



**UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
CT – CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Projeto e análise estrutural de um chassi de uma  
motocicleta de competição categoria Moto 3**

Gustavo Braga de Sá

João Pessoa-PB  
2019

# **Projeto e análise estrutural de um chassi de uma motocicleta de competição categoria Moto 3**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado para obtenção do grau de  
Engenheiro Mecânico para pelo curso de  
Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal da Paraíba-UFPB  
Orientador: Jean Pierre Veronese.

João Pessoa-PB  
2019

Gustavo Braga de Sá

# **Projeto e análise estrutural de um chassi de uma motocicleta de competição categoria Moto 3.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção do grau de  
Engenheiro Mecânico pelo curso de Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal da Paraíba-UFPB  
Orientador: Jean Pierre Veronese.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

## **COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Jean Pierre Veronese-UFPB  
(Orientador)

---

Daniel Anacleto-UFCG

---

Siderley Fernandes Albuquerque- UFPB

---

João Leite- UFPB

Dedico este trabalho a minha mãe,  
Solange Maria Braga Maciel, pessoa  
que mais amo no mundo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família, por investir em minha educação, em especial minha mãe, pelo apoio, confiança e carinho durante toda a vida; minha irmã, Gabriela Braga de Sá e meu falecido pai, Espedito Willian Fernandes de Sá.

Ao Professor Jean Pierre Veronese, pela orientação ao longo deste trabalho e por sua confiança na equipe do projeto de extensão Motorius.

Aos meus grandes amigos de Igor Cartaxo, Luiz Benício e Thiago Barbosa, que moraram comigo durante os primeiros anos de universidade e foram boa influência para meu crescimento pessoal e tornaram a vida em João Pessoa muito mais fácil.

Aos amigos e colegas de curso, com quem dividi momentos bons e ruins ao longo do período na academia: Alison Micael, Apolônio Marques, Augusto Araújo, Bruno Ferreira, Cássio Alcântara, Dauberson Azevedo, Halan Vital, Hércules Dutra, Lucas Bandeira, Luiz Henrique de Carvalho, Renato Sousa e Victor Marley.

A toda equipe do projeto Motórius, em especial a Daniel Anacleto, Felipe Mota, Francelino Franco, João Guilherme de Cabral, sem eles esse trabalho não seria possível.

Aos professores do curso, os quais contribuíram de forma significativa para meu crescimento profissional, me passando não só conhecimento como experiências de vida.

Por fim, a toda equipe da coordenação do curso de Engenharia mecânica, que sempre me ajudou perante as burocracias da universidade.

**Resumo:**

Esse trabalho tem por objetivo modelar e fazer a análise estrutural de um chassi tubular, de estrutura treliçada, de uma motocicleta de competição categoria moto 3 (250cc), utilizando como material aço cromo-molibdênio, sob as normas da competição bianual Motostudent. O projeto do chassi segue os requerimentos estabelecidos pela Motostudent e seus parâmetros geométricos buscam atender o que é recomendado para motos de corrida de acordo com a literatura especializada. A modelagem e a análise estrutural foram realizadas no software CAD/CAE *Solidworks* e as situações levadas em consideração foram as que, tipicamente, submetem um chassi a estresse constante durante uma corrida: frenagem, aceleração e inclinação. As cargas decorrentes dessas situações foram calculadas com base no centro de gravidade da motocicleta e analisadas de forma estática, levando em consideração o risco de escoamento, o deslocamento máximo e o fator de segurança mínimo que a estrutura apresentou em cada uma delas.

Palavras-chaves: Motocicleta, Motostudent, Caster, Trilha, Entre-eixos, Competição, Chassi, Análise estrutural.

**Abstract:**

This work aims to model and make structural analysis of a tubular chassis, with a triangulated structure, of a competition motorcycle category 3 (250cc), using chrome-molybdenum steel material, under the rules of the biannual Motostudent competition. The design of the chassis follows the requirements established by the Motostudent and its geometrical parameters seek to meet what is recommended for race bikes according to the specialized literature. The Modeling and structural analysis were performed in CAD / CAE Solidworks software and the situations considered were those that typically subject a chassis to constant stress during a race: braking, acceleration and slope. The loads resulting from these situations were calculated based on the center of gravity of the motorcycle and analyzed in a static way, taking into account the risk of runoff, the maximum displacement and the minimum safety factor that the structure presented in each of them.

Keywords: Motorcycle, Motostudent, Caster, Trail, Between-axes, Competition, Chassis, Structural Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

1.1- Equipe Motórius-UFPB.....	13
2.1- Modelo Inventado por Perreaux.....	16
2.2- Modelo Inventado por Roper.....	17
2.3- Modelo de Deimler.....	17
2.4- Primeira motocicleta produzida em série .....	18
2.5- A primeira Herley Davidson.....	19
2.6- Chassi BMW com armação treliçada.....	21
2.7- Chassi berço simples.....	22
2.8- Chassi berço duplo.....	23
2.9- Chassi Norton Commando backbone.....	24
2.10- Chassi dupla viga.....	25
2.11- Chassi BMW com motor estrutural.....	27
2.12- Curva Tensão-Deformação.....	28
2.13- Diagrama S-N para o aço USNG4 41300.....	29
2.14- Parâmetros geométricos da motocicleta.....	34
2.15- Relação entre a distância entre-eixos e o ângulo de esterço.....	35
2.16- Relação entre o entre-eixos e o ângulo de deslocamento .....	36
2.17- Relação entre ângulo de caster e trilha.....	37
2.18- Gráfico trilha x ângulo de esterço.....	37
2.19- Influência da trilha positiva no efeito restaurador da roda.....	39
2.20- Gráfico ângulo de esterço x ângulo de inclinação.....	40
2.21- Posição horizontal do centro de gravidade.....	42
2.22- Posição vertical do centro de gravidade.....	43
3.1- Geometria do projeto conceitual .....	47
3.2- Equilíbrio das forças na fase de aceleração máxima.....	49
3.3- Diagrama de corpo livre da suspensão traseira.....	51
3.4- Equilíbrio das forças na fase de frenagem máxima.....	52
3.5- Diagrama de corpo livre da suspensão dianteira .....	53
3.6- Equilíbrio das força durante a inclinação máxima.....	54
3.7- DLC na suspensão dianteira durante a inclinação.....	56
3.8- Equilíbrio de forças no eixo vertical durante a inclinação.....	57

3.9- Modelo CAD do projeto.....	58
3.10- Recursos para aplicação de forças estáticas no <i>Solidworks</i> .....	60
3.11- Pontos de atuação das forças no ensaio de frenagem máxima.....	62
3.12- Recurso “Acessórios de fixação” .....	62
3.13- Pontos de fixação no estudo de frenagem máxima.....	63
3.14- Seleção de material no <i>Solidworks</i> .....	63
3.15- Pontos de atuação da força no estudo de aceleração máxima.....	64
3.16- Pontos de fixação do estudo de aceleração máxima.....	64
3.17- Pontos de atuação das forças no estudo de inclinação máxima.....	65
3.18- Pontos de restrição no estudo de inclinação máxima.....	66
4.1- Tensão máxima na estudo de frenagem .....	66
4.2- Deslocamento máximo no estudo de frenagem.....	67
4.3- Áreas com fator de segurança acima de 1 durante frenagem.....	68
4.4- Tensão máxima no estudo de aceleração.....	68
4.5- Deslocamento máximo no estudo de aceleração.....	69
4.6- Áreas com fator de segurança acima de 1 durante a aceleração.....	69
4.7- Tensão máxima no estudo de inclinação.....	70
4.8- Deslocamento máximo no estudo de inclinação.....	71
4.9- Áreas com fator de segurança maior que 1 durante a inclinação.....	71

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 A Competição Motostudent.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.2 Na Universidade Federal da Paraíba.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Âmbito da pesquisa.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2 –REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Funcionamento da Competição.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2 As Etapas.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.2- O Protótipo.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2- Levantamento do estado da arte.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.1-Chassis.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.3- Chassis treliçados.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.4- Chassi tipo berço simples.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.5- Chassi berço duplo.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.6- Chassi monotubular.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.7- Comparação estrutural.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.8- Chassi dupla viga.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.9- Chassi com motor estrutural.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3- Materiais para fabricação de chassis.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.1- Propriedades dos materiais.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2- Alumínio.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.3- Aço.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.4- Ligas de Aço Cromo-Molibdênio-<i>Cromoly</i>.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.5- Outros Materiais.....</b>	<b>32</b>
<b>2.4- Geometria da motocicleta.....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.1-Parâmetros que definem uma motocicleta.....</b>	<b>33</b>
<b>2.4.2- Distancia entr-eixos.....</b>	<b>34</b>
<b>2.4.3- Ângulo de caster.....</b>	<b>34</b>
<b>2.4.4- A trilha.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.5- Centro de gravidade da motocicleta.....</b>	<b>38</b>

<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1- Projeto conceitual do chassi.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.2- Distribuição de massa e centro de gravidade do chassi.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2- Cálculo das Forças Atuantes no Chassi.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.1- Aceleração Máxima.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.2- Frenagem Máxima.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.3- Curva Máxima.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3- Análise estrutural do modelo.....</b>	<b>55</b>
<b>3.3.1- Métodos dos Elementos Finitos.....</b>	<b>58</b>
<b>3.3.2- Desenho CAD.....</b>	<b>58</b>
<b>3.3.3-Geração da malha.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3.4- Estudo de cargas estáticas.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3.4.1- Estudo da frenagem máxima.....</b>	<b>61</b>
<b>3.3.4.2- Estudo da Aceleração máxima.....</b>	<b>61</b>
<b>3.3.7- Estudo da Inclinação máxima.....</b>	<b>64</b>
<b>4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>4.1-Resultados das simulações .....</b>	<b>66</b>
<b>4.1.2-Resultados do ensaio de frenagem máxima.....</b>	<b>66</b>
<b>4.1.3-Resultados do ensaio de aceleração máxima.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.4-Resultado dos ensaios para inclinação máxima.....</b>	<b>69</b>
<b>5 - CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>
<b>6- REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>74</b>
<b>Apêndice A.....</b>	<b>76</b>
<b>Apêndice B.....</b>	<b>83</b>

# **CAPÍTULO I**

## **1 Introdução**

### **1.1 A Competição Motostudent**

Motostudent é uma competição internacional, entre universidades, que acontece a cada dois anos na Espanha, onde cada universidade constrói um protótipo de uma motocicleta seguindo o regulamento proposto e cujo principal objetivo é a aplicação direta do conhecimento adquirido na academia pelos estudantes de engenharia.

A construção do protótipo abrange não apenas a parte estrutural, mas também o sistema elétrico, sistema de freios, transmissão e aerodinâmica; ou seja, tudo que envolve a construção de uma motocicleta. Porém, este trabalho limita-se a detalhar o projeto e análise do chassi, a parte mais importante da motocicleta.

#### **1.1.2 Na Universidade Federal da Paraíba**

Na UFPB, tem-se uma equipe Motostudent, o Motórius, que foi fundada em 2013. A equipe é dividida em três grandes grupos: administrativo, pesquisa e desenvolvimento e execução. Dentro desses grupos, encontram-se cinco subsistemas: Estrutura, responsável pelo projeto e construção do chassi, suspensão e freios; *Powertrain*, responsável pelo projeto e construção da transmissão, sistema de escapamento e tanque de combustível; Elétrica, responsável pelo projeto e construção do sistema elétrico da moto; Aerodinâmica, responsável pelo projeto e construção da carenagem; Planejamento, responsável pela gestão de processos e pessoas e gerenciamento financeiro do projeto como um todo.

**Figura 1.1- A equipe Motórius**



**Fonte: Autor**

## **1.2 Âmbito da pesquisa**

Sabendo que a relação peso-rigidez é um parâmetro de suma importância no desempenho de uma motocicleta de competição, é de interesse de todas as equipes desenvolverem motocicletas que sejam leves o suficiente para atingir altas velocidades e, ao mesmo tempo, rígidas o suficiente para resistir as provas estáticas e dinâmicas a que serão submetidas, bem como aos esforços típicos de uma corrida: acelerações, frenagens, curvas, vibrações e etc.

O chassi é o componente da motocicleta mais afetado por todos esses esforços; assim sendo, faz-se necessário descobrir qual é a magnitude deles e se o chassi possui rigidez suficiente para suportá-los, sem comprometer o desempenho da motocicleta durante as provas da competição. Além disso, a competição possui um sistema de normas que delimitam o projeto do chassi e da motocicleta como um todo, tanto para assegurar que as equipes possam competir de forma equilibrada quanto para a segurança do piloto durante as

provas dinâmicas. Qualquer projeto que não se enquadre neste sistema, não está apto a participar das provas.

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é projetar um chassi que seja leve, rígido e resistente o suficiente para suportar os esforços típicos de uma corrida, atendendo, assim, às necessidades de uma motocicleta de competição, dentro das regras estabelecidas pelo do regulamento *Motostudent 2018* e das limitações do projeto de extensão Motorius-UFPB.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Fazer uma pesquisa sobre os principais parâmetros geométricos de uma motocicleta e, baseado nisso, decidir a geometria do protótipo;
- Calcular os esforços atuantes no chassi nas fases de frenagem, aceleração e inclinação;
- Realizar as simulações estáticas;
- Analisar os resultados.

## **CAPÍTULO II**

### **2 Referencial teórico**

#### **2.1 Funcionamento da Competição**

A competição é organizada pela Moto *Engineering Foundation* - MEF- e acontece a cada dois anos na Espanha, no circuito mundial de Aragon, e o objetivo principal é o projeto e desenvolvimento de uma motocicleta categoria Moto 3 (motos 250 cc e com motor 4 tempos) para competir em diferentes provas. As equipes que pretendem competir devem assumir o papel de uma empresa de fabricação de motos de competição e lidar com planejamento de custos, desenvolvimento de projeto, pesquisa e implemento de tecnologia. Vencerá a equipe que acumular mais pontos em cada etapa.

Cada equipe inscrita recebe um *kit* da organização do evento que consiste em, para a categoria combustão: Motor de combustão interna 250cc, um conjunto de pneus (dianteira e traseira), um conjunto de rodas (dianteiro e traseiro), cãliper de freio e bombas (dianteiro e traseiro).

### 2.1.2 As Etapas

As provas e testes a que os projetos e protótipos são submetidos estão divididas em 2 fases principais, a MS1 e MS2. Além dessas, tem-se as prévias e a verificação técnica ou escrutínio.

**Tabela 2.1: Etapas da competição**

<b>Estágio</b>	<b>Exclusivo</b>	<b>Pontuação</b>
Verificação administrativa	Sim	Pode penalizar
Inspeção	Sim	Não
MS1: Entrega dos projetos	Sim	Sim
MS2: Testes Dinâmicos	Sim	Sim

**Fonte: “adaptado de “ Regulamento Motostudent, 2018**

Para passar á próxima fase, a equipe deve obter o número mínimo de pontos na fase anterior.

Escrutínio: para que possa participar da competição, o protótipo de cada equipe deve cumprir os requisitos mínimos de segurança, resistência e funcionamento indicados no regulamento. Nessa etapa, faz-se a verificação desses requisitos.

MS1: Durante essa fase as equipes devem explicar o desenho do protótipo e o projeto para produção industrial em massa.

MS2: Essa é a etapa dos testes dinâmicos, para participar dela a equipe tem que ter atingido pelo menos 40% da pontuação total na MS1. Nesta fase os protótipos serão testados em distintas provas de circuito.

### 2.1.3- O Protótipo

O protótipo deve seguir todas as especificações descritas pelo regulamento. A motocicleta deverá ser um protótipo desenhado e projetado unicamente para a competição e a equipe possui liberdade para decidir suas dimensões, com exceção de certos parâmetros pré-determinado. O uso de chassis comerciais não é permitido. Também não é permitido o uso de ligas de titânio na fabricação do chassi e demais componentes estruturais. As sessões do apêndice A descrevem as principais regras para construção do protótipo segundo o regulamento *Motostudent 2018*.

## 2.2- LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE

As primeiras motocicletas foram, naturalmente, uma evolução das bicicletas. Dois engenheiros são conhecidos por desenvolver, quase que simultaneamente, e separadamente, as primeiras motocicletas: O francês Michaux Perreaux, na França; e o estadunidense Sylvester Howard Roper, nos Estados Unidos. Ambas possuíam quadros e rodas de madeira e eram movidas por um motor a vapor.

**Figura 2.1- Modelo inventado por Perreaux**



**Fonte: Site Expedições Latinas, 2019**

**Figura 2.2- Modelo inventado por Roper**



**Fonte: Site Expedições Latinas, 2019**

Sylvester Roper ainda viria a aperfeiçoar seu modelo e desenvolver outros vários até o ano em que morreria, 1896, coincidentemente, enquanto pilotava um desses modelos.

Foi apenas em 1885 que surgiu, de fato, a primeira motocicleta com motor de combustão interna. Esta foi desenvolvida na Alemanha por Gottlieb Daimler, que era um ex assistente do doutor Nikolaus Otto, inventor do motor de combustão interna de quatro tempos. Daimler desenvolveu seu motor baseado no de Otto e o acoplou numa espécie de bicicleta de madeira, com duas rodas a mais para dar equilíbrio. A máxima velocidade alcançada era 18 km/h e sua potência era de 0,5 cavalos. O motor era posicionado verticalmente no centro da máquina, a transmissão a roda traseira era feita através de uma correia para o contraveio. Esta é considerada, por muitos, a primeira motocicleta pelo fato de possuir um motor de combustão interna, embora possuísse duas pequenas rodas adicionais.

**Figura- 2.3- Modelo de Daimler**



**Fonte: Site Expedições latinas, 2019**

Em 1894 Hilderbrand e Wolfmuller, em Munique, a primeira motocicleta que viria a ser produzida em série: a *Hilderbrand & Wolfmuller*. No ano de abertura da fábrica, foram produzidas mais de 200 motocicletas e o sucesso comercial foi absoluto. Ela tinha dois cilindros de 1500cc refrigerados por água, alcançava 45 km/h e possuía controles no guidão para operar a entrada da mistura ar-combustível.

**Figura 2.4- Primeira motocicleta produzida em série**



**Fonte: Site Revista Auto Esporte, 2019**

Apenas a partir de 1901 o conceito de motocicleta como conhecemos hoje começou a ser modelado. Naquele ano, dois irmãos franceses, os Werner, construíram seu modelo, que possuía um chassi feito de tubos metálicos, o qual alojava o motor em sua parte central; esse tipo de chassi passaria a ser conhecido como “berço”. A direção era feita por um guidão ligado a um garfo, da mesma forma que ocorre em uma bicicleta, e o tanque de combustível encontrava-se também no centro da estrutura, um pouco à frente do assento do motorista.

Ao longo dos anos, houve relutância por parte dos *designers* em se afastar do modelo tradicional de quadro herdado das bicicletas, o diamante (Foale, 2002). Essa parecia ser a opção mais lógica principalmente nos primeiros anos, quando os motores das motocicletas ainda eram pequenos e mais simples e, ainda antes, quando se utilizava um cilindro de gás e pedais para auxiliar na propulsão. Por muito tempo depois da Primeira Guerra Mundial o quadro tipo diamante ainda era a principal escolha dos fabricantes; porém, conforme os motores ganharam formas mais complexas e ficaram maiores, surgem aqueles

que podem ser considerados evoluções diretas do chassi diamante: berço simples e berço duplo.

Não foi até 1901, quando a motocicleta foi criada como é conhecido hoje em dia. Naquele ano os irmãos franceses Werner moveram o motor do roda dianteira para um quadro retangular entre as rodas. A Nova Werner se manejava muito melhor graças ao seu baixo centro de gravidade e ditou o modelo ser seguido, com algumas notáveis exceções, no design de motocicletas. Também em 1901 a empresa americana Indian construiu seu primeiro modelo e, um ano depois, a Harley Davidson faria o mesmo. (Lópes Carpes, 2017). Essa primeira Harley-Davidson foi a *Silent Gray Fellow*, com motor de três cavalos e cilindro de 410 cm<sup>3</sup>.

**Figura2.5- A primeira Harley-Davidson**



**Fonte: Site Brasília Harley-Davidson, 2019**

Com o tempo, a rigidez e a complexidade dos chassis aumentou e os tubos passaram a ter maior espessura e diâmetro, principalmente por conta do aumento do peso e tamanho dos motores; assim como os desenhos foram ficando mais originais.

Durante as décadas de 1920 e 1930, as motocicletas, cada vez mais sofisticadas e rápidas conseguiram manter sua popularidade, enquanto surgiam as motos de dois cilindros como a *Speed Twin*, da Triumph, e a *Brough Superior* (Lópes Carpes, 2017). A Guzzi, fabricante italiana, alcançou fama em 1956 vencendo campeonatos mundiais de 250cc e 350cc, levou o conceito de grandes motores para outro nível com a Guzzi V8 de 500 cc, feita unicamente para competições.

No começo da década de 60 as montadoras japonesas começaram a entrar no mercado, que antes era dominado apenas pelas marcas americanas e europeias. As montadoras orientais investiram muito em tecnologia, com foco

nas chamadas “superbikes”, motos com mais de 600cc. A Honda CB 750, lançada em 69, é um exemplo claro. No final da década de 70, as superbikes já eram uma tendência entre as fabricantes japonesas: motos com três e às vezes até seis cilindros, e alta potência, trouxeram popularidade para as japonesas Honda, Yamaha e Kawasaki; porém, não tardou para as marcas europeias entrarem nesse mercado e comecem a produzir superbikes também.

A década de 80 foi marcada pelo refinamento das superbikes: as primeiras dessa eram grandes, pesadas, com chassis tubulares de aço e motores com vários cilindros refrigerados a água; porém, com o passar dos anos as superbikes ficaram menores e mais leves, com chassis de alumínio, suspensão com amortecedor único e ênfase na aerodinâmica, ficando cada vez mais leves e rápidas.

A evolução das motocicletas caminha lado a lado com a evolução tecnológica, a descoberta de novos materiais e as necessidades requeridas pela sociedade.

### **2.2.1-Chassis**

No chassi é fixado o motor, as suspensões, dianteira e traseira, a carenagem (quando é o caso) e os demais elementos mecânicos responsáveis pela locomoção da moto. Além disso, ele mantém as rodas da motocicleta alinhadas entre si; ou seja, mantém o eixo de direção no mesmo plano da roda traseira para que haja estabilidade dinâmica.

As funções de um quadro de motocicleta são de dois tipos básicos: estático e dinâmico. No sentido estático a estrutura deve suportar o peso do piloto e passageiro, o motor e a transmissão, e os acessórios como tanques de combustível e óleo. Embora menos óbvia, a função dinâmica do quadro é criticamente importante. Em conjunto com o resto do chassi rolante (ou seja, suspensão e rodas), ele deve fornecer direção precisa, boa aderência à estrada, manuseio e conforto. (Foale, 2002).

### 2.2.2- Chassis tubulares.

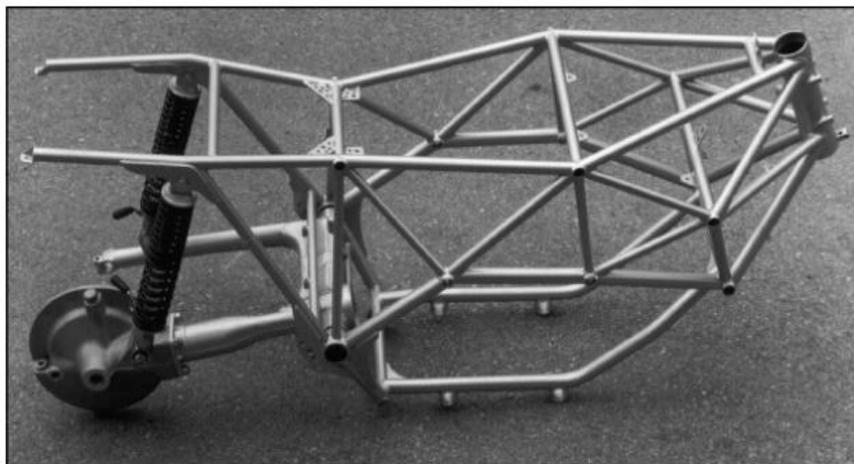
### 2.2.3- Chassis Treliçados

Esses chassis são compostos por vários tubos, soldados uns nos outros, formando uma rede rígida de barras transversais e longitudinais. Por conta disso, consegue-se obter extraordinária rigidez com peso relativamente baixo.

Embora estes possam ter uma eficiência estrutural extremamente alta, eles encontraram poucos adeptos entre os grandes fabricantes. Provavelmente isso acontece porque a forma e o tamanho dos tipos de motor mais populares exigem uma estrutura ampla e complicada e, portanto, com custo elevado (Foale, 2002). Um ponto a ser considerado, para tubos muito longos e de pequenos diâmetros, é a ressonância excitada pelo motor; ou seja, vibrações severas causadas por forças de inércia desequilibradas do motor podem levar os tubos a atingirem a frequência crítica, o que pode comprometer a integridade da estrutura. A solução para esse problema seria aumentar a frequência dos tubos através do aumento do diâmetro ou diminuição do comprimento. (Foale, 2002).

Nas décadas de 50 e 70, esses chassis foram muito usados pelas montadoras *Guzzi* e Norton, respectivamente; atualmente, a *Ducati* é uma marca que faz uso de excelentes chassis treliçadas.

**Figura 2.6-Chassi BMW com armação triangulada**

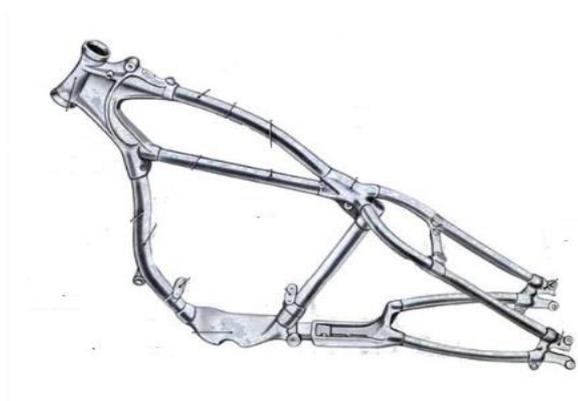


*Fonte: Foale, 2002*

#### 2.2.4- Chassi Tipo Berço Simples

Este modelo foi um dos primeiros a surgir, copiado dos chassis de bicicleta e adaptado para motos da época. A estrutura do chassi encontra-se toda em um só plano. Ele recebe este nome porque um tubo curvo envolve a parte inferior do motor e outro, geralmente de diâmetro maior, a parte superior, dando o aspecto de um berço. É de construção simples, relativamente barata. De acordo com Zayas (2013), esses chassis possuem baixa rigidez e por isso são usados em motos de baixa potência.

*Figura 2.7- Chassi berço simples*



*Fonte: Site Motoonline, 2019*

#### 2.2.5- Chassi Berço Duplo

É uma evolução do Berço Simples, onde duas vigas, em vez de uma, dão sustentação a parte inferior do motor. Isso permite que o chassi suporte mais peso e tenha maior rigidez. Por ser um chassi espaçoso, é geralmente usado em motocicletas com motores mais pesados como os modelos da Harley Davidson.

**Figura 2.8-Chassi berço duplo Harley Davidson**



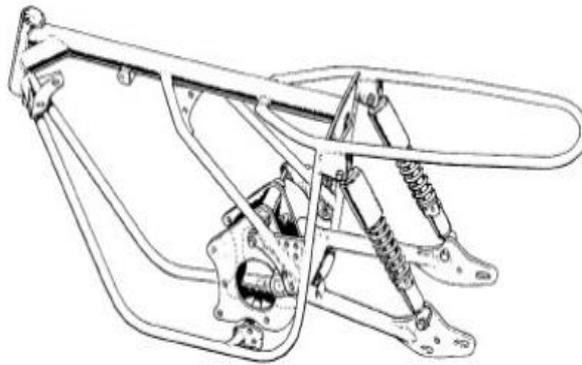
**Fonte: Site Paughco, 2019**

### **2.2.6- Chassi monotubular**

Também conhecido como *backbone* (espinha dorsal), é um modelo simples, fácil de fabricar e de custo relativamente baixo, que tem como viga principal um tubo longitudinal que dá sustentação ao motor e liga a coluna de direção ao subchassi e suspensão traseira. Por conta dessa simplicidade, o tubo usado precisa ter diâmetro e espessura maiores daqueles que, geralmente, são usados em outros tipos de chassis.

Apesar de sua alta eficiência estrutural, esse modelo não conseguiu alcançar a aceitação merecida. Isso provavelmente se deu por conta da dificuldade de acomodar motores volumosos. Foale (2002) diz que é preferível o tubo estar em linha reta e conectar a cabeça de direção diretamente ao pivô da suspensão traseira, mas isso raramente é possível por conta do desenho dos motores atuais. Uma alternativa, seria dobrar o tubo e aproximando-o, assim, da fixação do motor. Ainda segundo Foale, é possível construir um chassi *backbone* eficiente, sem dobrar o tubo principal, desde que se use tubos retos de menor diâmetro para fazer a conexão com o pivô da suspensão traseira. Um bom exemplo desse tipo de armação foi o chassi Norton Commando

**Figura 2.9- Chassi Norton Commando backbone**



**Fonte: Foale, 2002**

### **2.2.7- Comparação estrutural**

De acordo com Foale, existem basicamente duas abordagens para alcançar eficiência estrutural em chassis tubulares: as treliçadas e as em formato de viga, a maioria dos quadros usa uma das duas ou uma combinação de ambas. Desse modo, é interessante fazer uma comparação da rigidez e características de cada uma.

A tabela 2 mostra a comparação entre as propriedades dos dois tipos de estrutura em sua forma mais pura para diferentes valores de diâmetro e espessura da parede.

**Tabela 2: Comparação entre a rigidez das armações trianguladas e espinha dorsal**

Tipo de estrutura e tamanho do tubo	Rigidez flexional normalizada (%)	Rigidez torcional normalizada
Circular <i>Backbone</i> - 100mm x 1mm esp.	100	100
Circular <i>Backbone</i> - 75mm x 1,34 esp.	56	56
Treliçada 18,5mm x 1,5 mm	413	39
Treliçada 28mm x 0,91mm esp.	399	42

**Fonte: "Adaptado de" Foale (2002)**

Podemos concluir, da tabela, alguns pontos interessantes. O primeiro é que a armação *backbone* é muito mais sensível a alteração do diâmetro do que a triangulada. Segundo, com relação a rigidez flexional a estrutura treliçada se sai muito melhor, chegando a ser quatro vezes maior do que a estrutura *backbone* de maior diâmetro e sete vezes maior do que a de menor diâmetro; já no caso de torção, vale o oposto: a *backbone* consegue ser em torno de duas vezes e meia mais rígida do que a treliçada de maior diâmetro.

### **2.2.8- Chassi Dupla Viga**

Usado por muitas marcas japonesas (como Susuki e Kawasaki), este chassi é composto, basicamente, por duas vigas longitudinais que envolvem o motor lateralmente. Essas vigas podem ser separadas ou soldadas como uma só peça. São feitos, geralmente, de alumínio. A experiência mostra que, para uma quantidade suficiente de metal, podem alcançar rigidez suficiente, mesmo para corridas, mas, a partir da definição de eficiência estrutural (relação peso/rigidez), esse tipo de quadro não é particularmente bom (Foale, 2002). Mesmo feito em alumínio não é um método de construção que resulta em um quadro particularmente leve, e se feito em aço, como a maioria dos outros são, parece muito pesado (Foale, 2002).

Uma grande vantagem desse tipo de chassi é que ele permite a acomodação de grandes motores e grandes filtros de ar, típicos de motos de corrida, além de acesso fácil ao motor e demais componentes acomodados no quadro (o que é essencial em competições); por conta disso eles são, atualmente, os mais usados em competições de motocicletas.

**Figura 2.10- Chassi Dupla-Viga**



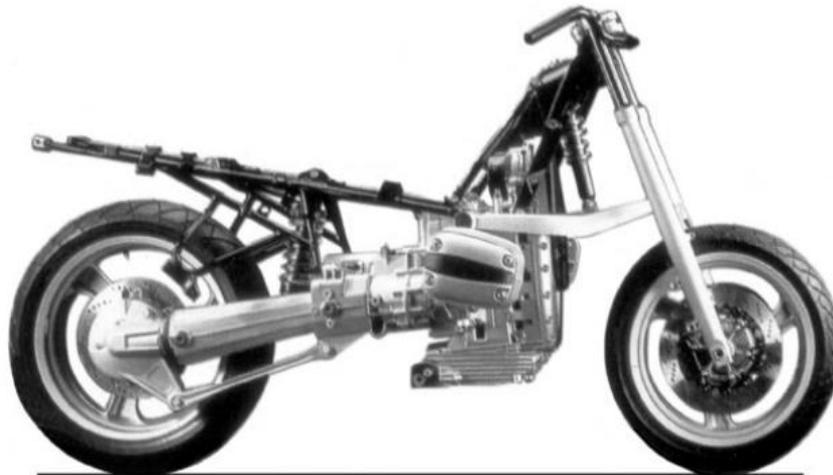
**Fonte: Foale, 2002**

### **2.2.9- Chassi com Motor Estrutural**

Nesse tipo de chassi o motor atua como um elemento estrutural, conferindo rigidez ao sistema. Potencialmente, esta é a maneira mais eficiente de construir uma moto com um grande motor (Foale, 2002). Por tanto, é usado, geralmente, quando o motor é robusto e possui grande dimensão. Segundo Foale, este modelo utiliza a rigidez inerente do motor e do sistema de transmissão para fornecer suporte a coluna de direção e o pivô da suspensão traseira. O quadro em si consiste em duas estruturas pequenas e leves, uma para ligar a coluna de direção ao motor e outra para ligar o motor a suspensão traseira e sustentar o sub-chassi.

Bons exemplos de uso desse tipo de estrutura são as motocicletas Vincent da década de 50 que tinham como motor o *Vincent V Twin*, de 2 cilindros e configuração em V, como o nome sugere; e também os modelos Boxer da BMW.

*Figura 2.11- Chassi BMW com motor estrutural*



*Fonte: Foale, 2002*

## **2.3- MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE CHASSIS**

### **2.3.1- Propriedades dos Materiais**

A seleção de um material ideal para fabricação de um chassi não é um processo simples, existem diversas variáveis a se considerar: propriedades requeridas, esforços a que ele será submetido, viabilidade de trabalho (soldabilidade, usinabilidade), desenho do projeto, facilidade de obtenção do material e seu custo. Além dessas, deve-se ter em mente o propósito para o qual o chassi é destinado; por exemplo, numa motocicleta de baixa cilindrada produzida em massa a variável custo se sobrepõem as demais; já para motocicletas de competição, o custo geralmente fica em segundo plano e o peso é mais importante na escolha do material.

Conhecendo as propriedades do material e sabendo os tipos e a magnitude dos esforços a que ele será submetido, pode-se evitar falhas como ruptura, trincas, flambagem e deformações.

As propriedades que devem ser levadas em conta na hora da construção de um chassi, são:

- **Resistência Mecânica:** É a propriedade que mede o quanto um material suporta cargas externas. Ela é expressa como a força aplicada por unidade de área da secção transversal do material:  $N/m^2$ . A resistência

última (ou limite elástico) é carga máxima que um material pode suportar, seja por tração ou compressão, antes de romper. Na curva Tensão-Deformação, ela é representada pela tensão de ruptura, que fica no ponto mais alto da curva.(fig.2.12)

**Figura 2.12: Curva Tensão-Deformação**

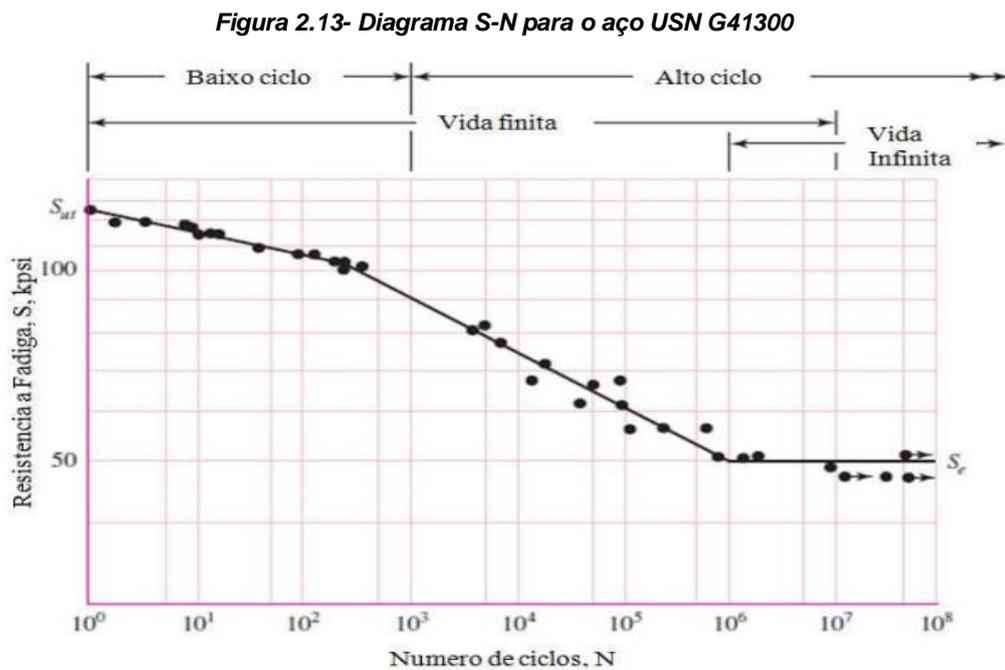


**Fonte: Adaptado de Foale, 2002**

A curva mostra o comportamento típico de um material dúctil (não frágil). Conforme a carregamos o material e a tensão a que ele está sujeito aumenta, ocorre um aumento quase que linear da deformação; porém, tal deformação é apenas elástica, e o que acontece quando removemos a tensão é um retorno total do material a sua forma original. Após ultrapassado o limite elástico, a deformação passa, progressivamente, de elástica para plástica e, dessa forma, quando removida a tensão, o material não conseguirá voltar totalmente a sua forma original. Se o carregamento continua após isso, a tensão de ruptura (ou tensão última) será atingida e o material se rompe.

- Resistência à Fadiga: A Fadiga é falha resultante de esforços chamados flutuantes; ou seja, esforços cíclicos. Se o chassi de uma motocicleta estiver sujeito apenas a cargas operacionais normais, a fadiga será a causa mais provável de falha (Foale, 2002). Assim, a Resistencia a Fadiga é a capacidade do material resistir a aplicações seguidas de reversões de tensão (fechando assim um ciclo) por um determinado período de tempo, ou vida.

A figura 2.13 mostra o diagrama S-N, resistência a fadiga por número de ciclos, para o aço USN G41300 (que aqui serve apenas de exemplo). Pode-se observar que o gráfico se torna horizontal ao se aproximar de  $10^6$  ciclos; assim, a resistência a fadiga se estabiliza nessa região. Segundo Shigley (2004), o gráfico nunca se torna horizontal para materiais não ferrosos, como alumínio, ou ligas e portanto esses materiais não têm limite de resistência a fadiga definido.



- Ductilidade: Define o tipo de falha que um material apresenta. Um material dúctil é um material que sofre grande quantidade de deformação plástica (permanente) antes de romper. Por outro lado, se um material se rompe repentinamente, sem apresentar grandes níveis de deformação, este é dito frágil. De forma geral, alto nível de ductilidade é preferível pois o material poderá suportar uma certa quantidade de sobrecarga sem chegar a falha total (Foale, 2002).
- Rigidez: A rigidez é definida pela carga aplicada e a deflexão causada no material. O Módulo de Young (ou de Elasticidade) é um parâmetro que proporciona uma noção da rigidez de um material, ele é a inclinação da

parte elástica linear da curva tensão-deformação (Ashby, 2011) Por exemplo, se uma carga de 100 KN é aplicada a um material com secção transversal de 1 mm<sup>2</sup>, e o mesmo sofre uma deformação de 0,001, seu módulo de Young será:

$$\frac{100KN/1mm^2}{0,001} = 100 Pa$$

As rigidezes torcional e flexional não dependem apenas do módulo de Young e da área da secção transversal do material, mas também do momento de inércia. (Foale, 2002). Essas são calculadas, respectivamente, pelo produto do módulo de Young com os momentos de inércia e polar.

- Densidade: Também chamada de massa específica, é a razão entre a massa de um material e o volume que ele ocupa. É expressa através da equação:

$$\rho = Kg/m^3 \quad (2.1)$$

- Soldabilidade: Pode ser descrita como o grau de dificuldade de soldar um material, além da capacidade deste de manter suas propriedades físicas após o processo de soldagem.

Na fabricação de chassis de motocicleta, os materiais mais empregados são as ligas de aço e de alumínio. Estas são escolhidas tanto por suas ótimas propriedades mecânicas quanto por de sua facilidade de trabalho e custo relativamente baixo. O alumínio se mostra melhor para alguns tipos de chassi, como os dupla-viga, e o aço para outros, como os chassis triangulares.

### 2.3.2- Alumínio

O alumínio possui propriedades bastante interessantes para engenharia: densidade muito baixa, 2700 kg/m<sup>3</sup>, e resistência mecânica alta. Outras propriedades incluem resistência a corrosão, excelente condutividade térmica e elevada ductilidade. Por possuir alta ductilidade, é fácil de se trabalhar com o

alumínio e dar a ele formas diversas. Pode-se ainda aumentar a resistência mecânica do alumínio através de tratamentos térmicos e da introdução de elementos de liga.

O alumínio também possui módulo de Young bastante baixo, em torno de 69 GPa (três vezes mais baixo do que o do aço) e, por conta disso, para alcançar a rigidez necessária num chassi tubular feito com esse material os tubos devem ter seu diâmetro aumentado, o que as vezes torna a fabricação inviável.

Deve ser lembrado que as características de fadiga do alumínio são tais que falha é inevitável, eventualmente, em componentes sujeitos a estresse alternado; portanto, sua vida deve ser aceita como limitada (Foale, 2002).

Nas competições atuais, o alumínio é usado principalmente na fabricação de chassis dupla viga.

### **2.3.3- Aço**

O aço é material mais comum na fabricação de chassis, tanto em motos urbanas como nas esportivas. Isso se deve a propriedades como alta resistência a tração e compressão, dureza, resistência ao desgaste e ductilidade. Além disso, o aço é relativamente barato (geralmente, mais barato que o alumínio) e fácil de se trabalhar :podendo ser soldado por vários métodos e facilmente usinado.

A densidade do aço fica em torno de 7800 Kg/m<sup>3</sup> (mais de três vezes maior do que a do alumínio), o que pode deixar chassis maciços muito pesados e, por conta disso, ele geralmente é usado em chassis tubulares.

De acordo com Foale, para manter a mesma rigidez torcional e flexional em um tubo de material menos denso pode-se aumentar sua espessura de parede e manter seu diâmetro o mesmo, ou, mais eficiente, aumentar o diâmetro e manter a mesma espessura de parede. Sabendo disso, ao substituir aço por alumínio na tentativa de tornar o chassi mais leve deve-se levar em consideração o aumento que será necessário no diâmetro do tubo para manter a rigidez.

Ainda segundo Foale, mantendo-se a espessura constante, um tubo de alumínio precisaria de aproximadamente o dobro do diâmetro de um tubo de aço para manter a rigidez; em contrapartida, haveria uma redução de peso de aproximadamente 30%.

#### 2.3.4- Ligas de Aço Cromo-Molibdênio-*Cromoly*

São ligas de aço que recebem adição de elementos que proporcionam um aumento da resistência, principalmente resistência após a soldagem. Porém, o módulo de Young e a densidade continuam iguais aos das ligas de aço comum. Por tanto, se eles forem substituídos por ligas de aço de baixa resistência e o mesmo tamanho de tubo for usado, o peso e a rigidez do quadro serão os mesmos (Foale, 2002). O que deve ser feito é aproveitar a vantagem de resistência das ligas de *cromoly* e diminuir o diâmetro e ou a espessura dos tubos utilizados na fabricação do chassi, tendo, dessa maneira, um chassi mais leve e resistente. Se rigidez não é problema para a estrutura ou membro em particular, então o uso de tubos de alta resistência permitirá paredes mais finas, portanto, peso reduzido. Mas se a rigidez é vital, a melhor maneira de usar esse tubo é reduzir a espessura da parede e aumentar o diâmetro, mas em menor proporção (Foale, 2002).

#### 2.3.5- Outros Materiais

Alguns outros tipos de materiais têm sido usados para fabricação de chassis ao longo do tempo, é o caso do magnésio e do titânio. O titânio foi, e ainda é, usado na construção de chassis tubulares. Ele possui aproximadamente metade do módulo de Young do aço, bem como metade de sua densidade, e alta resistência. Segundo Foale, por conta dessas características, seu uso seria apropriado em projetos de chassis triangulados. As desvantagens do titânio compreendem seu alto custo e as técnicas de soldagens sofisticadas necessárias.

Magnésio também foi usado na fabricação de estrutura *backbone*. A grande desvantagem desse material é a sua baixa resistência a fadiga, já que possui vida limitada, e a corrosão.

## 2.4- GEOMETRIA DA MOTOCICLETA

A geometria da motocicleta tem total influência no seu comportamento dinâmico e no seu rendimento em pista (Cossalter ,2006); assim sendo, em um projeto de uma motocicleta e, por conseguinte, de um chassi, cada parâmetro geométrico deve ser levado em consideração, pois a combinação destes ditará as reações da motocicleta á curvas, frenagens, aceleração em retas e perturbações externas. Os parâmetros que compõem a geometria da motocicleta são: (ver fig. 2.24).

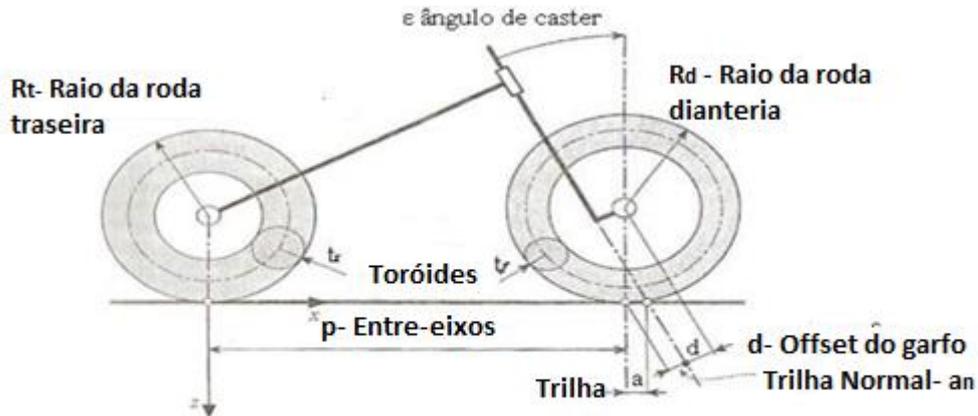
- Entre-eixos: distância entre os eixos das rodas dianteira e traseira;
- *Offset* do garfo dianteiro: distancia perpendicular entre o eixo do caster e o centro da roda dianteira;
- Ângulo de Caster: ângulo entre o eixo de direção e uma reta vertical perpendicular ao eixo da roda dianteira;
- Raio do Pneu Dianteiro;
- Raio do Pneu Traseiro;
- Raio da Seção circular do Pneu Dianteiro;
- Raio da Seção circular do Pneu Traseiro.

Além desses, existem alguns parâmetros que são definidos a partir dos anteriores:

- $p_d = (R_d - t_d)$  – raio do centro do toróide dianteiro;
- $p_t = (R_t - t_t)$  – raio do centro do toróide traseiro;
- $a_n = R_d \cdot \text{sen}(\epsilon) - d$  – trilha normal;
- $a = a_n / \text{cos}(\epsilon) = R_d \cdot \text{tang}(\epsilon) - d / \text{cos}(\epsilon)$  – trilha.

De todos os parâmetros mostrados, três deles tem uma importância superior na hora de projetar uma motocicleta, e é por eles que, usualmente, a motocicleta é definida. São eles o ângulo de caster,  $\epsilon$ , a Trilha,  $a$ , e a Distância Entre Eixos,  $p$ , (ou simplesmente entre eixos).

Figura 2.14: Parâmetros geométricos da motocicleta



Fonte: Adaptado de Cossalter (2006)

#### 2.4.1-Definição da Motocicleta através do Entre-eixos, do Caster e da Trilha

A distância entre eixos, **p**, é a distância entre os pontos de contato das rodas com o solo. O ângulo de caster,  $\epsilon$ , é o ângulo entre o eixo vertical e o eixo de rotação da seção frontal (eixo de direção). A Trilha normal, é a distância entre o ponto de contato da roda dianteira e o ponto de contato do eixo de direção com a estrada, medido do solo. (Cossalter,2006). Esses parâmetros, juntos, definem a manobrabilidade da motocicleta percebida pelo piloto.

#### 2.4.2- Distancia Entre Eixos

O valor ideal de Entre Eixos varia de acordo com o tipo de motocicleta: pode ter 1200 mm, para motos de baixas cilindrada e *scooters*, indo até 1300 mm para motos 125 cc e até 1350 mm para 250 cc. Para motos mais pesadas, geralmente destinadas a turismo, o entre eixos pode superar os 1600 mm.

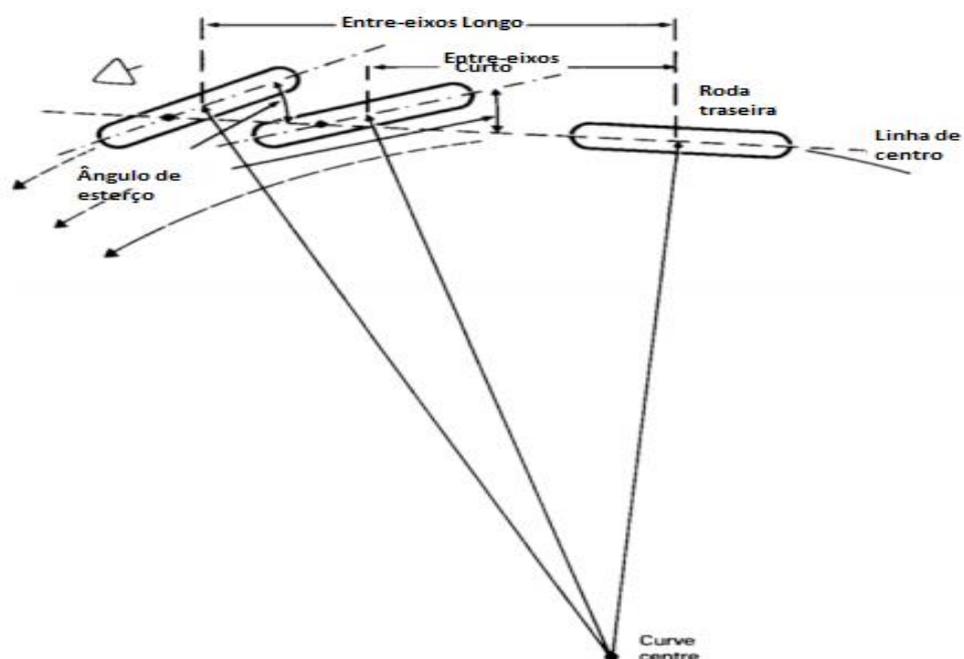
No geral, aumentar a distância entre eixos, assumindo que os demais parâmetros permaneçam constantes, leva a:

- Um aumento desfavorável na deformabilidade flexional e torcional do quadro, esses parâmetros são muito importantes para a manobrabilidade (quadros mais deformáveis fazem a motocicleta menos manobrável);

- Um aumento desfavorável no raio mínimo de curvatura, visto que isso torna mais difícil fazer uma curva com raio de curvatura pequeno;
- Na hora da curva, deve haver um aumento desfavorável do torque no guidão;
- Uma diminuição favorável na transferência da carga entre as duas rodas durante as fases de aceleração e frenagem, com conseqüente diminuição do movimento de arremesso (isso faz com que o *flip-over* para frente e para trás se torne mais difícil);
- Uma redução favorável do movimento de arremesso gerado pelo desnível da estrada;
- Um aumento favorável na estabilidade direcional da motocicleta. (Cossalter,2006).

De modo geral, com o aumento do entre-eixos, tem-se um aumento na estabilidade direcional da moto e uma conseqüente diminuição na facilidade de fazer curvas. Isso pode ser explicado pela necessidade de maiores ângulos de esterço para manobrar a máquina; ou seja, um maior esforço para fazer curvas. Ao mesmo tempo que perturbações da estrada terão menos efeito na deflexão da roda dianteira, promovendo maior estabilidade. Como pode ser visto da figura 2.15

**Figura 2.15- Relação entre a distância entre-eixos e o ângulo de esterço**



Fonte: "Adaptado de " Foale (2002)

A roda traseira também sofrerá menos com deslizamentos laterais (causados por perturbações externas) quando o entre-eixos é aumentado, tendo uma deflexão menor em relação ao eixo de simetria da moto. Isso pode ser observado na figura 2.16.

**Figura 2.16- Relação entre entre-eixos e ângulo de deslocamento**



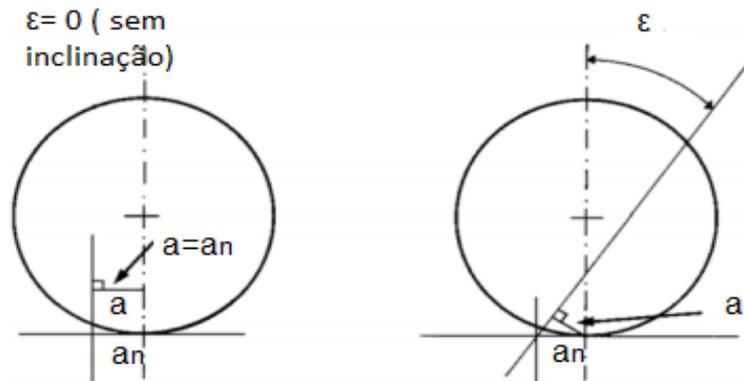
**Fonte: "Adaptado de " Foale ( 2002)**

### **2.4.3- Ângulo de Caster**

Assim como a distância entre eixos, o ângulo de caster também irá variar de acordo com o tipo da motocicleta. Ele pode ir de  $19^\circ$  para motos *speedway*, passando por  $21-24^\circ$  para motos de competição e chegando até  $27-34^\circ$  para motocicletas de turismo. De um ponto de vista estrutural, um ângulo muito pequeno provoca estresse notável na suspensão dianteira durante a frenagem. Como a suspensão dianteira é bastante deformável, tanto flexionalmente quanto torcionalmente, pequenos valores de caster levarão a estresse e, portanto, maiores deformações, que podem causar vibrações perigosas no trem dianteiro (Cossalter, 2006).

O valor do ângulo de caster é diretamente relacionado com o valor da trilha e uma variação leva, inevitavelmente, a uma proporcional variação da trilha. Para um determinado valor de trilha normal, o momento de auto alinhamento da roda dianteira e do garfo depende da trilha real. Na figura 2.17, vê-se que a trilha diminui à medida que o ângulo de caster aumenta. Na prática, isso significa que, para manter a mesma trilha real, precisamos de mais trilha no solo (normal) a medida que o ângulo de caster é aumentado.

**Figura 2.17- Relação entre ângulo de caster e trilha**

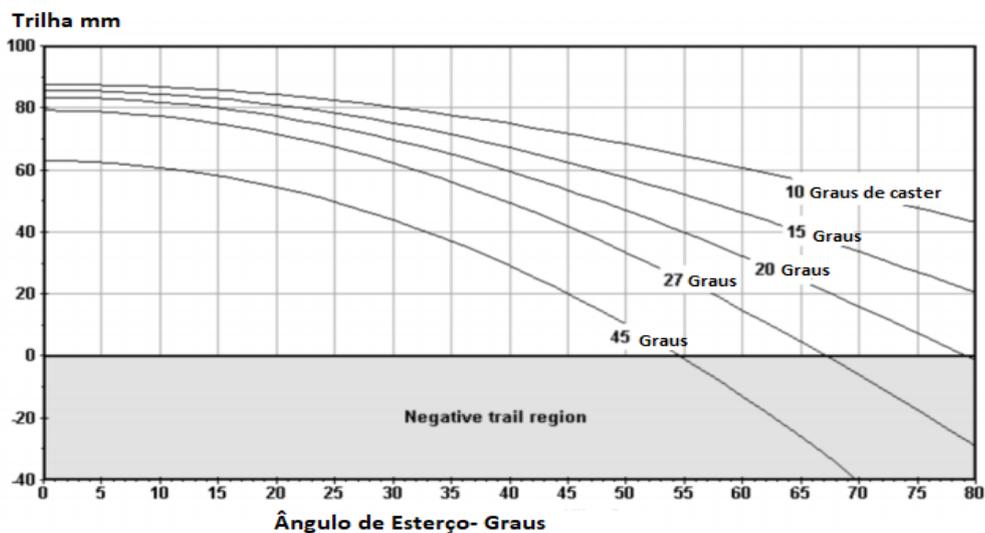


*Fonte: "Adaptado de" Cossalter, 2006*

Nota-se que, para um ângulo de caster nulo a trilha é igual a trilha normal; para uma maior abertura do ângulo de caster teremos uma trilha menor. Sabendo que o momento de auto alinhamento da roda tem como braço de alavanca a trilha, quanto maior for o ângulo de caster menor será esse momento.

Essa diminuição da trilha real com o aumento do caster fica mais explícita quando se aplica um ângulo de esterço (ângulo de giro da direção), como pode ser visto no gráfico da figura 2.18 que mostra uma combinação de trilha real, ângulo de caster e giro da direção.

**Figura 2.18- Gráfico trilha x ângulo de esterço**



*Fonte: Foale, 2002*

Para grandes ângulos de esterço, o caster pode fazer com a trilha se torne negativa (embora ângulos de esterço muito grandes só sejam possíveis em baixas velocidades). Ainda assim, há uma pequena redução da trilha para pequenos valores de giro; o que pode exigir o uso de uma trilha inicial maior no projeto.

Grandes valores de ângulos de caster também podem gerar alterações na cambagem da motocicleta; ou seja, durante uma curva, a roda dianteira pode se inclinar um pouco mais que a traseira. Outro efeito do aumento do ângulo de caster é a redução da eficiência do ângulo de esterço (eficiência giro do guidão). Sabe-se que, para ângulos de caster de aproximadamente 27 graus, se reduz a eficiência do ângulo de esterço máximo para aproximadamente 90% do giro do guidão.

#### 2.4.4- A Trilha

Assim como o caster e a distância entre eixos, há faixas de valores de trilha adequados para cada tipo de motocicletas. Segundo *Cossalter*, Para motos de competição, ela pode variar de 75 a 90 mm; já em motos de turismo ou esportivas, pode variar de 90 a 100 mm; para grandes motocicletas, destinadas apenas a turismo, a trilha pode passar os 120 mm,

O valor da trilha normal,  $a_n$ , pode ser calculado diretamente através de três parâmetros já mencionados: o ângulo de caster,  $\epsilon$ , o *offset* dianteiro,  $d$ , e o raio da roda dianteira,  $R_d$ . A trilha será considerada positiva quando o ponto de contato da roda dianteira estiver atrás do ponto de contato da linha do eixo de direção com o solo e será considerada negativa quando o ponto de contato da roda estiver na frente do ponto de contato da linha do eixo de direção com o solo. Segundo *Cossalter*, o valor da trilha medido a partir da roda pode ser relacionado com a trilha normal através da equação:

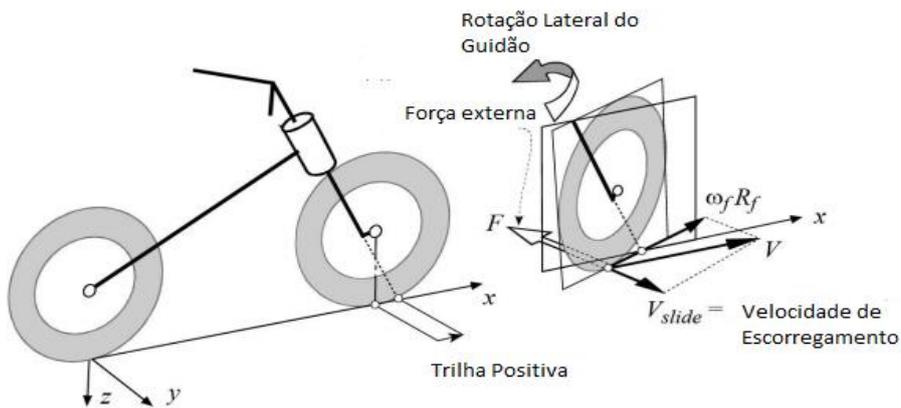
$$a = a_n / \cos \epsilon \quad [\text{mm}] \quad (2.2)$$

A trilha influenciará diretamente na estabilidade da motocicleta, especialmente quando em movimento retilíneo. A trilha atua como braço de alavanca para um momento que surge em resposta a uma perturbação externa

na roda. Esse momento faz com que a roda gire em torno do eixo de direção e, dependendo do tipo de trilha, pode ou não ser benéfico.

Para uma trilha positiva: ponto de contato da roda dianteira com o solo atrás do eixo de direção, o momento gerado se opõe a força externa e, portanto, a rotação lateral do pneu, o que ajuda a manter a estabilidade da motocicleta. Para uma trilha negativa, o momento gerado atua na direção da força externa, contribuindo para a rotação lateral do pneu e levando instabilidade a motocicleta.

**Figura 2.19- Influência da trilha positiva no efeito restaurador da roda**

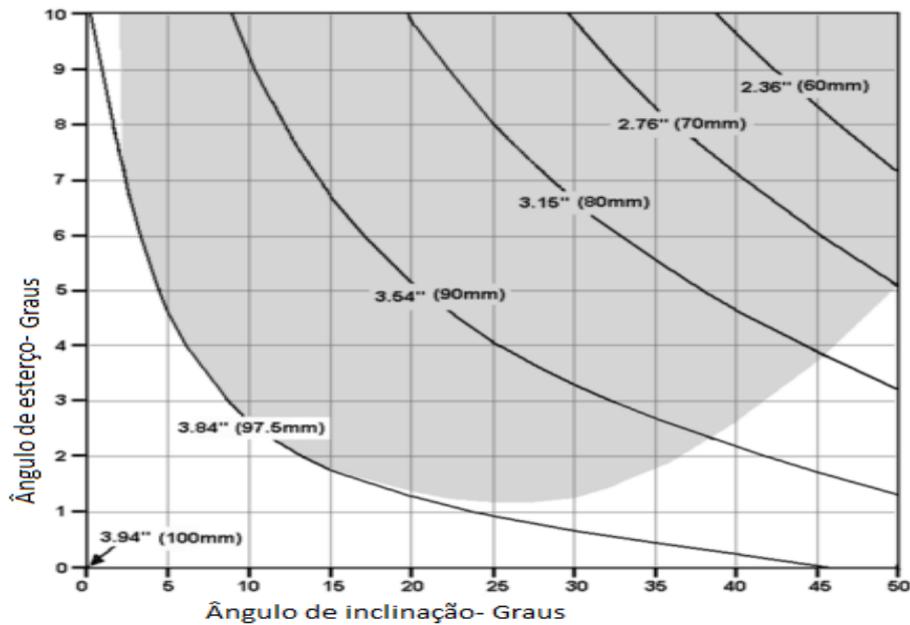


**Fonte: “adaptado de “Cossalter 2006”**

Apesar da trilha da roda dianteira ser bem menor do que a da traseira, ela exerce um papel mais importante no alinhamento da motocicleta. Se ambas as rodas sofrem um deslocamento lateral igual por conta de uma força externa, o ângulo de escorregamento da roda dianteira será sempre maior e, portanto, a ação da força restauradora é maior. A roda traseira, por sua vez, terá um ângulo de deslizamento menor, o que faz com que a força restauradora também seja menor; sendo, assim, mais difícil de realinhá-la.

No entanto, a trilha não é um valor fixo: numa corrida ou passeio, ela pode variar em função de vários fatores, como o ângulo de esterço<sup>1</sup>, ângulo de inclinação e mesmo o raio do perfil do pneu (Foale,2002). A figura 2.20 mostra valores de trilhas normais frontais em função do ângulo de inclinação e do ângulo de esterço. Algumas dessas combinações não podem ser reproduzidas na realidade, estas estão mostradas na área sombreada.

Figura 2.20- Gráfico ângulo de esterço x ângulo de inclinação



Fonte: "Adaptado de" Foale, 2002

Durante a curva, forças laterais de atrito asseguram a adesão da moto com a pista. Essas forças são perpendiculares a linha de intersecção da roda com o plano da estrada. Tais forças também criam momentos em volta do eixo de direção que são proporcionais as distâncias  $a_n$ , para a roda dianteira, e  $b_n$ , para a roda traseira. De acordo com Cossalter elas se relacionam com a distância entre eixos pelas seguintes equações:

$$a_n = a \cos \varepsilon \quad [\text{mm}] \quad (2.3)$$

$$b_n = (p + a) \cos \varepsilon \quad [\text{mm}] \quad (2.4)$$

Onde  $a_n$  representa a trilha normal dianteira e  $b_n$  a trilha normal traseira. Podemos observar, por essas equações, como a trilha se relaciona com o entre-eixos da moto e, por conta disso, devem ser considerados em conjunto. Portanto, não seria correto definir uma trilha como pequena ou grande sem relacioná-la com o entre-eixos. Como parâmetro comparativo, podemos usar a razão entre as trilhas normais traseira e dianteira:

$$R_n = a_n/b_n [\%] \quad (2.5)$$

O valor dessa razão para motocicletas de corrida é aproximadamente 6%; para motos esportivas e superesportivas, entre 6 e 6,5%; e para motos de turismo varia entre 6 e 8% (Cossalter, 2006).

#### 2.4.5- Centro de Gravidade da Motocicleta

A posição do centro de gravidade da motocicleta tem influência significativa no seu comportamento dinâmico. Sua posição depende da distribuição e quantidade de massa dos componentes individuais da moto (Cossalter, 2006). Numa motocicleta, geralmente, o componente mais pesado é o motor e assim é ele quem tem maior influência na posição do centro de gravidade.

Segundo Cossalter, a distância longitudinal entre o centro de gravidade e o ponto de contato da roda traseira pode ser facilmente determinada se soubermos a massa total da moto e as reações nas rodas em condições estáticas por uma das duas equações:

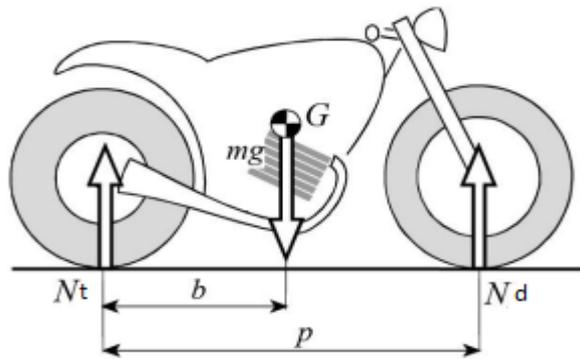
$$b = \frac{N_d * P}{mg} \quad [\text{mm}] \quad \text{ou} \quad (2.6)$$

$$p = \frac{N_t * P}{mg} \quad [\text{mm}] \quad (2.7)$$

Onde:

- $b$  = distância do ponto de contato da roda traseira até a CdG;
- $N_t$  = força normal na roda traseira;
- $N_d$  = força de reação na roda dianteira;
- $P$  = a distância entre-eixos;
- $mg$  = peso da motocicleta.

**Figura 2.21- Distância entre o ponto de contato da roda traseira e o centro de massa**



**Fonte: “adaptado de” Cossalter, 2006**

Podemos também expressar a posição do centro de massa através da porcentagem da carga que age em cada roda:

$$\frac{\% \text{ Carga Dianteira}}{\% \text{ Carga Traseira}} = \frac{N_d/mg}{N_t/mg} \quad (2.8)$$

A distribuição de carga pode variar de acordo com o tipo de motocicleta (a que se destina e como é usada) e potência da mesma: motos para todos os terrenos geralmente possuem centros de gravidade mais altos, enquanto motos de maior cilindrada possuem centros de gravidade mais baixos. A tabela 3 mostra a faixa de carregamento geralmente observada em cada roda para os tipos mais comuns de motocicletas.

**Tabela 3- Distribuição de carga nos principais tipos de motocicletas**

Tipo de Motocicleta	Carga dianteira (%)	Carga traseira (%)
Motos de competição	50-57	43-50
Turismo e Esportivas	43-50	50-57
Esportivas Atuais	50	50

**Fonte: “Adaptado de” Cossalter, 2006**

Se o centro de gravidade se encontra mais próximo da roda dianteira (carga frontal > 50%), como pode ocorrer nas motos de competição, rotacionar

a motocicleta torna-se mais difícil. Essa situação favorece as motos em competições por dificultar o giro excessivo do pneu dianteiro, mantendo-as em equilíbrio dinâmico mais facilmente quando expostas a perturbações externas. Outra vantagem é que uma carga maior na frente compensa parcialmente os efeitos aerodinâmicos que descarregam a roda dianteira em altas velocidades.

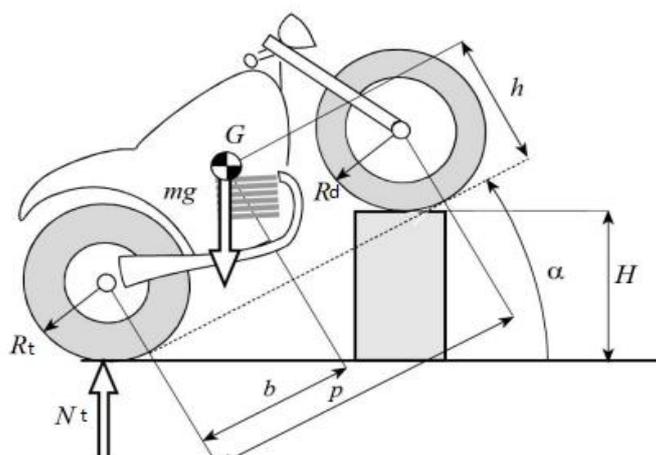
Ainda segundo o Cossalter, a posição vertical do centro de gravidade também pode ser encontrada, de forma relativamente simples, erguendo uma das rodas a uma altura conhecida e calculando a reação na roda que ficou no solo. Se erguermos a roda dianteira teremos:

$$h = \left( \frac{N_t \cdot p}{mg} - (p - b) \right) \cot \left[ \arcsen\left(\frac{H}{p}\right) \right] + \frac{R_d + R_t}{2} \quad [\text{mm}] \quad (2.9)$$

Sendo:

- $h$  = altura do centro de gravidade
- $H$  = altura de elevação da roda dianteira
- $\alpha$  = ângulo entre o ponto de contato da roda dianteira e o solo
- $R_t$  = raio da roda traseira
- $R_d$  = raio da roda dianteira
- $mg$  = peso da motocicleta
- $N_t$  = carga na roda traseira
- $b$  = distância entre roda traseira e o centro de massa
- $p$  = distância entre-eixos

**2.22- Posição vertical do centro de massa**



Fonte: "Adaptado de "Cossalter, 2002

Assim como a posição longitudinal, a posição vertical do centro de gravidade também exerce grande influência no comportamento dinâmico da moto e isso é ainda mais evidente durante as fases de aceleração e frenagem: durante a fase de aceleração, um centro de gravidade mais alto levará a uma maior transferência de carga da roda dianteira para a roda traseira que, por sua vez, leva a um aumento da força motriz (que é transmitida do motor até a roda traseira através do sistema de transmissão); porém, por estar menos carregada, a roda dianteira fica mais suscetível a rotação em torno do eixo de direção. Já na fase de frenagem, um centro de gravidade mais alto causa uma carga maior na roda dianteira e, por consequência, a roda traseira ficará menos carregada. Isso torna a frenagem mais eficiente, porém torna mais provável um efeito chamado de *flip-over*: quando a roda traseira é totalmente descarregada e se eleva ao perder o contato com o solo durante a frenagem.

A posição ideal do centro de gravidade também vai variar com a aderência do pneu a pista: em uma situação de pouca aderência (pista molhada ou suja), um centro de gravidade mais alto é ideal porque aumenta a capacidade de frenagem e aceleração; já para níveis de aderência mais altos (pista seca e limpa), é vantajoso que o centro de gravidade esteja mais baixo para evitar *flip-overs*.

O à altura do centro de gravidade da motocicleta sozinha tem valores que vão de 0,4 a 0,55 m, mas a presença do piloto eleva o centro de gravidade para valores entre 0,5 a 0,77 m. Obviamente, esse deslocamento do centro de gravidade devido a presença do piloto vai depender da relação entre a massa do piloto e a da motocicleta (Cossalter, 2006). A tabela 4 mostra um resumo dos principais efeitos da posição do centro de gravidade.

**Tabela 4- Relação entre a posição do CdG e o comportamento da motocicleta**

CdG mais próximo da roda dianteira	A motocicleta tende a deslizar mais (em curvas, a roda traseira escorrega lateralmente mais do que o necessário)
CdG mais próximo da roda traseira	A roda dianteira tende a virar mais do que o pretendido em curvas.
Cdg mais alto	A roda da frente tende a se elevar na aceleração. A roda traseira pode se elevar na frenagem
Cdg mais baixo	A roda traseira tende a escorregar na aceleração. A roda dianteira tende a escorregar na frenagem.

*Fonte: "adaptado de" Cossalter, 2006*

## **CAPPÍTULO III**

### **3. METODOLOGIA**

Este trabalho visa acompanhar o desenvolvimento de um chassi para uma moto de competição categoria Moto 3, desde a definição da sua geometria até a análise estrutural do mesmo. A partir disso, três grandes etapas foram seguidas:

- Coleta de dados, feita através de consulta a literatura especializada e trabalhos acadêmicos relacionados, principalmente trabalhos desenvolvidos na Espanha, que é o país sede da competição;
- Projeto conceitual do chassi, onde foram definidos os parâmetros geométricos do protótipo;
- Pesagem do chassi já feito, juntamente com motor e suspensão dianteira e traseira;
- Cálculo dos esforços atuantes no chassi durante frenagem, aceleração e inclinação;
- Análise estrutural, onde, após calculados os esforços que irão atuar no chassi, foi feita a simulação no software CAD/CAE *solidworks* para verificar o fator de segurança do projeto e seus possíveis pontos críticos.

### 3.1- PROJETO CONCEITUAL DO CHASSI

O projeto do chassi foi feito levando em consideração as necessidades da equipe Motorius UFPB referentes aos requerimentos estabelecidos no regulamento da competição e as limitações financeiras e logísticas encontradas pela equipe. Sob essas condições a solução proposta foi um chassi tubular, de estrutura triangulada, utilizando aço SAE 4130. Esse aço possui um limite de escoamento de 460 MPa e resistência a tração de 560 MPa.

A estrutura treliçada, além de fornecer alta rigidez, facilita o trabalho de soldagem e dobra dos tubos e minimiza a necessidade de usinagem. Os tubos selecionados para o projeto possuem as seguintes dimensões: 1" (uma polegada) de diâmetro, com espessura de 1,4mm, para as vigas principais (as que se conectam diretamente a caixa de direção) e para os componentes menores que fazem a união dessas vigas. Já para as treliças usou-se tubos com  $\frac{3}{4}$ " (três quartos de polegada) de diâmetro com 1,2mm de espessura para a treliças.

A escolha do material se deu através de uma análise que retornou bons resultados para as seguintes propriedades: limite de escoamento maior do que o do aço comum, alta resistência a tração, pouca necessidade de usinagem, afinidade com os tipos de soldagem mais comuns (Mig/Mag e eletrodo revestido), a possibilidade de uso de ferramentas simples e baratas para o corte dos tubos e chapas, custo relativamente baixo e boa logística, devido a disponibilidade no mercado regional.

O projeto conceitual foi feito no *software Solidworks*, e o design da estrutura foi pensado para ser simples e conseguir dar suporte ao motor modelo KTM 250cc (modelo padrão da competição 2018).

Começando pelo toróide das rodas dianteira e traseira, já que as rodas são fornecidas pela competição (padrão para as equipes) e possuem dimensão 2,5" x17" (roda dianteira) e 3,5" x17" (roda traseira) sendo o primeiro número a largura da roda e o segundo o diâmetro.

O *offset* do garfo é pré-estabelecido, 32mm, já que essa medida depende da suspensão dianteira e a usada no protótipo foi a do modelo Honda CB300, que se adequa perfeitamente a estrutura.

O ângulo de caster escolhido foi  $24^\circ$ , o que o deixa dentro do alcance recomendado pela literatura para motos de competição e gera uma trilha de 79,07 mm. Pode-se observar que esse resultado é coerente com o gráfico da figura 2.28 e a trilha gerada também se encontra dentro do alcance sugerido pela literatura para motos de competição.

Substituindo as equações 2.3 e 2.4 na equação 2.5, razão entre trilhas normais dianteira e traseira, com  $R_n$  igual a 0,06 (6%);  $a$ , trilha, igual a 79,07 mm; o ângulo de caster,  $\epsilon$ , igual a  $24^\circ$ , obtém-se:

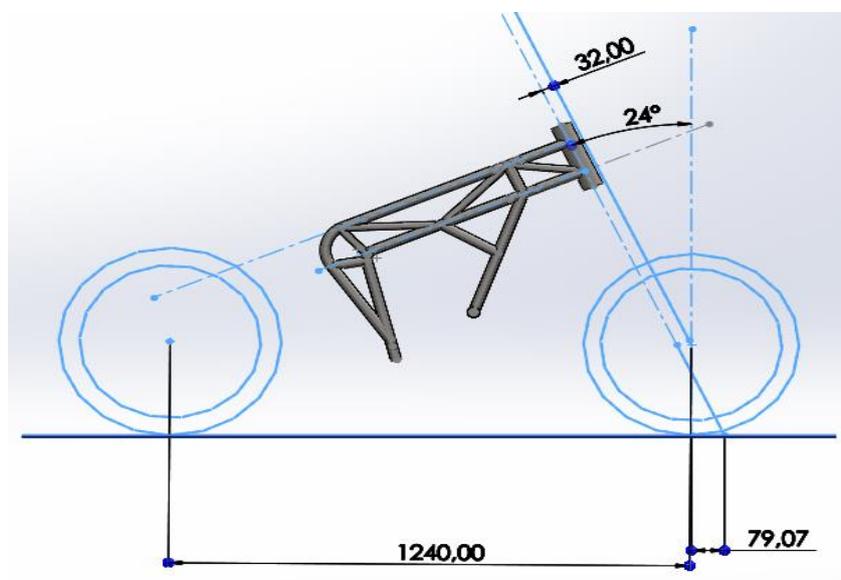
$$0,06 = \frac{79,07 * \text{Cos } 24}{(79,07+p)\text{Cos } 24}$$

Resolvendo para a distância entre-eixos, temos:

$$p = 1238,76 \text{ mm.}$$

Assim, o entre-eixos foi aproximado para 1240mm. A geometria do projeto fica, então, como na figura 3.1.

**Figura3.1- Geometria do projeto conceitual**



Fonte: Autor

### 3.1.2- Cálculo da distribuição de massa e centro de gravidade do chassi

Para verificar a distribuição de carga da motocicleta e a posição do centro de massa da mesma, utilizou-se de duas balanças com resolução de 100g.

O chassi usado na pesagem possui exatamente o mesmo *design* do projeto de chassi proposto neste trabalho; de fato, ele foi construído antes e com material que a equipe tinha disponível no momento, aço 1020. Isso não compromete os resultados dos estudos, visto que a massa específica do material é a mesma.

As balanças foram posicionadas sob as rodas da motocicleta, fornecendo, assim, o peso concentrado em cada trem (traseiro e dianteiro). Multiplicando o valor mostrado pela constante gravitacional ( $9,81\text{m/s}^2$ ) pode-se obter o valor das forças normais (reações ao peso) em cada roda. O peso total da motocicleta é a soma das indicações de cada balança. Observou-se que a balança posicionada na roda dianteira mostrou o valor de 44,6 kg e a balança posicionada na roda traseira 52,6kg. Assim sendo, o peso total do sistema é de 97,2 Kg.

- $mg = (44,6 \text{ kg} + 52,6 \text{ kg}) * 9,81 \text{ m/s}^2 = 953,53 \text{ kN}$
- $R1 = 44,6 \text{ kg} * 9,81\text{m/s}^2 = 437,52 \text{ kN} = Nt$
- $R2 = 52,6 \text{ kg} * 9,81\text{m/s}^2 = 516,00 \text{ kN} = Nd$

Usando agora a equação 2.6, pode-se achar a posição horizontal do centro de massa.

$$b = \frac{Nd * P}{mg} = \frac{437,52 * 1240}{953,53} = 568,96 \text{ mm}$$

Já para verificar a posição vertical do centro de massa, além de uma das balanças posicionada na roda traseira, foi usado um cavalete de altura previamente conhecida, 400mm, para sustentar a roda dianteira. Dessa forma, com o valor indicado pela balança e a altura do cavalete, pode-se usar a equação 2.9 para encontrar  $h$  :

- $Nt = 516,00 \text{ kN}$
- $H = 400 \text{ mm}$

$$h = \left( \frac{N_t * P}{mg} - (p - b) \right) \cot \left[ \arcsen \left( \frac{H}{p} \right) \right] + \frac{R_d + R_t}{2} =$$

$$\left( \frac{516,00 * 1240}{953,53} - (1240 - 568,96) \right) \cot \left[ \arcsen \left( \frac{400}{1240} \right) \right] + \frac{437,52 + 516,00}{2} = 475,23 \text{mm}$$

Se  $N_t$  e  $N_d$  são valores conhecidos, então pode-se encontrar as porcentagens da carga situadas em cada roda:

- % carga dianteira =  $N_d/mg = 437,52 \text{ kN} / 953,53 \text{ kN} = 45,88\%$
- % carga traseira =  $N_t/mg = 516,00 \text{ kN} / 953,53 \text{ kN} = 54,11\%$

A distribuição de cargas entre as rodas foi observada como 45,88%-54,11%, dianteira-traseira, respectivamente. Esse resultado pode representar vantagem num circuito onde se realiza muitas frenagens, já que o maior peso no trem traseiro vai ajudar a roda traseira a se manter no solo. Vale lembrar que, durante a corrida, esses valores sofrerão alterações constantes devido a transferência de carga. A figura 3.2 mostra o trabalho de pesagem da moto para cálculo da altura do centro de massa

**Figura 3.2- Pesagem do chassi de aço 1020**



**Fonte: Autor**

A tabela 5 sumariza os resultados obtidos para centro de massa e distribuição de carga.

**Tabela 5- Centro de massa e distribuição de cargas**

Distribuição de Carga (dianteira-traseira)	45,88%-54,11%
<i>b</i> - Distância do ponto de contato da roda traseira até o CG	568,96 mm
<i>h</i> - Altura do centro do CG	475,23 mm

*Fonte: Autor*

### 3.2- CÁLCULO DAS FORÇAS ATUANTES NO CHASSI

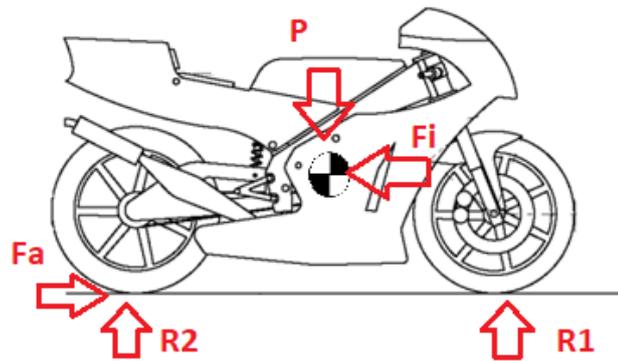
Nesse capítulo serão abordados os esforços típicos a que uma motocicleta de competição está submetido. Para conhecer a magnitude das forças que atuam no chassi, deve-se saber o peso do conjunto moto-piloto. Durante o desenvolvimento deste trabalho a motocicleta possui peso de 97,2 kg; porém, ao ser finalizada, a estimativa é que alcance 105 kg. Com um piloto de 65 kg, pode-se assumir que o peso final do conjunto será em torno de 170kg.

#### 3.2.1- Aceleração Máxima

No caso da aceleração máxima, ocorrerá uma transferência de peso da parte dianteira da motocicleta para a parte traseira até que todo o peso da moto esteja concentrado na roda traseira. É correto afirmar que o peso, **P**, da motocicleta está situado em seu centro de gravidade, **CG**; assim como a força de inércia **Fi**, que se opõem ao movimento de aceleração. As forças de reação devido ao peso, **R1** e **R2**, encontram-se situadas nos pontos de contato das rodas dianteira e traseira com o solo. Por fim, a força de aceleração, **Fa**, está situada na superfície de contato do pneu traseiro com o solo.

No momento da aceleração máxima, após toda a carga ser transferida pra roda traseira, o eixo dianteiro se torna muito mais leve e a roda dianteira perde momentaneamente o contato com o solo, anulando assim a reação nesta roda (**R1=0**) e fazendo a reação na roda traseira se igualar ao peso da moto (**R2=P**).

Figura 3.3- Equilíbrio de forças na aceleração máxima



Fonte: "Adaptado de" Regulamento Motostudent 2018

- $P = 170 \text{ Kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 1667,7 \text{ N}$
- $R1 = 0$
- $R2 = P = 1667,7 \text{ N}$ .

O somatório dos momentos em relação ao centro de massa fornece:

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

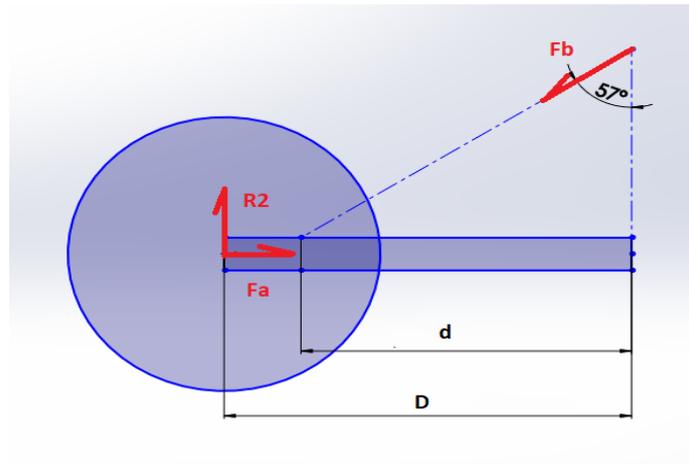
$$F_a \cdot 475,23 \text{ mm} = R2 \cdot 568,96 \text{ mm}$$

- $F_a = 953,53 \cdot (588,28/475,23) = 1180,36 \text{ N}$
- $F_i = F_a$

Na fase de aceleração máxima, será suposto que a força de aceleração atua de maneira horizontal na cavidade onde passa o eixo da balança, que faz a junção desta com o chassi. Essa força é a força de tração que é transmitida do pinhão para a coroa através da corrente, depois para o pneu, para a balança e, por último, para o chassi.

Será suposto também que a suspensão é um corpo rígido, com o sistema mola-amortecedor permanecendo em estado de repouso e, dessa forma, não haverá afundamento da balança devido ao peso do piloto. Nesta situação, as forças que equilibram o sistema são: força de reação ao peso R2, força de aceleração **Fa** e força de reação no amortecedor **Fb**.  $\beta$  é o ângulo que o amortecedor faz com uma linha reta imaginária que vai do seu ponto de ancoragem, no chassi, até a balança.

**Figura 3.4- Diagrama de corpo livre da suspensão traseira**



**Fonte: Autor**

- $D = 545 \text{ mm}$
- $d = 489,25 \text{ mm}$
- $R2 = P = 1667,7 \text{ N}$

No eixo vertical, tem-se:

$$R2 - Fb \cos\beta = 0$$

O somatório dos momentos em relação ao pivô da suspensão, ponto "A", fornece:

$$R2 \cdot D - Fb \cos\beta \cdot d = 0$$

Assim, a força no ponto de ancoragem do amortecedor é:

$$Fb = \frac{D}{d \cos\beta} \cdot R2 = \frac{545 \text{ mm}}{489,25 \text{ mm} \cdot \cos(57^\circ)} \cdot 1667,7 \text{ N} = 3322,17 \text{ N}$$

A força **Fb** atua com uma componente vertical e outra horizontal que são:

$$Fbx = 3322,17 \cdot \cos(57^\circ) = 1857,73 \text{ N}$$

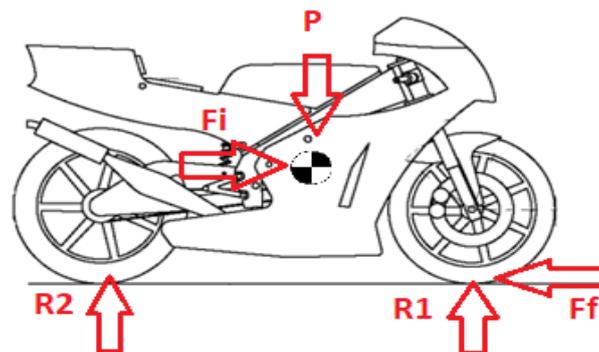
$$Fby = 3322,17 \cdot \sin(57^\circ) = 2754,20 \text{ N}$$

### 3.2.2- Frenagem Máxima

A frenagem máxima, ao contrário da aceleração máxima, transfere toda a carga do eixo traseiro da moto para o eixo dianteiro. Isso submete o chassi a flexão máxima, por conta da total compressão da suspensão dianteira, uma situação bastante desfavorável para a estrutura. Na frenagem máxima, por conta

da transferência de carga, o eixo traseiro fica muito mais leve que o dianteiro e perde momentaneamente o contato com o solo. Assim, pode-se dizer que a força de reação **R2** torna-se zero nesse momento. Como no caso da aceleração máxima, a força de inércia **Fi** se opõe ao movimento (dessa vez a frenagem) e se situa no centro de gravidade. A força de frenagem, **Ff**, atuará na superfície de contato entre o pneu dianteiro e o solo. A posição das forças está esboçada na figura 3.3.

**Figura 3.5- Equilíbrio de forças durante a frenagem máxima**



Fonte: "Adaptado de "Regulamento Motostudent 2018"

- $P = 1667,7 \text{ N}$
- $R2 = 0$
- $R1 = P = 1667,7 \text{ N}$

O somatório dos momentos em relação ao centro de gravidade fornece:

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

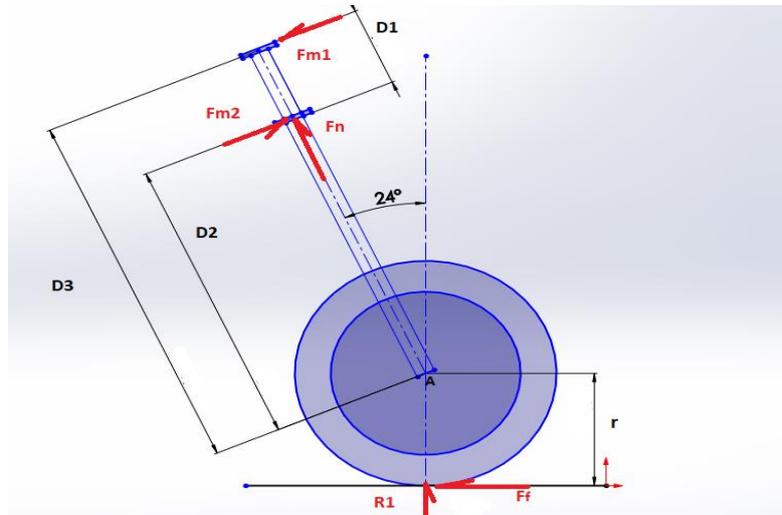
$$F_f \cdot 390,77 \text{ mm} = R1 \cdot 588,28 \text{ mm}$$

- $F_f = 953,53 \cdot (671,04/475,23) = 1346,41 \text{ N}$
- $F_f = F_i$

A frenagem máxima é a situação mais desfavorável a que será submetido o chassi de uma motocicleta: a transferência do peso por completo para a parte dianteira faz com que a caixa de direção fique sobre efeito de forças opostas de tração e compressão. Para obter o valor das forças atuantes nos rolamentos superior e inferior da caixa de direção (**Fm1** e **Fm2**, respectivamente) e a força que atua na suspensão, **Fn**, faz-se o cálculo do momento em relação ao ponto **A** (Onde passa o eixo dianteiro, localizado no centro da roda), ao ponto **m1** (rolamento superior) e em relação ao eixo vertical da suspensão (**Y**). Aqui será

suposto que a suspensão é um corpo rígido, e que, portanto, não ocorre afundamento desta com o peso do piloto.

**Figura 3.6- Diagrama de corpo livre da suspensão dianteira**



**Fonte: Autor**

Sendo as distâncias mostradas no diagrama iguais a:

- D1= 0,185m
- D2= 0,770 m
- D3= 0,955 m
- r = 0,127 m
- R1 = 1667,7 N
- Ff = 1346,41 N

$$\sum MA = 0$$

$$1346,41 \cdot r + F_{m2} \cdot D2 = F_{m1} \cdot D3$$

$$\sum M_{m1} = 0$$

$$F_{m2} \cdot D1 + 1667,7 \cdot D3 \cdot \sin(24^\circ) = 1346,41 \cdot [D3 \cdot \cos(24^\circ) + r]$$

$$\sum My = 0$$

$$-F_n \cdot \cos(24^\circ) + F_{m2} \cdot \sin(24^\circ) - F_{m1} \cdot \sin(24^\circ) + 1667,7 \text{ N} = 0$$

$$F_{m2} = \frac{1346,41 \cdot [0,955 \cdot \cos(24^\circ) + 0,127] - 1667,7 \cdot 0,955 \cdot \sin(24^\circ)}{0,185} = 3772,21 \text{ N}$$

$$F_{m1} = \frac{1346,41 \cdot 0,127 + 3772,21 \cdot 0,770}{0,955} = 3220,52 \text{ N}$$

Com as forças  $F_{m2}$  e  $F_{m1}$ , pode-se encontrar a força que atua verticalmente na suspensão,  $F_s$ , usando a equação x.

$$F_s = 2071,15 \text{ N}$$

Devido ao ângulo de Caster, essas forças terão duas componentes, a horizontal e a vertical. No rolamento superior:

- $F_{m1x} = F_{m1} \cdot \cos(24^\circ) = 2942,1 \text{ N}$
- $F_{m1y} = F_{m1} \cdot \sin(24^\circ) = 1309,90 \text{ N}$
- $F_{m1z} = 0$

No rolamento inferior:

- $F_{m2x} = F_{m2} \cdot \cos(24^\circ) = 3446,08 \text{ N}$
- $F_{m2y} = F_{m2} \cdot \sin(24^\circ) = 1534,30 \text{ N}$

Na suspensão

- $F_{Nx} = F_N \cdot \sin(24^\circ) = 842,41 \text{ N}$
- $F_{Ny} = F_N \cdot \cos(24^\circ) = 1892,09 \text{ N}$

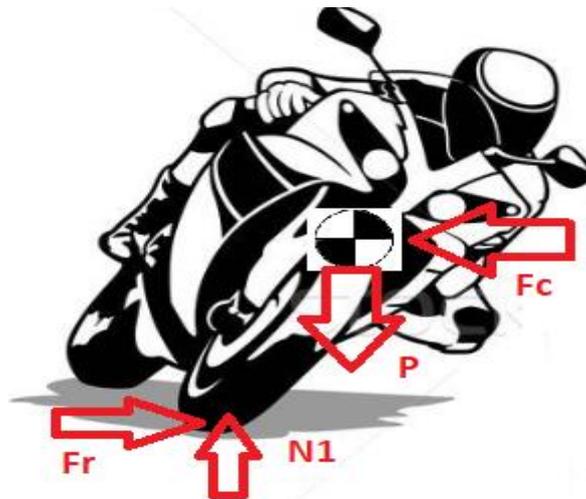
### 3.2.3- Curva Máxima

Nesse caso é considerada a maior inclinação possível da motocicleta durante uma curva, já que a situação será mais desfavorável quanto maior a inclinação.

Durante a curva, a força centrífuga,  $F_c$ , gera uma reação de igual intensidade sentido oposto,  $F_r$ ; essa força nada mais é do que a força de atrito, que atua no ponto de contato do pneu com o solo. Nesse ponto também está

situado a normal **N1** e, por conta da inclinação, essas duas forças estão deslocadas em relação ao centro do pneu. Essas forças acontecem tanto na roda traseira quanto na dianteira, e devem ser colineares. Pode-se considerar que, durante a entrada da curva, a carga é toda direcionada para a roda dianteira. O coeficiente de atrito ( $f$ ) depende do material da pista, da construção e da calibragem do pneu, bem como das condições da pista (e.g., pista seca, pista molhada, pista suja, lama). Por exemplo, em pista seca o valor típico do coeficiente é 0,8, e, em pista úmida, 0,4 (Cossalter, 2006). Nesse estudo, será considerado o fator de atrito como 0,8, que é a situação onde a força de atrito será maior.

*Figura3.7- Equilíbrio de forças durante a inclinação máxima*



Fonte: "Adaptado de" site Alamy

- $P = 1667,7 \text{ N}$
- $N1 = 1667,7 = P$
- $Fr = \mu \cdot N1 = 0,8 \cdot (1667,7 \text{ N}) = Fc = 1334,16 \text{ N}$

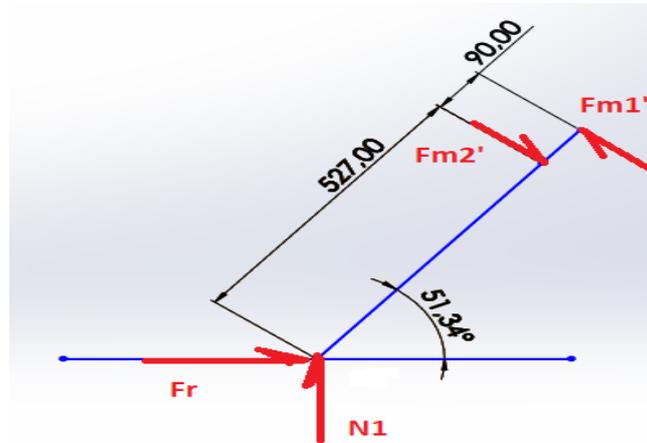
O ângulo máximo de inclinação,  $\alpha$ , pode ser encontrado pela relação das forças:

$$\alpha = \arctg (N1/Fc) = \arctg (1667,7/1334,16) = 51,34^\circ$$

Isolando a suspensão dianteira num sistema de 2-D, pode-se ver como essas forças atuam. **Fm1'** e **Fm2'** são as forças que atuam diretamente nos

rolamentos da caixa de direção, em decorrência da força de reação **N1** e da força e atrito **Fr**.

*Figura 3.8-Diagrama de corpo livre da suspensão dianteira durante a inclinação*



Fonte: Autor

As componentes de N1 e Fr que contribuem para o momento na caixa de direção são:

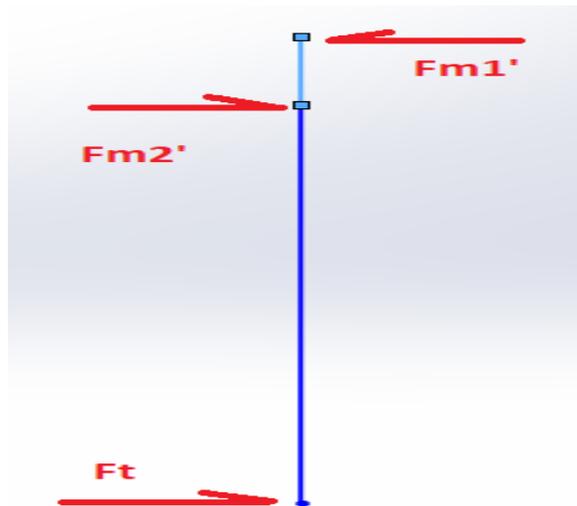
$$N1 \cos(51,34^\circ) = 1667,7(51,34^\circ) = 1302,25 \text{ N}$$

$$Fr \cos(38,66^\circ) = 1334,16(38,66^\circ) = 1041,80 \text{ N}$$

Essas componentes atuam de forma perpendicular ao eixo que representa a suspensão; assim, pode-se simplificar o problema fazendo a soma vetorial dessas forças e posicionar a resultante no eixo das abscissas.

$$\vec{F}_t = \vec{N}_1 + \vec{F}_r = -260,45 \text{ N}$$

Figura 1.9- Equilíbrio de forças no eixo vertical durante a inclinação



Fonte: Autor

Para que haja equilíbrio:

$$\overrightarrow{Fm2'} + \overrightarrow{Ft} = \overrightarrow{Fm1'}$$

.

O somatório dos momentos em relação ao rolamento superior fornece:

$$\sum M_{m1'} = 0$$

$$Fm2' * 90 - 260,45 * (0,5377 + 0,09),$$

$$\overrightarrow{Fm2'} = \frac{260,45 * (0,6277)}{0,09} = 1816,50 \text{ N},$$

Assim,

$$\overrightarrow{Fm1'} = 1816,50 + 260,45 = -2076,95 \text{ N}.$$

### 3.3- ANÁLISE ESTRUTURAL DO MODELO

#### 3.3.1- Métodos dos Elementos Finitos

Para estudar o comportamento do chassi nas várias situações a que é submetido, foi usado a ferramenta do *Solidworks* “*Solidworks simulation*”.

Realizou-se estudos com cargas estáticas (frenagem máxima, aceleração máxima e inclinação máxima) e análise do fator de segurança para todos os casos para que, dessa forma, os eventuais pontos críticos do chassi fossem detectados.

Na simulação o software usa o Método dos Elementos Finitos (MEF), uma ferramenta matemática utilizada para análise de meios contínuos, que consiste em discretizar o meio em pequenos elementos, conservando as propriedades do meio original. Tais elementos são modelados e resolvidos utilizando equações diferenciais.

A origem do MEF remonta ao final do século XVIII quando Gauss propôs a utilização de funções de aproximação para solucionar alguns problemas matemáticos, "posteriormente" o método foi sendo desenvolvido aos poucos, até meados da década de 50 quando um grupo de pesquisadores formados por Turner, Clough, Martins e Topp, trabalhando em um projeto para a Boeing, propuseram um método de análise estrutural que serviria de base para o que estes mesmos pesquisadores, mais tarde, chamariam de Método dos Elementos Finitos. (Lotti *et al*, 2006).

A divisão da geometria em pequenos elementos de comportamento bem definido permite resolver problemas complexos, a partir da subdivisão em problemas mais simples, essas divisões podem ser representadas de diferentes formas com a finalidade de melhor representar a geometria da peça, tais como a triangular, quadrilateral, entre outras, a escolha da geometria do elemento finito varia também em função da dimensão do problema, para que se evite um tempo de computação elevado.

Os pontos de encontro entre geometrias são denominados nós, ou pontos nodais, e o conjunto de todos os pontos nodais dá-se o nome de malha. As equações matemáticas são resolvidas de forma aproximada por método numérico, devido às subdivisões da geometria. O tamanho da malha, número de nós e elementos, definirá o nível de precisão da solução, quanto menor o tamanho do elemento, maior será a quantidade de nós e por consequência maior a precisão, pois as equações resolvidas representando cada elemento terão soluções cada vez mais aproximadas do real. (Mirlissena, 2016).

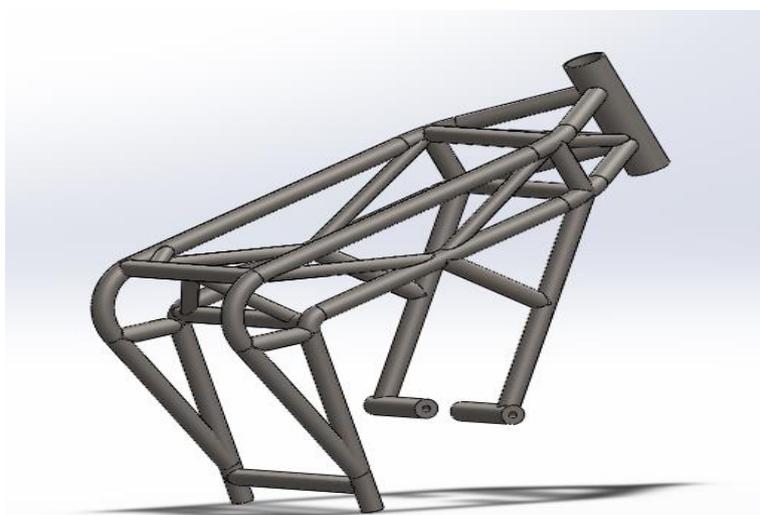
Embora existam outros métodos para realizar análise numérica, o método dos elementos finitos historicamente tem sido empregado para análise estrutural.

Segundo o site do *Solidworks* o MEF é aceito como padrão por conta de sua generalidade e por ser bastante adequado para implementação em computadores.

### 3.3.2- Desenho CAD

O desenho final do chassi, em 3-d, foi feito a partir da estrutura 2-d seguindo a geometria previamente ajustada e usando a ferramenta *sketch 3-d* do *Solidworks*. Os tubos foram feitos usando o recurso *weldment*, que permite criar perfis sólidos com formas pré-estabelecidas a partir de linhas. A forma final do desenho está representada na figura 3.4.

*Figura 3.10-Modelo CAD do projeto*



*Fonte: Autor*

### 3.3.3- Geração da Malha

A malha padrão do *software* é de 15,92 mm (tamanho médio do elemento), podendo ser alterada para mais ou para menos. Quanto menor a malha, maior será a precisão do estudo; porém, maior será o tempo de cálculo e a capacidade exigida da máquina. A geometria do chassi, com tubos de pequenos diâmetros, se adequa melhor a uma malha mais fina, e com base em curvatura; sendo assim, o tamanho utilizado será o de 7mm.

### 3.3.4- Estudo de Cargas Estáticas

Nesse estudo as cargas consideradas são aplicadas de forma estática, ou seja, não ocorrerá alteração na sua direção ou intensidade. O risco que uma carga estática oferece é o de escoamento do material que a suporta, o que só acontece quando o limite elástico (ou limite de escoamento) é atingido.

Para uma situação real, onde o elemento é submetido a um estado tridimensional de tensão, há uma diferença significativa na resistência ao escoamento comparado a um ensaio de tração simples. Segundo Shigley (2004), materiais dúcteis tensionados hidrosticamente apresentam valores de resistência ao escoamento muito maiores do que aqueles sujeitos a um estado de tração simples. A partir dessa observação postulou-se a Teoria da Energia de Distorção. Esse estado geral de tensão é previsto pela seguinte equação:

$$\sqrt{\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}\right]} \geq S_y$$

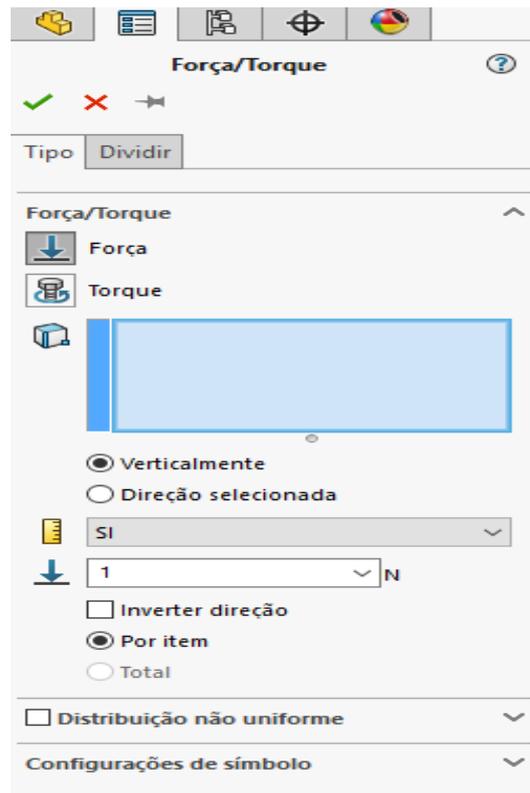
Sendo  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  as tensões aplicadas ao material respectivamente nos eixos x, y e z, e  $S_y$  o limite de escoamento do material. Se a parte esquerda da equação for pensada como uma tensão única, tem-se  $\sigma \geq S_y$ . Essa tensão única é o que se chama comumente de tensão de Von Mises, dada a colaboração do Dr. Von Mises para a teoria.

A tensão de Von Mises é um critério muito mais confiável para análise de escoamento em materiais dúcteis. Vários *softwares* que trabalham com o método dos elementos finitos, assim como *Solidworks*, fazem uso desse critério, e é ele que será levado em conta nesse trabalho.

#### 3.3.4.1- Estudo da Frenagem Máxima

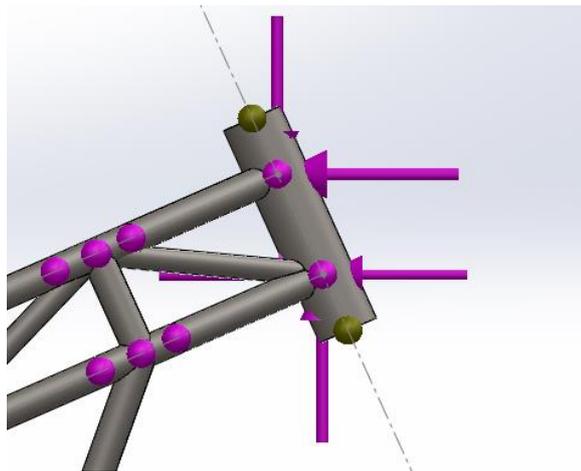
Para o estudo da frenagem máxima, usou-se as forças calculadas no capítulo anterior. Nesse caso o primeiro passo é aplicar as forças, com suas respectivas direções, no ponto onde estão localizados os rolamentos superior e inferior da caixa de direção usando a ferramenta “carga externa” do *software*, como mostrado nas figura 3.11 e 3.12.

**Figura 3.11- Recursos para aplicação de forças estáticas**



Fonte: Autor

**Figura 3.12- Pontos de atuação das forças na frenagem máxima**



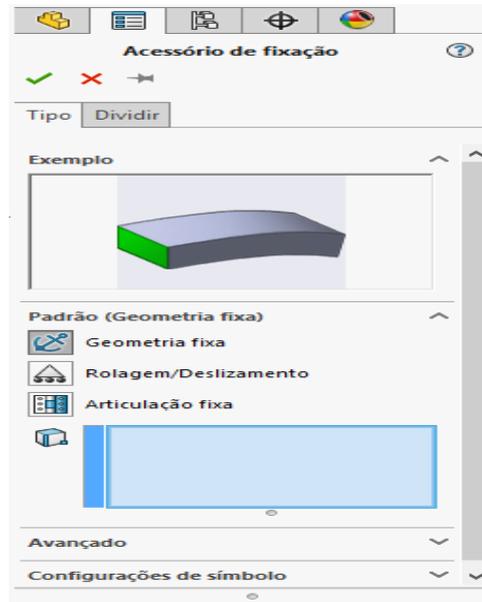
Fonte: Autor

Após a aplicação das cargas, devemos selecionar os pontos de restrição; ou seja, os pontos que ficarão fixos durante o ensaio. Para isso, utiliza-se o recurso do *Solidworks* “Acessórios de fixação” (fig. 3.13).

No caso da frenagem máxima, deve-se restringir os pontos de encaixe do motor, já que esses estão no extremo oposto do local de atuação da força e, por

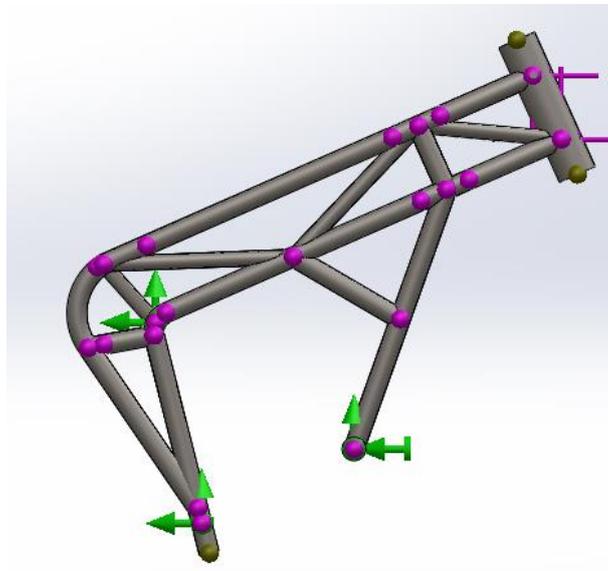
conta disso, sofrerão maior efeito do momento. Neste estudo, foram fixados os tubos nos quais os pontos de encaixe estão diretamente conectados, mais precisamente as áreas das juntas soldada destes.

**Figura 3.13- Recurso Acessório de fixação**



**Fonte: Autor**

**Figura 3.14- Pontos de fixação no estudo de frenagem máxima**



**Fonte: Autor**

Após isso, selecionou-se o material do chassi utilizando a ferramenta “Aplicar material”. O software oferece uma biblioteca com diversos materiais, metálicos ou não, e entre eles diversos tipos de aço submetidos aos principais tratamentos térmicos. Ao selecionar o material, uma tabela com suas principais propriedades é mostrada. O material selecionado foi a liga de aço 4130, recozido a 865 C°.

**Figura 3.15- Propriedades do material selecionado**

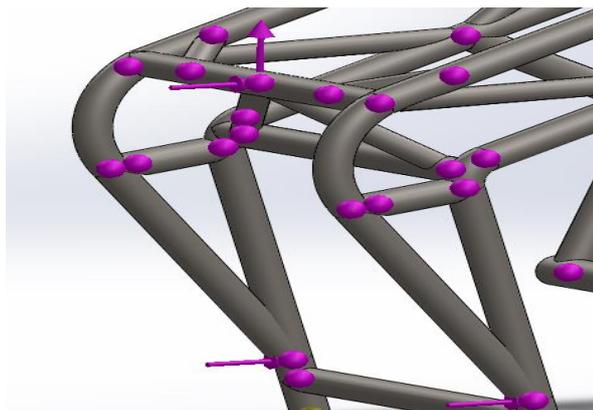
Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	2.05e+11	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.285	N/A
Módulo de cisalhamento	8e+10	N/m <sup>2</sup>
Massa específica	7850	kg/m <sup>3</sup>
Resistência de tração	560000000	N/m <sup>2</sup>
Resistência à compressão		N/m <sup>2</sup>
Limite de escoamento	460000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansão térmica		/K

**Fonte:** “adaptado de “biblioteca de materiais Solidworks

### 3.3.4.2- Estudo da Aceleração Máxima

Para o estudo da aceleração máxima, serão usadas as forças calculadas na sessão 3.2.1, com configuração mostrada na figura 3.12. O procedimento é o mesmo adotado no ensaio anterior.

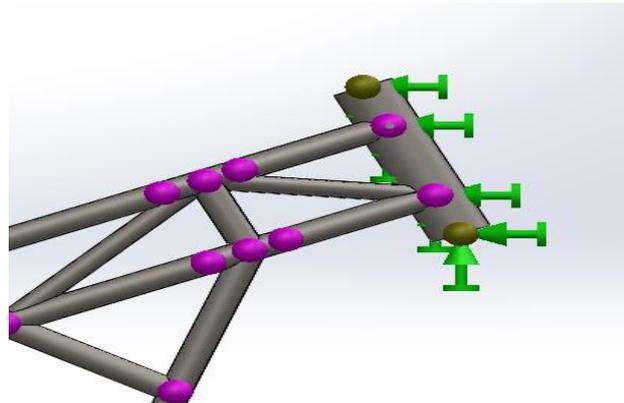
**Figura: 3.16- Pontos de atuação das forças no estudo de aceleração máxima**



**Fonte:** Autor

O ponto de restrição será a caixa de direção (todos os graus de liberdade desta), por ser o local mais distante dos pontos de atuação da força e, por conta disso, sofrendo maior momento.

**Figura 3.17- Ponto de fixação do ensaio de aceleração máxima**

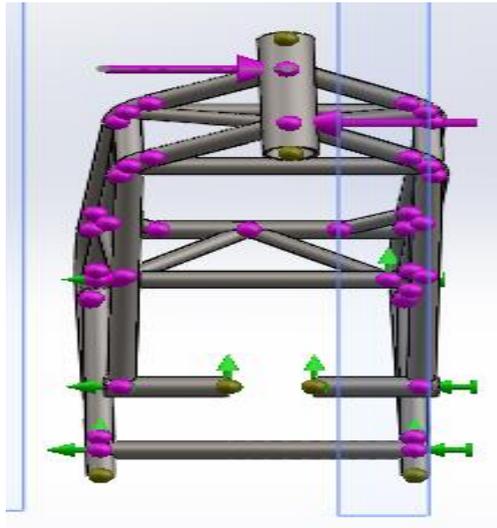


*Fonte: Autor*

### **3.3.4.3- Estudo da Inclinação Máxima**

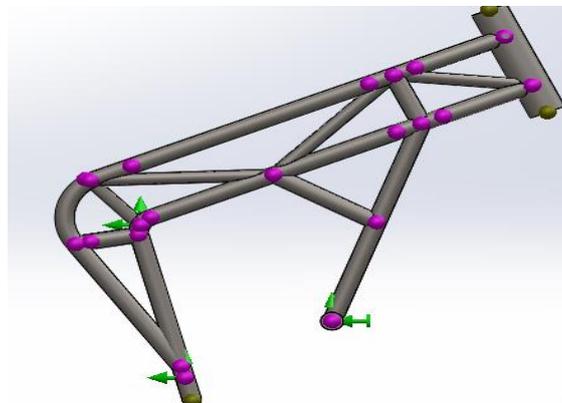
Para o estudo da inclinação máxima usou-se as forças encontradas na sessão 3.2.3. Assim como na frenagem máxima o ponto de atuação das forças é a caixa de direção, enquanto que os pontos de restrição são os pontos de fixação do motor (pontos mais extremos do chassi). Os procedimentos que se utilizou para este ensaio são idênticos aos descritos anteriormente.

**Figura 3.18- Pontos de atuação das forças durante a inclinação máxima**



*Fonte: Autor*

**Figura 3.19- Pontos de restrição durante a inclinação máxima**



*Fonte: Autor*

## **CAPÍTULO IV**

### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES**

Para as simulações, três parâmetros foram levados em consideração: tensão máxima de Von Mises, deslocamento máximo atingido pelo chassi em consequência da carga e o fator de segurança mínimo do projeto.

A tensão máxima de Von Mises será o indicador do quão próximo material ficou de escoar em decorrência da carga aplicada.

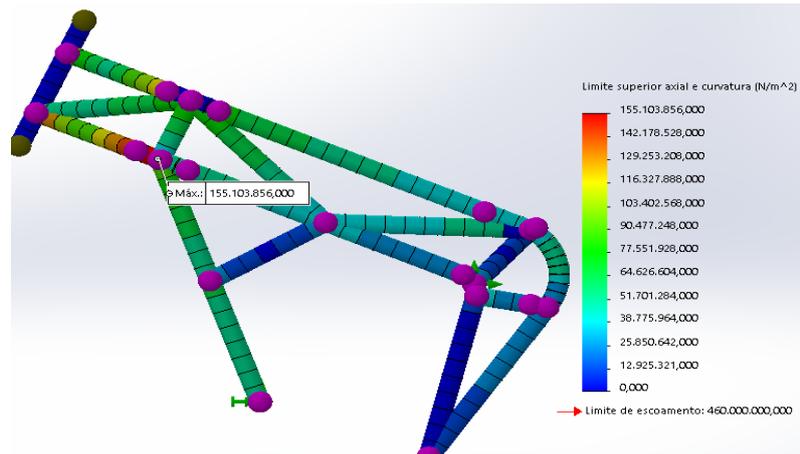
Já o deslocamento máximo indicará se o chassi sofrerá distorções significativas em sua estrutura ao ser tensionado.

O fator de segurança de projeto pode nos dizer se o chassi aguentará o esforços da frenagem, aceleração e inclinação, ou, em suma, se ele é seguro nessas situações. Se o fator de segurança é igual a 1 em um determinado ponto, significa que este está começando a escoar; se, por exemplo, for igual a 2, significa que escoará caso os esforços sejam dobrados.

#### 4.1.2 Resultados do estudo de frenagem máxima

Pode-se notar pela figura 4.1 que o local mais crítico é um ponto de curvatura da viga inferior, sendo o valor máximo da tensão de Von Mises atingido 155,1Mpa. Esse valor fica abaixo do limite de escoamento do material, que é 460Mpa, e, portanto, chassi retornou resultado positivo nesse aspecto.

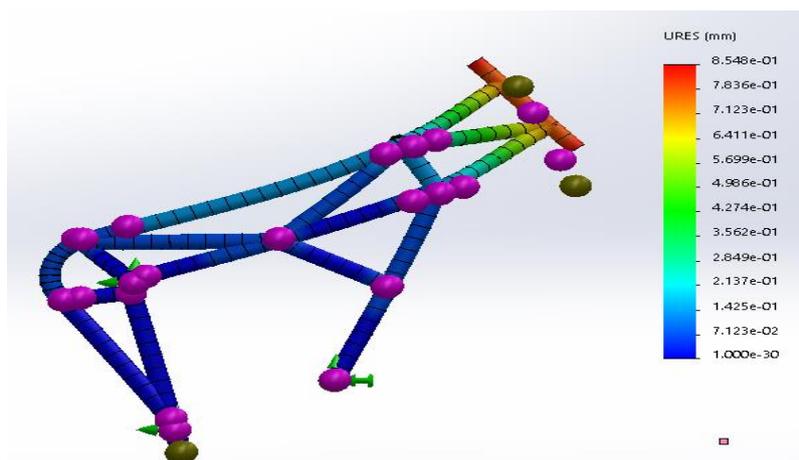
**Figura4.1- Tensão máxima no estudo de frenagem**



**Fonte: Autor**

O descolamento máximo atingido pelo chassi foi 0,855mm, que é um valor inexpressivo se comparado ao entre-eixos da moto. Esse deslocamento máximo ocorre nas proximidades da caixa de direção e é mostrado de forma propositalmente exagerada na figura 4.2

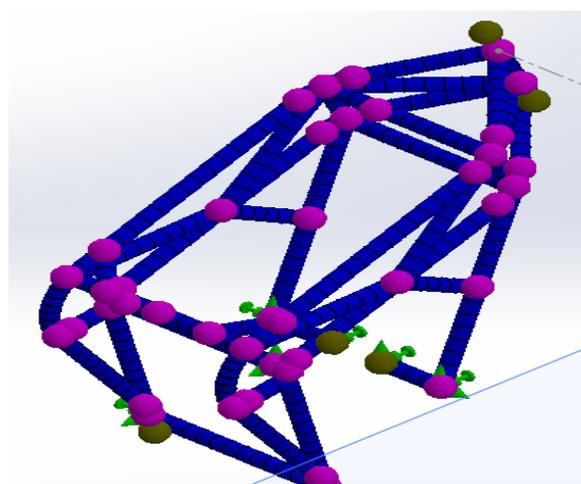
**Figura 4.2- Deslocamento máximo no estudo de frenagem**



*Fonte: Autor*

O fator de segurança mínimo do projeto durante a frenagem máxima foi de 3, o que mostra que o projeto é seguro para a situação estudada. A figura 4.3 mostra, em azul, todas as áreas para as quais o fato de segurança é maior que 1.

**Figura 4.3-Áreas com fator de segurança acima de 1 na fase de frenagem**



*Fonte: Autor*

**Tabela 6- Resultados do estudo de frenagem máxima**

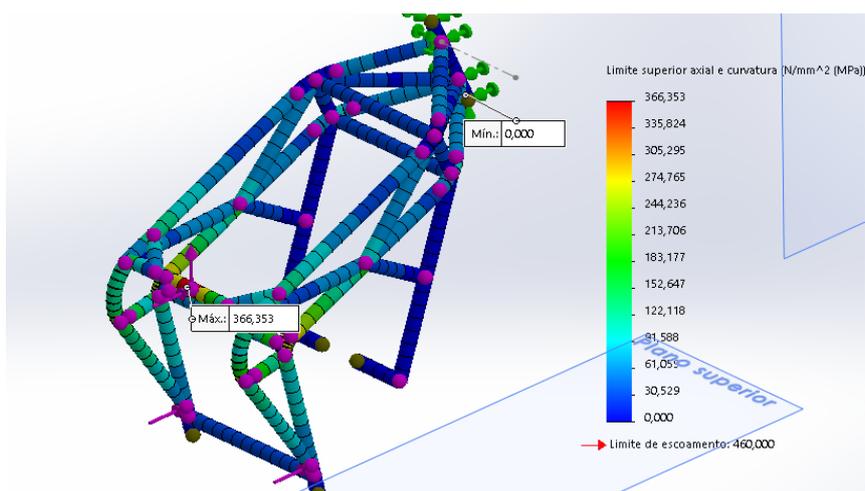
Tensão máxima de Von Mises	155,1 Mpa
Deslocamento máximo	0,855 mm
Fator de segurança mínimo	3
Limite de escoamento	460 Mpa

*Fonte: Autor*

### 4.1.3 Resultados do estudo de aceleração máxima

O estudo de aceleração máxima também retornou resultados positivos para os parâmetros levados em conta: a tensão de Von Misses máxima alcançada foi de 366,5 Mpa, mantendo-se abaixo do limite de escoamento do material. Essa tensão máxima ocorreu no tubo onde está situado o amortecedor e, desse modo, pode-se concluir que a força responsável é **Fb**.

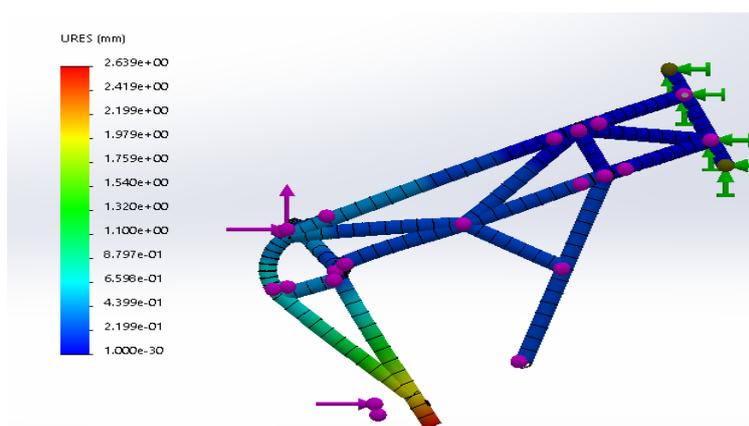
**Figura 4.4-Tensão máxima na fase aceleração**



Fonte: Autor

O deslocamento máximo também atingiu valores muito baixos, quase desprezíveis, se comparados com o entre-eixos da moto. Seu valor máximo foi de 2,64 mm e aconteceu na extremidade inferior do chassi, próximo a região de aplicação da força de aceleração.

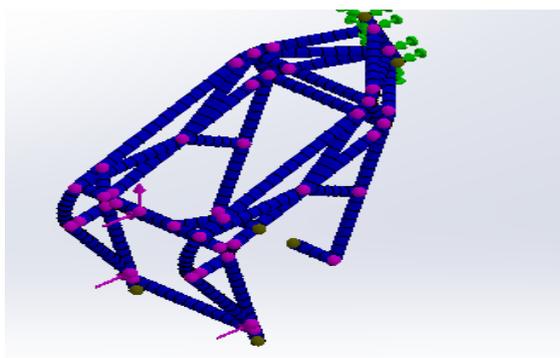
**Figura 4.5- Deslocamento máximo na fase de aceleração**



Fonte: Autor

Por fim, o fator de segurança mínimo foi de 1,3 e o local mais crítico é o mesmo onde ocorreu a tensão máxima (tubo onde fica ancorado o amortecedor). Esse valor pode parecer baixo, porém, deve-se levar em conta que a suspensão foi considerada como um corpo rígido e numa situação real ela absorverá parte do impacto gerado no tubo em questão. A figura 4.5 mostra, em azul, as áreas em que o fator de segurança é maior do 1.

**Figura 4.6- Áreas com fator de segurança acima de 1 na fase de aceleração**



*Fonte: Autor*

A tabela 7 resume os resultados para o ensaio de aceleração máxima.

**Tabela 7- Resultados do ensaio de aceleração máxima**

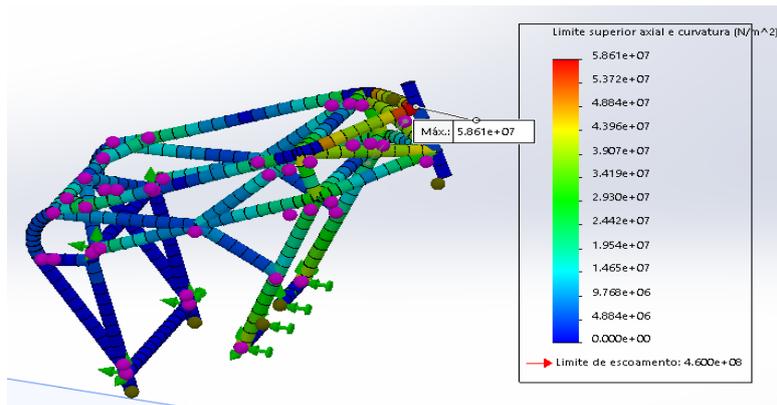
Tensão máxima de Von Mises	366,5 Mpa
Deslocamento máximo	2,64mm
Fator de segurança mínimo	1,3
Limite de escoamento	460 Mpa

*Fonte: Autor*

#### **4.1.4 Resultado dos estudos para inclinação máxima**

A tensão máxima alcançada foi de 58,6 Mpa e essa acontece no ponto de união entre a viga superior e a caixa de direção, próximo de onde atua a força no rolamento superior, como ilustrado na figura 4.7

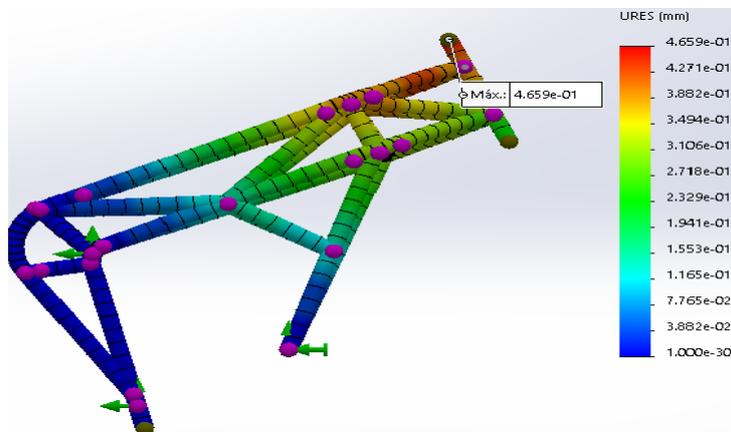
**Figura 4.7- Tensão máxima na fase de inclinação**



Fonte: Autor

Com relação a deslocamento, o valor máximo atingido durante a inclinação máxima foi de 0,46mm.

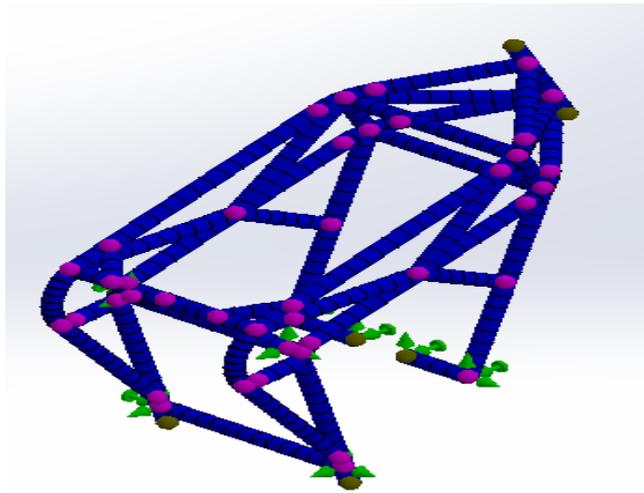
**Figura 4.8- Deslocamento máximo na inclinação**



Fonte: Autor

O fator de segurança mínimo atingido foi de 7,8 é um resultado muito positivo e demonstra que a situação da inclinação máxima não apresenta risco de escoamento. Na figura 4.8, pode-se ver que nenhuma área do chassi possui fator de segurança abaixo de 1.

**Figura 4.9-Áreas do chassi com fator de segurança acima de 1 no ensaio de inclinação**



*Fonte: Autor*

A tabela 8 resume os resultados para a inclinação máxima.

**Tabela 8- Resultados do ensaio de inclinação máxima**

Tensão máxima de Von Mises	58,6 Mpa
Deslocamento máximo	0,46mm
Fator de segurança mínimo	7,8
Limite de escoamento do material	460 Mpa

*Fonte: Autor*

## CAPÍTULO V

### 5- Conclusão.

Pelos resultados apresentados, conclui-se que o projeto atende as exigências do regulamento da competição *Motostudent*, além de ter sua geometria alinhada com o que é sugerido na literatura especializada para motos de corrida. Quanto aos testes estruturais, o chassi se mostrou apto a suportar as cargas estáticas que lhe serão impostas durante as situações principais: frenagens, curvas e aceleração; sua estrutura mostrou-se rígida o suficiente para não sofrer distorções significativas durante os ensaios. Ainda em termos estruturais, em todas as situações estudadas (frenagem, aceleração e inclinação) o chassi obteve fator de segurança mínimo maior que 1, o que mostra que o projeto pode ser colocado em pista e exposto as referidas situações sem risco de escoamento.

## CAPITULO VI

### 6. Referências Bibliográficas

FOALE, Tony. **Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and The Science**. Espanha: 2002.

COSSALTER, Vittore. **Motorcycle Dynamics**. Pádua: 2006.

LÓPEZ CARPES, José Ángel. **Disenô y Fabricación de um chasis de unamotocicleta de competición Usando Analogía de Plasticidad**.

Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena: 2017.

---

ASHBY, Michael. **Seleções de Materiais no Projeto Mecânico**.

Oxford: Elsevier Science & Technology, 2011.

.SHIGLEY, E. Joseph; MISCHKE, R. Charles; BUDYNAS, G. Richard. **Projeto de engenharia mecânica**. Nova York: 2004.

ÁLVAREZ DE EULATE ZAYAS, Claudia. **Fabricación de un protótipo de moto de competición categoría Moto 3**. Universidad Publica de Navarra.

Navarra: 2013.

LOTTI S., Raquel; WILSON MACHADO, André; TONANI MAZZIEIRO, Ênio;

LANDRE JÚNIOR, Janes. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos**. R Dental Press Ortodon Ortop Facial, Maringá v.11, n.2, p.35-43, 2006.

MIRLISSENA, Giuseppe. **Método dos elementos finitos: o que é? ESSS**,

2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/> Acessado em 03/12/2018.

Expedições Latinas: <http://www.expedicoeslatinas.com.br/p/historia.html> .Acessado em 05 de Abril de 2019.

Revista Autoesporte. Disponível em:

<http://revistaautoesporte.globo.com/Revista/Autoesporte/0,,EMI136773-10142,00-PRIMEIRA+MOTO+DO+MUNDO+E+VENDIDA+POR+US+MIL.html> Acessado em 05 de Abril de 2019.

Paughco.com. Disponível em: [http://www.paughco.com/2008-](http://www.paughco.com/2008-catalog/indivpages/Images/S132S5A_big_twin_rigid_frame.jpg)

[catalog/indivpages/Images/S132S5A\\_big\\_twin\\_rigid\\_frame.jpg](http://www.paughco.com/2008-catalog/indivpages/Images/S132S5A_big_twin_rigid_frame.jpg) Acessado em 05 de Abril de 2019.

Brasília Harley- Davidson. Disponível em: [https://brasiliaharley-](https://brasiliaharley-davidson.com.br/blog/conheca-a-silent-grey-fellow-a-primeira-harley-davidson/)

[davidson.com.br/blog/conheca-a-silent-grey-fellow-a-primeira-harley-davidson/](https://brasiliaharley-davidson.com.br/blog/conheca-a-silent-grey-fellow-a-primeira-harley-davidson/)  
Acessado em 2/04/2019.

Alamy.com. Disponível em: [https://www.alamy.com/stock-photo/race-motorbike-](https://www.alamy.com/stock-photo/race-motorbike-motorcycle.html?imgt=8)

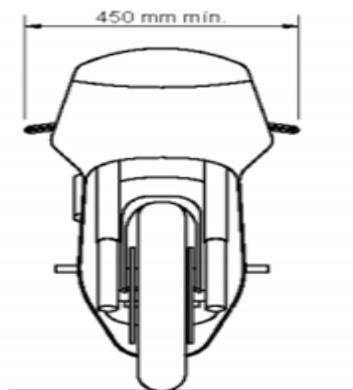
[motorcycle.html?imgt=8](https://www.alamy.com/stock-photo/race-motorbike-motorcycle.html?imgt=8). Acessado em 10/05/2019.

## Apêndice A

### A1-Requerimentos para o desenho

- Não é permitido o uso de chassis comerciais;
- Não é permitido o uso de ligas de titânio como material do chassi;
- A largura mínima entre as extremidades do semi-guidão deve ser de 450 mm.

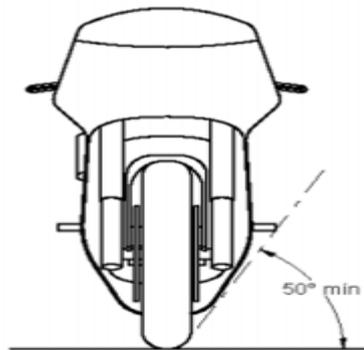
*Figura A.1- Largura máxima da motocicleta*



*Fonte: Regulamento Motostudent 2018*

- O ângulo mínimo de inclinação da motocicleta sem nenhum dos seus elementos (exceto os pneus) que toquem a superfície da estrada deve ser de 50°.

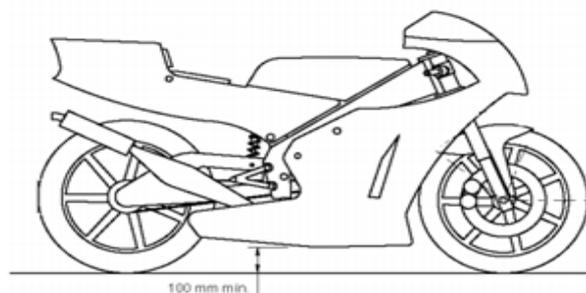
**Figura A.2: ângulo mínimo de inclinação**



**Fonte: Regulamento Motostudent 2018**

- A distância mínima entre a moto na posição vertical e a superfície da estrada deve ser de pelo menos 100 mm em situação de repouso. Essa medida é feita sem o piloto.

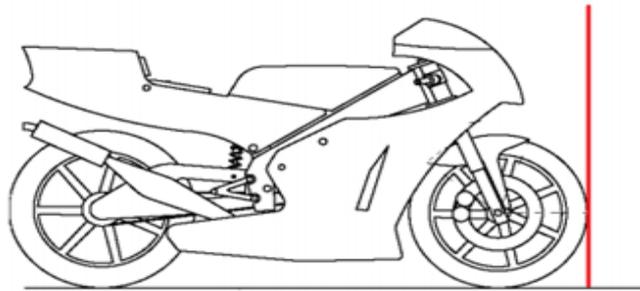
**Figura A.3: Distância mínima entre o solo e o ponto mais baixo da moto**



**Fonte: Regulamento Motostudent 2018**

- Limite dianteiro: Nenhum elemento da motocicleta deve sobressair da linha vertical dianteira desenhada tangencialmente em relação à circunferência externa do pneu dianteiro.

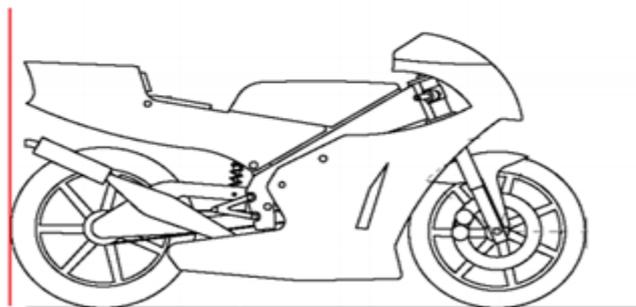
**Figura A.4: Limite dianteiro da moto**



**Fonte: Regulamento Motostudent 2018**

- Limite traseiro: Nenhum elemento da motocicleta deve sobressair da linha vertical desenhada tangencialmente em relação à circunferência externa do pneu traseiro.

**Figura A.5-Limite traseiro da moto**

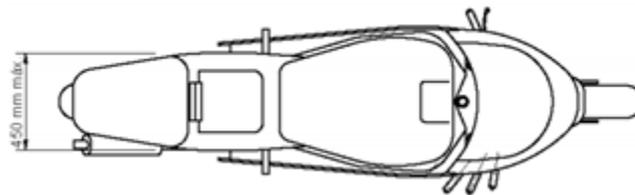


**Fonte: Regulamento Motostudent 2018**

- A superfície do pneu deve ter uma folga mínima de 15 mm ao longo da sua circunferência externa para qualquer parte da motocicleta, com a motocicleta em qualquer posição e com qualquer configuração de geometria.

- A largura mínima do banco não deve exceder 450mm. Nenhum outro elemento da motocicleta deve sobressair desta largura do banco para a retaguarda, exceto para o sistema de escape para motocicletas da categoria "MotoStudent Gasolina".

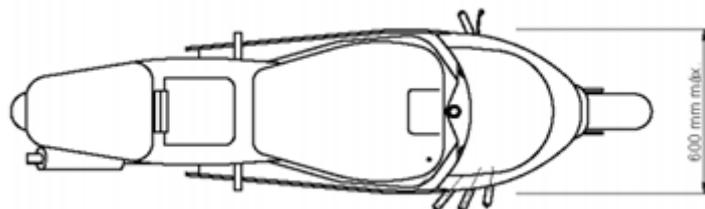
**Figura A.6-Largura mínima do banco**



**Fonte: Regulamento Motostudent 2018**

- A largura máxima da carenagem deve ser de 600mm.

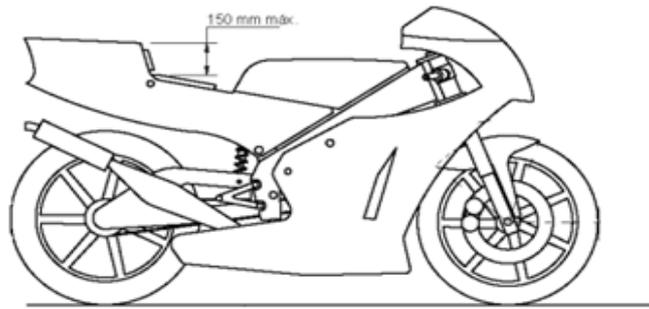
**Figura A.7-Largura máxima da carenagem**



**Fonte: Regulamento Motostudent 2018**

- A diferença de altura máxima entre a altura da sela e a parte mais alta da cauda deve ser de 150mm.

**Figura A.8- Diferença de altura entre o banco e a rabeta**



*Fonte: Regulamento Motostudent 2018*

## **A2- Peso**

O peso mínimo para a motocicleta, estabelecido pelo regulamento, é de 95kg, sem o piloto e incluindo todos os fluidos necessários para a operação correta da moto.

## **A3- Especificações sobre o chassi**

Embora não haja restrições no tipo de projeto do chassi, subchassi e a balanço estes devem ser autoproduzidos e autoprojeto, não podendo haver uso ou reaproveitamento de modelos comerciais. Fora isso, o regulamento estabelece algumas regras sobre materiais e métodos de união.

- **Materiais:** Não é permitido fabricar o chassi, subchassi ou balanço com ligas de titânio;
- **Soldagens e Uniões:** A soldagem entre os elementos pode ser realizada por qualquer método, mas as estruturas treliçadas devem obedecer ao padrão correto de triangulação:

*Figura A.9- Esquema para soldagem da estrutura*



*Fonte: Regulamento Motostudent 2018*

Esse tipo de triangulação permite que haja transferência de força de um elemento para outro, aliviando as partes críticas do chassi.

#### **A4- Verificações Pré-Evento**

Nessa etapa, serão feitas três verificações para comprovar que as motocicletas que irão competir cumpram as especificações estabelecidas no regulamento da competição em termos de desempenho e segurança.

#### **A5- Verificação Visual de segurança e Verificação Estática**

Cada motocicleta será verificada pelos avaliadores levando em conta todo o regulamento técnico

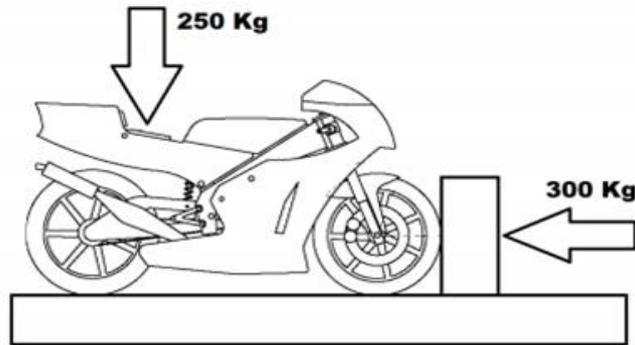
Após a verificação de segurança, a motocicleta será submetida a checagem em um banco de ensaio e nele a moto terá sua estrutura e seus freios testados.

#### **A6- Banco de Ensaio de Estrutura**

Aqui a motocicleta será submetida a forças horizontais e verticais para verificar a rigidez do chassi, a montagem e o funcionamento da suspensão. As forças aplicadas serão: carga horizontal progressiva na roda dianteira de 300 Kg e carga vertical progressiva no assento de 250 Kg.

Essas cargas serão aplicadas de forma progressiva e alternada, verificando que na situação de compressão não há interferência entre elementos e que todos os sistemas que interagem a parte do ciclo da motocicleta funcionam adequadamente. É necessário que, após a remoção das forças, a estrutura não sofra nenhuma deformação e que não haja fenda nos componentes estruturais ou nos elementos de junção.

*Figura A.10- cargas aplicadas no banco de ensaio*



Forces Diagram

Fonte: Regulamento Motostudent 2018

### **A7- Verificação dos Freios**

Após a verificação no banco de ensaios, os freios, dianteiro e traseiro, da motocicleta serão verificados em um rolo de testes de freio. Para ser aprovada, a motocicleta deverá fornecer valores de resistência a frenagem de:

- Freio dianteiro: 0,30 kN
- Freio traseiro: 0,25 kN.

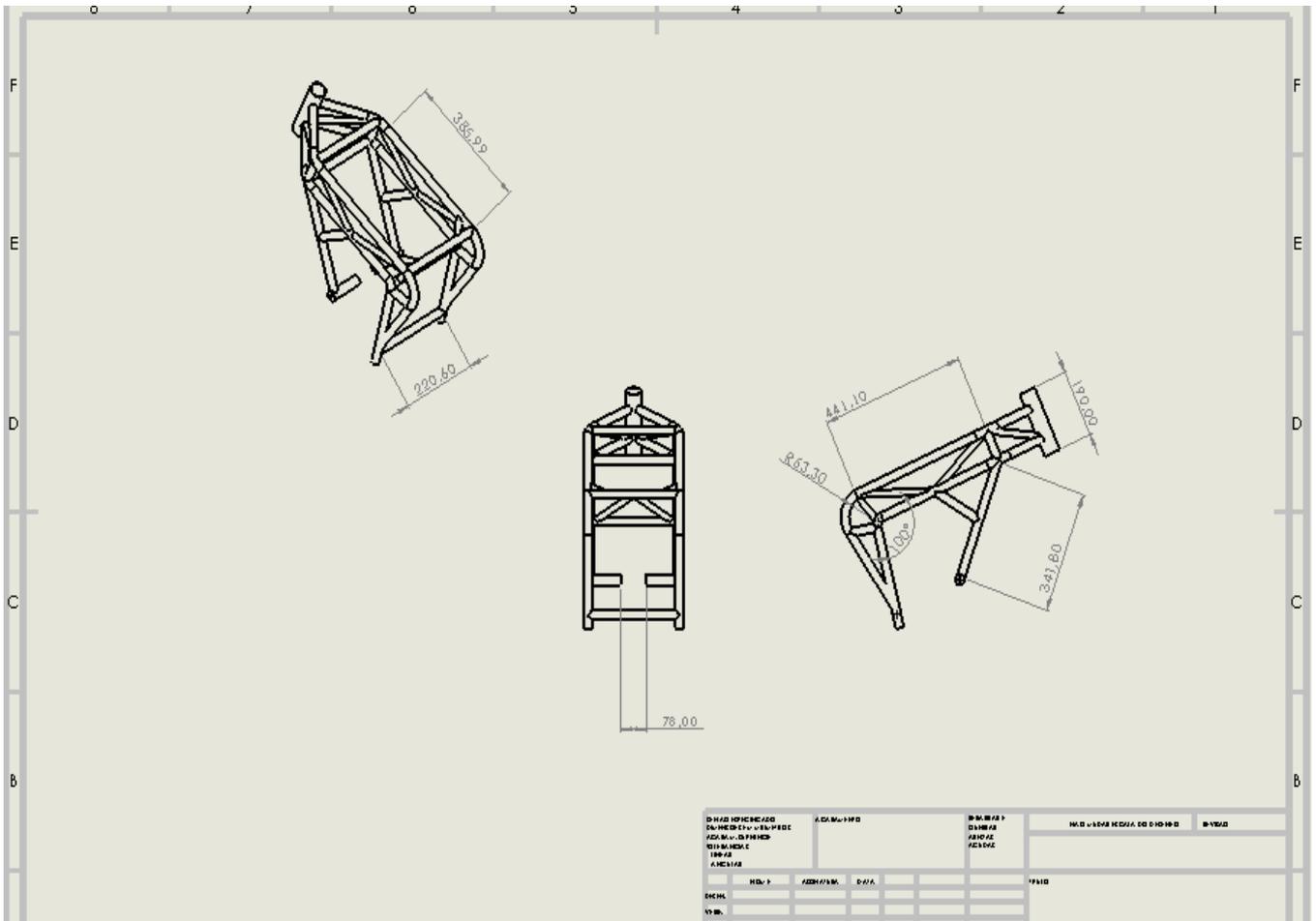
### **A8- Verificações Dinâmicas de Segurança na Pista**

Um piloto de testes nomeado pela organização irá realizar uma série de testes na motocicleta com finalidade de verificar se a mesma funciona corretamente. Para obter aprovação nesta etapa, a moto deverá atender os requisitos seguintes:

- Deve começar a se mover e avançar pelos seus próprios meios;
- Deve parar corretamente ao andar de forma suave e agressiva;
- Deve poder realizar uma série de voltas em diferentes velocidades;
- O piloto de testes determinará se a moto atende os requisitos básicos de segurança para poder participar da competição.

## Apendice B

Figura B.1- Desenho técnico do chassi



Fonte: Autor