

João Victor Costa  
Marcelo Henrique Araujo  
Mariana Ribeiro Lopes  
Maxwell Jonathan Azevedo Santos  
Vinicius Silva Nunes

## **Trabalho Acadêmico Integrador V**

# **Análise estrutural de chassi para um Mini Veículo *Off-road* pelo método de elementos finitos**

Arcos, MG

5 de julho de 2019

João Victor Costa  
Marcelo Henrique Araujo  
Mariana Ribeiro Lopes  
Maxwell Jonathan Azevedo Santos  
Vinicius Silva Nunes

## **Trabalho Acadêmico Integrador V**

### **Análise estrutural de chassi para um Mini Veículo *Off-road* pelo método de elementos finitos**

Projeto apresentado à disciplina de TAI-  
Trabalho Acadêmico Integrador do curso de  
Engenharia Mecânica ministrado no Instituto  
Federal de Minas Gerais, Campus Arcos

Instituto Federal de Minas Gerais  
Campus Avançado Arcos  
Bacharelado em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio

Arcos, MG  
5 de julho de 2019

# RESUMO

O chassi é considerado o principal membro de um automóvel, no qual todos os demais se encontram acoplados. O mesmo deve ser projetado, sobretudo a fim de resistir aos esforços internos e externos. O projeto tem a finalidade de dimensionar e construir um protótipo em escala real de um chassi para um mini veículo *off-road*, no qual o desenvolvimento se dará por uma análise estrutural, levando em consideração os tipos de obstáculos impostos pela competição BAJA SAE. Para tal análise será empregado o método dos elementos finitos, no qual será possível obter resultados e considerações para o dimensionamento inicial do projeto.

**Palavras-chave:** Chassi, BAJA SAE, *off-road*.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Esquema estrutural de um automóvel . . . . .	7
2	Chassi Tipo Escada . . . . .	8
3	Chassi Tipo monobloco . . . . .	8
4	Chassi tipo <i>ceframe</i> . . . . .	9
5	Exemplificação de malha . . . . .	10
6	Primeiro modelo tridimensional . . . . .	12
7	Modelo otimizado . . . . .	13
8	Espessura em função do raio . . . . .	15
9	Massa em função do raio . . . . .	16
10	Deformação direcional máxima . . . . .	18
11	Ponto crítico da estrutura . . . . .	19
12	Reações Estáticas . . . . .	20
13	Tensões causadas pelo momento torsor . . . . .	21
14	Deformação causada por momento torsor . . . . .	21
15	Deformação causada por um impacto frontal . . . . .	22

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>5</b>
1.1	Justificativa	5
1.2	Objetivos gerais	6
1.3	Objetivos Específicos	6
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>7</b>
2.1	Revisão bibliográfica	7
2.1.1	Tipos de chassi	7
2.2	Propriedades mecânicas do chassi	9
2.3	Análise de elementos finitos	9
2.3.1	Estudo da malha	10
2.3.2	Análise modal	11
2.3.3	Análise estática	11
2.3.4	Análise dinâmica	11
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>12</b>
3.1	Método	12
3.2	Dimensionamento dos tubos	13
3.3	Convergência da malha	17
3.4	Deformação Máxima	17
3.4.1	Deformação direcional	18
3.5	Ponto Crítico	19
3.6	Momento torsor	20
3.7	Impacto Frontal	22
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>24</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>25</b>
	<b>ANEXO A – DESENHO DO CHASSI</b>	<b>27</b>
	<b>ANEXO B – CRONOGRAMA</b>	<b>28</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Desde o início dos tempos o homem tem a necessidade de se deslocar a certas distâncias, pode-se ressaltar que foram utilizados animais para tal tarefa por grande parte da história. Com a primeira revolução industrial, bem como a criação dos primeiros motores a vapor, foram criados novos meios de locomoção, o que mais tarde desencadeou o desenvolvimento da indústria automotiva. Segundo (FURTADO, 2014), o automóvel é uma criação da imaginação e inventividade que vem se desenvolvendo com o passar dos séculos, refletindo assim, uma evolução que ocorreu no mundo inteiro.

O automóvel é composto por vários itens, sendo o chassi principal componente da estrutura, no qual são acoplados todos os outros conjuntos, como a suspensão, motor, transmissão, entre outros. A estrutura do chassi é submetida a cargas internas e externas, as cargas externas são transferidas através das rodas e do solo, descarregando na suspensão através do campo aerodinâmico em torno do corpo do veículo, enquanto as cargas internas são causadas pela massa do veículo, como também a massa dos passageiros, motor e outros componentes (GENTA; MORELLO, 2009).

A indústria automotiva tem grande relevância no cenário mundial e nacional, tendo grandes influências nos meios produtivos, agregando diversos setores, conduzindo o desenvolvimento e o lançamento de novos produtos, processos e materiais no mercado, servindo de referência para outros setores (CARDOSO, 2010). Sendo assim, ao longo dos anos houve a necessidade de novos profissionais na área. Como incentivo aos estudantes de engenharia foi criado o projeto Baja SAE (*Society of Automotive Engineers*).

O Projeto Baja SAE é uma atividade extracurricular proposta pela SAE Brasil aos estudantes de engenharia e física, tendo origem nos Estados Unidos em meados 1976. O projeto trata-se de desenvolver um veículo *off-road*, monoposto, robusto e que atenda às exigências do regulamento, a fim de participar de competições regionais, nacionais e internacionais. Sendo um projeto que desafia os estudantes a aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, impondo ao aluno desafios em um contexto profissional que possivelmente irá encontrar no mercado de trabalho.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Conforme Souza (1990) <sup>1</sup> apud (BOYNARD; ROLIN, 2018), as estruturas veiculares possuem características próprias de acordo com a concepção e utilidade do veículo a ser projetado. Os parâmetros de projeto de um chassi devem estar relacionados através de

---

<sup>1</sup> SOUZA, TEN. CEL. M. A.1990.Chassis: Estudo dos Pneus e Rodas.Instituto Militar de Engenharia.

uma solução de compromisso. O mesmo cita também que não existe o melhor método para se construir um chassi, pois cada veículo apresenta um conjunto de características e diversidades durante sua concepção e uso.

Com uma pesquisa realizada no campus, onde se cogitou a implementação de uma equipe para a competição Baja SAE, obtivemos resultados satisfatórios em entusiasmo dos discentes do campus, que já se desenvolvendo um modelo chassi seria de suma importância para o início da implementação de uma equipe. O desenvolvimento de um veículo para competições é uma atividade muito árdua, embora desafiante. Com isso a execução desde projeto é importante para desenvolvimento da equipe dentro do campus, ademais a experiência adquirida com a área automobilística no decorrer da formação acadêmica dos discentes.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho objetiva projetar e construir um protótipo de chassi para um mini veículo *off-road*, que atenda às normas da competição Baja SAE e seja capaz de resistir aos esforços decorrentes de obstáculos da competição, ou eventuais impactos que ocorram durante a mesma.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar e construir um protótipo de chassi em escala real;
- Desenvolver análise estrutural por elementos finitos;
- Otimizar as relações estruturais, minimizando a utilização de materiais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Chassi é uma estrutura fabricada por materiais rígidos, como aço ou alumínio, desenvolvidos para suportar cargas, como a aplicada pelo motor, carroceria, entre demais componentes e suportar esforços causados por terrenos irregulares. Segundo (CHANDRA, 2012) o chassi automotivo é um esqueleto onde todos os sistemas que compõem o carro são acoplados, como motor, rodas, direção entre outros, sendo considerado o principal componente do veículo.

Figura 1 – Esquema estrutural de um automóvel



Fonte – (BESTCARWEB, 2019)

O chassi Baja SAE é do tipo *spaceframe*, caracterizado pela utilização de perfis metálicos unidos entre si por soldas, resultando em uma estrutura de baixo custo de fabricação, fácil modificação e baixo peso (WEISS, 2016). A competição organizada pela SAE possui normas regulamentadoras para o chassi dos veículos participantes, as quais este projeto se baseia.

#### 2.1.1 TIPOS DE CHASSI

##### 2.1.1.1 TIPO ESCADA

Tipo de chassi que possui duas longarinas dispostas em sentido longitudinal interligadas por travessas, tendo consigo a vantagem de poder montar vários outros tipos de carrocerias sobre o mesmo chassi (CASTRO et al., 2008).



Figura 2 – Chassi Tipo Escada



Fonte – (BESTCARWEB, 2019)

### 2.1.1.2 CHASSI MONOBLOCO

O chassi tipo monobloco é projetado e fabricado em peça única que prescreverá a forma do veículo, com suas junções feitas por soldas. Este é adequado para a produção em robótica, onde a maioria dos veículos atuais faz uso desse modelo (CHANDRA, 2012).

Figura 3 – Chassi Tipo monobloco

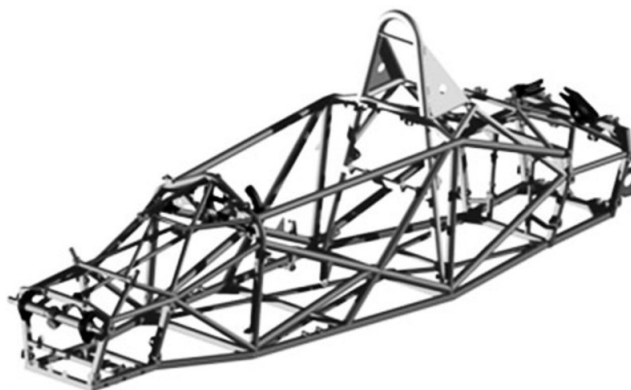


Fonte – (JORNALDOCARRO, 2019)

### 2.1.1.3 SPACEFRAME

Segundo (OLIVEIRA et al., 2007) um chassi tipo *spaceframe* é composto por membros tubulares circulares de pequeno diâmetro e/ou quadrados dispostos em diferentes posições a fim de oferecer uma altíssima rigidez quando submetido a diversos tipos de carregamento.

O chassi do tipo *spaceframe* tem-se uma grande flexibilidade em termos de produção de baixa escala, pois permite variação de materiais de sua construção e modelo desenvolvido, quando se necessita de uma produção em alta escala a estrutura do tipo *spaceframe* se torna inviável economicamente (OLIVEIRA et al., 2007).

Figura 4 – Chassi tipo *ceframe*

Fonte – (FORMULASTUDENT, 2019)

## 2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CHASSI

O chassi é uma estrutura do veículo que exerce diversas funções, portanto, suas propriedades devem ser definidas levando em consideração aspectos que nem sempre estão em concordância entre si, aspectos como dinâmica veicular, segurança, aerodinâmica, custo e dimensão. Do ponto de vista estrutural e dinâmico, propriedades inerciais e de rigidez são consideradas as principais (WEISS, 2016).

Alguns dos critérios de desempenho do chassi são a resistência ao impacto em qualquer situação, rigidez estática e dinâmica (SAMPO, 2011). A rigidez de um veículo pode variar entre modelos, onde para automóveis de certas aplicações podendo ser baixa ou elevada. Um veículo com baixa rigidez, o motorista tem a percepção de que a frente do veículo parece tremer, dificuldades entre fechar e abrir portas de veículos em terrenos irregulares é advindo da rigidez do chassi, vidros sempre estão sujeitos a cargas, como para-brisa que se encontra em contato direto com chassi ou até mesmo providos com teto de vidro, os mesmo que devem possuir alto índice de rigidez (HAPPIAN-SMITH, 2002).

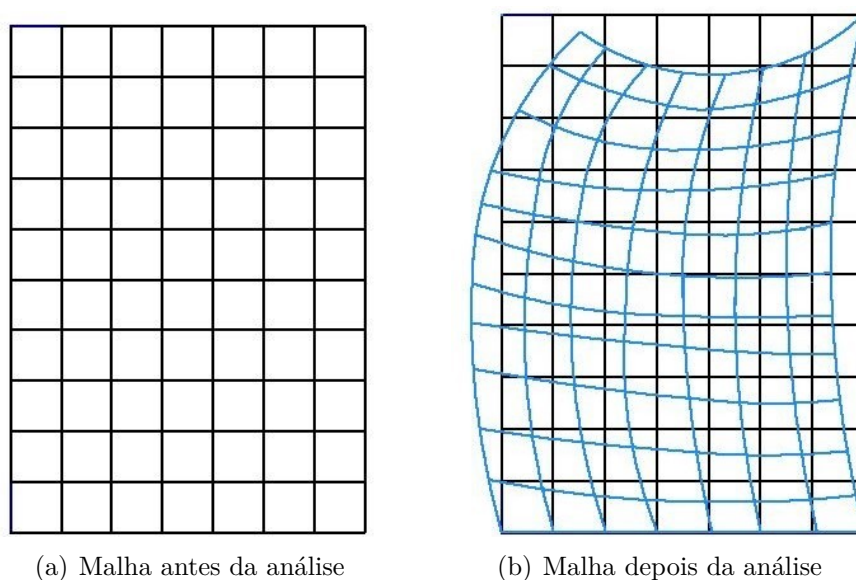
Levando em consideração a capacidade do chassi, em atender quesitos de aplicação de forças, suportando-as em regime elástico, atentando a deformações plásticas, onde o peso do passageiro, os componentes do veículo e as forças externas, vindas dos veículos já em movimento, podem vir a ter ações significativas sobre sua geometria, análises atentas a esses quesitos são de suma importância.

## 2.3 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Segundo (ANDRADE, 2017) o método dos elementos finitos é um procedimento numérico de simulações de diversos fenômenos físicos na análise e desenvolvimento de projetos complexos. Em uma análise por elementos finitos é necessário que se faça uma

subdivisão geométrica da peça em pequenos elementos, que são unidos por nós. Tal característica origina o termo malha, onde o *software* fornece os resultados da análise de acordo com os deslocamentos destes sob a ação de forças ao modelo analisado, exemplificado na Figura 5.

Figura 5 – Exemplificação de malha



Fonte – Próprios autores

Segundo (ROCHA, 2004), o sucesso do desenvolvimento de produtos das empresas automobilísticas, está relacionado com a utilização de novos conceitos e tecnologias, que tornam a atividade de projeto mais eficiente. Sendo assim, será desenvolvida uma análise por elementos finitos com a finalidade de verificar a integridade da estrutura do chassi, averiguando possíveis danos que podem ocorrer ao chassi causados por obstáculos impostos pelas provas, e eventuais impactos.

### 2.3.1 ESTUDO DA MALHA

A malha está intimamente relacionada com os resultados que serão obtidos na análise, ou seja, quanto menor forem as dimensões da mesma, maior é a precisão dos resultados, porém uma malha menor exigirá *hardware* mais avançado e mais tempo para obtenção dos resultados. Atentando-se a este efeito, utilizando algumas das ferramentas disponíveis pelo *software* onde é fornecido alguns dados sobre a relevância da malha utilizada. A priori duas delas, *average* (média) e o *standard deviation* (desvio padrão) da mesma, com os dados é analisado que quanto mais perto de 1 a média se encontra e quanto menor for o desvio padrão, ou seja mais perto de 0, melhor a qualidade da malha utilizada na análise, sendo realizado posteriormente o teste de convergência para obter resultados concretos com uma demanda menor de *hardware* e tempo.

### 2.3.2 ANÁLISE MODAL

Na análise modal o estudo se baseia nas propriedades dinâmicas da estrutura, verificando o comportamento da estrutura sob frequências naturais impostas pelo *software* a fim de averiguar o comportamento dinâmico da mesma. A análise modal requer menor tempo de processamento em comparação a outros tipos de análise.

### 2.3.3 ANÁLISE ESTÁTICA

Nessa análise as cargas são aplicadas continuamente, com o chassi permanecendo estático, resultando em valores acerca do comportamento da estrutura, sendo estes as tensões consequentes que podem resultar em danos sobre o chassi, por vez até deformando-o plasticamente. Neste quesito consideram-se cargas pontuais de aplicações contínuas, como o peso do piloto, motor, transmissão e uma estimativa do peso de componentes que se encontram acoplados ao chassi.

### 2.3.4 ANÁLISE DINÂMICA

Na análise dinâmica o resultado advém do corpo sujeito a acelerações, com as forças podendo variar de intensidade, direção e sentido, fornecendo assim resultados precisos de comportamento do chassi em situações de capotamento, impactos com outros veículos, etc. São obtidos resultados próximos aos reais de como se comportará o corpo sob tais análises.

## 3 METODOLOGIA

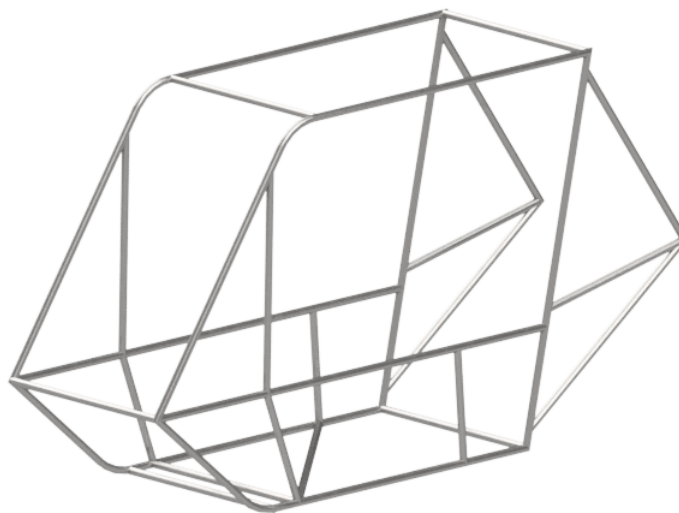
### 3.1 MÉTODO

O presente projeto tem como principal objetivo o dimensionamento de um chassi com o desenvolvimento de um protótipo em escala real. Foi realizada consulta bibliográfica ao regulamento BAJA SAE (RSBS, 2019), direcionando-se às regras impostas para a construção do chassi. Para o desenvolvimento do chassi, existem restrições pré-estabelecidas pelo regulamento, visando à segurança em caso de acidentes, evitando que o piloto seja colocando em risco. Certo padrão deve ser seguido por todas as equipes, os membros secundários da estrutura podem ser modificados com maior liberdade, de modo a se obter um melhor desempenho do veículo. Para o desenvolvimento o projeto foi dividido nas seguintes etapas:

Etapa 1: Pesquisa e desenvolvimento da temática abordada e delimitação dos elementos de contorno do problema.

Etapa 2: Esboço de um primeiro chassi em *software* de modelagem tridimensional, de acordo do com as restrições impostas pelo regulamento, para uma melhor compreensão do modelo a ser criado, desenvolvida no *software Autodesk Inventor*.

Figura 6 – Primeiro modelo tridimensional



Fonte – Próprios autores

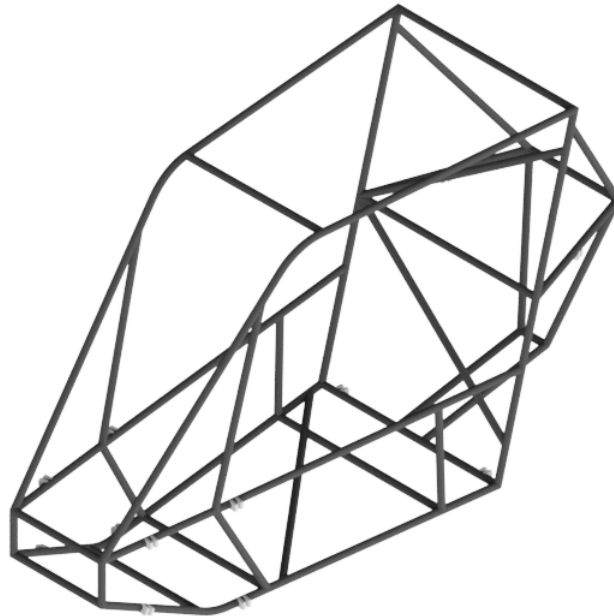
Etapa 3: De acordo com o regulamento é feito um estudo para que se defina o diâmetro e a espessura dos tubos que compõe o chassi com a finalidade de otimizar a

utilização de materiais e reduzir a massa do veículo.

Etapa 4: São modificadas partes do chassi objetivando o aumento de rigidez, maior resistência a esforços e menor massa, atentando-se às restrições do regulamento.

Etapa 5: É criado um modelo otimizado no *software Autodesk Inventor*.

Figura 7 – Modelo otimizado



Fonte – Próprios autores

Etapa 6: Desenvolvimento de análise estrutural no chassi, sendo realizada pelo método de elemento finitos, utilizando o *software Ansys*. As etapas de 3 a 6 são repetidas até que um modelo com propriedades adequadas ao projeto seja desenvolvido.

Etapa 7: Construção do protótipo.

## 3.2 DIMENSIONAMENTO DOS TUBOS

A estrutura do chassi segundo o regulamento (RSBS, 2019), deve ser constituída de tubos de aço. Os mesmos deveram apresentar um percentual mínimo de 0.18% de carbono em sua composição, como também devem possuir dimensões mínimas na seção transversal, sendo o diâmetro externo ( $de$ ) mínimo de  $25,4mm$  e uma espessura mínima de  $0.89mm$ .

Para o desenvolvimento do chassi é de suma importância o dimensionamento do tubo a ser usado, sendo possível relacionar a massa e a espessura que o mesmo possui. Para atender as especificações apresentadas no regulamento, foi realizado um levantamento

de tubos que possuem as condições necessária e que são comerciais, sendo escolhido um tubo de aço 1020, no qual a tabela 1 apresenta as propriedades deste.

Tabela 1 – Propriedades aço 1020

Teor de carbono	0,20%
Módulo de elasticidade	205GPa
Limite de escoamento	350MPa
Densidade	7,87g/cm <sup>3</sup>
Resistência a tração	470MPa

Fonte – (AZO, 2013)

As dimensões da secção transversal do tubo terá influência na massa do chassi e a espessura que este apresenta resultará na rigidez do chassi. Sendo o mesmo material ao longo da estrutura, pode se desenvolver uma função que relaciona a massa ( $m$ ) em função do raio interno ( $r_i$ ), sendo que o raio externo  $r_e$  não irá variar, conforme adotado o ( $de$ ) mínimo.

A massa total da estrutura pode ser obtida através da seguinte equação (1):

$$massa = \rho_{aço} \cdot V \quad (1)$$

Onde,  $\rho_{aço}$  é densidade do aço ( $Kg/m^3$ ) e  $V$  é Volume da seção transversal ( $m^3$ ).

O volume total da estrutura é calculada através da equação (2):

$$V = S \cdot A \quad (2)$$

Onde,  $S$  é Comprimento total de tubos ( $m$ ) e  $A$  é Área da seção transversal ( $m^2$ ).

O cálculo da área da seção transversal é calculada pela equação (3):

$$A = \pi \cdot (r_e^2 - r_i^2) \quad (3)$$

Onde o  $r_e$  e  $r_i$ , são calculados da seguinte maneira:

$$r_e = r_i + t; \quad r_i = r_e - t$$

Substituindo  $r_e$  e  $r_i$  na equação (3) e manipulando algebricamente, tem-se:

$$A = 2\pi \cdot r_i \cdot t \quad (4)$$

Combinando as equações (3), (2), (1), obtêm-se a equação (5):

$$massa = \rho_{aço}(s \cdot 2\pi r_i \cdot t) \quad (5)$$

Foram selecionados tubos comerciais, listados na tabela 2:

Tabela 2 – Especificação de tubos comerciais

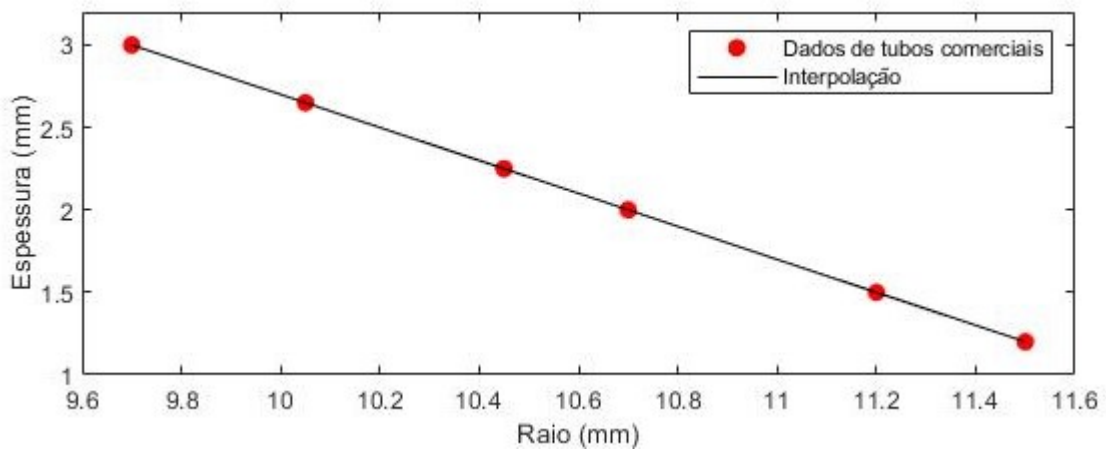
Tubo	Raio interno ( $r_i$ )	Espessura ( $t$ )
25,4mm	11,5mm	1,20mm
25,4mm	11,2mm	1,50mm
25,4mm	10,7mm	2,00mm
25,4mm	10,45mm	2,25mm
25,4mm	10,05mm	2,65mm
25,4mm	9,7mm	3,00mm

Fonte – Próprios autores

Os dados da tabela 2, obtêm-se uma função de ( $t$ ) em relação à ( $r_i$ ).

$$t(r_i) = 11.7453r_i^2 - 1.2534r_i + 0.0142 \quad (6)$$

Figura 8 – Espessura em função do raio

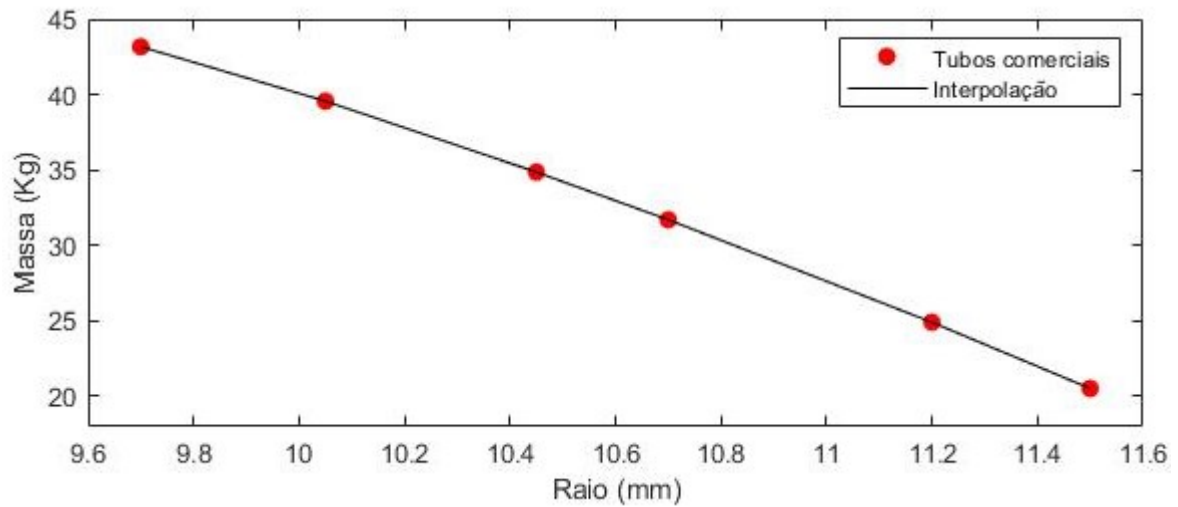


Fonte – Próprios autores

Implementando a função (6) em (5) para obter a variação da massa em relação ao raio do tubos.



Figura 9 – Massa em função do raio



Fonte – Próprios autores

Com as funções encontradas, foi possível observar como a massa irá variar em função ( $r_i$ ). A partir do gráfico, foi possível identificar que existe ponto de máximo e mínimo, mas para utilizar foi escolhido o ponto médio deste, no qual se aproxima do ( $r_i$ ) = 10,7 mm sendo tubo que apresenta ( $t$ ) = 2,00mm. Com a secção transversal do tubo determinada é possível encontrar a massa total ( $m_t$ ) que o protótipo do chassi virá a ter.

$$m_t = 32,5Kg$$

Com a determinação das dimensões a serem usadas, o regulamento (RSBS, 2019) sugere, por os tubos ser uma peça estrutural que seja verificado sua rigidez a flexão e a resistência a flexão.

Rigidez à flexão:

$$R_f = E \cdot I \quad (7)$$

Sendo que a rigidez à flexão é calculada pela equação (7), sendo ( $E$ ) o módulo de elasticidade do material e  $I$  o momento inércia da secção transversal. A rigidez a flexão dos tubos é  $2078,04N \cdot m^2$ .

Resistência à flexão:

$$R_e = \frac{S_y \cdot I}{c} \quad (8)$$

A resistência à flexão é dada pela equação (8), no qual ( $S_y$ ) é tensão de escoamento do material e ( $c$ ) é igual a ( $r_e$ ). Sendo a resistência a flexão igual à  $279.35N \cdot m$ .

### 3.3 CONVERGÊNCIA DA MALHA

Para efetuar as análises, de acordo com o refinamento da malha, a variação do tempo de processamento é considerável, ou seja, o tempo de análise será maior quanto menor a dimensão da malha. Com o intuito de diminuir o tempo de solução, foi realizado um estudo de convergência da malha, onde são realizadas análises modais, variando as dimensões da malha, encontrando frequências naturais do chassi por meio do *software*. A malha encontrada no momento em que a variação das frequências é tida como não significativa em relação aos obtenção dos resultados ao se variar o refinamento da malha, será utilizada para as demais análises, com menor tempo de processamento e sem alterações significativas nos resultados encontrados.

Tabela 3 – Convergência de malha

Frequências naturais $Hz$					
	Malha 50mm	Malha 10mm	Malha 5mm	Malha 2,5mm	Malha 2mm
1°	34,433	34,428	34,428	34,427	34,427
2°	42,245	42,239	42,239	42,239	42,239
3°	49,754	49,735	49,734	49,734	49,734
4°	60,884	60,881	60,881	60,881	60,881
5°	67,554	67,54	67,54	67,539	67,539
6°	80,946	80,941	80,941	80,941	80,941

Fonte – Próprios autores

De acordo com a tabela 3 são apresentadas análises de cinco diferentes refinamentos de malha, com seis frequências naturais diferentes em cada malha. Analisando as malhas de 2,5mm e 2mm, não houve nenhuma variação significativa em suas frequências, sendo assim utilizada a malha com a dimensão de 2,5mm.

### 3.4 DEFORMAÇÃO MÁXIMA

A deformação da estrutura do chassi é causada inicialmente pelas cargas de seus componentes, que estão presentes ao longo de seu corpo, sendo elas o motor, transmissão, peso do piloto e demais componentes do veículo, listados na tabela 4.

Tabela 4 – Objetos presentes na estrutura

	Item	Massa (kg)
1	Motor	35,0
2	Transmissão	15,0
3	Demais componentes	20,0
4	Piloto	109,0

Fonte – Próprios autores

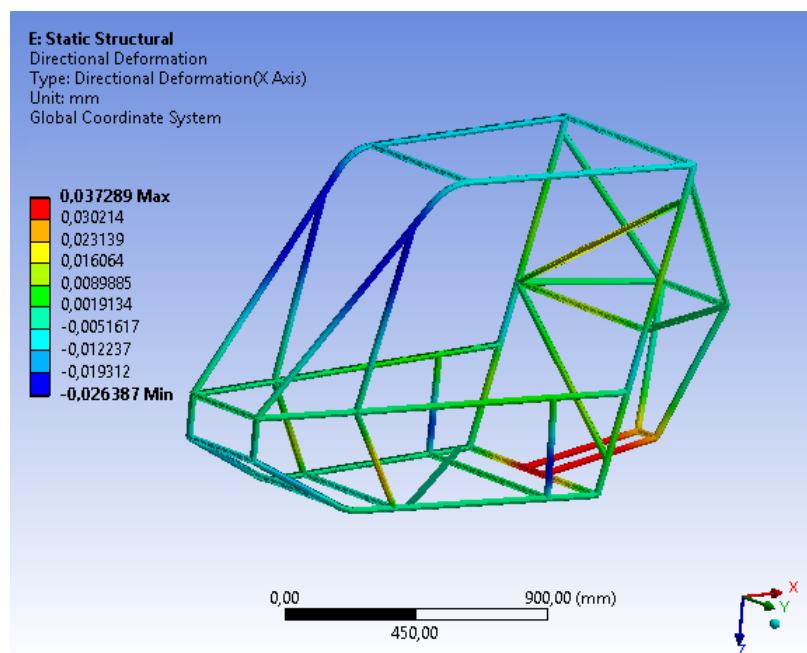
Tais cargas provocam deformação na estrutura do chassi, pra isso foi desenvolvido uma análise estática do chassi, no qual será desprezado as forças de amortecimento sobre a estrutura, apenas será considerado as forças inercias presentes neste.

Como condições iniciais para a análise, o chassi será fixado nas proximidades onde se encontraria as bandejas fixadoras dos amortecedores, afim de verificar e quantificar a magnitude dos esforços internos e seus deslocamentos, sendo assim averiguado sua integridade estrutural.

### 3.4.1 DEFORMAÇÃO DIRECIONAL

O desenvolvimento da análise de deformação direcional, consiste em verificar o quanto as cargas sob a estrutura provocaram de deslocamento, sendo neste método de análise foram utilizados os critérios mencionados acima, como as massas da tabela 4 presentes na estrutura e modelos de fixação.

Figura 10 – Deformação direcional máxima



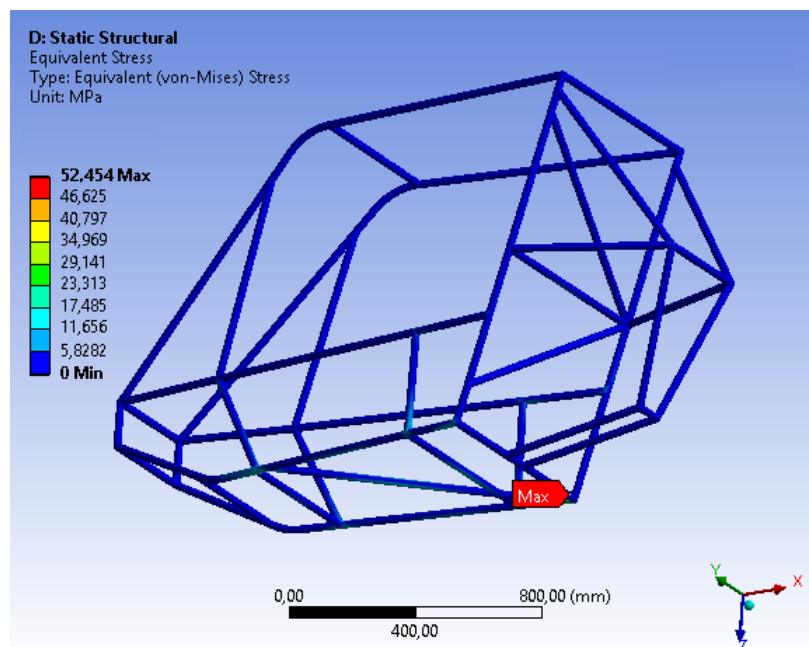
Fonte – Próprios autores

Como apresentado pela Figura 10, existem deslocamentos, quando cargas estão sob à estrutura. Foram obtidos os resultados de máximo e mínimo de deslocamento, sendo respectivamente,  $0,037\text{mm}$  e  $-0,026\text{mm}$ . Como sugerido pela bibliográfica a estrutura está sujeito a sofrer pequenos deslocamentos, no qual a rigidez do chassi não será afetada.

### 3.5 PONTO CRÍTICO

A distribuição de forças no chassi não é uniforme. Devido a isso, existe um ponto na estrutura que pode estar sujeito a maior carga, sendo denominado como ponto crítico. Para a verificação deste ponto, foi realizada uma análise do chassi, com as mesmas condições de contorno que foram abordadas na análise da deformação direcional máxima. Tendo como mudança o tipo de resultado a ser obtido, sendo que neste caso, será obtido a tensão de deformação em  $MPa$ , como também será utilizado o critério de falha de Von Mises. Este critério é usado para identificar possíveis deformações em pontos específicos em materiais como o aço 1020, que apresenta um baixo teor de carbono.

Figura 11 – Ponto crítico da estrutura



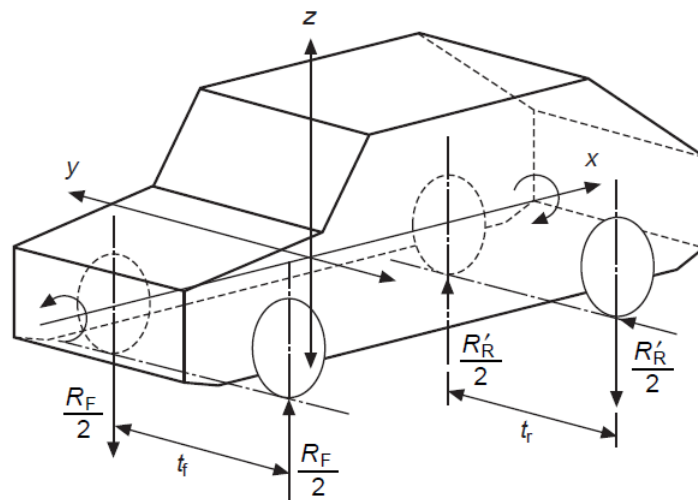
Fonte – Próprios autores

Na Figura 11, está ilustrado a localização do ponto crítico, no qual neste tem-se a máxima tensão na estrutura. Tendo essa tensão uma magnitude de  $52,45 MPa$ , sendo assim abaixo do limite da tensão máxima do material, com localidade na parte inferior do chassi.

### 3.6 MOMENTO TORSOR

O chassi é submetido a forças dispostas verticalmente nos pontos de apoio de sua suspensão, gerando um momento torsor Figura 12 , simulando uma situação em que o veículo encontra-se disposto transversalmente sobre uma lombada. É possível obter deformações máximas em  $mm$  e tensões máximas em  $MPa$ , tais dados devem ser obtidos, pois esse esforço pode causar danos a sua estrutura.

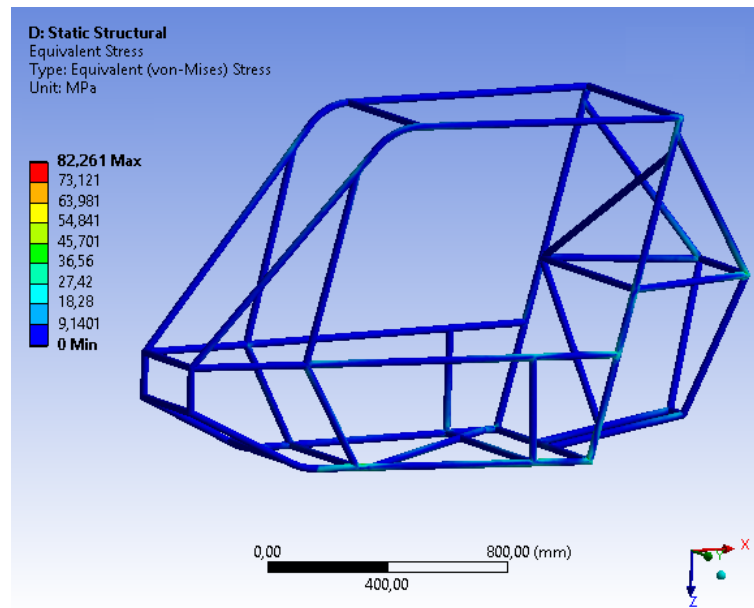
Figura 12 – Reações Estáticas



Fonte – (HAPPIAN-SMITH, 2002)

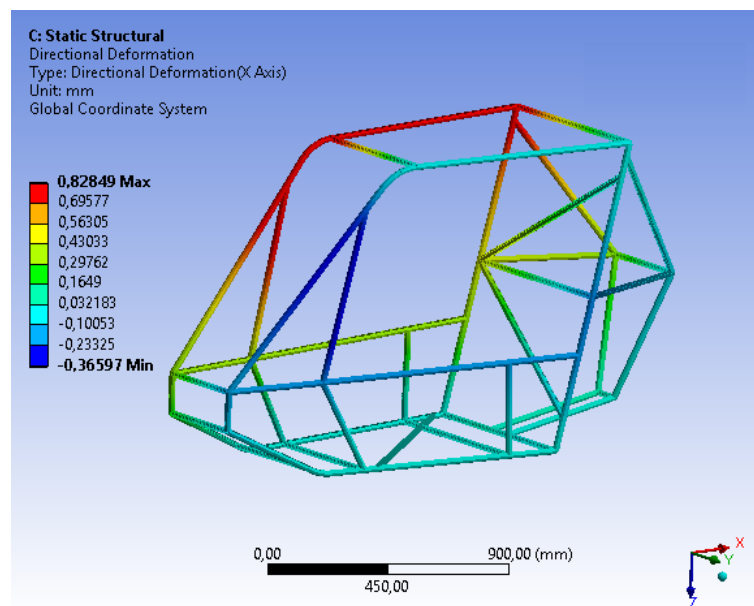
Nesta simulação serão utilizados as mesmas massas que estão na tabela 4, como também será analisado a tensão máxima causada pelo momento torsor, utilizando o critérios de Von Mises novamente e obtendo a deformação direcional causado por este.

Figura 13 – Tensões causadas pelo momento torsor



Fonte – Próprios autores

Figura 14 – Deformação causada por momento torsor



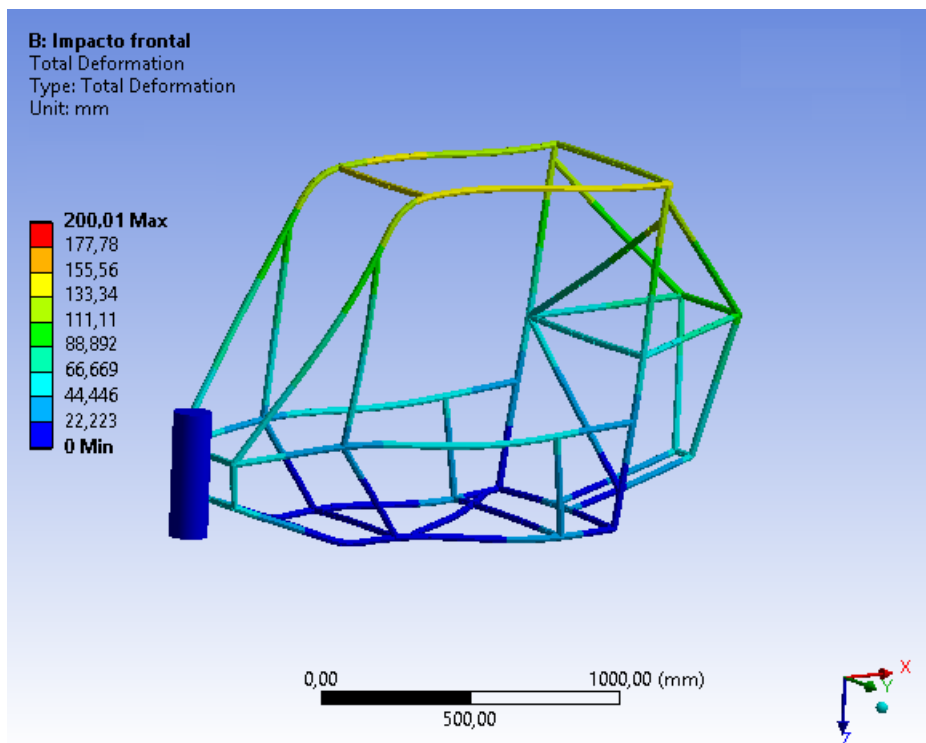
Fonte – Próprios autores

Observando-se as Figuras 13 e 14 foi obtido como resultados de tensão máxima de  $82,26\text{MPa}$  e de deslocamento máximo de  $0,8284\text{mm}$ , mostrando que a tensão máxima da análise é menor que a tensão de escoamento do material, e o mesmo sofre pouca deformação, permanecendo em regime elástico.

### 3.7 IMPACTO FRONTAL

Durante o percurso da competição, podem haver impactos frontais entre veículos, como também impactos com algum tipo de barreira. Nesta análise o chassi é submetido a um impacto frontal contra um corpo fixo, rígido e não deformável. Será adotada uma velocidade de  $20m/s$ , sendo que esta é a máxima velocidade que um veículo mini Baja pode atingir. O movimento do chassi na análise será permitido apenas no eixo X, como também o tempo de colisão com o obstaculo será de  $0,1s$ , como sugerido por (ESSS, 2009)

Figura 15 – Deformação causada por um impacto frontal



Fonte – Próprios autores

Com o impacto observa-se que ocorre uma deformação no chassi Figura 15, devido a absorção do impacto sofrido, ocorrendo assim uma deformação plástica. O chassi teve uma deformação de  $200mm$ , sendo que os tubos não estão próximos da tensão de ruptura.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo (HAPPIAN-SMITH, 2002), na pior condição de cargas, a tensão não deverá exceder 67% da tensão de escoamento do material, portanto o coeficiente de segurança mínimo aceito é de 1,5:

$$\sigma \leq \frac{\sigma_e}{1,5} \quad (9)$$

De acordo com resultados obtidos na análise estática o requisito listado acima é respeitado, com resultados satisfatórios de tensões de  $52,425MPa$  sob cargas estáticas em solo reto e  $82,261MPa$  em solo irregular. Em solo reto a deformação máxima do chassi foi de  $0,03728mm$  e em solo irregular de  $0,8284mm$ , apresentando pouco deslocamento e atendendo requisitos de rigidez e absorção de cargas sem grandes deformações.

Com a análise de impacto frontal obtivemos resultados elevados de deformações, onde a máxima deformação possui um valor de  $200mm$ . Para que o veículo tenha possibilidades de continuar a se locomover após um impacto do mesmo grau de deformação. É possível que não consiga continuar com o mesmo desempenho na pista que antes do acidente, porém atenta-se que o veículo deforma, visando a segurança do piloto no impacto, onde o chassi é obrigado a absorver grande parte da energia do impacto, deformando-se plasticamente.



## 5 CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido teve a finalidade de dimensionar e construir um protótipo em escala real do chassi de um mini baja, buscando aperfeiçoar as relações estruturais, minimizando a quantidade de material gasto para a construção. Para a validação da integridade estrutural do chassi foi utilizado o método dos elementos finitos, o que permitiu a obtenção de uma aproximação considerável aos dados reais em relação a danos na estrutura sob diversas condições impostas a ele.

Ao longo do projeto, foram utilizados métodos específicos que serviriam para a análise, como, dimensionamento dos tubos e estudo da malha de maneira a se obter dados confiáveis para a validação do chassi para que o mesmo pudesse ser construído. Foi realizada uma análise estática e dinâmica, no qual o chassi foi submetido a aplicação de forças inerciais, o que possibilitou obter dados para a validação em pontos críticos.

O trabalho foi finalizado de acordo com os objetivos estabelecidos no escopo do projeto, sendo concluído o dimensionamento do modelo, segundo o regulamento BAJA SAE (RSBS, 2019), assim a construção de um protótipo em escala real. Sendo o veículo mini baja, composto por vários subsistemas fica como sugestão para futuros trabalhos, o desenvolvimento de outras partes do veículo que possam ser acoplado na estrutura, seguindo a mesma diretriz deste projeto.

# REFERÊNCIAS

- ANDRADE, G. A. M. d. Análise estrutural-baja pampa. Universidade Federal do Pampa, 2017. Citado na página 9.
- AZO, M. 2013. Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9145>>. Acesso em: 17 de março de 2019. Citado na página 14.
- BESTCARWEB. *Chassi tubular: a melhor opção para esportivos e carros de corrida*. 2019. Disponível em: <<http://www1.uol.com.br/bestcars/ct/chassi.htm>>. Acesso em: 6 de abril de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- BOYNARD, D. C. C. C.; ROLIN, A. da S. Projeto conceitual e análise estrutural com utilização do método de elementos finitos em um chassi baja sae. *Engevista*, v. 20, n. 2, p. 346–359, 2018. Citado na página 5.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Unico. Nenhuma citação no texto.
- CARDOSO. *Estudo do Comportamento do Chassi de Veículo em Espuma Metálica Submetido a Tese de Impacto*. 2010. Disponível em: <ArtigodeperiódicopublicadonoDesign&Tecnologia>. Acesso em: 6 de abril de 2019. Citado na página 5.
- CASTRO, M. S. d. et al. Uma metodologia para melhoria da rigidez torcional de componentes estruturas automotivos. Florianópolis, SC, 2008. Citado na página 7.
- CHANDRA. Modeling and structural analysis of heavy vehicle chassis made of polymeric composite material by three different cross sections. *International Journal of Modern Engineering Research*, v. 2, n. 4, p. 2594–2600, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- ESSS. *Regulamento BAJA SAE*. 2009. Disponível em: <Aplicaç~oesde\T1\textquotefleftcrashworthiness\T1\textquoterightutilizandooLS-DYNA>. Acesso em: 17 de março de 2019. Citado na página 22.
- FORMULASTUDENT. *Pat's Column - Space-frame Chassis*. 2019. Disponível em: <<https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/pats-column-space-frame-chassis/>>. Acesso em: 6 de abril de 2019. Citado na página 9.
- FURTADO, D. C. Análise estrutural de chassi de veículos automotivos. 2014. Citado na página 5.
- GENTA, G.; MORELLO, L. *The Automotive Chassis: Components Design*. 9. ed. Torino: Springer, 2009. v. 1. Citado na página 5.
- HAPPIAN-SMITH, J. *An Introduction to modern vehicle desing*. 1. ed. Wildwood Avenue, Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 2002. Unico. Citado 3 vezes nas páginas 9, 20 e 23.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. 7. ed. São Paulo SP: Pearson Education do Brasil Ltda, 2010. Unico. Nenhuma citação no texto.

JORNALDOCARRO. *Benefícios do alumínio e da fibra de carbono*. 2019. Disponível em: <<https://jornaldocarro.estadao.com.br/carros/beneficios-do-aluminio-e-da-fibra-de-carbono/>>. Acesso em: 6 de abril de 2019. Citado na página 8.

NORTON, R. L. *Projeto de máquinas*. 4. ed. São Paulo SP: Bookman, 2013. Unico. Nenhuma citação no texto.

OLIVEIRA, F. C. G. d. et al. Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurísticos de otimização numérica. Universidade Federal de Uberlândia, 2007. Citado na página 8.

ROCHA, F. K. *Desenvolvimento de uma metodologia para análise de estrutura veicular*. 2004. Disponível em: <UFSC>. Acesso em: 6 de abril de 2019. Citado na página 10.

RSBS. *Requisitos gerais do veículo*. 2019. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil/regras/>>. Acesso em: 6 de abril de 2019. Citado 4 vezes nas páginas 12, 13, 16 e 24.

SAMPO, E. *Modelling chassis flexibility in vehicle dynamics simulation*. Tese (Doutorado) — University of Surrey, 2011. Citado na página 9.

WEISS, G. H. E. *ANÁLISE COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL DE RIGIDEZ À TORÇÃO DE UM CHASSI DE FÓRMULA SAE*. 2016. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016923.pdf>>. Acesso em: 15 de abril 2019. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 9.

# ANEXO A – DESENHO DO CHASSI

