

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

GUILHERME VINÍCIUS DE AZEVEDO

ANÁLISE DE RIGIDEZ TORCIONAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE  
UM CHASSI TUBULAR MODELO BAJA SAE

Joinville  
2020

GUILHERME VINÍCIUS DE AZEVEDO

ANÁLISE DE RIGIDEZ TORCIONAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE  
UM CHASSI TUBULAR MODELO BAJA SAE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, no curso Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Eng.  
Mecânico Andrea Piga Carboni

Coorientador: Prof. Dr. Eng. Mecânico  
Modesto Hurtado Ferrer

Joinville  
2020

## RESUMO

A rigidez estrutural de um chassi é fundamental para o correto funcionamento dos sistemas neste acoplados. Este trabalho estuda, dentre os diferentes modos, a rigidez torcional de um chassi modelo Baja SAE. A rigidez torcional é caracterizada pela resistência a torção da estrutura em seu eixo longitudinal (eixo x pela convenção da SAE). Ao longo do trabalho é definido um método de estudo numérico da rigidez de estruturas, e este na sequência, é validado experimentalmente. Estudou-se o chassi proveniente da equipe BAJA CTJ, bem como variações deste com três arranjos tubulares diferentes. Este estudo apresentou um método, que pode ser usado como referência e melhorado para o estudo de rigidez de chassis tubulares. Apresentou também a rigidez torcional atual do chassi da equipe, bem como as rigidezes dos outros modelos que foram propostos.

**Palavras-chave:** Rigidez Torcional. Baja SAE. Ansys. Elementos Finitos. Simulação.

## **ABSTRACT**

The structural rigidity of a chassis is fundamental for the correct functioning of the systems in this coupling. This work studies, among the different modes, a torsional stiffness of a Baja SAE chassis model. Torsional stiffness is characterized by the resistance to torsion of the structure on its longitudinal axis (x-axis by the SAE convention). Throughout the work, a method of numerical study of structural stiffness is defined, and this sequence is validated experimentally. Study or assemble a chassis proven by the BAJA CTJ team, as well as changing these three different tubular arrangements. This study shows a method, which can be used as a reference and improved for the study of tubular chassis stiffness. It also presents the current rigidity of the team's chassis, as well as the models of the other models that have been proposed.

**Keywords:** Torsional stiffness. Baja SAE. Ansys. Finite Elements. Simulation.



## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato ao Deus de Abraão, que por sua soberana vontade me conduziu até aqui. Toda a minha existência é para a glória dele. Sou grato ao meus pais, Samoel de Azevedo e Janice Teresinha Pereira de Azevedo. Não existe texto de agradecimento para vocês, este seria insuficiente. Sou grato ao meu irmão, Bryan Calebe de Azevedo. Muito do meu esforço foi para mostrar-lhe o exemplo, e que Deus vai de alguma maneira, conduzir-te aos sonhos que ele plantou em seu coração. Sou grato aos meus avós. Pio de Azevedo, Ruth Hoepfner de Azevedo, José Pereira e Judite Tereza Pereira. Vocês são o alicerce de uma família simplesmente maravilhosa.

De tantos e tantos outros que passaram pela minha vida, me ensinaram, me suportaram em amor, meu muito obrigado! Aos muitos amigos durante a graduação. Obrigado! Aos professores que me apresentaram idéias inovadoras, que me fizeram querer ser melhor, obrigado! Ao meu país, que me proporcionou a oportunidade de ter acesso a esse conhecimento, obrigado!

Gostaria de agradecer ao meu professor orientador, Prof. Dr. Eng. Mecânico Andrea Piga Carboni, que durante um período difícil em nossa sociedade, esteve presente, quase que diariamente na elaboração deste trabalho. Meu obrigado também a empresa Semacald, que investiu em mim, permitindo que eu realiza-se meu estágio, e autorizando que fosse utilizado de seus equipamentos e recursos para a construção do equipamento de testes. Sou grato também aos professores Dr. Eng. Mecânico Modesto Hurtado Ferrer, professor Dr. Eng. Mecânico Marcos Alves Rabelo e ao professor Dr. Eng. Civil Antônio Otaviano Dourado, pela leitura e correção de meu trabalho, além das diversas vezes ao longo do curso que foram meus professores e me auxiliaram.

*Feliz o homem que descobre a sabedoria e adquire inteligência!  
Pois adquiri-la vale mais do que a prata,  
e seu lucro mais que o ouro;  
É mais preciosa que as pérolas,  
e nenhuma de tuas jóias com ela se compara.  
Longos dias há em sua destra;  
em sua esquerda, riquezas e honra.  
Seus caminhos são amenos,  
e todas as suas sendas são prósperas.  
É uma árvore de vida para quem a alcança:  
ditoso será quem a ela se apegar.  
O Senhor fundou a terra com sabedoria,  
estabeleceu os céus com inteligência;  
Por seu saber, abriram-se os mananciais,  
e as nuvens destilam orvalho.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – SAE Vehicle Axis System . . . . .	12
Figura 2 – Dan Gurney pilotando o Ford 999 . . . . .	14
Figura 3 – Chassi estrutural do Lotus Mark Six . . . . .	14
Figura 4 – Chassi escada com elementos de ligação transversais . . . . .	15
Figura 5 – Frame Multi Tubular de um Cooper Mônaco . . . . .	16
Figura 6 – Tetraedro - Estrutura básica do space-frame . . . . .	17
Figura 7 – Space Frame Chassis - Pune University 2015 . . . . .	17
Figura 8 – Space Frame Composto por Blocos Estruturais . . . . .	18
Figura 9 – Space Frame com Baixa Rigidez Concentrada no Habitáculo . . . . .	19
Figura 10 – Anteparo a ser fixado dentro ao chassi ao entorno das pernas do piloto	20
Figura 11 – Monocoque em Fibra de Carbono - F1 . . . . .	20
Figura 12 – Chassi Baja SAE - Space Frame . . . . .	21
Figura 13 – Travamentos Exemplificados pelo RATBSB . . . . .	21
Figura 14 – Flexão Vertical . . . . .	22
Figura 15 – Flexão Lateral . . . . .	23
Figura 16 – <i>Lozenging</i> Horizontal . . . . .	23
Figura 17 – Torção Longitudinal . . . . .	24
Figura 18 – Veículo em curva . . . . .	25
Figura 19 – Métodos de Modelagem de Sistemas Mecânicos . . . . .	28
Figura 20 – Discretização de Problema . . . . .	29
Figura 21 – Alguns Elementos Finitos . . . . .	30
Figura 22 – Elemento de Viga Tridimensional . . . . .	31
Figura 23 – Matriz de Rigidez Tridimensional de um Elemento de Viga . . . . .	32
Figura 24 – Gaiola de Proteção - Equipe BAJA CEM . . . . .	34
Figura 25 – Geometria Tratada - Simplificação de Curvatura . . . . .	35
Figura 26 – Nuvem de Pontos da Geometria . . . . .	36
Figura 27 – Nuvem de Pontos e Corpo de Linhas . . . . .	37
Figura 28 – Condições de Contorno e Iniciais Definidas . . . . .	37
Figura 29 – Viga em Flexão. . . . .	38
Figura 30 – Análise de rigidez de um frame com carregamento unilateral. . . . .	38
Figura 31 – Diagrama de Forças e Momentos . . . . .	39
Figura 32 – Tabela de valores inseridos para automatizar os cálculos. . . . .	40
Figura 33 – Tubo Representando o Chassi Exposto a Esforços . . . . .	41

Figura 34 – Diagrama de Forças e Momentos . . . . .	41
Figura 35 – Deflexões verticais diferem em lados diferentes . . . . .	42
Figura 36 – Equipamento de Testes . . . . .	44
Figura 37 – Parte de Estudo . . . . .	45
Figura 38 – Ilustração da conexão entre corpos de linha . . . . .	47
Figura 39 – Fabricação - Corte da Viga W . . . . .	48
Figura 40 – Fabricação - Perfis cortados . . . . .	48
Figura 41 – Fabricação - Início da Montagem . . . . .	49
Figura 42 – Fabricação - Montagem . . . . .	49
Figura 43 – Fabricação - Medição da massa da parte de carga . . . . .	50
Figura 44 – Fabricação - Equipamento de testes pronto . . . . .	50
Figura 45 – Plano de testes . . . . .	51
Figura 46 – Gráfico de resultados . . . . .	52
Figura 47 – Chassi original no programa CAE . . . . .	54
Figura 48 – Chassi original - Deformação . . . . .	55
Figura 49 – Modelos de arranjo propostos . . . . .	56
Figura 50 – Tubos primários . . . . .	56
Figura 51 – Corpos formados por operação booleana e unidos por elementos de viga . . . . .	57
Figura 52 – Elementos prolongadores e seus efeitos nas conexões com o chassi . . . . .	58
Figura 53 – Resultados obtidos de rigidez torcional para diferentes arranjos . . . . .	59
Figura 54 – Resultados obtidos de rigidez torcional para diferentes arranjos (Linhas) . . . . .	61
Figura 55 – Resultados obtidos de rigidez torcional para diferentes arranjos (Barras) . . . . .	61
Figura 56 – Ganho percentual de rigidez torcional e massa para diferentes arranjos . . . . .	62
Figura 57 – Momentos fletores e forças normais nos elementos . . . . .	63
Figura 58 – Influência do membro adicionado no plano superior . . . . .	63
Figura 59 – Influência dos membros adicionados nos planos laterais inferiores . . . . .	64
Figura 60 – Diminuição de Momento Fletor na Estrutura . . . . .	65
Figura 61 – Aumento de Esforços Normais na Estrutura . . . . .	65
Figura 62 – Ganho percentual de rigidez torcional e massa para diferentes arranjos . . . . .	67

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>10</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>10</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do texto</b>	<b>11</b>
<b>1.4</b>	<b>Justificativa</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Sistemas de Coordenadas</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>O Chassi Automotivo</b>	<b>13</b>
2.2.1	Chassi Estrutural - Uma definição	13
2.2.2	Uma Breve História do Chassi Automotivo	13
2.2.3	Tipos de Chassi	15
2.2.3.1	O Chassi Escada (Twin Tube ou Ladder Frame)	15
2.2.3.2	O Chassi Multi Tubular	16
2.2.3.3	Space Frame	17
2.2.3.4	Monocoque	20
2.2.4	Chassi BAJA SAE	21
<b>2.3</b>	<b>Principais Carregamentos e Modos de Deformação de um Chassis Automotivo</b>	<b>22</b>
2.3.1	Flexão Vertical	22
2.3.2	Flexão Lateral	23
2.3.3	<i>Lozenging</i> Horizontal	23
2.3.4	Torcão Longitudinal	24
<b>2.4</b>	<b>Rigidez Torcional: Sua Importância</b>	<b>24</b>
<b>2.5</b>	<b>Métodos de Análises de Estruturas</b>	<b>26</b>
<b>2.6</b>	<b>O método dos Elementos Finitos</b>	<b>27</b>
2.6.1	Uma Introdução ao Problema	27
2.6.2	Sistemas Contínuos e Sistemas Discretos	28
2.6.3	Problemas Lineares e não Lineares	29
2.6.4	Os tipos de Elementos	30
2.6.5	Elementos Unidimensionais: O elemento de viga	31
<b>3</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Determinação do Objeto de Estudo</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Escolha dos Programas a Serem Utilizados</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Obtenção da Geometria Inicial</b>	<b>33</b>

3.4	Definição das Hipóteses Simplificadoras . . . . .	34
3.5	Tratamento da Geometria . . . . .	35
3.6	Definição das Condições de Contorno e Condições Iniciais . . . . .	37
3.7	Estratégia de Aferição e Caracterização da Rigidez do Chassi . . . . .	40
4	<b>TEXTE EXPERIMENTAL PARA VALIDAÇÃO DE MÉTODO DE ANÁLISE NUMÉRICA . . . . .</b>	<b>44</b>
4.1	Apresentação . . . . .	44
4.2	Objetivo . . . . .	45
4.3	O método . . . . .	46
4.4	Comportamentos Esperados . . . . .	47
4.5	Construção . . . . .	48
4.6	Resultados do teste experimental . . . . .	51
4.7	Crítica dos erros obtidos . . . . .	52
4.8	Conclusão acerca do teste experimental . . . . .	53
5	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>54</b>
5.1	Sobre a Configuração Original . . . . .	54
5.2	Soluções Propostas e algumas informações relevantes . . . . .	55
5.3	Sobre os dados obtidos e seu tratamento . . . . .	58
5.4	Crítica de dados . . . . .	62
5.5	Influência de membros adicionados ao chassi . . . . .	62
6	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>66</b>
7	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O objetivo do chassi de um veículo é ser uma estrutura que permita conectar todos os seus pontos de apoio(rodas), de modo a apresentar as menores flexões e torções possíveis. O chassi, portanto, deve suportar e fornecer pontos de fixação para todos os componentes e ocupantes, apresentando o mínimo de deformações possíveis.(COSTIN; PHIPPS, 1965)

Esta monografia analisou numericamente através método de elementos finitos, um chassis tubular tipo space frame, desenvolvido sob norma SAE (Society of Automotive Engineers) Brasil. O chassi em estudo foi utilizado pela equipe BAJA UFSC-CTJ de 2018 à 2020. Através de um modelo FEM gerado a partir de uma geometria CAD, iterações serão processadas com o auxílio de um computador obedecendo o algoritmo do programa Ansys. As análises apreciarão o chassi sob esforços torcionais em seu eixo longitudinal, retornando dados acerca da deformação estrutural.

Uma revisão bibliográfica será apresentada ao longo deste documento, contemplando as principais áreas de conhecimento envolvidas. Tais conceitos serão fundamento para o desenvolvimento das análises realizadas.

### 1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é promover um estudo a respeito da rigidez torcional do chassi em utilização pela equipe UFSC CTJ, e ao fim, propor melhorias estruturais.

### 1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão listados abaixo:

- Analisar os métodos utilizados em outros trabalhos publicados os quais foram utilizados para estudar os mesmos tópicos
- Propor um método que seja o mais simples possível
- Projetar e construir um equipamento de testes com objetivo de validar o método proposto
- Estudar o comportamento estrutural com enfoque na rigidez torcional do chassi BAJA UFSC CTJ
- Apresentar opções de arranjos estruturais ao BAJA UFSC CTJ com o objetivo de aumentar a rigidez torcional do chassi

### **1.3 Estrutura do texto**

A estrutura do texto se inicia com uma revisão teórica, abordando a história, tipos e definições dos chassis automotivos. Será apresentada a norma vigente da SAE acerca do projeto e construção do chassi para participação em campeonatos nacionais. Será tratado sobre a rigidez, definindo-a e abordando suas implicações estruturais.

Na sequência será tratado sobre o método proposto. Serão apresentadas diferentes abordagens de estudo de rigidez, apresentando seus benefícios e deficiências. Tópicos sobre preparação de geometria e modelo, serão discutidos.

O método proposto será em seguida validado experimentalmente por um equipamento projetado e construído pelo aluno, com o apoio da empresa Semacald.

Com o método validado, serão apresentados os resultados do estudo no chassi do BAJA CTJ, juntamente com os estudos de arranjos tubulares alternativos, que visam melhorar as características estruturais do chassi em uso atualmente pela equipe.

Espera-se que o leitor tenha um panorama geral, e em uma hipótese otimista, um ponto de partida para estudos posteriores.

### **1.4 Justificativa**

Este trabalho justifica-se pela lacuna de um método exemplificado e didático para estudos de chassis tubulares no CTJ. O processo de desenvolvimento estrutural é complexo e demanda apoio aos estudantes para que os mesmos desenvolvam as habilidades para conceber, modelar e analisar numericamente as estruturas veiculares em desenvolvimento.

Espera-se que o método proposto seja estudado, criticado e melhorado por trabalhos futuros, criando assim um ciclo de registro de conhecimento, que servirá como fonte de pesquisa para estudantes que estiverem iniciando seus estudos na área de análise estrutural.

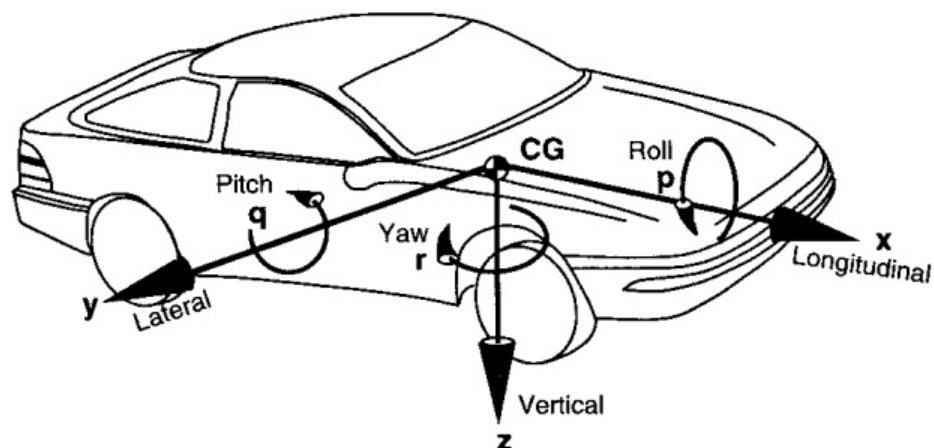


## 2 REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 Sistemas de Coordenadas

Para que seja possível desenvolver algumas explicações sobre alguns temas, precisa-se estabelecer um sistema de coordenadas para referência. Será utilizado o sistema de coordenadas SAE Vehicle Axis System, sendo o mesmo, adotado por (GILLESPIE, 1992).

Figura 1 – SAE Vehicle Axis System



Fonte: (GILLESPIE, 1992)

Pela convenção da SAE, as coordenadas são:

- x - Para frente no plano longitudinal de simetria
- y - Para o lado direito
- z - Para baixo do veículo
- Pitch ( $q$ ) - Rotação em torno do eixo  $+y$
- Yaw ( $r$ ) - Rotação em torno do eixo  $+z$
- Roll ( $p$ ) - Rotação em torno do eixo  $+x$

## 2.2 O Chassi Automotivo

Segundo Genta (2009), um chassi pode ser separado da carroceria, como em veículos comerciais e veículos fora de estrada. Entretanto, podem ser integrados como é visto na maioria dos automóveis de passeio modernos.

Segundo Seward (2015), o termo chassis pode ser usado para se referir a toda a massa suspensa e não suspensa em deslocamento. Um termo mais específico do inglês é "structural frame", que seria quadro estrutural ou armação estrutural. Portanto os termos chassi, frame, quadro e armação são semelhantes e, quando citados neste texto referem-se a parte estrutural.

Neste tópico, serão apresentados pontos como a definição de chassi, sua breve história e também seus principais tipos. Ao final, será introduzido o chassi BAJA SAE, juntamente com sua norma construtiva vigente.

### 2.2.1 Chassi Estrutural - Uma definição

Segundo Seward (2015), o chassi estrutural é análogo ao esqueleto humano, o qual mantém todos os órgãos vitais nos locais corretos, providenciando ancoragem para os tendões e músculos para que todos os movimentos necessários possam ser realizados.

### 2.2.2 Uma Breve História do Chassi Automotivo

Os primeiros chassis foram projetados para resistir a flexão vertical, que ocorre no plano lateral do veículo. Idealizava-se este componente estrutural como uma viga biapoiada pelos eixos dianteiro e traseiro, com suas respectivas massas suspensas ao longo da mesma. Pode-se ver na Figura 2, Dan Gurney, um grande piloto e construtor de carros norte americano, guiando o Ford 999 em 1902. O chassis era basicamente composto por pesadas vigas de madeira, com alto momento de inércia de seção. Em janeiro de 1904, Henry Ford pilotou o 999 e bateu um novo recorde mundial de velocidade no estado do Michigan. Sobre o gelo, Ford atingiu 141,1 km/h! Neste período da construção de veículos, uma maior atenção era dada para a rigidez quanto a flexão vertical. (WIKIPEDIA, 2018)

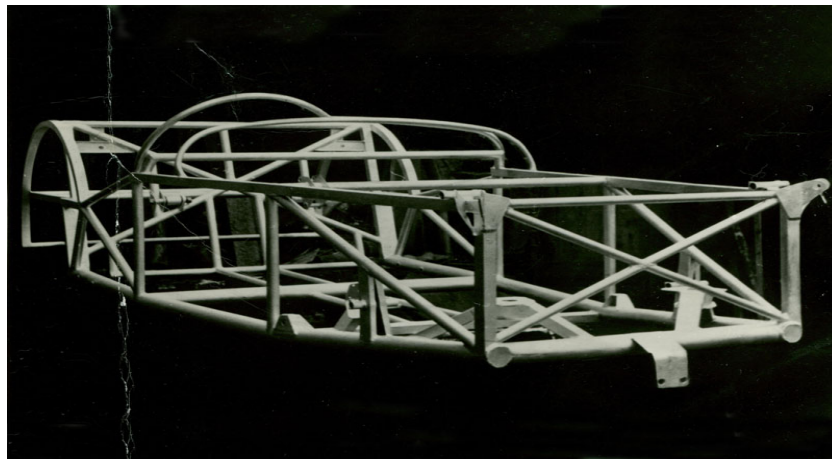
Figura 2 – Dan Gurney pilotando o Ford 999



Fonte: Barrett (1963)

Pouco antes da segunda guerra mundial quase todos os chassis de carros esportivos mantiveram o padrão viga do Ford 999. Quase sempre estes veículos tinham eixos rígidos e não contavam com suspensão. Por volta de 1934 começaram a ser desenvolvidos chassis ladder-type, conhecido no português como "escada". Nesta mesma época iniciou-se o desenvolvimento de suspensões mais elaboradas.

Figura 3 – Chassi estrutural do Lotus Mark Six



Fonte: Sevens (2018)

Segundo Costin e Phipps (1965), a partir de 1950 os construtores começaram a notar a necessidade de se aumentar a rigidez de suas estruturas. Assim, passou a ser adicionado uma estrutura tubular sobre os já existentes chassis escada. Porém essa prática foi mais útil para facilitar a montagem da carroceria do que para melhorar a rigidez em si. Surgiram assim os chassis multitubulares, que de maneira simplista, são chassis space frame com baixa eficiência estrutural.

Então, a partir de 1952 começaram a ser introduzidos os primeiros chassis considerados space frame. Dois veículos se destacaram: Lotus Mark Six e o Mercedes-Benz 300SL.

A partir de 1962, o termo monocoque é introduzido com o lançamento do Lotus 25. Um monocoque é um chassi que contém a estrutura e a carroceria em um único corpo.

Este trabalho se restringirá ao estudo de chassis space frame, porém alguns tipos de chassi serão brevemente discutidos um a um.

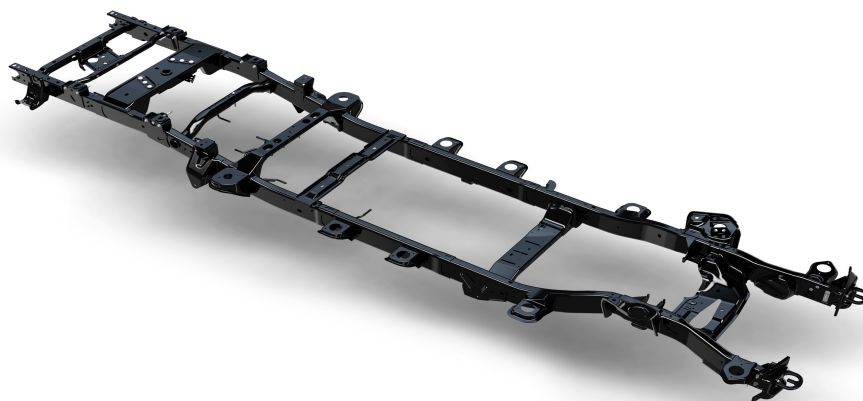
### 2.2.3 Tipos de Chassi

Ao longo dos últimos anos, segundo Seward (2015), existiram basicamente dois grandes grupos de chassi, o space frame e o monocoque. Existem, como se verá a seguir, outros tipos de chassi que estão entre esses dois grandes grupos. Neste trabalho serão apresentados os quatro tipos construtivos principais, que são: Chassi escada, multitubular, space frame e monocoque.

#### 2.2.3.1 O Chassi Escada (*Twin Tube ou Ladder Frame*)

A tradução direta do inglês das palavras twin e ladder são respectivamente gêmeo e escada. Esses nomes foram atribuídos a este tipo de chassis devido a suas características. Segundo Costin e Phipps (1965), é composto de dois membros laterais espelhados com grandes diâmetros, caso sejam elementos de seção transversal circular. De forma geral os elementos laterais e gêmeos apresentam uma seção transversal de tamanho considerável.

Figura 4 – Chassi escada com elementos de ligação transversais



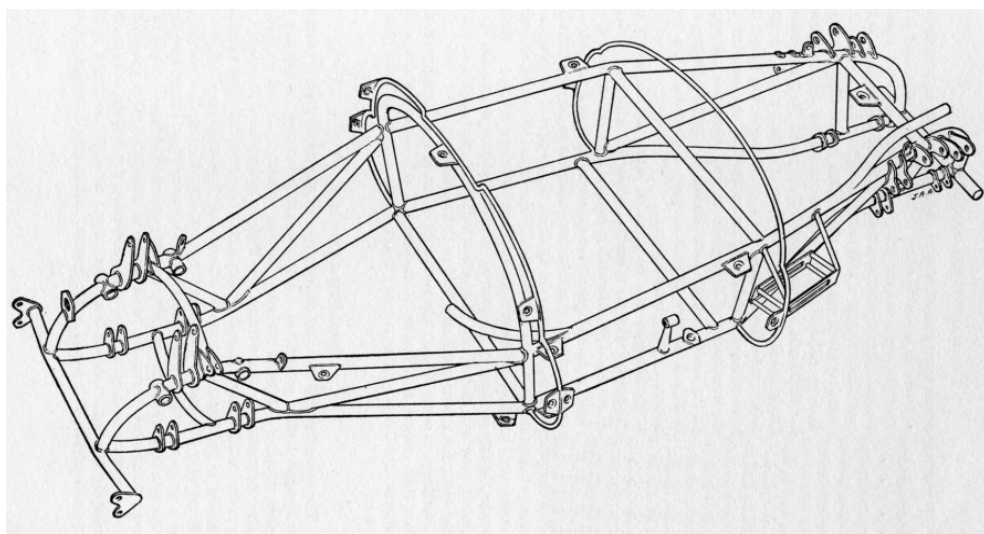
Para a construção de um chassi escada, é necessário a união duas longarinas gêmeas através de elementos transversais e/ou diagonais, originando o nome escada. Ao se ter uma visão superior do chassi, o mesmo se assemelha a uma escada como visto na Figura 4. As uniões permanentes geralmente constituem-se de soldas e/ou rebites.

Este tipo de arranjo de elementos estruturais é utilizado até hoje, porém sua incidência em veículos modernos depende fortemente da categoria em qual este está inserido. Ainda hoje é comumente empregado em picapes e SUVs, entretanto seu uso em automóveis é raro. Na categoria de veículos de carga, como caminhões e ônibus, este tipo de arranjo é amplamente utilizado. O motivo é a simples análise estrutural e fabricação, além da sua grande capacidade de carga. Este arranjo também possibilita o fácil acesso a componentes para que se possa realizar manutenções. Os motivos que os tornam pouco atrativos para a aplicação em veículos pequenos, são seu elevado peso e sua deficiência em termos de rigidez torcional.

#### 2.2.3.2 O Chassi Multi Tubular

O chassi multitubular é um meio termo entre o ladder frame e o space frame. Ele é um arranjo espacial com pouca ou nenhuma triangulação, gerando uma baixa eficácia em termos de rigidez uma vez que, segundo Costin e Phipps (1965) depende muito do número de membros e do diâmetro dos tubos empregados. Um frame multi tubular tem uma capacidade de resistir a flexão vertical aceitável, e é também mais pesado do que o space frame.

Figura 5 – Frame Multi Tubular de um Cooper Mônaco



Fonte: Costin e Phipps (1965)

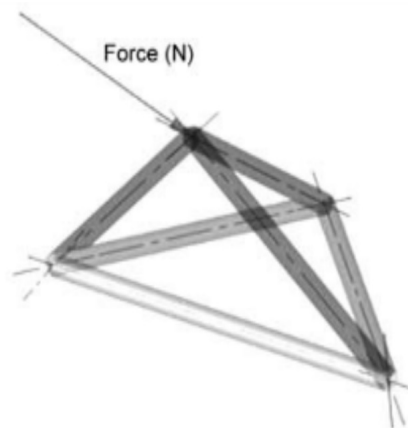
A Figura 5 mostra um chassi multi tubular de um Cooper Mônaco. É possível reparar a falta de triangulação e o fato de que as orelhas que ligam o chassi a suspensão

e outros carregamentos, estão posicionadas longe dos nós. O chassi escada era formado por duas longarinas, podemos ver que agora neste arranjo temos quatro longarinas, duas em cima e duas em baixo.

### 2.2.3.3 Space Frame

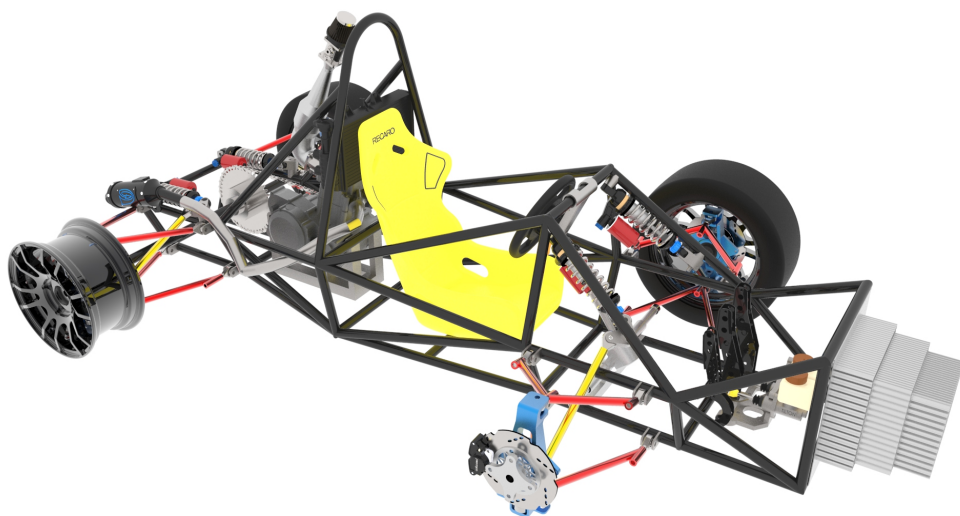
Segundo Seward (2015) a essência do arranjo space frame são as linhas centrais axiais dos elementos conectadas entre si em nós, formando triângulos. Um nó é um ponto no espaço, e cada um deve ter pelo menos três elementos conectados. Quando tem-se seis elementos seguindo essa norma, forma-se o tetraedro. Todas as cargas aplicadas a esse frame devem ser posicionadas idealmente nos nós, e não no meio de um elemento por exemplo.

Figura 6 – Tetraedro - Estrutura básica do space-frame



Fonte: Seward (2015)

Figura 7 – Space Frame Chassis - Pune University 2015



Fonte: Das (2015)

Um fato que torna esse arranjo tão eficiente é que idealmente, os elementos estão expostos puramente a cargas trativas ou compressivas. Entretanto, devido ao tubo não ser conectado como um pino em suas extremidades, mas por meio de soldas, formando um engaste, algum momento fletor é transferido ao longo do elemento.

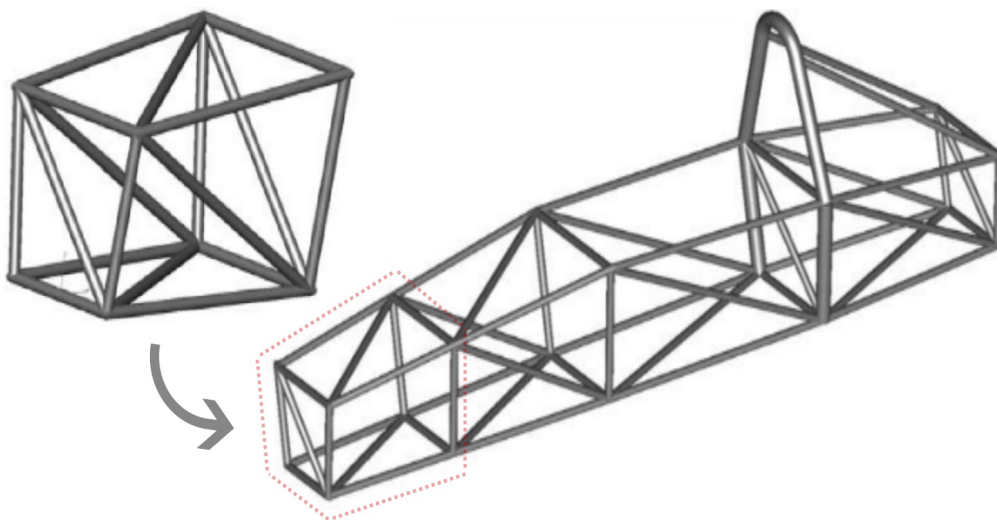
Pode-se notar que a triangulação da estrutura foi priorizada. Vemos que os suportes das balanças das suspensão no chassis, as chamadas "orelhas" estão sobre os nós ou muito próximo deles. As orelhas que não estão sobre os nós provavelmente não puderam ser anexadas naquele local exato pro critérios de projeto da suspensão, mas idealmente é onde deveriam estar.

Segundo Costin e Phipps (1965), um chassi deve sempre ser considerado como um meio para o fim, e nunca como o fim. O chassi é construído para dar suporte aos componentes, e portanto, está sujeito as restrições destes componentes. Cada seção do chassi deve ser uma estrutura completa como na Figura 6, pois se uma delas não for, todo o conjunto será afetado em termos de rigidez.

Pela teoria de estrutura lecionada em diversas obras, um space frame em sí, é uma estrutura completa, na qual todas as articulações poderiam ser flexíveis sem que o chassis perdesse sua rigidez. Caso as uniões permanentes por meio de solda, entre os corpos, fosse substituída por conexões esféricas, a rigidez não seria alterada.

Podemos perceber nas Figuras 7 e 8 que alguns membros foram retirados para que se pudesse ocupar o chassi. Observe que não há triangulação sobre o cockpit e nem em a sua frente onde as pernas do piloto precisam se acomodar. Também foi retirado o elemento no espaço ocupado pelo motor. A estrutura ideal seria construída por blocos como o destaque da Figura 8, porém por questões como as citadas acima isso não é possível.

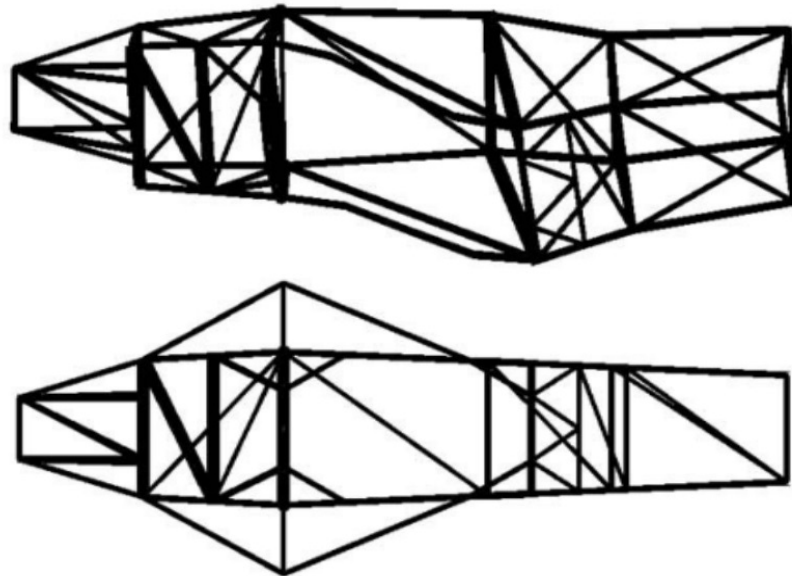
Figura 8 – Space Frame Composto por Blocos Estruturais



Fonte: Adaptado Seward (2015)

Como Já foi discutido previamente, a rigidez do conjunto depende da parte menos rígida dele. Logo precisa-se implementar soluções para reduzir o efeito da falta desses elementos. A parte menos rígida é justamente a do habitáculo como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Space Frame com Baixa Rigidez Concentrada no Habitáculo



Fonte: Adaptado Seward (2015)

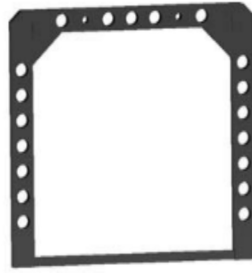
Segundo Seward (2015) algumas medidas que podem ser vistas na Figura 9, as quais podem melhorar a rigidez nesses locais são:

- Aumentar a rigidez de flexão dos membros superiores laterais, particularmente no plano horizontal. Isso no caso de perfil circular, aumentando o diâmetro desses membros.
- Adicionar elementos superiores ao habitáculo, acima do piloto. A gaiola do BAJA SAE, diferente do Fórmula SAE, é desta maneira.
- Reduzir o comprimento efetivo dos membros laterais do cockpit, adicionando pequenos elementos nos cantos.
- Criar um invólucro estrutural no entorno no habitáculo. No caso da Figura 9 aumentou a rigidez em 50%!

Seward (2015) ainda continua seu raciocínio falando sobre a parte dianteira do chassi, no entorno nas pernas do piloto. Pode-se adicionar um anteparo como o da Figura 10. Esse método é ótimo para evitar a flexão de algum elemento que por ventura possa a vir receber carregamentos fora dos nós, como em caso de capotamento ou mesmo algum esforço de suspensão.



Figura 10 – Anteparo a ser fixado dentro ao chassi ao entorno das pernas do piloto



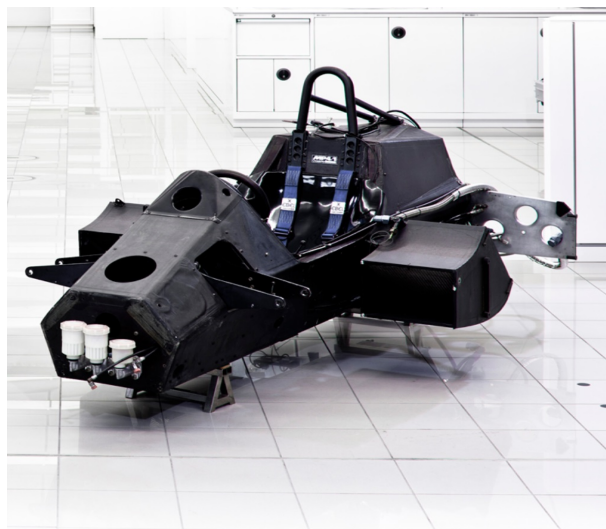
Fonte: Seward (2015)

#### 2.2.3.4 Monocoque

Segundo (SEWARD, 2015), o chassi monocoque é universalmente adotado por equipes de corrida profissionais devido ao seu potencial de ser leve, rígido forte e seguro. É construído de materiais nobres, como fibra de carbono, aços ultra resistentes e titânio. Uma ilustração é apresentada na Figura 11, mostrando uma de suas aplicações mais famosas, nos veículos de corrida da Fórmula 1.

A estrutura monocoque apresenta um custo elevado de fabricação, e exige uma mão de obra altamente qualificada, bem como um maquinário de custo alto. Em contraste a estes obstáculos, a mesma entrega um ótimo comportamento dinâmico, leveza, a capacidade de ser modelado sobre medida e conforme necessidade.

Figura 11 – Monocoque em Fibra de Carbono - F1



Fonte: <https://tsmsportz.com/>

## 2.2.4 Chassi BAJA SAE

A gaiola de proteção dos veículos BAJA SAE é do tipo space frame, e seu projeto e construção são normatizados pelo Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil (RATBSB), conforme a Figura 12. A norma a ser empregada neste trabalho é a Emenda 3, com data de efetividade de 30 de setembro de 2019.

Segundo o RATBSB, o objetivo da gaiola é manter um espaço mínimo ao redor do piloto, devendo ser projetada e fabricada para prevenir qualquer falha de sua integridade. Deve ser construída em aço carbono com teor de carbono de ao menos 0,18%.

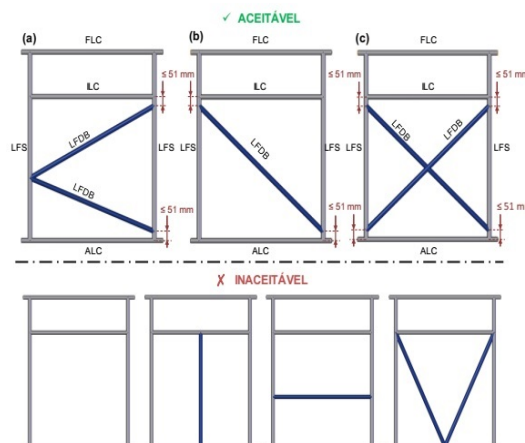
Figura 12 – Chassi Baja SAE - Space Frame



Fonte: RATBSB - Emenda 3

O RATBSB orienta as equipes BAJA SAE, quanto a construção do chassi, acerca de alguns métodos de travamento estrutural, como pode ser visto na Figura 13, para o plano inferior da gaiola de proteção.

Figura 13 – Travamentos Exemplificados pelo RATBSB



Fonte: RATBSB - Emenda 3

Assim como as orientações acerca dos travamentos apresentados acima,

não cabe a este trabalho transcrevê-la ou explicá-la. Poderiam ser criados erros de interpretação. Recomenda-se que sobre este assunto, busque-se as informações diretamente no documento RATBSB.

### 2.3 Principais Carregamentos e Modos de Deformação de um Chassis Automotivo

Para que se possa projetar uma estrutura é necessário que se compreenda as forças atuantes e seus pontos de entrada no chassi. Estes esforços por sua vez provocam uma grande quantidade de modos de flexão e torção. Para tornar uma análise praticável, se faz necessário a seleção dos principais modos de deformação. Segundo Riley e George (2002), os principais modos de deformação são:

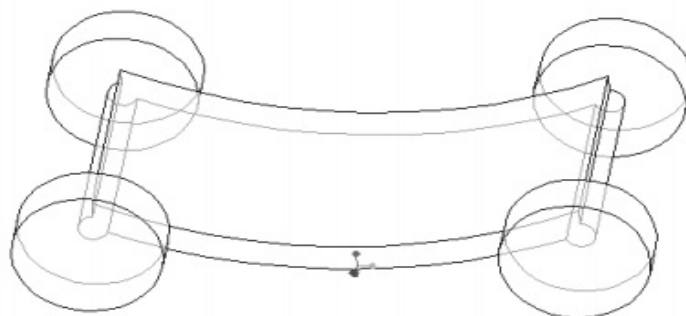
- a. *Lozengeing* Horizontal
- b. *Torsional Stiffness* ou Rigidez Torcional
- c. *Lateral Bending* ou Flexão Lateral
- d. *Vertical Bending* ou Flexão Vertical

#### 2.3.1 Flexão Vertical

A flexão vertical foi o primeiro modo de deformação com o qual os engenheiros de chassi se preocuparam, como podemos ver na Figura 2, o chassi viga do Ford 999. Esse modo de deformação se caracteriza por sua analogia a uma viga com carga distribuída, com suportes nas extremidades.

A deformação esperada é que a estrutura se deforme como uma parábola com concavidade para cima, que é o sentido contrário da aceleração da gravidade. Acelerações verticais diferentes da gerada pela gravidade podem aumentar ou reduzir as forças na estrutura.

Figura 14 – Flexão Vertical

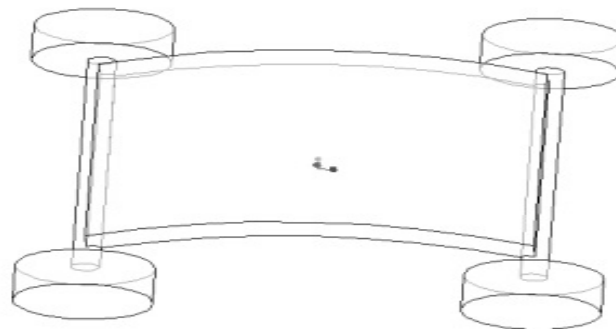


Fonte: Riley e George (2002)

### 2.3.2 Flexão Lateral

A flexão lateral é um carregamento que tem várias fontes. Algumas delas são: Inclinação do pavimento, curvas que induzem acelerações centrífugas a massa suspensa e esforços aerodinâmicos laterais. As forças que tornam a estrutura estática no instante são geradas pelo atrito pneu/solo. A deformação esperada é uma parábola no plano xy da referência SAE, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Flexão Lateral

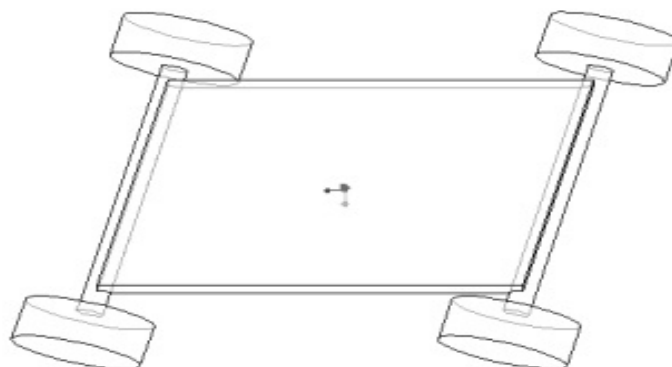


Fonte: Riley e George (2002)

### 2.3.3 Lozengeing Horizontal

Se aplicarmos uma força para frente de um lado do eixo de simetria -x, e uma força para trás do lado +x, induziremos uma deformação deste tipo a estrutura. Ela tende a formar um paralelogramo como mostrado na Figura 16. Este tipo de carregamento pode ser gerado por deformações do pavimento, variações da força de frenagem em cada roda, colisões entre outros.

Figura 16 – *Lozengeing* Horizontal



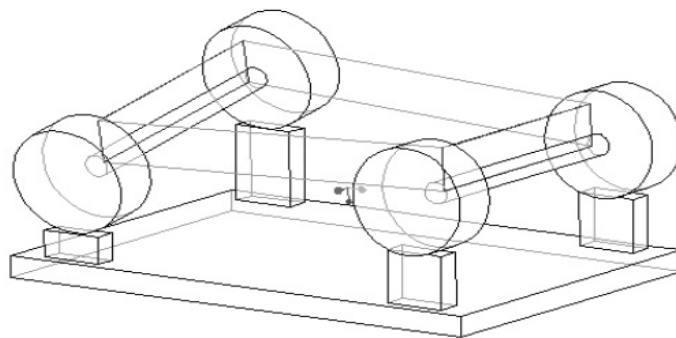
Fonte: Riley e George (2002)

### 2.3.4 Torção Longitudinal

A torção longitudinal é provocada por cargas com direção z aplicadas em eixos diferentes e em lados opostos, ou apenas uma força em uma roda. Pode-se visualizar melhor na Figura 17. A torção longitudinal dá origem a rigidez torcional que é um dos parâmetros de análise que define a qualidade do chassi.

Segundo Riley e George (2002), a estrutura pode ser visualizada como uma mola de torção ligando os dois finais do chassi. Adiante do texto será discutido sobre os cálculos para estimar tal parâmetro.

Figura 17 – Torção Longitudinal



Fonte: Riley e George (2002)

A torção longitudinal é o modo de deformação que será estudado ao longo deste trabalho. Espera-se compreender seu funcionamento e como criar um arranjo tubular que apresente a maior rigidez possível a ele.

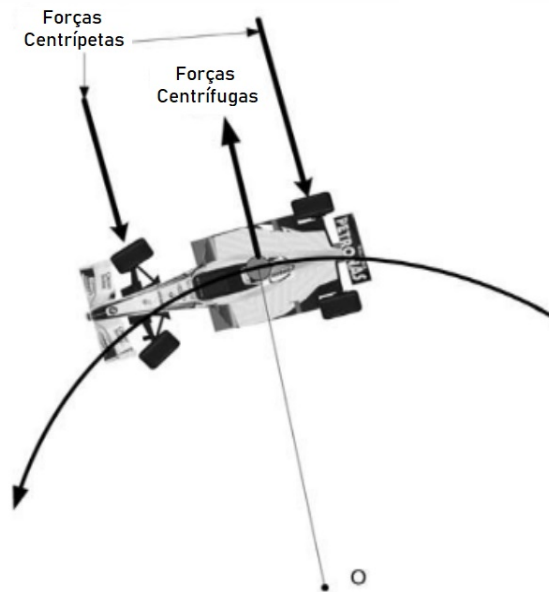
## 2.4 Rigidez Torcional: Sua Importância

Boa parte dos autores comentam diretamente ou indiretamente, que a rigidez de um chassi, é o fator que de fato define a qualidade do mesmo. Tem-se dois grandes motivos para esta avaliação:

- Ser possível por meio do ajuste da rigidez da suspensão dianteira e traseira, controlar o comportamento dinâmico do veículo. Sub-esterçante, sobre-esterçante ou neutro.
- Evitar o fenômeno de ressonância na estrutura devido a elasticidade do arranjo tubular.

O primeiro motivo, como descrito pela teoria de dinâmica veicular, quando um veículo está em curva ocorre um estado de transferência de carga das rodas internas das curvas para as externas a ela. Como pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 – Veículo em curva



Fonte: Seward (2015)

Quando esse fenômeno ocorre em cada eixo, dianteiro e traseiro, a força de atrito do pneu externo a curva aumenta enquanto a do pneu interno, diminui. O ponto é, a soma das forças de atrito dos dois pneus quando o veículo está em linha reta, é sempre maior que a soma dos atritos do pneu externo e interno sob condições de curva. Esse estado de transferência de carga tem um limite. Em um determinado ponto, o pneu externo a curva entra em sobrecarregamento e seus flancos se deformam, e por sua vez, provocam deformação na banda de rodagem, de maneira a reduzir a força de atrito. Nesse ponto em específico, tem-se a roda interna já perdendo atrito pela transferência de carga, e agora a roda externa também começa a perder a eficiência do seu mecanismo de geração de força. Inicia-se então, o processo de escorregamento do pneu.

Sabe-se que quando se tem muita transferência de carga, o eixo dianteiro ou traseiro entra em escorregamento. A ordem de qual desses eixos inicia esse estado primeiro, que define o comportamento geral do veículo em sub-esterçante (eixo dianteiro primeiro), sobre-esterçante (eixo traseiro primeiro) ou neutro (iniciam o escorregamento ao mesmo tempo). É possível reduzir a transferência de carga enrijecendo as molas da suspensão. Por exemplo, se fossemos tornar o veículo sub-esterçante, tornaríamos a suspensão dianteira menos rígida do que a traseira, isso faria com que o eixo dianteiro atingisse o estado de escorregamento antes do eixo traseiro. Porém, note que, ao fazer isso, estamos impondo um forte esforço de torção ao chassi. Se a estrutura não for rígida o suficiente, perder-se-á essa capacidade de ajustar o comportamento dinâmico de curva pois o que for ajustado na suspensão, será desajustado pela torção da estrutura.

Segundo Seward (2015) há uma banda de valores utilizados para a rigidez torcional de um chassi. Essa banda varia de  $300Nm/o$ , e vai até os carros de F1 na casa dos  $20000Nm/o$ . Segundo o autor, esse valor enorme atingido por veículos de F1 só pode ser alcançado por monocoques feitos a partir de fibra de carbono. Valores desejáveis ficam em torno de  $1000Nm/o$ . Será visto que, esses valores de rigidez são fortemente dependentes do método de medição e de sua precisão.

O segundo motivo, é a possibilidade de que devido a baixa rigidez, o modo de vibração da estrutura atrapalhe o controle do veículo. No caso da suspensão, temos uma mola absorvendo energia em conjunto com um amortecedor que a dissipa. Esse acoplamento evita que o carro fique sub-amortecido e oscilando. A rigidez torcional do chassi atua de maneira análoga a uma mola torcional, e o único amortecimento que possui é a inércia da massa suspensa e do pequeno e próprio amortecimento de sua estrutura. Portanto, no caso de se ter uma estrutura flexível, é possível que se tenha uma estrutura instável, que gere oscilações que reduzam consideravelmente a manobrabilidade e estabilidade de um veículo.

## 2.5 Métodos de Análises de Estruturas

Existem basicamente três maneiras de se analisar uma estrutura. Segundo (SEWARD, 2015) e (GENTA, 2009), podemos analisá-las manualmente, por meio de computadores e experimentalmente.

A análise manual analítica é muito limitada, diversas simplificações são assumidas para viabilizar o cálculo, isso o torna muito pobre. Sua aplicação é basicamente empregada para analisar esforços em seções da estrutura.

Devido a necessidade de uma análise mais detalhada, utiliza-se a ferramenta computacional, por meio da implementação do método dos elementos finitos. Esse método permite avaliar deformações e tensões em diversos modos, permite também trabalhar com não linearidades. Pode-se usar elementos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. Em contraste com a capacidade humana, permite executar milhões de cálculos em um tempo muito curto.

O outro método é o experimental, o qual é muito abrangente, podendo utilizar-se de equipamentos de medição como transdutores de deslocamento e relógios comparadores. Consiste em fabricar um modelo e testá-lo sob condições controladas para que se possa estudar se ele atende os requisitos de projeto.

Comumente todos são empregados, porém em etapas diferentes de projeto. Os métodos de análise numérica disponíveis hoje, somados com a capacidade computacional crescente, são perfeitos para as análises necessárias. Porém, vale ressaltar que para se analisar um modelo numericamente, obviamente é necessário que se tenha um modelo matemático detalhado. Conforme (GENTA, 2009) discorre em

sua obra, a necessidade desses modelos matemáticos detalhados da estrutura acaba por tornar sua aplicação difícil durante as primeiras etapas de projeto. Grande parte da informação que se precisa ainda não está disponível, e virá conforme o projeto avança. Hoje em dia, em um veículo comercial, e até mesmo em veículos esportivos, o arranjo estrutural depende fortemente do design externo. Este, é frequentemente alterado para ajustes estéticos ou de otimização aerodinâmica, segundo (HUCHO, 2013).

## **2.6 O método dos Elementos Finitos**

Segundo (COOK, 2001), o método de elementos finitos, é um método para solução numérica de problemas de campo. Este tipo de problema se caracteriza quando determinamos a distribuição espacial de uma ou mais variáveis dependentes. Assim, podemos estudar a distribuição de tensões ao longo de uma viga, por exemplo, assim como sua deformação.

### **2.6.1 Uma Introdução ao Problema**

No ramo da engenharia que se estudam estruturas, sejam elas formadas pelas mais diversas formas e materiais, é comum o engenheiro estar sujeito a situações onde precisa-se de maneira ágil, elaborar um projeto de um item que demande responsabilidade de projeto.

Como um problema de exemplo, vamos supor que fosse necessário elaborar o projeto de uma viga que terá uma carga de 5 toneladas igualmente distribuída ao longo de seu comprimento, que é de 4 metros, sendo que, suas extremidades são pinadas. O requisito de projeto é que a deflexão máxima da viga, seja seu comprimento dividido por 300. Vamos utilizar esse problema para o desenvolvimento de texto.

O que se pede nesse caso ao projetista, é que ele diga qual viga, dentro da tabela do fornecedor de aço da empresa, eles precisam comprar. Entretanto, a massa da viga tem uma importância enorme aqui. Ele não pode simplesmente abrir o catálogo e escolher a maior viga disponível. Cada quilograma desnecessário, é um custo a mais para a empresa. O engenheiro deve então, definir uma viga que atenderá aos requisitos de projeto, de modo que tenha a menor massa possível.

O engenheiro de projetos precisa estimar com precisão as cargas máximas as quais o elemento em projeto será exposto, e então, garantir que este não falhe em nenhuma hipótese. Geralmente, esse processo se inicia muito antes de se iniciar o projeto do elemento que suportará a carga, analisando o problema e definindo o problema estático, utilizando-se para isso relações de equilíbrio.

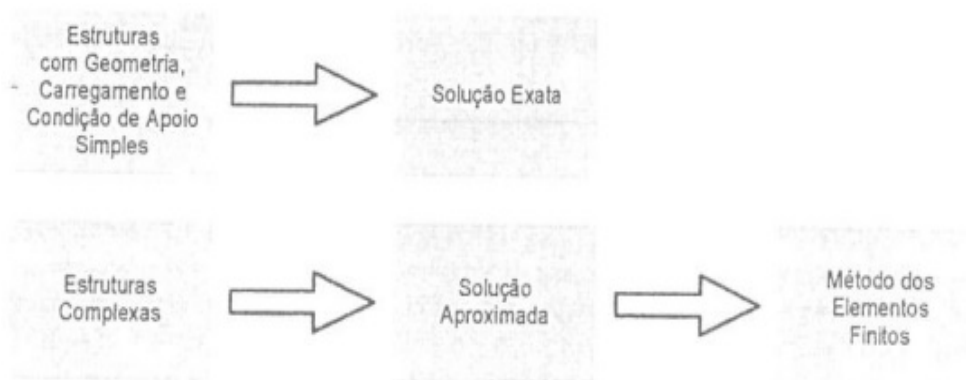
Segundo (FILHO, 2008), as soluções prontas do problema de flexão de vigas, que são encontradas em livros de resistência dos materiais como por exemplo, a obra de (HIBBELER, 2016), são produtos do tratamento matemático clássico baseado no



estudo das equações diferenciais. Entretanto, os problemas reais do cotidiano são complexos demais para serem modelados por este tipo de método. Para que este seja aplicável, demanda-se muitas simplificações que acabam por sabotar a precisão dos resultados.

Na obra (FILHO, 2008), são discutidos os dois métodos que são utilizados, os métodos analíticos clássicos e o método dos elementos finitos. Os métodos analíticos clássicos promovem o cálculo exato dos deslocamentos, deformações e tensões na estrutura. Esses cálculos são possíveis de serem feitos em qualquer um dos infinitos pontos da geometria. Porém, diante de problemas complexos, a modelagem destes problemas através deste método é muito complicada e exige um grande conhecimento matemático. Já o método dos elementos finitos introduz uma abordagem diferente, este apresenta uma resposta aproximada, ao invés de uma resposta exata, mas por sua vez, tem uma capacidade de modelar situações muito mais complexas quando comparada ao método analítico clássico. A Figura 19 apresenta uma ilustração que resume o assunto comentado.

Figura 19 – Métodos de Modelagem de Sistemas Mecânicos



Fonte: (FILHO, 2008)

### 2.6.2 Sistemas Contínuos e Sistemas Discretos

Quando um problema é tratado como sistema contínuo, tem-se uma resposta para cada ponto da estrutura sob qualquer solicitação de carregamento. Por exemplo, vamos assumir a hipótese que fosse necessário calcular a deflexão na viga de quatro metros do problema de exemplo, poderíamos calcular a deflexão ao meio, ou 1mm antes do meio, ou ainda em qualquer outra posição que fosse desejada. Para cada uma dessas posições, poderíamos variar a carga, gerando diferentes respostas. Isso é um sistema contínuo.

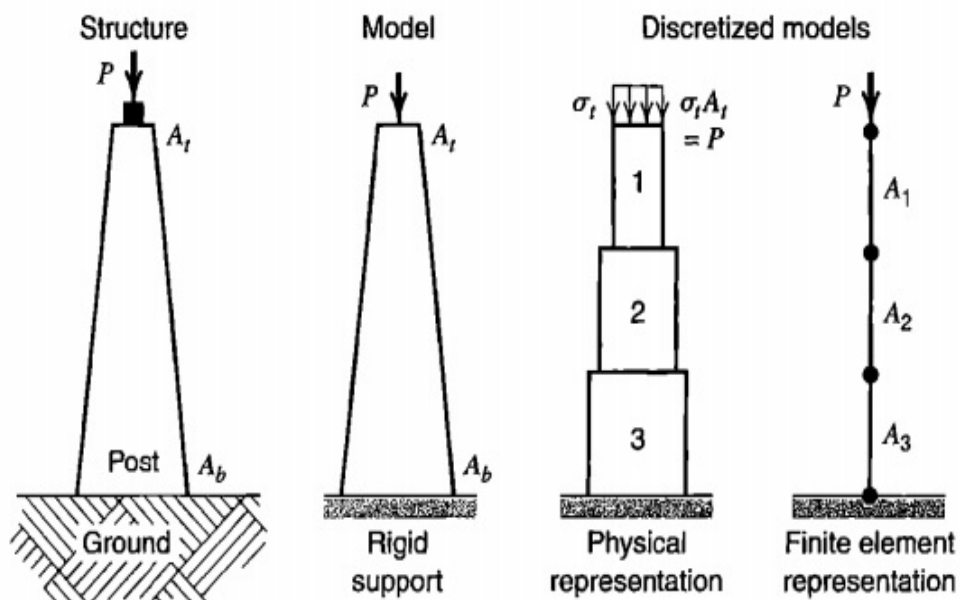
Já um sistema discreto, segundo (FILHO, 2008), não se pretende calcular os deslocamentos dos infinitos pontos de um corpo, como no caso contínuo. Calcula-se

então esses deslocamentos em alguns pontos, de modo que se julga suficiente para representar o deslocamento de todo o conjunto de maneira aproximada.

Segundo (COOK, 2001), um modelo matemático é discretizado quando se divide este em uma malha de elementos finitos. Um elemento finito pode ser visualizado, de maneira simplista e muito introdutória, como uma linha com um ponto de início e um ponto final. A viga em estudo, de quatro metros de comprimento, poderia por exemplo, ser representada por um elemento de quatro metros, ou quatro elementos de um metro, ou quatrocentos elementos de um centímetro. A questão é que o corpo é tratado como um conjunto, uma malha, de elementos finitos.

Ainda segundo (COOK, 2001), por meio da discretização, um sistema contínuo inteiro é representado por um campo contínuo por partes, sendo este, definido por um número finito de nós. A Figura 20, apresenta uma ilustração. Nela, temos o problema inicial que é a estrutura, em seguida constitui-se o modelo físico estático e contínuo. Na sequência tem-se o modelo discretizado, mas ainda com representação física, e por último tem-se a representação por elementos finitos. Note que, cada um dos nomes "A1", "A2" e "A3", é um elemento. Neste, tem-se informações acerca das propriedades do material e geométricas, de modo a representar aquela parte do sistema contínuo.

Figura 20 – Discretização de Problema



Fonte: (COOK, 2001)

### 2.6.3 Problemas Lineares e não Lineares

O problema a ser estudado neste trabalho, foi assumido como um problema dentro da hipótese linear. Quando se assume tal hipótese, entende-se que as

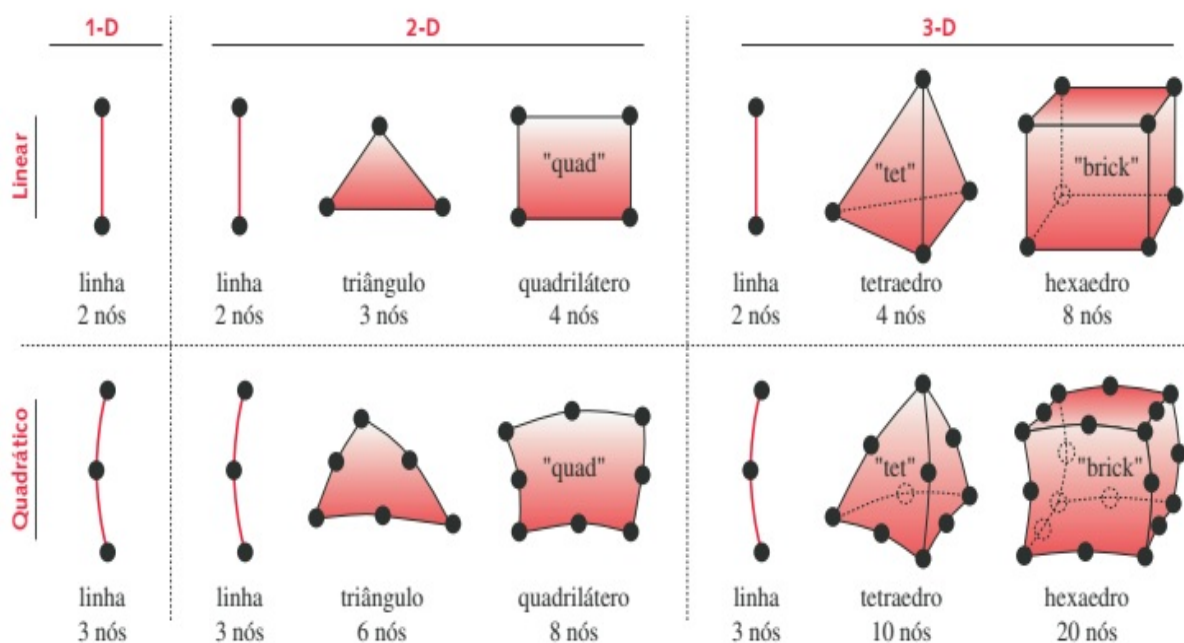
propriedades do material não se alteram com o carregamento. Esse tipo de abordagem, também exige que as deformações sejam pequenas o suficiente para que as equações de equilíbrio possam ser escritas assumindo a mesma geometria inicial. Por exemplo, imagine uma barra reta, redonda de um metro. Esta barra tem 10mm de diâmetro. Aplica-se uma força de tração nesta barra, o que acontecerá, é a redução do diâmetro de sua seção. Em outras palavras, sua geometria mudou com a aplicação da carga. Uma análise por elementos finitos, englobando esse fato da redução de seção devido a aplicação da carga pode ser realizada, mas é muito mais complexa.

#### 2.6.4 Os tipos de Elementos

Existem diversos tipos de elementos finitos. Existem os elementos unidimensionais, elementos planos, elementos tridimensionais. Dentro de cada um destes grupos citados, existem variações. Os principais elementos são apresentados na Figura 21, segundo (NORTON, 2011).

Essa primeira introdução, apresentada nos tópicos acima, teve o objetivo de apresentar um problema, e mostrar alguns dos métodos gerais de solução. Entretanto, não é viável neste documento apresentar toda a teoria da análise por elementos finitos. Vamos nesse ponto, direcionar para a classe de elementos a qual será utilizada neste trabalho, que é a dos elementos unidimensionais.

Figura 21 – Alguns Elementos Finitos



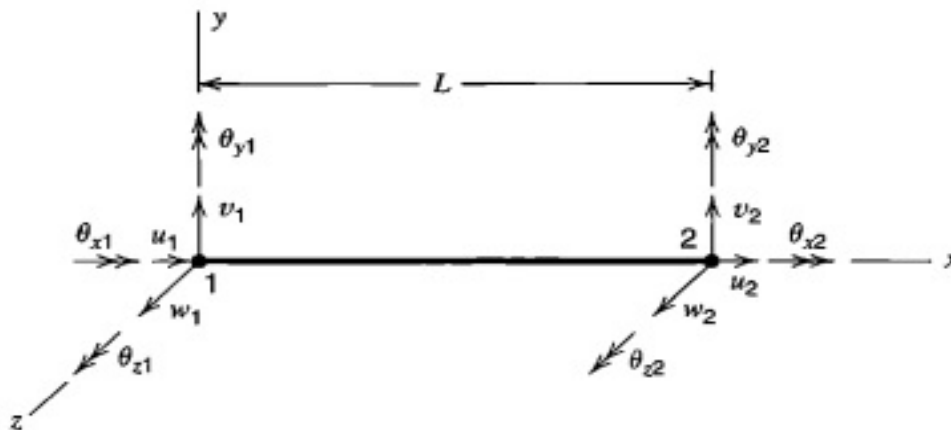
Fonte: (NORTON, 2011)

### 2.6.5 Elementos Unidimensionais: O elemento de viga

Segundo (COOK, 2001), considera-se um elemento unidimensional um elemento reto que tem um nó em cada ponta. Neste, são aplicados argumentos físicos para que se obtenha matrizes que representem o ambiente do elemento. Elementos unidimensionais, são por exemplo, segundo Cook fala em seu livro, uma barra reta, carregada axialmente, ou uma viga reta carregada lateralmente, ou ainda, uma barra que conduz calor ou eletricidade.

Em análises estruturais, utiliza-se dois elementos, o elemento de barra e o elemento de viga. Elementos de barras, resistem apenas a cargas axiais, enquanto um elemento de viga pode resistir a carregamentos mais complexos como, momento fletor, torque e esforços de cisalhamento.

Figura 22 – Elemento de Viga Tridimensional



Fonte: (COOK, 2001)

Segundo (COOK, 2001), em uma viga contínua ao longo de dois ou mais suportes, pode ser modelada usando-se um elemento de viga entre cada par de suportes. Assim, se torna trivial o processo de discretização utilizando-se elementos de viga. É importante ressaltar que, elementos diferentes podem ser mesclados para que se tenha o modelo desejado, ou seja, pode-se conectar um elemento de viga a um elemento de barra.

Um elemento finito tem uma matriz característica, que no caso dos estudos em estruturas de aço, por exemplo, é uma matriz de rigidez para análise de deformação em função da carga aplicada. A formulação do elemento de viga utilizada no Ansys, é a formulação tridimensional, ela está disponível em boa parte dos livros focados em elementos finitos como por exemplo as obras (COOK, 2001) e (FILHO, 2008). Portanto, o desenvolvimento completo não será apresentado neste documento, apenas a matriz de rigidez pronta tridimensional de um elemento de viga e uma ilustração do elemento de viga também tridimensional.

Figura 23 – Matriz de Rigidez Tridimensional de um Elemento de Viga

$$[k] = \begin{bmatrix}
 X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & Y_1 & 0 & 0 & 0 & Y_2 & 0 & -Y_1 & 0 & 0 & 0 & Y_2 \\
 & & Z_1 & 0 & -Z_2 & 0 & 0 & 0 & -Z_1 & 0 & -Z_2 & 0 \\
 & & & S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S & 0 & 0 \\
 & & & & Z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_2 & 0 & Z_4 \\
 & & & & & Y_3 & 0 & -Y_2 & 0 & 0 & 0 & Y_4 \\
 \hline
 & & & & & & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & & & & Y_1 & 0 & 0 & 0 & -Y_2 \\
 & & & & & & & & Z_1 & 0 & Z_2 & 0 \\
 & & & & & & & & & S & 0 & 0 \\
 & & & & & & & & & & Z_3 & 0 \\
 & & & & & & & & & & & Y_3 \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & & Y_3 \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & & Y_3
 \end{bmatrix} \begin{matrix}
 u_1 \\
 v_1 \\
 w_1 \\
 \theta_{x1} \\
 \theta_{y1} \\
 \theta_{z1} \\
 u_2 \\
 v_2 \\
 w_2 \\
 \theta_{x2} \\
 \theta_{y2} \\
 \theta_{z2}
 \end{matrix}$$

symmetric

Fonte: (COOK, 2001)

Pode-se ver que tem-se 12 linhas na matriz. A variável "u", é o deslocamento axial do nó, a variável "v", é o deslocamento em no eixo y do nó, e a variável "w" é o deslocamento no eixo z, também do nó. Já as variáveis  $\theta$ , são referentes as rotações em torno dos eixos x,y e z. Cada uma dessas possibilidades de deslocamento nodal, são chamadas de graus de liberdade. Portanto, um elemento de viga apresenta seis graus de liberdade em cada nó, e em um único elemento de viga, tendo dois nós, temos os 12 graus de liberdade.

Assim, um elemento de barra tem apenas três graus de liberdade por nó, e sua matriz tem apenas 6 linhas. Perceba que quanto maior a matriz, maior é a demanda de capacidade de processamento.

Todo o modelo do chassi do Baja, foi feito a partir de elementos de viga. A malha foi gerada pelo Ansys, bem como a solução da matriz, de acordo com as condições de contorno e cargas aplicadas.

## **3 MÉTODO**

### **3.1 Determinação do Objeto de Estudo**

Quando o tema é análise da rigidez torcional de um chassi, abre-se um leque variado de objetos de estudo, e os métodos os quais estes são abordados. Durante extensa pesquisa em diversas publicações, contrastaram-se duas linhas primordiais de análise. Uma delas isola o frame, isto é, a gaiola sem nenhum item a mais acoplado nela. A outra aborda o que no idioma inglês se refere à "*full chassis torsion test*", e envolve também a suspensão acoplada assim como outros possíveis elementos, como por exemplo, os pneus. O objeto de estudo deste trabalho é o arranjo tubular estrutural, o frame. Buscar-se-á compreender, como diferentes possibilidades de travamentos permitidos pela norma, influenciam na rigidez torcional do frame.

### **3.2 Escolha dos Programas a Serem Utilizados**

Para a realização deste estudo, o qual pretende analisar numericamente a rigidez de frames metálicos, são necessários programas que executem três tarefas básicas, que são:

- a. Ler e criar um modelo CAD da geometria em corpos de linha (*Line Bodies*).
- b. Discretizar o modelo CAD e construir uma matriz de rigidez (Criação de Malha).
- c. Resolver a matriz de rigidez com as respectivas condições de contorno, ao mesmo tempo que ofereça pós processamento destes dados, fornecendo saídas necessárias para produzir respostas ao objeto de estudo.

Para tais necessidades, foram escolhidos os programas SolidWorks como ferramenta CAD, e Ansys como ferramenta CAE. É válido o registro que ambos apresentam tanto ferramenta CAD quanto CAE no mesmo programa, entretanto o SolidWorks apresenta uma plataforma CAD mais robusta em relação ao Ansys, e o Ansys uma plataforma CAE mais refinada quando comparado ao SolidWorks.

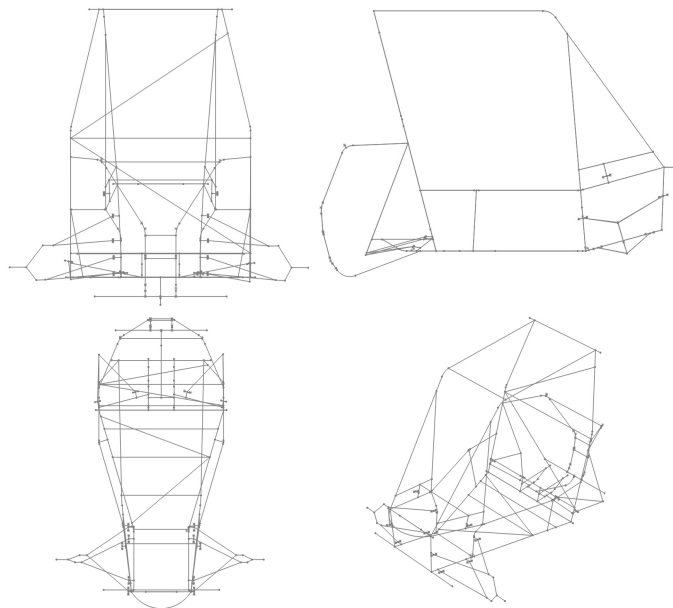
### **3.3 Obtenção da Geometria Inicial**

Este trabalho tem como objetivo responder a algumas perguntas preliminares de projeto estrutural de um chassi, em um ambiente colaborativo com a equipe UFSC BAJA CEM. A equipe, bem como o campus da Universidade Federal de Santa Catarina, estão situados no município de Joinville, no norte de Santa Catarina.

Realizou-se contato com o coordenador da equipe, bem como seu capitão e com o responsável pelo desenvolvimento do *space frame* do time. Foi verificado o interesse da equipe em desenvolver em conjunto este estudo acerca da rigidez estrutural de seu protótipo. Obteve-se, assim, o modelo a ser utilizado no ano de 2020, que foi desenvolvido dentro da norma prevista.

O modelo recebido é um arquivo CAD, composto de elementos de linha. Foi solicitado este tipo de modelo, pois nele tem-se as informações acerca das localizações dos nós, que para a análise que seria realizada, seriam de grande importância.

Figura 24 – Gaiola de Proteção - Equipe BAJA CEM



Fonte: O autor. (Programa: SolidWorks)

### 3.4 Definição das Hipóteses Simplificadoras

Teoricamente, é impossível descrever com elementos finitos, uma estrutura em completa exatidão. Segundo (FILHO, 2008), isso só seria possível quando fosse utilizado os modelos clássicos, que descrevem a resposta em infinitos pontos de um corpo, são os modelos contínuos. Entretanto, eles são aplicáveis apenas para geometrias simples e sob condições controladas. São então utilizados os modelos discretos, elementos finitos, que viabilizam a execução de uma análise através de uma rotina de cálculos, permitindo o emprego de computadores. Essa abordagem, segundo Filho (2008), entrega uma resposta aproximada. Neste estudo, não foi diferente. Assumiu-se hipóteses que facilitaram criação do modelo e também causaram aproximação nas respostas. Essa deficiência na exatidão devido as simplificações, deve ser criticada e mensurada de acordo com o objetivo do estudo.

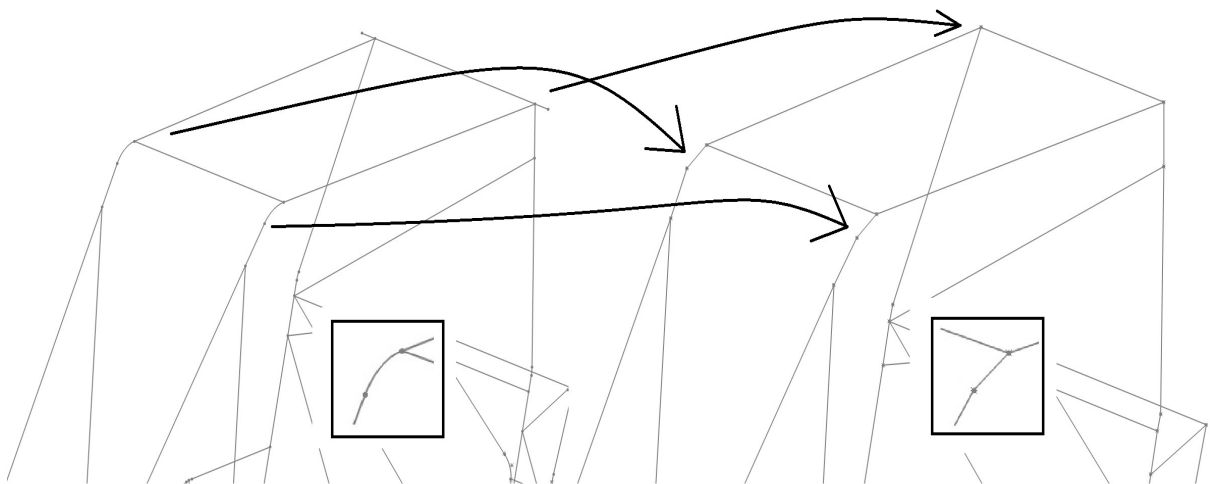
O material, é considerado isotrópico e livre de trincas. Todos os tubos não

apresentam descontinuidades ou sequer, imperfeições geométricas. Considera-se também que todas as uniões soldadas são perfeitas e não acrescentam resistência nas extremidades dos tubos, além de serem desconsideradas as zonas termicamente afetadas. Todas as curvas com raios da geometria foram retiradas, e substituídas por aproximações compostas por linhas retas.

### 3.5 Tratamento da Geometria

Uma vez com o modelo em mãos e tendo o objeto de estudo definido, inicia-se o processo de preparação da geometria. O programa Ansys, possui um algoritmo que discretiza o domínio, no caso, o corpo composto de linhas e pontos. Trocando palavras, o algoritmo que produz a malha de elementos finitos, abordagem discreta, identifica na geometria onde estão os nós do modelo, e entre eles, cria um ou mais elementos. Portanto, quanto melhor desenhado estiver o modelo CAD, e quanto menor for a complexidade da geometria, melhor e mais leve ficará o modelo matemático do chassi. Busca-se por exemplo, eliminar-se curvaturas e regiões complexas desnecessárias, como na Figura 25.

Figura 25 – Geometria Tratada - Simplificação de Curvatura



Fonte: O autor. (Programa: SolidWorks)

Para atingir tal objetivo, a geometria enviada pela equipe foi redesenhada, ponto a ponto, para que não houvesse linhas "perdidas" e descontinuidades. Esse procedimento não significa que a geometria recebida é de má qualidade, mas simplesmente uma questão de preparo para a análise. A simplificação da geometria é uma questão de disponibilidade de processamento e armazenamento RAM disponíveis, entretanto, o preparo e envio da geometria em formatos não padronizados, somados a más práticas de modelagem, possivelmente criarão problemas em alguma parte do processo de análise por elementos finitos.



A partir do modelo recebido, foram retirados todas as coordenadas de todos os pontos cruciais do modelo, possibilitando a criação de uma nuvem de pontos. Essa nuvem foi registrada em uma planilha, mostrada na Figura 26.

Figura 26 – Nuvem de Pontos da Geometria

COORDINATES LIST			
CHASSI			
MODULE 1 : FRONT			
	x [m]	y [m]	z [m]
Reference	0	0	0
1	0.36	0	0
2	0.36	-0.02	-0.06
3	0.36	-0.09	-0.33
4	0.36	-0.1	-0.39
5	0	-0.02	-0.06
6	0	-0.09	-0.33
7	-0.0012	-0.1	-0.39
8	-0.02	0.31	0.01
9	-0.0012	0.06	-0.4
10	-0.07	0.2	-0.41
11	0.36	0.06	-0.4
12	0.43	0.2	-0.41
13	0.38	0.31	0.01
14	-0.05	0.23	-0.27
15	0.41	0.23	-0.27
16	-0.05	0.27	-0.28
17	0.41	0.27	-0.28
18	-0.07	0.97	-0.48
19	0.43	0.97	-0.48
20	-0.05	0.33	-0.29
21	0.41	0.33	-0.29
22	-0.08	1.05	-0.54
23	0.44	1.05	-0.54
24	-0.08	1.08	-0.6
25	0.44	1.08	-0.6
26	-0.01	0.17	0.01
27	0.37	0.17	0.01
28	0.4	0.17	0.01
29	0.4	0.06	-0.4
30	0.39	-0.02	-0.06
31	0.39	-0.09	-0.33
32	-0.03	-0.02	-0.06
33	-0.03	-0.09	-0.33
34	-0.04	0.17	0.01
35	-0.04	0.06	-0.4
36	-0.08	0.27	-0.28
37	0.44	0.27	-0.28

COORDINATES LIST			
CHASSI			
MODULE 2 : MIDDLE			
	x [m]	y [m]	z [m]
Reference	0	0	0
28	-0.1	1.08	-1.46
29	0.46	1.08	-1.46
30	-0.23	-0.1	-1.15
31	0.59	-0.1	-1.15
32	-0.22	-0.1	-1.11
33	-0.19	-0.1	-1.03
34	-0.17	-0.1	-0.96
35	-0.14	-0.1	-0.85
36	-0.01	-0.1	-0.43
37	0.55	-0.1	-1.03
38	0.53	-0.1	-0.96
39	0.5	-0.1	-0.85
40	-0.23	0.2	-0.94
41	0.59	0.2	-0.94
42	-0.23	0.54	-1.32
43	0.59	0.54	-1.32
44	-0.23	0.51	-1.31
45	0.59	0.51	-1.31
46	-0.23	0.43	-1.29
47	-0.23	0.2	-1.23
48	0.59	0.43	-1.29
49	0.59	0.2	-1.23
50	-0.23	0	-1.17
51	0.59	0	-1.17
52	-0.23	-0.04	-1.16
53	0.59	-0.04	-1.16
54	0.1	0	-1.17
55	0.27	0	-1.17
56	0.1	-0.05	-1.16
57	0.27	-0.05	-1.16
58	0.1	-0.1	-1.15
59	0.27	-0.1	-1.15
60	0.49	0.97	-1.43

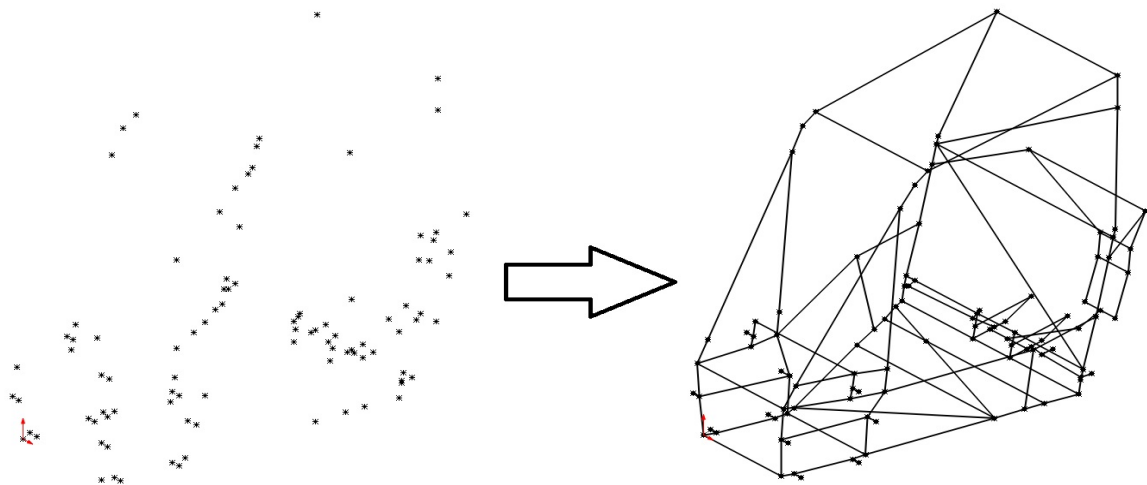
COORDINATES LIST			
CHASSI			
MODULE 3 : REAR			
	x [m]	y [m]	z [m]
Reference	0	0	0
61	-0.09	0.41	-1.6
62	0.45	0.41	-1.6
63	0.11	0.08	-1.73
64	0.25	0.08	-1.73
65	0.11	-0.02	-1.72
66	0.25	-0.02	-1.72
67	0.11	-0.19	-1.66
68	0.25	-0.19	-1.66
69	0.18	-0.19	-1.66
70	0.18	-0.22	-1.56
71	0.18	-0.1	-1.23
72	0.27	-0.1	-1.23
73	0.1	-0.1	-1.23
74	0.27	-0.1	-1.25
75	0.1	-0.1	-1.25
76	0.27	-0.05	-1.42
77	0.1	-0.05	-1.42
78	0.27	-0.1	-1.3
79	0.1	-0.1	-1.3
Reference	0.18	-0.1	-1.23
80	0.16	0.01	0
81	-0.16	0.01	0
82	0.4	0.06	0.06
83	-0.4	0.06	0.06
84	0.41	0.06	0.02
85	-0.41	0.06	0.02
86	0.17	0.02	-0.04
87	-0.17	0.02	-0.04

Fonte: O autor. (Programa: Excel)

Estes pontos foram inseridos um a um no programa SolidWorks. Na sequência, utilizando-se do recurso Sketch3D, foram ligados os pontos desejados por linhas. Esse método permite um controle preciso da posição dos nós os quais o algoritmo gerador de malha irá receber e processar.

Uma vez que o modelo preparado está pronto, o mesmo foi salvo no formato .step, e em seguida importado no programa Ansys. O formato .step (*Standard for the Exchange of Product model data*) é um formulário de troca de dados desenvolvida pela ISO e é amplamente utilizado.

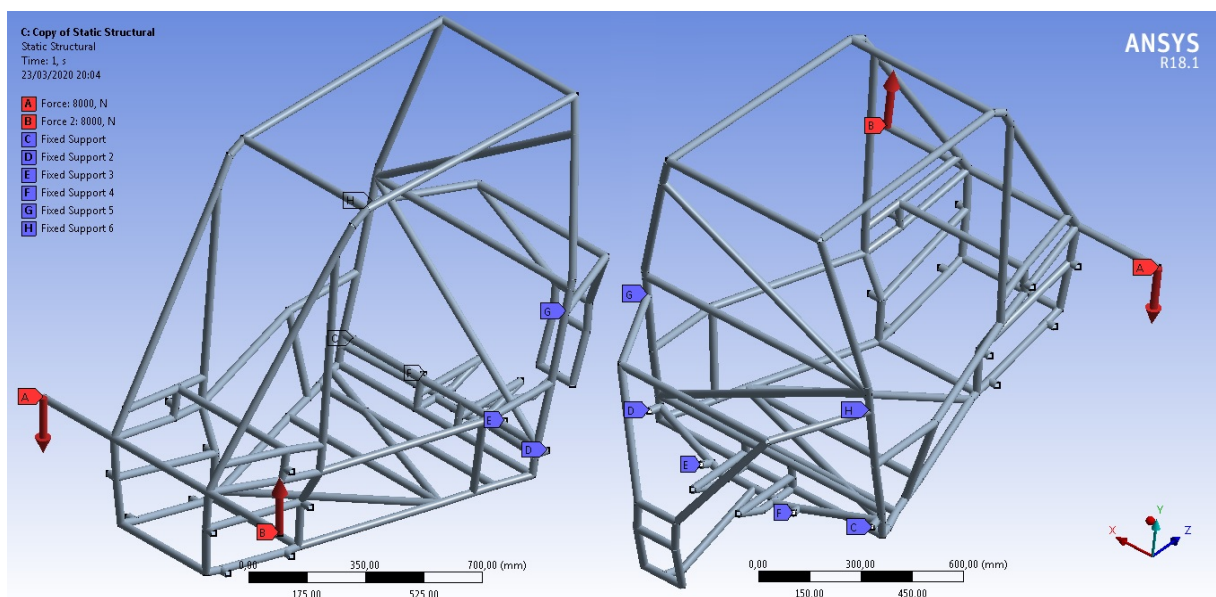
Figura 27 – Nuvem de Pontos e Corpo de Linhas



Fonte: O autor. (Programa: SolidWorks)

### 3.6 Definição das Condições de Contorno e Condições Iniciais

Figura 28 – Condições de Contorno e Iniciais Definidas



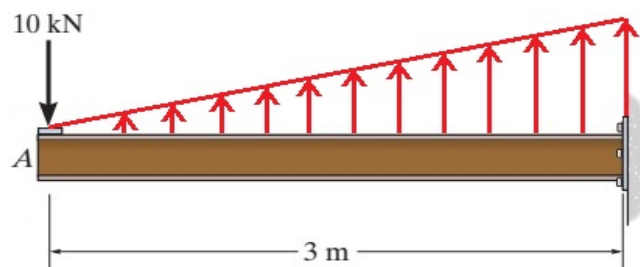
Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

Segundo (RILEY; GEORGE, 2002), para que se possa analisar a rigidez da estrutura com uma precisão aceitável, é necessário que se pense com cuidado nos modos que serão utilizados para travar e carregar a estrutura no programa, são as conhecidas condições de contorno. Estas, que serão utilizadas neste estudo, foram tomadas a partir de referências, como a equipe BAJA da Universidade de Cornell, localizada na cidade de Ithaca, no estado de Nova Iorque, Estados Unidos da América.

Se trata de pinar ou engastar todas as orelhas de suspensão traseiras, e aplicar um binário de forças na parte frontal do veículo.

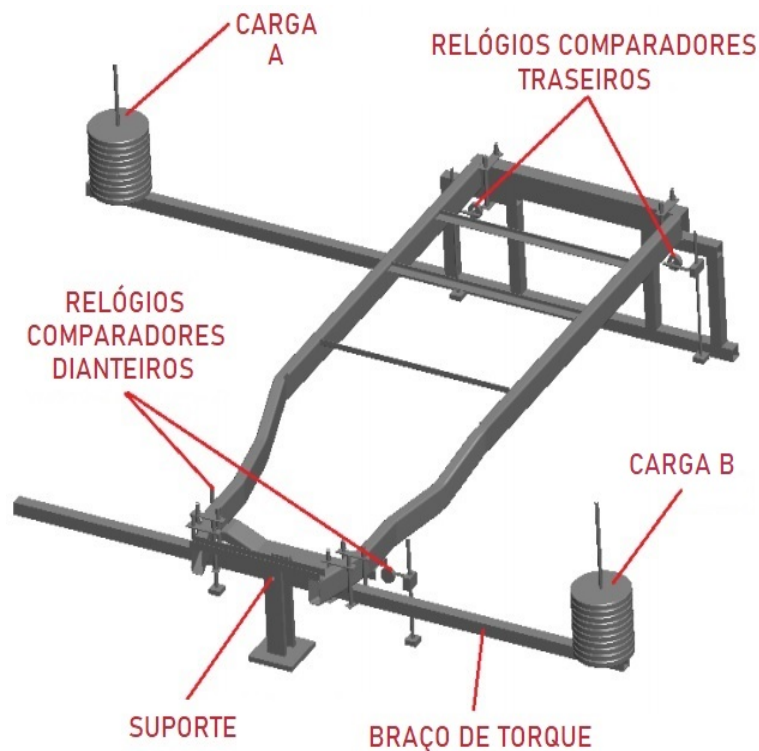
Este método foi utilizado ao longo de vários anos pela equipe, para analisar alguns parâmetros da estrutura, como por exemplo, a rigidez torcional. Durante seu uso, percebeu-se um efeito colateral do método. Quando foram realizadas otimizações nas estruturas, através de algoritmos, as soluções propostas pelo programa deslocaram a triangulação presente na estrutura, para perto dos suportes. Nestas regiões, as tensões são mais elevadas, devido aos valores de momentos fletores serem maiores. Entretanto, nem sempre essa solução proposta produz uma maior rigidez estrutural. Teoricamente podemos compreender isso, engastando uma viga em uma extremidade, e aplicando uma força na outra extremidade. Um exemplo é mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Viga em Flexão.



Fonte: (HIBBELER, 2016). Modificado.

Figura 30 – Análise de rigidez de um frame com carregamento unilateral.



Fonte: (PALDE, 2015). Modificado.

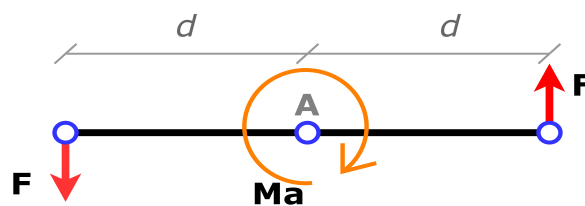
O momento fletor tende a aumentar em direção ao engaste. O mesmo ocorre com o frame, multiaxialmente, induzindo o deslocamento da triangulação para perto do apoio fixo.

Um ponto importante a ser discutido, é o fato de ser utilizado um momento criado por forças iguais e opostas em sentido. Algumas publicações fazem o uso de uma força aplicada em apenas um dos lados na parte dianteira do frame. Como mostrado por Palde (2015), na Figura 30.

É importante notar, que a viga da parte de trás do aparato de teste está sobre o chão, enquanto um carregamento B é imposto a estrutura. Entretanto, para impedir que todo o aparato "tombe", fez-se o uso de uma carga A, que vai garantir que a parte traseira fique estabilizada. A respeito da unilateralidade do carregamento de torção na parte frontal, observa-se que existe um item de apoio, bem ao meio da parte frontal do frame. Esse suporte serve para anular por meio de reação de apoio a força descendente criada pelo carregamento B. Assim não haverá esforço de deflexão na estrutura, do mesmo modo que ocorre a viga na Figura 29. Deste modo é possível expor o frame a um carregamento de torção puro.

No modelo adotado neste trabalho, elimina-se a força peso da análise, e introduz-se as condições iniciais como um carregamento binário, de modo que as forças verticais se anulem, produzindo um carregamento de torção na estrutura. Foi utilizado também um elemento prolongador, cujas extremidades apresentam uma distância de 1 metro entre si. Assim, é possível facilitar os cálculos de quanto momento está sendo aplicado ao chassi. Como este item não faz triangulação com a estrutura, ele não apresenta qualquer influência na rigidez do frame.

Figura 31 – Diagrama de Forças e Momentos



Fonte: O autor.

$$\sum M_a = 0 [N \cdot m]$$

$$M_a = F \cdot d + F \cdot d [N \cdot m]$$

$$M_a = 2 \cdot (F \cdot d) [N \cdot m] \quad \therefore \quad d = 0,5 [m]$$

$$M_a = 2 \cdot (F \cdot 0,5) [N \cdot m]$$

$$T = M_a = F [N \cdot m]$$



Portanto, a utilização do elemento prolongador de  $1m$  de comprimento, permitiu uma simplificação do equacionamento, e o torque será dado pelo mesmo valor da força binária  $F$  aplicada. Por exemplo, se aplicarmos uma força binária  $F = 1500[N]$ , o torque será  $T = 1500[N.m]$ .

A execução das forças binárias será feita através de parâmetros inseridos no Ansys. Serão inseridas forças binárias de  $500N$  até  $4000N$ , em intervalos de  $250N$ . O computador vai executar os cálculos para todas essas condições iniciais de retornar os dados de deflexão máxima e mínima, que serão discutidas à frente no texto. Na Figura 32, os parâmetros são apresentados.

Figura 32 – Tabela de valores inseridos para automatizar os cálculos.

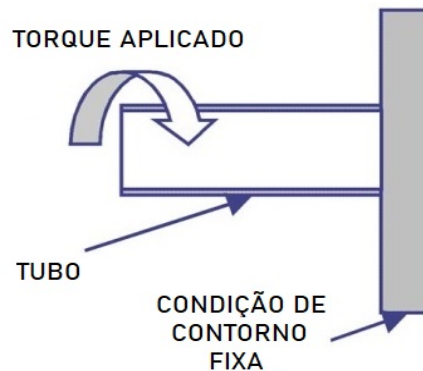
Table of Design Points								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P17 - Force Y Component	P18 - Force Z Y Component	P19 - Vertical Displacement Minimum	P20 - Vertical Displacement Maximum	Retain	Retained Data	Note
2	Units	N	N	mm	mm			
3	DP 0 (Current)	500	-500	-1,5579	1,6387	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	DP 1	750	-750	-2,3369	2,4581	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	DP 2	1000	-1000	-3,1159	3,2775	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	DP 3	1250	-1250	-3,8948	4,0969	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	DP 4	1500	-1500	-4,6738	4,9162	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	DP 5	1750	-1750	-5,4528	5,7356	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	DP 6	2000	-2000	-6,2318	6,555	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	DP 7	2250	-2250	-7,0107	7,3744	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	DP 8	2500	-2500	-7,7897	8,1937	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
12	DP 9	2750	-2750	-8,5687	9,0131	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
13	DP 10	3000	-3000	-9,3476	9,8325	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
14	DP 11	3250	-3250	-10,127	10,652	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
15	DP 12	3500	-3500	-10,906	11,471	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
16	DP 13	4000	-4000	-12,464	13,11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
17	DP 14	2500	-2500	-7,7897	8,1937	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
18	DP 15	2525	-2525	-7,8676	8,2757	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
19	DP 16	2550	-2550	-7,9455	8,3576	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
20	DP 17	2575	-2575	-8,0234	8,4396	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
21	DP 18	2600	-2600	-8,1013	8,5215	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
22	DP 19	2625	-2625	-8,1792	8,6034	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
23	DP 20	2650	-2650	-8,2571	8,6854	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
24	DP 21	2675	-2675	-8,335	8,7673	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
25	DP 22	2700	-2700	-8,4129	8,8492	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
26	DP 23	2725	-2725	-8,4908	8,9312	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
27	DP 24	2750	-2750	-8,5687	9,0131	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
*						<input type="checkbox"/>		

Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

### 3.7 Estratégia de Aferição e Caracterização da Rigidez do Chassi

Tendo as condições de contorno sido definidas, temos o chassi modelado como uma viga engastada, a qual em uma das extremidades será aplicado um torque, e em outra, haverá um engaste. A Figura 33 ilustra essa abordagem.

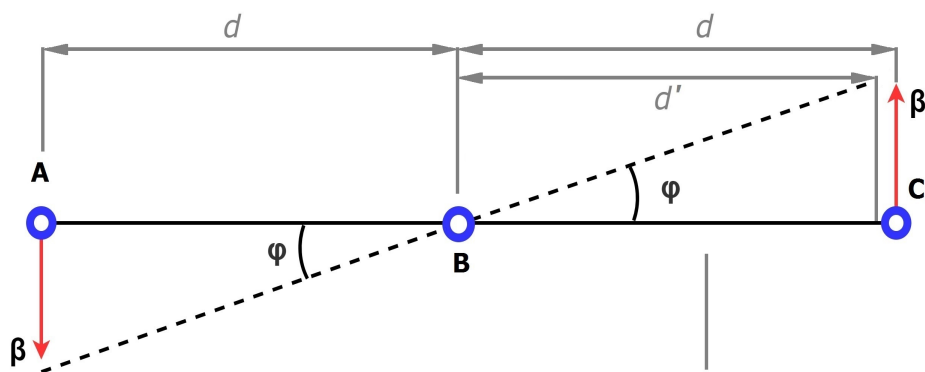
Figura 33 – Tubo Representando o Chassi Exposto a Esforços



Fonte: (RILEY; GEORGE, 2002)

Com o objetivo de tornar a análise quantitativa, trabalhos como Riley e George (2002), Rodrigues Poncio (2015), estimam o ângulo em que a extremidade frontal, rotaciona em relação a extremidade engastada. A rigidez torcional ( $K_t$ ) pode ser quantificada conhecendo o torque imposto ao frame ( $T$ ), e posteriormente dividindo-o pela deflexão angular ( $\varphi$ ).

Figura 34 – Diagrama de Forças e Momentos



Fonte: O autor.

Assim, a equação que define a rigidez torcional ( $K_t$ ) é dada por:

$$K_t = \frac{T}{\varphi} \frac{N \cdot m}{o} \quad \therefore \quad \varphi = tg^{-1}\left(\frac{\beta}{d}\right)$$

Nessa parte da modelagem matemática, quanto utiliza-se o valor  $d$  como denominador para se obter  $\varphi$ , se faz presente mais uma hipótese que simplifica o modelo. Quando o segmento de reta que une os pontos A, B e C, mostrados da Figura 34, rotaciona em um valor  $\varphi$ , o comprimento  $d$  não seria mais o mesmo. Uma vez que o comprimento do elemento prolongador não se altera, a distância horizontal dos pontos C e A em relação ao ponto B se torna menor, assumindo um valor  $d' \therefore d' < d$ . Portanto o denominador da equação deveria ser  $d'$ .

A hipótese que se assume, então, é que a rotação de  $1^\circ$  produz uma variação muito pequena na distância horizontal, de modo que  $d - d' \approx 0$ . Essa hipótese é válida apenas para ângulos pequenos.

Podemos, agora, com base na modelagem apresentada, definir um valor de  $\beta$  para o qual  $\varphi = 1^\circ$ . É importante obtermos este valor, uma vez que a saída do programa Ansys será em deslocamento em um eixo, no caso, o eixo com direção vertical. Temos:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\beta}{d} \quad \therefore \quad d = 500[\text{mm}] \quad \text{e} \quad \varphi = 1^\circ$$

$$\beta = d \cdot \operatorname{tg}(\varphi) = 500 \cdot \operatorname{tg}(1^\circ) \approx 8,73 [\text{mm}]$$

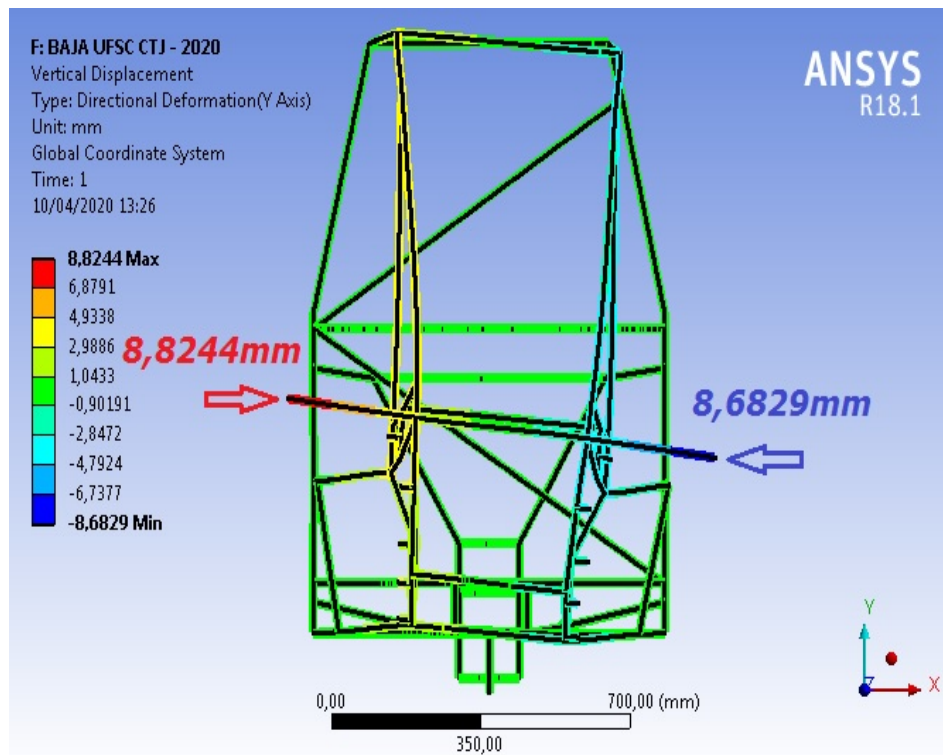
Uma vez que temos que o ângulo desejado é de grau unitário, podemos simplificar a equação da rigidez torcional. Temos:

$$K_t = \frac{T}{\varphi} \quad \therefore \quad \varphi = 1^\circ$$

$$K_t = \frac{T}{1} = T = F \left[ \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\circ} \right]$$

Desse modo, temos que a rigidez torcional  $K_t$  é igual a força binária  $F$  aplicada, na sua respectiva unidade de medida.

Figura 35 – Deflexões verticais diferem em lados diferentes



Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

Uma vez que tem-se o valor do deslocamento vertical que causará a deflexão angular de  $1^\circ$ , precisamos definir como  $\beta$  será obtido, a partir dos dados retornados do programa Ansys. A flecha de deflexão não é igual nos dois lados do chassi, isto é, o  $\beta$  da direita é diferente do da esquerda. Isso ocorre devido ao fato de o chassi não ser simétrico, devido aos travamentos do assoalho e do plano do corta-fogo. A Figura 35 exemplifica este comportamento.

Os mesmos trabalhos referenciados anteriormente, abordam esse comportamento fazendo uma média simples da flecha esquerda e direita. Assim, define-se  $\beta$  como apresentado abaixo:

$$\beta = \frac{\beta_{esquerda} + \beta_{direita}}{2}$$



## 4 TEXTE EXPERIMENTAL PARA VALIDAÇÃO DE MÉTODO DE ANÁLISE NUMÉRICA

### 4.1 Apresentação

A importância das ferramentas computacionais para a simulação do comportamento de materiais é incontestável, entretanto, seu método de utilização não. Dados numéricos validados através de experimentos são a combinação ideal, pois promovem a crítica sobre os dados apresentados pelo modelo numérico.

Foi com esse intuito que decidiu-se construir um equipamento de testes. Este, é composto de quatro partes. A parte estrutural, a parte de estudo (tubular), parte de carga, e a parte de medição. Uma imagem renderizada é apresentada abaixo.

Figura 36 – Equipamento de Testes



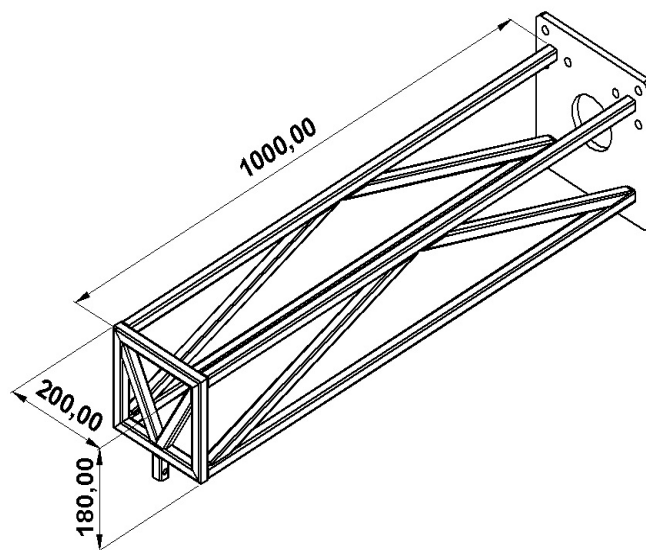
Fonte: O autor. (Programa: SolidWorks)

O equipamento foi projetado e construído pelo aluno, com o apoio da Semacald. A Semacald é uma caldeiraria, com mais de 25 anos de experiência, localizada em Joinville.

Foram aproximadamente dez dias de projeto. Nesse período, pelo menos quatro modelos diferentes foram criados e discutidos. Para a fabricação, foram três dias, entre corte de chapas e perfis, soldagem e montagem.

A equipamento é composto pela estrutura, que por sua vez, é composta por uma viga W250x80 e por três elementos de apoio fabricados a partir de uma viga U de sete polegadas. Ambos laminados. Tem-se também a sub-montagem de carga, onde serão postos dois sacos de granalha comerciais, cada um com 25kg, além do peso próprio de 8,185kg. A parte de medição é composta por um pedestal metálico, construído a partir de chapas metálicas e um tubo industrial redondo de cinco polegadas. O instrumento de medição é um relógio comparador da marca Mitutoyo, modelo 7010sn. A parte de estudo é composta por um arranjo tubular, com perfil metálico tubular quadrado 20mm x 20mm x 2mm. Todo o conjunto é feito de aço AISI 1020.

Figura 37 – Parte de Estudo



Fonte: O autor. (Programa: SolidWorks)

## 4.2 Objetivo

O objetivo deste experimento é validar um método de análise numérica. Este método, será usado para o ensaio numérico de rigidez do chassi do Baja.

### 4.3 O método

O método, de maneira geral, consiste em:

- a. Modelar um corpo metálico tubular utilizando corpos de linha
- b. Exportar este modelo em .step
- c. Importar o modelo no Ansys
- d. Gerar uma operação booleana para unir todos os corpos ou mesclar a utilização da operação booleana com a utilização uniões pontuais por elementos de viga
- e. Criar uma malha
- f. Aplicar as condições de contorno e iniciais (Engastes, Forças, Gravidade)
- g. Analisar as saídas do modelo

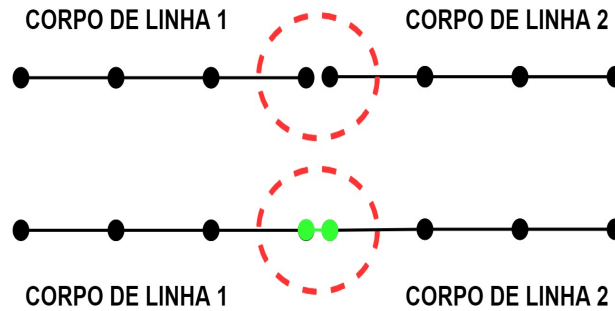
Existe um ponto importante a ser discutido. É a questão da conexão entre elementos de viga. Uma vez a geometria exportada para o Ansys, no momento da criação de malha, o algoritmo divide cada linha em vários elementos de viga unidos entre si. Porém, ele não faz o mesmo entre corpos diferentes. Uma ilustração é apresentada da Figura 38. As ferramentas existentes para conectar estes elementos e que foram usadas neste estudo são a operação booleana e utilização dos spot welds.

A operação booleana, quando aplicada ao modelo estudado, une e transforma todos os corpos em um só. Porém, esse processo exige que todos os elementos do corpo unido sejam de mesma seção transversal. Sabe-se que o chassi do Baja pode ser composto de tubos com tamanhos e espessuras diferentes. Cria-se então a necessidade novamente de unir nós separados. A solução encontrada se chama spot weld no Ansys. Consiste em criar um elemento de viga conectando os nós. Este elemento de viga conector (em verde na ilustração) transmite esforços normais, cortantes e momentos fletores. Entretanto, exige-se muito trabalho para conectar nó a nó, repetindo-se a operação diversas vezes, para modelar corretamente a geometria, abrindo uma lacuna para eventuais "esquecimentos".

A saída encontrada foi mesclar as duas ferramentas. As partes as quais são suscetíveis da aplicação da operação booleana são unidas, criando corpos separados. Depois, une-se estes corpos através dos spot welds. O processo torna-se muito mais rápido, e permite criar geometrias com seções diferentes.

Observou-se em alguns testes que, em uma estrutura completamente ligada por spot welds, há uma resposta de deflexões e deslocamentos nodais ligeiramente superiores para um mesmo corpo inteiramente unido por uma operação booleana.

Figura 38 – Ilustração da conexão entre corpos de linha



Fonte: O autor.

Usou-se nessa modelagem uma única condição de contorno, e duas condições iniciais, uma em  $t=0$  e a outra em  $t=1$ . A condição de contorno utilizada é o engastamento da estrutura tubular na parte estrutural. Essa condição de contorno modela as uniões por coalescência, realizadas entre a estrutura e a chapa de base, através do processo MAG. As duas condições iniciais são o peso próprio, que é gerado expondo a estrutura a aceleração da gravidade, e a força de carregamento que modela a parte de carga e os dois lastros de 25kg.

Durante a análise do chassi do Baja, não se considera a força resultante provocada pela atração gravitacional, pois o objetivo é isolar os esforços de torção. Isso se deve ao fato que em ambiente computacional, é possível expor a estrutura a um ambiente sem gravidade. Porém, como esse teste está modelando um experimento que será construído e que sofrerá os efeitos da gravidade, a estrutura de teste deve ser exposta em modelo computacional, as mesmas condições as quais se espera que será exposta durante o experimento.

#### 4.4 Comportamentos Esperados

Algumas hipóteses são assumidas antes da execução do teste, como forma de criar parâmetros prévios para uma crítica quanto a assertividade dos dados. A primeira hipótese é que o material trabalhe dentro do regime elástico. Assim, espera-se uma deformação linear com a variação da carga, ou um comportamento muito próximo deste.

A segunda, espera-se que os elementos os quais foram dimensionados através do Ansys, alcancem as deformações dentro da banda de medição do relógio comparador, utilizando para isso, valores de cargas que possibilitassem o manuseio por um homem sozinho.

## 4.5 Construção

A construção do equipamento foi realizada pelo aluno com auxílio da Semacald. A construção iniciou-se na etapa de programar o equipamento de corte de chapas plasma. Em seguida, foi iniciado os cortes dos perfis, conforme desenhos técnicos encaminhados. Ao mesmo passo, as chapas que necessitavam de dobras foram conformadas.

Iniciou-se a etapa de montagem. As peças foram unidas por coalescência, utilizando o processo MAG. Devido ao peso, as partes separadas foram unidas por fixadores removíveis, utilizando para isso, parafusos, arruelas e porcas. Em seguida iniciou-se o processo de corte e montagem dos cabos de aço com diâmetro de 1/8", sendo sua fixação feita por presilhas.

Uma vez montado, pesou-se a parte de carga em uma balança aferida, conforme mostrado na Figura 43. Foram então utilizados sacos de granalha de 25kg. A massa desses sacos é aferida no fabricante de granalhas.

Figura 39 – Fabricação - Corte da Viga W



Fonte: O autor.

Figura 40 – Fabricação - Perfis cortados



Fonte: O autor.

Figura 41 – Fabricação - Início da Montagem



Fonte: O autor.

Figura 42 – Fabricação - Montagem



Fonte: O autor.



Figura 43 – Fabricação - Medição da massa da parte de carga



Fonte: O autor.

Figura 44 – Fabricação - Equipamento de testes pronto



Fonte: O autor.

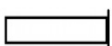
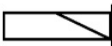
#### 4.6 Resultados do teste experimental

Os resultados obtidos validaram o método numérico. Uma plano de testes é apresentado na Figura 45. Observou-se maiores erros proporcionais nas coletas de dados oriundas de menores cargas, entretanto esses erros são inferiores a 1mm. De modo geral, executando a média aritmética entre todos os erros, obteve-se 10,53%. Já a média aritmética de erro dos modelos booleanos foi de 10,62%, e a dos modelos mesclados de 10,45%.

Fica evidente, analisando os dados que o modelo consegue se aproximar melhor do resultado experimental para deflexões maiores. Essa observação, entretanto, não é satisfeita no modelo experimento B, com modelo booleano.

De modo geral, entende-se que a combinação dos dois métodos de união de corpos de linha, bem como o uso exclusivo de um ou outro, apresentaram resultados satisfatórios na tarefa de calcular numericamente a deformação do corpo com a aplicação de uma carga.

Figura 45 – Plano de testes

Plano de testes									
LEGENDA		[1] = MODELO BOOLEANO			[2] = MODELO BOOLEANO + SPOT WELDS				
MEDIÇÃO A - SEM TRAVAMENTO									
Medição	Massa [kg]	Peso [N]	Coleta 1 Deflexão [mm]	Coleta 2 Deflexão [mm]	Coleta 3 Deflexão [mm]	Coleta 4 Deflexão [mm]	Coleta 5 Deflexão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão
A	8,185	80,29	1,25	1,25	1,24	1,25	1,32	1,26	0,0327
	33,185	325,54	5,15	5,12	5,11	5,11	5,2	5,14	0,0383
	58,185	570,79	8,3	8,41	8,39	8,41	8,39	8,38	0,0458
SEM TRAVAMENTO	Massa [kg]	Peso [N]	Média [mm]	Desv. Pad.	Ansys [1] [mm]	E [1]	Ansys [2] [mm]	E [2]	
	8,185	80,295	1,26	0,0327	1,61	27,50%	1,6519	30,90%	
	33,185	325,545	5,14	0,0383	5,07	1,32%	5,22	1,58%	
	58,185	570,795	8,38	0,0458	8,53	1,79%	8,78	4,77%	
MEDIÇÃO B - COM TRAVAMENTO									
Medição	Massa [kg]	Peso [N]	Coleta 1 Deflexão [mm]	Coleta 2 Deflexão [mm]	Coleta 3 Deflexão [mm]	Coleta 4 Deflexão [mm]	Coleta 5 Deflexão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão
B	8,185	80,29	0,59	0,48	0,51	0,5	0,5	0,516	0,0428
	33,185	325,54	2,06	1,95	1,98	1,97	2,05	2,002	0,0497
	58,185	570,79	3,54	3,41	3,44	3,42	3,51	3,464	0,0577
COM TRAVAMENTO	Massa [kg]	Peso [N]	Média [mm]	Desv. Pad.	Ansys [1] [mm]	E [1]	Ansys [2] [mm]	E [2]	
	8,185	80,295	0,52	0,0428	0,52	1,55%	0,58	13,11%	
	33,185	325,545	2,00	0,0497	1,705	14,84%	1,90	5,14%	
	58,185	570,795	3,46	0,0577	2,89	16,71%	3,22	7,18%	

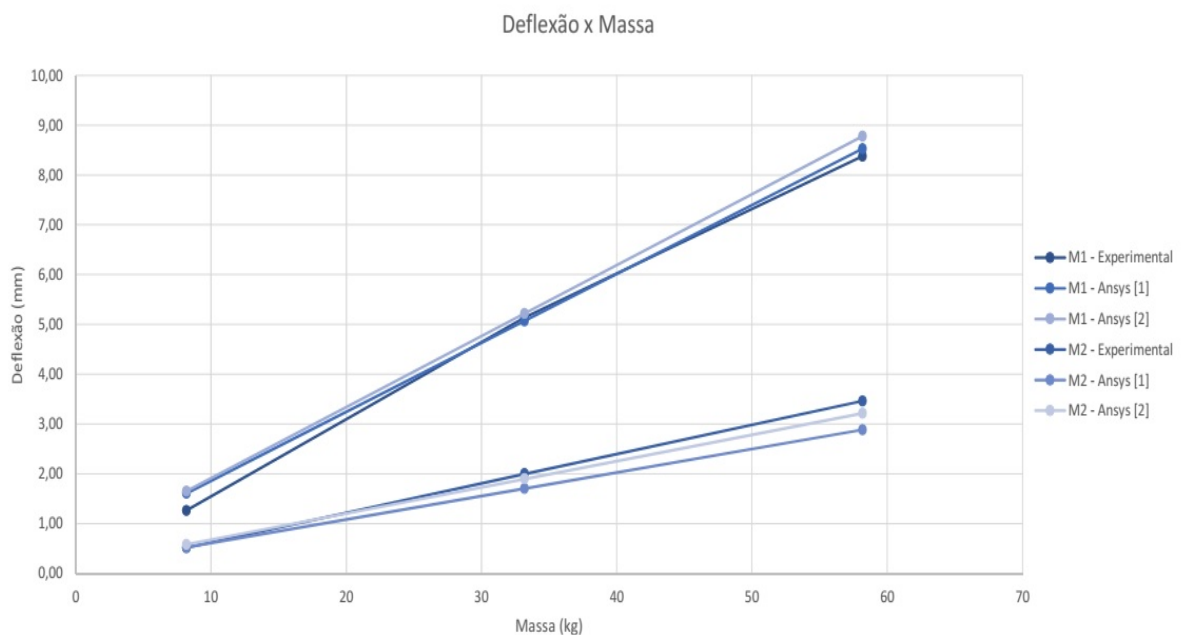
Fonte: O autor. (Programa: Excel)

Pode-se ver na Figura 46, as representações das medições experimentais e oriundas do programa Ansys. As medições "Ansys [1]" fazem menção ao modelo booleano, e as medições "Ansys [2]", referem-se ao modelo misto, com corpos unidos por operações booleanas e ligados entre si por meio de elementos de viga.



É visível que o programa em ambos os tipos de modelo, obteve êxito em apresentar uma resposta muito próxima dos deslocamentos experimentais. Esse erro, por mais que seja pequeno, se deve a fatores construtivos e possivelmente diferenças em propriedades do material. Os tubos comercializados na indústria apresentam em grande maioria, costuras, e são feitos por meio de conformação de chapas de aço. Todo esse processo de conformação e união permanente, cria diversos tipos de tensões residuais no material.

Figura 46 – Gráfico de resultados



Fonte: O autor. (Programa: Excel)

É válido registrar que a medição apresentava leitura quando foi colocada uma luva de couro em cima da treliça, ou quando se alterava o torque de aperto dos parafusos da base, mostrando grande sensibilidade.

#### 4.7 Crítica dos erros obtidos

Para que se possa ter um parâmetro de avaliação sobre os erros associados ao método de análise numérica por elementos finitos realizado neste trabalho, serão utilizados as monografias de ANDRADE (2017) e BARBOSA (2015). Nestes, os erros encontrados foram de 7,31% e 13,5% respectivamente. Assim o erro encontrado nesse estudo, de 10,45% para o modelo mesclado, que será o utilizado para modelar o chassi do BAJA CTJ, está compatível com outros valores de erros apresentados.

#### **4.8 Conclusão acerca do teste experimental**

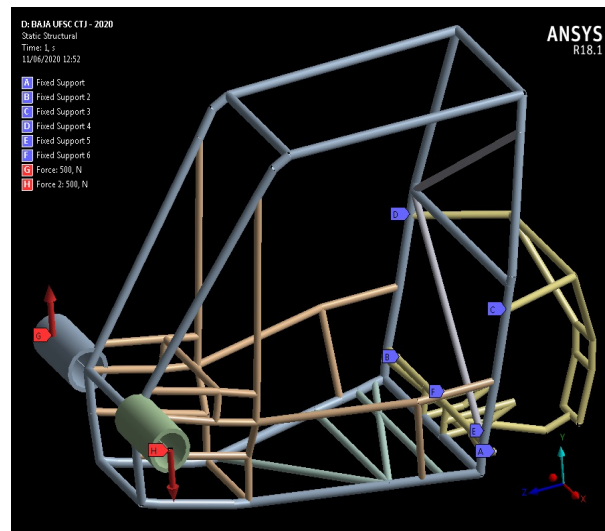
De modo geral, considera-se bem sucedido o processo de projeto, construção e uso do equipamento de testes, com fins de validação de método de análise numérica por elementos finitos. Os desenhos estão no Apêndice A, e tem autorização para serem reproduzidos e fabricados para realização de pesquisa.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Sobre a Configuração Original

Tendo posse da geometria, executando as preparações necessárias, pesquisando e definindo as condições iniciais e de contorno, pode-se então colher os resultados do programa de elementos finitos Ansys. A geometria que foi enviada pela equipe BAJA CTJ, é apresentada na Figura 47, já inserida no programa Ansys.

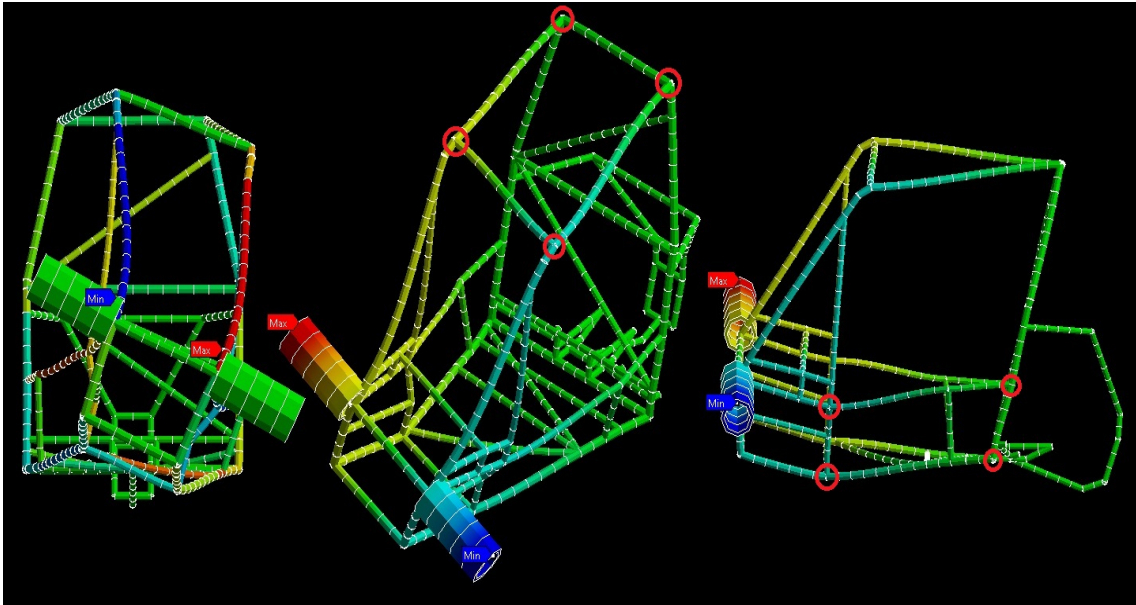
Figura 47 – Chassi original no programa CAE



Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

O processo de análise ocorreu em dois momentos. Um deles foi o de análise empírica, e o segundo, de colher os dados de deslocamentos nodais em função da carga aplicada. O momento empírico, exige do analista uma interpretação interdisciplinar. Executando-se uma simulação como a da Figura 48, pode-se extrair informações acerca do comportamento estrutural. Vê-se que os planos nas regiões acima e ao lado do habitáculo, sofrem efeito de *lozenging*. Uma vez que o torque é aplicado, o plano superior se alonga tendendo a tomar a forma de um losango. O mesmo ocorre nos planos laterais de onde estaria o piloto, porém, nestes planos laterais existe um outro elemento, com pouca influência no aumento de rigidez, mas reduz o comprimento efetivo das barras as quais se conecta, como pode ser visualizado na Figura 59.

Figura 48 – Chassi original - Deformação



Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

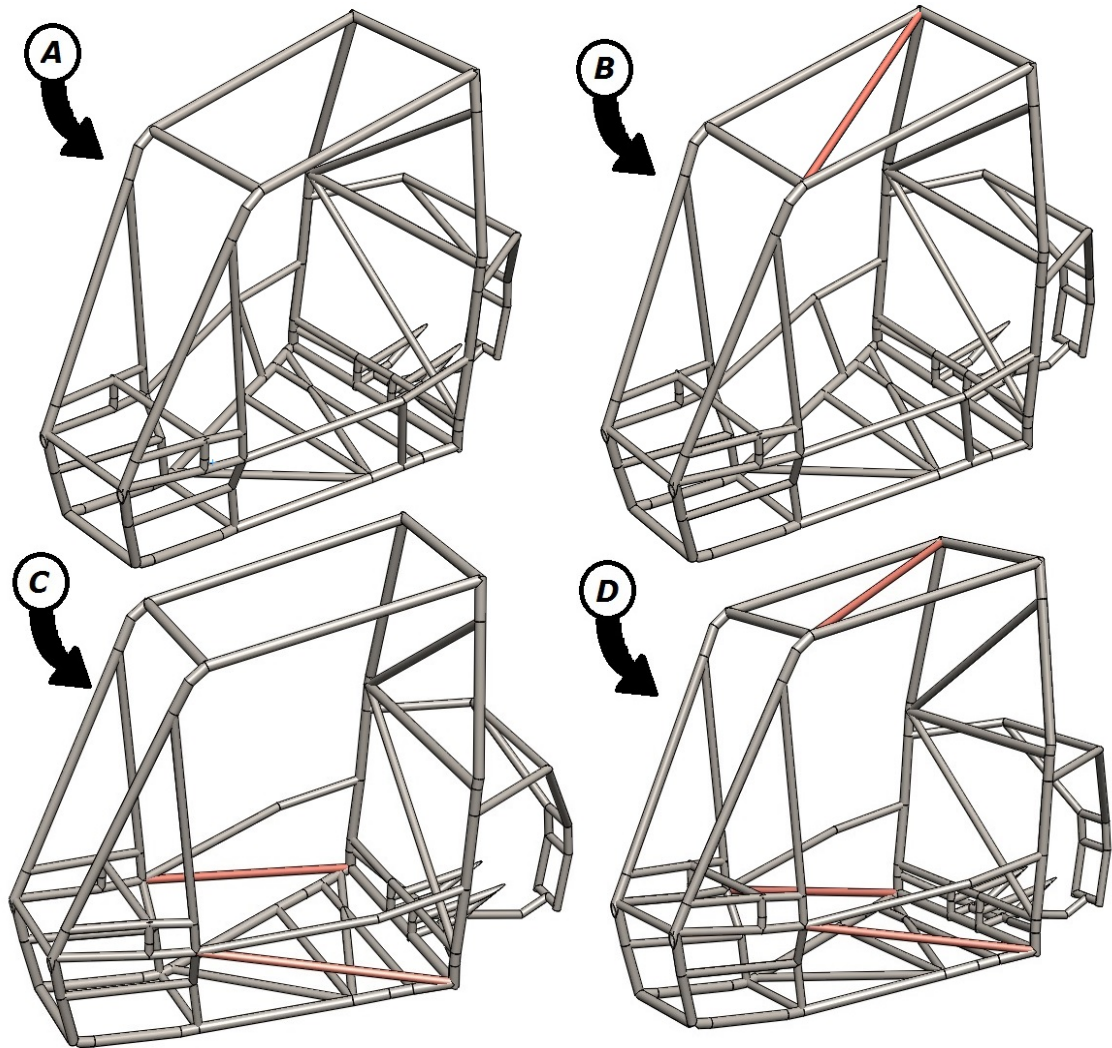
Através dessas observações, é possível se ter um bom direcionamento sobre os locais que mais precisam de atenção, com o objetivo de aumentar a rigidez torcional. Precisa-se, então, com base nessa análise, promover alterações na estrutura de modo que se crie restrições para os movimentos desses nós. Esses nós, são os nós que estão nos "cantos" do plano superior a cabeça do piloto, e os nós dos cantos dos planos laterais, onde estariam as pernas do piloto. Estes estão assinalados em vermelho na Figura 48.

## 5.2 Soluções Propostas e algumas informações relevantes

Com base nisso, foram propostas duas soluções, em formato de alteração de arranjo estrutural, sendo estas aplicáveis combinadas ou separadamente. Com isso, somando as combinações possíveis, temos quatro modelos os quais serão estudados. Os modelos são apresentados na Figura 49. O modelo "A", é o chassi original. O modelo "B", é o chassi apenas com o travamento superior. Já o modelo "C", é caracterizado pelo chassi original, adicionado do travamento inferior. Por último, o modelo "D", é o chassi, adicionado das duas soluções combinadas.

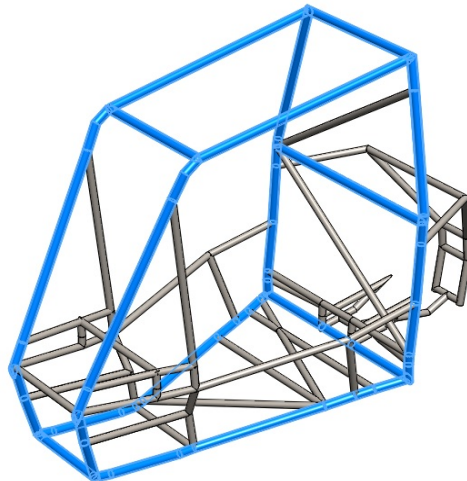
Uma vez definidos os modelos que serão estudados, para que se possa comparar com o chassi original, alguns pontos devem ser levantados. Primeiro, os tubos apresentam seções diferentes em seu todo, porém toda a estrutura é composta do mesmo material, AISI 1020. Uma vez contatada, a equipe informou que em uso estavam dois tipos de seção transversal. São esses:  $\varnothing 31,75\text{mm} \times 2\text{mm}$  e  $\varnothing 25,4\text{mm} \times 1,5\text{mm}$ . Os tubos primários, que podem ser vistos em azul na Figura 50, são de seção  $\varnothing 31,75\text{mm} \times 2\text{mm}$ . Todo o resto utiliza-se do tubo com diâmetro menor.

Figura 49 – Modelos de arranjo propostos



Fonte: O autor. (Programa: SolidWorks)

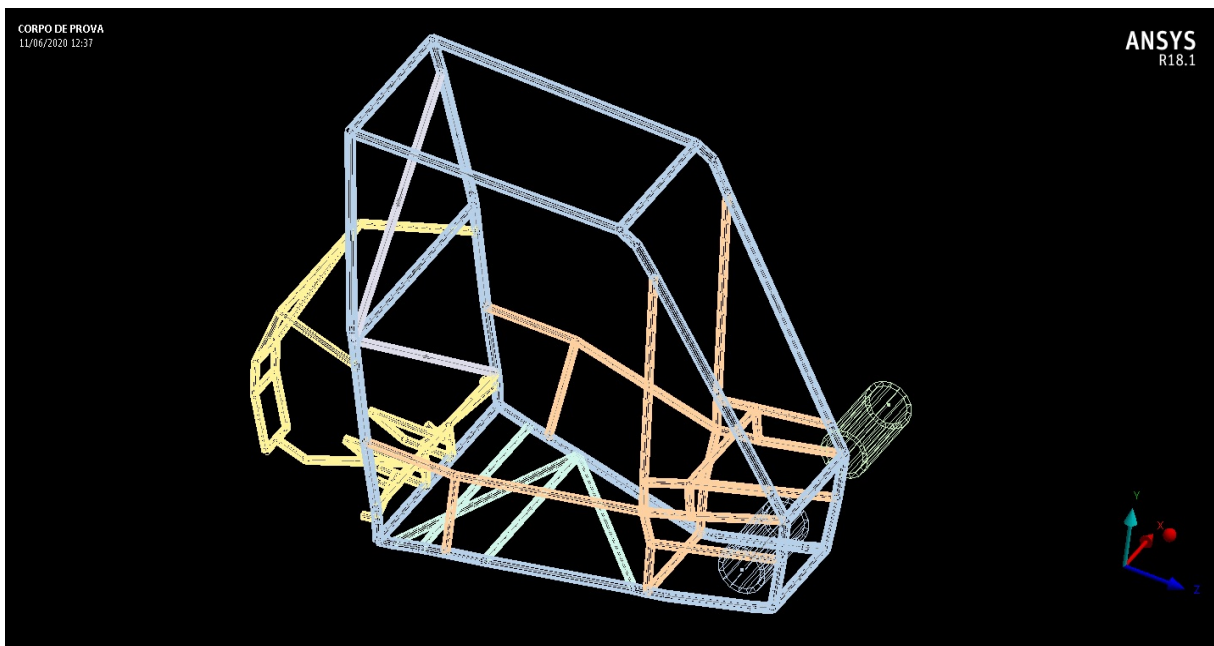
Figura 50 – Tubos primários



Fonte: O autor. (Programa: SolidWorks)

Como comentado anteriormente, quando se realiza a operação booleana, todo o chassi se torna composto da mesma seção transversal. Por exemplo, se temos um chassi composto pelos dois tubos diferentes comentados um pouco acima no texto, quando se aplica a operação, um desses é "cancelado", e todo o chassi se torna feito de apenas um tipo de tubo. Portanto, o que foi feito para contornar esse obstáculo, foi criar grupos de tubos que são de mesma seção, através da operação booleana, como pode ser visto na Figura 51. Cada cor nessa ilustração apresenta um desses grupos. Se fossem aplicadas todas as condições de contorno e iniciais, e enviássemos a ordem de execução dos cálculos para o algoritmo, o modelo apresentaria erro, afinal as partes estão livres e sem restrições de movimento, e o modelo não satisfaz a hipótese estática entre elementos. Então, através do recurso "spot welds", cria-se elementos de viga que ligam estes corpos. Esse processo de preparo de geometria, no Ansys, acontece no módulo DesignModeler, já o processo de unir nós pelos "spot welds", ocorre no módulo Ansys Mechanical.

Figura 51 – Corpos formados por operação booleana e unidos por elementos de viga



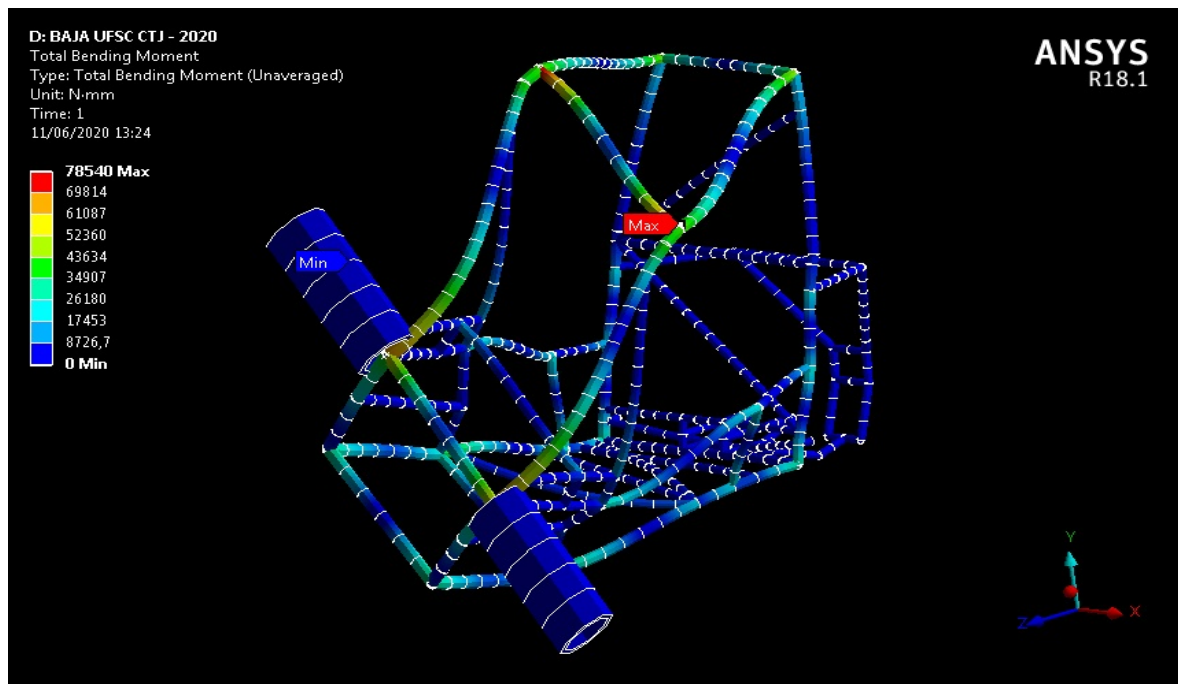
Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

Observa-se nas imagens também que os elementos prolongadores apresentam uma seção transversal muito maior do que a dos tubos do chassi. Isso foi feito para que uma vez aplicada a carga, não houvesse deflexão nas mesmas, do mesmo modo que espera-se ocorrer na Figura 29. Os efeitos colaterais que o analista deve estar ciente, sobre a utilização desses elementos prolongadores, é da indução de momento fletor nas conexões entre os elementos prolongadores e o chassi. Entretanto por observação, constatou-se que a rigidez torcional do chassi é muito menor do que o necessário para gerar uma deformação nas conexões entre os elementos prolongadores e o



chassi, como pode ser visto na imagem abaixo, sendo a deformação escalada em 235x.

Figura 52 – Elementos prolongadores e seus efeitos nas conexões com o chassi



Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

### 5.3 Sobre os dados obtidos e seu tratamento

Os dados foram colhidos do Ansys e tratados no excel. Como é possível se ver na Figura 53, temos as medições A, B, C e D. Em cada uma delas, na base de seus títulos, tem-se a referência de qual modelo estas representam. Por exemplo, em baixo do título "A", vê-se que faz referência ao chassi original.

Inseriu-se no Ansys os momentos de binário, que podem ser vistos nas colunas "Torque". Em seguida, como descrito na seção método, o Ansys retornou os dados de deflexão máxima e mínima, que estão chamados na Figura 53 como "Deflexão A" e "Deflexão B", também em colunas. A partir desses dados de deflexão foram tomadas médias simples. Para uma melhor visualização, ver a Figura 35.

Como já foi visto, a deflexão média ( $\beta$ ) que está associada a uma torção de um grau, é  $8,73[mm]$ . Logo, ao vermos a coluna "Média", na medição "A", percebemos que esse valor está entre  $1500[Nm]$  e  $1750[Nm]$ . Por hora espera-se que a coluna "Média" varie linearmente com a coluna "Torque", devido ao regime elástico no qual o aço estaria em trabalho. Isso pode ser visualizado na Figura 55. Como se sabe que o valor o qual está sendo buscado está entre  $1500[Nm]$  e  $1750[Nm]$ , insere-se no Ansys, valores binários novamente, mas agora com passos menores entre sí. Os dados dessa segunda etapa, chamada de "Refino", estão do lado direito.

Figura 53 – Resultados obtidos de rigidez torcional para diferentes arranjos

Plano de testes										
BETA 1°	8,73mm				LEGENDA		[1] - Original	[2] - Trav. Superior		
Medição	Torque [Nm]	Deflexão A [mm]	Deflexão B [mm]	Média [mm]	Medição	Torque [Nm]	Deflexão A [mm]	Deflexão B [mm]	Média [mm]	
A	500	2,593	2,592	2,59	A	1500	7,780	7,777	7,78	
	750	3,890	3,889	3,89		1525	7,910	7,907	7,91	
	1000	5,187	5,185	5,19		1550	8,040	8,036	8,04	
	1250	6,484	6,481	6,48		1575	8,169	8,166	8,17	
	1500	7,780	7,777	7,78		1600	8,299	8,296	8,30	
	1750	9,077	9,073	9,08		1625	8,429	8,425	8,43	
	2000	10,374	10,370	10,37		1650	8,558	8,555	8,56	
	2250	11,670	11,666	11,67		1675	8,688	8,685	8,69	
	2500	12,967	12,962	12,96		1700	8,818	8,814	8,82	
	2750	14,264	14,258	14,26		1725	8,947	8,944	8,95	
	3000	15,560	15,554	15,56		1750	9,077	9,073	9,08	
	3250	16,857	16,851	16,85		TANGENTE		0,0052		
	3500	18,154	18,147	18,15		INTERPOLAÇÃO		1682,544053	Nm/°	
	4000	20,747	20,739	20,74						
ORIGINAL					ORIGINAL					
B	500	2,084	2,109	2,10	B	2000	8,437	8,338	8,39	
	750	3,127	3,164	3,15		2025	8,543	8,442	8,49	
	1000	4,169	4,219	4,19		2050	8,648	8,546	8,60	
	1250	5,211	5,273	5,24		2075	8,754	8,651	8,70	
	1500	6,253	6,328	6,29		2100	8,859	8,755	8,81	
	1750	7,296	7,383	7,34		2125	8,964	8,859	8,91	
	2000	8,338	8,437	8,39		2150	9,070	8,963	9,02	
	2250	9,380	9,492	9,44		2175	9,175	9,067	9,12	
	2500	10,422	10,546	10,48		2200	9,281	9,172	9,23	
	2750	11,465	11,601	11,53		2225	9,386	9,276	9,33	
	3000	12,507	12,656	12,58		2250	9,492	9,380	9,44	
	3250	13,549	13,710	13,63		TANGENTE		0,0042		
	3500	14,591	14,765	14,68		INTERPOLAÇÃO		2080,773305	Nm/°	
	4000	16,676	16,874	16,78						
TRAVAMENTO SUPERIOR					TRAVAMENTO SUPERIOR					
C	500	1,639	1,558	1,60	C	2500	8,194	7,790	7,99	
	750	2,458	2,337	2,40		2525	8,276	7,868	8,07	
	1000	3,277	3,116	3,20		2550	8,358	7,945	8,15	
	1250	4,097	3,895	4,00		2575	8,440	8,023	8,23	
	1500	4,916	4,674	4,80		2600	8,521	8,101	8,31	
	1750	5,736	5,453	5,59		2625	8,603	8,179	8,39	
	2000	6,555	6,232	6,39		2650	8,685	8,257	8,47	
	2250	7,374	7,011	7,19		2675	8,767	8,335	8,55	
	2500	8,194	7,790	7,99		2700	8,849	8,413	8,63	
	2750	9,013	8,569	8,79		2725	8,931	8,491	8,71	
	3000	9,832	9,348	9,59		2750	9,013	8,569	8,79	
	3250	10,652	10,127	10,39		TANGENTE		0,0032		
	3500	11,471	10,906	11,19		INTERPOLAÇÃO		2731,228669	Nm/°	
	4000	13,110	12,464	12,79						
TRAVAMENTO INFERIOR					TRAVAMENTO INFERIOR					
D	500	1,312	1,253	1,28	D	3250	8,525	8,143	8,33	
	750	1,967	1,879	1,92		3275	8,591	8,206	8,40	
	1000	2,623	2,506	2,56		3300	8,656	8,268	8,46	
	1250	3,279	3,132	3,21		3325	8,722	8,331	8,53	
	1500	3,935	3,758	3,85		3350	8,787	8,394	8,59	
	1750	4,590	4,385	4,49		3375	8,853	8,456	8,65	
	2000	5,246	5,011	5,13		3400	8,919	8,519	8,72	
	2250	5,902	5,638	5,77		3425	8,984	8,582	8,78	
	2500	6,558	6,264	6,41		3450	9,050	8,644	8,85	
	2750	7,214	6,890	7,05		3475	9,115	8,707	8,91	
	3000	7,869	7,517	7,69		3500	9,181	8,769	8,98	
	3250	8,525	8,143	8,33		TANGENTE		0,0026		
	3500	9,181	8,769	8,98		INTERPOLAÇÃO		3402,561247	Nm/°	
	4000	10,492	10,022	10,26						
TRAVAMENTO SUPERIOR + INFERIOR					TRAVAMENTO SUPERIOR + INFERIOR					

Fonte: O autor. (Programa: Excel)

Uma vez com todos os dados, teria-se duas opções para enfim encontrar o valor de torque necessário para impor uma torção de um grau. São elas: gerar diversas etapas de refino, por iterações, até se aproximar do valor, como foi feito do lado esquerdo ao direito de cada medição; ou provar que os dados tem comportamento linear e fazer



uma interpolação simples. É mais ágil realizar uma interpolação, logicamente. Então, para provar a linearidade, calcula-se as tangentes do lado esquerdo e do lado direito de cada medição. Por exemplo, no lado esquerdo na medição "A", calculamos a tangente da linha que relaciona as colunas "Torque" e "Média".

$$tg(\alpha) = \frac{20,24 - 2,59}{4000 - 500} = 0,005$$

Executando a mesma lógica para o lado direito, na etapa de refino, podemos comparar com a etapa anterior e provarmos que os deslocamentos são lineares. Temos portanto:

$$tg(\alpha) = \frac{9,08 - 7,78}{1750 - 1500} = 0,005$$

Agora, fazendo a interpolação, para que se encontre o valor de torque que produza uma deflexão média de 8,73 [mm], temos:

$$K_t(A) = \frac{8,73 \cdot 1750}{9,08} = 1682,54 [Nm/^\circ]$$

Executa-se a mesma lógica para todas as medições seguintes. Onde encontra-se os seguintes valores para cada modelo proposto:

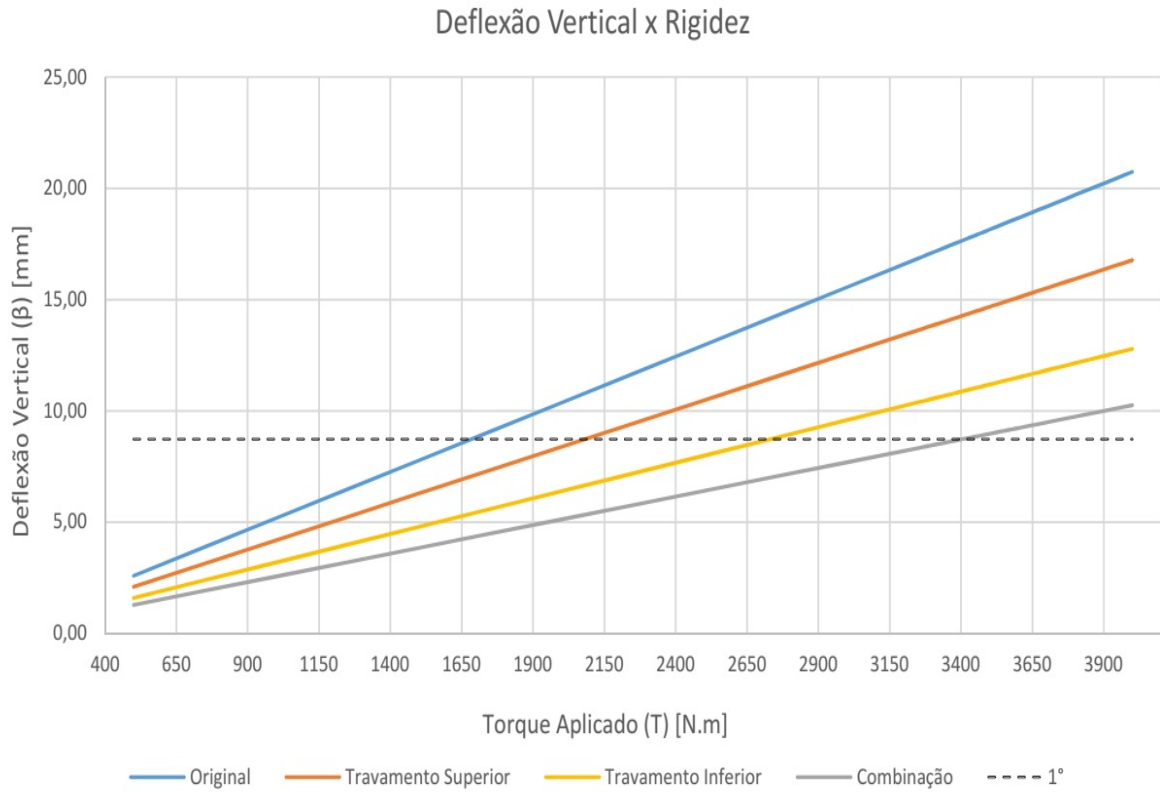
- Chassi original:  $K_t(A) = 1682,5 [Nm/^\circ]$
- Chassi com travamento superior:  $K_t(B) = 2080,77 [Nm/^\circ]$
- Chassi com travamento inferior:  $K_t(C) = 2731,23 [Nm/^\circ]$
- Chassi com travamento superior e inferior:  $K_t(D) = 3402,56 [Nm/^\circ]$

Na Figura 54, vemos um gráfico de linhas mostrando a deflexão vertical média ( $\beta$ ), em função do torque aplicado. Nota-se que as inclinações das retas tangentes diminuem conforme o aumento da rigidez torcional. A linha pontilhada marca a linha de 1° de torção. Logo, quanto mais cedo no eixo X as retas plotadas interceptarem a linha pontilhada, menor a rigidez torcional.

É possível extrair destes resultados, que em uma eventualidade, fosse necessário implementar apenas um dos travamentos propostos, seria de maior benefício em termos de rigidez construir os travamentos inferiores.

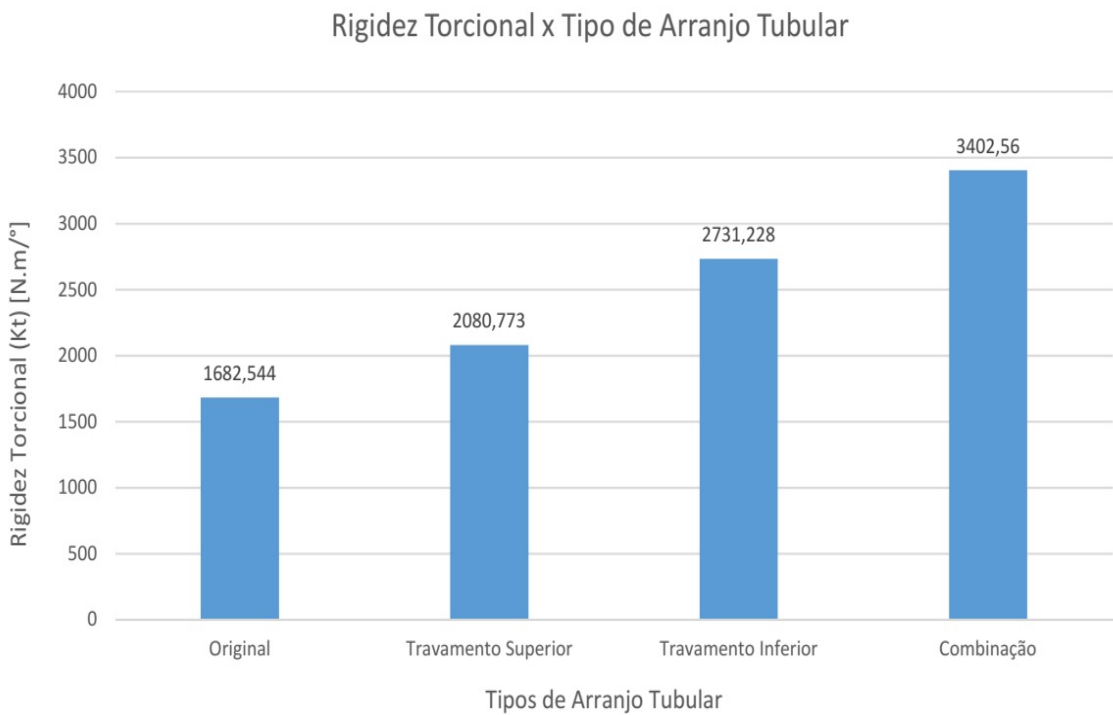
Pode-se ver na Figura 55, uma representação em escala. Observou-se os aumentos percentuais conforme a Figura 56. O aumento percentual de 23,67% no travamento superior não deve ser considerado pequeno quando ao ganho percentual de 62,33% do travamento inferior. Isso porquê no travamento inferior, dois planos são travados ao invés de um, no travamento superior. Então se fosse dividido o aumento por plano, teríamos 31,165% de aumento para cada plano no travamento inferior.

Figura 54 – Resultados obtidos de rigidez torcional para diferentes arranjos (Linhas)



Fonte: O autor. (Programa: Excel)

Figura 55 – Resultados obtidos de rigidez torcional para diferentes arranjos (Barras)



Fonte: O autor. (Programa: Excel)

Figura 56 – Ganho percentual de rigidez torcional e massa para diferentes arranjos

Incrementos		
Tipo	Rigidez	Massa
Travamento Superior	+23,67%	+1%
Travamento Inferior	+62,33%	+1,56%
Combinação	+102,23%	+2,51%

Fonte: O autor. (Programa: Excel)

Na Figura 56 nota-se os aumentos percentuais de massa em relação ao modelo original, como consequência das alterações propostas no arranjo. O peso do chassi original é de 35kg. O autor, em uma primeira observação dos dados de massa apresentados pelo SolidWorks, considerou pequena a massa apresentada, entretanto, uma vez as espessuras das paredes alteradas para 3mm como era utilizado por costume alguns anos atrás no projeto BAJA, o peso subiu para 62kg. Isso mostra que, a equipe por sua vez, nos últimos semestres de desenvolvimento, reduziu o peso substancialmente da estrutura, quando comparados aos anos anteriores. Assim, os ganhos percentuais em rigidez são muito grandes quando comparados com os ganhos percentuais consequentes em massa.

#### 5.4 Crítica de dados

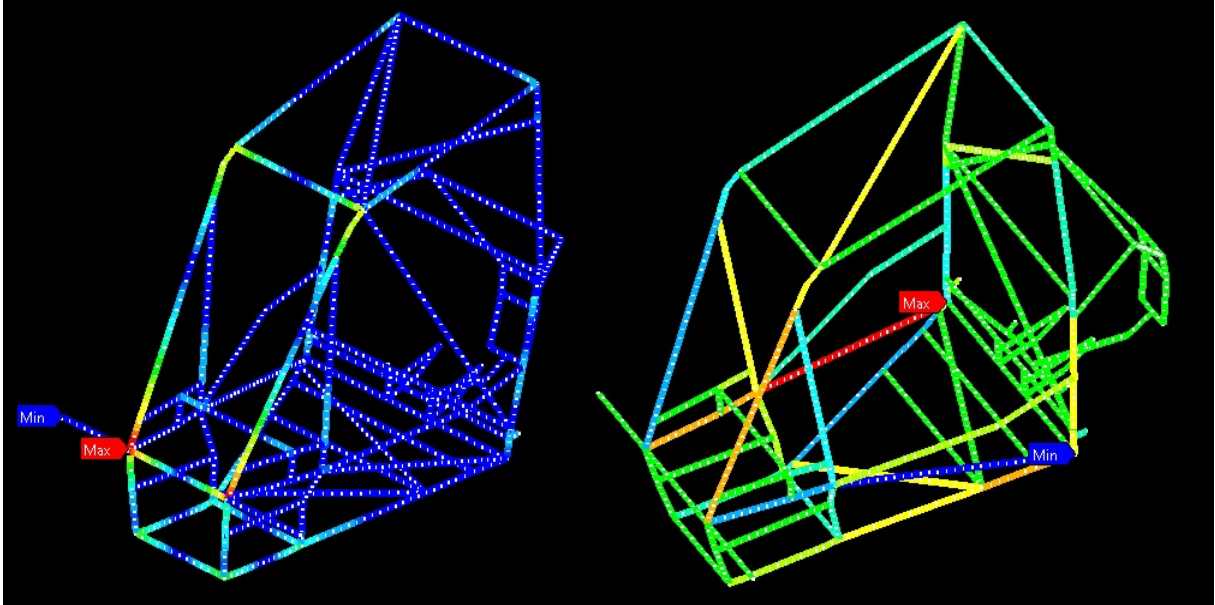
Com o objetivo de garantir a assertividade dos resultados, foi realizada uma crítica. É possível verificar a distribuição de momentos fletores ao longo dos elementos, além de verificar quais estão sob compressão e tração. Na Figura 57, observa-se um pico de momento fletor atuando logo nas juntas do elemento prolongador, o que era esperado. Mesmo se as cargas fossem aplicadas em outro ponto, haveria esforços similares nas regiões de contato. O mesmo é válido para os elementos em tração e compressão. Vemos que os travamentos inferiores atuam de maneiras opostas em lados opostos. Um está atuando sobre tração e o outro, em compressão. Observa-se também que a solicitação trativa no travamento superior é menor do que a solicitação trativa no travamento inferior sob tração. Todas essas observações corroboram os dados de incremento percentual de rigidez, onde identifica-se que a influência dos travamentos inferiores (31,165%), é maior do que a influência do travamento superior (23,67%).

#### 5.5 Influência de membros adicionados ao chassi

Na Figura 58, é perceptível o modo como o plano superior ao piloto tende a formar um losango, sendo também evidente como este efeito é reduzido ao adicionarmos o travamento superior, restringindo os deslocamentos nodais. Note o modo que na parte "B" da Figura 58, o nó do plano do corta-fogo é puxado para

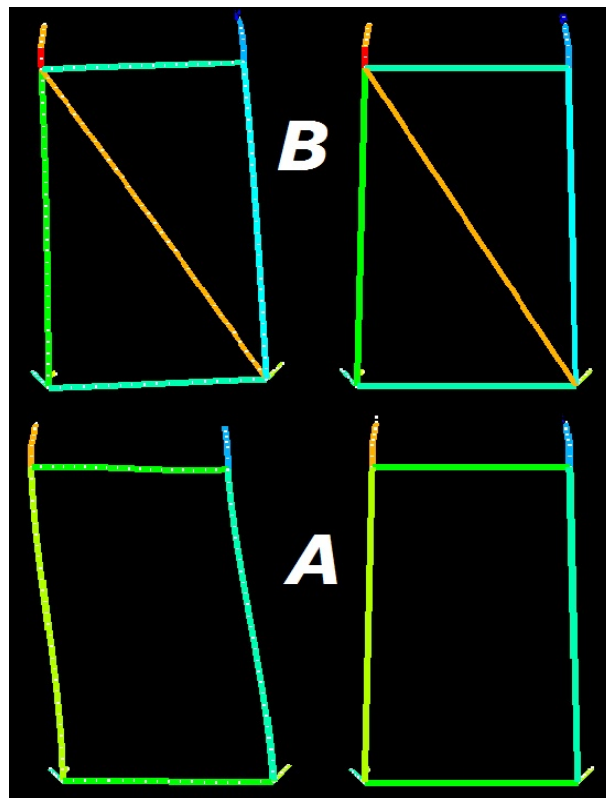
frente pelo travamento superior. Em trabalhos futuros, um ótimo tópico cabível de ser estudado seria como o arranjo tubular da região do motor influencia na rigidez torcional do chassi.

Figura 57 – Momentos fletores e forças normais nos elementos



Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

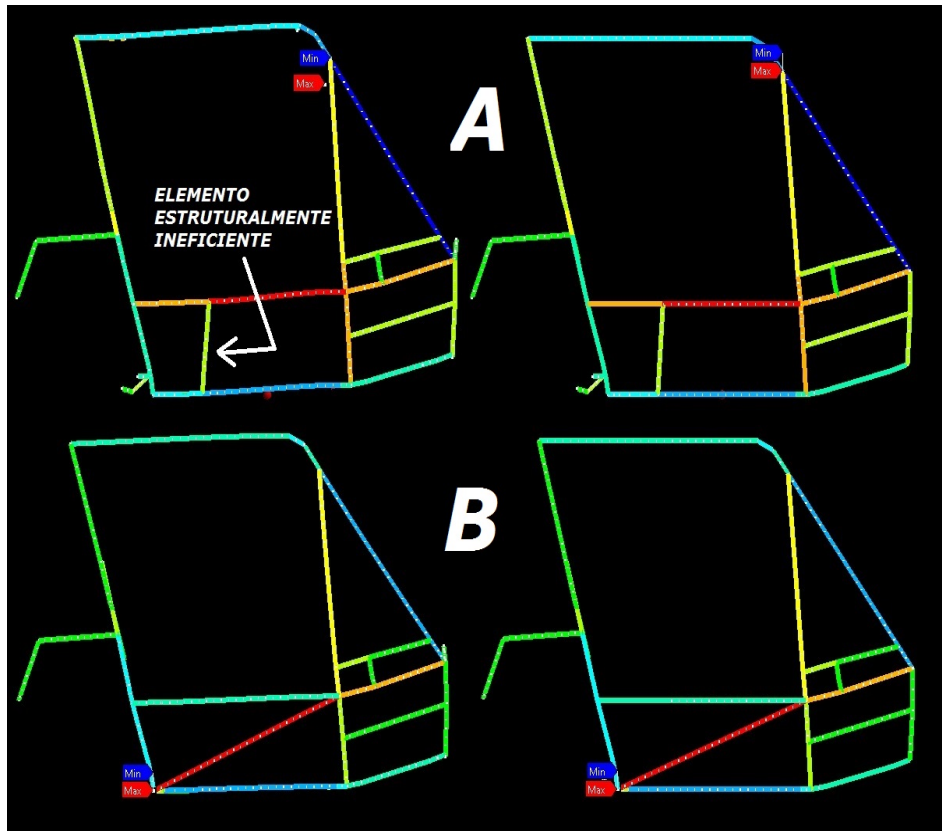
Figura 58 – Influência do membro adicionado no plano superior



Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

Um efeito similar percebe-se na Figura 59, nos travamentos inferiores. Note que na parte "A" da mesma ilustração, tem-se uma deformação devido a um travamento com pouca eficácia. Executando a alteração, os membros trabalham sob compressão/tração, com menos momento fletor. Essas considerações são visualizadas na parte "B".

Figura 59 – Influência dos membros adicionados nos planos laterais inferiores

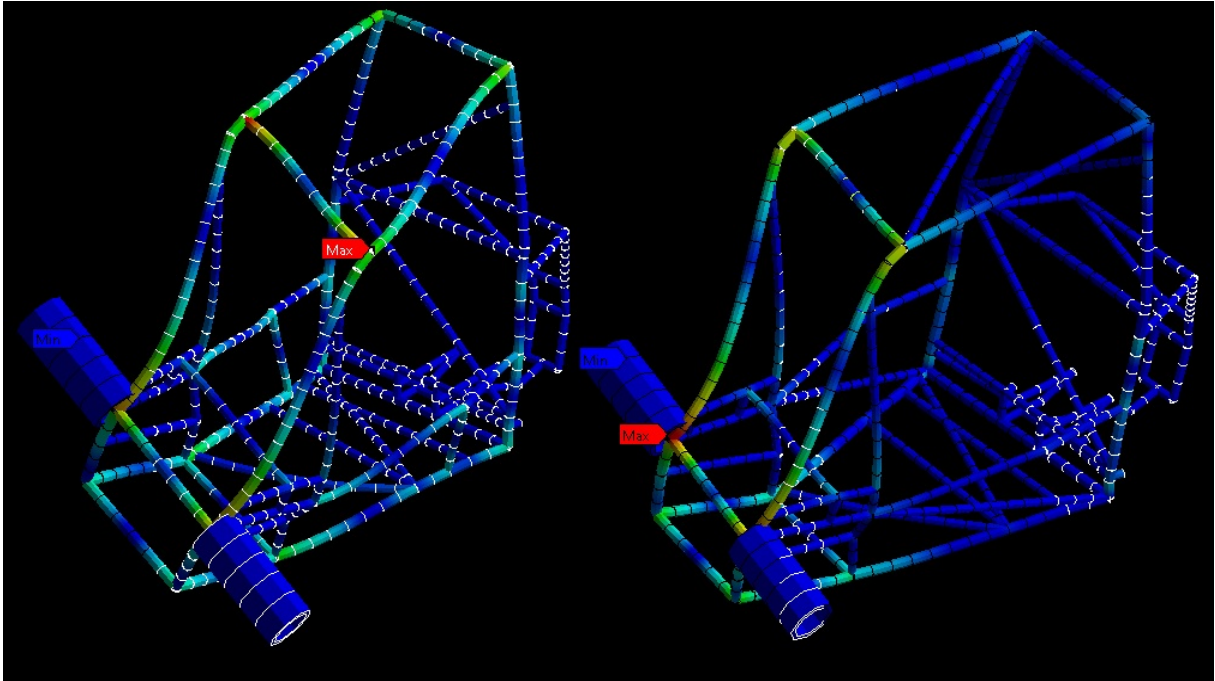


Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

Essa redução de momento fletor é melhor visualizada na Figura 60. Observa-se que toda a região no entorno no piloto, teve redução da magnitude de momento fletor. Isso é consequência da triangulação que obriga os membros a trabalharem compressivamente/trativamente. Na parte mais frontal do veículo tem-se ainda momento fletor devido aos elementos prolongadores e outros elementos que não são conectados à nós. A escala de deformação está configurada em 150x.

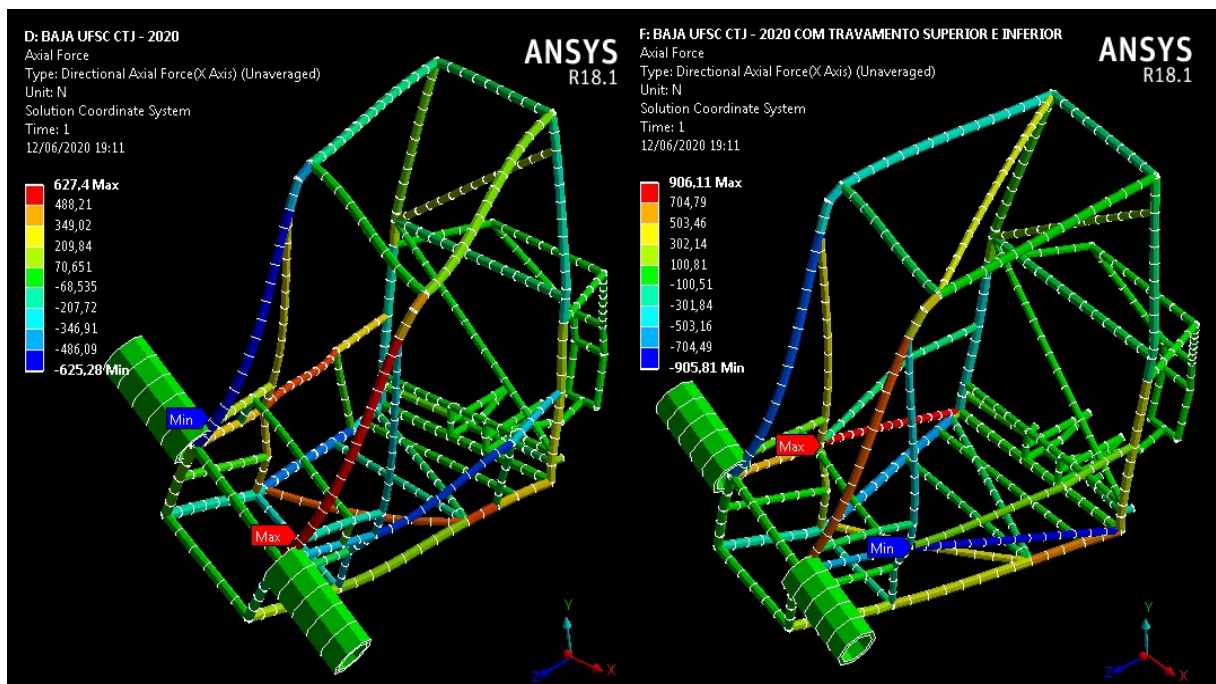
Vê-se que alguns membros do plano inferior ao piloto não são muito solicitados estruturalmente como por ser visto nas Figura 60 e Figura 61. Seria de ganho para a equipe, em trabalhos futuros, executar também uma análise sobre a eficiência do arranjo deste plano.

Figura 60 – Diminuição de Momento Fletor na Estrutura



Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

Figura 61 – Aumento de Esforços Normais na Estrutura



Fonte: O autor. (Programa: Ansys)

Na Figura 61, nota-se o aumento de cerca de 50% na força normal máxima, sendo essa, maior nos membros de travamento propostos, na parte inferior do chassi. Observa-se tanto na Figura 60 quanto na Figura 61, um estado mais avançado de flambagem nos elementos longos que ligam a frente do chassi ao seu plano superior, bem como o aumento da força normal nestes após os travamentos serem executados.



## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho, apresentou um estudo sobre a rigidez torcional do chassi utilizado pela equipe BAJA UFSC CTJ. Para este fim, foi definido e utilizado um método, sendo este validado experimentalmente. A ferramenta de estudo, foi a teoria dos elementos finitos.

O método de análise que foi validado, diz respeito ao modelo numérico de elementos finitos, aplicado a um material considerado isotrópico, neste caso o aço, englobando seções transversais diferentes. Neste método, corpos diferentes foram conectados, através de operações *booleanas* e com a adição de elementos de viga conectores, os chamados "*spot welds*". Para efetuar a validação, foi construído um equipamento de testes, com uma geometria que facilita-se sua construção, e a mesma foi modelada numericamente. O método descrito acima, atende a demanda para análise estrutural do BAJA, em termos de rigidez torcional, e foi utilizado para tal.

Ao comparar-se os dados numéricos com os dados experimentais do equipamento de testes, constatou-se que o método empregado descreveu o comportamento físico da estrutura sob carregamento, durante o experimento. O erro geral do método, com as uniões feitas por meio de operações *booleanas* e *spot welds*, foi de 10,45%. Esse erro associado, foi comparado a valores de erros apresentados em outros trabalhos, e está dentro dos valores usuais para as aproximações feitas com o método dos elementos finitos.

Analisou-se então, o chassi do BAJA UFSC CTJ, empregando o método validado. Identificou-se os pontos críticos no chassi, os quais mais contribuía para a baixa rigidez. Foram propostas duas soluções de alteração do arranjo estrutural, que poderiam ser aplicadas separadamente na estrutura, ou em conjunto. Ambas as soluções consistem em adicionar um membro de travamento na estrutura, a primeira, no plano acima do chassi, e a segunda, nos planos laterais as pernas do piloto. Tais ações aumentaram a triangulação do arranjo, aumentando os esforços axiais, e reduzindo a propagação de momento fletor ao longo do chassi. Os valores encontrados das rigidezes para os modelos estudados, são apresentados abaixo:

- Chassi original:  $K_t(A) = 1682,5 [Nm/^\circ]$
- Chassi com travamento superior:  $K_t(B) = 2080,77 [Nm/^\circ]$
- Chassi com travamento inferior:  $K_t(C) = 2731,23 [Nm/^\circ]$
- Chassi com travamento superior e inferior:  $K_t(D) = 3402,56 [Nm/^\circ]$

Para cada uma destas propostas, os incrementos percentuais de rigidez torcional e de massa são apresentados na Figura 62:

Figura 62 – Ganho percentual de rigidez torcional e massa para diferentes arranjos

Incrementos		
Tipo	Rigidez	Massa
Travamento Superior	+23,67%	+1%
Travamento Inferior	+62,33%	+1,56%
Combinação	+102,23%	+2,51%

Fonte: O autor. (Programa: Excel)

Conclui-se por meio dos dados acima apresentados, obtidos com método validado experimentalmente, que foi possível modelar numericamente o chassi do BAJA CTJ. Entende-se que uma vez aplicadas as alterações propostas, serão obtidos valores de rigidez estrutural consideravelmente maiores, a despeito do pequeno incremento de massa. Compreende-se que dentre os muitos modos de condições de contorno e iniciais, é possível que este seja usado como referência, ou aprimorado por trabalhos futuros.



## 7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, um estudo sobre como diferentes seções transversais afetam a massa e a rigidez do chassi. Há a possibilidade para variar determinadas seções, pois nem todos os elementos entram em modo de flambagem, ou atingem tensões que causem escoamento. Deve-se encontrar o mínimo possível em termos de seções transversais que restrinjam os movimentos nodais, adicionando o mínimo possível de massa.

Uma outra possibilidade é estudar como que o arranjo tubular traseiro afeta a rigidez torcional. Por mais que os suportes de suspensão estejam logo atrás do plano do corta-fogo, o travamento superior expõe os nós mais altos do corta-fogo à esforços. Existem travamentos em "X" que conectam-se a parte superior do plano do corta-fogo.

É viável também a execução de um trabalho que adicione a gravidade ao modelo, ao passo que se crie um dispositivo para experimentar a rigidez torcional do chassi.

Como última sugestão, um estudo sobre o melhor arranjo para o plano inferior ao piloto. Existem elementos nesta região que não estão tendo grande contribuição estrutural.

## REFERÊNCIAS

- DE ANDRADE, G. A. M. **Análise Estrutural - BAJA PAMPA**. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica), 2017.
- BARBOSA, L. F. F. M. **Avaliação da Rigidez Torcional do Chassi de um Protótipo Baja SAE Através do Método de Elementos Finitos e de Ensaio Experimental**. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica), 2015.
- BARRETT, R. **Dan Gurney Drives the Monster in Which Henry Ford set a World's Speed Record**. 1963. Disponível em: <<http://allamericanracers.com/1902-ford-999-dan-gurney/>>.
- COOK, R. **Concepts and applications of finite element analysis**. New York, NY: Wiley, 2001. ISBN 0471356050.
- COSTIN, M.; PHIPPS, D. **Racing and Sports Car: Chassis Design**. [S.l.]: B. T. BATSFORD LTD, 1965. v. 2.
- DAS, A. **FSAE Vehicle**. 2015. Disponível em: <<https://abhijeetscad.wordpress.com/2015/01/03/fsae-car/>>.
- FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. Sao Paulo: Editora Erica, 2008. ISBN 978-8571947412.
- GENTA, G. **The Automotive Chassis Vol 1**. Dordrecht: Springer, 2009. ISBN 978-1-4020-8674-8.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. [S.l.]: SAE International, 1992. ISBN 1560911999.
- HIBBELER, R. C. **Mechanics of Materials (10th Edition)**. [S.l.]: Pearson, 2016. ISBN 0134319656.
- HUCHO, W.-H. **Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 9781483102078.
- NORTON, R. **Machine design : an integrated approach**. Boston: Prentice Hall, 2011. ISBN 9780136123705.
- PALDE, K. Design improvement and analysis of car chassis for static and dynamic characteristics. **International Research Journal of Engineering and Technology**, p. 238–244, 2015.
- RILEY, W. B.; GEORGE, A. R. **Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis**. [S.l.]: SAE International, 2002. v. 1.

RODRIGUES PONCIO, C. G. P. O. Static and dynamic analysis of a chassis of a prototype car. **SAE TECHNICAL PAPER SERIES**, 2015.

SEVENS, S. **Ford 999**. 2018. Disponível em: <<http://www.simplesevens.org/0005/0005.htm>>.

SEWARD, D. **Race Car Design**. [S.l.]: Red Globe Press, 2015. ISBN 1137030143.

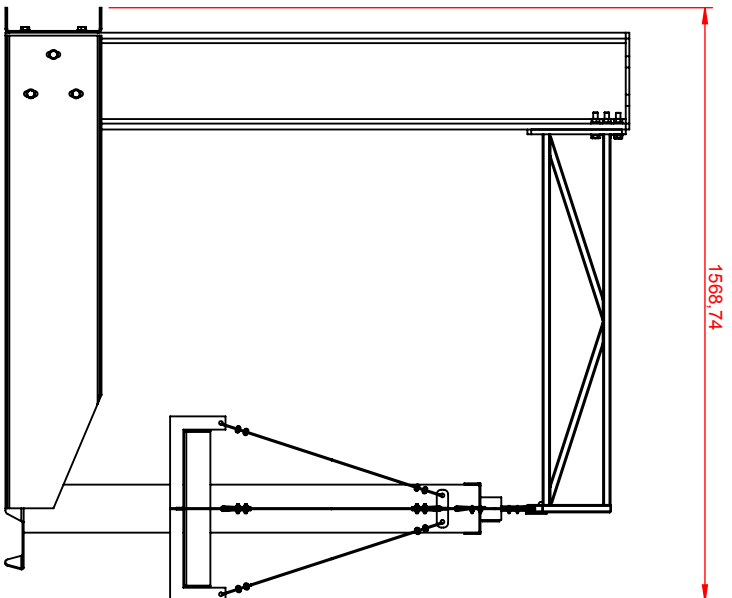
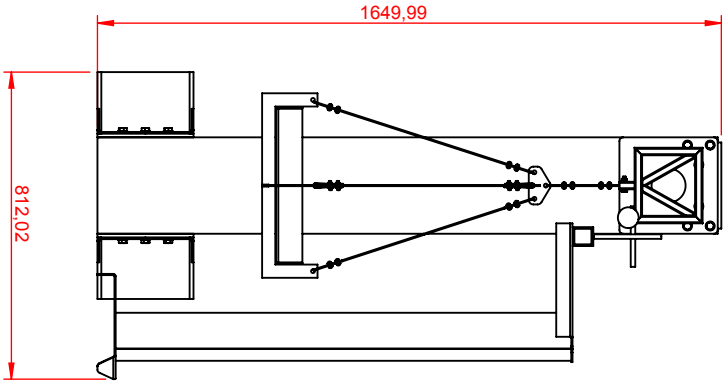
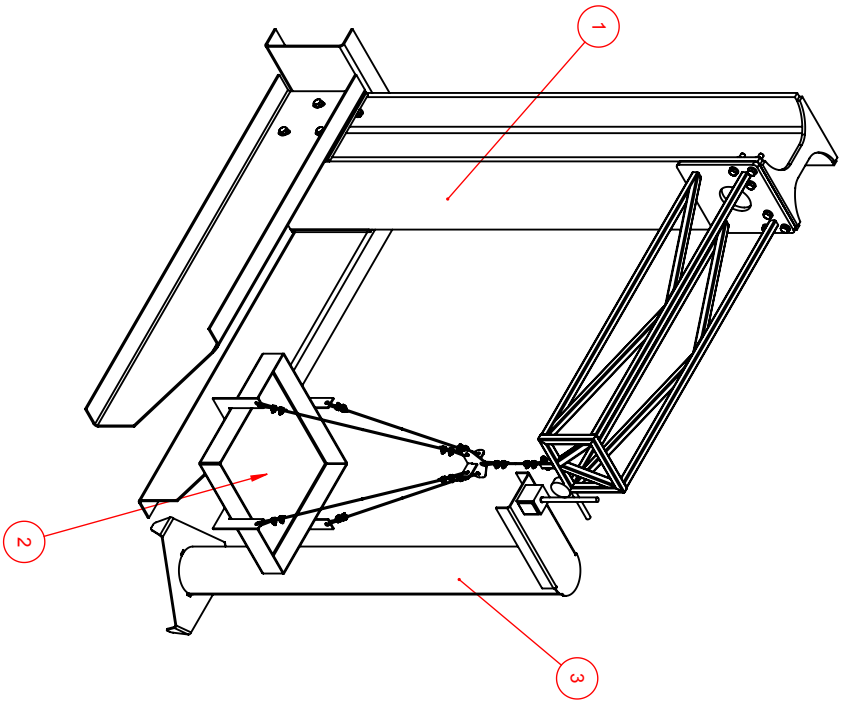
WIKIPEDIA. **Ford 999**. 2018. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Ford\\_999](https://en.wikipedia.org/wiki/Ford_999)>.

WWW.CARFAX.COM. **Ladder Frame Chassis**. 2018. Disponível em: <<https://www.carfax.com/blog/unibody-vs-body-on-frame-construction>>.

## APÊNDICE A

Neste apêndice são apresentados os desenhos técnicos de fabricação do equipamento de testes. Os desenhos foram desenvolvidos no Programa SolidWorks, sendo que as seguintes normas foram utilizadas como referência:

- NBR10067 - Princípios Gerais de Representação em Desenho Técnico
- NBR10126 - Cotação de Desenho Técnico
- NBR10068 - Folha de Desenho - Leiaute e dimensões
- NBR8403 - Aplicação de Linhas em Desenhos - Tipos de Linhas - Larguras das Linhas
- NBR8402 - Execução de Caractere para Escrita em Desenho Técnico

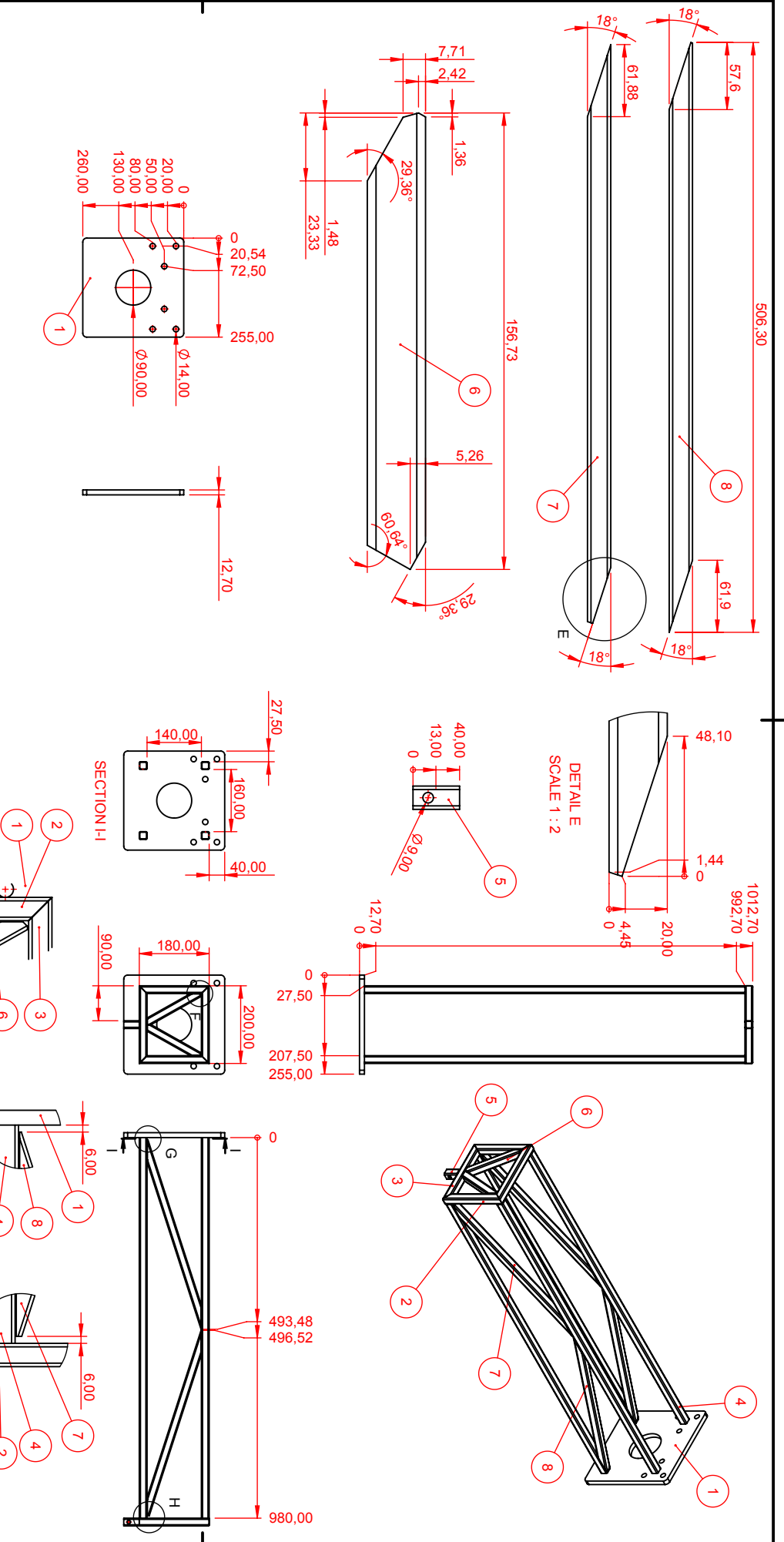


Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD
1	TCC 0001-001 = ESTRUTURA	Montagem da parte estrutural	1
2	TCC 0001-002 = CARGA	Montagem da parte de carregamento	1
3	TCC 0001-003 = MEDIÇÃO	Montagem da parte de medição	1

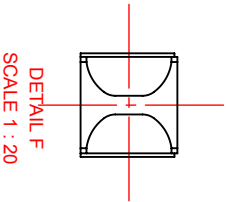
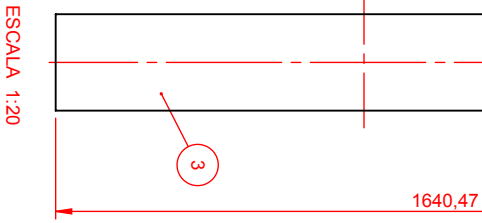
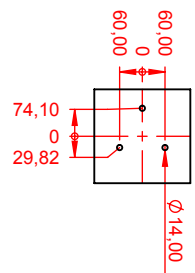
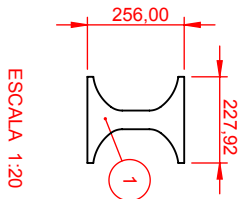
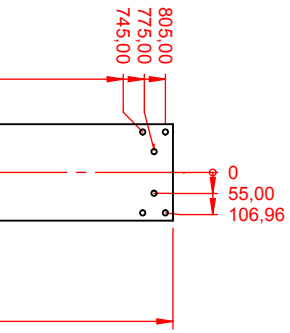
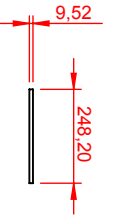
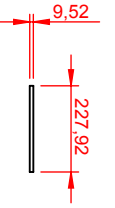
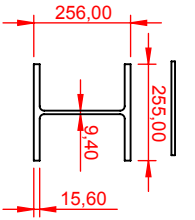
<b>CÓDIGO DA PEÇA / PART CODE</b> <b>TCC 0001</b>		<b>NOME DA PEÇA / PART NAME</b> <b>Montagem Geral</b>		<b>PROJETISTA / DESIGNER</b> <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
<b>NOME DO PROJETO / PROJECT NAME</b> <b>Equipamento de Testes</b>		<b>MASSA / MASS</b> <b>221,55</b>		<b>DESENHISTA / DRAWER</b> <b>Guilherme de Azevedo</b>	
<b>CÓDIGO DO PROJETO / PROJECT CODE</b> <b>TCC 0001</b>		<b>MATERIAL / MATERIAL</b> <b>Múltiplos</b>		<b>DETALHAMENTO / DETAIL</b> <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA</b>		<b>CLIENTE / CUSTOMER</b> <b>UFSC</b>		<b>FORMATO DA FOLHA</b> <b>A4</b>	
<b>ELIMINAR CANTOS VIVOS E ARESTAS CORTANTES BREAK SHARP EDGES</b>		<b>QUANTID. / QUANTITY</b> <b>1</b>		<b>ESCALA DA FOLHA</b> <b>1:20</b>	
<b>UNIDADES / UNITS</b> <b>mm - kg - s</b>		<b>DIEDRO / PROJECTION</b> 		<b>DATA / DATE</b> <b>21/05/2020</b>	

POS	QTD	DESCRIÇÃO E DIMENSÃO	MATERIAL	MASSA	Nº DO ITEM
1	1	Chapa # 12.7 x 255 x 260	AISI 1020	11.49	TCC 0001-001-01-1
2	2	Tubo ind. Quad. 20,00 x #1,50 x 180	AISI 1020	11.49	TCC 0001-001-01-2
3	2	Tubo ind. Quad. 20,00 x #1,50 x 200	AISI 1020	11.49	TCC 0001-001-01-3
4	4	Tubo ind. Quad. 20,00 x #1,50 x 980	AISI 1020	11.49	TCC 0001-001-01-4
5	1	Tubo ind. Quad. 20,00 x #1,50 x 40	AISI 1020	11.49	TCC 0001-001-01-5
6	2	Tubo ind. Quad. 20,00 x #1,50 x 156.73	AISI 1020	11.49	TCC 0001-001-01-6
7	2	Tubo ind. Quad. 20,00 x #1,50 x 496.78	AISI 1020	11.49	TCC 0001-001-01-7
8	2	Tubo ind. Quad. 20,00 x #1,50 x 506.3	AISI 1020	11.49	TCC 0001-001-01-8

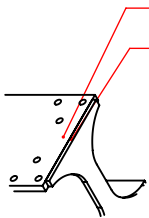
<b>CÓDIGO DA PEÇA / PART CODE</b> <b>TCC 0001-001-01</b>		<b>NOME DA PEÇA / PART NAME</b> <b>Trelíça</b>		<b>PROJETISTA / DESIGNER</b> <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
<b>NOME DO PROJETO / PROJECT NAME</b> <b>Equipamento de Testes</b>		<b>MASSA / MASS</b> <b>11.49</b>		<b>DESENHISTA / DRAWER</b> <b>Guilherme de Azevedo</b>	
<b>CÓDIGO DO PROJETO / PROJECT CODE</b> <b>TCC 0001</b>		<b>MATERIAL / MATERIAL</b> <b>AISI 1020</b>		<b>DETALHAMENTO / DETAIL</b> <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA</b>		<b>CLIENTE / CUSTOMER</b> <b>UFSC</b>		<b>FORMATO DA FOLHA</b> <b>A4</b>	
		<b>ELIMINAR CANTOS VIVOS E ARESTAS CORTANTES BREAK SHARP EDGES</b>		<b>ESCALA DA FOLHA</b> <b>1:15</b>	
		<b>UNIDADES / UNITS</b> <b>mm - kg - s</b>		<b>DATA / DATE</b> <b>15/05/2020</b>	
		<b>DIEDRO / PROJECTION</b>			



POS	QTD	DESCRIÇÃO E DIMENSÃO	MATERIAL	MASSA	N° DO ITEM
1	1	Chapa # 9.52 x 227.92 x 256	AISI 1020	1.92	TCC-0001-001-02-1
2	2	Chapa # 9.52 x 248.2 x 254	AISI 1020	4.71	TCC-0001-001-02-2
3	1	Viga W 250 x 80.0 x 1640.47	AISI 1020	131.91	TCC-0001-001-02-3

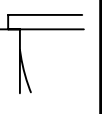


DETAIL E  
 SCALE 1 : 15

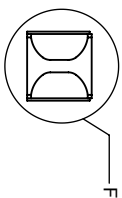
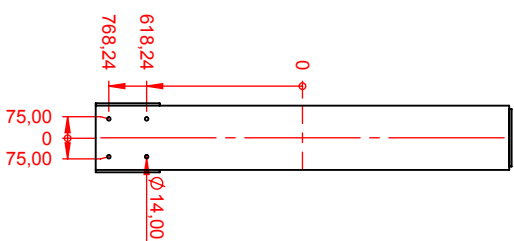
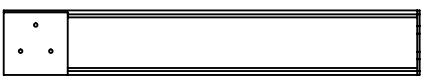
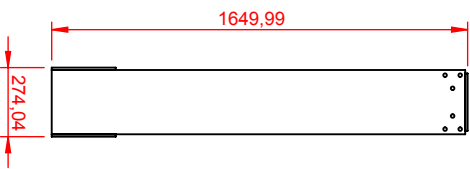
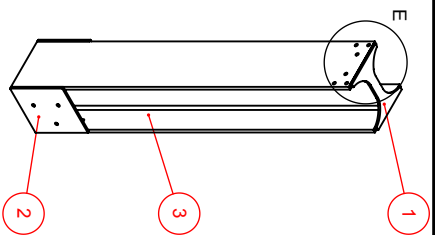
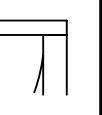


DEIXAR AS DUAS  
 FACES COINCIDENTES

DETAIL H  
 SCALE 1 : 5

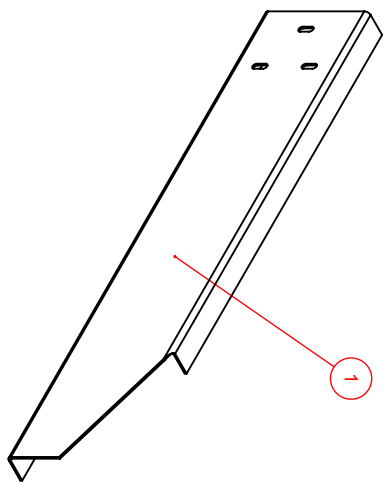
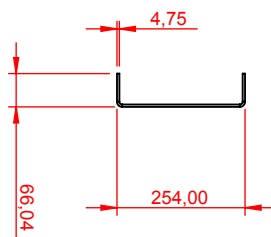
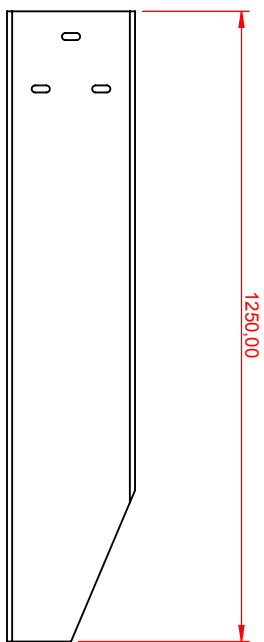
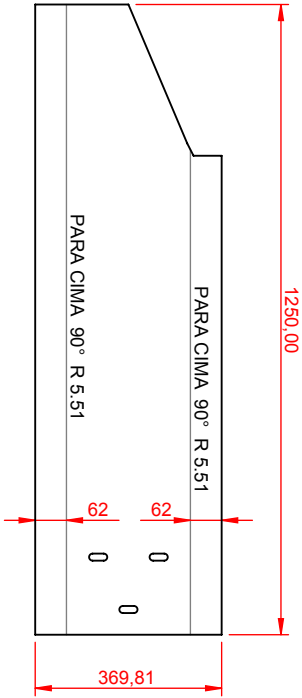


DETAIL G  
 SCALE 1 : 5



CÓDIGO DA PEÇA / PART CODE <b>TCC 0001-001-02</b>	NOME DA PEÇA / PART NAME <b>Viga Base</b>	PROJETISTA / DESIGNER <b>Guilherme V. de Azevedo</b>
NOME DO PROJETO / PROJECT NAME <b>Equipamento de Testes</b>	MASSA / MASS <b>143.24</b>	DESENHISTA / DRAWER <b>Guilherme de Azevedo</b>
CÓDIGO DO PROJETO / PROJECT CODE <b>TCC 0001</b>	MATERIAL / MATERIAL <b>AISI 1020</b>	DETALHAMENTO / DETAIL <b>Guilherme V. de Azevedo</b>
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA	CLIENTE / CUSTOMER <b>UFSC</b>	FORMATO DA FOLHA <b>A4</b>
	ELIMINAR CANTOS VIVOS E ARESTAS CORTANTES BREAK SHARP EDGES	ESCALA DA FOLHA <b>1:30</b>
	UNIDADES / UNITS mm - kg - s	DATA / DATE <b>21/05/2020</b>
	DIEDRO / PROJECTION 	

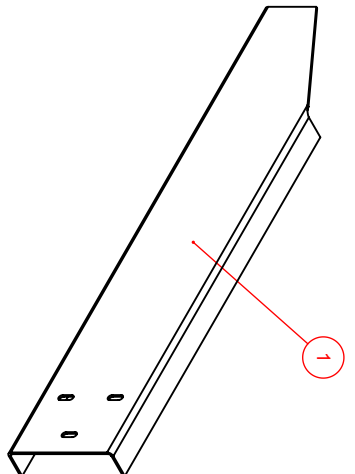
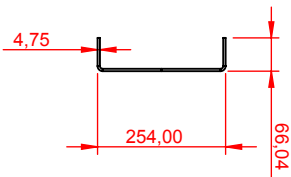
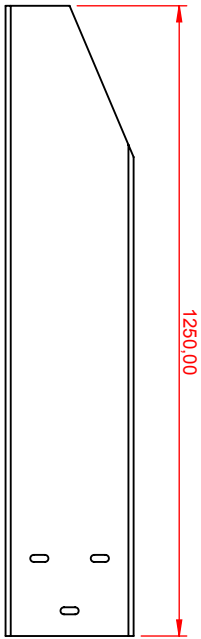
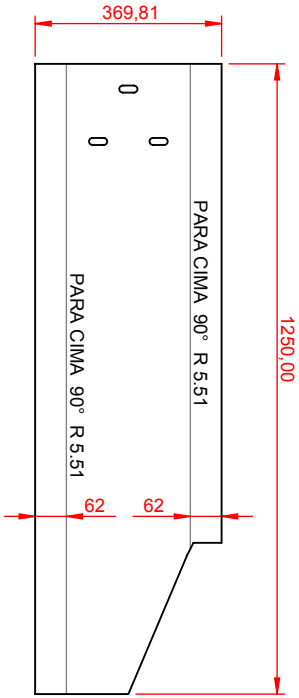
POS	QTD	DESCRIÇÃO E DIMENSÃO	MATERIAL	MASSA	N° DO ITEM
1	1	Chapa # 4.75 x 369,8115 x 1250	AISI 1020	15.93	TCC 0001-001-03-1



CÓDIGO DA PEÇA / PART CODE <b>TCC 0001-001-03</b>		NOME DA PEÇA / PART NAME <b>Chapa Lateral Esquerda</b>		PROJETISTA / DESIGNER <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
NOME DO PROJETO / PROJECT NAME <b>Equipamento de Testes</b>		MASSA / MASS <b>15.93</b>		DESENHISTA / DRAWER <b>Guilherme de Azevedo</b>	
CÓDIGO DO PROJETO / PROJECT CODE <b>TCC 0001</b>		MATERIAL / MATERIAL <b>AISI 1020</b>		DETALHAMENTO / DETAIL <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA		CLIENTE / CUSTOMER <b>UFSC</b>		FORMATO DA FOLHA <b>A4</b>	
ELIMINAR CANTOS VIVOS E ARESTAS CORTANTES BREAK SHARP EDGES		QUANTID. / QUANTITY <b>1</b>		ESCALA DA FOLHA <b>1:15</b>	
UNIDADES / UNITS mm - kg - s		DIEDRO / PROJECTION 		DATA / DATE <b>21/05/2020</b>	

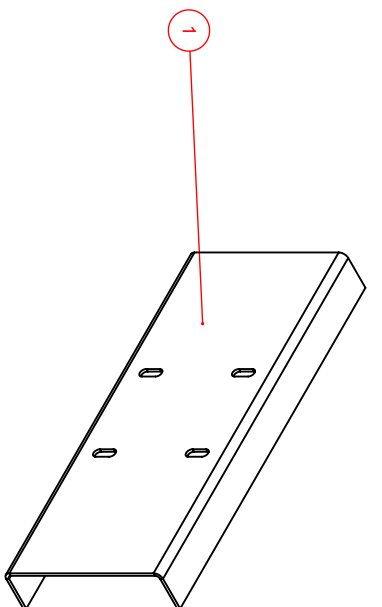
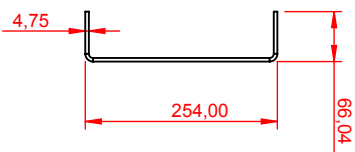
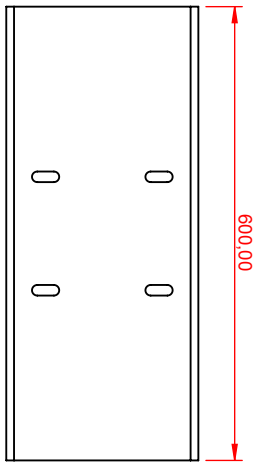
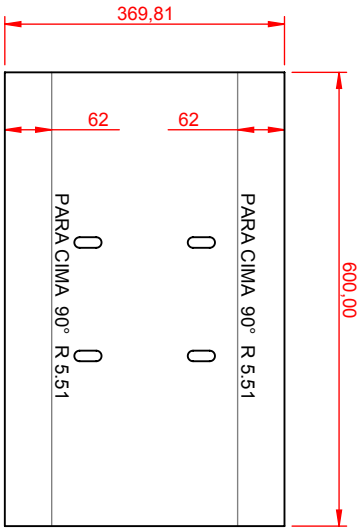


POS	QTD	DESCRIÇÃO E DIMENSÃO	MATERIAL	MASSA	N° DO ITEM
1	1	Chapa # 4,75 x 369,815 x 1250	AISI 1020	15,93	TCC 0001-001-04-1



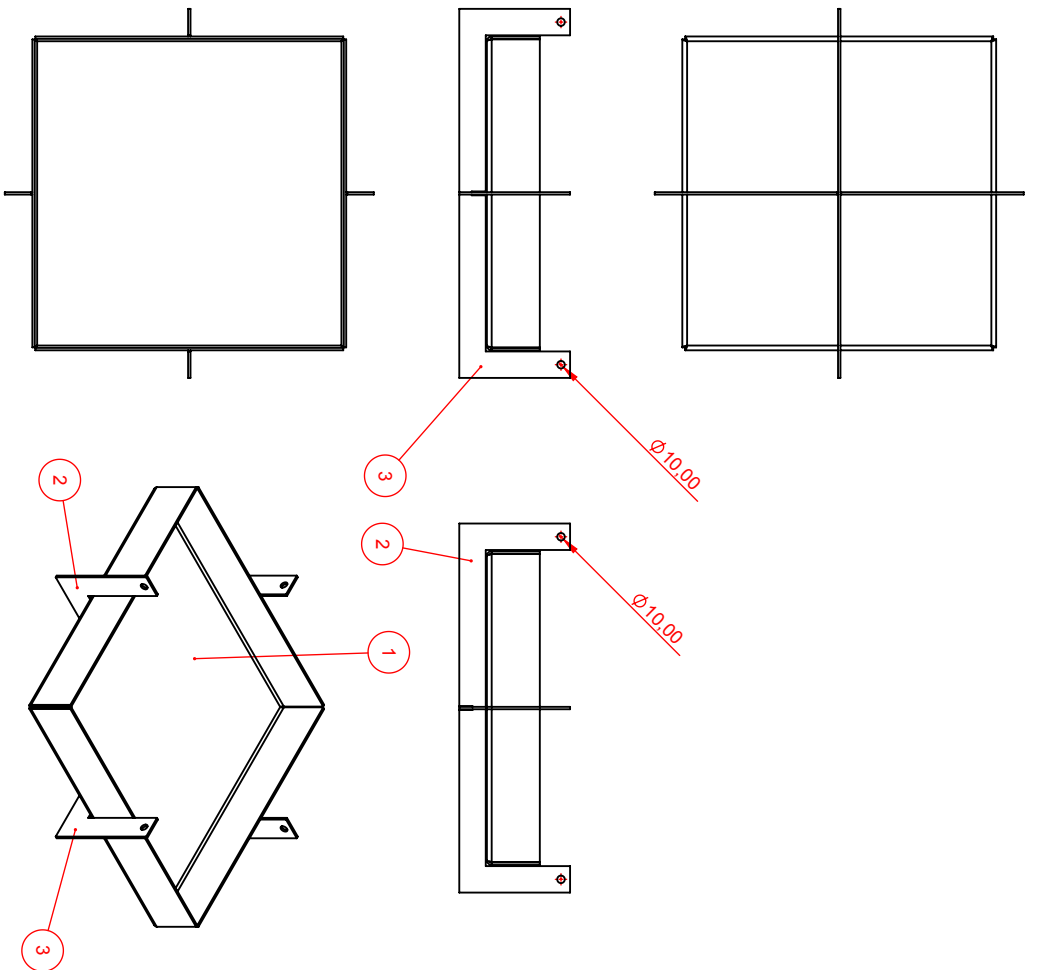
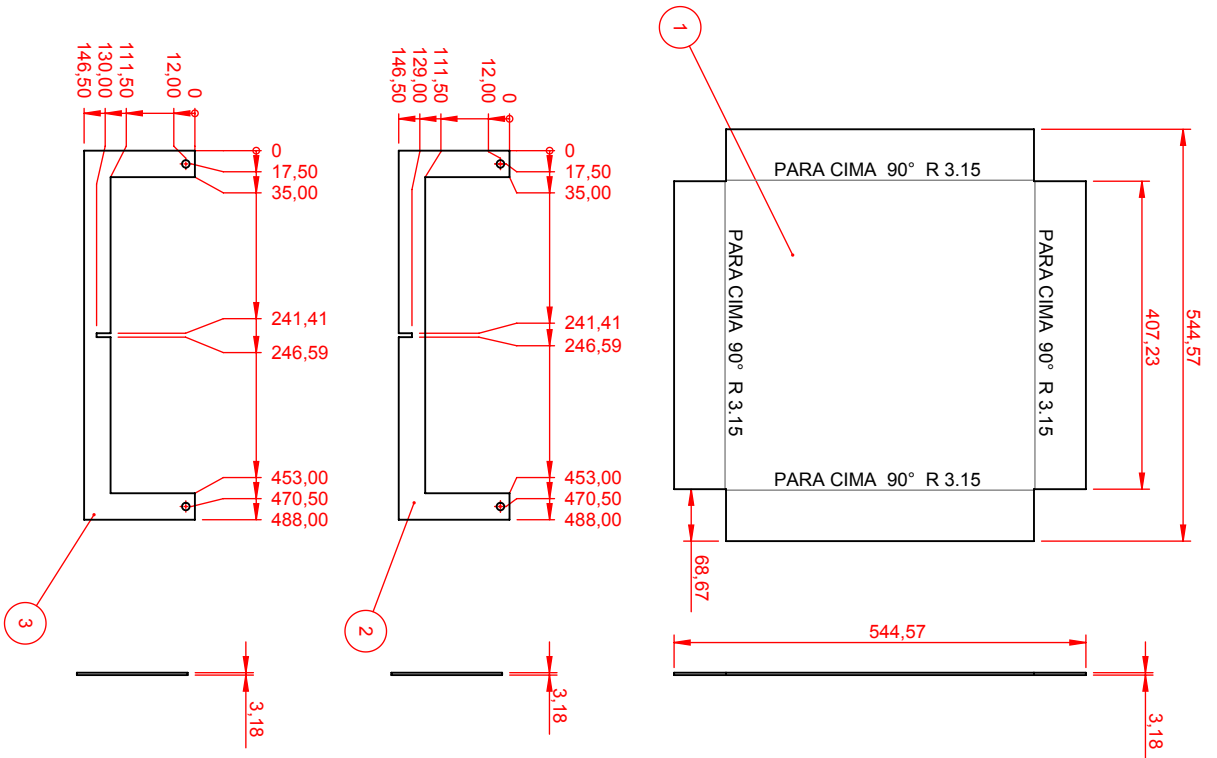
CÓDIGO DA PEÇA / PART CODE <b>TCC 0001-001-04</b>		NOME DA PEÇA / PART NAME <b>Chapa Lateral Direita</b>		PROJETISTA / DESIGNER <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
NOME DO PROJETO / PROJECT NAME <b>Equipamento de Testes</b>		MASSA / MASS <b>15,93</b>		DESENHISTA / DRAWER <b>Guilherme de Azevedo</b>	
CÓDIGO DO PROJETO / PROJECT CODE <b>TCC 0001</b>		MATERIAL / MATERIAL <b>AISI 1020</b>		DETALHAMENTO / DETAIL <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA		CLIENTE / CUSTOMER <b>UFSC</b>		FORMATO DA FOLHA <b>A4</b>	
ELIMINAR CANTOS VIVOS E ARESTAS CORTANTES BREAK SHARP EDGES		QUANTID. / QUANTITY <b>1</b>		ESCALA DA FOLHA <b>1:15</b>	
UNIDADES / UNITS mm - kg - s		DIEDRO / PROJECTION 		DATA / DATE <b>21/05/2020</b>	

POS	QTD	DESCRIÇÃO E DIMENSÃO	MATERIAL	MASSA	N° DO ITEM
1	1	Chapa # 4,75 x 369,8115 x 600	AISI 1020	8,26	TCC 0001-001-05-1



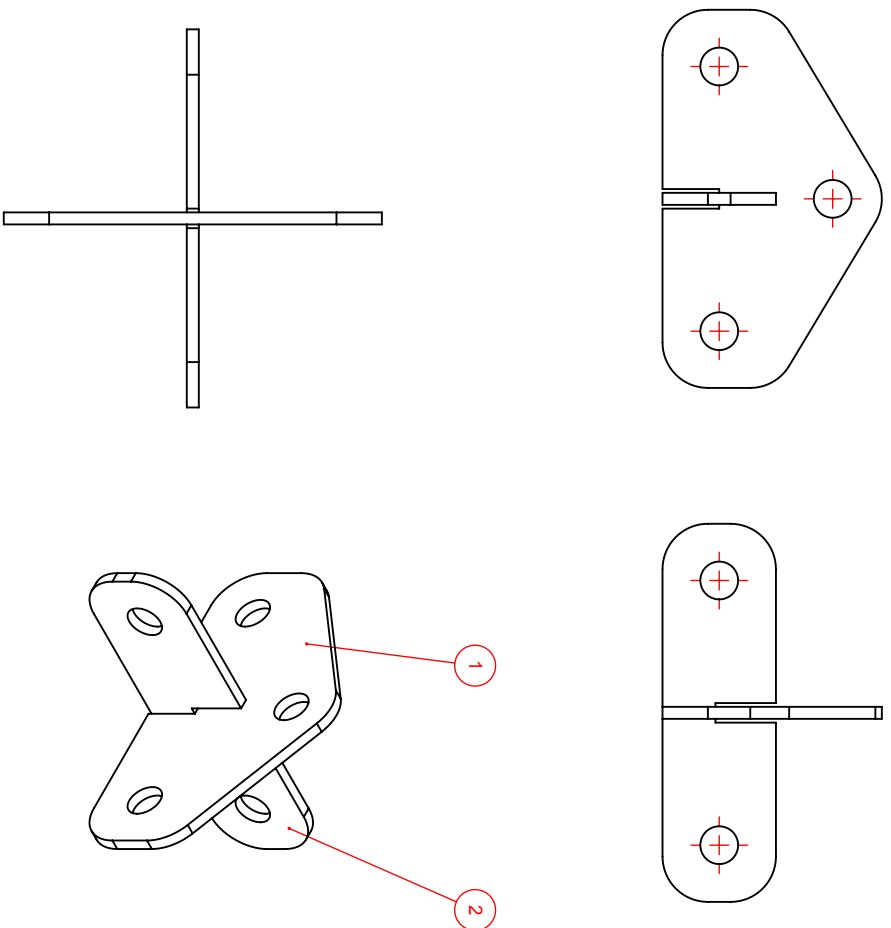
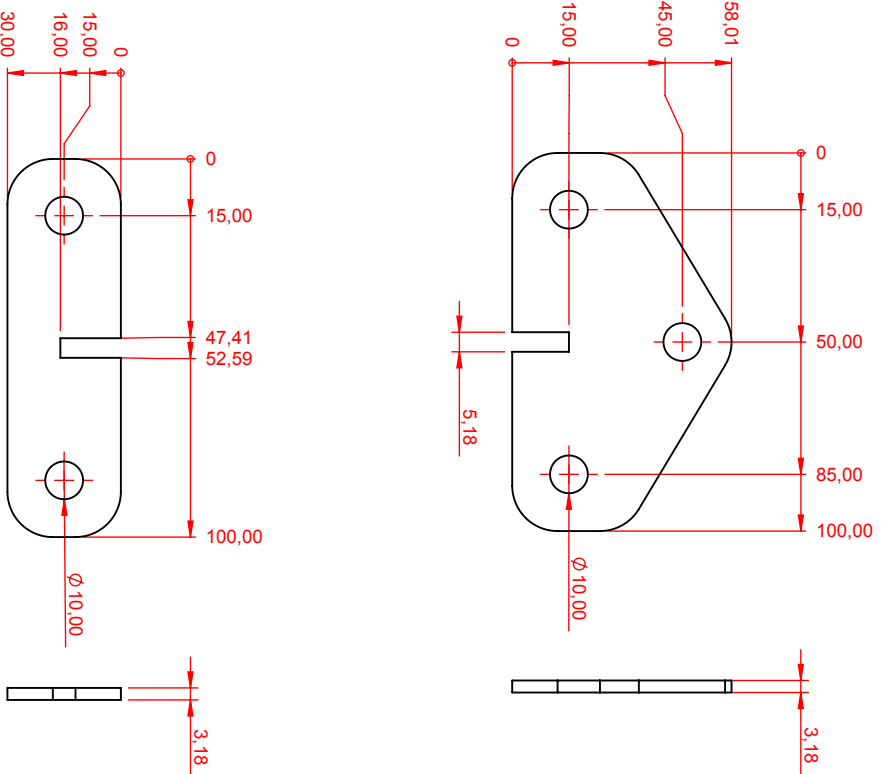
<b>CÓDIGO DA PEÇA / PART CODE</b> <b>TCC 0001-001-05</b>		<b>NOME DA PEÇA / PART NAME</b> <b>Chapa Traseira</b>		<b>PROJETISTA / DESIGNER</b> <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
<b>NOME DO PROJETO / PROJECT NAME</b> <b>Equipamento de Testes</b>		<b>MASSA / MASS</b> <b>8,26</b>		<b>DESENHISTA / DRAWER</b> <b>Guilherme de Azevedo</b>	
<b>CÓDIGO DO PROJETO / PROJECT CODE</b> <b>TCC 0001</b>		<b>MATERIAL / MATERIAL</b> <b>AISI 1020</b>		<b>DETALHAMENTO / DETAIL</b> <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA</b>		<b>CLIENTE / CUSTOMER</b> <b>UFSC</b>		<b>FORMATO DA FOLHA</b> <b>A4</b>	
<b>ELIMINAR CANTOS VIVOS E ARESTAS CORTANTES</b> <b>BREAK SHARP EDGES</b>		<b>UNIDADES / UNITS</b> <b>mm - kg - s</b>		<b>ESCALA DA FOLHA</b> <b>1:10</b>	
<b>DIEDRO / PROJECTION</b>				<b>DATA / DATE</b> <b>21/05/2020</b>	

POS	QTD	DESCRIÇÃO E DIMENSÃO	MATERIAL	MASSA	Nº DO ITEM
1	1	Chapa # 3.18 x 544,57 x 544,57	AISI 1020	6.97	TCC 0001-002-01-1
2	1	Chapa # 3.18 x 146,5 x 488	AISI 1020	0.62	TCC 0001-002-01-2
3	1	Chapa # 3.18 x 146,5 x 488	AISI 1020	0.62	TCC 0001-002-01-3



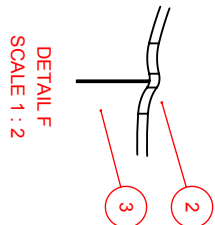
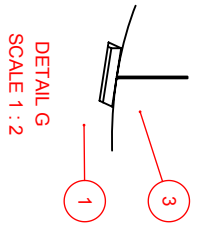
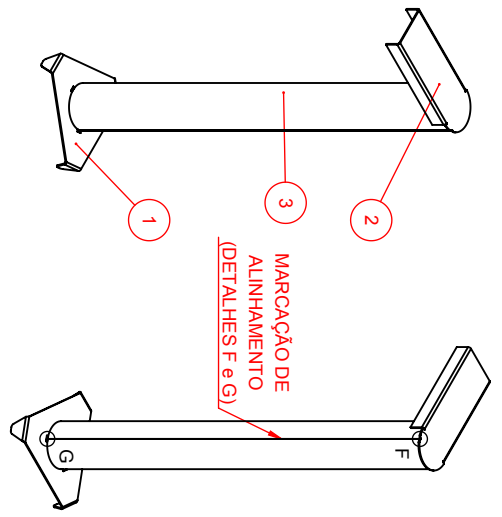
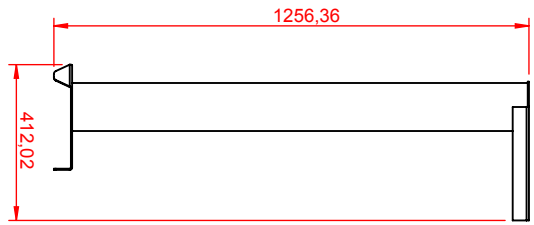
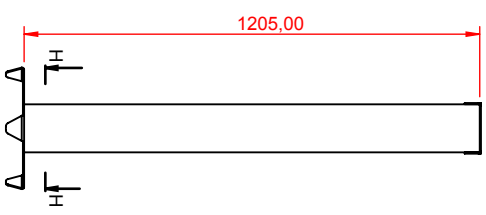
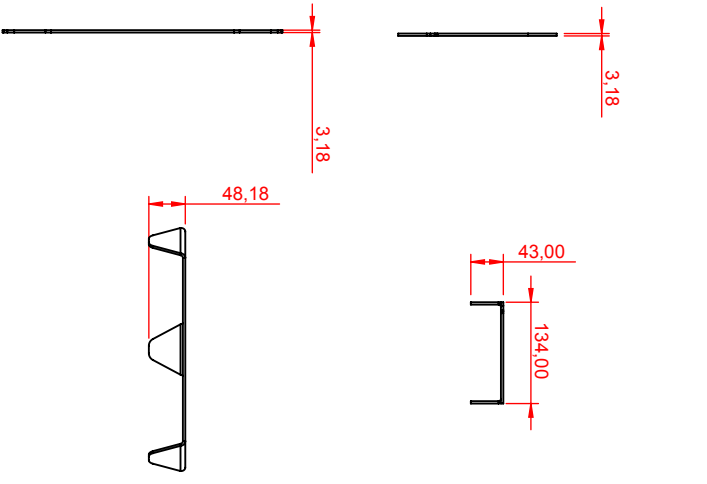
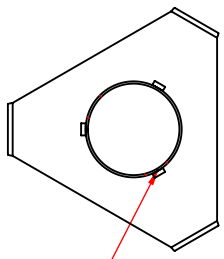
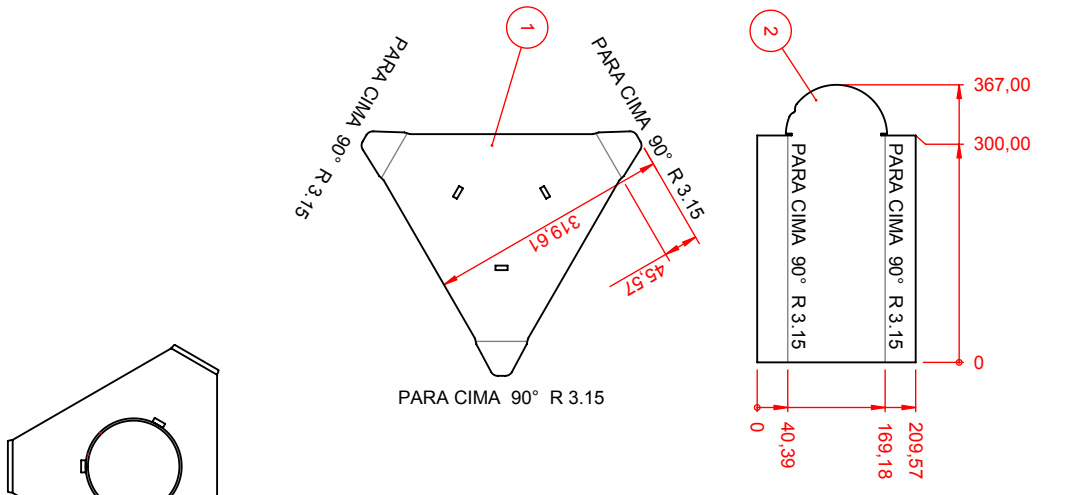
CÓDIGO DA PEÇA / PART CODE <b>TCC 0001-002-01</b>		NOME DA PEÇA / PART NAME <b>Cesto de Carga</b>		PROJETISTA / DESIGNER <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
NOME DO PROJETO / PROJECT NAME <b>Equipamento de Testes</b>		MASSA / MASS <b>8.21</b>		DESENHISTA / DRAWER <b>Guilherme de Azevedo</b>	
CÓDIGO DO PROJETO / PROJECT CODE <b>TCC 0001</b>		MATERIAL / MATERIAL <b>AISI 1020</b>		DETALHAMENTO / DETAIL <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA		CLIENTE / CUSTOMER <b>UFSC</b>		FORMATO DA FOLHA <b>A4</b>	
		ELIMINAR CANTOS VIVOS E ARESTAS CORTANTES BREAK SHARP EDGES		ESCALA DA FOLHA <b>1:10</b>	
		UNIDADES / UNITS mm - kg - s		DATA / DATE <b>15/05/2020</b>	
		DIEDRO / PROJECTION			

POS.	QUANT.	DESCRIÇÃO E DIMENSÃO	MATERIAL	MASSA	Nº DO ITEM
1	1	Chapa # 3.18 x 58.0057 x 100	AISI 1020	0.10	TCC 0001-002-02-1
2	1	Chapa # 3.18 x 30 x 100	AISI 1020	0.07	TCC 0001-002-02-2



CÓDIGO DA PEÇA / PART CODE <b>TCC 0001-002-02</b>		NOME DA PEÇA / PART NAME <b>Othal de Suspensão</b>		PROJETISTA / DESIGNER <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
NOME DO PROJETO / PROJECT NAME <b>Equipamento de Testes</b>		MASSA / MASS <b>0.17</b>		DESENHISTA / DRAWER <b>Guilherme de Azevedo</b>	
CÓDIGO DO PROJETO / PROJECT CODE <b>TCC 001</b>		MATERIAL / MATERIAL <b>AISI 1020</b>		DETALHAMENTO / DETAIL <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA		CLIENTE / CUSTOMER <b>UFSC</b>		QUANTIDADE / QUANTITY <b>1</b>	
EIMINAR CANTOS VIVOS E ARESTAS CORTANTES BREAK SHARP EDGES		UNIDADES / UNITS <b>mm - kg - s</b>		FORMATO DA FOLHA <b>A4</b>	
DIEDRO / PROJECTION		ESCALA DA FOLHA <b>1:2</b>		DATA / DATE <b>15/05/2020</b>	

POS	QTD	DESCRIÇÃO E DIMENSÃO	MATERIAL	MASSA	Nº DO ITEM
1	1	Chapa # 3.18 x 323,27 x 370,19	AISI 1020	1,60	TCC-0001-003-01-1
2	1	Chapa # 3.18 x 209,57 x 367	AISI 1020	1,75	TCC-0001-003-01-2
3	1	Tubo Industr. Øext 127,00 x #3,00 x 1205	AISI 1020	11,12	TCC-0001-003-01-3



CÓDIGO DA PEÇA / PART CODE <b>TCC 0001-003-01</b>		NOME DA PEÇA / PART NAME <b>Supporte de Medição</b>		PROJETISTA / DESIGNER <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
NOME DO PROJETO / PROJECT NAME <b>Equipamento de Testes</b>		MASSA / MASS <b>14,47</b>		DESENHISTA / DRAWER <b>Guilherme de Azevedo</b>	
CÓDIGO DO PROJETO / PROJECT CODE <b>TCC 0001</b>		MATERIAL / MATERIAL <b>AISI 1020</b>		DETALHAMENTO / DETAIL <b>Guilherme V. de Azevedo</b>	
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA		CLIENTE / CUSTOMER <b>UFSC</b>		FORMATO DA FOLHA <b>A4</b>	
		ELIMINAR CANTOS VIVOS E ARESTAS CORTANTES BREAK SHARP EDGES		ESCALA DA FOLHA <b>1:20</b>	
		UNIDADES / UNITS mm - kg - s		DATA / DATE <b>19/05/2020</b>	
		DIEDRO / PROJECTION			