

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**RUDY GABRIEL DAL MUT**

**ESTUDO PRELIMINAR DE CHASSIS DE VEÍCULO DA CATEGORIA CONCEITO  
URBANO PARA COMPETIÇÃO NA SHELL ECO MARATHON**

**PATO BRANCO**

**2022**

**RUDY GABRIEL DAL MUT**

**ESTUDO PRELIMINAR DE CHASSIS DE VEÍCULO DA CATEGORIA CONCEITO  
URBANO PARA COMPETIÇÃO NA SHELL ECO MARATHON**

**Preliminary study of chassis for urban concept category vehicle to the Shell  
Eco Marathon Competition**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Diego Rizzotto Rossetto.

**PATO BRANCO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**RUDY GABRIEL DAL MUT**

**ESTUDO PRELIMINAR DE CHASSIS DE VEÍCULO DA CATEGORIA CONCEITO  
URBANO PARA COMPETIÇÃO NA SHELL ECO MARATHON**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Diego Rizzotto Rossetto.

Data de aprovação: 21/Junho/2022

---

Diego Rizzotto Rossetto  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

---

Fabio Rodrigo Mandello Rodrigues  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

---

Robson Gonçalves Trentin  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

**PATO BRANCO**

**2022**

A natureza é a fonte de todo o conhecimento verdadeiro. Ela tem sua própria lógica, suas próprias leis, não existe um efeito sem causa ou invenção sem necessidade. (VINCI, Leonardo da).

## RESUMO

As competições automobilísticas são eventos que fascinam o ser humano desde sua criação até os dias de hoje, onde, atualmente, várias categorias e formas de avaliar diversas características dos times competidores são utilizados como forma de incentivar a competitividade e a busca por melhorias e criação de novas tecnologias com o objetivo de ser nomeado o campeão. Uma destas modalidades é a competição em ambiente acadêmico, onde estudantes e professores de universidades formam equipes para diversos tipos de competição, como por exemplo: Fórmula SAE, onde as equipes projetam e constroem protótipos para corrida; MotoStudent, uma competição internacional de corrida voltada às motocicletas; Eficiência energética, a qual a equipe Pato a Jato participa desde 2009 e atualmente planeja ampliar a atuação para a competição na categoria conceito urbano, ao qual, este estudo é focado. Neste documento, foi aplicada uma abordagem para a confecção do primeiro chassi de um veículo, desde a etapa de condições de projeto, até a análise final da primeira versão do chassi. Este estudo possui explicações dos passos a serem tomados para esta primeira estimativa com uma abordagem conservadora, apontando as características que deverão ser utilizadas, pontos a serem levantados nos primeiros cálculos, até o procedimento de análise por elementos finitos do componente com uma análise dos dados obtidos e comparação de valores com os estimados em cálculos. Após a interpretação dos dados, os resultados obtidos são comentados e como a metodologia aplicada traz resultados satisfatórios para o caso de análise estipulado. Sugestões de melhorias tanto na geometria quando no material utilizado são feitas, assim como a sugestão de novo caso de análise obrigatório que pode ser utilizado como ponto de partida para a continuação deste trabalho e conseqüentemente, a segunda iteração do chassi apresentado no estudo.

Palavras-chave: chassi; projeto; estrutura; conceito urbano.

## ABSTRACT

Automobilist Competitions are events that fascinate the human kind since its creation until nowadays, where, in these days, a lot of categories and ways of judging team's characteristics are used as a form of incentivizing competition and the search for better and new technologies with the objective to be called the champion. One of these competitions modalities is in the academic ambient, where students and professors from universities form teams in various kinds of competition, for example: Formula SAE, where teams design and build racing prototypes; MotoStudent, an international competition turned to racing motorcycles; Energetic efficiency, in which Pato a Jato participates since 2009 and currently is seeking to grow its acting field to the urban concept category, in which, this study is focused on. In this document, a conservative approach will be applied to the design of the first chassis of a vehicle, from the project conditions step, to the final analysis of the first versions of the chassis. This Study has explanations of the steps to be taken, characteristics that must be used, situations to be thought on to use in the first calculations, the analysis of the finite element process of the component and comparison to the values estimated through calculus. After the data interpretation, the results obtained are commented and how the applied methodology brings back satisfying results to the defined case of analysis. Suggestions of improvements in the geometry as well as in the material used are made, and also, a new mandatory case of analysis that can be used as a starting point to new studies that continue this document, and, consequently, the second iteration of the chassis presented in the study.

Keywords: chassis; project; structure; urban concept.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Benz Patent-Motorwagen .....	17
Figura 2 - 1908 Ford Model T .....	18
Figura 3 - Popygua .....	20
Figura 4 - Situação de torção da estrutura.....	21
Figura 5 - Monocoque Lamborghini Aventador LP700 .....	22
Figura 6 - Chassis Mercedes Benz 300 SL.....	23
Figura 7 - Chassi Lotus Elan .....	24
Figura 8 - Chassi escada de um Suzuki Jimny .....	25
Figura 9 - Posicionamento de Ballast em veículos de Fórmula 1 .....	26
Figura 10 - Veículo conceito urbano da Shell.....	28
Figura 11 - Sistema de coordenadas do veículo segundo a SAE .....	29
Figura 12 - Forças longitudinais atuantes.....	30
Figura 13 - Força de resistência devido à inclinação da pista .....	33
Figura 14 - Inclinação da pista .....	34
Figura 15 - Representação das componentes inerciais de um veículo.....	35
Figura 16 - Bancada dinamométrica automatizada .....	37
Figura 17 - Audi RS7 sendo passado no dinamômetro .....	37
Figura 18 - Força lateral devido a inclinação da pista .....	39
Figura 19 - Forças atuando na curva de um corpo .....	40
Figura 20 - Sistema de dinâmica vertical do veículo.....	41
Figura 21 - Diagrama de forças de um veículo em movimento .....	43
Figura 22 - Matriz força e deslocamento genéricas do MEF.....	45
Figura 23 - Equação 30 em notação de matriz.....	46
Figura 24 - Problema estrutural. (a) Modelo idealizado; (b) modelo dos elementos finitos.....	47
Figura 25 - Tipos de elementos de malha .....	48
Figura 26 - Chassi escada conceitual.....	56
Figura 27 - Perfil quadrado oco.....	58
Figura 28 - Montagem do chassi com rodas R17 .....	60
Figura 29 - Propriedades estimadas do chassi .....	60
Figura 30 - Coeficiente aerodinâmico.....	64
Figura 31 - Configurações da simulação - Caso 1.....	67
Figura 32 - Tensões de von Mises do veículo em movimento – Caso 1.....	68
Figura 33 - Deformações totais - Caso 1 .....	68
Figura 34 - Configurações da simulação - Caso 2.....	70
Figura 35 - Tensões de von Mises no veículo em movimento – Caso 2.....	70
Figura 36 - Deformações totais - Caso 2 .....	71
Figura 37 - Configuração da simulação - Caso 3.....	72
Figura 38 - Tensões de von Mises do veículo estático - Caso 3 .....	73
Figura 39 - Deformações totais - Caso 3 .....	74
Figura 40 - Destaque das mãos francesas .....	75

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Coeficiente de resistência ao rolamento .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 2 - Comparação dos dados do artigo referente às dimensões .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 3 - Propriedades dos materiais .....</b>	<b>51</b>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>14</b>
1.1.1	Objetivo principal	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>14</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Revisão bibliográfica</b>	<b>17</b>
2.1.1	Aspectos históricos	17
<u>2.1.1.1</u>	<u>Carros</u>	<u>17</u>
<u>2.1.1.2</u>	<u>Competições automobilísticas</u>	<u>18</u>
2.1.2	Chassis	20
<u>2.1.2.1</u>	<u>Monocoque</u>	<u>21</u>
<u>2.1.2.2</u>	<u>Chassis Tubular</u>	<u>22</u>
<u>2.1.2.3</u>	<u>Backbone</u>	<u>23</u>
<u>2.1.2.4</u>	<u>Chassis escada</u>	<u>24</u>
2.1.3	Regras da shell eco marathon 2021 para conceito urbano	25
<u>2.1.3.1</u>	<u>Artigo 45: Dimensões</u>	<u>25</u>
<u>2.1.3.2</u>	<u>Artigo 46: Corpo do veículo</u>	<u>26</u>
2.1.4	Dinâmica veicular	28
<u>2.1.4.1</u>	<u>Dinâmica longitudinal</u>	<u>29</u>
<i>2.1.4.1.1</i>	<i>Resistência ao rolamento</i>	<i>32</i>
<i>2.1.4.1.2</i>	<i>Resistência devida à inclinação da pista</i>	<i>34</i>
<i>2.1.4.1.3</i>	<i>Resistência Inercial</i>	<i>34</i>
<i>2.1.4.1.4</i>	<i>Resistência da transmissão</i>	<i>36</i>
<u>2.1.4.2</u>	<u>Dinâmica lateral</u>	<u>38</u>
<i>2.1.4.2.1</i>	<i>Inclinação lateral da pista</i>	<i>38</i>
<i>2.1.4.2.2</i>	<i>Força centrífuga</i>	<i>39</i>
<i>2.1.4.2.3</i>	<i>Força do vento</i>	<i>40</i>
<u>2.1.4.3</u>	<u>Dinâmica vertical</u>	<u>41</u>
<i>2.1.4.3.1</i>	<i>Carregamento nas rodas</i>	<i>42</i>
<i>2.1.4.3.2</i>	<i>Carga nos eixos do veículo quando em movimento</i>	<i>43</i>
2.1.5	Análise pelo método dos elementos finitos	44

2.1.5.1	Elementos de malha.....	47
2.1.5.2	Condições de contorno.....	48
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1</b>	<b>Dados do chassi.....</b>	<b>50</b>
3.1.1	Tipo do chassi .....	50
3.1.2	Material do Chassi.....	51
<b>3.2</b>	<b>Caso de análise .....</b>	<b>52</b>
<b>3.3</b>	<b>Geometria do chassi .....</b>	<b>53</b>
3.3.1	Centro gravitacional.....	53
3.3.2	Geometria.....	55
3.3.3	Esforços dinâmicos .....	60
<u>3.3.3.1</u>	<u>Esforços longitudinais.....</u>	<u>61</u>
3.3.3.1.1	<i>Resistência ao rolamento .....</i>	<i>61</i>
3.3.3.1.2	<i>Resistência devida à inclinação da pista .....</i>	<i>61</i>
3.3.3.1.3	<i>Resistência inercial.....</i>	<i>61</i>
3.3.3.1.4	<i>Resistência mecânica.....</i>	<i>62</i>
3.3.3.1.5	<i>Resistência aerodinâmica .....</i>	<i>62</i>
<u>3.3.3.2</u>	<u>Esforços laterais.....</u>	<u>63</u>
3.3.3.2.1	<i>Inclinação lateral da pista .....</i>	<i>63</i>
3.3.3.2.2	<i>Força centrífuga .....</i>	<i>63</i>
3.3.3.2.3	<i>Força do vento.....</i>	<i>64</i>
<u>3.3.3.3</u>	<u>Dinâmica vertical .....</u>	<u>65</u>
3.3.3.3.1	<i>Carga nos eixos do veículo quando em movimento .....</i>	<i>65</i>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Caso 1.....</b>	<b>67</b>
<b>4.2</b>	<b>Caso 2.....</b>	<b>69</b>
<b>4.3</b>	<b>Caso 3.....</b>	<b>72</b>
<b>4.4</b>	<b>Considerações sobre os resultados.....</b>	<b>74</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE A - Distribuição de forças nas mãos francesas .....</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXO A- Artigo 45 e 46 do livro de regras da Shell Eco Marathon</b>	
	<b>2021 – Capítulo 1 .....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No início da construção dos veículos, as pessoas que investiam dinheiro na ciência e tecnologia do desenvolvimento de veículos, preferiam melhorar o motor, transmissão, suspensão e direção, tanto que, até o final do século XIX, o corpo do veículo não era considerado como tecnologia necessária, os fabricantes utilizavam madeira como material e não costumavam fazer desenhos do chassi (GENTA; MORELLO, 2009).

Aproximadamente na década de 1920, quando a produção em massa foi bem estabelecida, os carros possuíam a configuração de 'corpo no chassi', o qual permitia que o chassi fosse tratado como uma peça separada, onde todos os componentes mecânicos eram incorporados (CROLLA, 2009).

A forma do chassi tinha o objetivo principal de montar o feixe de molas da suspensão aos eixos, onde este era montado sobre o chão do veículo e era chamado de estrutura do carro. Este consiste em uma estrutura similar a uma escada, onde membros laterais do comprimento do veículo são conectados em ângulos de 90° entre si por perfis de seção aberta. Este estilo de chassi era chamado de "*grillage*", os quais são estruturas planas sujeitas a esforços normais ao seu plano (CROLLA, 2009).

Atualmente o estudo da estrutura é tão importante que existem modalidades de competição os quais as diferenças que mais influenciam entre os veículos competindo são os parâmetros do chassi, como por exemplo, os protótipos da Moto2 onde os motores e transmissões são fornecidos por um fabricante que não possui equipe efetiva na modalidade e as diferenças entre as motos estão no chassi e carenagens.

Com o surgimento de várias competições automobilísticas com diversas propostas e objetivos, em 1985, a Shell iniciou a Shell Eco Marathon (SEM). Esse é um programa acadêmico focado na otimização de energia, o qual desafia acadêmicos do mundo inteiro das áreas de engenharia, ciências, tecnologias e matemática a projetar, construir e operar veículos de alta eficiência energética. Atualmente, a SEM conta com várias classes de competição como conceito urbano, protótipo com propulsão à motor de combustão interna movido com gasolina, etanol, diesel ou célula de hidrogênio e protótipo com propulsão elétrica (SHELL, 2021).

A classe de conceito urbano é definida como um veículo energeticamente eficiente que se parece com um carro moderno para transporte de passageiros, onde

a competição é focada em uma direção com várias reacelerações e paradas (SHELL, 2021).

Pensando no desenvolvimento acadêmico e nas competições de eficiência energética, em 2009, a equipe Pato a Jato foi fundada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Pato Branco, inicialmente visando competir com um protótipo de eficiência energética na modalidade de motores à combustão interna com gasolina. Após 10 anos de pesquisas, desenvolvimento, competições e conquistas, a Pato a Jato decidiu ampliar a atuação na competição para a classe de conceito urbano, onde o presente documento apresenta um estudo de caso inicial para o chassi do veículo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo principal**

Projeto estrutural inicial de um chassi para veículo da categoria conceito urbano visando competir na Shell Eco Marathon levando em consideração as regras contidas no manual da competição.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo principal os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Utilizar algumas etapas de projeto conceitual e/ou projeto detalhado para escolha do tipo do chassi;
- Análise dos esforços para os quais o chassi será submetido;
- Especificar os materiais utilizados;
- Realizar análise pelo Método dos Elementos Finitos via programa.

## **1.2 Justificativa**

A Pato a Jato está evoluindo e crescendo, e com isso, planeja-se aumentar sua área de atuação com a construção de um novo veículo para competição e através de reuniões durante mais de um ano, decidiu-se fazer este veículo em uma categoria a qual a equipe nunca competiu antes, a categoria de conceito urbano.

O projeto de um componente é um passo necessário quando se fala em engenharia, então, o presente estudo é o primeiro caso de análise para definição de

uma geometria e material utilizado no projeto de um chassi para o veículo que competirá na categoria de conceito urbano na Shell Eco Marathon, e que futuramente, os atuais e os novos membros da equipe possam exercitar a prática de projetar e fabricar utilizando os conceitos vistos em sala de aula e dando continuidade ao projeto do chassi, além de contribuir para o seu crescimento pessoal, o crescimento da equipe e o reconhecimento do nome da universidade nas competições.

Este estudo será de suma importância para a equipe, pois a partir deste, as pesquisas para as outras células serão feitas. Tendo como base o espaço disponível para seus projetos, cada célula poderá utilizar as informações contidas neste documento para projetar as fixações no veículo, assim como este documento irá guiar principalmente a célula estrutural da equipe, a qual poderá projetar os sistemas adjacentes.

### 1.3 Estrutura do trabalho

Neste capítulo apresentam-se a introdução do trabalho contextualizando o leitor assim como os objetivos do trabalho e a justificativa do mesmo perante a ideia advinda da equipe Pato a Jato.

No capítulo dois tem-se a revisão bibliográfica, que traz informações desde o início da história dos veículos e competições até o estado atual desta área de estudo. Também é comentado neste sobre a história da equipe de eficiência energética Pato a Jato, desde seu início em 2009 até o atual momento da equipe. Informações cruciais para o presente estudo também se encontram neste capítulo, tais como os tipos construtivos de chassi, com imagens exemplificando estes, além de constar algumas vantagens e desvantagens de cada um. Como o veículo será utilizado para uma competição específica, dentro deste capítulo também serão abordadas as regras dos organizadores, as quais ditam se uma equipe e um veículo estão aptos a participar do evento. Este documento possui informações como os requisitos mínimos e máximos de cada categoria da competição, assim como regras gerais. Além dos pontos já comentados, este capítulo também trata sobre materiais e métodos necessários para a conclusão do estudo contendo uma modelagem preliminar do chassi em CAD assim como os parâmetros utilizados na simulação e por que destes serem escolhidos. Neste capítulo também é exposta toda a teoria que embasa o presente estudo, assim como as explicações e valores de estimativa inicial que serão utilizados no seguinte capítulo e em futuros estudos da equipe. Finalmente, serão demonstradas e debatidas todas as ideias e condições aplicáveis ao modelo matemático, todos os cálculos resolvidos com suas devidas condições aplicadas, assim como uma validação numérica através da análise pelo método dos elementos finitos.

O capítulo três por sua vez trará todas as conclusões do estudo de forma mais breve, apenas recapitulando os principais pontos e também traz algumas sugestões em relação ao chassi aos membros da equipe que darão continuidade ao estudo, projeto e fabricação do conceito urbano.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Revisão bibliográfica

#### 2.1.1 Aspectos históricos

##### 2.1.1.1 Carros

A história dos carros começa em 1879, quando Karl Friedrich Benz conseguiu a patente do primeiro motor de combustão interna fabricado, e em 1885, ele fabricou o primeiro carro do mundo, conhecido como Benz Patent-Motorwagen, ou somente Motorwagen, o qual em 1886 conseguiu a patente número 37435 em 29 de Janeiro de 1886 (BENZ, 2001).

**Figura 1 - Benz Patent-Motorwagen**



**Fonte: mercedes-benz-publicarchive.com (2021)**

Com o passar do tempo, vários outros países criaram seus carros baseados no conceito do veículo de Benz. Uma das montadoras mais conhecida é a Ford, fundada por Henry Ford, que em 1896 no quintal de sua casa em Detroit, criou o seu primeiro veículo experimental, e em 1908, Ford demonstrou seu primeiro veículo, o Ford Model T. A demanda foi tão grande que Ford implantou a primeira linha de produção em massa (MILLER, 1922).

**Figura 2 - 1908 Ford Model T**

Fonte: [corporate.ford.com](http://corporate.ford.com) (2021)

A corrida por um dos bens mais desejados já havia começado, e com isso, todos os investidores queriam atrair mais clientes para a compra dos seus veículos. A maioria destes investidores bancavam pesquisas e o desenvolvimento nas áreas do motor, transmissão, suspensão e direção (CROLLA, 2009). Devida a importância que os investidores davam ao desenvolvimento destas áreas, até o final do século XIX, o corpo do veículo não era considerado como tecnologia necessária, assim, não recebia a devida atenção na seu projeto e fabricação, onde os fabricantes não costumavam desenhar o corpo do veículo e utilizavam madeira pela praticidade, isso gerou uma separação da indústria entre os fabricantes de chassis, os quais desenvolviam a tecnologia do veículo e os fabricantes do corpo, os quais agiam mais como carpinteiros (GENTA; MORELLO, 2009).

#### 2.1.1.2 Competições automobilísticas

Quando falamos em competições automobilísticas, geralmente, a primeira coisa que nos lembramos é de corrida de carros focados em velocidade, porém, a primeira competição registrada aconteceu na França, no ano de 1894, onde esta era focada na confiabilidade dos veículos e o objetivo era percorrer de Rouen até Paris, um trajeto de aproximadamente 80 km (BRITANNICA, 1999).



Desde então, várias modalidades de competições automobilísticas foram criadas, para vários estilos de veículos com diversos objetivos, desde corridas de carros e motos competindo em circuitos abertos e fechados disputando o melhor tempo de volta, como a Fórmula 1, MotoGP, TT – Isle of Man e DAKAR até competições acadêmicas como Fórmula SAE, BAJA SAE e a Shell Eco Marathon, onde a equipe Pato a Jato compete desde 2010.

Em 1985, na França, acontecia a primeira Shell Eco Marathon da história, 25 veículos de madeira estavam presentes no grid utilizando um formato de desafio similar ao visto até hoje nas competições. Tudo isso começou com um diretor de pesquisas da Shell, o Bob Greenshields, que em 1939, fez uma competição amigável com seus colegas para ver quem conseguia ser mais energeticamente eficiente, onde Bob conseguiu a marca de aproximadamente 21 km/L utilizando um Studebaker de 1924 como sua cobaia (SHELL, 2021).

Fundada em 2009, a Pato a Jato começou suas pesquisas e trabalhos para a fabricação do primeiro protótipo da equipe, o “E Dai”, o qual possuía um chassi em alumínio e conseguiu a marca de 82 km/L utilizando gasolina como combustível, na Maratona Brasileira de Eficiência Energética. Atualmente, 11 anos depois, a equipe conta com o Popygua, protótipo que compete na categoria eficiência energética para combustíveis alternativos e é composto por monocoque de fibra de carbono, com carenagens em fibra de vidro, quadro para suporte do motor e componentes eletrônicos em alumínio, motor a combustão interna com injeção de combustível programável, além de outras tecnologias aplicadas. Todo o esforço da equipe neste protótipo o rendeu o título de tricampeão da América Latina, com a sua maior marca de 702,4 km/L, onde a Figura 3 apresenta o protótipo que conseguiu alcançar esta marca. (PATO A JATO, 2021)

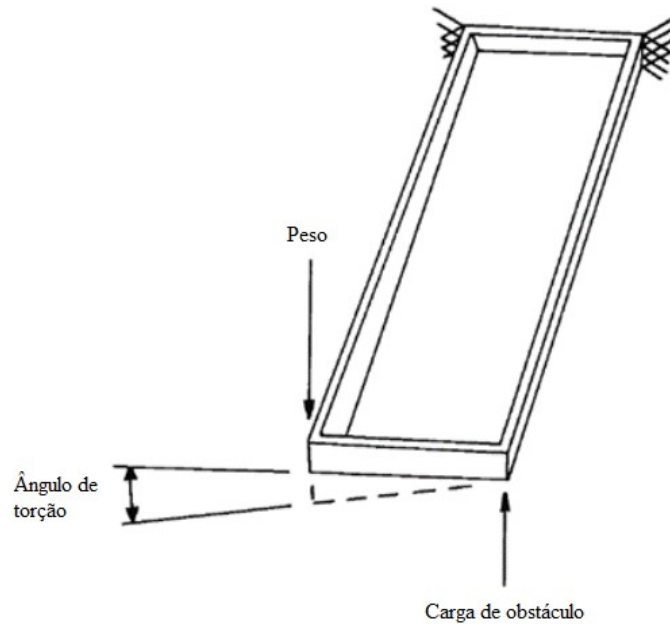
**Figura 3 - Popygua**

Fonte: [pb.utfpr.edu.br/patoajato/](http://pb.utfpr.edu.br/patoajato/) (2021)

### 2.1.2 Chassis

O principal objetivo de uma estrutura é manter a forma do veículo enquanto suporta os esforços que são aplicados à ela. Existem vários tipos de chassis, os quais devem ser estudadas as vantagens e desvantagens para a aplicação dele, onde as principais propriedades que um chassi deve ter são resistência e rigidez (CROLLA, 2009). A rigidez de um chassi pode ser dividida em rigidez à flexão a qual refere-se ao quanto o chassi sofrerá de deformação de forma fletora quando este é carregado no centro e apoiado nas extremidades, e a rigidez à torção refere-se ao comportamento da estrutura quando a uma parte do chassi é mantida na horizontal e a outra possui um momento binário causando a sua torção, isto é, manter os apoios das rodas traseiras estáticas e exercer duas forças de direção vertical com sentidos opostos nos apoios dianteiros do chassi, conforme a Figura 4 (LOPES, 2014).

**Figura 4 - Situação de torção da estrutura**



**Fonte: Adaptado de Pedro Lopes (2014)**

O Chassis é um componente interno que serve como um guia da produção de um veículo, além de suportar outros sistemas, como o corpo e motor (RAGHUVANSHI et al., 2015). Os tipos de chassis mais utilizados na indústria são classificados em quatro tipos, o monocoque, o tubular, o *Backbone* e o estilo escada (AIRALE et al., 2011).

#### 2.1.2.1 Monocoque

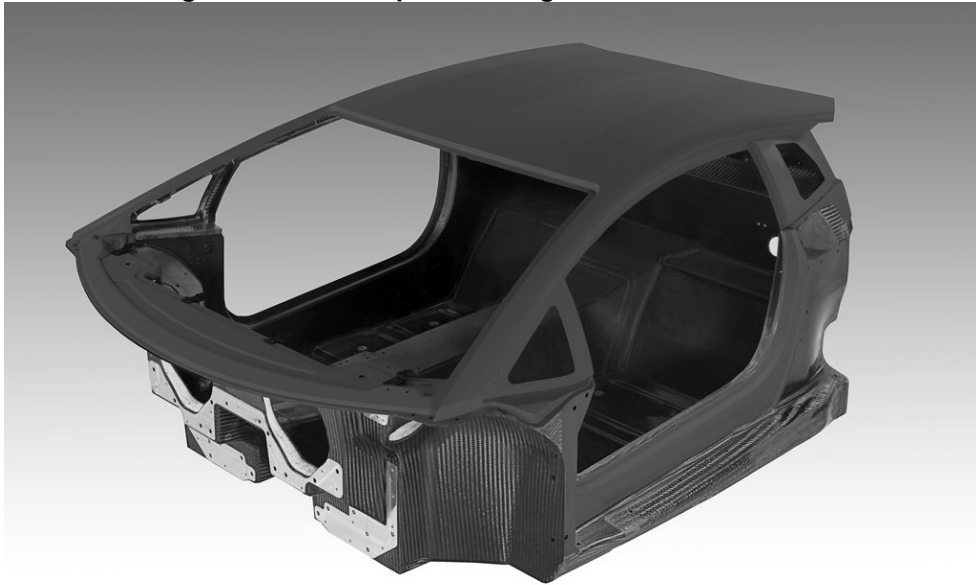
Este tipo de chassis se assemelha a uma caixa fechada e a palavra vem do francês que significa “casca única”, onde a casca funciona como corpo e estrutura do veículo, o que torna esse tipo de chassis muito eficiente no ponto de vista do peso total do veículo (CROLLA, 2009). Pelo ponto de vista da segurança, este tipo também é muito bom, pois o passageiro fica protegido dentro de uma casca estrutural muito resistente (SUPERMILEAGE TEAM, 2009).

Esta estrutura é muito utilizada em veículos de competição devido ao fato de ser leve, porém, para conseguir uma estrutura resistente e rígida, esta não pode ter descontinuidades, e por este motivo, ela não é utilizada para veículos urbanos, visto que estes são compostos por várias peças com grandes vãos entre elas para melhorar a visibilidade, entrada de passageiros, entre outros aspectos, e devido a isso, a rigidez à torção da estrutura é significativamente reduzida (CROLLA, 2009).

As vantagens deste tipo de chassi é que ele é muito seguro pela natureza do seu conceito, devido ao fato de conseguir combinar a estrutura e o corpo do veículo em um só componente, este possui poucas partes, além do fato de que ele é feito de compósitos, e a natureza destes materiais é de alta resistência e rigidez, o qual aumenta a razão de rigidez por peso, ou seja, o veículo terá a rigidez desejada e será extremamente leve (SUPERMILEAGE TEAM, 2009).

Em contra partida, as desvantagens pesam muito na hora da decisão do projeto de um monocoque, visto que o preço de reparo é muito alto, a análise para a construção em compósitos é muito complexa, além da dificuldade de acessibilidade de materiais e dificuldade e preço elevado para a fabricação (SUPERMILEAGE TEAM, 2009).

**Figura 5 - Monocoque Lamborghini Aventador LP700**



**Fonte: motor1.com (2011)**

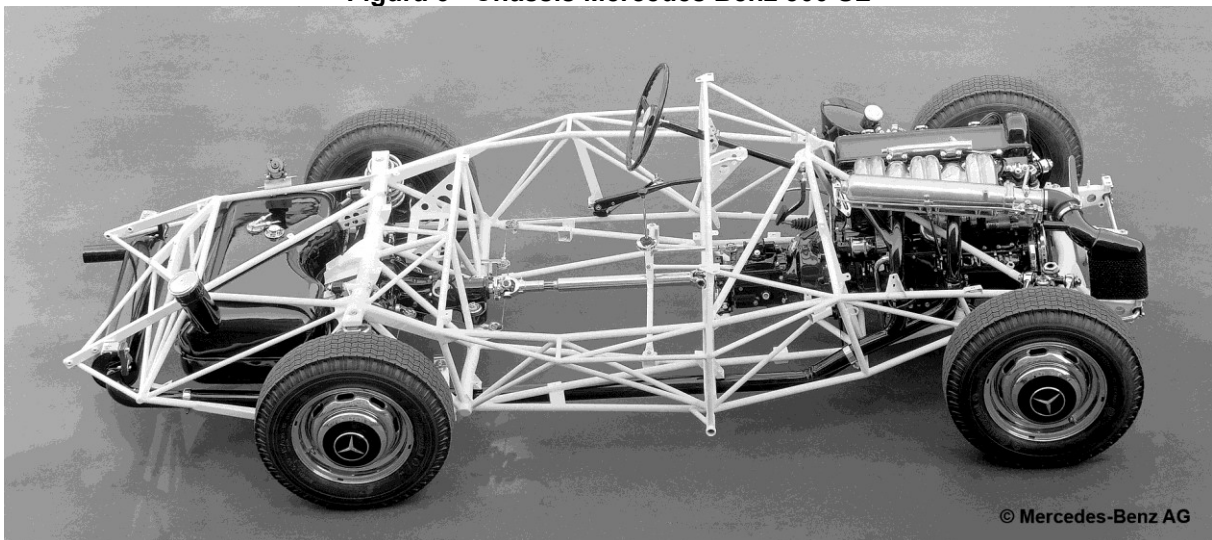
#### 2.1.2.2 Chassis Tubular

O chassi tubular geralmente é composto por uma estrutura de treliças, onde vários tubos soldados, geralmente em forma triangular, formam a estrutura do veículo, então, o corpo será fixado nos tubos, cobrindo a estrutura e provendo vantagens aerodinâmicas e estéticas (SUPERMILEAGE TEAM, 2009).

Geralmente, os carros esportivos utilizam este tipo de chassi no layout “banheira” o qual é composta por estruturas triangulares que cercam o piloto, como se fosse uma banheira, daí vem o nome (CROLLA, 2009).

As vantagens deste tipo de chassis é que este tem baixos custos de produção além de ser rígido, leve, tem fácil acesso aos materiais e processos para fabricação e um ponto muito importante, é que, a análise destas estruturas é relativamente simples e tem alta precisão. Quanto às desvantagens, estas são poucas se comparadas ao monocoque, porém, são importantes para o propósito do projeto, onde estas são principalmente a dificuldade na produção além do veículo ter muitas peças (SUPERMILEAGE TEAM, 2009). Um ponto importante que deve ser considerado é o veículo ter poucas partes, para que sua montagem e transporte da universidade até o local onde a competição está acontecendo seja fácil e sua desmontagem e montagem seja rápida.

**Figura 6 - Chassis Mercedes Benz 300 SL**



Fonte: mercedes-benz-publicarchive.com (2021)

### 2.1.2.3 Backbone

Este tipo de chassis é definido como um tubo de seção larga (CROLLA, 2009) ou por uma viga posicionada no meio do veículo onde os outros sistemas são fixados (SUPERMILEAGE TEAM, 2009). Por ele ter um elemento estrutural central grande, o Backbone consegue solucionar o problema de rigidez à torção dos chassis estilo escada (ADAMS, 1993).

As vantagens deste estilo de chassis são a acessibilidade, a baixa quantidade de peças e a complexidade da análise, além de ter baixo custo, capacidade de reparos e fabricação simples. Como o veículo passará pelo processo de transporte e competição, é importante que este seja relativamente simples de reparar, visto que a possibilidade de um dano ao veículo é alta. As maiores desvantagens desde modelo

são a fragilidade a impactos laterais e a dirigibilidade dinâmica (SUPERMILEAGE TEAM, 2009).

**Figura 7 - Chassi Lotus Elan**



**Fonte: commons.wikimedia.org (2020)**

#### 2.1.2.4 Chassis escada

Segundo Pedro Lopes (2014) o chassi tipo escada consiste basicamente em longarinas e travessas sendo essas fixadas em paralelo ou cruzadas (em forma de X) entre as longarinas. Este estilo de chassi tem este nome por que se assemelha a uma escada sobre rodas.

As principais vantagens deste tipo de chassi é que este é fácil de fabricar e oferece boa rigidez à flexão. Como principal desvantagem, é citado que para que este estilo de chassi se torne rígido, geralmente deve-se adicionar muita massa a sua estrutura, desta forma, não recomendado para automóveis de alta performance. Em contra partida, a concepção deste chassi foi criada para veículos que trafegam em velocidades lentas, curvam em baixa velocidade, e precisam movimentar cargas pesadas.

Desta forma, o chassi tipo escada se mostra ideal para o presente estudo, visto que as velocidades ao qual o veículo será submetido são baixas, além disto, a capacidade de suportar cargas pesadas sobre o chassi indica que a estrutura de um veículo do porte de um conceito urbano pode trazer benefícios pela simplicidade da estrutura, visto que o veículo deve ser leve.

**Figura 8 - Chassi escada de um Suzuki Jimny**



**Fonte: quatorrodas.com.br (2018)**

### 2.1.3 Regras da shell eco marathon 2021 para conceito urbano

No capítulo I das regras oficiais de 2021 na seção 3C – *URBAN CONCEPT CLASS* estão constados os requisitos mínimos e máximos para a categoria do conceito urbano. Os artigos 45 e 46 estão diretamente relacionados as dimensões e aspectos gerais dos chassis dos veículos conceito urbano que poderão ser aplicados à competição. Estes artigos encontram-se traduzidos nas seções 2.1.3.1 e 2.1.3.2, assim como a versão retirada do livro oficial de regras em inglês no Anexo A.

#### 2.1.3.1 Artigo 45: Dimensões

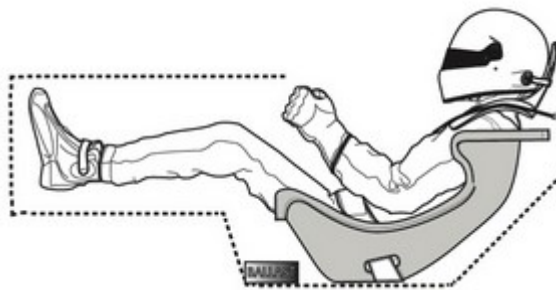
- a) A altura total do veículo deve estar entre 1000 mm e 1300 mm;
- b) A largura total do veículo, excluindo retrovisores deve estar entre 1200 mm e 1300 mm;
- c) O comprimento total do veículo deve estar entre 2200 mm e 3500 mm;
- d) O comprimento entre rodas do eixo frontal deve ser de no mínimo 1000 mm e do eixo traseiro deve ser de no mínimo 800 mm, medindo desde o ponto central da banda de rodagem entre os pneus dos respectivos eixos;



- e) O entre eixos deve ter no mínimo 1200 mm;
- f) A cabine para o piloto deve ter altura mínima de 880 mm e largura mínima de 700 mm nos ombros do piloto;
- g) O vão livre do chassi e do corpo do carro (carenagem) deve ser de no mínimo 100 mm com o piloto (e se necessário, com *ballast*) dentro do veículo;
- h) O peso máximo do veículo sem piloto deve ser de 225 kg;
- i) Todas as dimensões do veículo não devem ser alcançadas através de extensões nas carenagens como apêndices presos ou cortes.

*Ballast* é um sobrepeso exterior ao piloto, o qual é necessário utilizar caso o piloto do veículo não tenha o peso mínimo requerido pelo regulamento.

**Figura 9 - Posicionamento de Ballast em veículos de Fórmula 1**



Fonte: motorsport.tech (2019)

### 2.1.3.2 Artigo 46: Corpo do veículo

- a) As equipes devem enviar arquivos técnicos como desenhos, fotografias ou animações do *design* completo do veículo para os organizadores para aprovação na oportunidade mais breve;
- b) O corpo do veículo deve cobrir todas as partes mecânicas vistas de todos os lados. As rodas e suspensão devem ser cobertas por completo pelo corpo se o veículo for visto por cima (vista superior) e as rodas devem estar cobertas até a linha de centro do eixo quando visto de frente ou trás (vistas frontal e traseira). A cobertura para as rodas e suspensão deve ser uma parte integrada e rígida do corpo do veículo;
- c) As equipes não podem utilizar peças de veículos que estejam comercialmente disponíveis;
- d) O acesso ao piloto deve ser fácil e prático assim como encontrado em veículos de passageiros comuns. Todos os veículos da categoria de conceito urbano devem ter duas portas laterais. Cada porta deve ter uma dimensão mínima de 500 x 800 mm (*será verificado com um modelo retangular de 500 x 800 mm com raio de 50 mm nos cantos*);



- e) Qualquer mecanismo de acesso que pode ser aberto deve estar firmemente fixado no corpo do veículo por dobradiças ou trilhos deslizantes. Fitas, velcro ou qualquer material similar é proibido para este propósito;
- f) O veículo deve ter teto fixo que cubra todo o compartimento do piloto;
- g) Um para-brisa com limpadores de para-brisa efetivo é obrigatório. Artigos referidos a este item são 52.b) e 109.b);
- h) Um espaço deve estar disponível para uma mala retangular de dimensões 500 x 400 x 200 mm (L x H x W). Este espaço deve ter fácil acesso da parte externa do veículo e deve incluir um fundo e paredes para segurar a mala no local enquanto o veículo se move. A mala deve ser fornecida pelos participantes e deve ser posicionada neste espaço durante a inspeção e competição;
- i) Corpos do veículo não podem incluir qualquer apêndice que possa ser perigoso para membros de outras equipes; exemplo: pontas afiadas devem ter um raio de 50 mm ou maior, de forma alternativa, estes devem ser feitos de espuma ou de material similar deformável;
- j) Um gancho ou anel para reboque é obrigatório na frente do veículo. Este pode ser rígido ou flexível (cabo ou alça). Se for rígido, este deve estar por baixo da carenagem do veículo por motivos de segurança. De forma alternativa, estes podem ser retráteis ou removíveis, porém, de fácil acesso assim como em carros normais. Este deve ser utilizado para reboque caso o veículo venha a quebrar na pista. Este deve ter uma resistência a tração equivalente ao peso do veículo e ter uma largura de abertura de no mínimo 30 mm.

Estes artigos regem as dimensões mínimas e máximas para os veículos da categoria do conceito urbano, as quais devem ser respeitadas para que o veículo da equipe seja permitido a competir. O descumprimento destas regras desclassifica o veículo da competição e para que o mesmo seja permitido a competir, devem-se ser feitas alterações para que as regras sejam cumpridas. Como o chassi é um componente muito importante e de difícil modificação, visto que este é a base para vários sistemas do veículo, ele deve ser feito para atender as regras vigentes da competição. O presente estudo utilizará as regras de 2021 como base inicial dos cálculos.

A Shell possui veículos das categorias de competição do evento, os quais servem como um exemplo para os acadêmicos analisarem, estudarem e utilizar como base para a fabricação dos protótipos de cada equipe. Segundo a Shell, o veículo exemplo da categoria conceito urbano pode ser parcialmente homologado na Europa, desta forma, é possível ter conhecimento do nível de tecnologia aplicada aos veículos

da competição. A Figura 10 mostra o veículo exemplo da Shell para categoria conceito urbano.

**Figura 10 - Veículo conceito urbano da Shell**



Fonte: vermonchan.com (2018)

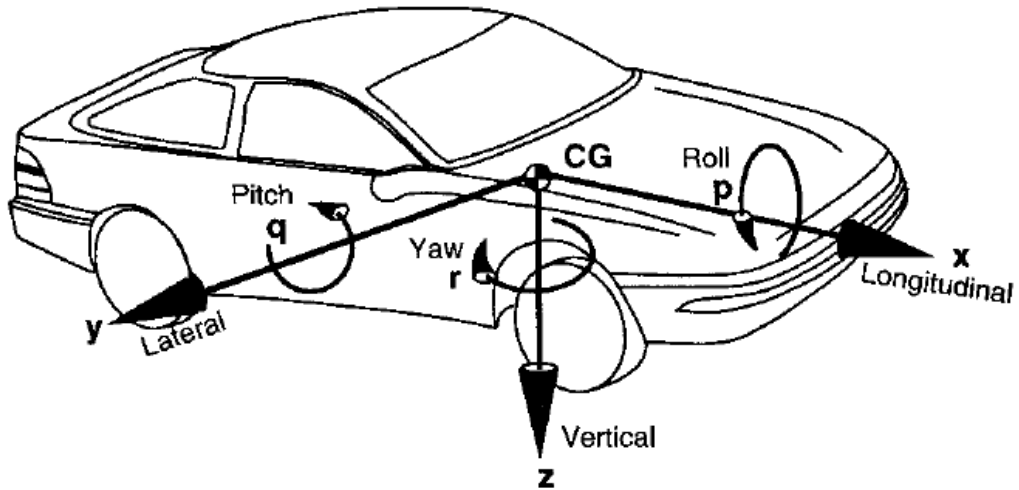
#### 2.1.4 Dinâmica veicular

A dinâmica veicular é o estudo que tem objetivo de entender os movimentos do veículo, assim como as forças que os originam. Estes movimentos são geralmente desenvolvidos em quatro pontos de contato, neste caso, os quatro pneus que estão em contato com o chão (GILLESPIE, 1992).

O entendimento da dinâmica veicular pode ser feito de duas formas, a analítica e a empírica. Ao optar pelo entendimento empírico, o estudo é feito por tentativa e erro, onde os engenheiros aprendem quais são os fatores que influenciam o comportamento do veículo e em sobre quais condições estes aparecem, porém, este método geralmente leva à falha, pois ao extrapolar as condições dos testes, novos fatores desconhecidos podem surgir e mudar os resultados obtidos. Por este motivo, os engenheiros preferem utilizar o método analítico, o qual tenta descrever a mecânica dos sistemas envolvidos da forma mais próxima à realidade através das leis da física para que este modelo possa ser considerado aceitável (GILLESPIE, 1992).

Este estudo é dividido em três principais domínios, os quais representam os graus de liberdade do veículo, sendo estes, a dinâmica longitudinal, dinâmica lateral e a dinâmica vertical (HEIßING; ERSOY, 2011).

Figura 11 - Sistema de coordenadas do veículo segundo a SAE



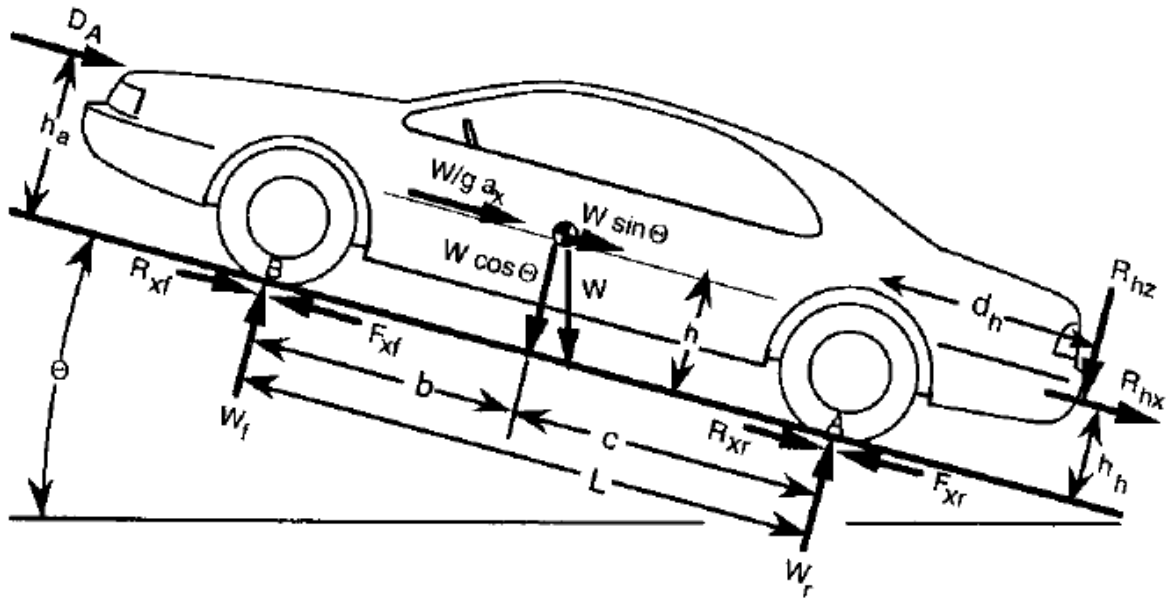
Fonte: Gillespie (1992)

#### 2.1.4.1 Dinâmica longitudinal

Esta trata do comportamento de forças no eixo que está paralelo ao chão onde o veículo está andando. Para Canale (1989), existem cinco forças que podem dizer-se principais quando se fala à oposição do movimento do veículo, ou seja, forças longitudinais e estas são as resistências ao rolamento, à inclinação da pista, resistência exercida pelo ar, resistência inercial e a resistência da transmissão.

De uma forma geral, a dinâmica longitudinal aborda a aceleração e frenagem do veículo quando este se movimenta em linha reta. A Figura 12 demonstra as forças atuantes no veículo que correspondem à dinâmica longitudinal.

Figura 12 - Forças longitudinais atuantes



Fonte: Gillespie (1992)

onde,

$w$ : peso do veículo agindo no centro gravitacional [N];

$W_f$ : força normal dinâmica nos pneus dianteiros [N];

$W_r$ : força normal dinâmica nos pneus traseiros [N];

$F_{xf}$ : força motriz dos pneus dianteiros [N];

$F_{xr}$ : força motriz dos pneus traseiros [N];

$R_{xf}$ : força de resistência ao rolamento nos pneus dianteiros [N];

$R_{xr}$ : força de resistência ao rolamento nos pneus traseiros [N];

$D_A$ : força de arrasto aerodinâmica agindo sobre o veículo [N];

$h_a$ : distância entre o chão e a força de arrasto aerodinâmica [mm];

$R_{hx}$ : força longitudinal atuante no veículo responsável pelo acoplamento de um trailer [N];

$R_{hz}$ : força vertical atuante no veículo responsável pelo acoplamento de um trailer [N];

Quando o veículo estiver acelerando, a componente  $W/g.a_x$  deve ser considerada. Esta representa uma força de "d'Alembert", que é uma força equivalente à inércia do veículo, a qual deve ser posicionada no centro gravitacional do veículo com direção oposta à aceleração.

Outro fator importante é a consideração de um momento equivalente através da multiplicação da força aerodinâmica  $D_A$  com a distância  $h_a$ . Este momento se deve à força de resistência aerodinâmica no veículo quando este está em movimento.

Finalmente, para o presente estudo, as forças  $R_{hz}$  e  $R_{hx}$  serão anuladas visto que o veículo irá ser projetado e utilizado em competições de circuito fechado onde nunca se fez necessário utilizar um trailer.

A SAE (*Society of Automotive Engineers*) tem como convenção um torque positivo no sentido horário no ponto A, sendo assim, utilizando a conservação de momentos em A e considerando que o veículo não está acelerando, Gillespie (1992) determina as somatórias de torques envolvidos no veículo por:

$$\sum M_A = 0 \quad (1)$$

$$W_f \cdot L + D_A \cdot h_a + \frac{W}{g} a_x \cdot h + R_{hx} \cdot h_h + R_{hz} \cdot d_h + W \cdot h \cdot \text{sen}(\theta) - W \cdot c \cdot \text{cos}(\theta) = 0 \quad (2)$$

Utilizando o mesmo conceito, porém em torno do ponto B, é possível calcular as forças  $W_f$  e  $W_r$ .

$$W_f = \frac{W \cdot c \cdot \text{cos}(\theta) - R_{hx} \cdot h_h - R_{hz} \cdot d_h - \left(\frac{W}{g} \cdot a_x \cdot h\right) - D_A \cdot h_a - W \cdot h \cdot \text{sen}(\theta)}{L} \quad (3)$$

$$W_r = \frac{W \cdot b \cdot \text{cos}(\theta) + R_{hx} \cdot h_h + R_{hz} \cdot (d_h + L) + \left(\frac{W}{g} \cdot a_x \cdot h\right) + D_A \cdot h_a + W \cdot h \cdot \text{sen}(\theta)}{L} \quad (4)$$

Agora, podem-se destacar dois casos importantes para o início da análise dos esforços agindo no veículo, onde o primeiro caso é o carro parado em um local plano, ou seja, o ângulo  $\theta$  é igual a zero e as forças dinâmicas são desprezadas, visto que o veículo está em repouso, sendo assim, as forças estáticas nas rodas dianteiras e traseiras do veículo são demonstradas, respectivamente, pelas equações 5 e 6.

$$W_{fs} = W \cdot \frac{c}{L} \quad (5)$$

$$W_{rs} = W \cdot \frac{b}{L} \quad (6)$$

Estas forças calculadas poderão ser o ponto inicial, pois a estrutura do veículo deve ter a condição mínima de suportar o próprio peso do veículo em repouso.

O segundo caso são as acelerações em baixas velocidades, onde o veículo ainda não sofre muita resistência aerodinâmica. Como Fox (2010) descreveu, e a

equação 7 demonstra, a velocidade é um parâmetro de proporção exponencial no cálculo da força aerodinâmica que um corpo sofre quando existe um fluxo de fluido sobre este. Esta equação também descreve a resistência aerodinâmica comentada anteriormente.

$$D_A = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (7)$$

onde,

$D_A$ : força de arrasto [N];

$C_p$ : coeficiente de arrasto do corpo;

$\rho$ : densidade do fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$A$ : área frontal do corpo em contato com o fluxo [ $\text{m}^2$ ];

$v$ : velocidade do fluxo [ $\text{m}/\text{s}$ ].

Então, para este caso, assume-se que a força  $D_A$  é igual a zero visto que o veículo não está em movimento, e desta forma, as equações 8 e 9 do peso sobre as rodas dianteiras e traseiras do veículo são, respectivamente.

$$W_f = W \left( \frac{c}{L} - \frac{a_x \cdot h}{g \cdot L} \right) = W_{fs} - W \cdot \frac{a_x \cdot h}{g \cdot L} \quad (8)$$

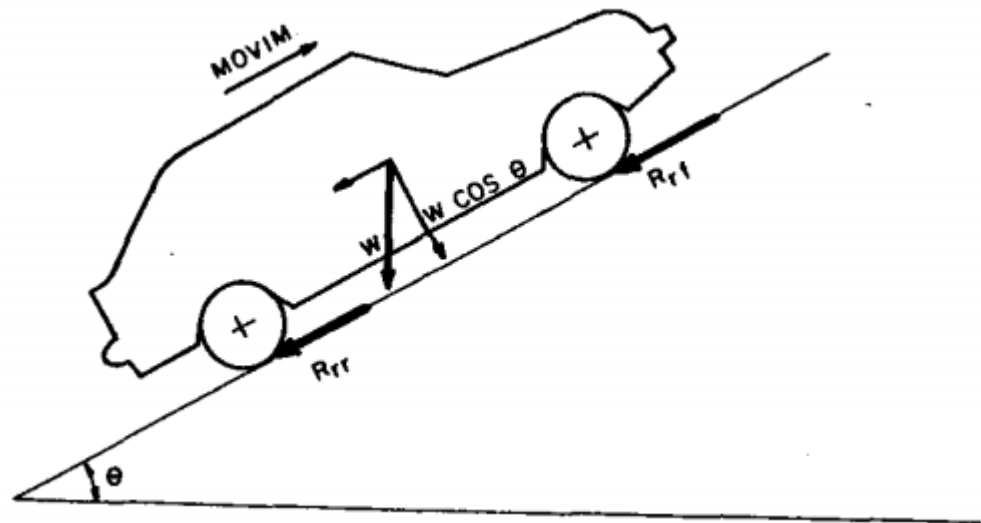
$$W_r = W \left( \frac{b}{L} - \frac{a_x \cdot h}{g \cdot L} \right) = W_{rs} - W \cdot \frac{a_x \cdot h}{g \cdot L} \quad (9)$$

#### 2.1.4.1.1 Resistência ao rolamento

Para Canale (1989) a resistência ao rolamento é uma perda de energia cinética que é transformada em energia térmica, a qual aquece os pneus do veículo, e, conseqüentemente, esta energia não pode ser reaproveitada, definindo-a como uma perda.

Esta perda está ligada as deformações cíclicas nos pneus do veículo, as quais acontecem a todo momento desde o início do movimento.

Figura 13 - Força de resistência devido à inclinação da pista



Fonte: Canale (1989)

Uma componente resultante destas forças pode ser descrita pela segunda lei de Newton, onde está pode ser representada por  $R_r$  na equação 10.

$$R_r = R_{rr} + R_{rf} = f \cdot w \cdot \cos(\theta) \quad (10)$$

onde,

$R_r$ : força resultante da resistência ao rolamento [N];

$R_{rr}$ : força de resistência ao rolamento nas rodas traseiras [N];

$R_{rf}$ : força de resistência ao rolamento nas rodas dianteiras [N];

$f$ : coeficiente de resistência ao rolamento;

$w$ : força peso do veículo [N].

Como a inclinação das pistas normalmente é pequena, pode-se assumir que  $\theta$  é igual a  $0^\circ$ , o que resulta em um erro de apenas 5% para inclinações da pista de até 32%, ou seja, este erro é muito baixo e pode ser desconsiderado mesmo em inclinações extremas. Sendo assim, a equação 10 se resume na equação 11, a qual já possui este erro, porém, simplifica ainda mais os cálculos.

$$R_r = R_{rr} + R_{rf} = f \cdot w \quad (11)$$

O coeficiente de resistência ao rolamento tem várias variáveis, as quais fazem uma grande diferença no valor, então, pode-se utilizar alguns valores tabelados, como os apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Coeficiente de resistência ao rolamento**

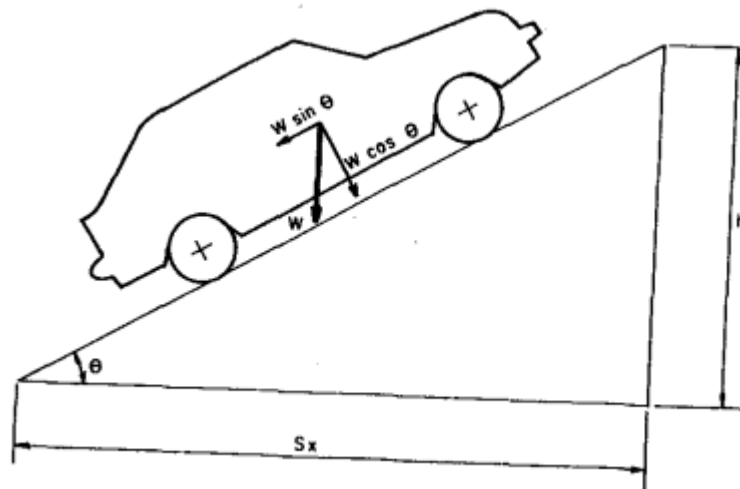
Veículo	Concreto	Dureza média	Areia
Carros passageiros	0,015	0,1	0,3
Caminhões pesados	0,012	0,08	0,25
Tratores	0,02	0,04	0,2

Fonte: adaptado de Canale (1982)

#### 2.1.4.1.2 Resistência devida à inclinação da pista

A resistência da inclinação é uma componente do peso do veículo na direção do movimento e no sentido oposto a este (CANALE, 1982), onde utilizando a segunda lei de Newton sobre as forças da Figura 14 é possível definir sua magnitude através da equação 12.

Figura 14 - Inclinação da pista



Fonte: Canale (1989)

$$R_g = w \cdot \text{sen}(\theta) \quad (12)$$

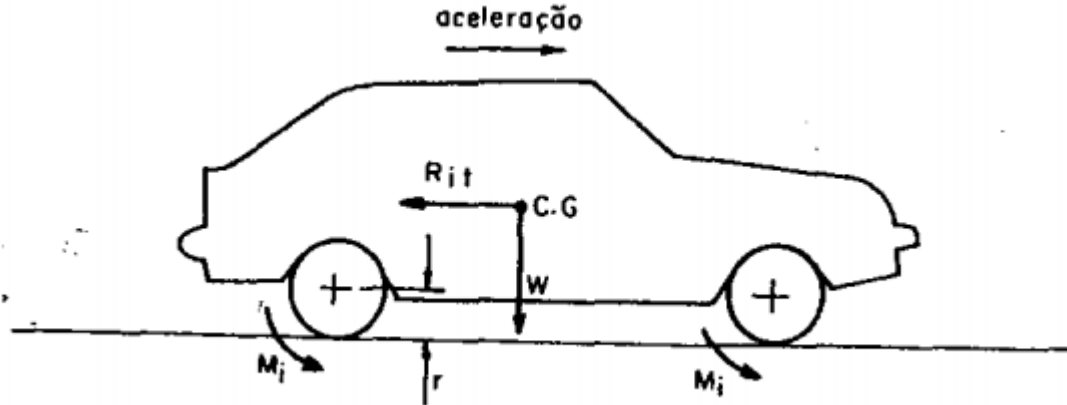
#### 2.1.4.1.3 Resistência Inercial

Segundo Sir Isaac Newton no *Philosophie Naturalis Principia Mathematica* (1687), a inércia pode ser definida como a tendência natural de um objeto em resistir a alterações ao seu estado atual, ou seja, um corpo parado tende a se manter parado,



assim como um corpo em movimento, tende a se manter em movimento. Para um veículo, a história não é diferente.

Figura 15 - Representação das componentes inerciais de um veículo



Fonte: Canale (1989)

Para um veículo com aceleração “a”, a força total de inércia  $R_{it}$  pode ser definida como:

$$R_{it} = m \cdot a = \frac{W}{g} \cdot a \quad (13)$$

onde,

m: massa do veículo [kg];

W: força peso do veículo [N];

g: força gravitacional  $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$ ;

a: aceleração do veículo [ $\text{m/s}^2$ ]

Qualquer alteração na rotação do sistema de geração e transmissão de torque necessita de um torque. Este pode ser definido pela equação 14.

$$M = I \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \alpha \rightarrow M = I \cdot \alpha \quad (14)$$

onde,

I: momento de inércia em torno do eixo de rotação [ $\text{kg.m}^2$ ];

$\alpha$ : aceleração angular [ $\text{rad/s}^2$ ].

Fazendo a transferência de todos os momentos de inércia das peças rotativas do veículo, é possível definir qual é o torque  $M_i$  necessário nas rodas para fazer a movimentação do veículo.

$$M_i = \alpha \cdot \sum I \cdot \xi^2 \quad (15)$$

onde,

$\alpha$ : aceleração angular [rad/s<sup>2</sup>];

$I$ : momento de inércia de peça em rotação [kg.m<sup>2</sup>];

$\xi$ : relação de transmissão (mov. de entrada/saída).

Para a descrição dos momentos no veículo, é possível utilizar uma força fictícia denominada como “ $R_{iR}$ ” no centro gravitacional do carro. O objetivo desta força equivalente é facilitar a análise do que está acontecendo no veículo. Esta variável é descrita na equação 16.

$$R_{iR} = \frac{\alpha \cdot \sum I \cdot \xi^2}{r^2} \quad (16)$$

onde,

$\alpha$ : aceleração angular [rad/s<sup>2</sup>];

$I$ : momento de inércia de peça em rotação [kg.m<sup>2</sup>];

$\xi$ : relação de transmissão (mov. de entrada/saída);

$r$ : raio do pneu [m].

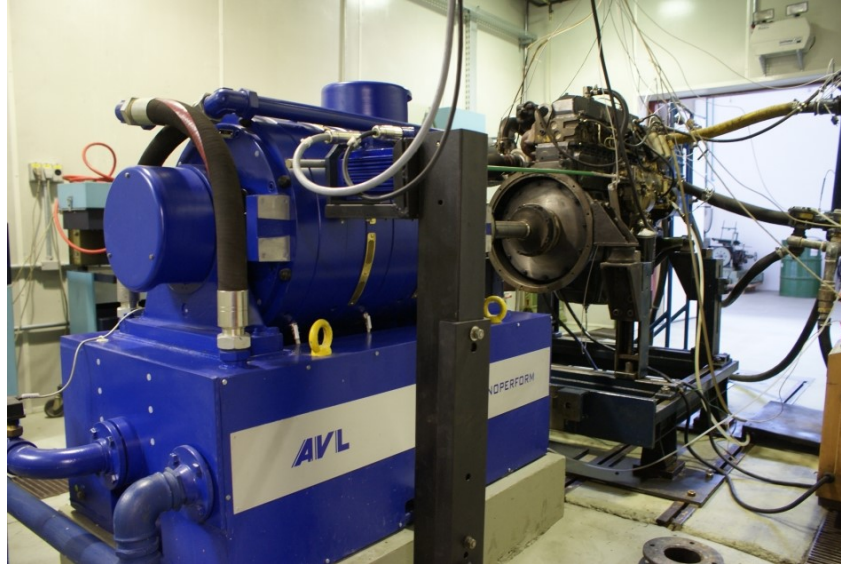
Além deste, as forças no movimento de curva na trajetória do veículo também se encaixam neste caso, porém, estas serão calculadas nas próximas seções, onde a direção do veículo será abordada.

#### 2.1.4.1.4 Resistência da transmissão

Esta resistência não é descrita como uma força, mas sim, como a eficiência do sistema de transmissão de força do veículo, em outras palavras, quanta energia é perdida no processo de transmissão de movimento do motor até as rodas (CANALE, 1989). A forma mais comum de medir esta eficiência, é analisar os dados de saída do motor do veículo em dinamômetro (conhecido popularmente pelo teste de bancada),

representado na Figura 16 e refazer os testes quando o veículo estiver todo montado (conhecido popularmente como passagem do veículo no dinamômetro), nas respectivas condições de uso, representado na Figura 17.

**Figura 16 – Bancada dinamométrica automatizada**



Fonte: ipt.br (2021)

**Figura 17 - Audi RS7 sendo passado no dinamômetro**



Fonte: JFAutomotive.co.uk (2022)

Popularmente é dito que a perda da transmissão em um veículo é de aproximadamente 15%. Este valor ficou popular pois após vários veículos terem seus dados de passagem de dinamômetro comparados com os valores divulgados pelos fabricantes, a maioria deles ficava em torno desta perda na transmissão.

Nicolazzi, Rosa e Real (2011) descrevem uma equação que consegue determinar o rendimento mecânico utilizando os métodos de medição citados anteriormente.

$$P_c = P_e \eta_m \quad (17)$$

onde,

$P_c$ : potência no cubo [kW];

$P_e$ : potência efetiva do motor [kW];

$\eta_m$ : rendimento mecânico da transmissão.

#### 2.1.4.2 Dinâmica lateral

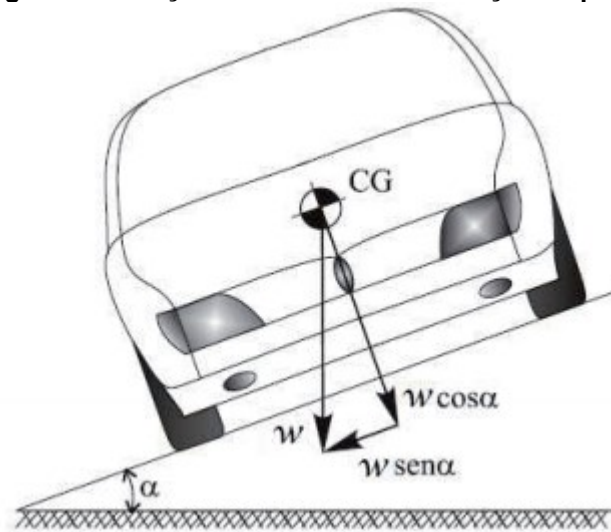
A dinâmica lateral trata sobre todas as forças que influenciem na estabilidade do veículo (COSSA, 2017). Esta, é diretamente influenciada pelas forças que acontecem na direção do veículo, o qual, este sistema é utilizado para controlar e estabilizar o veículo (HEIßING; ERSOY, 2011).

A dinâmica lateral é separada em três principais forças com possibilidade de influenciar na estabilidade lateral do veículo, sendo elas a inclinação lateral da pista, a força centrífuga e o vento incidido na lateral do veículo (COSSA, 2017).

##### 2.1.4.2.1 *Inclinação lateral da pista*

Quando um veículo está sobre uma pista lateralmente inclinada, parte do seu peso irá agir no eixo lateral deste. A Figura 18 demonstra as variáveis necessárias para descrever a força peso de um veículo quando este encontra-se sobre uma via inclinada.

**Figura 18 - Força lateral devido a inclinação da pista**



Fonte: Nicolazzi, Rosa e Leal (2012)

Analisando esta figura, é possível concluir que a força “ $F_l$ ” que atua no eixo lateral do veículo tem uma forma muito simples, a qual está descrita na equação 18.

$$F_l = w \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (18)$$

onde,

$F_l$ : força lateral devido à inclinação da pista [N];

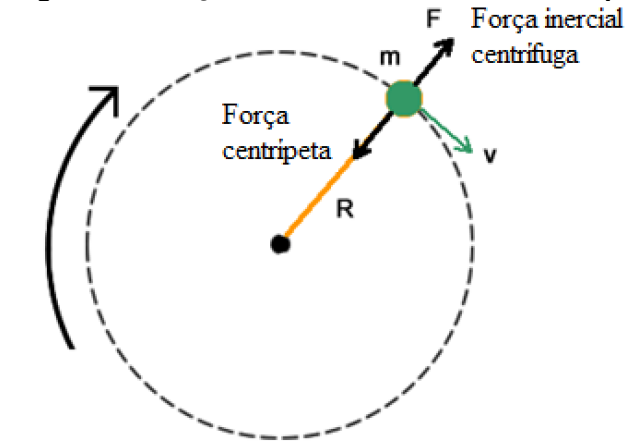
W: peso do veículo [N];

$\alpha$ : ângulo de inclinação da pista [°].

#### 2.1.4.2.2 Força centrífuga

Todo veículo ao fazer uma curva, necessita de duas componentes de força para realizar este movimento, a componente tangencial responsável pelo movimento linear do veículo e a força centrípeta, responsável por manter o veículo na sua trajetória. Porém, a reação que o veículo sentirá é a força centrífuga devida a inércia do veículo. A diferença entre essas forças, é que uma delas representa a componente vetorial do movimento e a outra, representa a força ao qual o veículo será submetida.

Figura 19 - Forças atuando na curva de um corpo



Fonte: Adaptado de quora.com (2021)

A Figura 19 demonstra as forças atuantes em um veículo enquanto este faz uma curva. A equação 19 descreve a força centrífuga atuante durante a curva.

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot R = m \frac{v_t^2}{R} \quad (19)$$

onde,

$F_c$ : força centrífuga [N];

$m$ : massa do veículo [kg];

$\omega$ : velocidade angular [rad/s];

$v_t$ : velocidade tangencial [m/s];

$R$ : raio da curva [m].

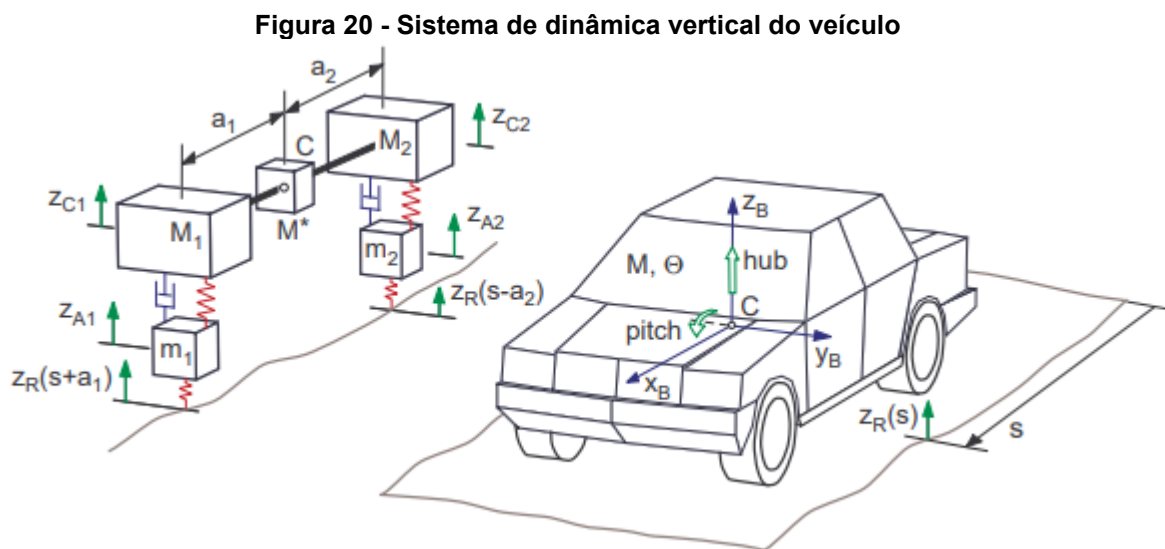
#### 2.1.4.2.3 Força do vento

Assim como a resistência aerodinâmica, a força que o vento faz em um veículo pode ser descrita pela equação 7, a diferença é a área ao qual o ar está sendo incidido no veículo, que deve ser medida pelas dimensões laterais no carro, porém, esta força causa um momento de guinada, visto que o ponto central de pressão do vento dificilmente coincidirá com o centro gravitacional do veículo (GILLESPIE, 1992).

### 2.1.4.3 Dinâmica vertical

A dinâmica vertical é focada no sistema de suspensão do veículo, lidando com o amortecimento das cargas para garantir melhor conforto aos passageiros causando o mínimo de esforço no veículo. Para a análise completa deste tipo de dinâmica, faz-se necessário modelos complexos das vias e do veículo utilizado no estudo (RILL, 2007).

Para fazer uma análise inicial, pode-se utilizar um sistema mais simples do chassi, o qual negligencia acelerações longitudinais e descreve o veículo como um sistema bidimensional (RILL, 2007)



Fonte: Rill (2007)

A partir da Figura 20, devem-se aplicar os conhecimentos de vibrações para que o sistema comece a ser descrito. Para dar início ao estudo, deve-se assumir duas condições que são descritas pelas equações 20 e 21, respectivamente.

$$M_1 + M^* + M_2 = M \quad (20)$$

$$a_1^2 \cdot M_1 + a_2^2 \cdot M_2 = \theta \quad (21)$$

A equação 19 descreve que os pontos de massa do veículo devem ser igual à massa do chassi, ou seja, uma condição de continuidade, assim como a equação 20 diz que os pontos de massa do veículo devem resultar uma mesma inercia em um

eixo localizado no ponto C do chassis e este eixo deve apontar na direção lateral do veículo, ou seja, o eixo  $y_B$ .

Assim, a localização correta do centro de gravidade pode ser encontrada pela equação 22.

$$a_1 \cdot M_1 = a_2 \cdot M_2 \quad (22)$$

Utilizando as equações 21 e 22, é possível isolar as massas principais e conseqüentemente, determinar a massa  $M^*$ .

$$M_1 = \frac{\theta}{a_1(a_1 + a_2)} \quad (23)$$

$$M_2 = \frac{\theta}{a_2(a_1 + a_2)} \quad (24)$$

$$M^* = M \left( 1 - \frac{\theta}{M \cdot a_1 \cdot a_2} \right) \quad (25)$$

#### 2.1.4.3.1 Carregamento nas rodas

O centro gravitacional tem suma importância para determinar as reações nas rodas do veículo. Sem ele, não é possível iniciar o estudo do veículo. Existem algumas formas de calcular o centro gravitacional de um veículo. A mais comum é pesar o veículo em um solo plano com balança nas rodas, assim, é feita a leitura nos valores mostrados. Porém, este deve possuir um protótipo e como o presente estudo não dispõe de um modelo real, deve-se estimar os valores do mesmo. Como o centro gravitacional de um veículo em movimento está em constante mudança, devem-se adotar algumas simplificações no modelo afim de ajudar na análise (COSSA, 2017).

1. As condições de análise são estacionárias, ou seja, estradas não possuem irregularidades, os raios de curvatura das curvas são constantes, além disso, o veículo é considerado em velocidade constante e aceleração longitudinal constante;



2. O veículo está em estado estacionário, ou seja, todas as variáveis demonstradas estão em equilíbrio físico assim como qualquer comportamento transitório e a dinâmica de massas suspensas e não suspensas são ignorados;
3. Todas as variáveis são lineares e as dimensões do veículo são constantes;
4. O chassi do carro é considerado rígido, principalmente na torção.

Segundo Milliken e Milliken (1995), a localização do centro gravitacional de carros de corrida é muito importante para ter bons resultados, pois a capacidade de fazer curvas em um veículo está diretamente atrelada à esta informação.

Segundo Cossa (2017), grande parte dos projetos e alterações feitas em chassis de veículos de competição tem como objetivo alterar a posição do centro gravitacional do veículo para que esta mudança melhore a performance do veículo.

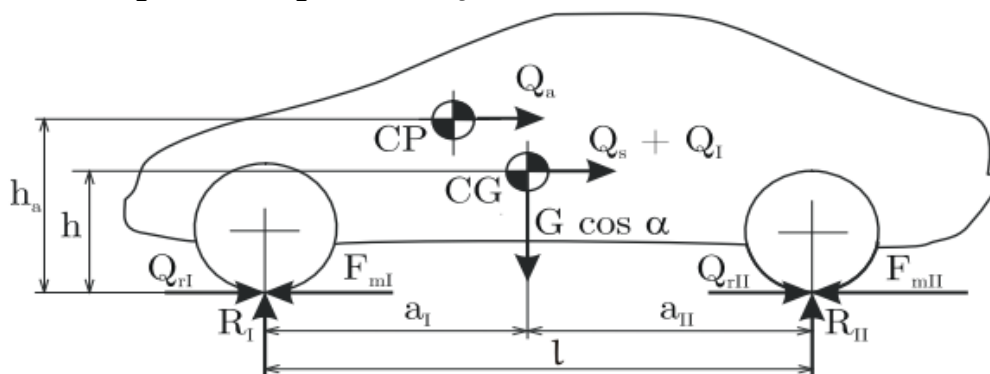
Como citado anteriormente, para um protótipo existente, a melhor forma de medir o centro gravitacional é pesar o veículo em duas condições diferentes, porém, no presente estudo, esta informação será estimada a partir do modelo CAD via programa de modelagem.

#### 2.1.4.3.2 Carga nos eixos do veículo quando em movimento

Com o movimento do veículo, algumas forças surgem e atuam nos pontos de contato pneu-pista, no centro gravitacional e no centro de pressão, causando uma alteração nas componentes normais das forças sentidas nos pneus (NICOLAZZI; ROSA; LEAL, 2012).

Fazendo o equilíbrio de forças na direção do movimento do veículo, a equação 26 consegue descrever o comportamento no veículo demonstrado na Figura 21.

**Figura 21 - Diagrama de forças de um veículo em movimento**



Fonte: Nicolazzi, Rosa e Leal (2012)

$$F_m = Q_s + Q_r + Q_I + D_A \quad (26)$$

onde,

$F_m$ : força motriz [N];

$D_A$ : resistência aerodinâmica [N];

$Q_r$ : resistência ao rolamento [N];

$Q_I$ : resistência da inércia [N];

$Q_s$ : resistência ao aclone [N];

$F_{mI}$  e  $F_{mII}$ : força motriz nos eixos dianteiro e traseiro, respectivamente [N];

$Q_{rI}$  e  $Q_{rII}$ : resistência ao rolamento nos eixos dianteiro e traseiro, respectivamente [N].

A partir desta figura, Nicolazzi, Rosa e Leal (2012) descrevem as reações  $R_I$  e  $R_{II}$  pelas equações 27 e 28, respectivamente.

$$R_I = (1 - x) \cdot w \cdot \cos(\theta) - (F_m + Q_r) \cdot \frac{h}{l} \quad (27)$$

$$R_{II} = x \cdot w \cdot \cos(\theta) + (F_m - Q_r) \cdot \frac{h}{l} \quad (28)$$

onde,

$x$ : parcela de carga sobre o eixo traseiro;

$w$ : peso do veículo [N];

$\theta$ : ângulo de inclinação da pista [°];

$h$ : altura do centro gravitacional;

$l$ : entre eixos.

### 2.1.5 Análise pelo método dos elementos finitos

Uma das atividades mais importantes de um engenheiro é a capacidade de dimensionar sistemas de forma correta, sejam estes estruturais, térmicos, do fluxo de fluidos, entre outros. Existem três formas de dimensionar um sistema, através dos cálculos analíticos, através das medidas em um sistema protótipo ou a utilização de programas capazes de simular as situações a ele impostas. Porém, vários dos problemas de engenharia são extremamente complexos de resolver, ou alguns,

chegam a níveis quase impossíveis de analisar pelo método analítico (FENNER, 1975).

A análise por elementos finitos surgiu originalmente para a área de análise estrutural de sistemas aeroespaciais. Hoje em dia, este tipo de análise é muito difundido entre engenheiros mecânicos, principalmente para a análise de componentes sólidos (FENNER, 1975).

Para Shigley (2016), a análise por elementos finitos divide estruturas elásticas contínuas em uma estrutura de pequenas, porém, finitas e bem definidas subestruturas elásticas, as quais são denominadas como elementos.

Segundo Logan (2007), o método de elementos finitos utiliza uma notação de matrizes para simplificar a formulação das equações de rigidez de um elemento. Desta forma, é possível de resolver vários conjuntos de equações algébricas simultaneamente de forma simples e com notação fácil de ser utilizada, principalmente na área de programação. Então, é possível definir duas matrizes, onde a matriz  $\underline{F}$  corresponde as componentes de força aplicadas no componente e a matriz  $\underline{d}$  os deslocamentos nos nós dos elementos. A Figura 22 demonstra a forma genérica dessas matrizes.

**Figura 22 - Matriz força e deslocamento genéricas do MEF**

$$\{F\} = \underline{F} = \begin{pmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{1z} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \\ F_{2z} \\ \vdots \\ F_{nx} \\ F_{ny} \\ F_{nz} \end{pmatrix} \quad \{d\} = \underline{d} = \begin{pmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ d_{1z} \\ d_{2x} \\ d_{2y} \\ d_{2z} \\ \vdots \\ d_{nx} \\ d_{ny} \\ d_{nz} \end{pmatrix}$$

**Fonte: Logan (2007)**

As letras a direita dos termos F e d nas matrizes representam respectivamente o nó ao qual a condição é aplicada e quando a direção da força ou deslocamento do nó.

As forças são proporcionais ao deslocamento nodal dos elementos, onde a proporcionalidade entre essas duas matrizes é descrita por outra matriz, denominada matriz  $\underline{K}$ , onde esta representa os coeficientes de influência da rigidez.

$$\underline{F} \propto \underline{d} \quad (29)$$

$$\underline{F} = \underline{K} \cdot \underline{d} \quad (30)$$

A equação 30 é denominada como equação da rigidez global, onde utilizando a notação de matriz, a Figura 23 demonstra a notação genérica das matrizes utilizadas para resolução do método.

**Figura 23 - Equação 30 em notação de matriz**

$$\begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ \vdots \\ F_{nz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & & & \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ \vdots \\ d_{nz} \end{Bmatrix}$$

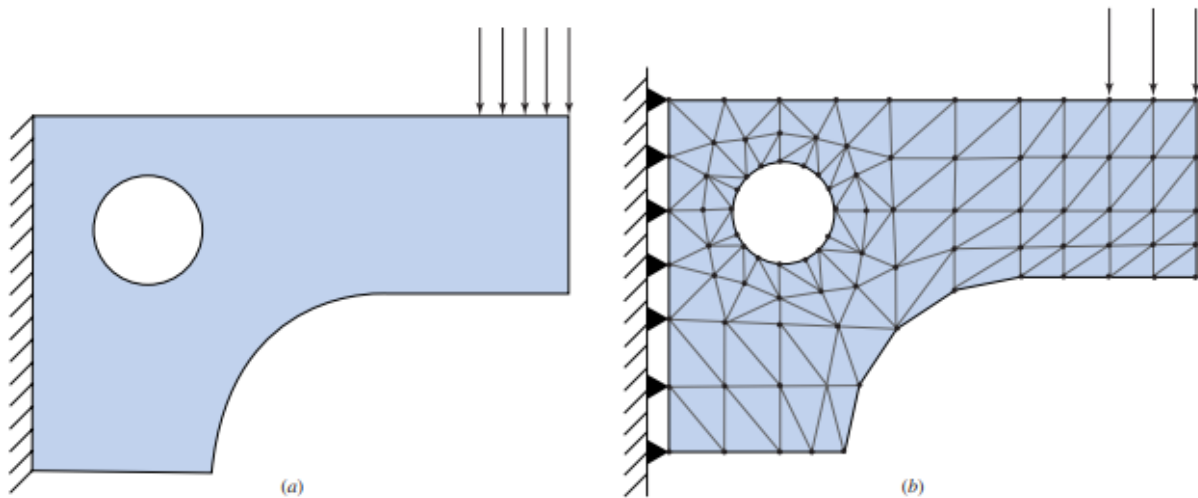
**Fonte: Logan (2007)**

Segundo Logan (2007), as principais vantagens deste método são a facilidade de modelar peças irregulares e complexas, suporte de condições de carregamentos gerais sem dificuldades, possibilidade de incluir efeitos dinâmicos e a capacidade do método resolver sistemas com quantidades ilimitadas de condições de contorno, entre outras.

Para os diferentes problemas, existem diferentes módulos de solução, porém como o presente estudo se trata de uma abordagem mecânica, as condições dos outros sistemas não serão apresentadas neste pois esses fogem do escopo do estudo.

A análise estrutural requer alguns elementos e passos a serem tomados antes de ser resolvida, os quais serão apresentados nos tópicos a seguir. A Figura 24 mostra a interpretação de um modelo idealizado de um problema comparado à lógica aplicada no método de elementos finitos, onde é possível ver que existe uma malha no sólido a ser analisado e condições de contorno (neste caso a aplicação das forças e reações) são aplicadas nos nós da malha.

Figura 24 - Problema estrutural. (a) Modelo idealizado; (b) modelo dos elementos finitos



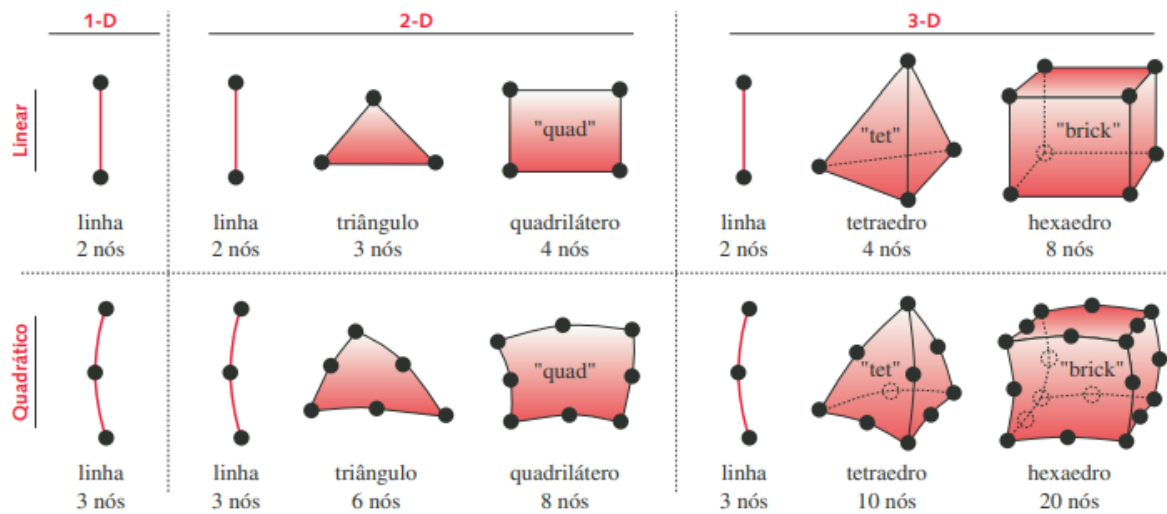
Fonte: Shigley (2016)

#### 2.1.5.1 Elementos de malha

A malha é formada por uma quantidade finita de elementos, onde estes podem ter suas formas e tamanhos definidos pelo usuário do programa. A malha é uma informação muito importante, pois esta está diretamente ligada à precisão da simulação (ADAMS; ASKENAZI, 1999). Quanto mais nós e elementos a malha possuir, mais próximo do resultado real o valor será, porém, mais capacidade computacional é necessária para simular o sistema.

Os elementos podem ser divididos em três tipos, os unidimensionais, bidimensionais e os tridimensionais. Estes, possuem diferentes formas, graus de liberdade, podem ser lineares ou quadráticos, os quais influenciam na ordem de interpolação do elemento (NORTON, 2013). A Figura 25 mostra os diferentes elementos de malha que podem ser utilizados na modelagem dos sistemas de simulação.

Figura 25 - Tipos de elementos de malha



Fonte: Norton (2013)

### 2.1.5.2 Condições de contorno

Em todos os sistemas matemáticos, as condições de contorno são um fator muito importante, pois a incorreta definição destes resulta em um resultado errôneo e as soluções podem ser divergentes.

Segundo Norton (2013), as condições de contorno têm o objetivo de representar ao programa de forma simples e objetiva, quais são as restrições que o sistema deve obedecer para resolver as suas incógnitas. Tais condições incluem restrições de movimentos ou movimentos específicos.

Outro fator que influencia nas condições de contorno são os pontos de contato entre diferentes peças, que dita qual será o comportamento que o programa deverá ter sobre a interação destas peças na solução do sistema.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como o veículo será utilizado exclusivamente com função competitiva, algumas condições de contorno e iniciais podem ser retiradas das regras da competição, as quais estão presentes nas seções 2.3.1 e 2.3.2, onde estas tratam dos artigos que regem as regras para que a equipe e o veículo possam competir. Uma informação importante para o presente estudo é a consistência das medidas mínimas, ou seja, se as dimensões mínimas necessárias mudaram muito com o passar das edições da competição. Este dado é importante pois o estudo do chassi terá como base estes valores, ou seja, se os valores mudarem e as medidas não forem atendidas, o presente estudo terá seu objetivo altamente afetado.

A Tabela 2 mostra a variação dos valores de forma sucinta para fácil comparação de dados. Estes valores foram retirados das regras oficiais fornecidas pela Shell nos respectivos anos das competições. Vale lembrar que devida à pandemia da Covid-19, no ano de 2020 não foi realizada a competição e no ano de 2021 as regras foram fornecidas, porém, assim como no ano anterior, a competição não aconteceu, então, os valores serão utilizados para comparação.

**Tabela 2 - Comparação dos dados do artigo referente às dimensões Shell Eco Marathon**

Dados	Shell Eco Marathon		
	2018	2019	2021
Altura Total (mm)	$1000 \leq H \leq 1300$	$1000 \leq H \leq 1300$	$1000 \leq H \leq 1300$
Largura Total (mm)	$1200 \leq W \leq 1300$	$1200 \leq W \leq 1300$	$1200 \leq W \leq 1300$
Compri. Total (mm)	$2200 \leq L \leq 3500$	$2200 \leq L \leq 3500$	$2200 \leq L \leq 3500$
Entre rodas dianteiro (mm)	$1000 \leq E_{rd}$	$1000 \leq E_{rd}$	$1000 \leq E_{rd}$
Entre rodas traseiro (mm)	$800 \leq E_{rt}$	$800 \leq E_{rt}$	$800 \leq E_{rt}$
Entre eixos (mm)	$1200 \leq E_e$	$1200 \leq E_e$	$1200 \leq E_e$
Altura mínima da cabine (mm)	$H_{cab} \leq 880$	$H_{cab} \leq 880$	$H_{cab} \leq 880$
Largura mínima da cabine (mm)	$W_{cab} \leq 700$	$W_{cab} \leq 700$	$W_{cab} \leq 700$

Distância do solo do veículo até o chão (mm)	$H_s \leq 100$	$H_s \leq 100$	$H_s \leq 100$
Massa máxima sem piloto (kg)	$m \leq 225$	$m \leq 225$	$m \leq 225$

Fonte: Autoria própria (2021)

A medida de largura mínima da cabine, denominada como  $H_{cab}$  na Tabela 2, corresponde a medida na altura dos ombros do piloto. Esta informação é mais importante para a área responsável pela fabricação das carenagens do veículo.

Percebe-se assim, que nas últimas três edições da competição, as medidas não sofreram alterações e que estas podem ser levadas como base dos cálculos iniciais para a primeira iteração do chassi.

### 3.1 Dados do chassi

#### 3.1.1 Tipo do chassi

Foram apresentados anteriormente alguns tipos de chassi que podem ser considerados para a fabricação, porém, um destes deve ser escolhido e para o início das análises.

Pode-se começar desconsiderando o tipo monocoque, pois este envolve uma fabricação muito complexa, visto que o chassi deve ser feito em somente uma peça laminada em fibra de carbono, a qual necessita moldes de boa qualidade, bombas para a geração de vácuo para o processo de *vacuum bagging*, além da complexidade da geometria e do alto custo envolvido no processo de fabricação.

Segundo a equipe *Supermileage* (2009), o chassi tubular apresenta poucos pontos positivos em comparação ao *backbone*, onde alguns destes pontos positivos estão presentes em ambos os tipos, alguns destes pontos são a facilidade de análise, o custo e a capacidade de reparo. Em contra partida, o chassi tubular possui várias partes, o que aumenta o peso final do componente, assim como a complexidade de fabricação. Além disto, pela maior quantidade de peças, os pontos de solda a mais podem trazer outros problemas como fragilização ou a deformação devido ao aquecimento das peças durante o processo de soldagem.



Levando em consideração que o chassi deve ser leve e que o veículo atingirá velocidade máxima em torno de 40 km/h, o chassi tipo escada se mostra adequado para o caso de estudo inicial, visto que este estilo de chassi foi desenvolvido pensando em suportar altos esforços em baixas velocidades. Aliado ao conceito inicial do chassi escada, o fato deste possuir menos elementos estruturais e estes elementos poderem ter geometria simples torna o processo de fabricação e reparo do chassi simples, econômico e rápido enquanto resultando em um produto leve.

### 3.1.2 Material do Chassi

Vários materiais podem ser aplicados na construção de um chassi, onde as contam com as melhores razões entre peso e propriedades mecânicas, tais como rigidez e resistências. A Tabela 3 mostra os valores genéricos para algumas ligas e materiais.

Material	Tensão de escoamento	Tensão limite de resistência	Módulo elástico	Densidade
	MPa	MPa	GPa	kg/m <sup>3</sup>
Fibra de Vidro	--	675	25	0,25
Fibra de Carbono	--	5000	142	0,175
AISI 1020	240	430	190	7900
AISI 6061-T6 <sup>1</sup>	276	310	69	2640
AISI 7075-T6 <sup>1</sup>	480	560	70	3000

**Fonte: Adaptado de SuperMileage (2009) Team e Makeitfrom.com (2021)**

Como pode ser observado, o melhor material para fabricar o chassi seria a fibra de carbono, porém, como citado anteriormente, devida a complexidade e custos para uma fabricação deste porte, será adotada a liga AISI 6061-T6<sup>1</sup> como base para fabricação, visto que esta já foi utilizada no protótipo da equipe, é mais barata e mais fácil de encontrar em comparação a liga AISI 7075-T6<sup>1</sup>. A liga AISI 1020 é uma liga de aço carbono muito utilizada na indústria, porém, na tabela acima esta foi utilizada somente como comparação. Percebe-se o porquê não utilizar tal para a fabricação de um veículo que deve ser leve para competições com motores de baixa potência, pois ela possui tensão de escoamento menor do que as outras ligas comparadas e é muito

<sup>1</sup> Tratamento térmico T6 consiste na solubilização da liga e envelhecimento à 120°C por 24 horas.

densa, resultando em um componente mais pesado se comparado as outras ligas apresentadas na Tabela 3.

Uma desvantagem a ser considerada ao utilizar as ligas de alumínio (AISI 6061 e 7075) é o baixo módulo elástico destas se comparadas à fibra de carbono e ao AISI 1020. Isso indica que ao aplicar as forças no chassi, as ligas de alumínio sofrerão mais deformação se comparadas ao AISI 1020 e a fibra de carbono e isso pode ser um fator que determinará uma possível troca de material do chassi.

### **3.2 Caso de análise**

O caso da análise é composto pelas condições as quais o estudo será feito. Este, leva em consideração vários fatores em que o pesquisador determina quais são as condições as quais o estudo irá acontecer. Neste caso, o veículo será utilizado em um ambiente de competição com pista fechada, ou seja, as condições de conservação do asfalto são superiores aos pavimentos encontrados no dia-a-dia, desta forma, desconsideram-se efeitos de possíveis buracos, ondulações e obstáculos no asfalto, os quais perturbam a estabilidade do veículo.

As velocidades máximas atingidas na competição ficam em torno de 38 km/h segundo membros da Pato a Jato que já participaram de uma ou mais competições, onde este valor foi fornecido por outras equipes que já competem na categoria conceito urbano e pela organização do evento. Sendo assim, este valor será considerado para o caso de análise, onde o mesmo se encontra em movimento retilíneo uniforme, desta forma, a aceleração do veículo é nula. Segundo Gunadi e Fergianto (2020), alguns estudos e pesquisas aerodinâmicas feitas pelos autores foram utilizadas velocidades entre 20 e 40 km/h, o qual está de acordo com o valor que será utilizado para a análise.

Quanto a inclinação da pista, como o veículo não competirá apenas em uma pista, será considerada uma inclinação longitudinal máxima de 15 graus. Esse valor leva em consideração as inclinações encontradas nas ruas do Brasil e dos Estados Unidos da América. Já em relação à inclinação transversal, essa será desconsiderada, visto que relatos dos membros da Pato a Jato, a maioria das pistas onde a competição já aconteceu possui grau de inclinação lateral próxima a 0°.

### 3.3 Geometria do chassi

#### 3.3.1 Centro gravitacional

Com o tipo do chassi definido e com as informações da Tabela 2, é possível começar os cálculos que irão estimar os esforços sofridos na estrutura, assim, o dimensionamento dos elementos estruturais pode ser feito.

Para iniciar estes cálculos, faz-se necessário conhecer os valores dos esforços que o veículo irá sofrer, sendo assim, pode-se começar os cálculos pelas resistências descritas nos capítulos anteriores, porém, anterior a estes cálculos, é necessário o conhecimento do centro gravitacional do veículo, o qual terá uma grande importância nas estimativas de forças, e conseqüentemente, na dinâmica do veículo.

Inicia-se pela definição dos esforços no diagrama de corpo livre do chassi, para isso, algumas informações devem ser assumidas para que os cálculos possam começar a serem feitos. Uma destas informações é a distribuição de peso na parte dianteira e traseira do veículo, que será definida inicialmente como 30% do peso no eixo dianteiro e 70% no eixo traseiro. Esta informação está sendo estimada a partir da existência de uma parede corta fogo entre a cabine do piloto e o *powertrain*, e também está levando em conta uma aproximação do posicionamento do motor, que ficará na parte de trás do veículo, assim como todo o conjunto do *powertrain*, além destes, estima-se que o torso do piloto estará mais próximo ao eixo traseiro do veículo, assim, a maior parte da reação do peso do piloto também estará presente no eixo traseiro. Observando a Tabela 2, é possível retirar valores de entre eixo de 1200 mm e peso total do veículo sem passageiro de 225 kg, assim, possibilitando os cálculos para estimar uma posição do centro gravitacional do veículo. Para o chassi, será considerado 150 kg de massa inicial total, reservando 75 kg limite para os outros sistemas do veículo, e no futuro, serão estudadas melhorias neste projeto de chassi.

As equações 28 até 33 contém as condições necessárias em forma matemática e a demonstração dos cálculos que mostram essas distâncias, que estão mostradas na Figura 9. Definindo o sistema de coordenadas dos cálculos com eixo das abscissas positivo para a direita e o eixo das ordenadas positivos para cima, assim como o ângulo Theta ( $\theta$ ) igual a 0 graus. Para melhor entendimento dos cálculos, também se faz necessária a definição de duas variáveis, RD e RT, que representam, respectivamente, a força normal em cada roda do veículo.

A estimativa da massa total do veículo pode ser separada em quatro valores, sendo estes, a massa do chassi (definida inicialmente como 80 kg), massa do *powertrain* e componentes eletrônicos (definida como 15 kg), massa do piloto (definido para casos extremos como 80 kg) e a massa da carenagem (definida inicialmente como 25 kg). Desta forma, estes valores serão estimados a partir de medições feitas no protótipo atual da equipe, e além disto, será considerado um valor um pouco maior com a justificativa de se ter um coeficiente de segurança sobre estes valores. Faz-se então:

$$\theta = 0^\circ, W_f = 2R_D, W_r = 2R_T, L = 1200 \text{ mm}, g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$m_{TOTAL} = m_{chassi} + m_{p,e} + m_{piloto} + m_{carenagem}$$

$$m_{TOTAL} = 80 + 15 + 80 + 25 \text{ [kg]} \therefore m_{TOTAL} = 200 \text{ kg}$$

$$\sum f_y = 0$$

$$2R_D + 2R_T - m \cdot g = 0 \quad (31)$$

$$\sum M_{CG} = 0$$

$$2R_D \cdot b - 2R_T \cdot c = 0 \quad (32)$$

Utilizando as equações 31 e 32, pode-se resolver o sistema da equação 33 pelo método de Gauss.

$$\begin{cases} 2R_D + 2R_T = m \cdot g \\ 2R_D \cdot b - 2R_T \cdot c = 0 \end{cases} \quad (33)$$

Tem-se então a resolução das distâncias por:

$$c = \frac{2 \cdot R_D \cdot L}{m \cdot g}, R_D = \frac{0,3}{2} \cdot m \cdot g \therefore c = 360 \text{ mm} \quad (34)$$

$$L = b + c \rightarrow b = L - c \therefore b = 840 \text{ mm} \quad (35)$$

Sendo assim, tem-se a estimativa do posicionamento do centro gravitacional do veículo no eixo x.

Agora, é possível determinar as reações nas rodas do veículo, seguindo a Figura 12, da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\sum M_B &= 0 \\ 2R_T \cdot (b + c) - m \cdot g \cdot b &= 0 \\ R_T &= \frac{m \cdot g \cdot b}{2(b + c)} \therefore R_T \approx 686,7 \text{ N}\end{aligned}\quad (36)$$

$$\begin{aligned}\sum f_y &= 0 \\ 2R_D + 2R_T - m \cdot g &= 0 \\ R_D &= \frac{m \cdot g}{2} - R_T \therefore R_D \approx 294,3 \text{ N}\end{aligned}\quad (37)$$

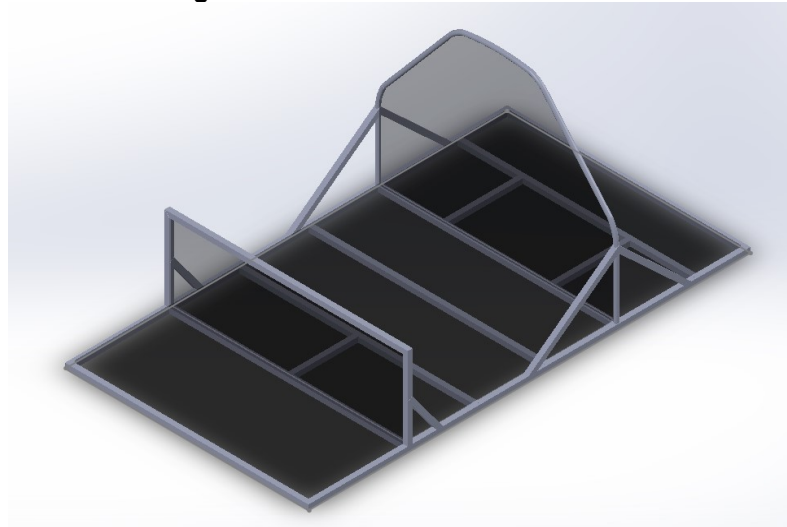
Sabendo destas variáveis, deve-se estimar a altura do centro gravitacional, ou seja, posição do centro gravitacional no eixo y, porém, esta estimativa é complexa de ser efetuada pois as equações que descrevem as forças no diagrama de corpo livre neste caso não são suficientes para resolução de todas as incógnitas, então, a adição de um ângulo de inclinação na análise dos esforços no veículo torna este método impossível de ser praticado quando ainda não existe um protótipo inicial para realizar as medições das reações nas rodas do mesmo.

Para solucionar este problema, pode-se adotar algumas alternativas para estimar um valor inicial como primeira iteração, como por exemplo, o projetista pode fixar o centro gravitacional do veículo em um ponto desejado e trabalhar o projeto em torno deste objetivo, ou também, posicionar todas as massas em um esboço do veículo, já sabendo quais são as medidas destes, como por exemplo, posição do piloto ao dirigir o veículo, posição do *powertrain*, entre outros. Porém, é importante deixar relatado neste documento que, após a produção do chassi, este deve ter suas medidas verificadas para identificação correta da posição do centro gravitacional.

### 3.3.2 Geometria

Como mencionado anteriormente, o chassi será baseado no tipo escada. A Figura 26 é uma representação da primeira ideia do chassi. Esta ainda não possui medidas definidas, pois foi uma etapa de projeto conceitual já desenvolvido e documentado dentro da equipe Pato a Jato.

**Figura 26 - Chassi escada conceitual**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

Com este modelo inicial, pode-se fazer algumas considerações sobre este para se ter uma forma mais próxima ao real, visto que esta teve apenas cunho visual para apresentação da proposta, porém, este modelo já foi baseado em chassi de outras equipes, as quais já documentaram o processo de desenho destas.

Verificando as regras da competição, é possível perceber que o chassi pode ter três larguras diferentes, sendo estas, dianteira, central e traseira. Diante destas informações, o chassi possuirá duas dimensões diferentes, uma correspondente a parte frontal do veículo e a cabine e a outra, a parte traseira, onde o *powertrain* irá ficar.

Com esta informação, pode-se começar a modelagem da geometria do chassi. Após esta completa, deve-se determinar qual perfil será utilizado pois assim, pode-se ter as primeiras estimativas de características do chassi, como por exemplo, a massa total do componente.

Uma informação importante que o programa de modelagem fornece ao final da modelagem com o perfil aplicado à geometria é uma estimativa do centro gravitacional do sólido, neste caso, do chassi. Este valor será adotado para fins das estimativas das reações onde o conhecimento da altura do CG seja necessária.

No modelo do chassi, algumas observações devem ser feitas antes da fabricação deste.

- i. A geometria da estrutura da parede corta fogo além das estruturas em forma de “T” nas laterais do veículo, devem ser alteradas para

que a fixação com a carenagem seja feita de forma correta, uma vez que esta for definida;

- ii. Como a direção e o *powertrain* ainda não possuem projetos conceituais e valores determinados, uma vez que estes forem definidos, o chassi pode sofrer algumas alterações afim de acomodar estes sistemas sobre ele, e ainda, as regulamentações da competição devem ser seguidas nestas alterações.

Para concluir a modelagem inicial deve-se saber qual será o perfil utilizado no chassi do veículo. Desta forma, as Equações 38 a 41 (Hibbeler, 2010) devem ser utilizadas pois estas descrevem as tensões sofridas no sólido de forma genérica. Estas são, respectivamente, a tensão normal, tensão cisalhante, tensão de torção e tensão de flexão.

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad (38)$$

$$\tau_c = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \quad (39)$$

$$\tau_n = \frac{T \cdot c}{J_o} \quad (40)$$

$$\sigma_f = \frac{M \cdot y}{I} \quad (41)$$

onde:

F: força normal;

A: área [mm<sup>2</sup>];

V: força cisalhante atuando na seção [N];

Q: primeiro momento de inércia [mm<sup>3</sup>];

I: momento de inércia [mm<sup>4</sup>];

t: espessura da área que o cisalhamento está sendo calculado [mm];

T: torque na seção [N.mm];

c: raio do sólido [mm];

J<sub>o</sub>: momento polar de inércia [mm<sup>4</sup>];

M: momento fletor na seção [N.mm];

y: distância entre o ponto calculado (superfície) até a linha neutra [mm].

Percebe-se que quanto maior o momento de inércia e o momento polar de inércia do perfil, menor é a tensão sofrida no material. Sendo assim, pode-se definir qual será o perfil utilizado no chassi. Comparando os perfis tipo I, C e quadrado oco, além da observação em chassi de veículos já fabricados, foi decidido utilizar o perfil quadrado oco, pois este além de possuir o maior momento de inércia entre os três, também é muito utilizado na fabricação de chassi para veículos comerciais.

Sabendo que o perfil será quadrado oco, faz-se então a coleta dos dados comerciais para que as medidas possam ser utilizadas para determinação dos momentos de inercia e assim, estimar os valores de tensões das equações 38 a 41.

**Figura 27 - Perfil quadrado oco**



**Fonte: Leroy Merlin (2022)**

Em análise inicial, o ponto de mais esforço será onde a força é considerada como atuante, ou seja, a distância  $b$  (estimada na Equação 35), pois neste ponto, o momento fletor é o maior em todo o chassi. Como para este caso inicial o veículo é uma viga, pode-se considerar que a tensão será puramente fletora, ou seja, só a equação 36 será utilizada para estimar se o perfil selecionado é adequado. Faz-se então a determinação do momento de inércia do perfil selecionado, que neste caso é quadrado oco 38,1 x 38,1 x 1,3 mm.

Sendo a espessura 1,3 mm, temos que a medida de largura e altura que compõe a parte oca do perfil é de 35,5 mm, então:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{c \cdot i^3}{12}, b = h = 38,1 \text{ mm}, c = i = 35,5 \text{ mm} \quad (42)$$

$$I = 43245,13 \text{ mm}^4$$



Agora é possível utilizar a equação 41 para estimar a tensão fletora que acontecerá neste ponto.

$$\sigma_f = \frac{M \cdot y}{I}, M = 494424 \text{ N} \cdot \text{mm}, y = 19,05 \text{ mm}$$

$$\sigma_f = 217,8 \text{ MPa}$$

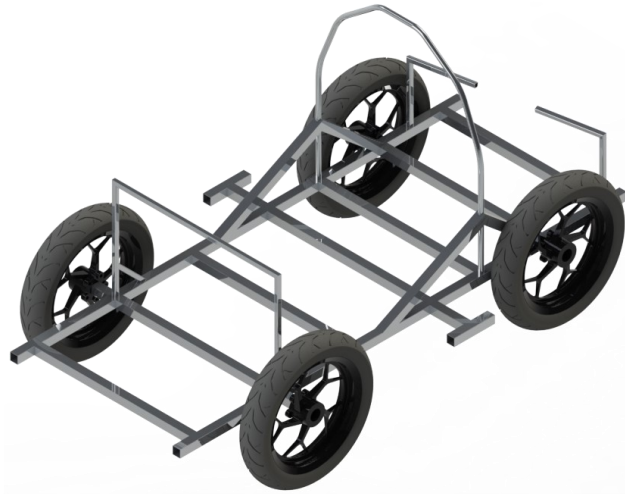
É muito importante notar que este valor é calculado para um elemento estrutural do tipo viga bi apoiada, ou seja, desconsidera todos os pontos de dissipação de tensão no próprio chassi, além disto, este é um valor inicial para averiguar de forma prévia se é necessário alterar a geometria do perfil.

Sabendo o valor da tensão, agora é possível determinar o material de fabricação do chassi. Neste caso, a liga de alumínio AISI 6061-T6 será utilizada para o estudo, visto que esta liga possui ótimas propriedades mecânicas e é muito utilizada na fabricação de estruturas de transporte, andaimes e engenharia em geral.

Segundo a Império dos metais, empresa de comercio de metais de São Paulo, eles conseguem entregar uma liga com limite de resistência mecânica de 300 MPa e resistência ao escoamento de 255 MPa. Levando em consideração estas informações, é possível observar que a tensão de flexão está abaixo da tensão de escoamento, então, a liga AISI 6061-T6 pode ser utilizada para prosseguir o estudo, porém, os valores das deformações no chassi ainda são parâmetros importantes a serem observados e esses podem invalidar a decisão da utilização desta liga para fabricação do chassi. A análise pelo método dos elementos finitos irá estimar os valores das deformações no chassi, os quais deverão ser analisados e assim, deverá ser verificada a possibilidade da utilização desta liga. Sendo assim, é possível fazer a modelagem CAD do chassi em sua versão inicial.

A modelagem trouxe algumas estimativas importantes para as estimativas posteriores. Estes valores são a massa do chassi, a qual foi estimada como aproximadamente 8,72 kg e a altura do centro gravitacional do chassi de 102,81 mm. Desta forma, utilizando rodas de aro 17, a altura do CG que será utilizado será:

**Figura 28 - Montagem do chassi com rodas R17**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

**Figura 29 - Propriedades estimadas do chassi**

Center of mass: ( millimeters )  
 X = 59.29  
 Y = 328.03  
 Z = -16.50

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Da Figura 29 o dado importante é a estimativa da altura, ou seja, o valor de CGY. Como a roda tem centro de massa no seu eixo de rotação, a massa do chassi é elevada pela altura do raio da roda. Os outros valores estão relacionados com os planos da montagem, que foram utilizados afim de obter a total definição da montagem, por isto estes podem ser ignorados.

Assim, antes de levar esta como a geometria final, deve-se estimar os esforços dinâmicos envolvidos no caso.

### 3.3.3 Esforços dinâmicos

Para entrar dentro das condições de estudo de caso, deve-se começar a estimar os esforços atuantes no veículo conforme as premissas estipuladas anteriormente. Cada condição de inicial ou de contorno será mencionada quando esta for utilizada novamente. É importante lembrar que os cálculos feitos a partir de agora levarão em consideração a dinâmica do veículo.

### 3.3.3.1 Esforços longitudinais

#### 3.3.3.1.1 *Resistência ao rolamento*

Como comentado anteriormente, a estimativa da resistência ao rolamento envolve várias variáveis, sendo assim, a Tabela 1 fornece alguns valores de coeficiente de resistência ao rolamento que podem ser utilizados. Neste caso, o coeficiente será igual a 0,015 pois este corresponde ao movimento de um carro de passageiros em contato com pavimentos duros, como asfalto e concreto. Assim, será feito:

$$R_r = f \cdot w, f = 0,015, w = m \cdot g$$

$$R_r = f \cdot m \cdot g [N]$$

$$R_r = 0,015 \cdot 128,72 \cdot 9,81 [N] \therefore R_r = 18,95 N$$

#### 3.3.3.1.2 *Resistência devida à inclinação da pista*

Para o caso mais extremo de inclinação da pista, será utilizada a angulação de 15 graus. Vale lembrar que este valor nem sempre será atingido, visto que depende de onde a competição estará acontecendo. Utilizando a equação 12, é possível determinar qual é o valor desta força, que nada mais é do que a componente horizontal do peso do veículo quando este estiver no terreno inclinado.

$$R_g = w \cdot \text{sen}(\theta), w = m \cdot g, \theta = 15^\circ$$

$$R_g = 128,72 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \text{sen}(15^\circ) \therefore R_g = 326,83 N$$

#### 3.3.3.1.3 *Resistência inercial*

A resistência inercial pode ser calculada através da equação 13, a qual nada mais é do que a segunda lei de Newton. Como parâmetros da equação, será utilizada a massa corrigida do veículo após os cálculos do chassi, o qual retorna um valor de massa de 128,72 kg e a aceleração para este caso será considerada a variação de aceleração até a velocidade máxima do veículo em 7 segundos, tempo médio cronometrado da aceleração do protótipo Popygua, onde a ideia inicial é utilizar um motor do mesmo modelo no conceito urbano e a massa entre os veículos é próxima (massa do Popygua com piloto é de aproximadamente 110 kg). Esta resistência será calculada da seguinte forma.

$$\Delta v = 37 \frac{km}{h} = 10,28 \frac{m}{s}$$

$$R_{it} = m \cdot a, a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(10,28 - 0)m}{(7 - 0)s * s} \therefore a = 1,467 \frac{m}{s^2}$$

$$R_{it} = 128,72 \cdot 1,467 N \therefore R_{it} = 189,03 N$$

#### 3.3.3.1.4 Resistência mecânica

Como esta resistência não é medida em forma de força e sim em forma de potência, este cálculo seria utilizado diretamente no dimensionamento do *powertrain*, onde uma análise energética deve ser feita, porém, este valor pode ser estimado aqui como título de curiosidade. Utilizando como base o motor HONDA™ GX 50, motor este que foi cogitado para o *powertrain* do veículo, tem a potência divulgada pelo fabricante de 1,6 kW à 700 rpm. Levando em consideração 15% de perda das transmissões dos veículos comerciais, para este caso, tem-se aproximadamente uma potência líquida de:

$$P_c = 1,6 kW \cdot (1 - 0,15) \therefore P_c = 1,36 kW$$

A perda de potência estimada é de 240 W, porém, vale lembrar que o sistema do *powertrain* do conceito urbano é muito mais simples do que o sistema de um carro tradicional, sendo assim, este valor da perda de potência pode ser menor, quando o *powertrain* se encontrar em condições ideais de funcionamento.

#### 3.3.3.1.5 Resistência aerodinâmica

Esta resistência, também conhecida como força de arrasto, pode ser estimada através da equação 7. Esta resistência corresponde à força que o vento faz no veículo quando este está em movimento.

Para estimar esta força, deve-se conhecer algumas variáveis geométricas da carenagem do veículo. Como essa ainda não foi definida, a área utilizada será a de um quadrado correspondente ao tamanho máximo permitido pelo regulamento da competição, ou seja, um quadrado de área 1300 x 1300 mm. Para a velocidade, será adotada a velocidade de 37 km/h já utilizada anteriormente. Já para o coeficiente de

atrito, será utilizado o valor de um Volkswagen Gol G5, que, segundo Sousa (2013), é de 0,34.

$$D_A = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

$$D_A = \frac{1}{2} \cdot 0,34 \cdot 1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot (1,3^2) \text{ m}^2 \cdot 10,28 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$D_A = \frac{1}{2} \cdot 0,34 \cdot 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (1,3^2) \text{ m}^2 \cdot 10,28 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \therefore D_A = 37,2 \text{ N}$$

### 3.3.3.2 Esforços laterais

#### 3.3.3.2.1 *Inclinação lateral da pista*

Segundo membros da Pato a Jato, as pistas onde a competição acontece são majoritariamente no plano, salvo algumas exceções. Sendo assim, o valor de angulação da pista utilizado em um caso extremo será de 12°, este valor foi fornecido pela Nascar, que é uma angulação lateral média das pistas de corrida. Para comparação a este valor, eles também divulgaram o dado que em algumas pistas, como por exemplo, Talladega, a maior angulação lateral da pista chega a 33°. Sendo assim, pode-se estimar esta força através da Equação 18.

$$F_l = w \cdot \text{sen}(\alpha), \alpha = 12^\circ, w = 1262,75 \text{ N}$$

$$F_l = 1262,75 \cdot \text{sen}(12^\circ) [\text{N}] \therefore F_l = 262,54 \text{ N}$$

#### 3.3.3.2.2 *Força centrífuga*

Segundo a Equação 19, o raio da curva deve ser um valor conhecido, porém, como as velocidades são menores, as pistas também tem dimensões diferentes, como por exemplo, largura da pista menor e curvas com raio de curvatura menor. Para este caso, será utilizado o valor de uma curva de 6 metros de raio. Este valor está no artigo 47 do regulamento. Deve-se lembrar que o regulamento exige que o veículo faça uma curva com esta geometria para que o mesmo seja aceito na competição, porém, a velocidade do veículo é baixa.

Já para a variável de velocidade, será considerada uma curva feita à 10 km/h, visto que o raio de curva é extremamente baixo. Como esta variável está ao quadrado

na equação, isso representa um aumento brusco na força de reação da curva com pouco aumento de velocidade.

$$F_c = \frac{mv_t^2}{R}, v_t = 10 \frac{km}{h} = 2,78 \frac{m}{s}$$


$$F_c = \frac{128,72 \cdot 2,78^2 [N]}{6} \therefore F_c = 165,8 N$$

### 3.3.3.2.3 Força do vento

Como mencionado anteriormente, essa força tem a mesma forma da resistência aerodinâmica longitudinal, as diferenças são que, a área lateral do veículo é maior do que a área frontal, assim, esta força causa um efeito de guinada, facilitando a capotagem do veículo, mas, em contra partida, a outra diferença é que a velocidade do vento é geralmente muito mais baixa do que a velocidade do veículo, e isso diminui muito a influência desta força no veículo.

Assim como anteriormente, a área de ação do vento no veículo será estimada através das dimensões gerais dadas pelo regulamento e um coeficiente de atrito de 0,4 para carros de passeio, conforme mostrado na Figura 30.

**Figura 30 - Coeficiente aerodinâmico**

Formato	Descrição	Cx	Formato	Descrição	Cx
	Formato mais aerodinâmico	0,08		Caminhão	0,90
	Carro esporte	0,25		Ciclista em competição	0,90
	Semi-esfera face plana atrás	0,38		Cubo	1,05
	Carros de passeio	0,40		Placa quadrada	1,2
	Esfera	0,47		Semi-esfera face plana frontal	1,42
	Ônibus	0,70		Motociclista	1,8
	Cilindro vertical	0,90		Secção em C	2,3

Fonte: Adaptado de IFPR (2021)

Segundo Liberman, et al. (2002), a maior velocidade média do vento registrada no ano do estudo foi de 6,38 km/h. Pode-se então utilizar este valor para estimar uma força de reação que o veículo irá sofrer.

$$D_{Al} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^2; C_p = 0,4; A = 2,2 \text{ m}^2; v = 6,38 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 1,77 \text{ m/s}$$

$$D_{Al} = \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 2,2 \cdot 1,225 \cdot 1,77^2 \text{ [N]} \therefore D_{Al} = 1,7 \text{ N}$$

Como era esperado, este valor pode ser negligenciado devida a baixa influência deste sobre o veículo. Vale lembrar também que a carenagem não terá forma retangular, ou seja, o valor real desta resistência será ainda mais baixo.

### 3.3.3.3 Dinâmica vertical

No presente estudo não será feito o dimensionamento da suspensão do veículo. Como comentado anteriormente, o chassi do veículo será considerado como rígido e em estado estacionário, ou seja, não existe sistema de amortecimento, o qual iria aumentar o nível de complexidade do projeto. Além disto, vários estudos e fotos de outras equipes mostram que os veículos deles não possui sistema de suspensão.

#### 3.3.3.3.1 *Carga nos eixos do veículo quando em movimento*

Finalmente, na determinação de forças dinâmicas, deve-se estimar as forças atuantes nos eixos do veículo, visto que agora, as forças dinâmicas são conhecidas e estes valores podem ser considerados nas equações 27 e 28.

Para que o carro funcione de forma correta, a força motriz deve ser maior do que as forças de resistência, desta forma, a Força motriz  $F_m$  é descrita na Equação 25, a qual, após as estimativas feitas, resulta no seguinte valor:

$$F_m = R_g + R_r + R_{it} + D_A$$

$$F_m = 326,83 + 18,95 + 189,03 + 37,2 \text{ [N]} \therefore F_m = 572 \text{ N}$$

Desta forma, é possível estimar a carga dinâmica em ambos os eixos do veículo. Assumindo que 70% do peso estará na traseira do veículo, com massa total de 128,72 kg, resistência ao rolamento de 18,95 N, entre eixo de 1200 mm e altura do centro gravitacional de 328,03 mm. Primeiramente a carga no eixo dianteiro será estimada.

$$R_I = (1 - x) \cdot w \cdot \cos(\theta) - (F_m + Q_r) \cdot \frac{h}{l}$$

$$R_I = (1 - 0,7)128,72 \cdot 9,81 \cdot \cos(15^\circ) - (572 + 18,95) \cdot \frac{328,03}{1200} \therefore R_I = 209 \text{ N}$$

A carga no eixo traseiro é estimada da seguinte forma.

$$R_{II} = x \cdot w \cdot \cos(\theta) + (F_m - Q_r) \cdot \frac{h}{l}$$

$$R_{II} = 0,7 \cdot 128,72 \cdot 9,81 \cdot \cos(15^\circ) + (572 - 18,95) \cdot \frac{328,03}{1200} \therefore R_{II} = 1015,8 \text{ N}$$

Agora, faz-se a segunda iteração com os dados obtidos, desta forma, é possível ter uma ideia do que acontecerá mecanicamente no chassi e quais serão os estresses que este sofrerá. Para este caso, as equações 38 a 41 serão aplicadas novamente, mas desta vez, algumas forças foram estimadas, estas terão influência na tensão, a qual não será de pura flexão como admitido anteriormente.

Retornando ao passo da mecânica geral para ter uma ideia inicial de como estas forças dinâmicas atuam no estresse do chassi, tem-se que o maior momento fletor acontece em 840 mm e o valor é de 175,56 Nm, sendo assim, o ponto de análise mecânica acontecerá neste ponto para os valores dependentes do momento fletor.

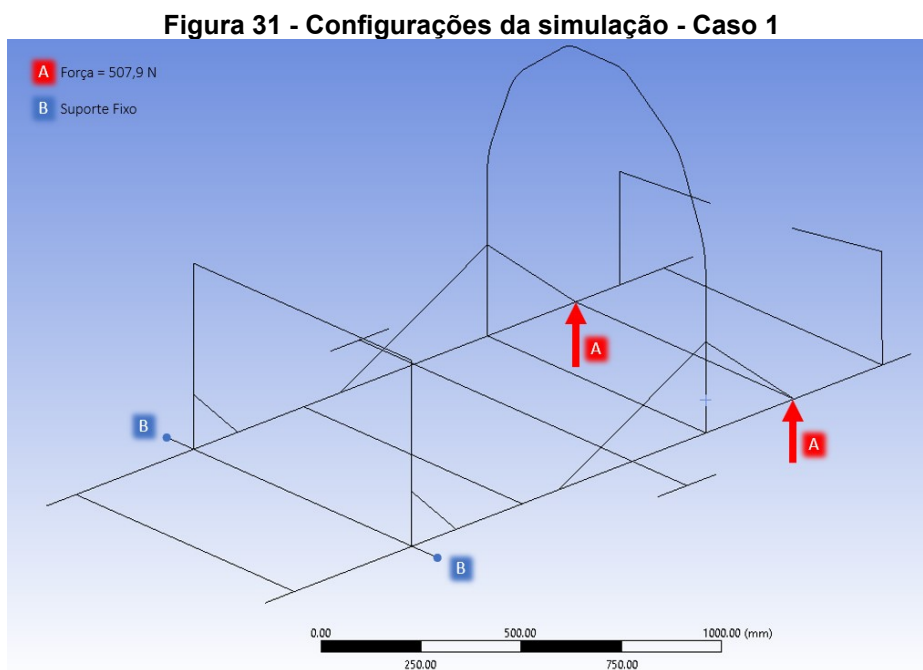


## 4 RESULTADOS

Com o carro em movimento retilíneo a uma velocidade de 38 km/h foi possível estimar as forças de movimento acima. Assim, foram feitos três casos de simulação para análise das tensões e deformações estimadas no chassi.

### 4.1 Caso 1

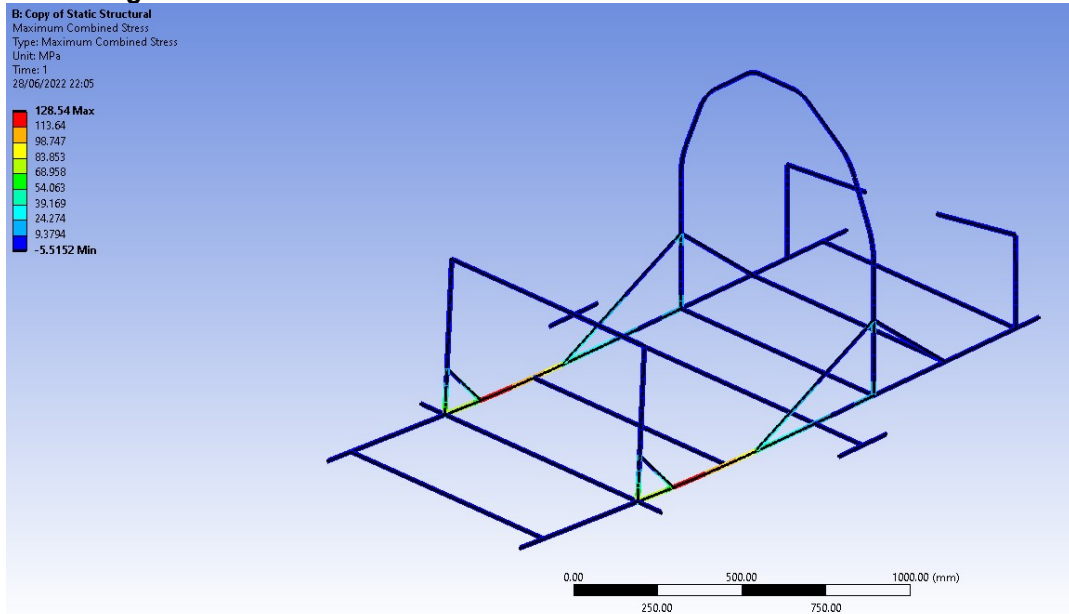
Toda simulação estática necessita de um ou mais pontos aos quais os valores de condição de contorno são iguais a zero, sejam estes, deformações, deslocamentos ou tensões, desta forma, um dos recursos disponíveis e que foi utilizado é o suporte fixo. Na Figura 31 é possível ver que no primeiro caso foram fixadas as rodas dianteiras do veículo, demonstrados pelos pontos B e representada pelas setas A é a componente de força  $R_{II}$  estimada anteriormente. Visto que o valor  $R_{II}$  representa a força peso ao qual o eixo traseiro estará sendo submetido quando o veículo estiver em movimento retilíneo uniforme a 38 km/h e o parâmetro para a simulação e a força em cada roda, deve-se dividir o valor de  $R_{II}$  e aplicar este valor nas rodas traseiras, isto é, 507,9 N em cada roda.



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Com estes parâmetros aplicados ao modelo de simulação, foi possível estimar um valor de tensão máxima de von Mises de 128,54 MPa utilizando o método dos elementos finitos, como mostrado na Figura 32.

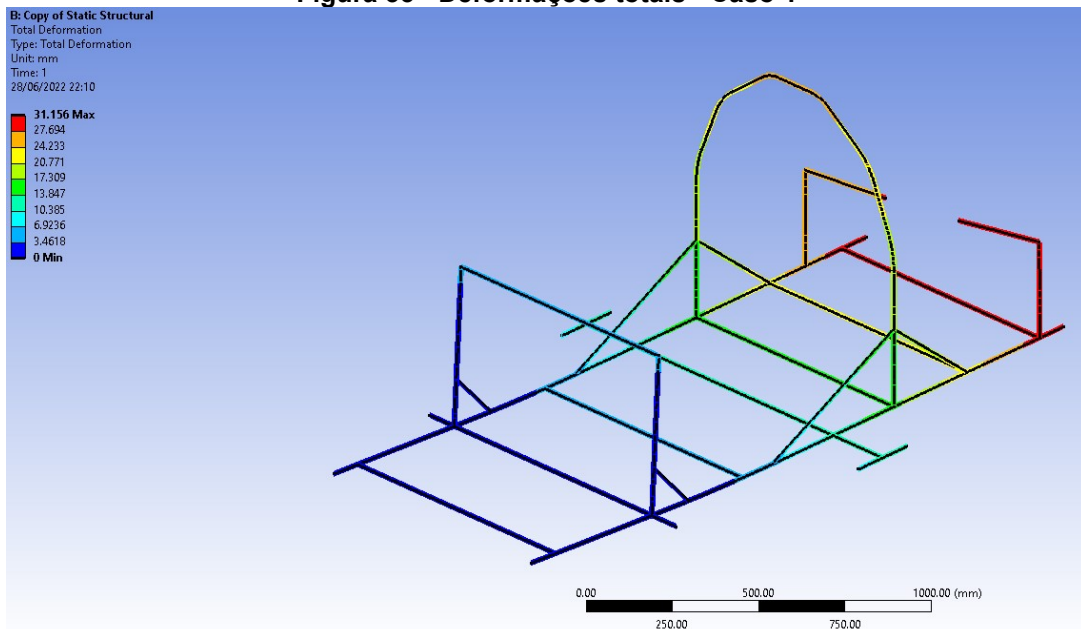
**Figura 32 - Tensões de von Mises do veículo em movimento – Caso 1**



Fonte: Autoria própria (2022)

Para este caso, é possível observar na Figura 33 que a maior deformação estimada foi de 31,156 mm na parte traseira do chassi.

**Figura 33 - Deformações totais - Caso 1**



Fonte: Autoria própria (2022)

Esta deformação não corresponde a um cenário real da movimentação do veículo, pois a fixação utilizada na configuração da simulação caracteriza este caso similar a uma viga engastada, onde as deformações são nulas nos pontos de apoio.

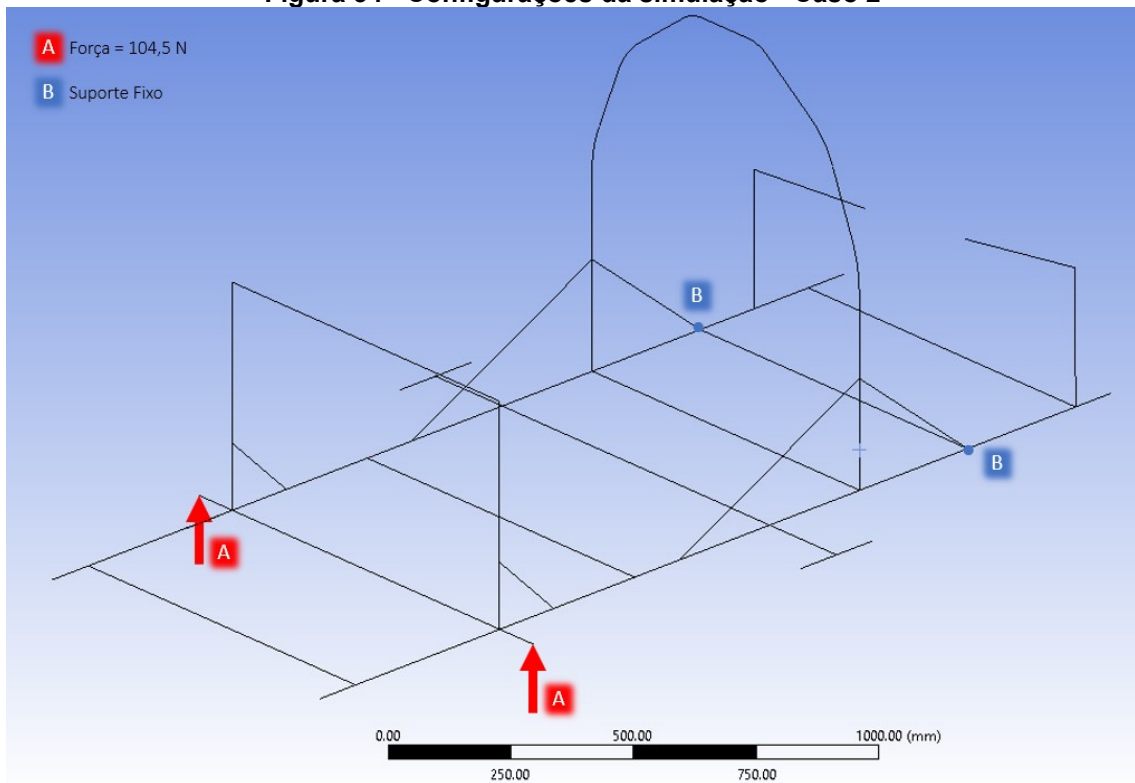
O que torna as deformações apresentadas inválidas para este caso de análise é a resistência ao momento fletor que a condição de suporte fixo impõe nas rodas dianteiras. Desta forma, caso seja desejado estimar as deformações no chassi do veículo este deve ser modelado como uma viga biapoiada, pois o chassi não resiste aos esforços de momento fletor de forma similar a um elemento estrutural engastado. Considerando esta análise, o caso 3 será utilizado para estimativa das deformações do material definido para o presente estudo.

O caso das deformações apresentadas na Figura 33 representam as deformações genéricas consideradas verdadeiras no momento de uma colisão do veículo com um corpo que absorveria toda a energia do impacto sem se deslocar, como por exemplo, uma colisão entre o veículo e uma coluna de uma edificação. Neste caso, pode-se dizer que a forma da deformação do veículo no momento do impacto seria esta, ou seja, a parte dianteira do veículo teria deslocamento nulo e a parte de trás sofreria toda a deformação do impacto. Para isto, deve-se calcular as forças que o chassi sofreria no impacto e estes valores devem ser utilizados na configuração da simulação, gerando um novo caso de análise, o qual foge do escopo do estudo.

## **4.2 Caso 2**

Neste caso faz-se a aplicação de forças similar ao caso 1, porém, agora os suportes fixos serão aplicados nos pontos de fixação das rodas traseiras e a metade da força  $R_i$  será aplicada em cada roda. Desta forma, a Figura 34 apresenta a configuração dos parâmetros utilizados para o seguinte caso. A força de 104,5 N aplicada em cada roda está representada pelas setas A e os suportes fixos requeridos para simulação estática são representados pelos pontos B.

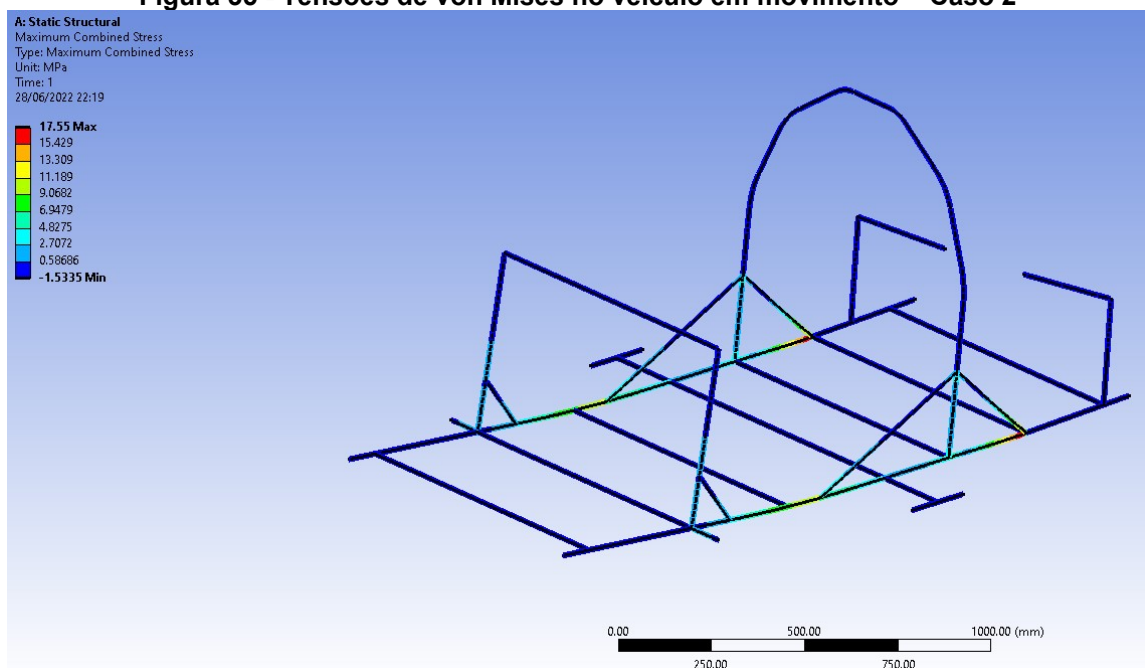
**Figura 34 - Configurações da simulação - Caso 2**



Fonte: Autoria própria (2022)

O maior valor de tensão estimado pelo método dos elementos finitos para este caso foi de 17,55 MPa. Este valor pode ser verificado na Figura 35 e localizado próximo ao ponto B da Figura 34.

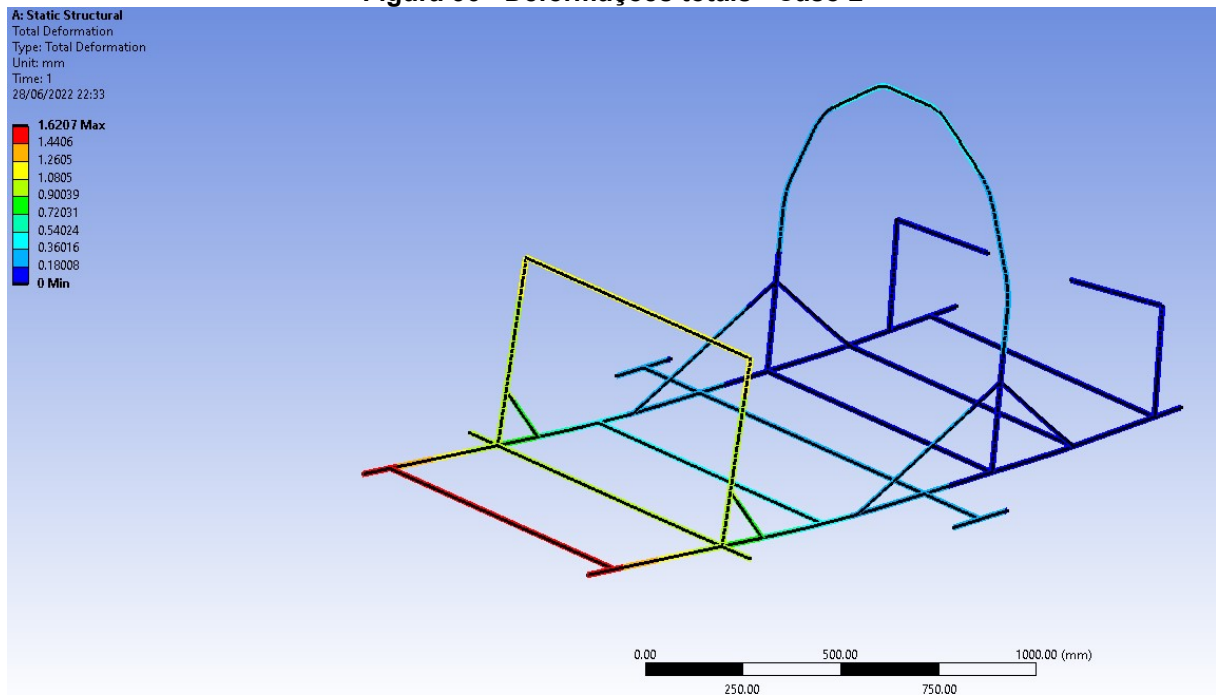
**Figura 35 - Tensões de von Mises no veículo em movimento – Caso 2**



Fonte: Autoria própria (2022)

Para as deformações, as mesmas considerações feita no caso 1 se aplicam neste caso também. O fato de utilizar o suporte fixo nos pontos de apoio das rodas traseiras no chassi implica na resistência de momento do mesmo, resultando em valores de deformação não condizentes para o presente caso de análise. O valor máximo estimado pelo método dos elementos finitos foi de 1,6207 mm. A Figura 36 demonstra os resultados de deformação total para o caso 2.

**Figura 36 - Deformações totais - Caso 2**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

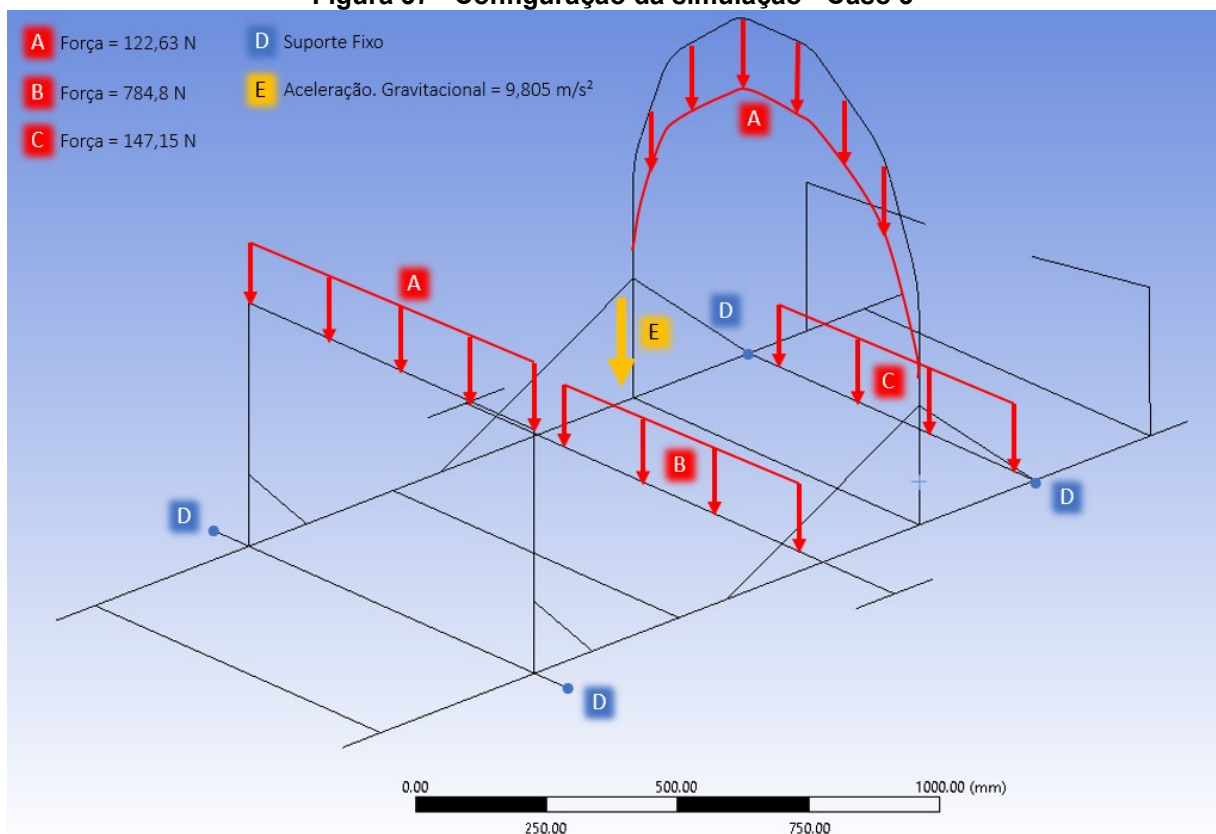
Assim como no caso 1, a forma genérica das deformações deste caso pode ser considerada em um caso de colisão, porém, desta vez o exemplo é um veículo de outra equipe colide com a traseira do veículo da Pato a Jato. As deformações nos momentos iniciais da colisão, isto é, um intervalo curto após a colisão, terão comportamento semelhante da Figura 36. Assim como citado no caso 1, estes valores devem ser estimados e utilizados na configuração da simulação, o que foge do escopo do estudo.

### 4.3 Caso 3

Este caso tem como objetivo principal trazer estimativas de deformações as quais possam sanar a preocupação sobre as deformações no chassi devido ao valor do módulo de elasticidade do material definido.

Desta forma, a simulação utilizou as forças estimadas para o caso estático, ou seja, as massas são 25 kg para a carenagem como força distribuída metade em cada vértice demonstrado pelas setas A equivalentes à 122,83 N, 80 kg para o piloto como força distribuída de 784,8 N demonstrada pelas setas B, 15 kg para o *powertrain* como força distribuída de 147,15 N demonstrada pelas setas C e aproximadamente 8,72 kg para o chassi demonstrada pela seta E, onde a aceleração gravitacional irá simular o peso do veículo, força esta de aproximadamente 85,5 N. A Figura 37 apresenta uma representação gráfica das configurações da simulação do caso 3.

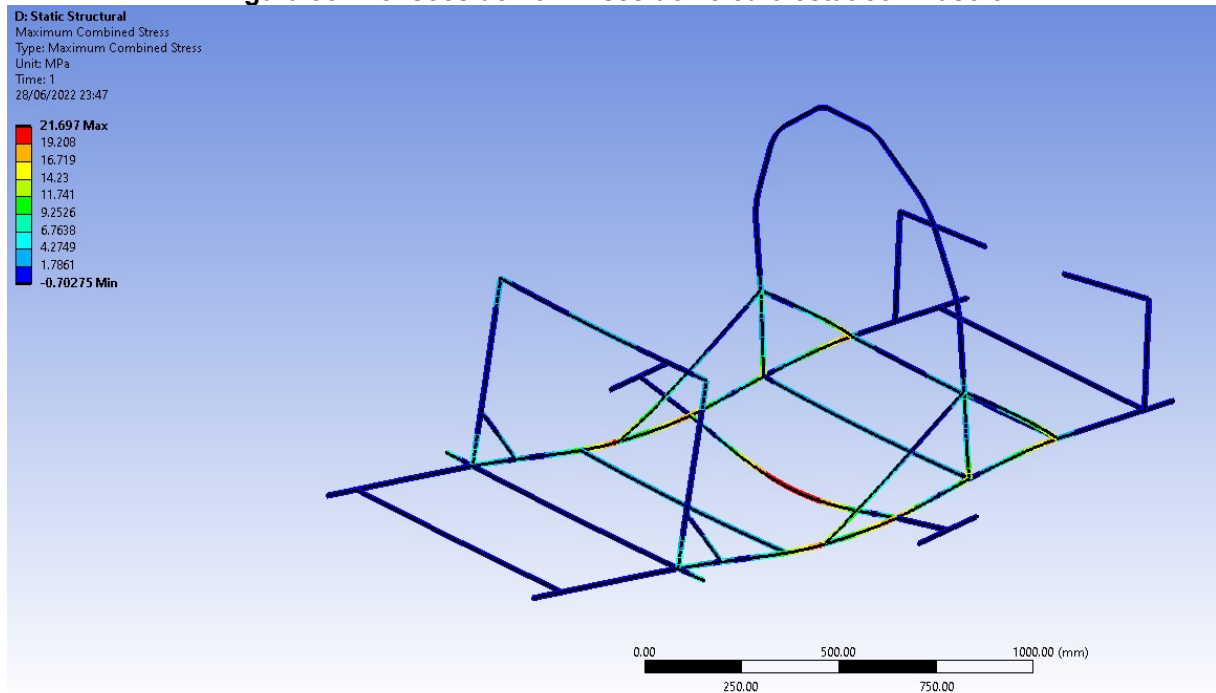
**Figura 37 - Configuração da simulação - Caso 3**



Fonte: Autoria própria (2022)

Através das estimativas da simulação, é possível ver na Figura 38 que a tensão de von Mises para o caso estático é de 21,697 MPa, aproximadamente 17% da tensão exercida no chassi para o caso 1.

**Figura 38 - Tensões de von Mises do veículo estático - Caso 3**

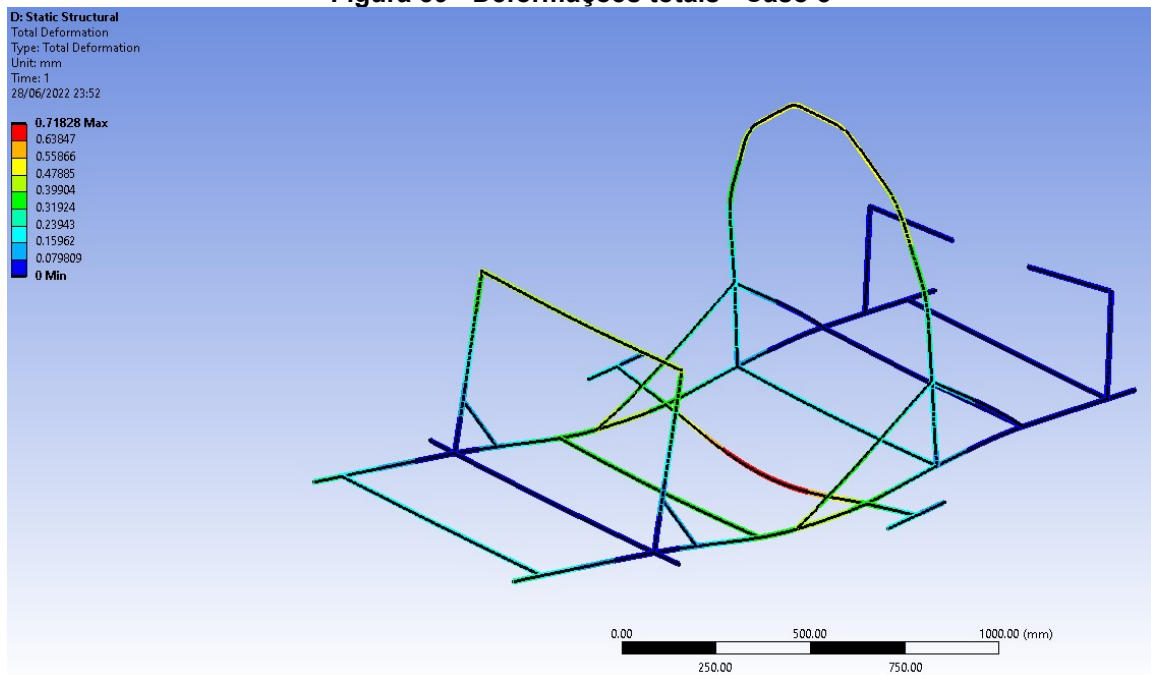


Fonte: Autoria própria (2022)

Em relação as deformações para este caso, é possível observar na Figura 39 que a maior deformação estimada foi de 0,71828 mm na travessa onde a força peso do piloto foi aplicada. Para a deformação total nos principais pontos de fixação da carenagem, ou seja, no pórtico e no arco central, é possível observar que estas deformações ficam em torno de 0,4 mm e 0,48 mm, respectivamente. Para a travessa de fixação do *powertrain* foi percebida a menor deformação entre as forças aplicadas na configuração da simulação, e esta apresenta deformação inferior à 0,07 mm, devido ao fato de estar próxima aos suportes fixos, para este caso, pode-se analisar a deformação fixando arestas adjacentes ao sistema e aplicar a força novamente, porém, para o presente caso de estudo, o valor encontrado pode ser desprezado, pois as maiores deformações irão ocorrer nos outros locais do chassi.



**Figura 39 - Deformações totais - Caso 3**



Fonte: Autoria própria (2022)

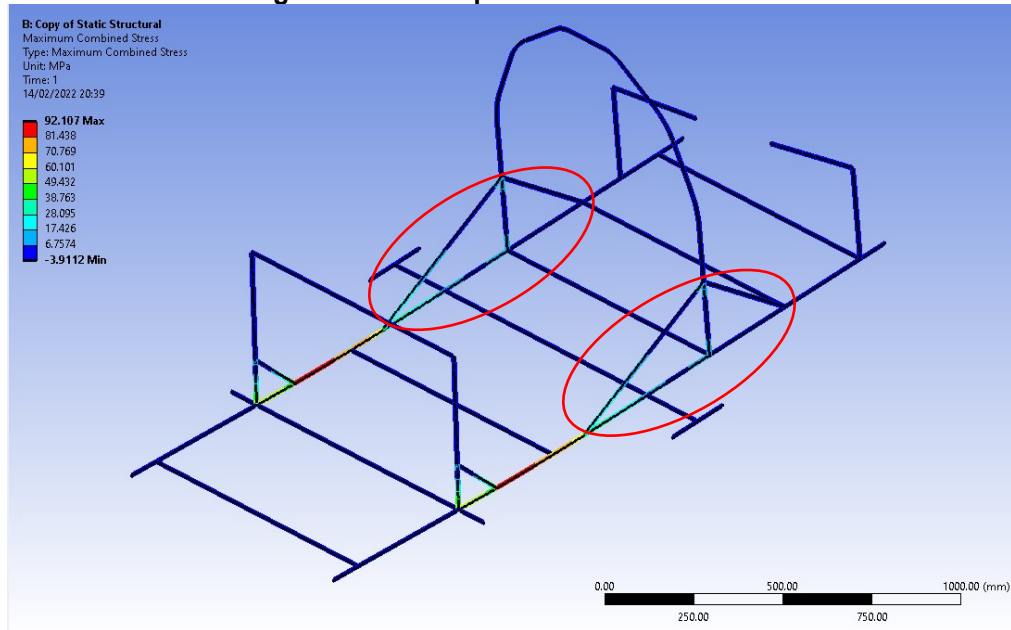
#### 4.4 Considerações sobre os resultados

Os valores de tensão se diferem do valor estimado anteriormente pois o cálculo feito foi considerando somente uma longarina suportando a força ao qual aquele lado do veículo seria submetido. Quando o chassi se torna mais complexo e novos elementos estruturais aparecem, a força é distribuída pelos elementos estruturais adjacentes.

O principal argumento para a diminuição na tensão são as mãos francesas destacadas na Figura 38. Estas, reagem a grande parte da força peso do veículo, assim, diminuindo drasticamente o momento fletor nas longarinas laterais.



**Figura 40 - Destaque das mãos francesas**



**Fonte: A autoria própria (2022)**

Desta forma, o valor estimado inicialmente foi utilizado como uma primeira iteração para conferir se o perfil escolhido estava subdimensionado, o qual era a primeira preocupação sobre o estudo, que, após simulações feitas, foi possível concluir que o perfil suporta o caso estudado.

Como comentado anteriormente, existe uma preocupação em relação aos valores de deformação no chassi devido ao módulo de elasticidade do material. Desta forma, o caso 3 foi utilizado para estimar estas forças de deformação, visto que os resultados de deformação obtidos nos casos 1 e 2 não descrevem o modelo aplicado ao caso de análise do presente estudo.

Um objetivo muito importante da primeira versão de um chassi é auxiliar na percepção de espaço e planejamento de sistemas adjacentes, onde possivelmente este pode ser utilizado como a primeira versão efetiva do veículo, o qual deverá ser estudado novamente para que seja otimizado.

## 5 CONCLUSÃO

A concepção de todos os projetos leva várias iterações até que a forma final do produto seja obtida, e com o presente estudo não é diferente. O objetivo principal é apresentar um projeto de um chassi, o qual foi alcançado pela estimativa de esforços gerais do veículo, e a aplicação destes esforços em um caso dinâmico básico, onde o dimensionamento inicial utilizado visa atender todas as regras especificadas pela organização da competição, e também, visa atender o espaçamento das outras células integrantes ao veículo, como o motor e transmissão que compõem o *powertrain* e a central eletrônica, sensores e chicotes que compõem o sistema eletrônico do veículo.

Dentro deste objetivo macro, foram utilizadas informações já levantadas por outras equipes ao redor do mundo, as quais divulgam a metodologia para confecção do chassi de suas equipes, assim, boa parte da informação conceitual já é apresentada de forma detalhada por eles.

Mesclando estas informações com a teoria fornecida pela bibliografia apresentada, foi possível estimar os esforços iniciais que o protótipo irá sofrer, e desta forma, já deixar explicações e fórmulas prontas para serem utilizadas novamente nas novas iterações que o chassi deverá sofrer no futuro afim de obter a geometria ideal para a aplicação.

Como parte da determinação de um projeto, o material deve ser estipulado pelo projetista, o qual o presente estudo faz de forma breve visando diminuir ao máximo a massa do veículo e como já citado anteriormente, diversas equipes já fizeram estudos sobre quais materiais utilizar, e, unindo os conhecimentos fornecidos com os conhecimentos obtidos internamente pela Pato a Jato, foi possível chegar a uma conclusão de material que pode ser utilizado para um caso inicial, porém, um estudo separado somente com este intuito deve ser instigado e caso determinado válido, deve ser efetuado. Como sugestão, a possível fabricação do chassi em fibra de carbono irá trazer vários benefícios para a equipe e para os acadêmicos, benefícios estes que fogem do escopo do estudo.

Visto que a geometria do chassi não é simples, foi utilizado um sistema analítico rudimentar, o qual tinha o objetivo de estimar inicialmente se o perfil utilizado estaria sub dimensionado. Levando em consideração a geometria do veículo, o sistema se mostrou suficiente para o estudo, pois a modelagem ainda seria submetida

à simulação pelo método de elementos finitos para determinar com mais clareza quais seriam as tensões e deformações sofridas pelo veículo.

Através da análise dos resultados obtidos através da simulação utilizando o método dos elementos finitos para o caso de análise definido, o qual é o movimento retilíneo uniforme do veículo a uma velocidade constante de 38 km/h em uma pista de corrida com inclinação longitudinal de 15° e onde são desconsiderados obstáculos e imperfeições do asfalto, os casos 1 e 2 se mostraram coerentes com os valores e comportamentos esperados quando se trata das tensões estimadas as quais o veículo será submetido. Já o caso 3 foi utilizado como forma de apresentar um resultado de deformações coerente com o caso de análise, visto que as deformações estimadas no caso 1 e 2 não condizem com o cenário definido para análise. No caso 3 foi possível observar que as deformações as quais o chassi irá apresentar em estado estático são baixas e estas são consideradas aceitáveis para o presente estudo.

Outro ponto demonstrado de suma importância são as mãos francesas, que segundo o Apêndice A, é possível ver que estas reagem a maior parte do esforço. Pode-se estudar a utilização de perfis diferentes nas mãos francesas, assim como diferente angulação em relação a longarina do chassi. Caso o ângulo entre a longarina e a mão francesa seja alterado, deve-se prestar atenção à flambagem do mesmo, pois pela forma que os esforços se comportam nesta região, dependendo do tipo de perfil e comprimento final, este pode se tornar um método de falha.

O chassi deverá passar por algumas iterações até chegar ao seu estado final, desta forma, a primeira versão do chassi é de suma importância para a equipe, pois é através desta que os acadêmicos terão a primeira noção de como o conceito urbano será, fornecendo a visão de quais são os pontos a serem melhorados, assim como dar o passo inicial para o desenvolvimento de sistemas adjacentes, como o *powertrain*, sistema aerodinâmico e de frenagem, assim como a geometria da direção e posicionamento de componentes eletrônicos. Todos estes sistemas irão afetar diretamente o chassi, pois serão considerados outros fatores para a modificação do mesmo, visando atender estas novas demandas de projeto.

A fabricação e telemetria dos testes do protótipo do conceito urbano utilizando este chassi irá retornar os primeiros valores reais, os quais irão ser os dados de entrada para a segunda iteração do chassi. Os testes que serão feitos nele também irão retornar quais são os primeiros pontos que podem ser melhorados, pontos estes

que vão desde projeto, até métodos e processos de fabricação, manutenção do veículo e seus componentes, uso em geral, como montagem, transporte e manuseio.

Como sugestão inicial de melhoria, pode-se estudar aumentar o espaçamento entre as travessas do chassi, alterar o perfil utilizado ou trocar componentes transversais por componentes diagonais (em forma de X), visto que a simulação retornou valores de tensão baixos nestes membros. Ampliando mais esta ideia, pode-se estudar a diminuição do número de travessas e uma geometria mais complexa para esta, visando a diminuição de peso do componente.

Outra sugestão é que um próximo caso de análise seja avaliado o caso de uma frenagem de emergência do veículo, visto que em uma frenagem brusca a desaceleração geralmente é maior do que a aceleração do veículo, o que irá aumentar as reações, e conseqüentemente, as forças atuantes no chassi podem ser maiores do que as forças estimadas para os casos do presente estudo.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, H. **Chassis Engineering**: Chassis Design, Building & Tuning for High Performance Handling. The Berkley Publishing Group. New York, 1993.
- ADAMS, V.; ASKENAZI, A. **Building Better Products with Finite Element Analysis**. 1a ed. OnWord Press. Santa Fe, 1999.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10a ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- CANALE, A. C. **Automobilística Dinâmica Desempenho**. 1a ed. Érica editora LTDA, São Paulo, 1989.
- COSSA, J. A.; ROSSETTO, D. R. **Análise do Comportamento Dinâmico em Chassi de Kart**. Novas Edições Acadêmicas, 2017.
- CROLLA, D. A. **Automotive engineering**: powertrain, chassis system and vehicle body. 1a ed. Elsevier. Oxford, 2009.
- FENNER, R. T. **Finite Element Methods for Engineers**. Imperial College Press. London, 1975.
- FORD. **The Model T**. Disponível em: <https://corporate.ford.com/articles/history/the-model-t.html>. Acesso em: 8 abr. 2021.
- GENTA, G.; MORELLO, L. **The Automotive Chassis Volume 1: Components Design**. Springer. Torino, 2009.
- GENTA, G.; MORELLO, L. **The Automotive Chassis Volume 2: system Design**. Springer. Torino, 2009.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamental of Vehicle Dynamics**. Society of Automotive Engineers. Warrendale, 1992.
- GUNADI; FERGIANTO, F. **Designing Shell Eco Marathon Car Bodies with Solid Work**. Journal of Physics: Conference Series. 2020.
- HEIBING, B.; ERSOY, M. **Chassis Handbook**: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. Ewald Schmitt | Elisabeth Langué, 2011.
- IFPR (Instituto Federal do Paraná). **Coeficiente de Arrasto Aerodinâmico**. Disponível em: <http://docente.ifrn.edu.br/edsonjose/disciplinas/fisica-i-mecanica-classica-e-termodinamica/coeficiente-de-arrasto-aerodinamico>. Acesso em 02 mai. 2021.
- IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). Testes de motores. **Consumo específico, desempenho, emissões e durabilidade de motores e seus componentes incluindo a transmissão**. Disponível em: <https://www.ipt.br/solucoes/417-testes-de-motores.htm>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- JFAUTOMOTIVE. Case Studies. **Audi RS6/RS7 C7 Engine Tuning**. Disponível em: <https://jfautomotive.co.uk/case-studies/audi-rs7-c7-tuning/>. Acesso em: 06 jul. 2022.

LEAL, L. da C. M.; ROSA, E. da; NICOLAZZI, L. C. **Uma introdução à modelagem quase-estática de automóveis**. UFSC, 2012.

LEROY MERLIN. **Perfil Tubo Quadrado Alumínio**. Disponível em: [https://www.leroymerlin.com.br/perfil-tubo-quadrado-aluminio-1mx19,05mmx19,05mm-prata-fosco\\_91775481](https://www.leroymerlin.com.br/perfil-tubo-quadrado-aluminio-1mx19,05mmx19,05mm-prata-fosco_91775481). Acesso em: 06 jul.2022.

LIBERMAN, B.; BATISTA, V. T.; OCÁCIA, G. C. **Estimativa de velocidade média do vento a partir de dados de estações meteorológicas com três registros diários**. Universidade Luterana do Brasil. Canoas. Rio Grande do Sul, 2002.

LOGAN, D. L. **A First Course in the Finite Element Method**. Thomson Canada Limited. Platteville, 2007.

LOPES, P. S. B. **Análise estrutural do Chassi de uma viatura Fórmula Livre FIA**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2014.

MERCEDES BENZ. **Benz Patent Motor Car, 1886 – 1894**. Disponível em: <https://mercedes-benz-publicarchive.com/marsClassic/en/instance/ko/Benz-Patent-Motor-Car-1886---1894.xhtml?oid=4373&reId=1001>. Acesso em: 8 abr. 2021.

MOTOR1. **Lamborghini LP700-4 Aventador all-carbon fiber monocoque revealed**. 11 fev. 2011. Disponível em: <https://www.motor1.com/news/25843/lamborghini-lp700-4-aventador-all-carbon-fiber-monocoque-revealed/>. Acesso em 12 abr. 2021

MOTORSPORT TECHNOLOGY. **F1 Technical regulations for 2019 – Fairness**. 09 fev. 2019. Disponível em: <https://motorsport.tech/formula-1/f1-technical-regulations-2019-fairness>. Acesso em 03 mai. 2021

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 4ª ed. Bookman. Porto Alegre, 2013.

PATO A JATO. **Protótipos**. Disponível em: <http://pb.utfpr.edu.br/patoajato/#Equipe>. Acesso em: 12 abr. 2021.

QUATRO RODAS. **Novo Suzuki Jimny tem tecnologias inéditas e está confirmado para o Brasil**. 18 jun. 2018. Disponível em: <https://quatorodas.abril.com.br/noticias/novo-suzuki-jimny-tem-tecnologias-ineditas-e-esta-confirmado-para-o-brasil/>. Acesso em: 12 abr. 2021.

QUORA. **What is Centripetal Force**. Disponível em: <https://www.quora.com/What-is-centripetal-force-1>. Acesso em 22 abr. 2021.

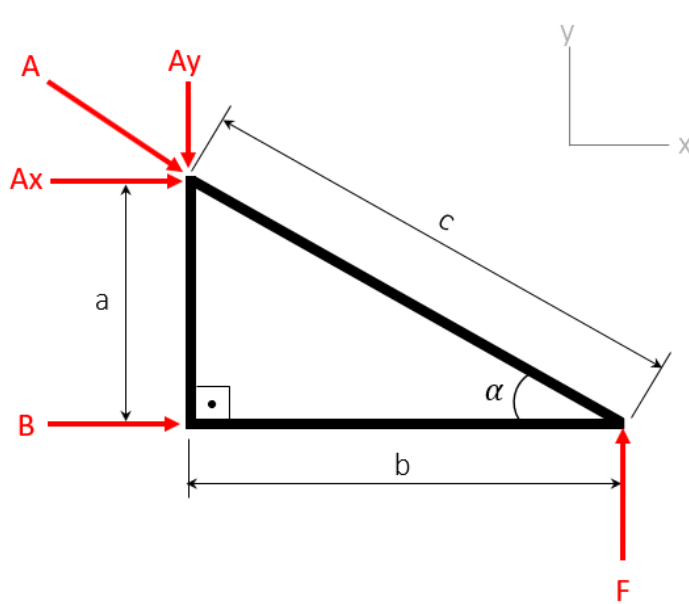
SOUSA, B. S. de; GONÇALVES, H. H. A. **Análise da aerodinâmica de carros populares**. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM. Minas Gerais, 2013.

VERNONCHAN. **Shell Eco-Marathon: A closer look at the UrbanConcept and Prototype Media Vehicles**. 10 mar. 2018. Disponível em: <https://vernonchan.com/shell-eco-marathon-urbanconcept-prototype-media-vehicles/>. Acesso em: 18 abr. 2021.

WIKIPEDIA. **Lotus Elan car chassis**. 22 out. 2020. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lotus\\_Elan\\_car\\_chassis.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lotus_Elan_car_chassis.jpg). Acesso em: 12 abr. 2021.

## **APÊNDICE A - Distribuição de forças nas mãos francesas**





$$F = \frac{1015,8 \text{ [N]}}{2} \therefore F = 507,9 \text{ N}$$

$$\alpha \cong 39,81^\circ$$

$$a = 250 \text{ mm}$$

$$b = 300 \text{ mm}$$

$$\sum f_y = 0$$

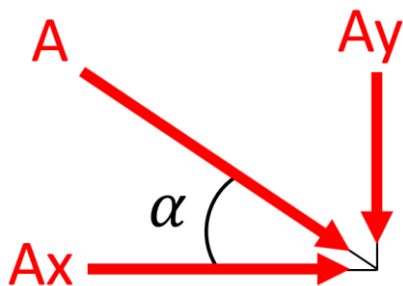
$$-A_y + f = 0 \therefore A_y = f$$

$$\sum M_A = 0$$

$$-B_x \cdot a - f \cdot b = 0 \rightarrow B_x = -f \cdot \frac{b}{a} \therefore B_x = -609,5 \text{ [N]}$$

$$\sum M_B = 0$$

$$-A_x \cdot a + f \cdot b = 0 \rightarrow A_x = f \cdot \frac{b}{a} \therefore A_x = 609,5 \text{ [N]}$$



$$A_x = A \cdot \cos(\alpha) \rightarrow A = \frac{A_x}{\cos(\alpha)} \therefore A = 793,42 \text{ [N]}$$

$A = 793,42 \text{ N}$ $B = 609,5 \text{ N}$ Como $A > B$ : $A \cong 56,56\% \cdot F$ $B \cong 43,43\% \cdot F$
---

## ANEXO A- Artigo 45 e 46 do livro de regras da Shell Eco Marathon 2021 – Capítulo 1

### ARTICLE 45: DIMENSIONS

- a) The total vehicle height must be between 1000 mm and 1300 mm.
- b) The total vehicle width, excluding rear view mirrors, must be between 1200 mm and 1300 mm.
- c) The total vehicle length must be between 2200 mm and 3500 mm.
- d) The track width must be at least 1000 mm for the front axle and 800 mm for the rear axle, measured between the midpoints where the tyres touch the ground.
- e) The wheelbase must be at least 1200 mm.
- f) The Driver's compartment must have a minimum height of 880 mm and a minimum width of 700 mm at the Driver's shoulders.
- g) The vehicle body and chassis ground clearance must be at least 100 mm with the driver (and necessary ballast) in the vehicle.
- h) The maximum vehicle weight (excluding the Driver) is 225 kg.
- i) All vehicle dimensions must not be achieved by body extensions such as 'stuck-on' appendages or cut-outs.

### ARTICLE 46: VEHICLE BODY

- a) Teams must submit technical drawings, photographs or animations of their entire vehicle design to the Organisers for approval at their earliest opportunity.
- b) The vehicle body must cover all mechanical parts when viewed from all sides. The wheels and suspension must be fully covered by the body when seen from above, and the wheels must be covered up to the axle centre line when seen from front or rear. The covering for the wheels and suspension must be a rigid, integral part of the vehicle body.
- c) Teams may NOT use commercially available vehicle body parts.
- d) Driver access must be easy and practical, as found in common passenger cars. All Urban Concept vehicles must have two side doors. Each door opening must have a minimum dimension of 500 x 800 mm.  
*This will be verified with a rectangular template of 500 x 800 mm with 50 mm radius corners*
- e) Any access opening mechanisms must be firmly attached to the vehicle body by means of hinges or sliding rails. Adhesive tape, Velcro, or similar materials are not permitted for this purpose.
- f) The vehicle must have a fixed roof covering the Driver's compartment.
- g) A windscreen with effective wiper(s) is mandatory. Please refer to Article 52:b)Article 109:b).
- h) Space must be available for a rectangular rigid luggage with dimensions of 500 x 400 x 200 mm (L x H x W). This space must be easily accessible from the outside and must include a floor and sidewalls to hold the luggage in place when the vehicle is moving. The luggage must be supplied by the Participant and must be placed in this space during inspection and competition.
- i) Vehicle bodies must not include any external appendages that might be dangerous to other Team members; e.g. sharp points must have a radius of 50 mm or greater, alternatively they should be made of foam or similar deformable material.
- j) A towing hook or ring is mandatory at the front of the vehicle. It can be rigid or flexible (cable or strap). If it is rigid, it must be placed fully under the body for safety reasons. Alternatively, it may be retractable or removable as in a regular car but should be easily accessible. It must be used to tow the vehicle in case of breakdown on the track. It must have a traction resistance equivalent to the weight of the vehicle and have an opening width of at least 30 mm.