

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**GUILHERME AUGUSTO MARQUES DE ANDRADE**

**ANÁLISE ESTRUTURAL – BAJA PAMPA**

**Alegrete**

**2017**

**GUILHERME AUGUSTO MARQUES DE ANDRADE**

**ANÁLISE ESTRUTURAL – BAJA PAMPA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

**Alegrete**

**2017**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M553a Marques de Andrade, Guilherme Augusto  
ANÁLISE ESTRUTURAL - BAJA PAMPA / Guilherme  
Augusto Marques de Andrade.  
64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA,  
2017.

"Orientação: Tonilson Rosendo".

1. Análise estrutural. 2. Baja. 3. Extensometria.  
I. Título.

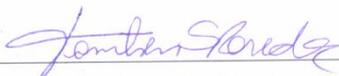
**GUILHERME AUGUSTO MARQUES DE ANDRADE**

**ANÁLISE ESTRUTURAL – BAJA PAMPA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 28 / 11 / 2017.

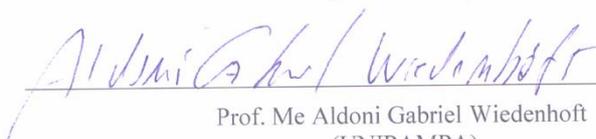
Banca examinadora:



Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo  
Orientador  
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia  
(UNIPAMPA)



Prof. Me Aldoni Gabriel Wiedenhoft  
(UNIPAMPA)

## RESUMO

O programa Baja SAE Brasil é destinado a estudantes de engenharia que formam equipes com intuito de desenvolver um veículo *off-road*, denominado baja, para participação da Competição Baja SAE Brasil. Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo principal o estudo estrutural do chassi baja da equipe Baja Pampa que é formada por alunos do curso de Engenharia Mecânica da Unipampa. Inicialmente foi realizado dois ensaios experimentais com o chassi: o primeiro para obter a rigidez torcional do chassi por meio da aplicação de um momento torçor dianteiro e o segundo ensaio teve como objetivo conhecer a deformação causada por uma carga estática através de sua instrumentação com extensômetros resistivos. A resistência à torção do chassi obtida experimentalmente foi de 940,00 Nm/° e se mostrou dentro do intervalo recomendado para este tipo de veículo. Após a realização dos ensaios experimentais, foi feita a modelagem numérica do chassi por meio de simulações com mesmas condições de contorno com que os ensaios experimentais foram feitos. As simulações mostraram uma rigidez torcional de 7,31% maior que a obtido experimentalmente e uma deformação 7,45% menor que a aferida no ensaio experimental de carga estática. Com isso, a validação do modelo em elementos finitos fez com que a equipe tenha de um modelo numérico do chassi podendo o utilizar para outros tipos de análises.

*Palavras-Chave: Análise estrutural, Chassi baja, Rigidez torcional, Extensometria.*

## ABSTRACT

The Baja SAE Brazil program is designed for engineering students who train teams with the purpose of developing an off-road vehicle, called baja, for participation in the Baja SAE Brazil Competition. The main objective of this work is to study the chassis of the Baja Pampa team, which is made up of students from the Mechanical Engineering course at Unipampa. This study initially carried out two experimental tests with the chassis: the first go to obtain the torsional stiffness by means of the application of a front torquing moment and the second test had as objective to know the deformation of specific points of the structure through its instrumentation with resistive extensometers due the application of a static charge. The torsional strength of the chassis was  $940.00 \text{ Nm/}^\circ$  and was within the range acceptable for this type of vehicle. After the experimental tests, the numerical model of the structure was validated by means of simulations with the same contour conditions with which the experimental tests were done. The simulations showed a torsional stiffness of 7,31% higher than that obtained experimentally and the strain value 7,45% lower than that measured in the experimental static load test. Finally, the validation of the finite element model allowed a dynamic study of the chassis in computational form showing its six first modes of vibration. With this, the validation of the model in finite elements has made the team have a numerical model of the chassis and can use for other types of analysis

*Key words: Structural analysis, Low chassis, Torsional rigidity, Extensometry*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de chassi de caminhonete e ônibus. ....	15
Figura 2 - Monobloco de um carro sedã. ....	16
Figura 3 - Chassi baja do tipo Space Frame. ....	17
Figura 4 - Exemplo comparativo da baixa e alta rigidez torcional. ....	20
Figura 5 - Problemas causados pela baixa e elevada rigidez torcional. ....	20
Figura 6 - Deformação flexão vertical. ....	21
Figura 7 - Deformação flexão lateral. ....	22
Figura 8 - Deformação torção longitudinal. ....	22
Figura 9 - Deformação <i>lozenging horizontal</i> . ....	23
Figura 10 - Esquema de teste experimental para obtenção da rigidez torcional. ....	24
Figura 11 - Representação do modelo teórico em um chassi baja. ....	24
Figura 12 - Representação frontal do método de cálculo da rigidez torcional por meio de uma força aplicada a um lado do chassi. ....	25
Figura 13 - Representação da deflexão angular devido ao momento torçor. ....	26
Figura 14 - Representação frontal do método de cálculo da rigidez torcional por meio de um binário aplicado no chassi. ....	27
Figura 15 - Representação da deflexão angular devido ao binário. ....	27
Figura 16 - Esquema do teste de rigidez torcional utilizando um pivô central. ....	29
Figura 17 - Esquema do ensaio de rigidez torcional do chassi com pivô no canto. ....	29
Figura 18 - Ensaio de torção experimental padrão da FIAT. ....	30
Figura 19 - Protótipo baja da equipe Baja Pampa. ....	33
Figura 20 - Chassi Baja Pampa. ....	34
Figura 21 - Esquema dos ensaios experimentais. ....	34
Figura 22 - Estrutura “branca” com o suporte de fixação traseira para o baja. ....	35
Figura 23 - Pivôs de centro usados nos experimentos. ....	35
Figura 24 - Fixação da barra no chassi. ....	36
Figura 25 - Recipiente utilizado como carga nos experimentos. ....	36
Figura 26 - Relógio comparador utilizado no experimento de rigidez torcional. ....	37
Figura 27 - Strain gage Kyowa de 120 $\Omega$ do tipo folha. ....	37
Figura 28 - Condicionador de sinais Spider 8. ....	37
Figura 29 - Chassi configurado para o ensaio de rigidez torcional. ....	38

Figura 30 - Relógios comparadores instalados.....	38
Figura 31 - Aplicação do torque na dianteira do chassi. ....	39
Figura 32 - Local de instalação dos strain gages. ....	40
Figura 33 - Local de aplicação da carga estática. ....	40
Figura 34 - Modelo virtual do protótipo baja SAE da equipe Baja Pampa. ....	41
Figura 35 - Modelo virtual do chassi.....	42
Figura 36 - Malhas resultantes A) rigidez torcional e B) carga estática.....	42
Figura 37 - Locais de fixação sem graus de liberdade na traseira do chassi. ....	43
Figura 38 - Restrição de apoio simples para simular o ensaio de rigidez torcio(estrutura vista por baixo). ....	44
Figura 39 - Aplicação da carga na simulação do ensaio de rigidez torcional. ....	44
Figura 40 - Restrição dianteira na estrutura no ensaio de carga estática. ....	45
Figura 41 - Aplicação da carga na simulação do ensaio de carga estática. ....	45
Figura 42 – Carregamentos e fixação do chassi do ensaio de tensão crítica. ....	46
Figura 43 - Deslocamentos dianteiros do chassi em decorrência do torque.....	47
Figura 44 - Deformação medida no extensômetro localizado no ponto “baixo-superior”. .....	49
Figura 45 - Deslocamentos $\Delta A$ e $\Delta B$ causados pela torção do modelo numérico. ....	50
Figura 46 - Condições de contorno de fixação ajustada. (vista inferior traseira do chassi). .....	51
Figura 47 - Deslocamentos $\Delta A$ e $\Delta B$ causados pela torção do modelo calibrado.....	52
Figura 48 - Deformação do local ”Baixo-Superior”.....	53
Figura 49 - Máxima tensão obtida na simulação.....	54
Figura 50 - Componentes de um extensômetro resistivo. ....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores característicos de rigidez torcional para diferentes veículos.....	19
Tabela 2 - Deslocamentos $\Delta A$ e $\Delta B$ resultantes do torque aplicado. ....	47
Tabela 3 - Deformação angular e rigidez torcional resultantes. ....	48
Tabela 4 - Comparação de $K_t$ experimental com numérica. ....	51
Tabela 5 - Resultados da simulação de rigidez torcional com modelo calibrado.....	52
Tabela 6 - Comparação da rigidez torcional obtida experimentalmente com a obtida computacionalmente. ....	52
Tabela 7 - Comparação da deformação do obtida experimentalmente com a obtida computacionalmente. ....	54

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

RBSB - Regulamento Baja SAE Brasil

CAD - Desenho Assistido por Computador

DCF - Dinâmica Computacional de Fluidos

DMC - Dinâmica de Multicorpos

CAE - Engenharia Assistida por Computador

hp - Horse Power

CAM - Manufatura Assistida por Computador

MEF - Método de Elementos Finitos

$K_t$  - Rigidez torcional

SAE - Sociedade dos Engenheiros Automotivos

SG - Strain Gage

## SUMÁRIO

SUMÁRIO .....	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivo Geral	13
1.2 Objetivos Específicos .....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Competição Baja SAE Brasil .....	14
2.1.1Histórico competição baja SAE.....	15
2.2 Chassi veicular	15
2.2.1 Monobloco .....	16
2.2.2 Chassis baja SAE Brasil.....	16
2.2.3Propriedades de um chassi .....	17
2.2.3.1 Propriedades inerciais .....	18
2.3 Cargas atuantes em um chassi automotivo.....	20
2.4 Modos de deformação de um chassi automotivo .....	21
2.4.1 Flexão vertical .....	21
2.4.2 Flexão lateral .....	22
2.4.3 Torção longitudinal.....	22
2.4.4 Lozengeing horizontal .....	23
2.5 Cálculo da rigidez torcional .....	23
2.5.1 Cálculo da rigidez através de um momento torçor .....	25
2.5.2 Cálculo da rigidez através de um binário.....	26
2.6 Ensaio experimentais de rigidez torcional .....	28
2.6.1 Pivô de centro .....	28
2.6.2 Pivô no canto .....	29
2.6.3 Dois suportes rígidos .....	30
2.7 Métodos de análise de estruturas.....	30
2.7.1 Método de elementos finitos.....	31
2.7.2 Análise estática .....	31
3 METODOLOGIA .....	33

3.1	Testes experimentais .....	33
3.1.1	Aparato experimental.....	34
3.1.2	Ensaio de rigidez torcional .....	37
3.1.3	Ensaio de carga estática .....	39
3.2	Simulações computacionais .....	40
3.2.1	Modelo numérico do Chassi .....	41
3.2.2	Malha .....	42
3.2.3	Fixação traseira do chassi .....	43
3.2.4	Simulação de rigidez torcional .....	43
3.2.5	Simulação de carga estática .....	44
3.2.6	Simulação de detecção do ponto crítico .....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1	Ensaio experimental de rigidez torcional .....	47
4.2	Ensaio experimental de carga estática.....	48
4.3	Calibração e validação do modelo em elementos finitos .....	49
4.3.1	Simulação de rigidez torcional .....	49
4.3.2	Ensaio numérico de rigidez torcional com modelo calibrado.....	52
4.3.3	Ensaio numérico de carga estática com modelo calibrado .....	53
4.3.4	Ensaio numérico de detecção do ponto crítico .....	54
5	CONCLUSÕES .....	56
6	REFERÊNCIAS .....	58
7	ANEXOS.....	61

## **1 INTRODUÇÃO**

O programa Baja SAE BRASIL é destinado a estudantes de engenharia e os oferece a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula através da competição baja SAE Brasil que é organizada pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE). A competição proporciona aos alunos das equipes participantes a oportunidade de desenvolver um veículo *off road* desde sua concepção, projeto detalhado, construção e testes de campo.

A análise estrutural de um veículo *off road*, conhecido como baja, projetado para competição com condições adversas de terreno, pode resultar em significativa melhora na performance do veículo. O chassi de um baja tem grande relevância no desempenho do veículo, pois ele é o principal componente estrutural e responsável por grande parte do peso final do veículo além de ajudar a garantir a integridade física do piloto. Desta forma, o desenvolvimento de um estudo com foco na análise estrutural do chassi baja da equipe Baja Pampa se demonstra de grande importância, pois avalia a estrutura que deverá resistir às condições adversas durante a Competição Baja SAE Brasil que a equipe formada por alunos do curso de Engenharia Mecânica da Unipampa tem o objetivo de participar.

Este trabalho contém a revisão bibliográfica necessária para a captação do comportamento estrutural do chassi durante o funcionamento do baja. Logo após, a metodologia expõe os métodos e procedimentos adotados no desenvolvimento do trabalho, seguido dos resultados obtidos, onde são interpretados. Por fim, todos os conhecimentos adquiridos sobre o comportamento do chassi são apresentados

### **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise estrutural do protótipo baja da equipe Baja Pampa da UNIPAMPA.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Este estudo tem como objetivos específicos:

- Avaliar a rigidez torcional do chassi do baja da equipe Baja Pampa através de ensaio experimental;
- Medir a deformação em pontos específicos do chassi por meio da instrumentação da estrutura;
- Criar e validar o modelo computacional em Elementos Finitos;
- Suprir a equipe Baja Pampa de material referente a estrutura do baja.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Na revisão bibliográfica são abordados assuntos relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, como a competição Baja SAE, o chassi baja, cargas atuantes e formas de deformações de chassis automotivos , por fim o método de análise estrutural da gaiola baja de forma computacional e experimental.

### **2.1 Competição Baja SAE Brasil**

Baja é um veículo off road construído para disputar a Competição Baja SAE BRASIL a nível nacional que ocorre anualmente e é organizada pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE - Society of Automotive Engineers). Nesta competição, as equipes são formadas apenas por estudantes de engenharia que representam a instituição de ensino superior à qual são ligados. A SAE determina que cada equipe participante desenvolva um veículo off road, desde a sua concepção, projeto preliminar e detalhado, construção e testes em campo resultando em um baja que seja bem visto pelo seu visual, desempenho, confiabilidade, facilidade de operação/manutenção e, por fim, funcionamento seguro.

Na competição as equipes são avaliadas em três provas: estática, dinâmica e de testes de segurança. As provas estáticas consistem em apresentações dos projetos, análise de custo e cases de venda e marketing do veículo. As provas dinâmicas consistem na análise do veículo dentro da pista de diferentes situações e os testes de segurança são verificações de conformidade do veículo com relação às regras, devendo este ser aprovado para credenciar o veículo na prova dinâmica.

No Brasil, a competição ocorre desde 1991 com a etapa nacional, porem existe também as competições regionais que são nomeadas como Etapa Sul, Sudeste e Nordeste.

Entretanto apenas a equipe vencedora da disputa nacional ganha o direito de disputar a etapa internacional da prova que ocorre nos Estados Unidos, país de origem do projeto Baja SAE.

### 2.1.1 Histórico competição baja SAE

O projeto Baja SAE foi criado na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos sendo que a primeira competição ocorreu em 1976. Em 1991 teve o início das atividades da SAE BRASIL, que, em 1994, lançava o Projeto Baja SAE BRASIL. Em 1995, foi realizada a primeira competição nacional, na pista Guido Caloi em de São Paulo.

No ano seguinte a competição foi transferida para o Autódromo de Interlagos, onde ficou até o ano de 2002. A partir de 2003 a competição passou a ser realizada em Piracicaba.

## 2.2 Chassi veicular

Chassi (ou chassis) é uma estrutura fabricada por um material rígido como aço e alumínio que suporta o motor e carroceria de ônibus, carros (modelos antigos) e caminhões, por exemplo. Nesta mesma linha, Weiss (2016), diz que o chassi é um item que suporta e conecta outras partes de um veículo, como sistema de transmissão, suspensão e frenagem, por exemplo. A Figura 1 demonstra exemplos de chassis.

Figura 1 - Exemplos de chassi de caminhonete e ônibus.



Fonte: Agrale.com

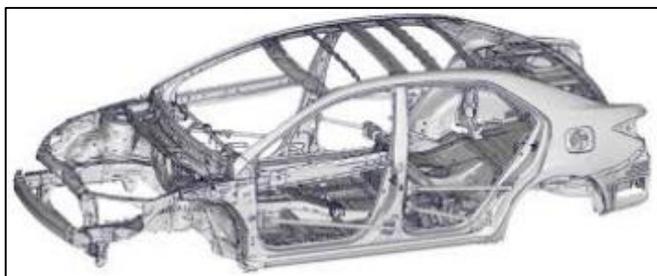
Veículos que transportam cargas e são de comprimentos longos como ônibus, caminhões e algumas caminhonetas possuem chassis robustos e separado da carroceria devido às elevadas forças de torção que o mesmo sofre.

A utilização do chassi separado da carroceria faz com que o chassi sofra com os altos valores de carregamentos sem causar os efeitos consequentes na caçamba (parte da carroceria que transporta a carga) e cabine ocupada pelo motorista e passageiros. Além disso, é preferível a utilização de chassi em veículos que transportam altas cargas pelo fato de possuírem menor custo de fabricação e reparo em comparação ao de um monobloco. Nestes veículos a utilização de uma estrutura única, conhecida como monobloco, poderia causar a diminuição da vida útil da estrutura devido a fadiga do material na região de transporte de carga.

### 2.2.1 Monobloco

Atualmente, os carros de passeio possuem seus sistemas (motor, transmissão, suspensão, etc.) montados diretamente na carroceria sendo conhecido como uma modalidade de chassi denominada Monobloco, ilustrada na Figura 2. A principal vantagem deste tipo de estrutura é a redução de peso e espaço.

Figura 2 - Monobloco de um carro sedã.



Fonte: car.blog.br

### 2.2.2 Chassis baja SAE Brasil

O chassi do Baja SAE, também chamado de gaiola, serve de proteção ao piloto em casos de colisão, acomodação do *cockpit*, suporte ao motor, e aos sistemas de transmissão, suspensão e frenagem do veículo.

O chassi baja é do tipo *Space Frame*, representado na Figura 3. Ele é caracterizado pela utilização de perfis metálicos unidos entre si por soldas, resultando em uma estrutura de baixo custo de fabricação, fácil modificação, baixo peso e com alta capacidade de absorção e dissipação de energia em caso de impacto. Como ponto negativo deste tipo de chassi é a baixa relação da rigidez com o peso, ocasionando o aumento do peso para a obtenção de maior rigidez do quadro, quando necessário. Weiss (2016)

Figura 3 - Chassi baja do tipo Space Frame.



Fonte: [vr3.ca/gallery.html](http://vr3.ca/gallery.html)

A competição organizada pela SAE possui normas regulamentadoras para o chassi dos veículos baja participantes. A SAE determina medidas máximas da gaiola com intuito de limitar as dimensões dos veículos e fornecer a segurança necessária ao piloto durante a competição. Pode-se destacar as seguintes regras, segundo o Regulamento Baja SAE Brasil (RBSB) 5 de 2016:

- Largura máxima do veículo: 1,62m;
- Comprimento livre, “Contudo os circuitos construídos para os Baja SAE baseiam-se em protótipos de 2,75m de comprimento. Veículos que excederem esta dimensão poderão ser incapazes de operar em alguns percursos”, como relata a RBSB 5.
- O chassi deve ser construído com tubos circulares de aço com um diâmetro externo de 25,4 mm, parede com espessura de 3,05 mm e um teor de carbono de pelo menos 0,18%. Ou com tubos circulares de aço ligado com rigidez à flexão e resistência à flexão pelas menos iguais à do tubo com teor de carbono de pelo menos 0,18%, desde que a espessura da parede seja igual ou maior que 1,57 milímetros.

### 2.2.3 Propriedades de um chassi

O chassi deve possuir propriedades que satisfaçam os requisitos de funcionamento do veículo, como os de desempenho, de segurança, dirigibilidade, aerodinâmica, custos de fabricação, manutenção, compactação e acessibilidade. Entretanto, a maioria destas condições é conflitante entre si, de acordo com Sampò (2011).

Do ponto de vista estrutural e dinâmico do chassi, suas propriedades inerciais e de rigidez são consideradas as mais importantes (Weiss, 2016).

### 2.2.3.1 Propriedades inerciais

Em um chassi, a distribuição da massa é um parâmetro fundamental nas propriedades inerciais do mesmo. Em carros de corrida, Milliken e Milliken (1995) diz que a localização do centro de gravidade (CG) é um dos parâmetros que mais influenciam no desempenho, pois para os pneus fornecerem a força necessária para realização de uma curva, por exemplo, as forças atuantes nos pneus são influenciadas pelo centro de gravidade do veículo. Para aperfeiçoar o desempenho dos carros de corridas são realizadas mudanças no CG e/ou outros componentes que alteram a distribuição de carga nas curvas, influenciando nas forças atuantes sobre as rodas.

O baixo peso e momento de inércia são importantes propriedade de um carro, visto que quanto menor o momento de inércia de um corpo, mais fácil será girá-lo ou alterar sua rota. De acordo com Sampò (2011) são preferíveis baixos valores de momento de inércia *yaw* (momento de inércia em torno do eixo vertical) em carros esportivos ou de passeio, pois torna o carro mais fácil de controlar.

### 2.2.3.2 Rigidez do chassi

A deflexão do chassi não deve impedir que as portas sejam fechadas ou que a suspensão funcione corretamente. Sampò (2011)

Weiss (2016) diz que a análise da rigidez à torção e à flexão são determinantes para o estudo de performance estrutural de um automóvel. A rigidez à torção está relacionada à deformação angular da estrutura devido a um torque ao longo de seu eixo longitudinal e a rigidez à flexão se refere a rigidez à deformação vertical que o quadro sofre devido cargas estáticas aplicadas.

Milliken e Milliken (1995) diz que se o chassi apresentar rigidez à torção satisfatória, conseqüentemente o mesmo terá rigidez a flexão satisfatória. Desta forma, pode-se dizer que a rigidez à torção é a propriedade mais importante de um chassi, servindo de critério de *design* e desempenho. Os valores típicos da rigidez torcional de chassi são expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores característicos de rigidez torcional para diferentes veículos.

Veículo	Rigidez torcional (Nm/grau)
Baja SAE*	750 – 1.500
Fórmula SAE	1.000 – 5.000
Carros de passeio	5.000 – 25.000
Carro de corrida Winston Cup**	15.000 – 30.000
Carros esportivos	15.000 – 40.000
Fórmula 1	10.000 – 100.000

Fonte: Barbosa (2015)

Em carros de corrida, a falta de rigidez do chassi torna o veículo imprevisível e pouco sensível às ações do piloto. Para Sampò (2011), a falta de rigidez no chassi induz alguns problemas:

- Efeitos dinâmicos e vibrações;
- Ocorrem deslocamentos dos pontos de fixação da suspensão, não garantindo o controle do movimento dos pneus;
- Comportamento imprevisível e de difícil controle;
- Maior probabilidade de ocorrer falha de componentes por fadiga;
- Baixa qualidade de direção;
- Difícil controle da distribuição de carga lateral.

Nos karts a falta de rigidez não implica um problema, visto que devido ao fato de não possuir suspensão resta ao chassi ser usado como substituto, devendo apresentar certa flexibilidade.

Para o aumento da rigidez é necessário um grande estudo, visto que o problema é conseguir aumentar a rigidez torcional do veículo, sem que haja um aumento grande do seu peso e mudança da localização do centro de gravidade. (Weiss, 2016). Desta forma, o grande desafio para os engenheiros projetistas é construir o veículo o mais leve possível e, ao mesmo tempo, resistente à flexão e à torção. Porém torná-lo resistente em alto grau tem a consequência de tornar a estrutura muito pesada.

Pereira (2016) diz que devido a esta contradição entre rigidez e peso, o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais é fundamental conferindo a rigidez necessária e o peso requerido ainda mais em carros de corrida.

A Figura 4 exemplifica de forma clara duas situações extremas de baixa e alta rigidez torcional.

Figura 4 - Exemplo comparativo da baixa e alta rigidez torcional.



Fonte: flatout.com

Analisando a Figura 4, a torção é completamente visível comparando a linha de base do vidro traseiro com o topo da tampa da caçamba. Do lado direito a torção do chassi é bem menor que a situação oposta em que a rigidez torcional é baixa.

Nos casos em que se tem um elevado valor de rigidez torcional pode resultar em excesso de tensões na estrutura devido ao fato dela não deformar de forma elástica como ocorre nos casos de baixa rigidez torcional.

A Figura 5 apresenta um quadro resumo que contém os problemas da baixa e elevada rigidez torcional de um chassi.

Figura 5 - Problemas causados pela baixa e elevada rigidez torcional.

Baixa rigidez torcional	Elevada rigidez torcional
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruídos</li> <li>• Movimentação de elementos da carroceria</li> <li>• Má dirigibilidade</li> <li>• Má vedação de partes móveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso elevado ( para mesmo material)</li> <li>• Concentração de tensões</li> </ul>

### 2.3 Cargas atuantes em um chassi automotivo

Riley e George (2002) diz que para projetar a estrutura de um automóvel ou qualquer outra estrutura, é necessário entender as diferentes cargas que atuam sobre a estrutura.

As cargas atuantes em um chassi podem ser de natureza estática ou dinâmica (magnitude, direção e posição variam ao longo do tempo). Para Sampò (2011), o chassi sofre vários tipos de esforços que são induzidos pela transmissão, suspensão, motor e carroceria do veículo. Dentre todos os componentes de um carro o motor, o diferencial e

a caixa de câmbio são os componentes mais pesados e por este motivo suas localizações no chassi são determinantes para o projeto e performance do veículo.

Em funcionamento, os subsistemas de um veículo geram forças que a estrutura básica deve suportar. As vibrações de funcionamento do motor transmitem ao chassi oscilações induzidas que podem causar fadiga nos pontos de fixação do motor no chassi. Da mesma forma, o torque da transmissão causa reações na estrutura do veículo transmitidas pelos pontos de fixação do diferencial no chassi.

## 2.4 Modos de deformação de um chassi automotivo

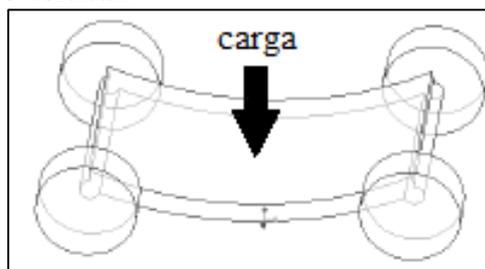
Para Weiss (2016) as deformações em um chassi automotivo são divididas em duas categorias: deformações globais, que ocorre quando todo o chassi é atingido e deformações locais em que apenas as fixações dos sistemas montados sob o chassi são deformadas.

Riley e George (2002) classifica as quatro principais formas de deformação em um chassi automotivo como: flexão vertical, flexão lateral, torção longitudinal e lozenging horizontal.

### 2.4.1 Flexão vertical

Cargas estáticas como o peso do piloto e dos componentes montados no chassi, além do seu próprio peso, fazem com que a estrutura sofra uma flexão no plano vertical. A resistência do veículo a esse modo de deformação é denominada rigidez à flexão vertical. De acordo com Weiss (2016) deformações simétricas, como as de flexão, afetam a qualidade de direção. A Figura 6 ilustra este tipo de deformação.

Figura 6 - Deformação flexão vertical.

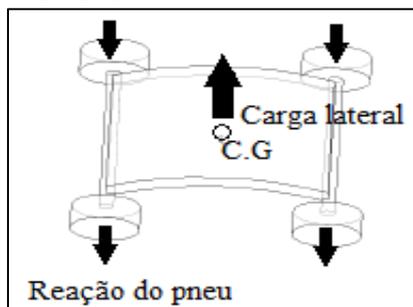


Fonte: RILEY e GEORGE, 2002. Adaptado

### 2.4.2 Flexão lateral

A flexão lateral ocorre em situações em que o chassi sofre alguma carga lateral ao longo de seu comprimento como, por exemplo, a força centrífuga que “empurra” o veículo para fora do traçado durante a execução de uma curva. A resistência a esta carga lateral se dá pelos pneus do veículo. A Figura 7 demonstra este tipo de deformação.

Figura 7 - Deformação flexão lateral.

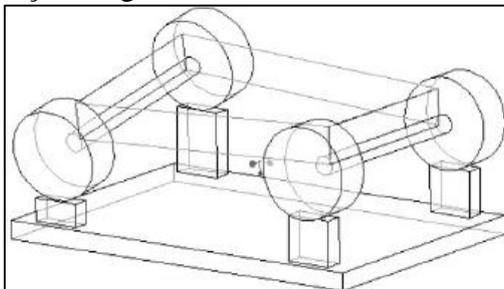


Fonte: RILEY e GEORGE, 2002. Adaptado

### 2.4.3 Torção longitudinal

O chassi sofre torção longitudinal em situações em que o veículo passa por alguma irregularidade na pista ou realiza uma curva, por exemplo, existindo uma diferença de carga normal dos pneus ao veículo. Como consequência desta diferença de carga, o chassi deforma torcionalmente afetando a dirigibilidade e desempenho do automóvel conforme mostra Figura 8. Denomina-se rigidez torcional a resistência do veículo a essa deformação em Newton metro por grau ( $N.m/^\circ$ ).

Figura 8 - Deformação torção longitudinal.



Fonte: RILEY e GEORGE, 2002. Adaptado

Riley e George (2002) e Milliken e Milliken, (1995) enfatizam que a rigidez torcional é a principal determinante da performance de um chassi, visto que grande parte

do movimento do carro está associada à função de transferência de carga entre os pneus. Além disso, em seus estudos os autores dizem que se a rigidez à flexão vertical e a rigidez à torção são suficientes, o chassi é satisfatório.

Nesta mesma linha de raciocínio, Weiss (2016) diz que as deformações não simétricas, como as induzidas pela flexibilidade à torção, influenciam principalmente na dirigibilidade do veículo ao realizar curvas, frenagens e acelerações, que são atreladas à performance e estabilidade do chassi.

#### 2.4.4 Lozenging horizontal

Ocorre este modo de deformação quando existem forças de sentidos opostos aplicadas nas rodas opostas do veículo, fazendo com que o chassi fique com o formato de um paralelogramo, como ilustra a Figura 9. Estas forças podem ser causadas por pequenos impactos ou defeitos na pista.

Figura 9 - Deformação *lozenging horizontal*.

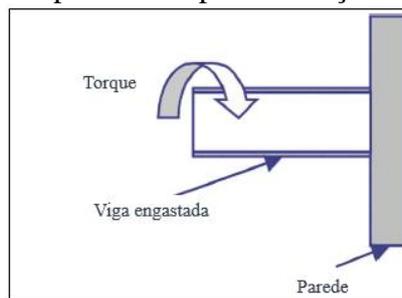


Fonte: RILEY e GEORGE, 2002. Adaptado

#### 2.5 Cálculo da rigidez torcional

Em seu estudo, Riley e George (2002) demonstra uma forma de teste experimental para a obtenção da rigidez torcional de um quadro veicular como é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Esquema de teste experimental para obtenção da rigidez torcional.

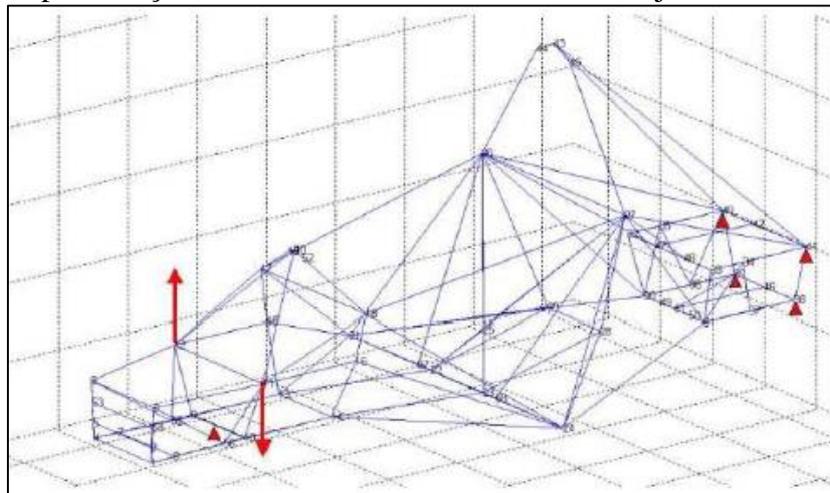


Fonte: Riley e George, 2002. Adaptado

Este modelo consiste em uma viga com uma de suas extremidades fixada a uma superfície rígida (em balanço) enquanto que sobre a outra extremidade é aplicado um torque em relação ao seu eixo longitudinal.

Analogamente a este modelo apresentado por Riley e George (2002), neste estudo o tubo representa o chassi do veículo baja, a extremidade fixada representa a fixação traseira do veículo e a extremidade livre a dianteira. A Figura 11 ilustra a aplicação desse modelo a um chassi de Fórmula SAE numérico.

Figura 11 - Representação do modelo teórico em um chassi baja.



Fonte: Riley e George, 2002.

A parte traseira da estrutura está fixada, não permitindo movimento em nenhuma direção enquanto que a dianteira se encontra livre e recebendo um momento binário em relação ao eixo longitudinal da estrutura que causa a sua torção.

Pode-se mensurar o quanto a estrutura em estudo resiste a esta deformação através do cálculo da rigidez torcional que é obtido com o valor do torque aplicado no eixo longitudinal e deflexão angular, conforme a equação a seguir.

$$K_t = \frac{T}{\theta} \quad (1)$$

onde:  $K_t$  = Rigidez torcional do chassi, em N.m/°

$T$  = Torque aplicado à estrutura, em N.m

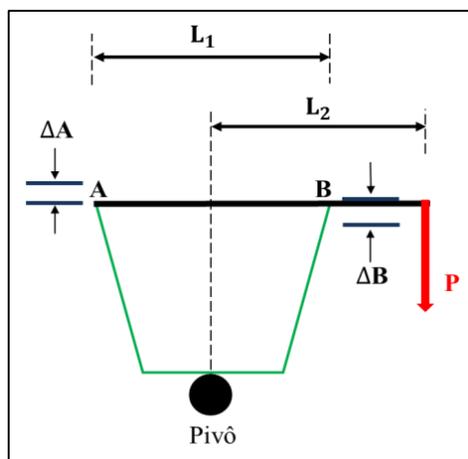
$\theta$  = Ângulo de deformação da estrutura, em graus.

Esta equação é a forma básica para obter o valor da rigidez torcional. Na literatura existem diferentes métodos de aplicação do torque que são demonstrados a seguir.

### 2.5.1 Cálculo da rigidez através de um momento torçor

Neste método, é aplicado um torque na dianteira da estrutura que se encontra livre causando a torção do chassi. A Figura 12 representa este modelo.

Figura 12 - Representação frontal do método de cálculo da rigidez torcional por meio de uma força aplicada a um lado do chassi.



Fonte: Próprio autor

Analisando a Figura 12, nota-se a presença de uma barra rígida presa nos pontos A e B da estrutura que serve como o braço de alavanca. Um corpo de peso  $P$  é aplicado em sua extremidade que faz com que o chassi gire em torno do pivô. Para Burba (2015) este é um método que facilita a fabricação de uma bancada de testes para aferição dos resultados.

O torque gerado pela carga colocada na extremidade do braço da alavanca e resistido pela fixação traseira da estrutura é o produto da força pela distância, conforme a equação a seguir:

$$T = PL_2 = (mg)L_2 \quad (2)$$

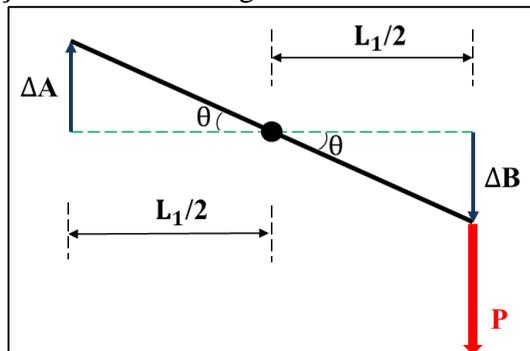
em que:  $m$  é a massa suspensa na extremidade da barra, em kg;

$g$  é a aceleração da gravidade, em  $m/s^2$ ;

$L_2$  é o braço da alavanca, em m.

A deflexão angular que a estrutura sobre é representada esquematicamente pela Figura 13.

Figura 13 - Representação da deflexão angular devido ao momento torçor.



Fonte: Próprio autor

A deflexão angular ( $\theta$ ) é calculada pela média dos deslocamentos angulares dos pontos A e B.

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\Delta A + \Delta B}{L_1} \right) \quad (3)$$

onde:  $\Delta A$  e  $\Delta B$  são os deslocamentos da estrutura, em m;

$L_1$  é a largura da estrutura, em m.

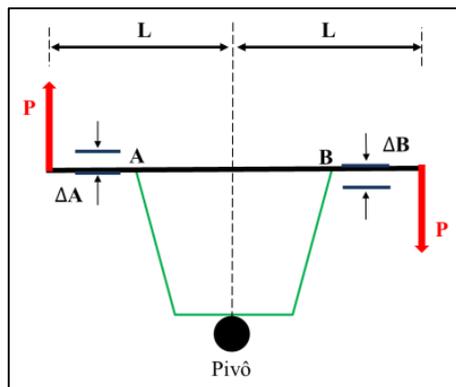
Com isso, substituindo as equações do torque e deflexão angular na equação da rigidez torcional por meio de um torque aplicado, resulta em:

$$K_t = \frac{P \cdot L_2}{\text{tg}^{-1} \left( \frac{\Delta A + \Delta B}{L_1} \right)} \quad (4)$$

### 2.5.2 Cálculo da rigidez através de um binário

Neste caso, um binário (duas forças de mesma intensidade, direção e sentidos opostos) é aplicado nas duas extremidades do braço de alavanca situado na dianteira da estrutura enquanto que sua traseira tem seus deslocamentos restringidos. Neste molde, o braço do binário é a distância entre as forças atuantes. A Figura 14 ilustra este modelo.

Figura 14 - Representação frontal do método de cálculo da rigidez torcional por meio de um binário aplicado no chassi.



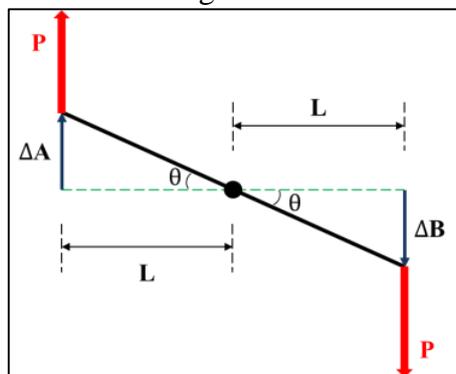
Fonte: Próprio autor

Para este caso o torque binário gerado é o produto das forças pela distância do eixo longitudinal, conforme a equação a seguir:

$$T = 2 PL = 2 (mg)L \quad (5)$$

A deflexão angular é o ângulo formado do centro da estrutura até a extremidade da estrutura, conforme esquematizado na Figura 15.

Figura 15 - Representação da deflexão angular devido ao binário.



Fonte: Próprio autor

A deflexão angular ( $\theta$ ) é calculada pela média dos deslocamentos angulares dos pontos A e B.

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\Delta A + \Delta B}{2L} \right) \quad (6)$$

Desta forma, a equação da rigidez torcional com um binário aplicado é:

$$K_t = \frac{2PL}{\text{tg}^{-1} \left( \frac{\Delta A + \Delta B}{2L} \right)} \quad (7)$$

## 2.6 Ensaios experimentais de rigidez torcional

Através do método experimental é possível obter valores reais de parâmetros como, por exemplo, o ângulo de torção ao longo do eixo longitudinal, sendo essa a principal vantagem do ensaio experimental em relação a simulação computacional que fornece resultados aproximados. Como desvantagem dos testes experimentais, Barbosa (2015) diz que não há um procedimento padrão para medir a rigidez torcional, desta forma, há diferentes maneiras de realizar o teste que se diferem na forma de aplicar o torque, de fixar a estrutura e na análise dos resultados.

Em seu estudo, Castro (2008) diz que devido à falta de padrão, as grandes montadoras de automóveis criam sua própria metodologia para realizar o ensaio de rigidez torcional. Mesmo com várias formas de realizar o teste, pode-se dizer que o mesmo possui uma configuração básica: manter a traseira fixa enquanto um momento torçor é aplicado na dianteira da estrutura.

Barbosa (2015) classifica o tipo de ensaio de rigidez em função de variáveis independentes que são o torque e ângulo de torção. Pode-se realizar um torque conhecido que resultará em um ângulo de torção ou aplica-se um ângulo de torção na estrutura e medem-se as forças de reações para obter o torque.

O mesmo autor também cita outro fator que varia nos ensaios de rigidez torcional é o local de aplicação da carga. Há ensaios em que apenas a rigidez do chassi é analisada e nestes a aplicação do torque e fixação são feitas diretamente no chassi. E há outros ensaios que analisam a rigidez do chassi incluindo a suspensão. Nestes ensaios a aplicação do torque é nos cubos das rodas.

Segundo Sampò (2011), as bancadas de ensaio para medir a rigidez torcional podem ser classificadas de acordo com os suportes dianteiros que sustentam a estrutura, existindo três configurações: pivô no centro, pivô no canto e dois suportes rígidos. Nestas três configurações a traseira da estrutura é fixada, enquanto que a dianteira é livre para sofrer torção.

### 2.6.1 Pivô de centro

A configuração com o pivô no centro é a mais utilizada entre as equipes universitárias participantes das competições da SAE. Oyama (2009), em seu trabalho

utiliza esta configuração de ensaio e, como alavanca, foi empregada uma viga I com um pivô de centro. Sobre esta viga, a dianteira do chassi foi apoiada e massas foram colocadas em uma das extremidades fazendo com que a barra gira em torno do pivô de centro. A Figura 16 demonstra o teste realizado por Oyama (2009)

Figura 16 - Esquema do teste de rigidez torcional utilizando um pivô central.



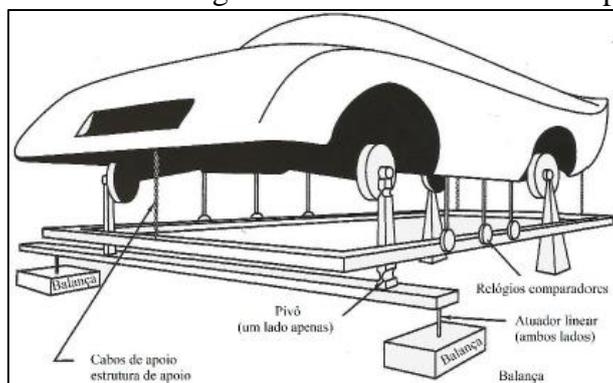
Fonte: Oyama (2009). Traduzido

### 2.6.2 Pivô no canto

Nesta forma de ensaio dois suportes conectados através de uma barra em dois parafusos atuadores lineares apoiam os cubos das rodas dianteira do veículo.

Através dos deslocamentos dos atuadores um binário é aplicado fazendo com que o chassi torça. Vários relógios comparadores são instalados em outra estrutura rígida para medir o ângulo de torção de diversas seções ao longo do eixo longitudinal do chassi. Esta configuração de teste de rigidez torcional é mostrada na Figura 17.

Figura 17 - Esquema do ensaio de rigidez torcional do chassi com pivô no canto.



Fonte: W. F. Milliken e D. L. Milliken, 1995, traduzido.

### 2.6.3 Dois suportes rígidos

Nesta modalidade dois suportes rígidos suportam a dianteira da estrutura e aplicam forças verticais sobre as torres dos amortecedores dianteiros de forma que o chassi sofra um torque puro por meio de um binário. Os deslocamentos que a estrutura sofre são aferidos por sensores instalados paralelamente ao eixo longitudinal do chassi. A Figura 18 demonstra este método de ensaio realizado pela FIAT.

Figura 18 - Ensaio de torção experimental padrão da FIAT.



Fonte: Castro, 2008.

## 2.7 Métodos de análise de estruturas

Dentro da engenharia o objetivo da análise estrutural é definir os componentes da estrutura que melhor apresentam estabilidade e capacidade de suportar as solicitações de carga Silva, (2009). Uma das maneiras de obter tais respostas são os métodos analíticos clássicos, os quais permitem o cálculo exato dos deslocamentos, deformações e tensões das estruturas para apenas casos simples, os quais fogem da maioria das aplicações práticas de engenharia.

Desta forma, para análises mais complexas em que o método analítico é inviável, os métodos computacionais são utilizados como forma de se obter respostas mais próximas possíveis sobre o comportamento da estrutura em análise.

Na análise numérica existem três classes diferentes de softwares que auxiliam os engenheiros a alcançar o seu objetivo de forma rápida, que são: o CAD (*Computer Aided Design*) que significa Desenho Assistido por Computador, o CAM (*Computer Aided Manufacturing*) que significa Manufatura Assistida por Computador e, por fim, o CAE (*Computer Aided Engineering*) cujo significado é Engenharia Assistida por Computador.

Por fim, o método experimental é realizado em laboratório através da instrumentação do corpode prova, por exemplo.

### **2.7.1 Método de elementos finitos**

O Método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico de simulações de diversos fenômenos físicos na análise e desenvolvimento de projetos complexos.

De acordo com Souza (2003) esse método constitui-se na divisão da área superficial da estrutura analisada em várias áreas menores, denominadas elementos, as quais são interconectadas por pontos em comum, chamados nós. O conjunto de elementos e nós é conhecido como malha.

Azevedo (2003) diz que quanto maior for a discretização do domínio do problema, maior será a proximidade das respostas obtidas perante o comportamento real da estrutura simulada. O método de elementos finitos (MEF) pode ser descrito de forma sucinta como a discretização do contínuo, em Elementos menores, os quais são conectados entre si por pontos discretos chamados de Nós. Madenci (2015)

Para cada elemento finito resultante da malha é estabelecido um comportamento aproximado, de forma que as incógnitas do problema em qualquer ponto da estrutura possam ser definidas em função das mesmas incógnitas nos pontos nodais de um elemento. Desta forma, com a soma das respostas de cada elemento se chega a um sistema de equações, cujas soluções são os valores das incógnitas nos pontos nodais e, a partir destes valores, pode-se calcular outros resultados.

### **2.7.2 Análise estática**

Esta forma de análise é utilizada para determinar deslocamentos e tensões sob a condição de carga estática. Existem dois tipos de análise estática: linear e não linear. A grande diferença entre elas se dá pelo fato de que na análise estática linear o material do componente em estudo respeita a lei relacionada com a elasticidade de corpos, conhecida como Lei de Hooke, que diz que a tensão é diretamente proporcional à deformação.

Madenci, 2015 diz que os carregamentos e condições de contorno aplicados ao corpo rígido em uma análise estática não variam no domínio do tempo

Para realizar uma análise estática de uma estrutura, inicialmente, se define o tipo do componente estrutural (tubo, placa, viga, etc.), em seguida são definidas as suas propriedades (coeficiente de Poisson, densidade, módulo de Young, etc.), geometria (área superficial, altura, largura, comprimento, etc.) e disposição (coordenadas espaciais) dos elementos a serem analisados. Após a definição destes parâmetros são determinadas as condições de contorno e, em seguida, é feita a aplicação da carga na forma de forças externas, forças de inércia (como gravidade) e pressões, por exemplo. Com estas variáveis definidas, o programa fornece as respostas de deslocamentos, deformações, tensões e forças de reação sob o efeito de cargas aplicadas.

### 3 METODOLOGIA

Este estudo foi dividido em duas etapas: etapa experimental e etapa numérica. Em ambas o objeto de estudo foi o chassi baja da equipe Baja Pampa que é constituído por tubo circulares de aço DIN 2440 NBR PRETO RED com diâmetro externo de 33,70 mm e espessura de 3,35 mm, segundo o certificado dos tubos apresentado no Anexo 1. O Anexo 2 mostra as propriedades dos tubos. A Figura 19 ilustra o protótipo baja da equipe Baja Pampa em sua situação atual.

Figura 19 - Protótipo baja da equipe Baja Pampa.



Fonte: Equipe Baja Pampa

Na etapa experimental foram realizados dois ensaios, um de rigidez torcional e outro de carga estática no chassi do protótipo baja da equipe Baja Pampa. Após a realização dos ensaios experimentais iniciou-se a fase numérica, onde foram realizadas simulações de rigidez torcional e carga estática com as mesmas condições de contorno realizadas nas respectivas simulações experimentais afim de validar o modelo em elementos finitos. Por fim, com o modelo validado foi feito outro estudo para obter o local do chassi com maior tensão devido a carregamentos estáticos específicos.

#### 3.1 Testes experimentais

Para a realização dos ensaios experimentais foi necessário retirar toda a suspensão, assoalho, “corta-fogo” e banco do protótipo baja, restando apenas o chassi tubular *Spaceframe*, foco deste estudo conforme ilustrada na Figura 20.

Figura 20 - Chassi Baja Pampa.



Para a realização do ensaio de rigidez torcional e de carga estática foram utilizadas as mesmas condições de contorno de fixação e apoio. O chassi foi fixado na parte traseira de forma que todos os graus de liberdade de translação ( $U$ ) e de rotação ( $\theta$ ) ficaram anulados e na dianteira foi utilizado um pivô de centro que apoia a dianteira da estrutura restringindo apenas a translação vertical ( $U_y$ ), conforme ilustra a Figura 21.

Figura 21 - Esquema dos ensaios experimentais.



### 3.1.1 Aparato experimental

Para a fixação da traseira do chassi foi necessário a fabricação de um suporte que conectou o chassi a uma outra estrutura mais robusta de forma que anulou totalmente os movimentos da traseira do chassi. Este suporte se acopla no chassi através das abas localizadas na parte de trás da estrutura onde a suspensão traseira é fixada no chassi.

Para garantir a estabilidade necessária a realização de ambos os experimentos, o suporte fabricado foi soldado em uma estrutura rígida localizada no campus da universidade, conforme ilustra a Figura 22.

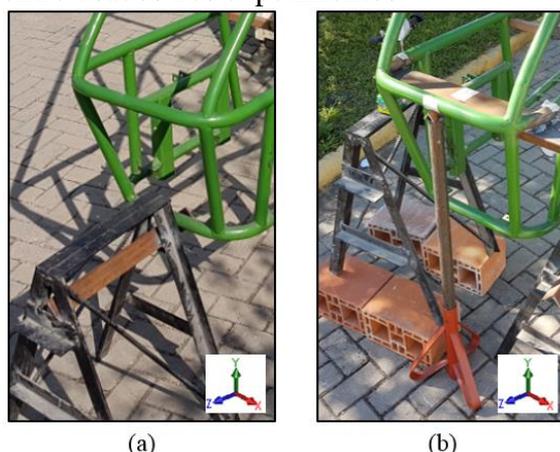
Figura 22 - Estrutura “branca” com o suporte de fixação traseira para o baja.



Na dianteira do chassi, como forma de apoio, foi visto no estudo bibliográfico três formas diferentes de pivôs: pivô de canto, de centro e dois suportes rígidos. Devido a forma geométrica simétrica da estrutura, foi estabelecida a utilização do apoio centrado na seção transversal da estrutura, sendo chamado de pivô de centro.

Para o ensaio de carga estática foi fabricado um pivô de centro que apoia a estrutura na barra inferior da parte frontal do chassi (Figura 23(a)). Por outro lado, para o ensaio de rigidez torcional foi necessária a utilização de um pivô de centro mais alto (Figura 23 (b)), de forma que o apoio realizado pelo pivô esteja na mesma altura do local em que a traseira do chassi foi fixada, diminuindo um possível erro de medição no ângulo de deformação dianteiro da estrutura.

Figura 23 - Pivôs de centro usados nos experimentos.



No ensaio de rigidez torcional, para a geração do torque dianteiro na estrutura foi fabricado uma barra de perfil trasversal ‘T’ rígida o suficiente para não ocorrer sua flexão e assim não influenciar no resultado do ensaio durante a aplicação do torque.

Para esta barra ficar estável e conectada ao chassi, visto que ela serviu como braço de alavanca para a geração de torque, foi decidido soldá-la com eletrodo revestido na

dianteira da estrutura resultando em um braço de alavanca de 0,7 metros do ponto de aplicação da carga até o centro trasnversal dianteiro do chassi. A Figura 24 demosntra a fixação da barra no chassi baja.

Figura 24 - Fixação da barra no chassi.



Como carga vertical para a geração do momento torçor na dianteira no ensaio de rigidez torcional e carga no ensaio de carga estática foi utilizado um balde com massa total de 19,70 kg, conforme ilustra a Figura 25.

Figura 25 - Recipiente utilizado como carga nos experimentos.



A medição do deslocamento que a dianteira da estrutura sofre devido ao momento torçor no ensaio de rigidez torcional foi realizada através de dois relógios comparadores da marca DIGIMESS de resolução centesimal. Este modelo de relógio possui uma escala auxiliar sobre a qual um ponteiro pequeno indica as voltas completas do ponteiro principal. Cada volta indica 1mm sendo que este modelo de relógio possui a capacidade de medir o máximo de 5 mm. A Figura 26 demonstra o relógio comparador utilizado.

Figura 26 - Relógio comparador utilizado no experimento de rigidez torcional.



No ensaio de carga estática foram utilizados strain gages do tipo folha da Kyowa de  $120 \Omega$  para medir a deformação em certos pontos da estrutura, conforme a Figura 27 ilustra.

Figura 27 - Strain gage Kyowa de  $120 \Omega$  do tipo folha.



Para a aquisição dos sinais dos extensômetros utilizou-se o condicionador de sinais Spider 8 da HBM, representado na Figura 28.

Figura 28 - Condicionador de sinais Spider 8.



### 3.1.2 Ensaio de rigidez torcional

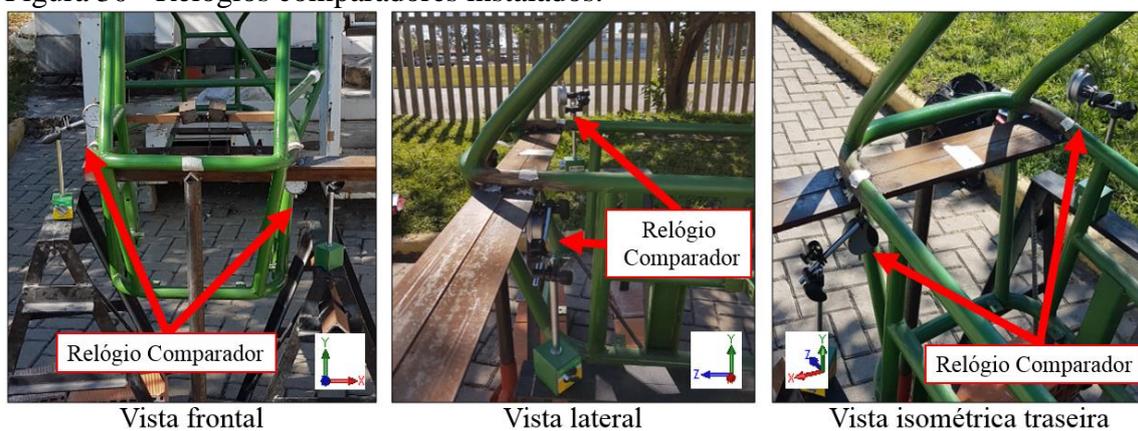
A Figura 29 ilustra a chassi fixado na traseira e apoiado na dianteira, pronto para receber o torque.

Figura 29 - Chassi configurado para o ensaio de rigidez torcional.



Para obter o deslocamento que a dianteira da estrutura sofreu devido ao torque gerado no sentido horário, os relógios comparadores foram instalados conforme a Figura 30 ilustra.

Figura 30 - Relógios comparadores instalados.



O torque aplicado na dianteira do chassi foi através de uma carga vertical para baixo de 19,70 kg com braço de alavanca de 0,7 metro, gerando um torque no sentido horário, conforme ilustra a Figura 31.

Figura 31 - Aplicação do torque na dianteira do chassi.



Pela Equação 2, o torque aplicado foi de:

$$T = PL_2 = (mg) L_2 \quad (2)$$

$$T = (19,7 \text{ kg}) \left( \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} \right) (0,7 \text{ m}) = 135,27 \text{ Nm}$$

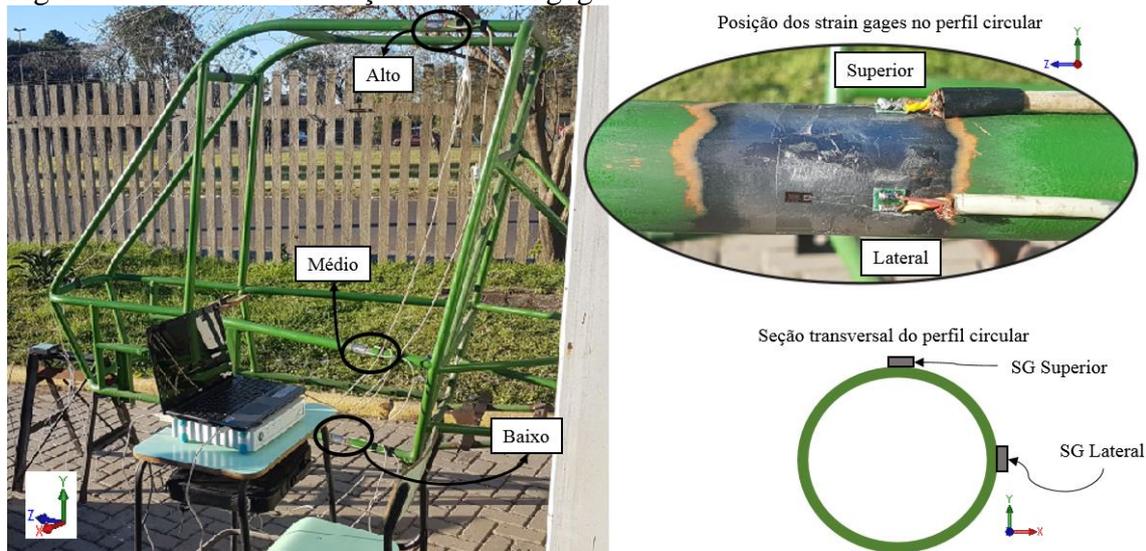
Para diminuir a probabilidade de erro de medição dos relógios comparadores, o torque foi realizado três vezes, tomando-se a média aritmética das três medições.

### 3.1.3 Ensaio de carga estática

No ensaio de carga estática, a estrutura foi fixada da mesma forma como foi realizado no ensaio de rigidez torcional e, na dianteira, apoiada na barra inferior em relação a utilizada como apoio no ensaio de rigidez.

Neste ensaio foram instalados strain gages em 3 pontos diferentes do chassi denominados “Baixo, Médio e Alto”. Em cada um destes pontos foram instalados dois strain gages na posição “Superior” e “Lateral” do perfil circular que constitui o chassi afim de aferir a deformação longitudinal e transversal que ocorre nestes pontos específico da estrutura devido a aplicação de 19,7 kg na posição aproximada em que o banco do piloto ocupa no veículo. A Figura 32 ilustra a posição de instalação dos extensômetros na estrutura.

Figura 32 - Local de instalação dos strain gages.



Foram realizados três movimentos de aplicação da carga para minimização de prováveis erros de leitura dos extensômetros. A carga estática, aplicada na região a qual o piloto ficará, esta ilustrada na Figura 33. Utilizou-se uma ripa de madeira como suporte ao recipiente usado como carga, de forma que a mesma fosse aplicada no centro da secção transversal da estrutura.

Figura 33 - Local de aplicação da carga estática.

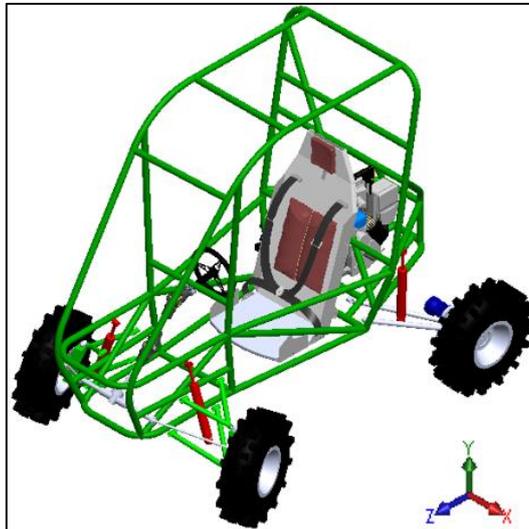


### 3.2 Simulações computacionais

Após a realização dos ensaios experimentais, iniciou-se a fase computacional do estudo do chassi baja com o objetivo de calibrar e validar o modelo computacional da estrutura. As simulações foram realizadas no software de simulação por elementos finitos

ANSYS Workbench. A Figura 34 ilustra a montagem completa do protótipo baja SAE da equipe Baja Pampa feita no programa SolidWorks 2013 pela equipe baja.

Figura 34 - Modelo virtual do protótipo baja SAE da equipe Baja Pampa.



Fonte: Equipe Baja Pampa

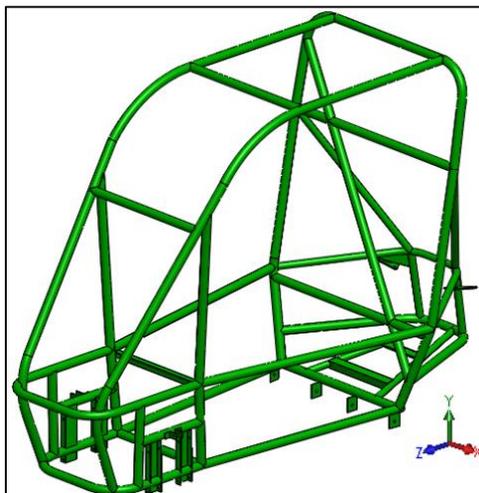
Foram realizadas simulações de rigidez torcional e de carga estática, sendo que em ambas foram utilizadas as mesmas condições de contorno de fixação, apoio e carregamento implementadas nos ensaios experimentais..

### 3.2.1 Modelo numérico do Chassi

Inicialmente foram feitas adequações do modelo computacional repassado pela equipe Baja Pampa, mostrado na Figura 34, de modo a incorporar algumas atualizações estruturais que a equipe realizou. Dentre as adequações realizadas está a exclusão de barras circulares nas laterais do chassi, alteração das dimensões de tubos circulares da traseira, inclusão de cantoneiras que suportam o motor além da inserção de perfis “U” e de abas que conectam a suspensão dianteira e traseira ao chassi, respectivamente.

No processo da exportação do modelo do Solidworks para o Workbench, o material adotado para o modelo foi aço estrutural da biblioteca de materiais do Ansys Workbench. A Figura 35 ilustra o modelo computacional final do chassi, posteriormente as adequações descritas anteriormente.

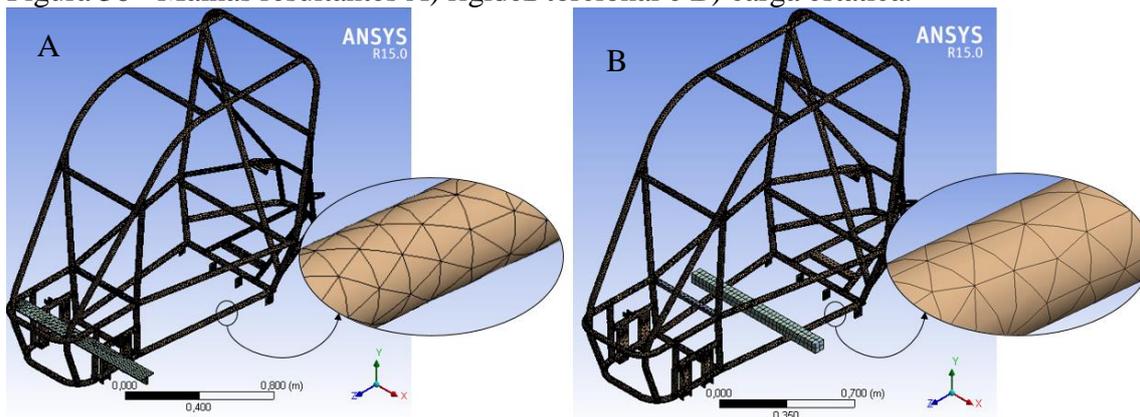
Figura 35 - Modelo virtual do chassi.



### 3.2.2 Malha

Após a importação da estrutura baja para o ANSYS o primeiro passo foi gerar a malha, ou seja, dividir a estrutura em elementos e nós. Na simulação de rigidez torcional o chassi e a barra utilizada para gerar o torque na dianteira foram importados juntos (um único corpo), da mesma forma como na simulação de carga estática com a ripa que serviu de apoio para aplicação da carga. As malhas resultantes para a realização das simulações de rigidez torcional e carga estática estão ilustradas na Figura 36.

Figura 36 - Malhas resultantes A) rigidez torcional e B) carga estática.



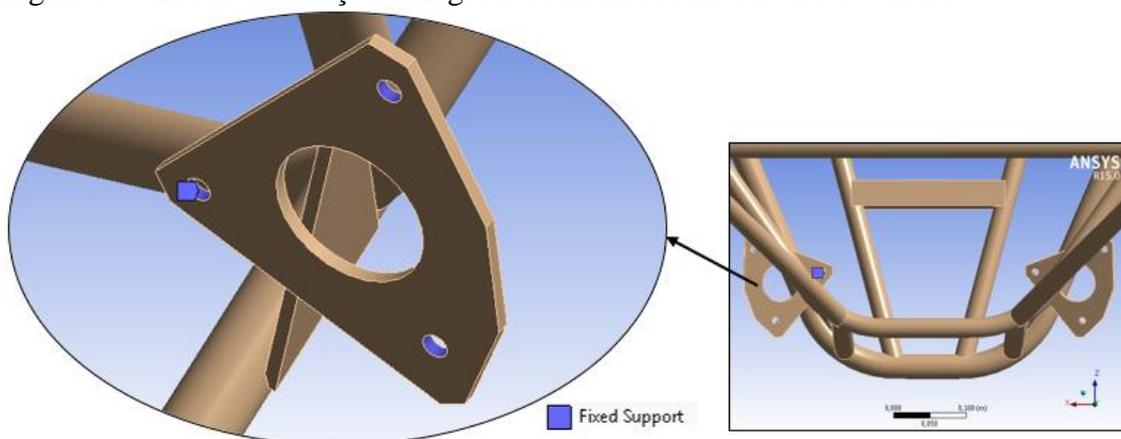
O software implementou uma malha padrão a qual foi refinada em termos de tamanho, relevância e modo resultando em uma malha com elementos do tipo *SOLID92*, o qual é recomendado para a modelagem tridimensional de estruturas sólidas possuindo dez nós com três graus de liberdade cada um: translação em x, y e z.

Após a geração da malha foram definidas as condições de contorno e local de aplicação do carregamento.

### 3.2.3 Fixação traseira do chassi

Para todas as simulações de rigidez torcional e carga estática foi implementada uma fixação total (engaste) na parte traseira da estrutura selecionando as faces internas dos locais em que os parafusos são colocados nos ensaios experimentais para fixar a traseira do chassi baja na estrutura branca (ver Figura 22). Estes locais estão representados na Figura 37.

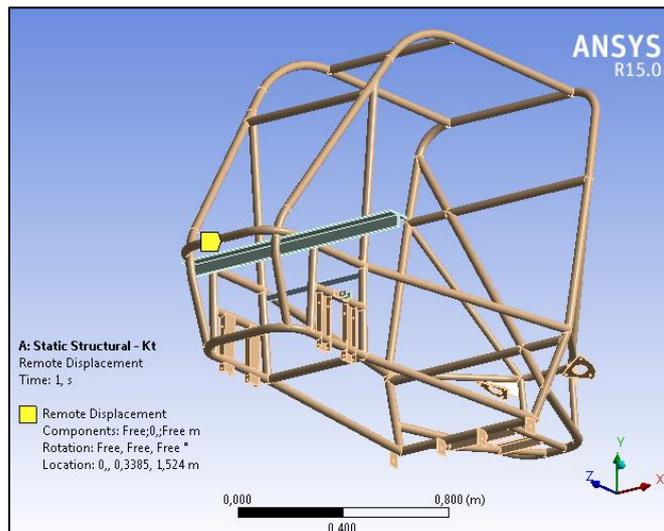
Figura 37 - Locais de fixação sem graus de liberdade na traseira do chassi.



### 3.2.4 Simulação de rigidez torcional

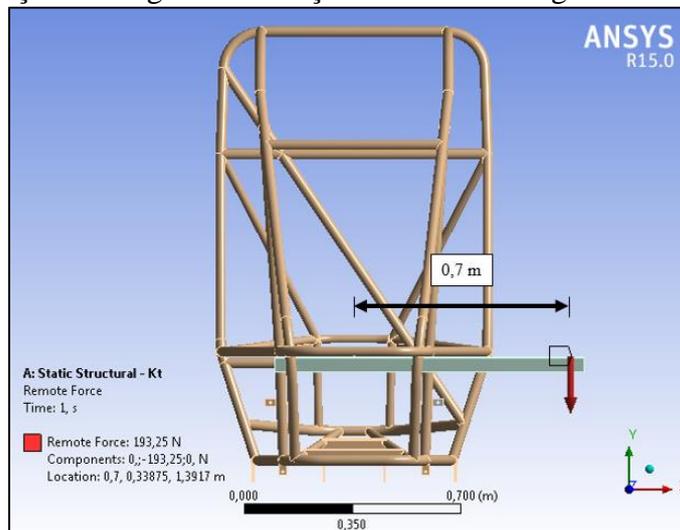
Para a simulação de rigidez torcional, na parte dianteira da estrutura uma das barras transversais foi configurada para simular uma condição de apoio simples. A barra teve restringida a sua translação vertical em seu centro da seção. Desta forma simulou-se a mesma condição de apoio utilizada na análise experimental (ver Figura 31). A Figura 38 demonstra o local de apoio frontal no modelo numérico.

Figura 38 - Restrição de apoio simples para simular o ensaio de rigidez torçio(estrutura vista por baixo).



Para a geração do mesmo torque que foi aplicado no ensaio experimental o carregamento aplicado foi de 193,25 N, correspondente a massa de 19,7 kg aplicada a uma distância de 0,7 metros do pivô de centro. A Figura 39 ilustra a aplicação da carga.

Figura 39 - Aplicação da carga na simulação do ensaio de rigidez torcional.

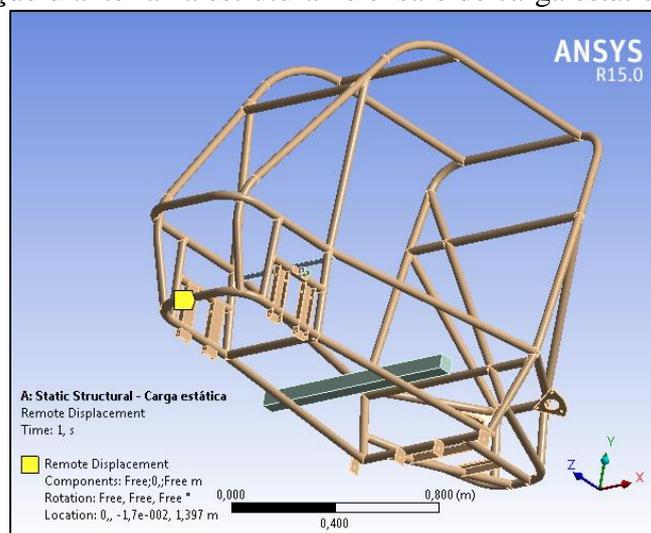


### 3.2.5 Simulação de carga estática

A simulação de carga estática foi realizada com a mesma fixação traseira utilizada na simulação de rigidez torcional. Na dianteira, foi alterada a barra para implementação do apoio, para a de carga estática como ocorreu no seu respectivo ensaio experimental. A

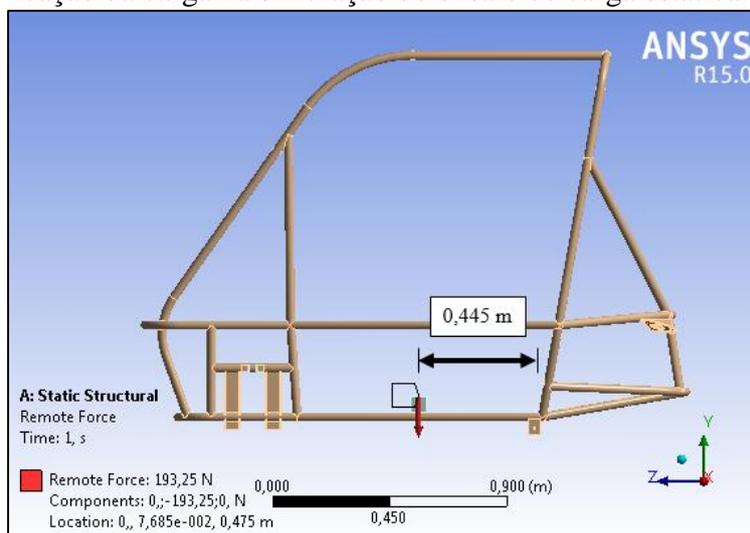
Figura 40 demonstra o local de apoio na estrutura para o ensaio numérico de carga estática.

Figura 40 - Restrição dianteira na estrutura no ensaio de carga estática.



Na simulação de carga estática um carregamento de 193,25 N, correspondente a massa de 19,7 kg foi aplicada, conforme ilustra a Figura 41. Esta posição aproxima-se à que o piloto ocupa na estrutura.

Figura 41 - Aplicação da carga na simulação do ensaio de carga estática.



### 3.2.6 Simulação de detecção do ponto crítico

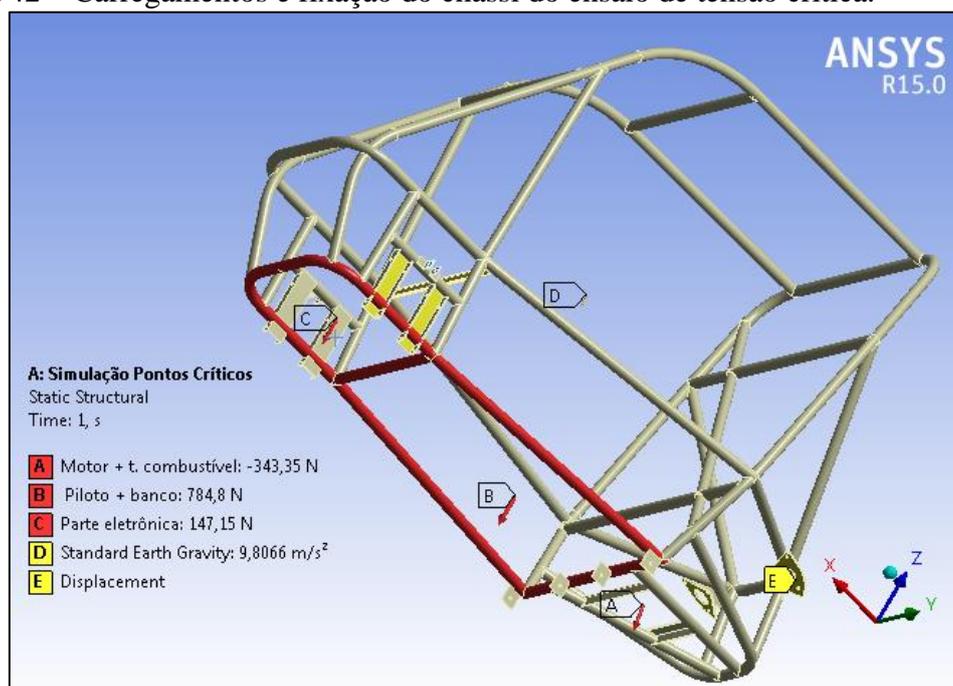
A calibração e validação do modelo em elementos finitos do baja permite que outras simulações sejam feitas a fim de abastecer a equipe Baja Pampa com estudos referentes a estrutura. Com isso, um novo estudo com carregamentos estáticos que simulam o peso da parte eletrônica do baja (fios e bateria) localizados na dianteira do chassi, motor e tanque de combustível localizadas na traseira do chassi e piloto localizado no centro do chassi foi realizado com o propósito de verificar os pontos da estrutura que apresentam as maiores tensões (pontos críticos). Na simulação, foi considerado os seguintes carregamentos:

- Piloto: 80 kg
- Motor (Briggs Stratton 10 HP) e tanque de combustível: 35 kg
- Parte eletrônica: 15 kg

Como forma de fixação, foi selecionado os locais que a suspensão dianteira e traseira é conectada ao chassi, de forma que estes locais não tenham nenhum descolamento.

A Figura 42 ilustra os carregamentos aplicados (em vermelho) e fixação do chassi (em amarelo).

Figura 42 – Carregamentos e fixação do chassi do ensaio de tensão crítica.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados inicialmente os resultados dos ensaios experimentais seguidos pelos resultados dos ensaios numéricos.

### 4.1 Ensaio experimental de rigidez torcional

Através do ensaio experimental foi possível obter os deslocamentos  $\Delta A$  e  $\Delta B$  na dianteira da estrutura em decorrência do momento torçor aplicado. A Figura 43 ilustra o momento torçor aplicado e os deslocamentos causados por ele.

Figura 43 - Deslocamentos dianteiros do chassi em decorrência do torque.



Os valores, indicados pelos relógios comparadores, dos deslocamentos resultantes na estrutura devido ao momento torçor aplicado estão na Tabela 2, para três repetições.

Tabela 2 - Deslocamentos  $\Delta A$  e  $\Delta B$  resultantes do torque aplicado.

Ensaio/repetição	$\Delta A$ ( $10^{-4}$ m)	$\Delta B$ ( $10^{-4}$ m)
1	5,9	6,3
2	6,0	6,5
3	5,9	6,4

Por meio da equação (3) é possível obter a deformação angular ( $\theta$ ):

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\Delta A + \Delta B}{L_1} \right) \quad (3)$$

onde  $L_1 = 0,491$  m referente a distância horizontal entre os relógios comparadores.

Substituindo o valor do torque aplicado (135,2799 N) e deflexão angular obtida na equação (3) é possível obter a rigidez torcional do chassi por meio da equação (1):

$$K_t = \frac{T}{\theta} \quad (1)$$

A Tabela 3 contém todos os valores de deformação angular e rigidez torcional obtidos nas três repetições.

Tabela 3 - Deformação angular e rigidez torcional resultantes.

Ensaio/repetição	$\theta$ (graus)	$K_t$ (Nm/°)
1	0,142	950,2
2	0,145	927,4
3	0,143	942,3
Média		940,0

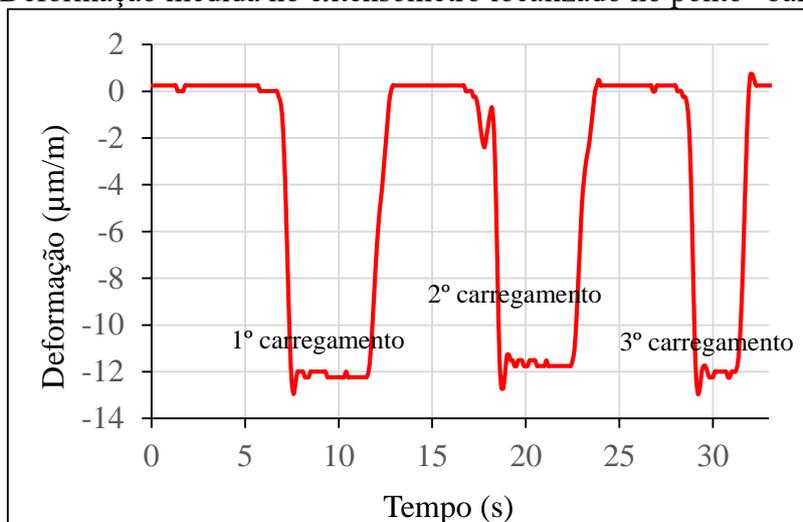
Fazendo uma média dos três valores obtidos de rigidez torcional chega-se ao valor resultante de rigidez torcional obtida experimentalmente de 940,0 Nm/°.

O valor obtido de rigidez torcional ficou no intervalo aceitável que Barbosa (2015) apresenta em seu estudo, referente a um veículo baja (ver Tabela 1). Este resultado mostra que mesmo sem haver nenhum estudo de mudança estrutural do chassi que cause a diminuição de seu peso, por exemplo, ele já apresenta certa confiabilidade de desempenho, visto que Riley e George (2002) e Milliken e Milliken, (1995) citam que a rigidez torcional é o principal critério para avaliar o desempenho de um chassi.

## 4.2 Ensaio experimental de carga estática

A partir da carga estática aplicada no chassi (ver Figura 33), foram feitas as medidas da deformação indicada pelo extensômetros. Dentre todos os extensômetros instalados na estrutura, apenas o instalado na posição "Baixo-Superior" (ver Figura 32) apresentou uma deformação significativa (em termos da relação sinal/ruído) para a carga aplicada. O gráfico mostrado na Figura 43 apresenta os resultados da deformação longitudinal  $z$  medida, no ponto Baixo- Superior para três repetições do teste.

Figura 44 - Deformação medida no extensômetro localizado no ponto “baixo-superior”.



Observando o gráfico da Figura 44 é possível ver três picos referentes aos valores máximos de deformação, sendo: -12,96; -12,72 e -12,96. Fazendo a média para três repetições, tem-se:

$$\varepsilon_{m\acute{e}dia} = \frac{-12,96 - 12,72 - 12,96}{3} = -12,88 \mu\text{m/m}$$

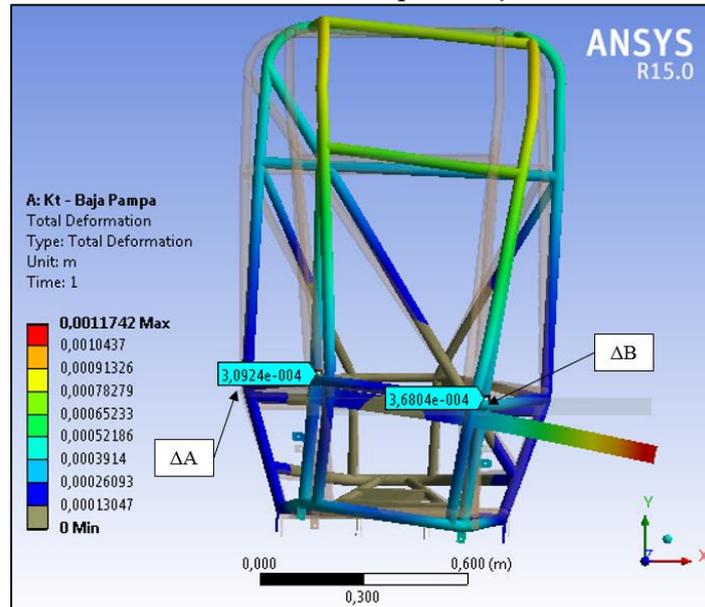
### 4.3 Calibração e validação do modelo em elementos finitos

Para a validação do modelo computacional, foi realizada a simulação de rigidez torcional.

#### 4.3.1 Simulação de rigidez torcional

Os resultados da simulação de rigidez torcional são os deslocamentos verticais  $\Delta A$  e  $\Delta B$  (ver Figura 42) que a dianteira do chassi se desloca devido ao torque aplicado. Os deslocamentos obtidos pela simulação estão demonstrados da Figura 45.

Figura 45 - Deslocamentos  $\Delta A$  e  $\Delta B$  causados pela torção do modelo numérico.



Obtidos os valores  $\Delta A$  e  $\Delta B$  que a estrutura deslocou é possível, por meio da equação (3), obter a deformação angular ( $\theta$ ) da dianteira do chassi:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\Delta A + \Delta B}{L_1} \right) \quad (3)$$

onde  $L_1 = 0,491$  m é a distância horizontal dos locais de aferição dos deslocamento  $\Delta A$  e  $\Delta B$ .

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{(3,0924 + 3,6804) \times 10^{-4} \text{ m}}{0,491 \text{ m}} \right)$$

$$\theta = 0,079^\circ$$

Substituindo o valor do torque aplicado (135,27 N) e deflexão angular obtida na equação (3) é possível obter a rigidez torcional do chassi por meio da equação (1):

$$K_t = \frac{T}{\theta} \quad (1)$$

$$K_t = \frac{135,27 \text{ Nm}}{0,079^\circ}$$

$$K_t = 1711,56 \text{ Nm}/^\circ$$

O resultado obtido foi fora do intervalo aceitável para um veículo baja que Barbosa (2015) apresenta em seu estudo (ver Tabela 1) e além disso não foi próximo ao valor de rigidez torcional obtido experimentalmente, como apresenta a Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação de  $K_t$  experimental com numérica.

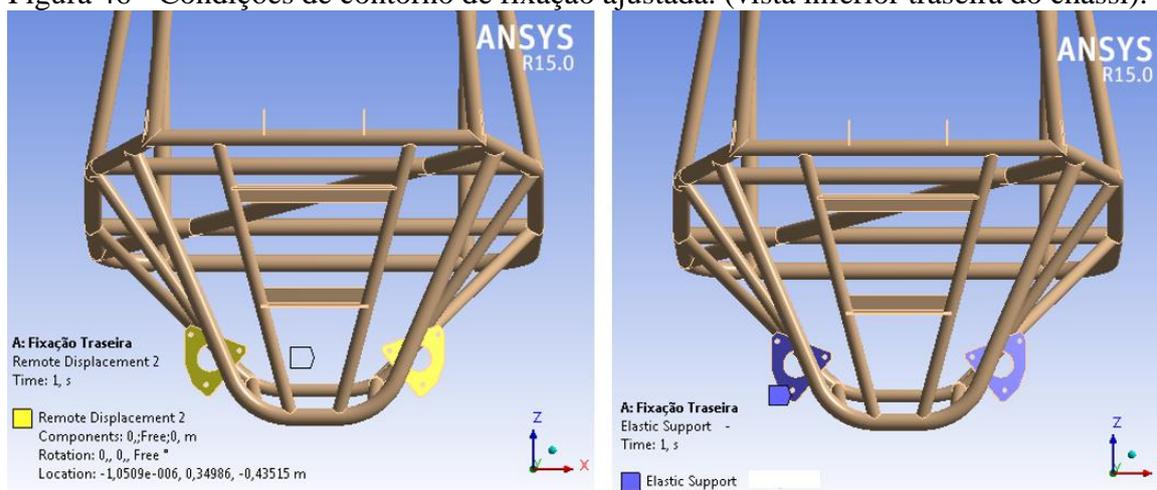
Ensaio experimental $K_t$	Ensaio numérico $K_t$	Diferença
940,0 Nm/°	1711,56 Nm/°	82,08%

O modelo numérico se mostrou muito rígido, não sendo validado. Com isso foi preciso rever os parâmetros que possam ter ocasionados o excesso de rigidez do modelo numérico. Dentre eles, as condições de contorno da simulação foram revistas com o objetivo de calibrar o modelo numérico com o experimental.

A ‘estrutura branca’ que sustenta a traseira do chassi pode não oferecer a rigidez e estabilidade total que foi considerado anteriormente quando o chassi é conectado à ela. Além disso, outros fatores influenciam na resposta de deslocamentos da estrutura como a fixação com parafusos do chassi junto ao suporte fabricado pode ter certa “folga” e o desnível do terreno, por exemplo são hipóteses que tornam necessário o ajuste e da condição de contorno de fixação do chassi.

Com isso, para ajuste da condição de contorno de fixação traseira do chassi foi excluído o “Fixed Support” (suporte fixado) e adicionado o “Remote Displacement” (deslocamento remoto) com restrição de translação em  $X$  e  $Z$  e de rotação em  $X$  e  $Y$  e o “Elastic Support” (suporte elástico), ambos nas mesmas faces, com intuito de fixar o chassi à estrutura da mesma forma feita experimentalmente. As novas condições de contorno de fixação traseira do chassi estão ilustradas na Figura 46.

Figura 46 - Condições de contorno de fixação ajustada. (vista inferior traseira do chassi).

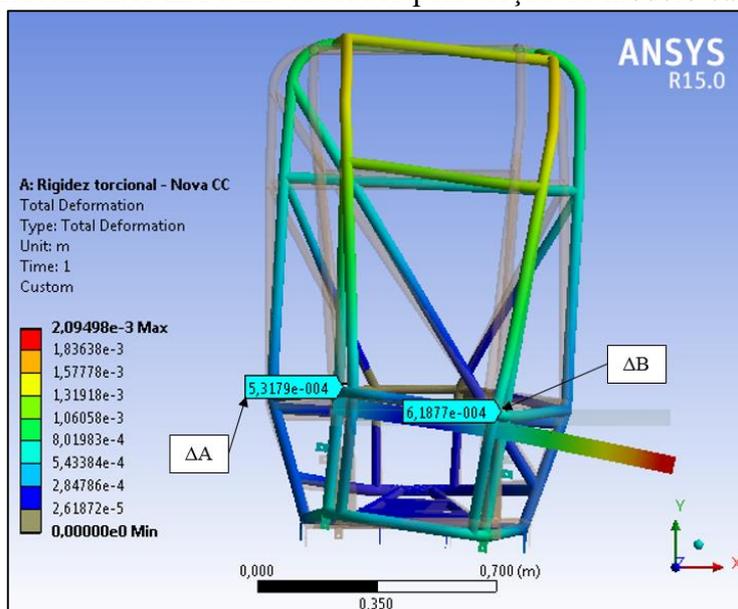


A simulação de rigidez torcional com as novas condições de contorno de fixação da traseira do chassi está no próximo item.

### 4.3.2 Ensaio numérico de rigidez torcional com modelo calibrado

A Figura 47 demonstra os deslocamentos  $\Delta A$  e  $\Delta B$  causados pela torção.

Figura 47 - Deslocamentos  $\Delta A$  e  $\Delta B$  causados pela torção do modelo calibrado.



Através do mesmo equacionamento e procedimentos realizados para obter o valor de rigidez da estrutura através dos deslocamentos causados pelo torque, chegou-se nos valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados da simulação de rigidez torcional com modelo calibrado

$\Delta A$ ( $10^{-4}$ m)	$\Delta B$ ( $10^{-4}$ m)	$\theta$ (graus)	$K_t$ modelo calibrado (Nm/°)
5,3179	6,1877	0,134	1008,8

A Tabela 6 contém o comparativo entre o valor de rigidez torcional do ensaio experimental com o do modelo calibrado.

Tabela 6 - Comparação da rigidez torcional obtida experimentalmente com a obtida computacionalmente.

Ensaio experimental $K_t$	Ensaio numérico $K_t$ modelo calibrado	Diferença
940,00 Nm/°	1008,8 Nm/°	7,31 %

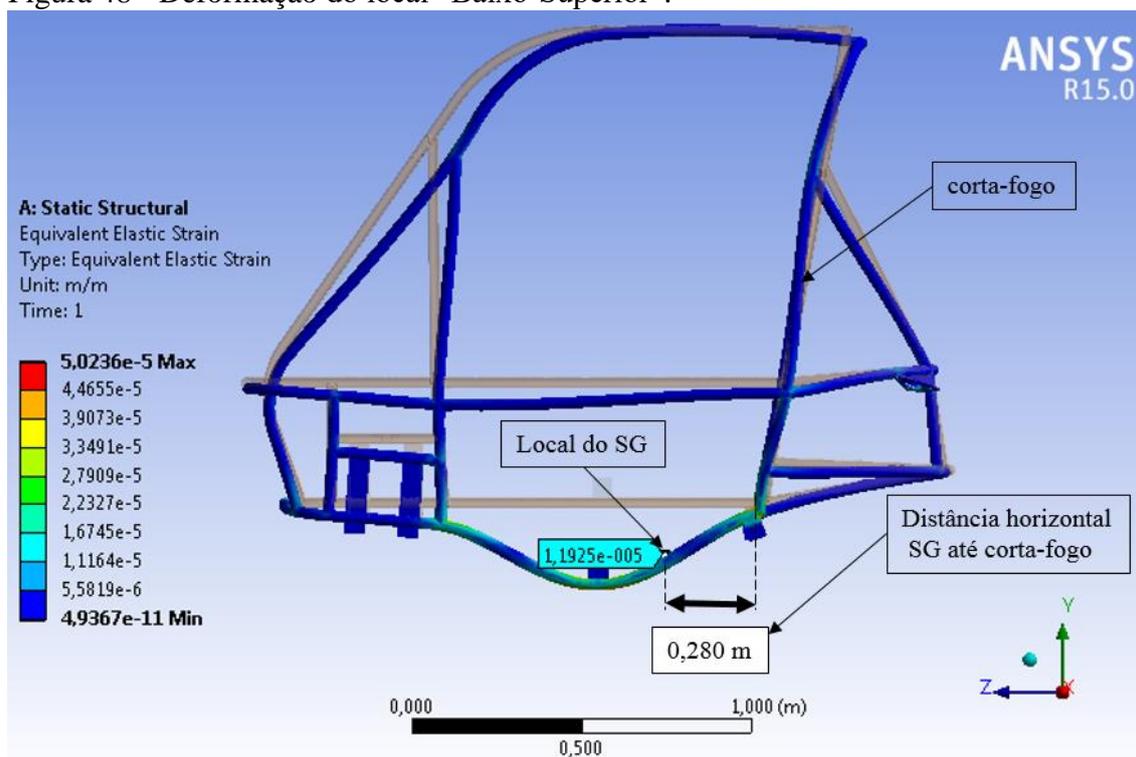
Analisando os valores de  $K_t$  obtidos, verifica-se que os dois valores são próximos e estão na faixa equivalente a veículos baja SAE conforme Barbosa (2015) apresentou na Tabela 1.

A proximidade da resposta de rigidez torcional do modelo numérico com o seu respectivo modelo físico permite afirmar que o modelo numérico está validado.

#### 4.3.3 Ensaio numérico de carga estática com modelo calibrado

Como resultado do ensaio numérico de carga estática, tem-se a deformação sofrida pela estrutura no local em que foi instalado o strain gage denominado "Baixo-Superior" no ensaio experimental (ver Figura 32). A Figura 48 ilustra a resposta de deformação do eixo longitudinal  $z$  da estrutura no local "Baixo-Superior" que está 0,28 m distante do corta-fogo.

Figura 48 - Deformação do local "Baixo-Superior".



Observando a Figura 48, o valor de deformação longitudinal obtido na posição "Baixo-Superior" foi de  $11,92 \times 10^{-6}$  m/m que equivale a  $11,92 \mu\text{m/m}$ , se mostrando ser uma deformação pequena para a carga aplicada.

A Tabela 7 contém o comparativo entre o valor de deformação obtido no ensaio experimental com o ensaio numérico de carga estática com o modelo calibrado.

Tabela 7 - Comparação da deformação do obtida experimentalmente com a obtida computacionalmente.

Ensaio experimental de carga estática	Ensaio numérico de carga estática modelo calibrado	Diferença
12,88 $\mu\text{m/m}$ .	11,92 $\mu\text{m/m}$ .	7,45%

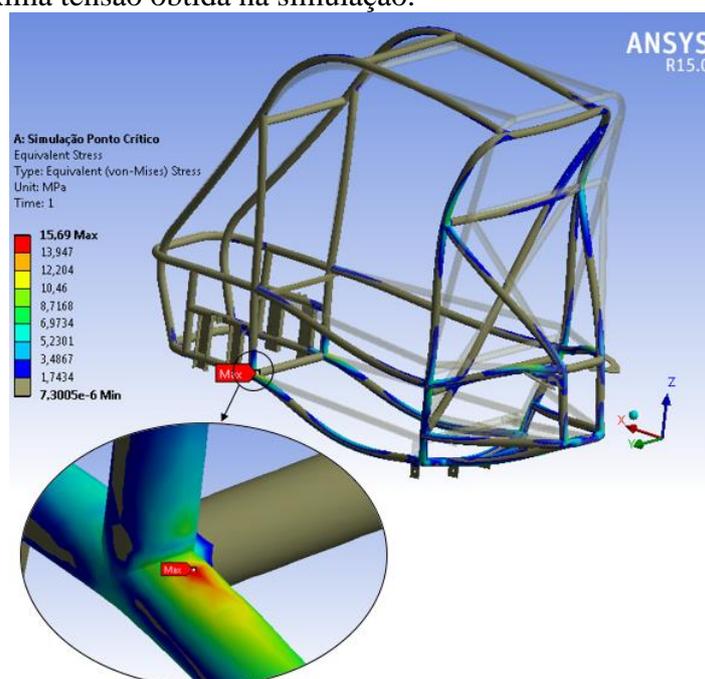
A simulação de carga estática com o modelo calibrado forneceu uma deformação de 7,45% menor que o valor obtido no seu respectivo ensaio experimental.

Devido à proximidade dos valores que as simulações computacionais de rigidez torcional e carga estática em relação aos respectivos ensaios experimentais, pode-se comprovar que o modelo calibrado está validado.

#### 4.3.4 Ensaio numérico de detecção do ponto crítico

Para a detecção do ponto crítico da estrutura, foi feito um estudo numérico com cargas estáticas representando o peso do piloto, tanque de combustível, motor e parte elétrica do veículo, como apresentado no item 3.2.6. A Figura 49 ilustra as tensões resultantes decorrentes dos carregamentos com destaque para o local com maior tensão.

Figura 49 - Máxima tensão obtida na simulação.



Observando a Figura 49 é possível ver que a máxima tensão resultante devido aos carregamentos estáticos aplicados que simulam o peso do piloto, motor e parte elétrica do baja foi de 15,69 MPa próximo ao local de ligação de dois perfis circulares que constituem o chassi, conforme a figura destaca.

Sabendo que o material possui uma tensão limite de escoamento de 185 MPa (Anexo II), percebe-se que o valor máximo obtido na simulação estática está bem abaixo da capacidade máxima do material se deformar de forma elástica.

Com isso, considerando todos os carregamentos estáticos aplicados, pode-se concluir que a estrutura resiste de forma segura, visto que a máxima tensão foi de aproximadamente 11 vezes menor que a tensão limite do material.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho de conclusão de curso realizou um estudo experimental e numérico do chassi baja da equipe Baja Pampa com objetivo de suprir a equipe com materiais referentes a estrutura. Dentre todas as propriedades de um chassi, este estudo realizou a instrumentação da estrutura para medir deformações, forneceu dados referente ao comportamento dinâmico do chassi e obteve a rigidez à torção da estrutura, sendo esta a propriedade de maior importância para o desempenho satisfatório de um chassi.

Através do ensaio de rigidez torcional do chassi baja realizado experimentalmente, chegou-se ao valor  $K_t = 940,00 \text{ Nm/}^\circ$  concluindo que este valor é apropriado para um chassi baja visto que a revisão bibliográfica mostrou que para veículos do tipo baja SAE a rigidez torcional do chassi deve estar entre 750 a 1500  $\text{Nm/}^\circ$ . Mesmo sem nenhum estudo prévio o primeiro protótipo da equipe se enquadrou nos valores de rigidez torcional aceitáveis. Entretanto, para sua melhoria de desempenho estudos que causem a efetiva diminuição da massa mantendo a rigidez torcional é bem-vinda.

Na etapa computacional do trabalho, o primeiro resultado de rigidez torcional obtido foi muito elevado concluindo que o modelo numérico não estava condizente com seu modelo físico.

No processo de calibração do modelo numérico foram revistas todas as condições de contorno da simulação e detectada que a fixação traseira do chassi não estava inteiramente de acordo com a feita experimentalmente. Como ajuste desta condição de contorno foi retirado o engaste total na traseira do chassi e adicionada a condição de deslocamento nulo (“Remote Displacement”) e suporte elástico (Elastic Support).

Refazendo a simulação com a nova condição de contorno de fixação da traseira a metodologia numérica adotada foi validada, visto que o valor de rigidez torcional obtido numericamente foi de 7,31% maior que o obtido experimentalmente e o valor de deformação apenas 7,45% menor que a aferida no ensaio experimental de carga estática concluindo que o modelo numérico condiz com o experimental.

O processo de calibração do modelo computacional mostrou que as condições de contorno empregadas numericamente são de grande importância para que o resultado final obtido numericamente seja o mais próximo possível do valor experimental.

A simulação para detecção do local de maior tensão da estrutura mostrou que o material empregado no chassi suporta de forma segura os carregamentos estáticos

aplicados, visto que a máxima tensão resultante foi onze vezes menor que a tensão limite de escoamento do material do chassi

O método experimental e numérico forneceu boas estimativas para o valor de rigidez torcional, deformação do chassi e tensões atuantes no mesmo, atingindo assim o objetivo proposto neste trabalho de abastecer a equipe com estudos referente ao comportamento do chassi baja.

## 6 REFERÊNCIAS

LIMA, Luciano Rodrigues Ornelas. **Capítulo 6 - Análise Experimental de Tensões**. Disponível em: [http://openlink.br.inter.net/lucianolima/cap\\_6\\_aet.pdf](http://openlink.br.inter.net/lucianolima/cap_6_aet.pdf). Acessado em: 29 outubro de 2016.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo, v. 5, p. 61, 2002.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1ª Edição, Abril 2003

DE CASTRO, Ciro Horner Hoe. **Simulação de Esforços por Elementos Finitos e Validação dos Resultados por Extensometria**. São Carlos, 2012

WEBER, Albano Luiz. **Metrologia e Instrumentação: Extensometria (Instrumentação)**. UCS Departamento de Engenharia Mecânica, 2008.

MARTHA, L. F. **Métodos básicos da análise de estruturas**. Rio de Janeiro: Campus, 2010.

DA SILVA, Andréa Regina Dias. **Sistema computacional para análise avançada estática e dinâmica de estruturas metálicas**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto.

**Análise de Estrutura via Ansys**. Disponível em: [http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5111/5111\\_3.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5111/5111_3.PDF). Acessado em 22 de outubro de 2016.

RBSB. **Baja SAE BRASIL**. Disponível em: <http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>. Acessado em 18 de outubro de 2016.

GUTH, Gustavo Albring. **Análise Dinâmica não Linear de um Chassi de Baja Utilizando a Metodologia de Elementos Finitos**. Horizontina, 2015

RBSB. **REGULAMENTO BAJA SAE BRASIL – CAPÍTULO 5**. Disponível em: <http://www.saebrasil.org.br/eventos/ProgramasEstudantis/site/baja2011/arquivos/RBSB>

%205%20-%20Requisitos%20Gerais%20do%20Veiculo%20-%20Emenda%200.pdf.

Acessado em: 18 outubro de 2016.

**RBSB. REGULAMENTO BAJA SAE BRASIL CAPÍTULO 7.** Disponível em: <http://www.saebrasil.org.br/eventos/ProgramasEstudantis/site/baja2011/Arquivos/RBSB>  
B. Acessado em: 18 out. de 2016.

**BAJA SAE BRASIL.** Disponível em: <http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>. Acessado em 11 de novembro de 2016.

**SOLIDWORKS. SolidWorks Professional.** 2015. Disponível em: <http://www.solidworks.com/sw/products/3d-cad/solidworks-professional.htm> Acesso em: 12 de novembro de 2016.

**ANSYS.** Disponível em: <http://www.ansys.com/About-ANSYS>. Acessado em: 12 de novembro de 2016.

**YAN, L.T.W. Análise estrutural utilizando o método de elementos finitos de componentes do veículo Baja SAE submetidos a esforços de fadiga** – São Paulo, 2011. 147 p.

**FURTADO, D. C. Análise Estrutural de Chassi de Veículos Automotivos.** Brasília: UnB, 2013. 88 p.

**RILEY W, B E ALBERT R.G. Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis** Cornell University 2002 SAE Internationa

**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**– Guaratinguetá, 2015.

**Costa, J.A. Estudo da rigidez torcional do quadro de um formula SAE por análise de elementos finitos** – São Caetano do Sul, SP, 2012

Weiss, G H. E. **Análise Computacional e Experimental de Rigidez à Torção de um Chassi de Fórmula SAE**– Rio de Janeiro: UFRJ / ESCOLA POLITÉCNICA, 2016

Burba, L. T. **Análise Da Rigidez Torcional do Chassi de um Veículo Fórmula Sae**, Universidade de Brasília ,2015

Sampò, E. **Modelling chassis flexibility in vehicle dynamics simulation** - University of Surrey, 2011

MADENCI, Erdogan, GUVEN, Ibrahim, **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®**. 2. ed. – New York: Springer, 2015.

PUGLIA, Vicente B., **Análise de Alguns Aspectos no Estudo de Torres Estaiadas**. 2009. 107 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

## 7 ANEXOS

## ANEXO I

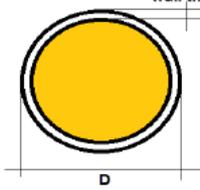
Certificado dos tubos utilizados pela equipe Baja Pampa na construção do chassi.

		ACOS FAVORIT DISTRIBUIDORA LTDA-FILIAL EST MANOEL JOSE DO NASCIMENTO, 741 94930-340 -CACHOEIRINHA/RS FONE: (51)3439.1134 FAX: (51)3439.1124 CNPJ: 92.216.209/0006-10 INSC. EST.: 177/0168580				<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE</b> <b>QUALITY CERTIFICATE</b> Nº : 17222 / 001			
<b>CLIENTE /CUSTOMER</b> IGOR FERNANDO BASSO									
<b>Produto / Product</b> TB DIN 2440 NBR PRETO RED 33.700X 3.350X 0.650 (2 PC)						I.L. H07468			
<b>Nota Fiscal /Invoice</b> 17222		<b>Data / Date</b> 22/04/2014		<b>Peso / Weight (Kg)</b> 3.150		<b>Corrida / Heat</b> 363337			
<b>Composição Química / Chemical Composition</b>									
C	MN	P	S	SI	CR	NI	MO	AL	N
0.0400	0.2000	0.0110	0.0120	0.0180	0.0110	0.0100	0.0040	0.0640	0.0043
TI	NB	CU	SN	V	B	CA			
0.0010		0.0080		0.0010					
<b>Propriedades Mecânicas / Mechanical Prop</b>									
Dureza Hardness	Limite Resistência Tensile Strength	Limite Escoamento Yield Point	Alongamento Elongation	Estricção Reduction of Area	Tam. Grão Austenítico Austenitic Grain Size	Grau Esferoidização Degree of Globularizing			
HB	MPa	MPa	%	%	ASTM	%			
<b>Observações / Observation</b>						 <b>GELSON JUNG</b> Controle de Qualidade Quality Control			
<b>CÓPIA FIEL DO CERTIFICADO ORIGINAL FORNECIDO PELA USINA</b> COPY OF THE ORIGINAL CERTIFICATE PROVIDED BY THE MILL									
CACHOEIRINHA 22 DE ABRIL DE 2014									
		ACOS FAVORIT DISTRIBUIDORA LTDA-FILIAL EST MANOEL JOSE DO NASCIMENTO, 741 94930-340 -CACHOEIRINHA/RS FONE: (51)3439.1134 FAX: (51)3439.1124 CNPJ: 92.216.209/0006-10 INSC. EST.: 177/0168580				<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE</b> <b>QUALITY CERTIFICATE</b> Nº : 17222 / 002			
<b>CLIENTE /CUSTOMER</b> IGOR FERNANDO BASSO									
<b>Produto / Product</b> TB DIN 2440 NBR PRETO RED 33.700X 3.350X 0.700 (1 PC)						I.L. H07468			
<b>Nota Fiscal /Invoice</b> 17222		<b>Data / Date</b> 22/04/2014		<b>Peso / Weight (Kg)</b> 2.050		<b>Corrida / Heat</b> 363337			
<b>Composição Química / Chemical Composition</b>									
C	MN	P	S	SI	CR	NI	MO	AL	N
0.0400	0.2000	0.0110	0.0120	0.0180	0.0110	0.0100	0.0040	0.0640	0.0043
TI	NB	CU	SN	V	B	CA			
0.0010		0.0080		0.0010					
<b>Propriedades Mecânicas / Mechanical Prop</b>									
Dureza Hardness	Limite Resistência Tensile Strength	Limite Escoamento Yield Point	Alongamento Elongation	Estricção Reduction of Area	Tam. Grão Austenítico Austenitic Grain Size	Grau Esferoidização Degree of Globularizing			
HB	MPa	MPa	%	%	ASTM	%			
<b>Observações / Observation</b>						 <b>GELSON JUNG</b> Controle de Qualidade Quality Control			
<b>CÓPIA FIEL DO CERTIFICADO ORIGINAL FORNECIDO PELA USINA</b> COPY OF THE ORIGINAL CERTIFICATE PROVIDED BY THE MILL									
CACHOEIRINHA 22 DE ABRIL DE 2014									

## ANEXO II

## Propriedades do aço DIN 2440 utilizado na estrutura do Baja Pampa.

TUBOS DE AÇO CARBONO COM COSTURA, PADRÃO DIN 2440 (MÉDIO) E 2441 (PESADO)							
CARBON STEEL SEAM PIPE, STANDARD DIN 2440 (MEDIUM) AND 2441 (HEAVY)							
DIN 2440 MEDIO (MEDIUM)							
Diâmetro nominal		Diâmetro externo (D)		Espessura da parede		Peso	
Nominal diameter		Outside diameter (D)		Wall thickness		Weight	
Inch	mm	Inch	mm	Inch	mm	lb/ft	kg/m
1/8"	6	0.402	10.2	0.079	2.00	0.274	0.407
1/4"	8	0.531	13.5	0.093	2.35	0.437	0.650
3/8"	10	0.677	17.2	0.093	2.35	0.573	0.852
1/2"	15	0.839	21.3	0.104	2.65	0.820	1.220
3/4"	20	1.059	26.9	0.104	2.65	1.062	1.580
1"	25	1.327	33.7	0.128	3.25	1.640	2.440
1 1/4"	32	1.669	42.4	0.128	3.25	2.110	3.140
1 1/2"	40	1.902	48.3	0.128	3.25	2.426	3.610
2"	50	2.374	60.3	0.144	3.65	3.427	5.100
2 1/2"	65	2.996	76.1	0.144	3.65	4.375	6.510
3"	80	3.500	88.9	0.159	4.05	5.692	8.470
4"	100	4.500	114.3	0.177	4.50	8.131	12.100
5"	125	5.500	139.7	0.191	4.85	10.886	16.200
6"	150	6.500	165.1	0.191	4.85	12.902	19.200



espesura da parede  
wall thickness

D

Aplicação: ar, água, gás não-agressivo e transporte de fluidos.  
Application: air, water, non-aggressive gas and fluid transportation.

Propriedades mecânicas do aço (Mechanical properties of steel)				
Grau	espesura da parede	Resis. à Tração	Lim Escoamento (não menor que)	Alongamento
Grade	wall thickness	Tensile Strength	Yield strength (not less than)	Elongation
	mm	N/mm <sup>2</sup> (Mpa)	N/mm <sup>2</sup> (Mpa)	%
S 185	< 3	310 - 540 (31,5-55,1)	185 (18,9)	14
	≥ 3	≥290 (29,6)		18

EN 10255/DIN 2440

## Anexo III

### Extensometria

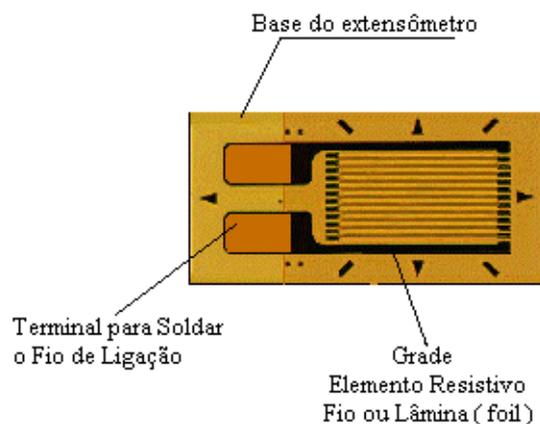
Extensômetros ou *strain gauge*, são componentes que trabalham como sensores de deformação de um componente. Estes componentes, da área da instrumentação, são usados para medir deformações em diferentes estruturas, visto que possuem boas características de trabalho como alta precisão, pequeno tamanho, leve, fácil utilização, boas respostas dentro de uma grande faixa de temperatura e funcionam em locais remotos como submerso em água e em atmosfera com gás corrosivo.

Existem diversos tipos de extensômetros, como: resistivos, capacitivos, mecânicos, fotoelásticos, piezoresistivos e piezoeásticos. Dentre todos, o mais utilizado é o resistivo, cuja resistência elétrica varia na proporção do valor da distensão no dispositivo.

A fixação do extensômetro de forma correta na estrutura a ser analisada é de grande importância, pois a má instalação pode interferir na precisão da deformação detectada. Para a montagem correta de um extensômetro resistivo é necessário limpar a superfície da peça sob teste, utilizar adesivos entre a peça e base do extensômetro que não interfiram nas deformações que a peça sofre (em geral, é utilizado adesivos de base epóxi ou cianoacrilato), verificar a resistência do *strain gauge* e seu isolamento após a montagem no componente analisado. Desta forma, com a instalação correta a distensão da estrutura é transferida diretamente ao *strain gauge*, que responde com uma mudança linear na sua resistência elétrica.

Extensômetro resistivos são constituídos por uma base de resina ou polímero, terminais para soldar os fios de ligação e tiras metálicas dispostas em forma de grade.

Figura 50 - Componentes de um extensômetro resistivo.



A disposição em grade das tiras metálicas maximiza a quantidade de fios ou lâminas sujeitas à distensão na direção paralela. A área transversal dos filamentos metálicos da grade é bem pequena com a intenção de reduzir os efeitos das tensões de cisalhamento e Poisson (diminuição do diâmetro da barra na direção transversal).

Os valores mais comuns de valores de resistência nominal são de 30 a 3000  $\Omega$ , sendo que os valores de 120, 350, e 1000  $\Omega$  são os mais comuns.

Estes componentes são produzidos com materiais que devem apresentar algumas características específicas, com: baixa sensibilidade à variação com a temperatura, alta sensibilidade, boa soldabilidade, alta resistividade, alta tensão de escoamento, baixa histerese e boa resistência à corrosão.

Em muitos casos, devido a sensibilidade à temperatura dos materiais que constituem os extensômetros é visto que o coeficiente de dilatação que existe entre o suporte da grade e a grade resulta em uma deformação da grade. Tal problema pode interferir no funcionamento do componente. Isto mostra a importância de se observar o valor da dilatação do elemento com a da base da estrutura onde será aplicada, de forma que seja o mais parecido entre si, eliminando assim este efeito negativo.