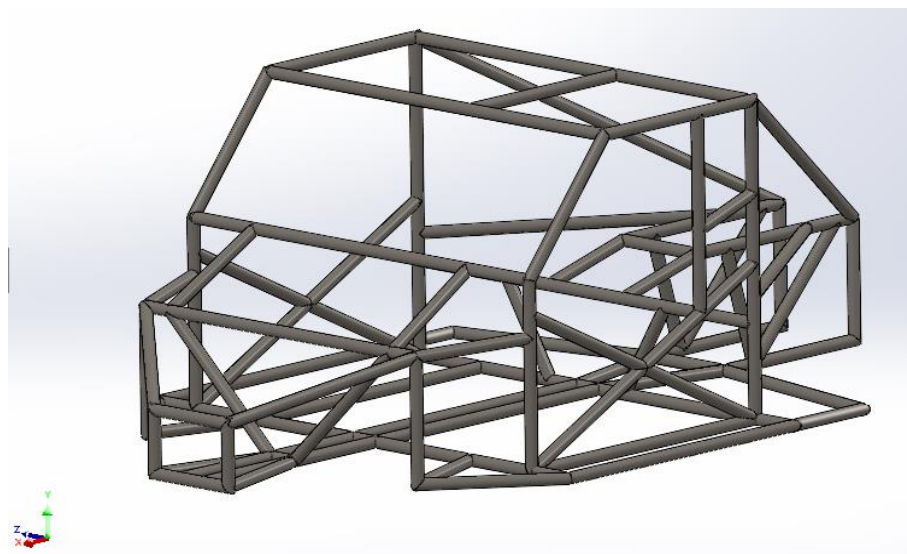
Fonte: O autor (2022)

### 3.2 Modelagem tridimensional em Solidworks

Após seu levantamento dimensional, o chassi foi modelado através do software CAD *Solidworks*. Abaixo, na Figura 16, é apresentado o chassi já modelado em vista isométrica.



Figura 16 - Chassi modelado no Solidworks

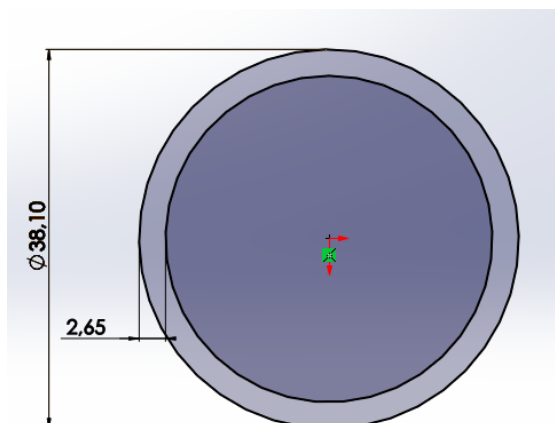


Fonte: O autor (2022)

Nesta modelagem, optou-se por não desenhar suportes e ligações de suspensão e carroceria, por não necessitar destes para as simulações, já que o objeto de estudo se concentra nas propriedades mecânicas do chassi como um todo, e como este deve se comportar à medida que é submetido a esforços previamente definidos.

Para esta primeira análise, decidiu-se utilizar diâmetros e espessuras únicos para os tubos no intuito de verificar em quais partes do chassi ocorrem os maiores esforços que necessitarão de melhorias e/ou ajustes. Estas dimensões têm como referência a média das dimensões dos tubos do próprio chassi físico tido como referência. A maior parte dos tubos tem um diâmetro de 38,10mm e espessura de 2,65mm, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 - Dimensões dos tubos que formam o chassi



Fonte: O autor (2022)

### 3.3 Definição do material

Os fatores mais importantes na escolha do material que será utilizado na fabricação do chassi a serem considerados dependem do propósito do chassi e do custo do material. Desta maneira, podem ser utilizados grandes variedades de ligas de aço, desde ligas de aços de alta qualidade de cromo-molibdênio e cromo-níquel, até aços de baixo carbono, como o aço AISI 1020, utilizado pela grande maioria de construtores e especialistas em carros de corrida (COSTIN; PHIPPS, 1961).

No Brasil, ligas de aço de maior qualidade tendem a ter preços consideravelmente mais altos. Sendo assim, esse também é um fator a se considerar ao decidir qual material deve-se utilizar como objeto desse estudo.

Em veículos de categorias amadoras utiliza-se o aço 1020 para construção da maioria das gaiolas de proteção de carros automotivos. Sendo assim a escolha do material para a simulação do chassi foi baseada na facilidade de encontrá-lo à disposição no mercado e seu preço razoavelmente menor que os demais, além de ser o material mais utilizado para esse tipo de aplicação conforme exposto acima.

Portanto, o material escolhido foi o aço AISI 1020, laminado a frio, por ter um limite de escoamento ligeiramente maior que só o aço AISI 1020. Segue abaixo, na Tabela 1, as propriedades mecânicas do material dadas pelo software *Solidworks*.

Tabela 1 - Propriedades do aço AISI 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>

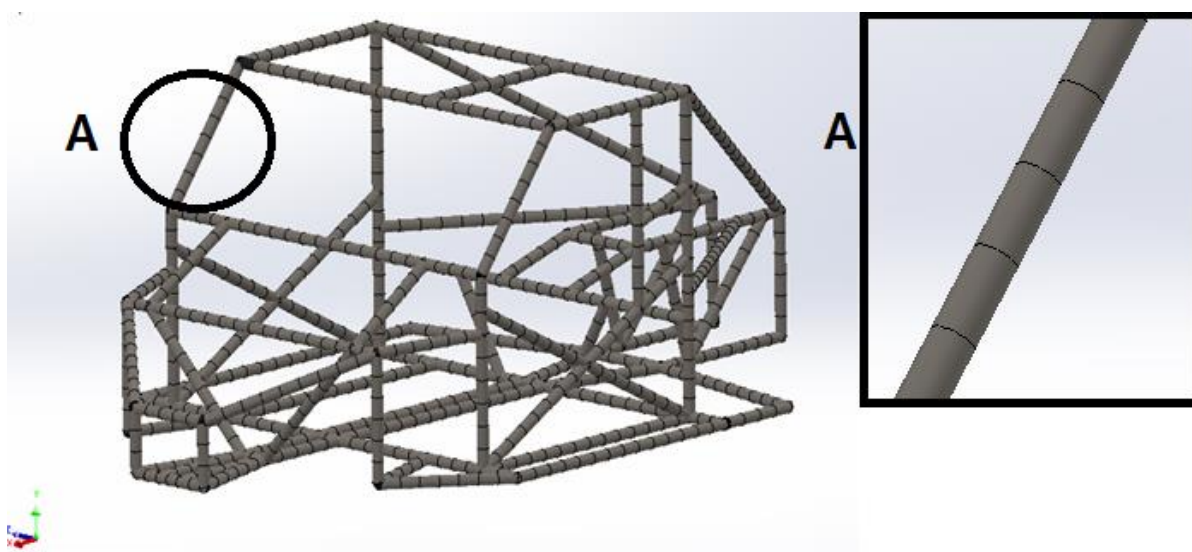
Fonte: Solidworks (2022)

### 3.4 Geração da Malha

Após a definição do material utilizado para a simulação, é necessário gerar a

malha, ou seja, dividir a estrutura em elementos e nós. Tanto a análise numérica do chassi como a modelagem da estrutura resultaram do uso do módulo *Solidworks Simulation*. Dentro deste módulo foi gerada a malha de elementos de viga, conforme mostra a Figura 18. O recorte A mostra numa visão com zoom essa estrutura em elementos.

Figura 18 - Malha de elemento de viga



Fonte: O autor (2022)

Neste caso, foram considerados elementos de viga de dois nós, onde cada nó possui 6 graus de liberdade (deslocamentos  $x,y,z$  e rotações  $x,y,z$ ). A Tabela 2 apresenta o tipo de malha, o número total de elementos e nós calculados pelo software.

Tabela 2 - Qualidade da malha

Qualidade da malha	
Tipo de malha	Elemento de viga
Nº total de nós	828
Nº total de elementos	801

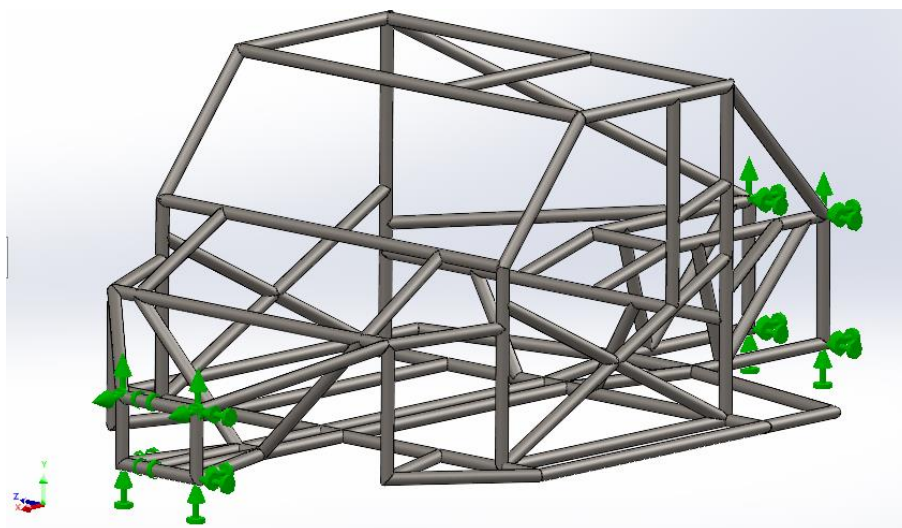
Fonte: Solidworks (2022)

### 3.5 Condições de fronteira para simulação da tensão máxima de flexão

Em primeira análise, buscando utilizar condições mais próximas possíveis do comportamento real do veículo, os pontos de travamento ou condições de fronteira da estrutura foram os pontos onde o chassi é fixado às suspensões e respectivamente

aos eixos das rodas. Desta forma a Figura 19 apresenta as condições de fronteira aplicadas à estrutura para a simulação da tensão máxima de flexão do chassi. As setas verdes representam os pontos de fixação do chassi à suspensão do veículo.

Figura 19 - Condições de fronteira aplicadas ao chassi para simulação da tensão de flexão máxima



Fonte: O autor (2022)

As zonas de ligação das setas verdes às juntas do chassi encontram-se com geometria fixa, ou seja, nestes pontos não são possíveis deslocamentos em qualquer um dos eixos  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , bem como rotação e translação em qualquer um desses eixos, no intuito de simular justamente os pontos em que o chassi é fixado aos eixos do automóvel.

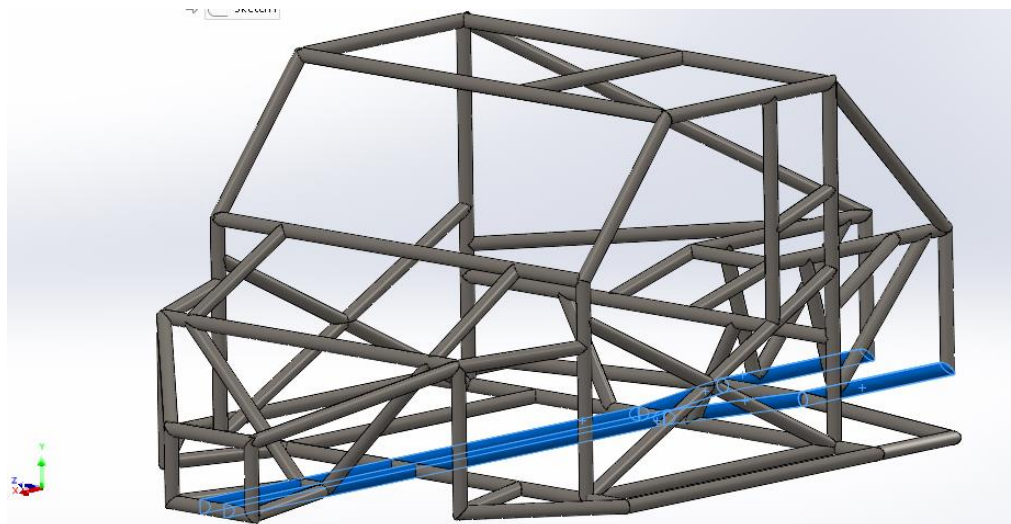
### 3.6 Carga total aplicada

Definidos os pontos de fixação do chassi, a carga utilizada para a simulação da tensão máxima de flexão do chassi foi definida. Este chassi é conectado com a suspensão traseira e dianteira do veículo através das setas verdes mostradas na figura 19. Posto isto, a parte do chassi que ficará diretamente exposta à carga total do veículo serão os tubos que estão conectados diretamente com estes pontos de fixação.

Portanto, nesta simulação, a carga total do veículo foi aplicada e concentrada nos tubos centrais do chassi. A Figura 20, mostra onde os tubos estão localizados, em azul, pois são esses tubos que estão conectados diretamente aos eixos do veículo e

que sustentam todo o peso do veículo bem como seus esforços.

Figura 20 - Concentração da carga no chassi



Fonte: O autor (2022)

Na Tabela 3 está listado o que foi considerado como esforço estático que deve ser suportado pelo chassi, para o cálculo do peso total do automóvel. A Equação 2 apresenta como se calculou a carga total que foi aplicada nesta simulação.

Tabela 3 - Grandezas consideradas para o cálculo do peso do veículo

Número	Grandeza	Unidade de medida
900	Massa do automóvel e do chassi	kg
80	Massa do piloto	kg
9,81	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
9613.8	Peso total do automóvel	N

Fonte: O autor (2022)

A carga total aplicada levando em consideração o peso do carro mais 1 ocupante será de:

Equação 2 - Carga total sobre o chassi

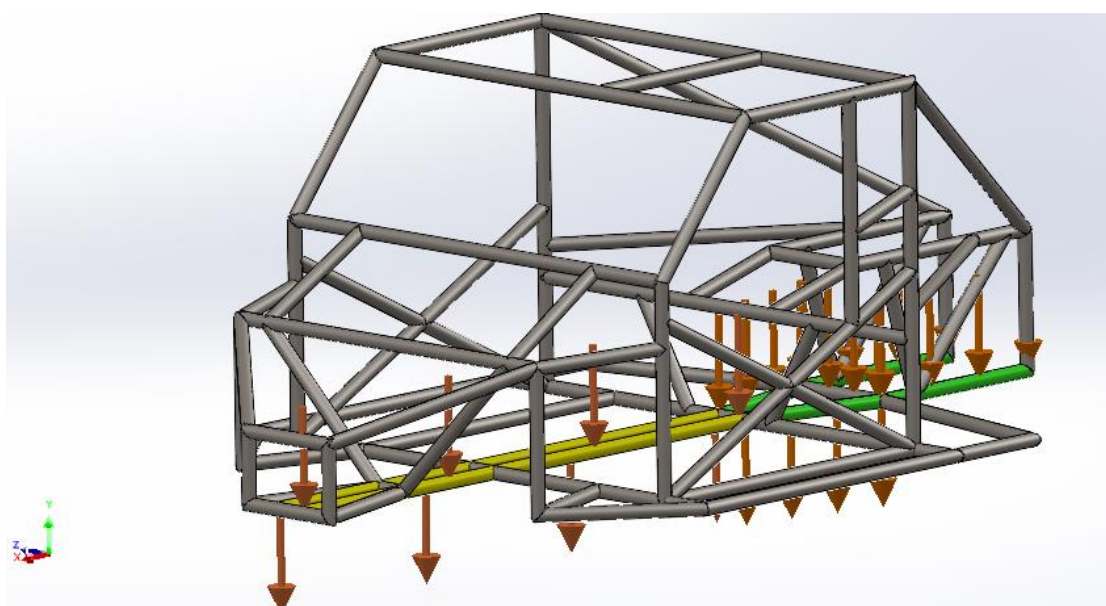
$$P = 900\text{kg} + 80\text{kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9613.8 \text{ N}$$

Fonte: O autor (2022)

### 3.7 Divisão da carga sobre o chassi

Esta carga  $P$  de  $9613.8\text{ N}$  deverá ser dividida entre a parte traseira e a parte dianteira do automóvel levando em consideração que toda parte de motor, caixa de câmbio, que são as partes mais pesadas do veículo, estão posicionadas na parte traseira. Portanto, foi convencionado que essa força  $P$  fosse dividida em duas partes, de forma que, 70% desse peso é aplicada na traseira do chassi (em verde) e o restante na parte dianteira (em amarelo). As flechas em laranja representam o peso total do veículo, como mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Distribuição de carga sobre o chassi



Fonte: O autor (2022)

Sendo assim, a divisão da força  $P$  ficou:

- 70% de  $P = 6729,7\text{ N}$  → Parte verde (conectada a suspensão traseira);
- 30% de  $P = 2884,1\text{ N}$  → Parte amarela (conectada a suspensão dianteira);

### 3.8 Rigidez torcional

A última análise estática visa encontrar o valor da rigidez torcional do chassi. A torção longitudinal é resultado da aplicação de carregamentos nas extremidades dos eixos do veículo, podendo este ser considerado uma mola torcional que atua entre os eixos do veículo. (BURBA, 2015)

Para a análise da rigidez torcional, são fixados os pontos de suspensão traseira, enquanto os pontos de suspensão dianteira são submetidos a cargas iguais

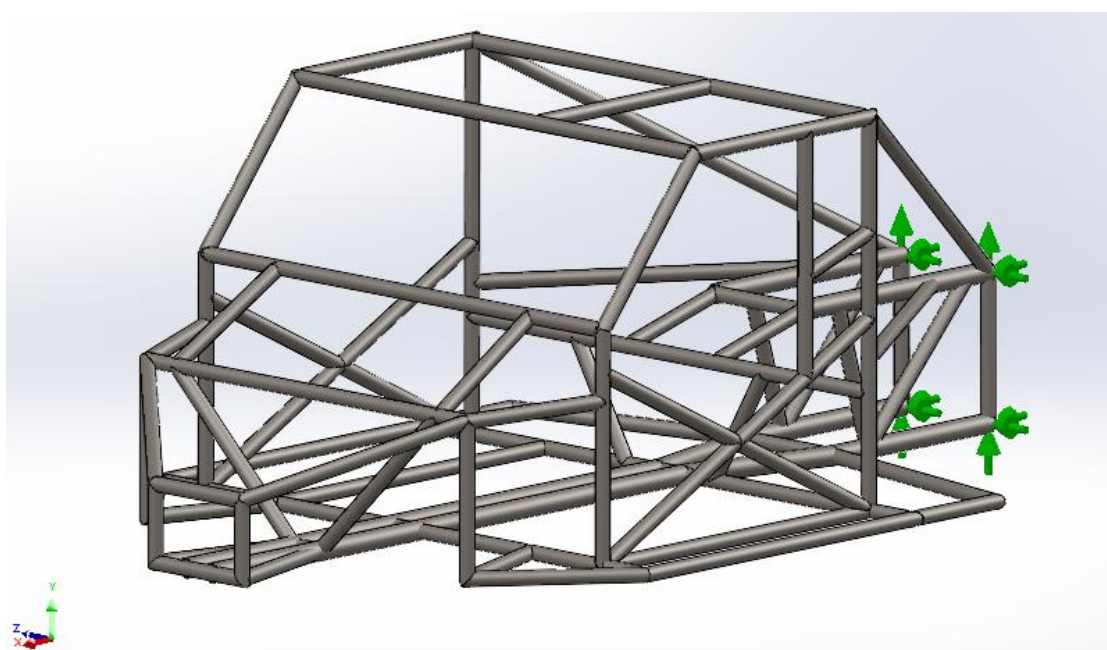
de mesma magnitude, porém em sentido contrário, causando assim um momento torçor na dianteira do chassi. (CAMARGO, 2017)

### 3.8.1 Condições de fronteira para simulação

Utilizando condições mais próximas possíveis do comportamento real do veículo, os pontos de travamento ou condições de fronteira da estrutura foram os pontos onde o chassi é fixado à suspensão traseira e respectivamente ao eixo das rodas traseiras.

Desta forma a Figura 22 apresenta as condições de fronteira aplicadas à estrutura para a simulação de torção do chassi. As setas verdes representam os pontos de fixação do chassi à suspensão do veículo.

Figura 22 - Condições de fronteira para simulação da rigidez torcional



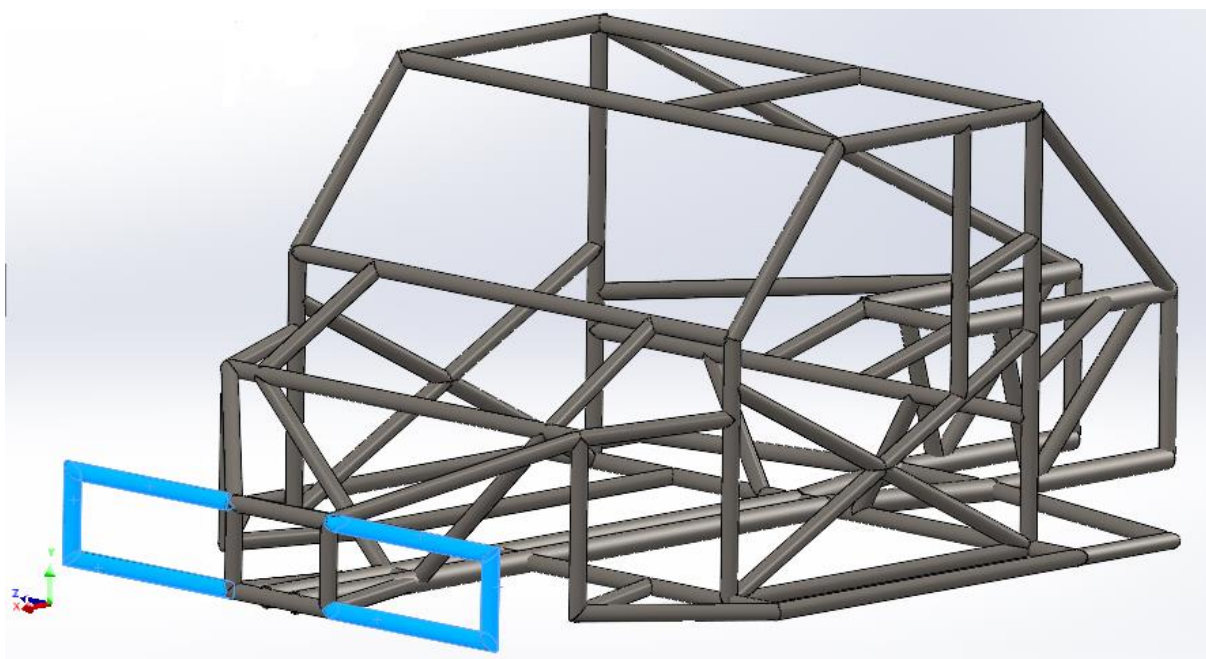
Fonte: O autor (2022)

As zonas de ligação dos triângulos verdes às juntas do chassi encontram-se com geometria imóvel, ou seja, nestes pontos não são possíveis deslocamentos ou translações em qualquer um dos eixos  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , porém é permitido a rotação em qualquer um desses eixos, no intuito de simular uma torção longitudinal ao chassi.

### 3.8.2 Carga aplicada ao chassi

Na parte dianteira do chassi, foi desenhado vigas para representar a bitola do veículo com seu respectivo eixo, onde estão montadas as rodas, que numa situação real é onde se localizam as forças de torção do chassi. A Figura 23 mostra a parte dianteira do chassi com as vigas que representam a bitola dianteira do veículo representada pela cor azul. Bitola, aqui, refere-se a distância entre os pneus do veículo. Para esta primeira simulação, considerou-se para a bitola, uma abordagem estática, já que não foram levados em consideração a suspensão do veículo.

Figura 23 - Eixo dianteiro do chassi



Fonte: O autor (2022)

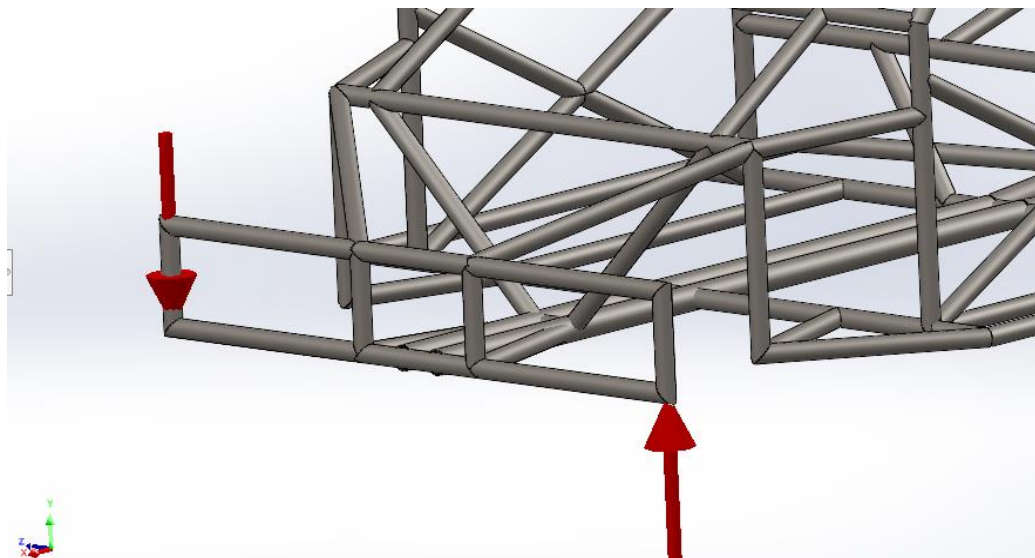
Conforme exposto, foi estipulado que 70% da carga do veículo estaria na parte traseira e o restante na parte dianteira do veículo devido as partes mais pesadas do automóvel incidirem sobre sua traseira. Sendo assim, para a simulação de torção do chassi, a parte traseira estará fixa e a dianteira sofrerá uma carga binária de mesma magnitude e direção oposta igual a metade da carga sobre a dianteira do veículo que é de 2884,1 N.

Em outras palavras, a carga de 2884,1 N aplicada sobre a dianteira do chassi foi dividida em duas. Cada uma dessas forças foi colocada nas extremidades da bitola do chassi, onde estariam conectadas as rodas. Essas forças têm sentido oposto uma à outra conforme mostra a Figura 24, para simular justamente a torção do chassi. As



cargas são representadas pelas setas vermelhas mostrando a direção de aplicação da força.

Figura 24 - Distribuição das forças para simulação da flexão torcional



Fonte: O autor (2022)

Cada força exercida sobre a dianteira do chassi foi de 1442 N conforme mostra a Equação 3:

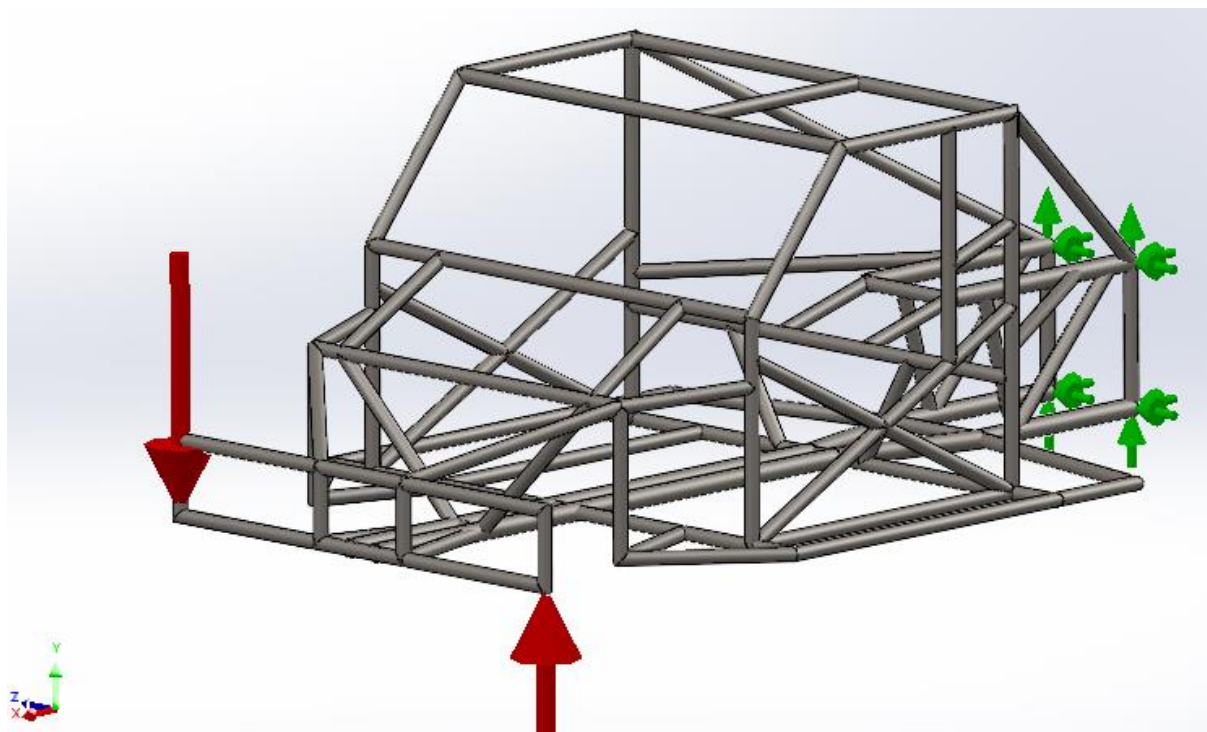
Equação 3

$$2884 \text{ N} / 2 = 1442 \text{ N}$$

Fonte: O autor (2022)

Por conseguinte, a Figura 25 mostra as condições de fronteira e as forças aplicadas sobre o chassi, dando uma noção geral de como ficaram as condições utilizadas para simulação da torção do chassi.

Figura 25 - Distribuição das forças e condição de fronteira para simulação da flexão torcional do chassi



Fonte: O autor (2022)

### 3.8.3 Geração da malha

A Tabela 4 apresenta o tipo de malha, o número total de elementos e nós calculados pelo software. Foram considerados elementos de viga de dois nós, onde cada nó possui 6 graus de liberdade (deslocamentos x,y,z e rotações x,y,z).

Tabela 4 – Qualidade da malha para simulação da flexão torcional

Qualidade da malha	
Tipo de malha	Elemento de viga
Nº total de nós	842
Nº total de elementos	813

Fonte: O autor (2022)

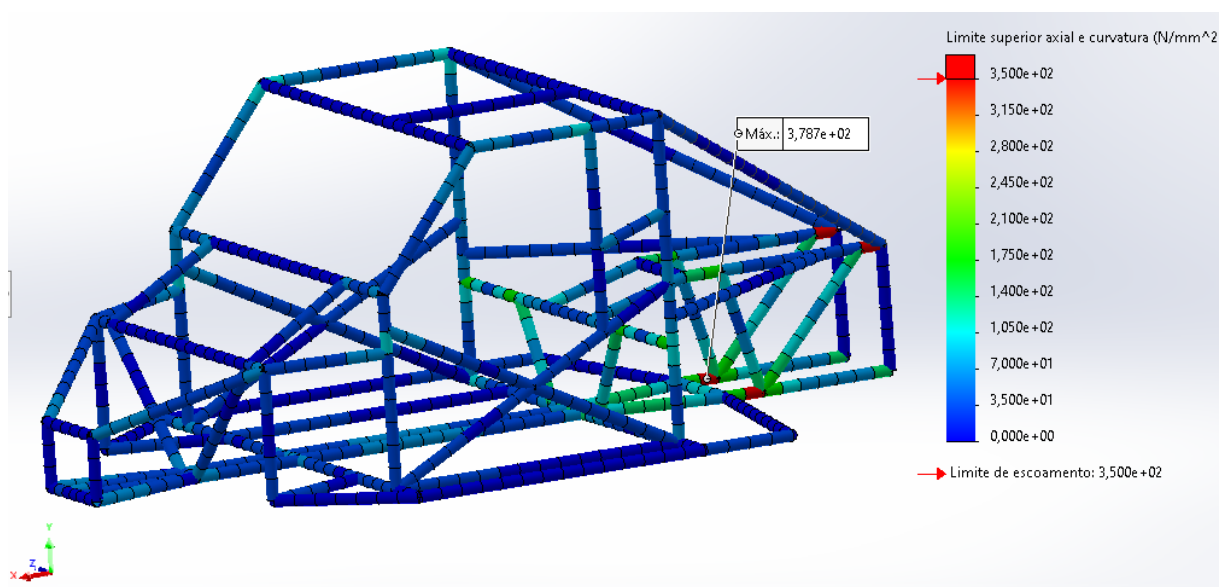
## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo mostra os resultados obtidos a partir dos parâmetros determinados na seção anterior e traz uma análise de qual sua consequência para o seguimento do projeto e quais modificações venham a ser necessárias.

### 4.1 Simulação da tensão máxima de flexão

Primeiramente foi realizada a simulação da tensão máxima de flexão do chassi através do *Solidworks Simulation* e a Figura 26 apresenta o primeiro resultado. Esta figura mostra, em uma escala de cores, as tensões exercidas através de todo o chassi, mostrando também a localização do ponto que ocorreu a maior tensão sobre o chassi. Ao lado direito da figura, é apresentada a legenda de cores indicando os valores das tensões na unidade de N/mm<sup>2</sup> (MegaPascal). A flecha vermelha indica a tensão de limite para o escoamento do material.

Figura 26 – Tensões de flexão resultantes



Fonte: O autor (2022)

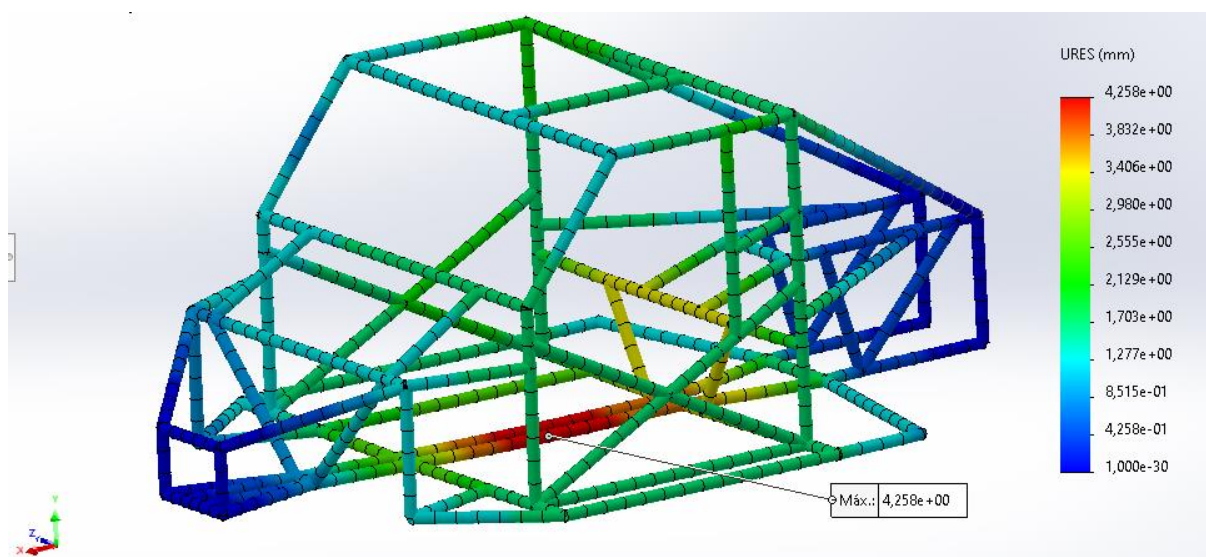
Pode-se observar que nos pontos onde a tensão ultrapassou o limite de escoamento do material de 350 MPa, em vermelho, haveria deformação plástica do material. Também mostra que o ponto de maior tensão atingido nesta simulação foi de 378,7 Mpa.

Esta região é onde estarão fixos o motor juntamente com a caixa de câmbio, sendo esse o motivo de maiores tensões ocorrerem nesta região.

## 4.2 Deslocamento máximo no chassi

Outra simulação realizada, é a simulação dos deslocamentos que a carga aplicada gerou por todo o chassi. Através de um sistema de cores a Figura 27 apresenta os deslocamentos resultantes em todo chassi. No lado direito da figura é apresentado, em milímetros, os valores dos deslocamentos obtidos na simulação. A Figura 27 aponta também o deslocamento máximo ocorrido no chassi.

Figura 27 - Resultado dos deslocamentos pelo chassi



Fonte: O autor (2021)

O deslocamento máximo ocorre nos tubos centrais do chassi e esse deslocamento é de 4,25 mm. A média de deslocamento por todo chassi fica em torno dos 2,5 mm.

## 4.3 Análise dos resultados e propostas de melhoria

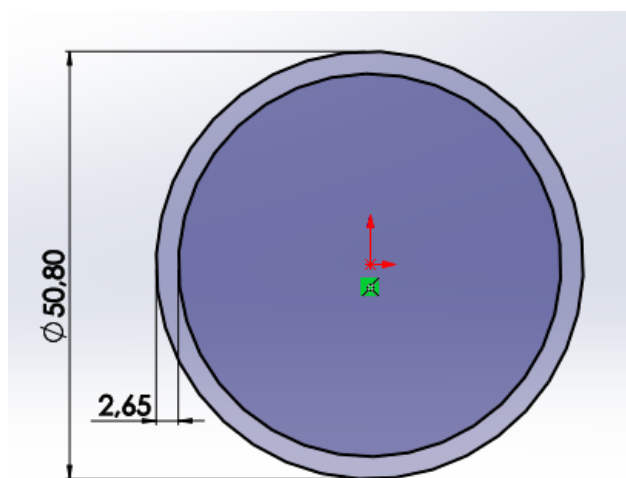
Estas simulações mostram que as regiões mais afetadas pelos esforços no chassi, são os tubos centrais e traseiros. A parte mais crítica do projeto é a parte do chassi que suportará a suspensão traseira do veículo. Este resultado faz sentido já que é justamente a suspensão traseira que suporta as partes mais pesadas do veículo

como motor e caixa de câmbio.

#### 4.3.1 Propostas de melhoria

Por conseguinte, optou-se por realizar uma modificação no diâmetro desses tubos centrais, aumentando-os de diâmetro de 38,10mm para 50,80mm. A espessura do tubo permanecerá a mesma de 2,65mm. A Figura 28 apresenta as novas dimensões desses tubos em milímetros.

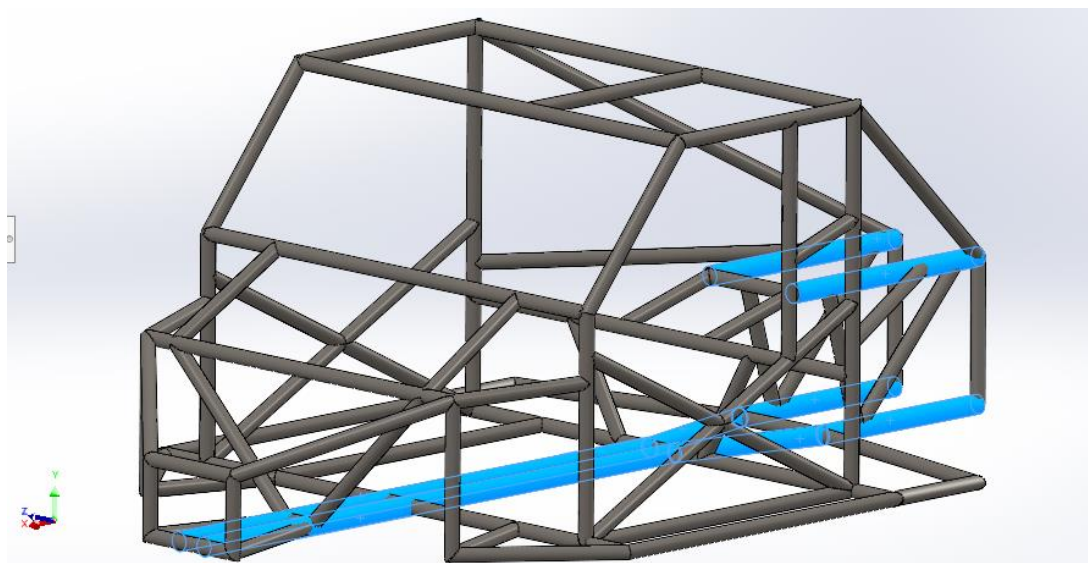
Figura 28 - Dimensões dos tubos centrais



Fonte: O autor (2022)

Além dos tubos centrais do chassi, os tubos que chegaram a um valor acima de 80% da tensão de escoamento do material no ensaio de tensão de flexão máxima, tiveram seus diâmetros modificados, todos com as mesmas dimensões mostradas na Figura 28. A Figura 29 mostra todos os tubos que foram modificados com as novas dimensões em cor azul.

Figura 29 - Tubos com novas dimensões



Fonte: O autor (2022)

Esta proposta de melhoria tem como objetivo reduzir a tensão sobre esses tubos para abaixo de 80% da tensão limite de escoamento do material bem como reduzir os deslocamentos destes tubos, trazendo maior rigidez a esta parte do chassi.

Desta forma, foi realizado o ensaio de flexão novamente, após as modificações. As cargas aplicadas foram as mesmas bem como a direção e o local de aplicação dessas cargas.

#### 4.3.2 Geração da malha

A Tabela 5 mostra os dados relevantes sobre a qualidade da malha gerada após as modificações relatadas. Em comparação com a geração da malha anterior, houve uma diminuição tanto no número de nós quanto no número total de elementos devido ao aumento do diâmetro dos tubos centrais do chassi que implicou numa diminuição do número de elementos da malha.

Tabela 5 - Qualidade da malha

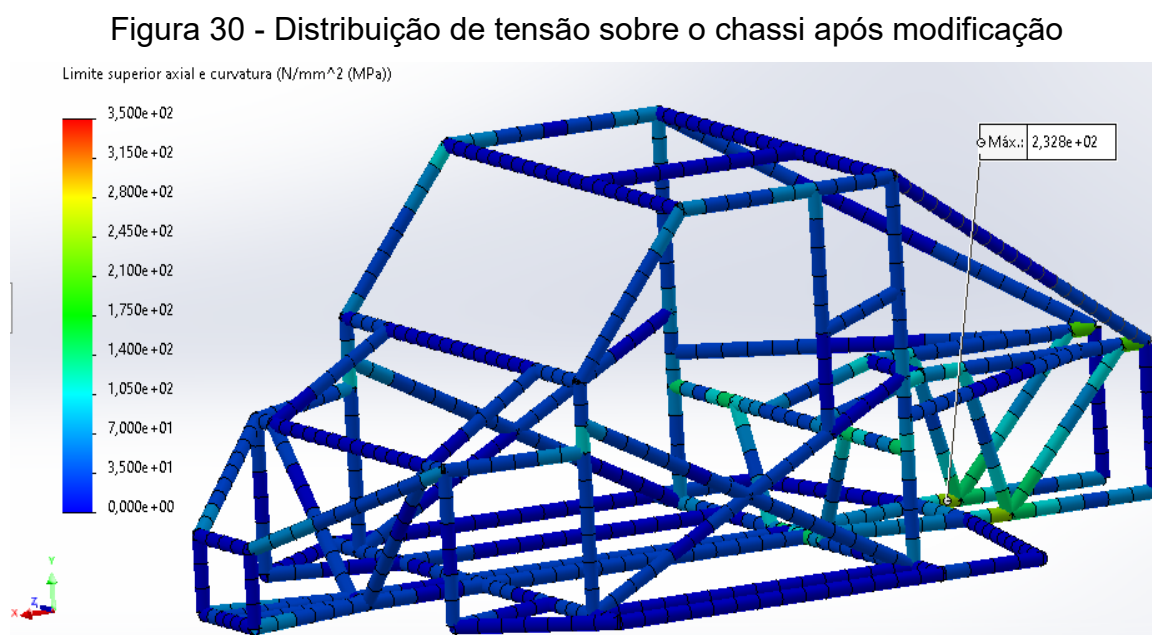
Qualidade da malha	
Tipo de malha	Elemento de viga
Nº total de nós	809
Nº total de elementos	784

Fonte: O autor (2022)

Novamente foram considerados elementos de viga de dois nós, onde cada nó possui 6 graus de liberdade (deslocamentos x,y,z e rotações x,y,z).

#### 4.4 Simulação da tensão máxima de flexão após proposta de melhoria

O resultado da simulação da tensão máxima de flexão após as propostas de melhoria do chassi apresenta-se na Figura 30. Esta mostra, em uma escala de cores, as tensões de deformação através de todo o chassi. Pode-se observar, que após as modificações nos diâmetros dos tubos, houve uma redução da tensão abaixo de 80% do valor de escoamento do material, que é de 350 Mpa. Também mostra que a tensão de flexão máxima atingida foi de 232,8 Mpa.

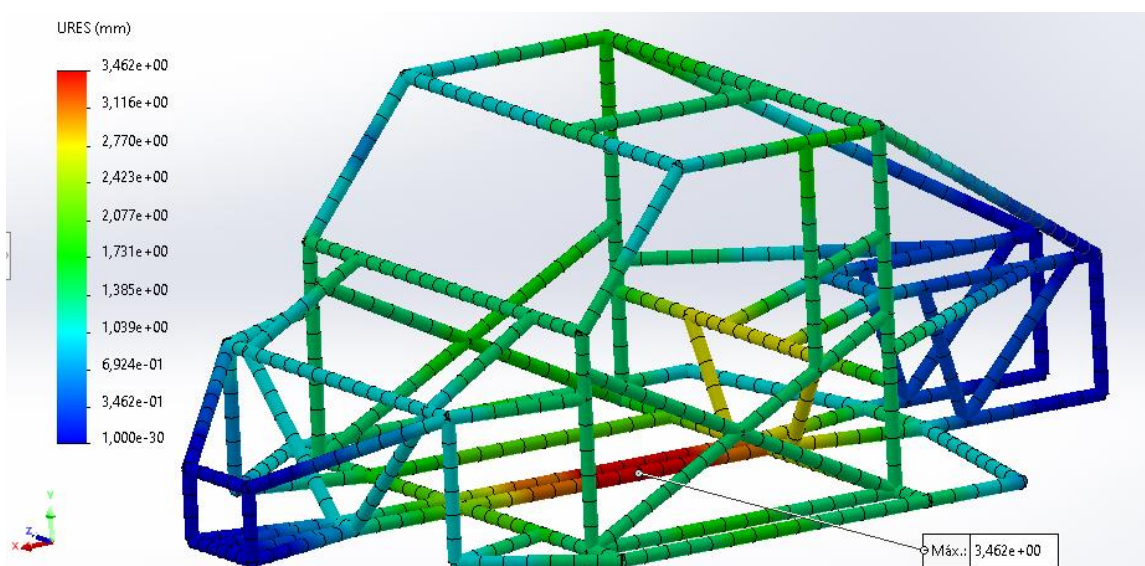


Com esta modificação nos diâmetros dos tubos, houve uma diminuição de 37,6% na tensão de flexão máxima exercida sobre o chassi, que caiu de 378 Mpa para 238 Mpa, deixando esse valor bem abaixo do limite de escoamento do material que é de 350 Mpa. Com esse novo diâmetro dos tubos centrais do chassi, houve um aumento do peso do chassi pouco significativo que foi desconsiderado nos cálculos posteriores.

#### 4.5 Deslocamento máximo no chassi após proposta de melhoria

A Figura 31 mostra o novo ensaio de deslocamento do chassi após a proposta de melhoria de aumentar os diâmetros dos tubos centrais e traseiros do chassi. A legenda ao lado esquerdo da figura mostra os deslocamentos obtidos por todo o chassi através da simulação. A média de deslocamento ficou em torno de 1,8 mm. Já o deslocamento máximo foi de 3,46 mm, uma redução de 18,5% em relação à simulação anterior.

Figura 31 - Distribuição dos deslocamentos sobre o chassi após as modificações



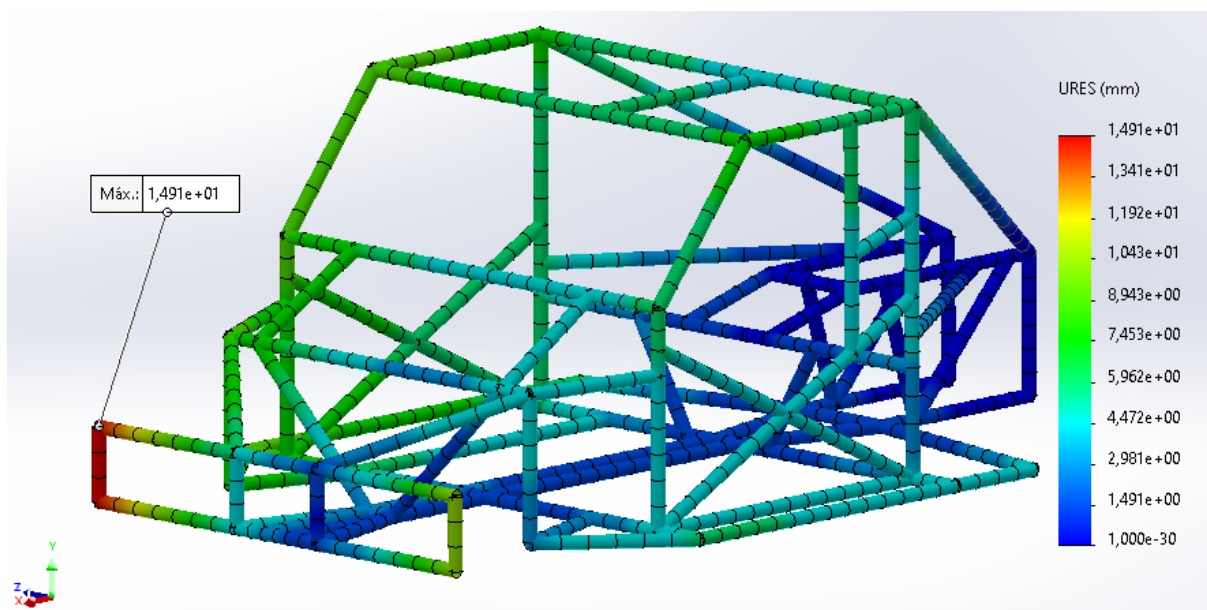
Fonte: O autor (2022)

#### 4.6 Rigidez torcional

A Figura 32 traz os deslocamentos que se deram após a aplicação da torção ao chassi. Os maiores deslocamentos ocorreram na parte dianteira esquerda do chassi onde foi aplicada a força de 1442 N com sentido para baixo. Seu deslocamento máximo foi de 14,91 mm. Após esta simulação, foi percebido que a direção da força exerce papel fundamental no deslocamento devido a geometria desse chassi em específico, já que no lado onde a força foi aplicada em sentido para cima houve menos deslocamento indicando maior rigidez do chassi em comparação com forças aplicadas para baixo.



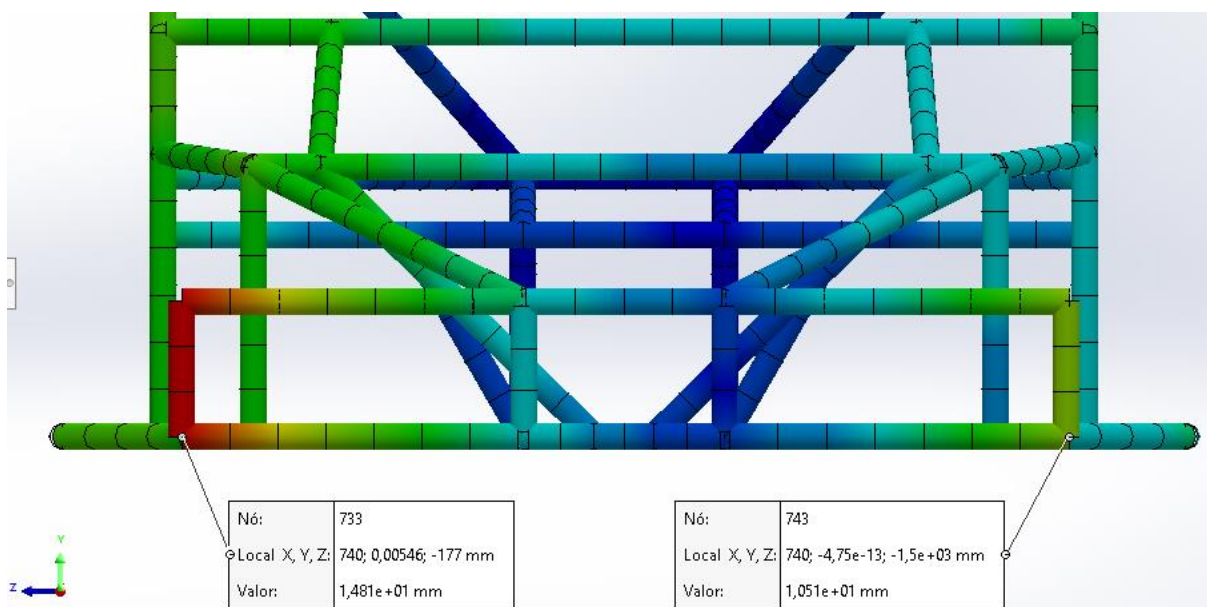
Figura 32 - Distribuição dos deslocamentos no chassi



Fonte: O autor (2022)

Para calcular a rigidez torcional do chassi é necessário verificar qual o deslocamento nas regiões onde foram aplicadas as forças de torção. Desse modo, a Figura 33 mostra que os deslocamentos foram de  $\Delta y_1 = 14,81$  mm e  $\Delta y_2 = 10,51$  mm.

Figura 33 - Deslocamentos nas regiões de aplicação das forças



Fonte: O autor (2022)

Aplicando a fórmula de Riley e George (2002), tem-se:

Equação 4

$$K = \frac{T}{\alpha}$$

$$K = \frac{1442N * 0,658m}{\tan^{-1} \left[ \frac{(0,01481m + 0,01051m)}{2 * 0,658m} \right]}$$

$$K = 860,8 Nm/graú$$

Fonte: O autor (2022)

Sampó (2011) traz uma tabela com os valores típicos de rigidez torcional de diferentes tipos de veículos mostrados na Figura 34. De acordo com essa tabela, a rigidez torcional do chassi do presente estudo se mostra abaixo do que seria ideal para carros de corrida, desqualificando assim este chassi para uso em veículos desse tipo.

Figura 34 - Rigidez torcional de diferentes veículos

Veículo	Rigidez torcional do chassi [Nm/deg]
Fórmula SAE	300 - 3000
Carro de Passeio	5000 - 25000
Stock car	15000 - 30000
Carros para competição	5000 - 50000
Fórmula 1	5000 - 10000

Fonte: Sampó (2011). Adaptado.

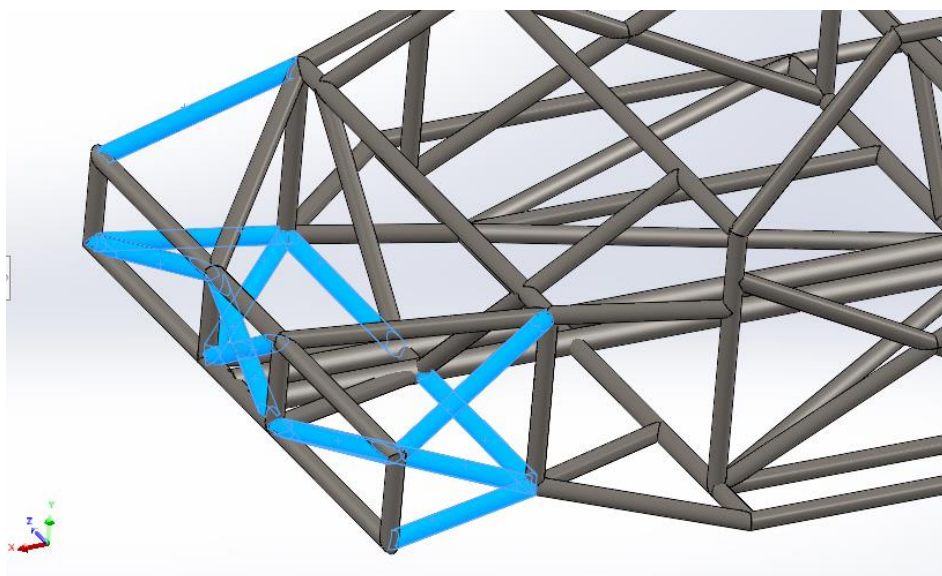
Portanto, a seguir foi proposto a adição de algumas vigas para auxiliar na rigidez do chassi.

#### 4.6.1 Proposta de melhoria para aumentar a rigidez torcional do chassi

Conforme descrito no capítulo 2.2.3 sobre chassi tubulares, para obter uma

rigidez maior sobre estruturas tubulares e vigas, uma das opções é triangular as estruturas para diminuir os momentos torçores aplicados. Dessa forma, foram adicionadas vigas em espaços que não estavam triangulados anteriormente ao chassi. A Figura 35, mostra em azul, a localização das vigas adicionadas ao chassi na parte dianteira.

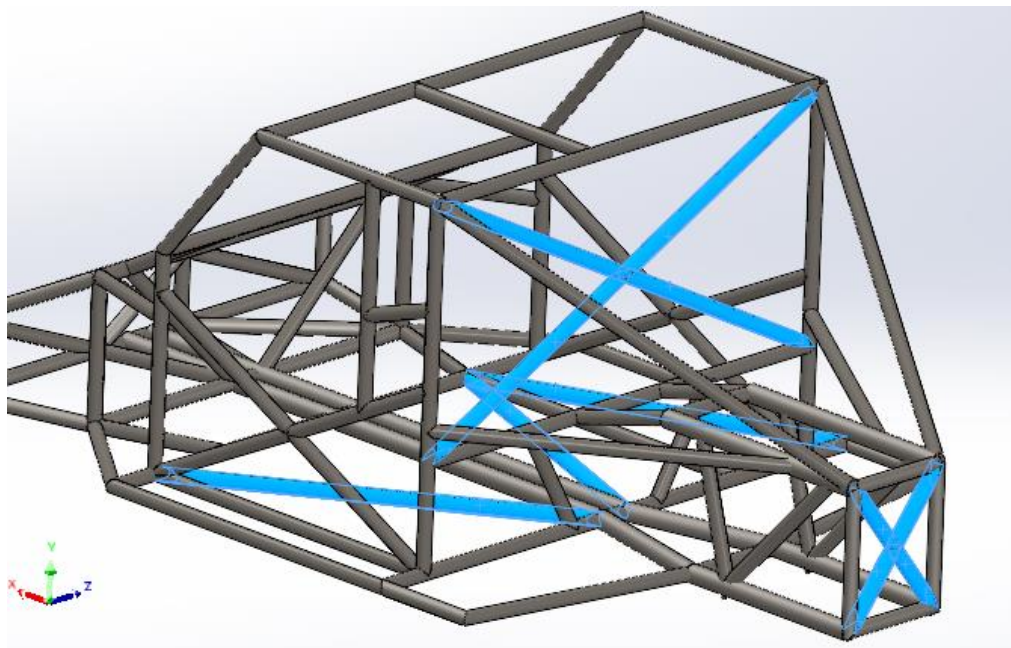
Figura 35 - Localização das vigas adicionadas ao chassi na parte dianteira



Fonte: O autor (2022)

A Figura 36, mostra as demais vigas, em azul, que foram adicionadas a parte do assoalho do chassi e a parte traseira no intuito de aumentar a rigidez torcional do chassi.

Figura 36 - Localização das vigas adicionadas ao chassi no assoalho e traseira



Fonte: O autor (2022)

Após a adição das vigas, a massa do chassi aumentou em 35 kg. Esta massa foi adicionada no cálculo do peso total do veículo para recalculer o novo binário de forças utilizado para o novo cálculo da rigidez torcional do chassi.

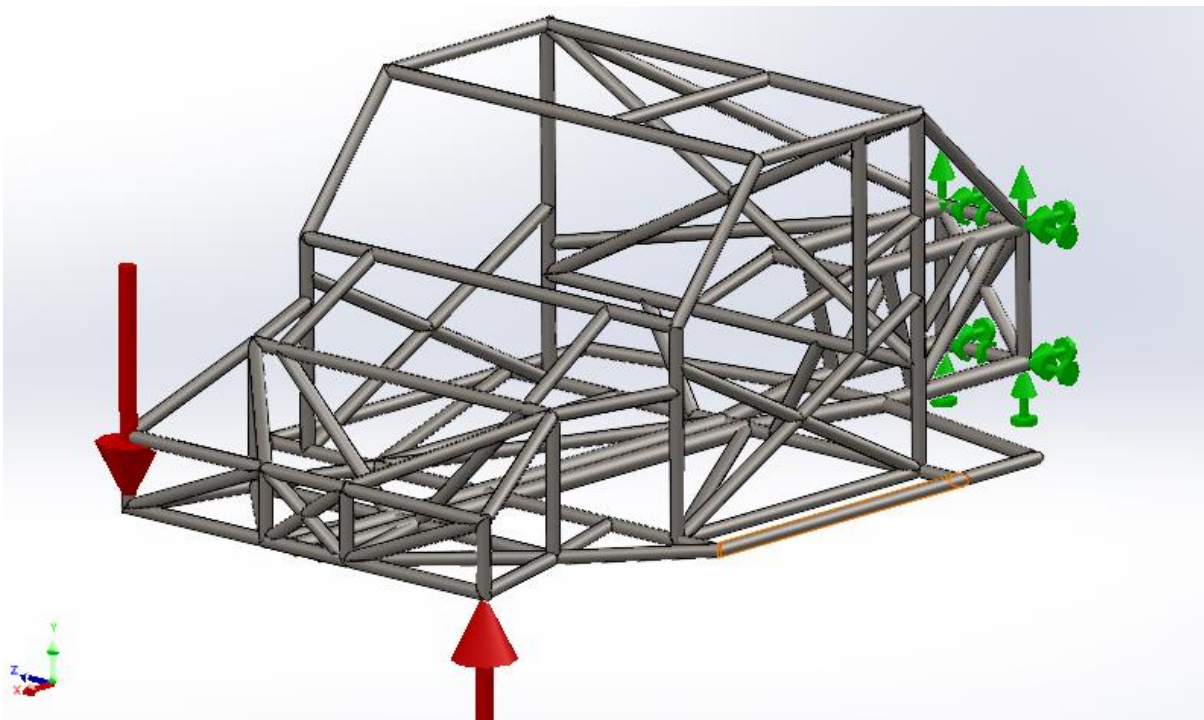
O peso total do automóvel antes da adição das novas vigas era de 9613,8 N. As novas vigas adicionaram um peso de 343,3 N. O novo peso total do automóvel é de 9957,1 N.

Sobre a parte dianteira do chassi incide 30% do peso total do automóvel.

- 30% do Peso total do automóvel = 2987,1 N

Para aplicação do binário de força sobre a dianteira, os 30% do peso total do automóvel é dividido em dois. Portanto cada força terá o valor de 1493,55 N. A Figura 37 mostra as condições de fronteira e as forças aplicadas sobre o chassi, dando uma noção geral de como ficaram as condições utilizadas para a nova simulação da torção do chassi. As setas verdes representam a traseira do chassi em geometria fixa e as setas vermelhas representam o binário de forças aplicadas sobre a dianteira.

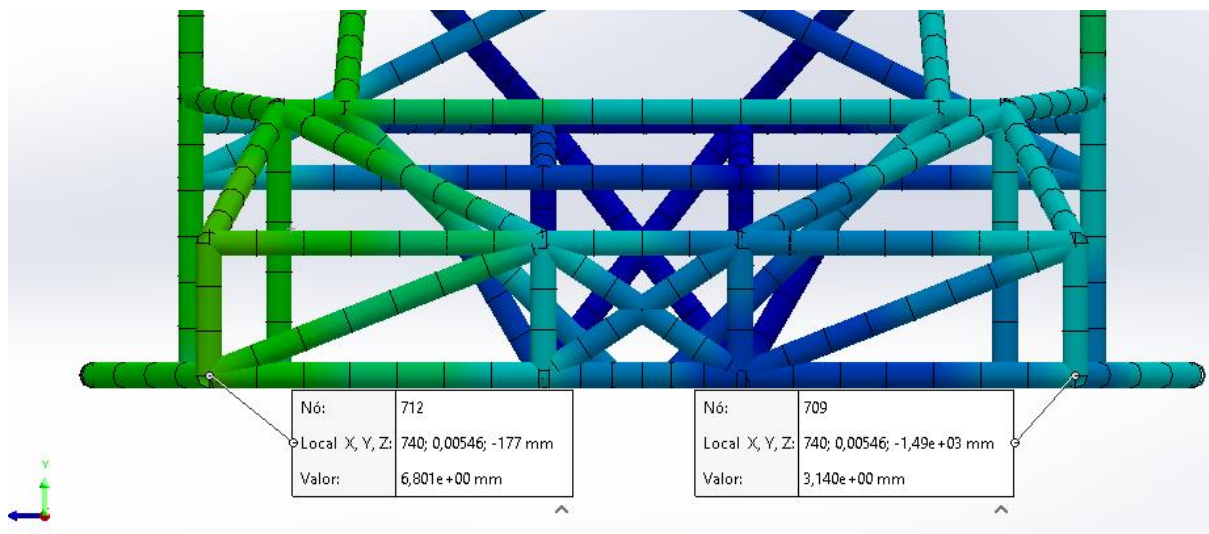
Figura 37 - Condições utilizadas para a nova simulação da torção do chassi



Fonte: O autor (2022)

Desse modo pode-se criar a malha do chassi e realizar a simulação. Para calcular a rigidez torcional do chassi é necessário verificar qual o deslocamento nas regiões onde foram aplicadas as forças de torção. A Figura 38 mostra que os deslocamentos foram de  $\Delta y_1 = 6,801 \text{ mm}$  e  $\Delta y_2 = 3,140 \text{ mm}$ .

Figura 38 - Deslocamentos nas regiões de aplicação das forças



Fonte: O autor (2022)

Aplicando a fórmula de Riley e George (2002), tem-se:

Equação 5

$$K = \frac{T}{\alpha}$$

$$K = \frac{1493,55N * 0,658m}{\tan^{-1} \left[ \frac{(0,006801m + 0,003140m)}{2 * 0,658m} \right]}$$

$$K = 2270,6 Nm/grau$$

Fonte: O autor (2022)

A rigidez torcional do chassi com as novas modificações aumentaram em aproximadamente 164%. Ainda assim a rigidez torcional do chassi está abaixo do que deveria ser para um carro de corrida, segundo a tabela de Sampó (2011) apresentada na Figura 34.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentada uma síntese do que é um chassi e seus principais tipos. Além disso, dentre suas propriedades, analisou-se aquelas de maior importância para um bom desempenho do chassi: a rigidez à flexão e a rigidez à torção. Desse modo, abordou-se os modelos teóricos utilizados para o cálculo dessas propriedades. Por conseguinte, foi escolhido um modelo de chassi, multitubular, de um carro de corrida, para modelar e simular computacionalmente através de um software CAD: O *Solidworks*. O material escolhido para a simulação foi o mais comum para esse tipo de aplicação, que é o aço AISI 1020.

Conceitos relativos à simulação computacional de um chassi foram apresentados, e primeiramente focou-se na rigidez à flexão do chassi. Para isso, foram apresentados os resultados obtidos para tensão máxima e deslocamento máximo do chassi com o auxílio da ferramenta *Solidworks Simulation*. Os primeiros resultados apresentados de tensão máxima e deslocamento máximo foram de 378,7 Mpa e 4,25 mm, respectivamente, e que estes se concentravam nos tubos centrais e traseiros do chassi. A tensão máxima atingida ultrapassou a tensão de escoamento do material de 350 Mpa.

Desse modo, o projeto foi modificado aumentando o diâmetro dos tubos em que estavam concentradas as tensões máximas. Após as modificações, os resultados apresentados de tensão máxima e deslocamento máximo foram de 232,8 Mpa e 3,66 mm, respectivamente. Resultados estes satisfatórios já que, após as modificações nos diâmetros dos tubos centrais, a tensão máxima sobre o chassi diminuiu em 38,5%, e ficou bem abaixo da tensão de escoamento do material.

Posto isto, foi apresentado o resultado do cálculo da rigidez torcional do chassi. Para isso, foi utilizado um cálculo analítico apresentado por Riley e George (2002). O primeiro resultado de rigidez torcional do chassi foi de 860,8 Nm/grau. Sampò (2011) apresenta em sua tese de doutorado uma tabela que define a faixa de rigidez torcional conforme o tipo de veículo e que para veículos de competições a rigidez torcional deveria estar entre 5000 e 50000 Nm/grau, mostrando que o primeiro resultado ficou bem abaixo do aceitável.

Desse modo, foram sugeridas pelo autor algumas alterações no projeto, adicionando novas vigas no intuito de triangular seções do chassi que estivessem sem essas triangulações, fator esse, exposto no presente trabalho, fundamental para

aumentar sua rigidez. Após as modificações e nova simulação, a rigidez torcional máxima conseguida foi de 2270,6 Nm/grau. Um aumento de aproximadamente 164% na sua rigidez torcional, mas que ainda assim ficou abaixo do proposto por Sampò (2011).

Logo após todas estas modificações, foi realizada uma última simulação, para verificar qual o valor da tensão máxima de flexão vertical após a adição de todas estas vigas. A tensão máxima de flexão vertical ficou em 189,9 Mpa, ainda no mesmo ponto da simulação anterior. Já o deslocamento máximo foi de 3,125 mm. Uma redução significativa da tensão e do deslocamento.

Sendo assim, conclui-se que o modelo analisado, em relação a rigidez à flexão, se provou rígido o suficiente. Já para a rigidez a torção, o valor ficou abaixo do aceitável para este tipo de veículos, tornando-o inapto para competições.



## REFERÊNCIAS

- BURBA, Leandro de Toledo. **Análise da rigidez torcional do chassi de um veículo fórmula SAE**. 2015. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- CAMARGO, Pedro de Souza. **Projeto de chassi tubular para veículo de alta performance**. 2017. 125 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- COSTIN, Michael; PHIPPS, David. **Racing and sports car chassis design**. Londres: B. T. Batsford Ltd, 1961. 91 p.
- HAPPIAN-SMITH, Julian. **An Introduction to Modern Vehicle Design**. Woburn: Butterworth Heinemann, 2002. 600 f.
- HERB, Adams. **Chassis engineering: chassis design building & tuning for high performance handling**. Nova York: Hpbooks, 1993. 142 p.
- LOPES, Pedro Samuel de Brito. **Análise estrutural do Chassi de uma viatura Fórmula Livre FIA**. 2014. 120 f. TCC (Graduação) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2014.
- LOTTERMANN, João Pedro Taborda. **Projeto estrutural de chassi tipo gaiola para veículos minibaja: análise numérica e experimental**. 2014. 97 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- OLIVEIRA, Fernando César Gama de. **Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurísticos de otimização numérica**. 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- PEREIRA, Cledizan Núcio. **Análise estrutural estática por elementos finitos de um chassi veicular tipo spaceframe**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Regional Catalão, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2016.
- RILEY, William B.; GEORGE, Albert R.. **Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis**. In: SAE MOTORSPORTS ENGINEERING CONFERENCE AND EXHIBITION, 1., 2002, Indianapolis. **Proceedings [...]** . Indianapolis: Sae Technical Paper Series, 2002. p. 1-19.
- SAMPÒ, Enrico. **Modeling chassis flexibility in vehicle dynamics simulation**. 2011. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Engenharia e Ciências Físicas, Universidade de Surrey, Guildford, 2011.
- SOUZA, Leandro Rodrigues da Silva. **Desenvolvimento de estrutura veicular do tipo spaceframe construída com tubos de PVC**. 2015. 124 f. Dissertação

(Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Gestão Organizacional (Profissional), Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2015

SILVA, Francisco José Neves e. **Projeto de melhoria de um chassi tubular para um veículo de competição Single Seater**. 2014. 49 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2014.