

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**GABRIEL DA SILVA REIS ALVES
GABRIEL DE ALMEIDA MOTA**

**ANÁLISE TORCIONAL DA ESTRUTURA DO PROTÓTIPO BAJA/SAE DO
CEFET-RJ**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2023**

GABRIEL DA SILVA REIS ALVES
GABRIEL DE ALMEIDA MOTA

**ANÁLISE TORCIONAL DA ESTRUTURA DO PROTÓTIPO BAJA/SAE DO
CEFET-RJ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientadores: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Brenno Tavares Duarte

RIO DE JANEIRO

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A474 Alves, Gabriel da Silva Reis
Estudo de aumento de performance em balanças de pesagem de
borracha em ambiente industrial / Gabriel da Silva Reis Alves [e]
Gabriel de Almeida Mota. — 2023.
45f. + apêndice : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.
Bibliografia : f. 44-45
Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar
Coorientador: Brenno Tavares Duarte

1. Engenharia mecânica. 2. Chassi – Engenharia. 3. Veículos
Mini-Baja. 4. Método dos elementos finitos. 5. ANSYS (Programa
de computador). I. Mota, Gabriel de Almeida. II. Aguiar, Ricardo
Alexandre Amar de(Orient.). III. Duarte, Brenno Tavares.
(Coorient.). IV. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos de Gabriel de Almeida Mota:

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado força e coragem para chegar até aqui. Se não fosse pelo seu cuidado diário e direcionamento, com certeza eu não teria sequer ingressado no CEFET-RJ. Em segundo lugar, quero agradecer a Júlia Moreira, minha namorada, por ter sido a minha base em grande parte da caminhada acadêmica, sempre me apoiando e me motivando a continuar. Parte dessa vitória é dela também.

Quero agradecer aos meus pais por terem sempre estarem ao meu lado em todas as etapas da minha vida. Sempre apoiaram as minhas escolhas, e se eu cheguei até aqui foi consequência de todo o suporte que eu recebi deles.

E por último, mas não menos importante, quero agradecer a todos os meus amigos e familiares que me acompanharam nessa jornada. Ao pessoal da Equipe Alpha, que em muitos momentos se mostraram como uma família durante a minha graduação. Aos meus irmãos da PIB de Jacarepaguá, que sempre estiveram ao meu lado, em momentos críticos. E aos meus primos e tios, que mesmo de longe sempre se importaram comigo e com o meu desenvolvimento.

Agradecimentos de Gabriel da Silva Reis Alves

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pelo suporte nos momentos mais difíceis.

Agradeço a minha família por serem a base de amor, apoio e inspiração que precisei para chegar até aqui.

Agradecimento especial para a equipe MudRunner Baja por toda oportunidade, conhecimento e amizades que me proporcionaram desde 2017, sendo fundamental para a formação da minha experiência dentro da engenharia mecânica.

RESUMO

ALVES, Gabriel. MOTA, Gabriel. **Análise Torcional da Estrutura do Protótipo Baja/SAE do CEFET-RJ.** 2023. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

O presente trabalho busca analisar a rigidez à torção do chassi de um veículo baja SAE, nos cenários mais recorrentes durante a competição. Conhecendo os subsistemas do veículo, entende-se que o projeto de estruturas deve estar alinhado com o de suspensão. O deslocamento dos pontos de fixação da suspensão varia de forma inversamente proporcional com a rigidez torcional da estrutura a qual está fixada. Logo, um projeto de chassi com uma rigidez torcional controlada faz-se necessário, objetivando um projeto de suspensão mais assertivo e coerente com a realidade. Assim, foi gerado um modelo de análise computacional utilizando-se o software Ansys, onde este foi embasado pelo modelo experimental aplicando uma variação de carregamentos sobre a suspensão, numa bancada de testes. Como resultado, foram observadas variações da rigidez torcional entre os modelos de análise e geometrias de chassi. Com isso, concluiu-se que o modelo numérico não é capaz de prever condições gerais, inerentes a fabricação e ao desgaste do chassi.

Palavras-chave: Rigidez estrutural. Chassi Baja. Elementos Finitos. Ensaio Torcional. Ansys.

ABSTRACT

ALVES, Gabriel. MOTA, Gabriel. **Torsional Analysis of the Structure of the CEFET-RJ Baja/SAE Prototype**. 2023. 55f. Completion of course work - Federal Center of Technological Education Celso Suckow da Fonseca – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

The present work seeks to analyze the torsional rigidity of the chassis of a baja SAE vehicle, in the most recurrent scenarios during the competition. Knowing the subsystems of the vehicle, it is understood that the structural design must be aligned with the suspension design. The displacement of the suspension attachment points varies inversely proportional to the torsional stiffness of the structure to which it is attached. Consequently, a chassis design with controlled torsional rigidity is necessary, proposing at a more assertive suspension design that is consistent with reality. Thus, a computational analysis model was generated using the Ansys software, where it was based on the experimental model applying a variation of loads on the suspension, on a test bench. As a result, variations in torsional stiffness were observed between analysis models and chassis geometries. Therefore, it was concluded that the numerical model is not capable of predicting general conditions, inherent to the manufacture and wear of the chassis.

Keywords: Structural rigidity. Baja chassis. Finite elements. Torsional Test. Ansys.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Veículo utilizado pela equipe de Baja Equipe MudRunner na competição de 2022.....	11
Figura 2: Veículos das equipes em posição para início do Enduro.....	13
Figura 3: Chassi tipo Space-Frame	14
Figura 4: Chassi tipo Monocoque	15
Figura 5: Modo de Flexão Vertical.....	16
Figura 6: Modo de Flexão Lateral.....	17
Figura 7: Deformação Lozenging Horizontal	17
Figura 8: Modo de torção longitudinal	18
Figura 9: Representação dos momentos inerciais encontrados em um veículo	19
Figura 10: Diagrama de Corpo Livre experimental	20
Figura 11: Modelo de torção linear de mola	22
Figura 12: Disposição dos tubos no chassi	23
Figura 13: Chassi da equipe MudRunner Baja	24
Figura 14: Fixação da parte traseira do chassi na estrutura rígida	25
Figura 15: Parte dianteira do chassi apoiada sobre o cavalete central e relógio comparador apoio em cavalete lateral	25
Figura 16: Balde com as massas, totalizando 25,5 kg.....	26
Figura 17: Balança Digital de Vidro G-Tech Glass10 com Capacidade de 150kg	27
Figura 18: Relógio comparador Digimess	27
Figura 19: Visão Geral do Chassi.....	28
Figura 20: Parte traseira do chassi fixada em estrutura metálica chumbado ao solo da oficina	29
Figura 21: Chassi A e B respectivamente	30
Figura 22: Distância de 0,7 metros entre o apoio central e carga aplicada.....	31
Figura 23: Recomendação de qualidade de malha	32

Figura 24: Estrutura de malha aplicada ao chassi.....	32
Figura 25: Condições de contorno da análise torcional com a massa de 10,5 kg.....	33
Figura 26: Condições de contorno do ensaio 1 no Ansys – Chassi B.....	34
Figura 27: Deslocamento vertical do ensaio 1 no Ansys – Chassi B	35
Figura 28: Deslocamento vertical do ensaio 1 no Ansys – Chassi A	35
Figura 29: Comportamento da rigidez torcional de acordo com a variação das cargas aplicadas no chassi A no ensaio computacional	37
Figura 30: Comportamento da rigidez torcional de acordo com a variação das cargas aplicadas no chassi B no ensaio computacional	37
Figura 31: Deslocamento gerados pela carga aplicada no chassi A.....	38
Figura 32: Comportamento da rigidez torcional de acordo com a variação das cargas aplicadas no chassi A no ensaio experimental	40
Figura 33: Comportamento da rigidez torcional de acordo com a variação das cargas aplicadas no chassi B no ensaio experimental	40
Figura 34: Condições de contorno do ensaio 2 no Ansys – chassi B	47
Figura 35: Deslocamento vertical do ensaio 2 no Ansys – chassi B	47
Figura 36: Condições de contorno do ensaio 3 no Ansys – chassi B	48
Figura 37: Deslocamento vertical do ensaio 3 no Ansys – chassi B	48
Figura 38: Condições de contorno do ensaio 4 no Ansys – chassi B	49
Figura 39: Deslocamento vertical do ensaio 4 no Ansys – chassi B	49
Figura 40: Condições de contorno do ensaio 5 no Ansys – chassi B	50
Figura 41: Deslocamento vertical do ensaio 5 no Ansys – chassi B	50
Figura 42: Condições de contorno do ensaio 6 no Ansys – chassi B	51
Figura 43: Deslocamento vertical do ensaio 6 no Ansys – chassi B	51
Figura 44: Deslocamento vertical do ensaio 2 no Ansys – chassi A	52
Figura 45: Deslocamento vertical do ensaio 3 no Ansys – chassi A	52
Figura 46: Deslocamento vertical do ensaio 4 no Ansys – chassi A	53

Figura 47: Deslocamento vertical do ensaio 5 no Ansys – chassi A	53
Figura 48: Deslocamento vertical do ensaio 6 no Ansys – chassi A	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores usuais de rigidez torcional para diferentes veículos de diversas modalidades.....	21
Tabela 2: Massas aplicadas em cada etapa dos ensaios nos dois tipos de chassi ..	30
Tabela 3: Dados de entrada da análise computacional de torção	33
Tabela 4: Deslocamento vertical em cada análise computacional do Chassi B.....	36
Tabela 5: Deslocamento vertical em cada análise computacional do Chassi A.....	36
Tabela 6: Deformações angulares e rigidezes torcionais por FEA do chassi B	36
Tabela 7: Deformações angulares e rigidezes torcionais por FEA do chassi B	36
Tabela 8: Deslocamentos verticais obtidos através dos ensaios experimentais no chassi A	39
Tabela 9: Deslocamentos verticais obtidos através dos ensaios experimentais no chassi B	39
Tabela 10: Deformações angulares e rigidezes torcionais do chassi A	39
Tabela 11: Deformações angulares e rigidezes torcionais do chassi B	39
Tabela 12: Comparativo entre a rigidez torcional do modelo computacional e do modelo experimental	41
Tabela 13: Comparativo entre a rigidez torcional do chassi A e do chassi B	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 COMPETIÇÃO BAJA SAE	13
2.2 CHASSI DO VEÍCULO	13
2.3 CARREGAMENTO DE UM VEÍCULO E SUAS DEFORMAÇÕES	15
2.3.1 Flexão Vertical	16
2.3.2 Flexão Lateral	16
2.3.3 <i>Lozenging</i> Horizontal.....	17
2.3.4 Torção Longitudinal.....	17
2.4 PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS DE UM CHASSI	18
2.4.1 Propriedades Inerciais.....	19
2.4.2 Rigidez Torcional	19
2.4.2.1 Influência da rigidez torcional	20
3 METODOLOGIA	22
3.1 OBTENDO A RIGIDEZ TORCIONAL	22
3.2 MODELO VIBRACIONAL PARA OBTER A RIGIDEZ EQUIVALENTE.....	22
3.3 MÉTODO EXPERIMENTAL.....	23
3.3.1 Equipamentos Utilizados no Ensaio	24
3.3.2 Ensaio Prático de Rigidez Torcional.....	27
3.4 MÉTODO COMPUTACIONAL ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS	31
3.4.1 Validação do Modelo Numérico e Estrutural.....	31
3.4.2 Análise Numérica de Rigidez Torcional	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 ENSAIO COMPUTACIONAL DE RIGIDEZ TORCIONAL DO CHASSI	34
4.2 ENSAIO PRÁTICO DE RIGIDEZ TORCIONAL DO CHASSI	38
4.3 COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS.....	41
5 CONCLUSÕES	42
6 TRABALHOS FUTUROS	43
7 REFERÊNCIAS	44
APÊNDICE A – Simulações realizadas no Ansys	46

1 INTRODUÇÃO

O projeto Baja é um programa estudantil cujo principal objetivo é a fabricação de um veículo off-road, de maneira completa desde o seu desenvolvimento em softwares, construção por meio de processos de fabricação (usinagem, soldagem...) e teste do protótipo em competições, como representado na figura 1. Este projeto é voltado principalmente para alunos de engenharia, para que possam aplicar os conhecimentos teóricos desenvolvidos em sala de aula na prática. Esse programa é amplamente disseminado nas faculdades públicas e privadas pelos próprios alunos, pois a estrutura organizacional das equipes, de maneira geral, se assemelha bastante com aquelas encontradas no mercado de trabalho, funcionando assim como uma espécie de “estágio”, antes mesmo do estágio curricular obrigatório. Um fator que proporciona a boa imagem das equipes de Baja é o fato das competições serem regidas pela SAE (*Society of Automotive Engineers* - Sociedade de Engenheiros da Mobilidade), que tem a função de regulamentar e organizar, ao longo do ano, diversas competições entre as equipes de Baja (em nível nacional e regional), buscando promover principalmente a interação entre as equipes e o desenvolvimento profissional e acadêmicos dos discentes das equipes. Tendo em vista isso, esse trabalho tem como objetivo principal a análise de rigidez estrutural de um chassi de Baja, para que a Equipe Mud Runner consiga implementar os resultados obtidos em seu planejamento de projeto anual.



Figura 1: Veículo utilizado pela equipe Mud Runner na competição de 2022

Fonte: Autores

Um dos pontos vitais em qualquer projeto Baja é o desenvolvimento do chassi, por ser considerado a estrutura básica sobre a qual o protótipo é construído, de acordo com Weiss (2016). Com isso, este trabalho visa principalmente o estudo e a análise torcional de um chassi Baja visando entender a importância da deformação torcional para o comportamento dinâmico do veículo, assim os resultados obtidos serão aproveitados pela equipe Baja do CEFET-RJ (Mud Runner) em seus futuros desenvolvimentos de projeto.

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre diversos métodos de ensaio para medir a rigidez torcional do chassi, bem como a análise de elementos finitos para esse fim.

Em seguida, foi realizado um estudo de caso, composto por três fases. Primeiramente, apresenta-se a análise de elementos finitos realizada pela equipe durante o desenvolvimento do protótipo MR21. A segunda etapa consiste em um ensaio experimental para obtenção de um valor de rigidez torcional do pórtico. Na terceira etapa, a simulação do modelo de elementos finitos realizada pela equipe foi comparada com os resultados experimentais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica são abordadas as referências relevantes para esse trabalho, como a explicação do que é a competição baja SAE e qual a influência do solo no chassi, esforços atuantes na estrutura e o conceito de rigidez torcional.

2.1 COMPETIÇÃO BAJA SAE

Ao participar do programa Baja SAE, o aluno se envolve com um caso real de desenvolvimento de um veículo *off-road*, ou seja, o veículo é projetado para enfrentar obstáculos, como rampas de 45 graus de inclinação, troncos, pneus, curvas, piscinas de lama e buracos, conforme a Figura 2. Isso tudo acontece ciclicamente durante as 4 horas do enduro, submetendo assim a estrutura a carregamentos intermitentes (SAE Brasil, 2022).



Figura 2: Veículos das equipes em posição para início do Enduro

Fonte: www.saebrasil.org.br (2022)

2.2 CHASSI DO VEÍCULO

Chassi é uma estrutura primária dos veículos, responsável por dar a base às demais partes do carro, como por exemplo o sistema de frenagem, suspensão, transmissão, motor etc. Além disso, o chassi tem papel fundamental na proteção do piloto e na absorção de impactos, quando submetido a esforços, como impacto lateral, impacto frontal, capotamento e até mesmo torção oriunda de desníveis na pista.

Existem alguns tipos de chassis desenvolvidos hoje em dia, porém os mais utilizados são apenas dois, de acordo com Seward (2014):

- *Space-frame* - Basicamente é uma estrutura tridimensional formada por tubos, e revestida por uma carenagem na maioria dos casos. Este tipo é o único permitido em competições de BAJA SAE, dada a sua resistência estrutural, o que garante mais segurança ao piloto, e a sua facilidade de fabricação e eventuais reparos. Porém a sua principal desvantagem é o peso, pois para que o chassi tenha uma elevada rigidez, é necessário o incremento no seu peso total, o que torna a relação peso/rigidez baixa quando comparada a outros tipos de chassi.
- Monocoque - Estrutura formada por um conjunto de placas agrupadas, resultando assim numa espécie de cilindro fechado. Essa configuração de chassi tem ganhado espaço no mercado automobilístico ultimamente, por conta do seu baixo peso, quando comparado ao *space-frame*, ilustrado na figura 3 e 4 respectivamente. Porém o ponto negativo na utilização desse tipo de chassi está relacionado ao seu custo, que na maioria dos casos é elevado, por conta da utilização de materiais compósitos como a fibra de carbono.

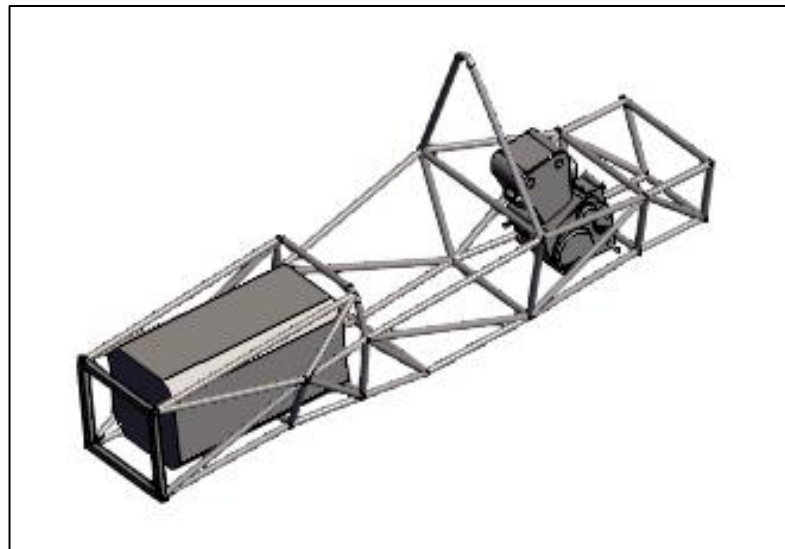


Figura 3: Chassi tipo *Space-Frame*
Fonte: www.3dcontentcentral.com (2020)

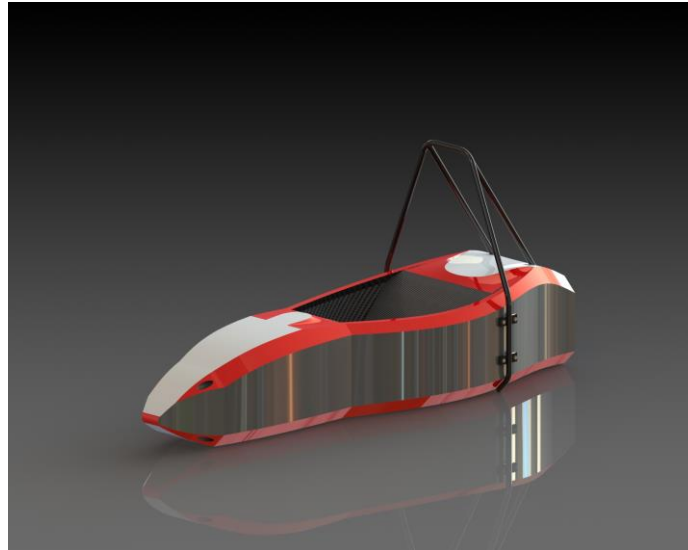


Figura 4: Chassi tipo monochoque

Fonte: www.grabcad.com (2018)

2.3 CARREGAMENTO DE UM VEÍCULO E SUAS DEFORMAÇÕES

A primeira etapa num projeto de chassi veicular, é compreender e conhecer as diferentes cargas que atuam sobre a estrutura (Riley, 2002). São essas:

- Reação gerada pela suspensão traseira do veículo: considerando que o veículo possui tração traseira, o torque será maior por conta da transmissão. Além disso, há a presença de componentes com elevada massa, como o motor, na parte traseira, o que contribui para um elevado carregamento nesta região.
- Reações provenientes da direção e suspensão dianteira: similares ao eixo traseiro, porém com uma carga menor devido à distribuição do peso ao longo do chassi.
- Elementos que possuem elevado peso individualmente (motor, caixa de marcha, diferencial, etc.): as forças produzidas por esses elementos são transmitidas através de suas fixações.

Com isso, é possível descobrir os diferentes esforços provenientes dessas cargas, às quais o chassi é submetido. Essas deformações podem ser classificadas como globais (exercem um deslocamento no chassi todo) ou locais, exercem um

deslocamento nas fixações (Weiss, 2016). Porém neste trabalho, serão tratadas somente as globais, por serem as mais críticas no chassi automotivo. São esses:

- Flexão Vertical;
- Flexão Lateral;
- *Lozenging* Horizontal (deformação do chassi num formato de paralelepípedo).
- Torção Longitudinal;

2.3.1 Flexão Vertical

As acelerações verticais podem elevar ou reduzir a magnitude dessas forças axiais (RILEY, 2002).

A flexão vertical é gerada pelo carregamento dos componentes do veículo perpendicular ao chão da estrutura, como o motor, a gaiola, o banco e o piloto. Esse carregamento somado às acelerações promove a ciclagem da flexão vertical do chassi, como representado na figura 5.

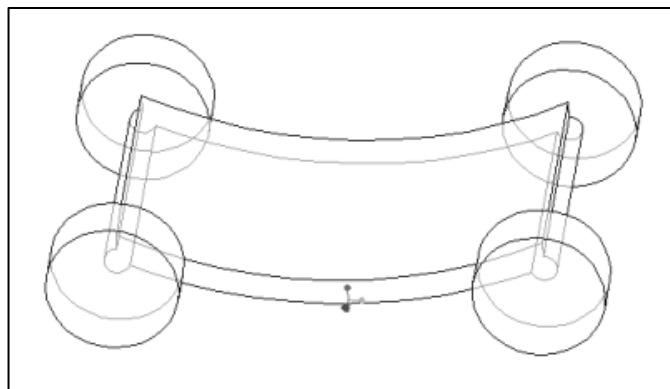


Figura 5 – Modo de flexão vertical

Fonte: Riley e George (2002)

2.3.2 Flexão Lateral

A flexão lateral ocorre quando existe uma curva na pista e a transferência de carga acontece para a direção oposta da curva, fazendo com que o centro de massa, pelo momento inercial, seja deslocado de sua posição inicial, conforme representada na figura 6. As forças laterais atuarão ao longo do comprimento do carro e serão

resistidas nos pneus, provocando assim uma carga lateral e, conseqüentemente, uma flexão resultante (RILEY, 2002).

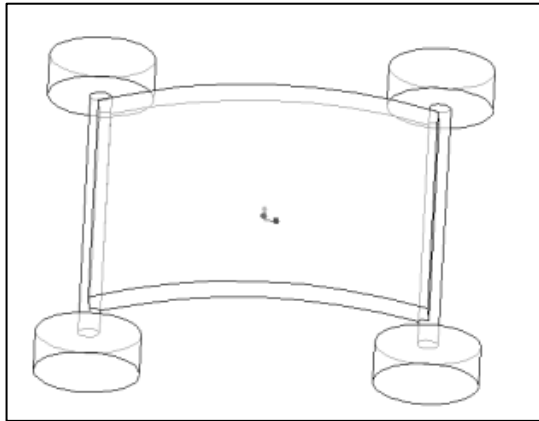


Figura 6 - Modo de flexão Lateral

Fonte: Riley e George (2002)

2.3.3 Lozenging Horizontal

Essa deformação ocorre quando há aplicação de forças de sentidos diferentes, nas rodas opostas, causando uma força para frente e uma para trás. Com isso, é gerada uma distorção em formato de paralelogramo, conforme Figura 7.

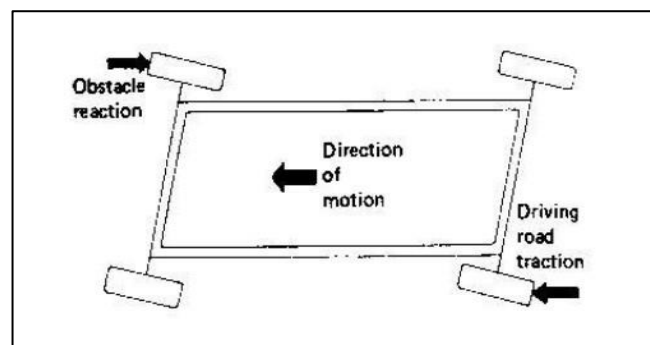


Figura 7: Deformação lozenging horizontal

Fonte: SINGH (2010)

Essas forças são provenientes de variações no pavimento, que acabam gerando pequenos impactos.

2.3.4 Torção Longitudinal

A torção Longitudinal é uma deformação do chassi provocada por cargas na vertical, aplicadas em eixos distintos e em lados contrários, ou até mesmo em uma

roda do veículo apenas. Esse tipo de torção dá origem à rigidez torcional do chassi, que é o principal parâmetro para concluir se um chassi atende ou não a necessidade.

De acordo com Riley e George (2002), o chassi pode ser visto como uma espécie de mola entre as duas extremidades do veículo, exercendo assim um movimento de torção.

A Figura 8 mostra um exemplo deste tipo de deformação, onde as duas rodas traseiras são travadas, enquanto as duas rodas dianteiras se encontram desniveladas, gerando assim um movimento binário, e conseqüentemente um torque no eixo x (longitudinal).

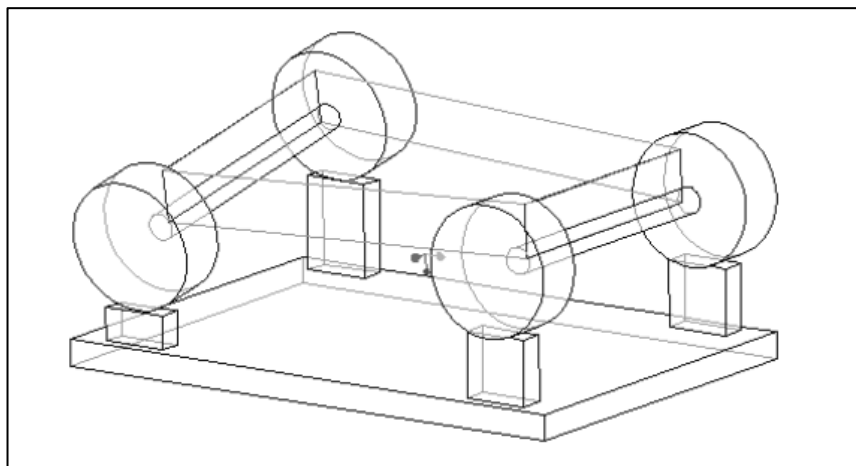


Figura 8 – Modo de torção longitudinal

Fonte: Riley e George (2002)

Este modo de torção é o mais comum em uma competição de BAJA SAE, pois a pista possui em seu percurso as valas intercaladas, onde as rodas continuamente alternam sua posição entre vala e superfície, gerando assim ciclos de torção no eixo longitudinal. Por esse motivo, este tópico será abordado novamente ao longo desta deste trabalho.

2.4 PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS DE UM CHASSI

O chassi é a “estrutura ligante” do veículo e possui diversas funções. Devido a isso suas propriedades precisam atender a uma série de pré-requisitos, tais como: desempenho veicular, segurança do piloto, aerodinâmica, custos adequados para orçamento do projeto, etc. Porém, muitas dessas propriedades são conflitantes entre si, e por isso quando se está elaborando um projeto, é necessário definir quais parâmetros devem ser priorizados. De acordo com Sampò *et al.* (2010), as

propriedades mais importantes sob a ótica estrutural e dinâmica do chassi são as inerciais e a de rigidez.

2.4.1 Propriedades Inerciais

A massa e a sua distribuição são parâmetros de extrema importância para os veículos de maneira geral, e especialmente para os veículos utilizados em competições automobilísticas. É sabido que os parâmetros supracitados também estão presentes nos demais sistemas e subsistemas do veículo, porém como o chassi tem a sua função de interligar esses componentes, a sua influência na massa e na distribuição do veículo como um todo é extremamente relevante para a análise de dados.

As propriedades inerciais citadas acima são as mais disseminadas e conhecidas pelos acadêmicos, porém já se nota uma crescente preocupação com um momento inercial específico. Trata-se do momento de inércia em torno do eixo do veículo, que pode ser chamado de guinada. A Figura 9 ilustra a ação do momento de guinada em um veículo:

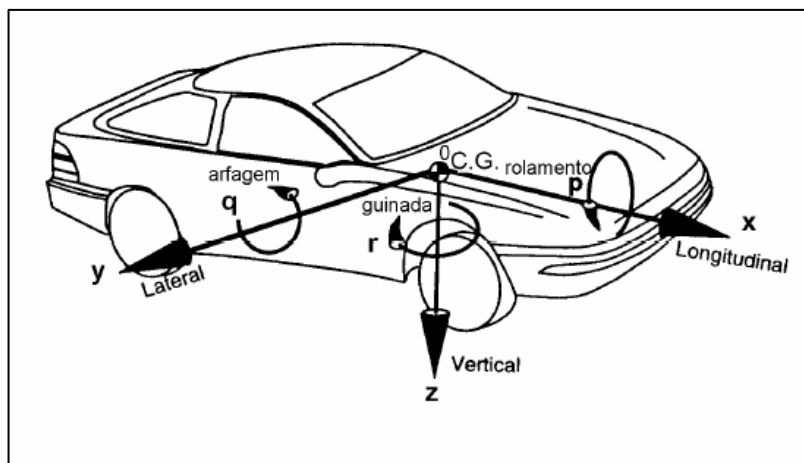


Figura 9: Representação dos momentos inerciais encontrados em um veículo

Fonte: www.coisasdeengenheiro.wordpress.com (2017)

2.4.2 Rigidez Torcional

A rigidez torcional de um chassi pode ser mensurada de diversas maneiras. Cada modo consiste no princípio básico de fixar uma extremidade do chassi e aplicar um momento torçor na outra extremidade de tal forma que a torção do chassi ocorra e seja medida (SAMPÒ, 2011). Sendo θ o valor da deformação angular (em graus)

para um respectivo momento torçor T (em N.m). Analisando a Figura 10, é possível entender como é medida a deformação angular. Primeiramente aplica-se uma força na extremidade da barra, onde é gerado um torque. Com esse torque, é possível verificar as deformações verticais ocorridas na barra:

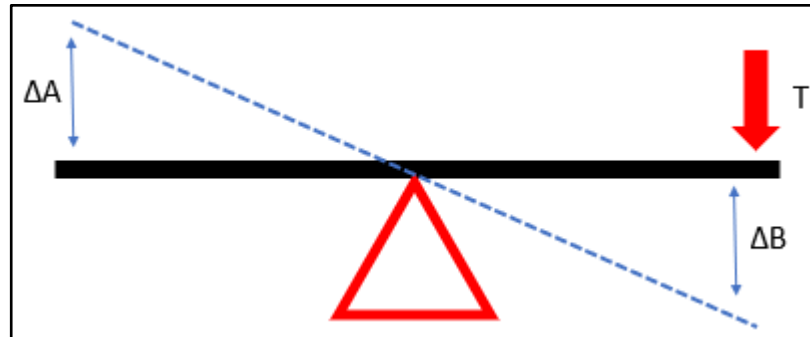


Figura 10: Diagrama de Corpo Livre experimental

Fonte: Autores

$$T = P * d \quad (1)$$

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

$$Kt = \frac{T}{\theta} \quad (3)$$

Em que Kt é o coeficiente de rigidez torcional do chassi, em N.m/graus, P é força aplicada, d é o comprimento do braço de alavanca, ΔA e ΔB são os deslocamentos verticais e L é a distância entre os relógios comparadores.

Como mencionado, o chassi pode fletir ou torcer, logo, o chassi resiste a ambas as solicitações. No entanto, a rigidez à flexão do chassi não é tão importante para rigidez torcional.

As razões para tal são que a flexão estática do chassi não afeta significativamente as forças nas rodas e sua distribuição, outro motivo é que se um chassi tem uma boa rigidez torcional, terá como consequência uma adequada rigidez à flexão (W. F. MILLIKEN e D. L. MILLIKEN, 1995).

2.4.2.1 Influência da rigidez torcional

Segundo W. F. Milliken e D. L. Milliken, (1995), “a predição da dirigibilidade de um veículo só é possível se o chassi for suficientemente rígido para que o ângulo de

rolagem entre as massas suspensas e as não suspensas seja causado somente pela suspensão”.

A Tabela 1 contém valores típicos de rigidez torcional para determinados modelos de carros. Dependendo da fonte, esses números podem alterar.

Tabela 1 - Valores usuais de rigidez torcional para diferentes veículos de diversas modalidades

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)

A dirigibilidade e o desempenho vibracional do veículo são afetados pela rigidez do chassi. Em geral, as deformações causadas por cargas externas não devem afetar a operação do veículo. Então, essas deformações não devem afetar o funcionamento da suspensão, para que o chassi desempenhe suas funções corretamente.

De acordo com Sampò (2011), outros fatores estão diretamente ligados à falta de rigidez do chassi, tais como:

- Dificuldade no controle da distribuição de carga lateral;
- Deslocamentos desnecessários na conexão do chassi com a suspensão, assim não se garante o desejado controle de movimento dos pneus;
- Vibrações podem ser ocasionadas;
- De forma geral, o veículo torna-se imprevisível e de difícil ajuste;
- Veículo mais suscetível ao fenômeno da fadiga;
- Falta de dirigibilidade.

3 METODOLOGIA

Neste t3pico, apresenta-se a metodologia utilizada nos ensaios pr3ticos e experimentos computacionais.

3.1 OBTENDO A RIGIDEZ TORCIONAL

Como o chassi de um Baja n3o 3 um corpo perfeitamente r3gido, o estudo da rigidez torcional do chassi 3 um problema mec4nico do corpo deform3vel. Portanto essa an3lise pode ser feita utilizando conhecimentos de resist4ncia de materiais, sendo assim existem 3 m3todos para serem escolhidos, s3o eles:

- M3todo anal3tico;
- M3todo experimental.
- M3todo computacional utilizando elementos finitos;

3.2 MODELO VIBRACIONAL PARA OBTER A RIGIDEZ EQUIVALENTE

Para obter a rigidez equivalente (K_{eq}) do chassi pode-se utilizar o conceito de vibra33o de um corpo deform3vel, que necessita apenas do deslocamento m3ximo da estrutura do ve3culo (x), for3a aplicada (F) e comprimento do tubo (L).

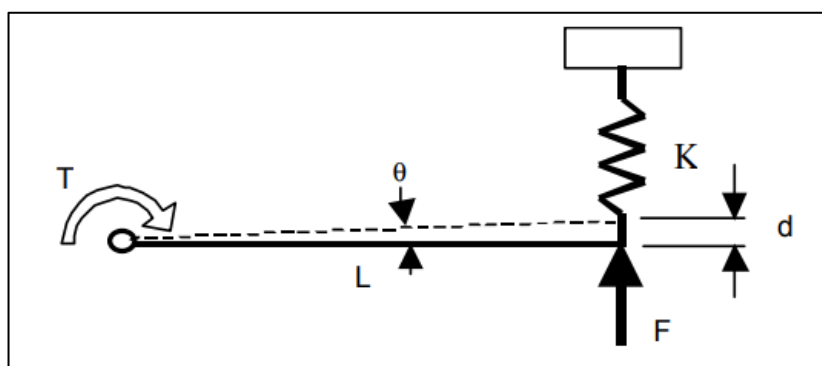


Figura 11: Modelo de tor33o linear de mola

Fonte: Riley e George (2002)

No caso de um chassi, por se tratar de uma estrutura complexa com muitos graus de liberdade e *inputs* de carregamentos, a an3lise num3rica da rigidez

equivalente pelo método de elementos finitos, utilizando o software *Ansys* se mostra muito eficiente em solucionar o problema.

3.3 MÉTODO EXPERIMENTAL

Esse método utiliza aspectos reais e práticos do chassi, logo será tratado como um método mais relevante, já que o método numérico não consegue prevê algumas inconsistências, como defeitos no processo de fabricação dos tubos que compõem o chassi e a deterioração do chassi (proveniente do tempo e local de armazenamento).

O chassi de Baja analisado foi o mesmo utilizado na competição de 2022, e é constituído por tubos circulares de aço SAE 1020 com diâmetro externo de 31,75 mm e 25,4 mm, possuindo espessuras de 2 e 0,9 mm, respectivamente, ordenado conforme a Figura 12 e o caso real na Figura 13.

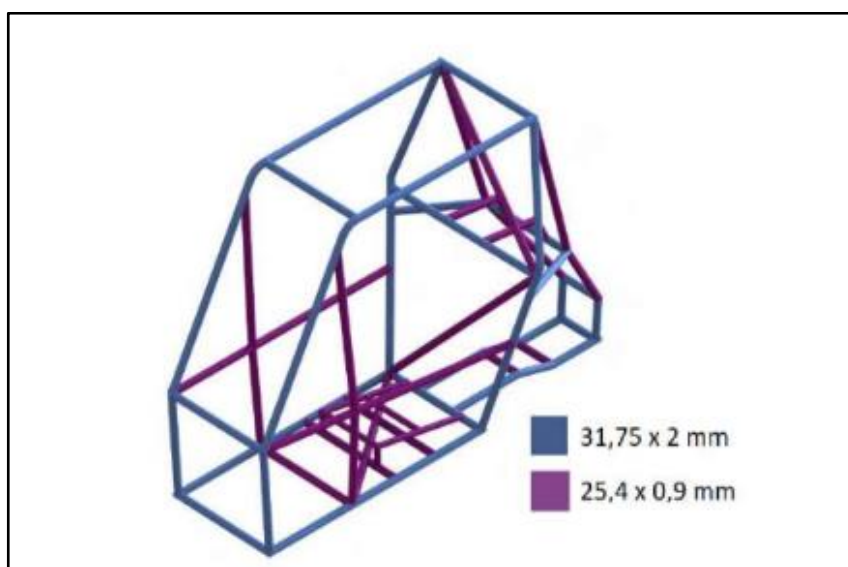


Figura 12: Disposição dos tubos no chassi

Fonte: Relatório Geral Mud Runner (2023)



Figura 13: Chassi da equipe Mud Runner Baja

Fonte: Autores

No método experimental foi utilizada a metodologia de carga concentrada em uma das balanças de suspensão do veículo, para determinação da rigidez torcional no chassi.

3.3.1 Equipamentos Utilizados no Ensaio

Foi necessária a adaptação da parte traseira do chassi, para que conseguisse se manter fixada e sem nenhum movimento. No caso, foram soldadas duas chapas de aço SAE 1020 na parte inferior do chassi, na intenção de conectar o chassi à estrutura fixa, conforme Figura 14. Esses suportes foram fabricados do mesmo material utilizado no chassi do veículo, e não contribuíram para o aumento do peso total do chassi.



Figura 14: Fixação da parte traseira do chassi na estrutura rígida

Fonte: Autores

Na parte dianteira do chassi foram utilizados um cavalete para apoiar o chassi e outro cavalete para suporte da base do relógio comparador. Com isso, foi possível garantir uma estabilidade ao chassi quando este fosse submetido ao ensaio torcional, conforme Figura 15.

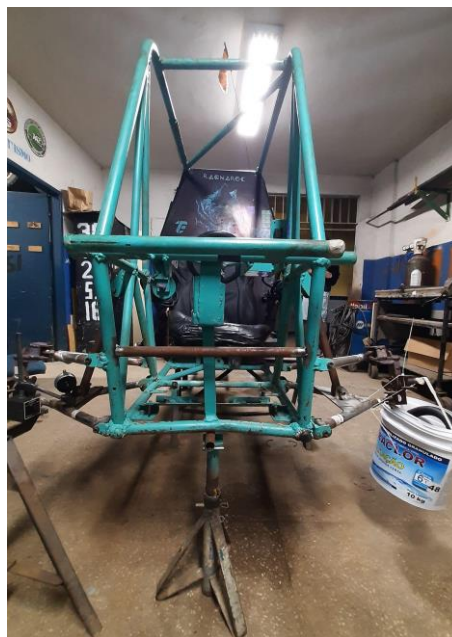


Figura 15: Parte dianteira do chassi apoiada sobre o cavalete central e relógio comparador apoio em cavalete lateral

Fonte: Autores

Além dos cavaletes de sustentação, foi necessária uma barra para apoiar a dianteira do chassi sobre o cavalete central para se ter somente um ponto de apoio, para a geração do momento, conforme Figura 15.

Os amortecedores foram substituídos por barras rígidas, para que dessa forma seja possível direcionar as cargas ao chassi somente. Com isso, é possível representar um cenário crítico, onde os amortecedores não exercem a função, por estarem totalmente comprimidos, conforme Figura 15.

A carga vertical foi gerada por meio de balde com anilhas de diversas massas, até que o peso total do corpo fosse o necessário para as análises, conforme Figura 15. Além disso foi utilizada uma balança G-Tech para verificação das cargas, conforme Figura 16 e 17.



Figura 16: Balde com as massas, totalizando 25,5 kg

Fonte: Autores



Figura 17: Balança Digital de Vidro G-Tech Glass10 com Capacidade de 150kg
Fonte: www.casaevideo.com.br (2023)

O deslocamento sofrido pela parte dianteira do veículo foi medido por dois relógios comparadores, com precisão centesimal, conforme Figura 18.



Figura 18: Relógio comparador Digimess
Fonte: www.casaevideo.com.br (2023)

3.3.2 Ensaio Prático - Rigidez Torcional

Nessa etapa foi realizado o ensaio de rigidez torcional por meio de um teste prático de carga concentrada em uma das extremidades do veículo. O primeiro passo a se seguir é a fixação da traseira do veículo. A forma de fixação do chassi foi estruturada tal qual o ensaio computacional, pois as condições de contorno devem seguir um padrão para um comparativo mais preciso.

Contudo, antes de realizar os ensaios experimentais, foi necessário a remoção de alguns componentes atrelados ao chassi, como as rodas do veículo, sistema de transmissão de força, motor do veículo e demais subsistemas acoplados ou fixados, para que o teste fosse o mais similar possível à simulação computacional, conforme Figura 19:



Figura 19: Visão Geral do Chassi

Fonte: Autores

Para a realização dos ensaios, a parte traseira do veículo foi totalmente fixada em uma estrutura chumbada ao solo, evitando assim que houvesse qualquer tipo grau de liberdade de translação ou rotação. Essa fixação se deu através de duas chapas de aço SAE 1020 soldados na parte traseira do chassi e na bancada. Já na parte dianteira do chassi, foi utilizado um cavalete para apoio, possibilitando apenas que houvesse o movimento rotacional do veículo, conforme Figura 20:



Figura 20: Parte traseira do chassi fixada em estrutura metálica chumbado ao solo da oficina

Fontes: Autores

Após a fixação da parte traseira do veículo na estrutura metálica, foram aplicados carregamentos distintos de forma a se obter a rigidez torcional do chassi. Porém foi constatado que o tubo inferior da parte dianteira do chassi estava fletido, e isso poderia resultar numa análise diferente da análise computacional. Logo, foram aplicadas as cargas num primeiro cenário, com o tubo inferior fletido (Chassi A) e num segundo cenário com o tubo inferior trocado por um novo tubo e o tubo mediano do quadro retirado (Chassi B), conforme Figura 21.



Figura 21: Chassi A e B, respectivamente

Fonte: Autores

O torque aplicado variou de acordo com a seleção de massas, aplicadas como carga vertical nas balanças do veículo. As massas utilizadas no Chassi A foram praticamente as mesmas utilizadas no Chassi B, para que não houvesse grandes variações nas condições de contorno, como pode ser observado na Tabela 2

Tabela 2: Massas aplicadas em cada etapa dos ensaios nos dois tipos de chassi

Chassi A		Chassi B	
N° do Ensaio	Massas Aplicadas (Kg)	N° do Ensaio	Massas Aplicadas (Kg)
1	5,4	1	5,6
2	10,4	2	10,5
3	15,4	3	15,6
4	20,4	4	20,6
5	25,5	5	25,7
6	30,4	6	30,5

Fonte: Autores

O braço de alavanca considerado para análise foi a distância de 700 mm entre a carga aplicada e o apoio central do chassi, como pode ser observado na Figura 22:



Figura 22: Distância de 0,7 metros entre o apoio central e carga aplicada

Fonte: Autores

3.4 MÉTODO COMPUTACIONAL ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS

Como é necessário garantir a integridade estrutural do habitáculo do veículo com confiabilidade e baixo custo, devido à limitação financeira e à complexidade relativa ao projeto, foi escolhido o método FEA (Análise de elementos finitos), utilizando-se o Software Ansys.

3.4.1 Validação do Modelo Numérico e Estrutural

Para garantir a qualidade da análise numérica foram utilizados elementos de malha quadrática, por se tratar de uma estrutura de perfil tubular, garantindo assim uma melhor qualidade de malha com um menor tempo de processamento computacional durante o desenvolvimento da análise.

Foi então selecionado o intervalo de 0,25 - 0,50 para a geometria dos quadrados e o de 0,70-0,95 para a qualidade de malha, que segundo a recomendação do software Ansys, estão em um nível muito bom, conforme as Figura 23 e 24:

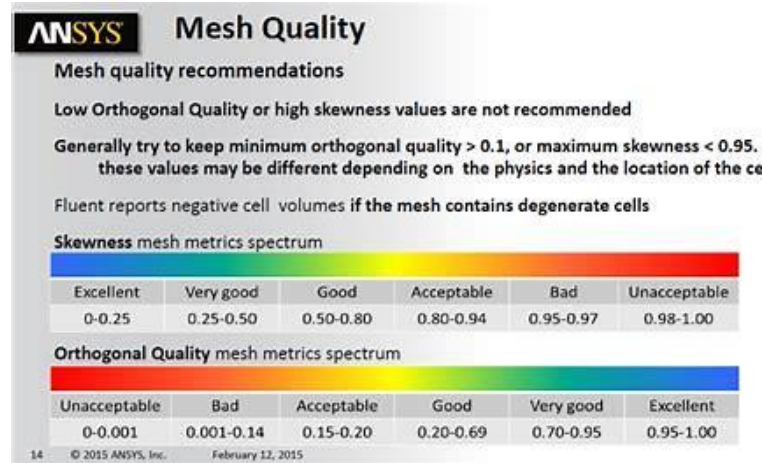


Figura 23: Recomendação de qualidade de malha

Fonte: Tutorial Ansys 2022 R1

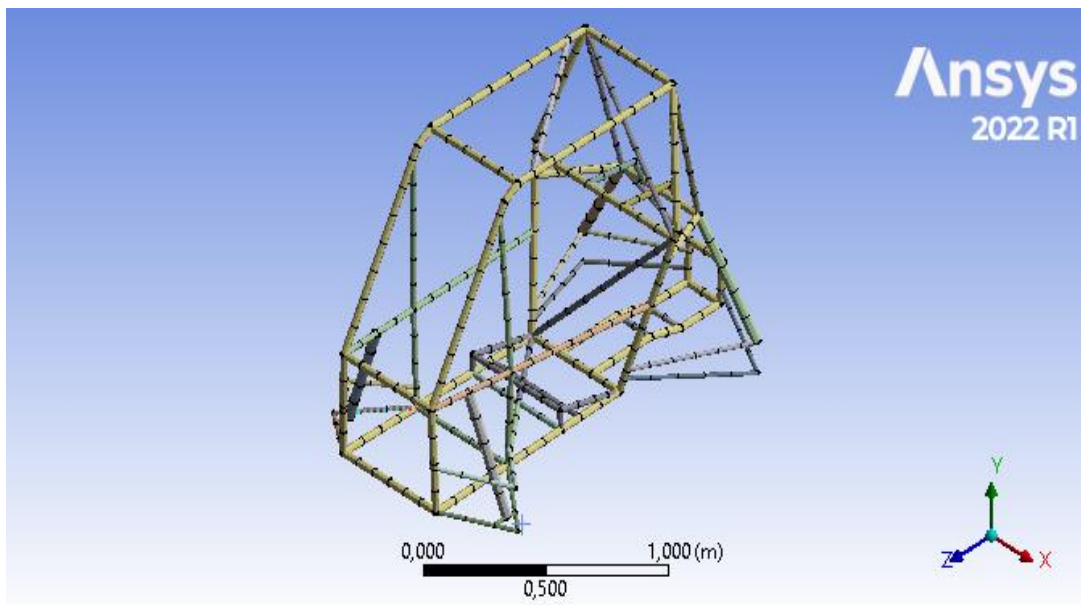


Figura 24: Estrutura de malha aplicada ao chassi

Fonte: Tutorial Ansys 2022 R1

3.4.2 Análise Numérica de Rigidez Torcional

Para a análise de rigidez torcional foi adotada a fixação do tubo traseiro (B) e a aplicação dos carregamentos na dianteira (A e C), onde foram variados os dados de entrada de força em cada análises, conforme Figura 25. As forças aplicadas a suspensão do chassi em cada análise variam conforme Tabela 3, que são as mesmas aplicadas no teste experimental.

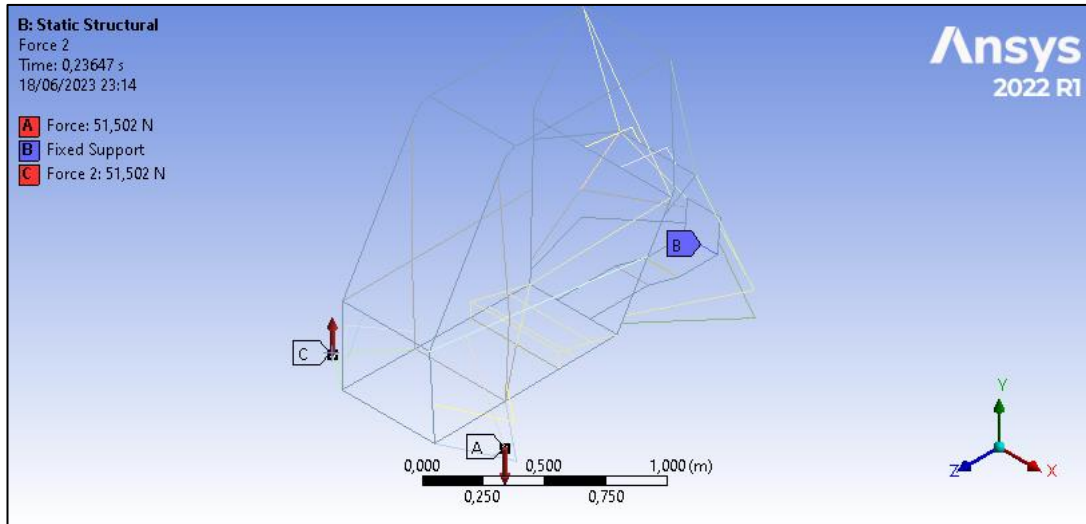


Figura 25: Condições de contorno da análise torcional com a massa de 10,5 kg

Fonte: Autores

Tabela 3: Dados de entrada da análise computacional de torção

Ensaio	Massa (Kg)	Gravidade (m/s ²)	Força (N)	Binário de Forças(N)
1	5,6	9,81	54,936	27,468
2	10,5	9,81	103,005	51,5025
3	15,6	9,81	153,036	76,518
4	20,6	9,81	202,086	101,043
5	25,7	9,81	252,117	126,0585
6	30,5	9,81	299,205	149,6025

Fonte: Autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa do trabalho serão analisados os dados nos ensaios experimentais, juntamente com os resultados obtidos na análise computacional.

4.1 ENSAIO COMPUTACIONAL DE RIGIDEZ TORCIONAL DO CHASSI

Por meio do ensaio computacional foi possível obter os valores de deslocamento vertical a partir da aplicação do binário de forças na suspensão do veículo, onde foram realizados 6 ensaios com valores crescentes de carregamento para as duas diferentes geometrias de chassi, conforme as figuras 26, 27 e 28. As demais figuras com as simulações realizadas estão contidas no APÊNDICE A.

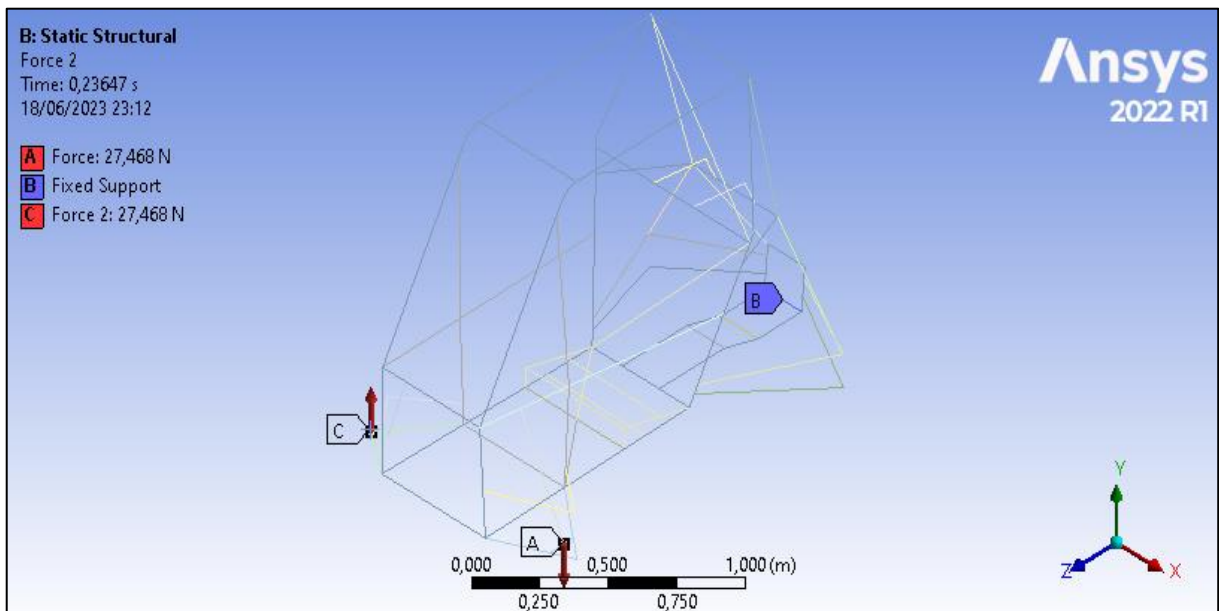


Figura 26: Condições de contorno do ensaio 1 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

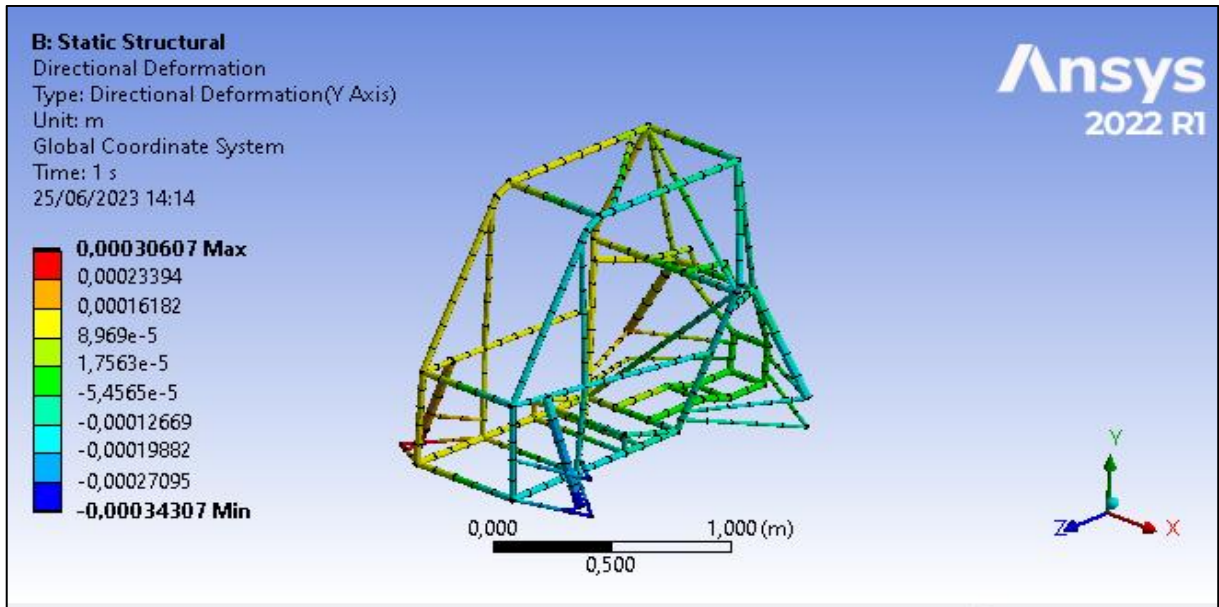


Figura 27: Deslocamento vertical do ensaio 1 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

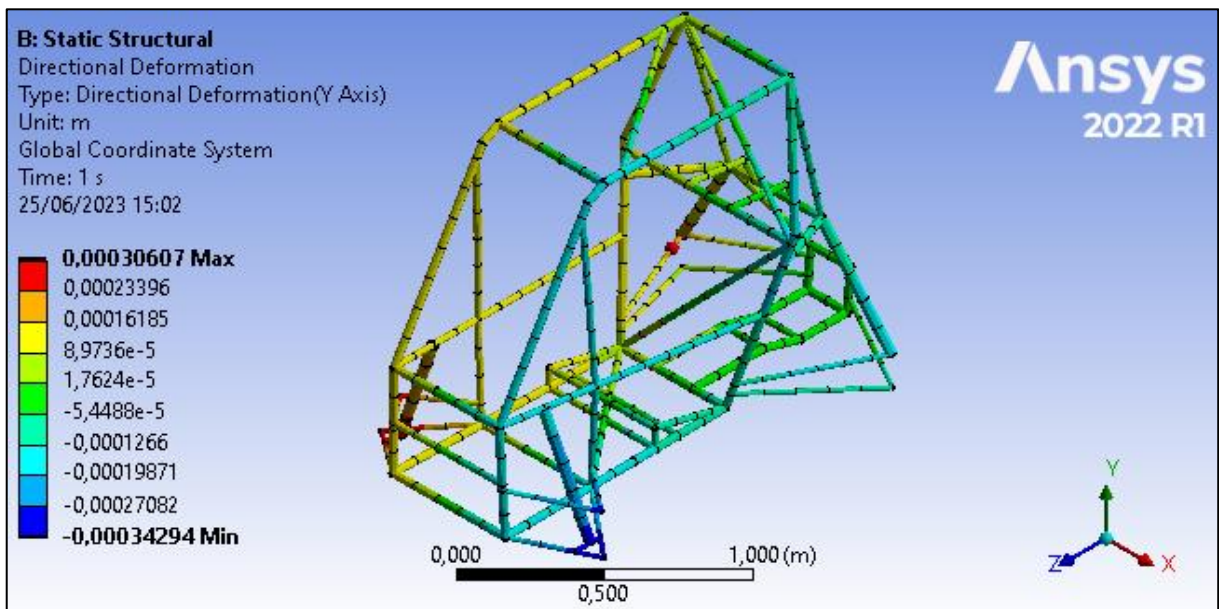


Figura 28: Deslocamento vertical do ensaio 1 no Ansys – chassi A

Fonte: Autores

Também foram compilados os dados de deslocamentos máximos e mínimos de deslocamento verticais das estruturas durante os carregamentos, conforme tabela 4 e 5.

Tabela 4: Deslocamento vertical em cada análise computacional do Chassi B

Ensaio	Massa (Kg)	Força (N)	Deslocamento Vertical A (mm)	Deslocamento Vertical B (mm)
1	5,6	54,936	0,39536	0,36226
2	10,5	103,005	0,74129	0,67924
3	15,6	153,036	1,1014	1,0092
4	20,6	202,086	1,4543	1,3326
5	25,7	252,117	1,8144	1,6625
6	30,5	299,205	2,1533	1,973

Fonte: Autores

Tabela 5: Deslocamento vertical em cada análise computacional do Chassi A

Ensaio	Massa (Kg)	Força (N)	Deslocamento Vertical A (mm)	Deslocamento Vertical B (mm)
1	5,6	54,936	0,30607	0,34294
2	10,5	103,005	0,57389	0,643
3	15,6	153,036	0,85263	0,95532
4	20,6	202,086	1,1259	1,2615
5	25,7	252,117	1,4047	1,5738
6	30,5	299,205	1,667	1,8678

Fonte: Autores

Com os valores obtidos de máximos e mínimos de deslocamento, foi possível utilizar a equação (2) para se calcular o Kt do sistema, conforme Tabela 6 e 7:

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

Tabela 6: Deformações angulares e rigidezes torcionais por FEA do chassi B

Ensaio	Deformação Angular (grau)	Torque (N.m)	Rigidez Torcional (N.m/grau)
1	0,05	41,75	865,64
2	0,09	78,28	865,65
3	0,13	116,31	865,61
4	0,18	153,59	865,66
5	0,22	191,61	865,66
6	0,26	227,40	865,65

Fonte: Autores

Tabela 7: Deformações angulares e rigidezes torcionais por FEA do chassi A

Ensaio	Deformação Angular (grau)	Torque (N.m)	Rigidez Torcional (N.m/grau)
1	0,04	41,75	1010,51
2	0,08	78,28	1010,51
3	0,12	116,31	1010,51
4	0,15	153,59	1010,52
5	0,19	191,61	1010,51
6	0,23	227,40	1010,51

Fonte: Autores

Analisando a Tabela 6 e 7, é possível traçar o valor de 865,65 N.m/grau e 1010,51 N.m/grau como média de rigidez torcional, respectivamente. Esses valores serão utilizados na análise final. Observando as Figuras 45 e 46, é possível notar que os valores de rigidez torcional entre os seis ensaios tem variação praticamente nula.

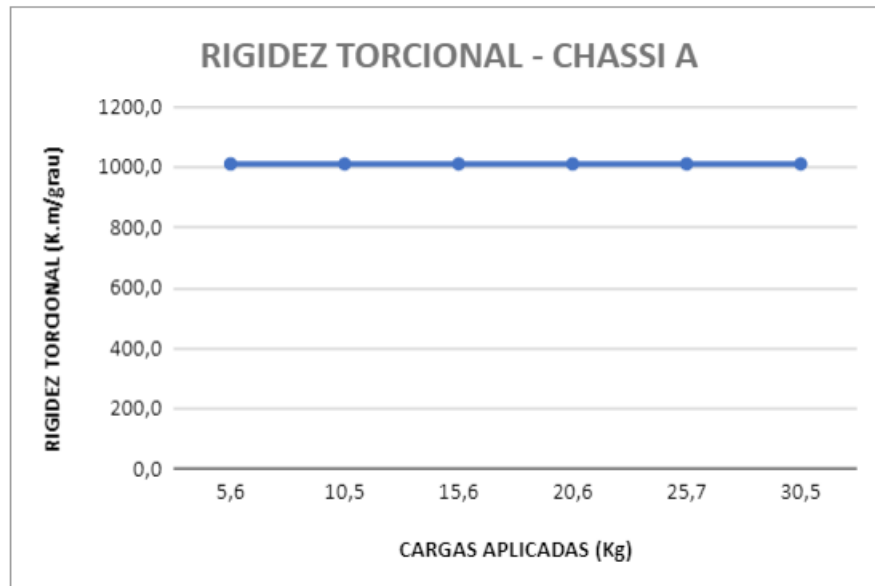


Figura 29: Comportamento da rigidez torcional de acordo com a variação das cargas aplicadas no chassi A no ensaio computacional

Fonte: Autores

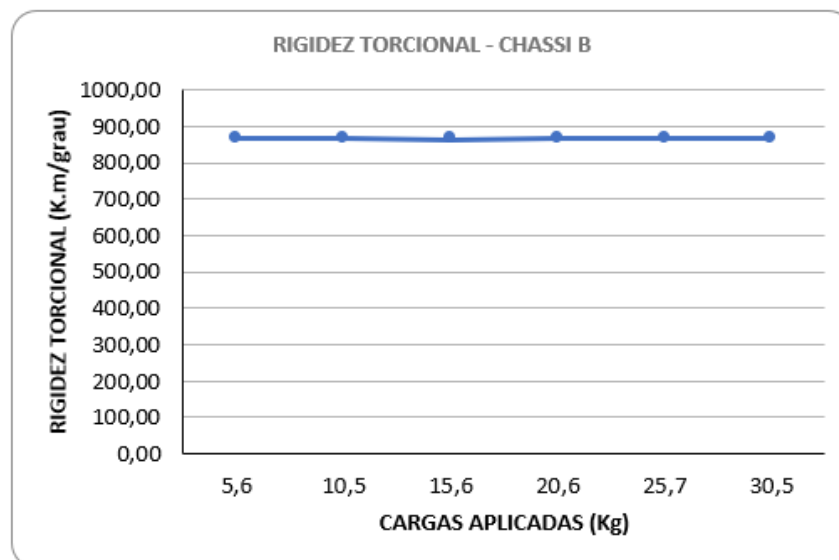


Figura 30: Comportamento da rigidez torcional de acordo com a variação das cargas aplicadas no chassi B no ensaio computacional

Fonte: Autores

4.2 ENSAIO PRÁTICO DE RIGIDEZ TORCIONAL DO CHASSI

Por meio do ensaio experimental foi possível obter-se os valores de deslocamento vertical (ΔA e ΔB) na parte dianteira da estrutura, por meio da aplicação de cargas diversas. A figura 31 representa esses deslocamentos após a aplicação da carga gerada pelo peso do balde com os carregamentos:



Figura 31: Deslocamento gerados pela carga aplicada no chassi A

Fonte: Autores

Os valores obtidos foram registrados por meio de um relógio comparador. Foram realizados ensaios com uma variação na carga de 5 kg até 30 kg. Além dessa variação de massas, o chassi sofreu mudanças estruturais e geométricas, que resultaram em duas configurações distintas de chassi, conforme descrito no item 3.3.2 deste trabalho. Logo, os valores de deformação angular variaram de acordo com os carregamentos aplicados e a geometria do chassi. As tabelas 8 e 9 apresentam os deslocamentos verticais obtidos nos ensaios experimentais:

Tabela 8: Deslocamentos verticais obtidos através dos ensaios experimentais no chassi A

Ensaio	Massa (Kg)	Deslocamento Vertical A (mm)	Deslocamento Vertical B (mm)
1	5,4	0,41	0,41
2	10,4	0,79	0,79
3	15,4	1,19	1,19
4	20,4	1,75	1,75
5	25,5	1,89	1,89
6	30,4	2,38	2,38

Fonte: Autores

Tabela 9: Deslocamentos verticais obtidos através dos ensaios experimentais no chassi B

Ensaio	Massa (Kg)	Deslocamento Vertical A (mm)	Deslocamento Vertical B (mm)
1	5,6	0,465	0,465
2	10,5	0,855	0,855
3	15,6	1,34	1,34
4	20,6	1,84	1,84
5	25,7	2,39	2,39
6	30,5	2,88	2,88

Fonte: Autores

Através da equação (2) é possível encontrar os valores de deformação angular:

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

Utilizando $L = 0,90$ metros, tem-se os valores de deformação angular apresentados na tabela 10:

Tabela 10: Deformações angulares e rigidezes torcionais do chassi A

Ensaio	Massas (Kg)	Deformação Angular (grau)	Rigidez Torcional (N.m/grau)
1	5,4	0,052203	771,23
2	10,4	0,100586	770,87
3	15,4	0,151515	757,79
4	20,4	0,222815	682,61
5	25,5	0,240641	790,05
6	30,4	0,303028	747,95

Fonte: Autores

Tabela 11: Deformações angulares e rigidezes torcionais do chassi B

Ensaio	Massas (Kg)	Deformação Angular (grau)	Rigidez Torcional (N.m/grau)
1	5,6	0,059205	705,19
2	10,6	0,108862	719,11
3	15,6	0,170614	681,70
4	20,6	0,234275	655,58
5	25,7	0,304301	629,67
6	30,5	0,366687	620,13

Fonte: Autores

Analisando as tabelas 10 e 11, é possível notar que os valores de rigidez torcional reduziram de acordo com a configuração do chassi. Em média, a rigidez torcional do chassi A é de 753,41 N.m/graus, e o chassi B é de 668,56 N.m/graus. Analisando o Figura 32 e 33, é possível notar que os valores encontrados não variam em $\pm 10\%$, o que garante uma margem de segurança confiável quanto ao teste realizado:

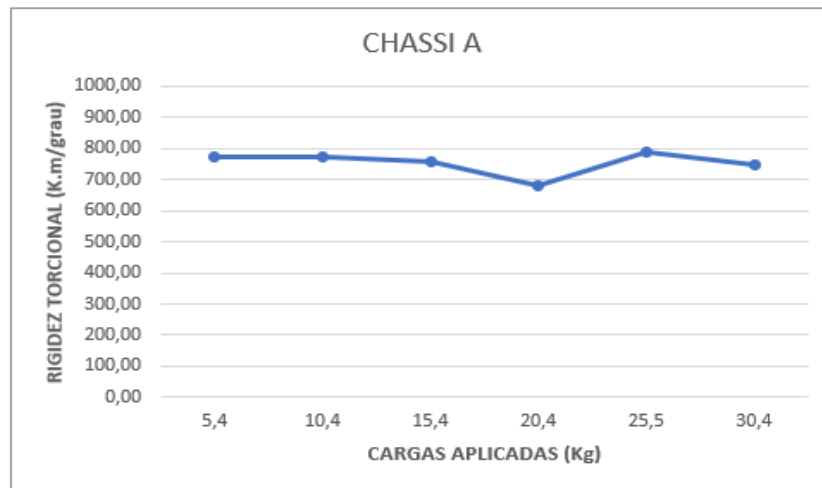


Figura 32: Comportamento da rigidez torcional de acordo com a variação das cargas aplicadas no chassi A no ensaio experimental

Fonte: Autores

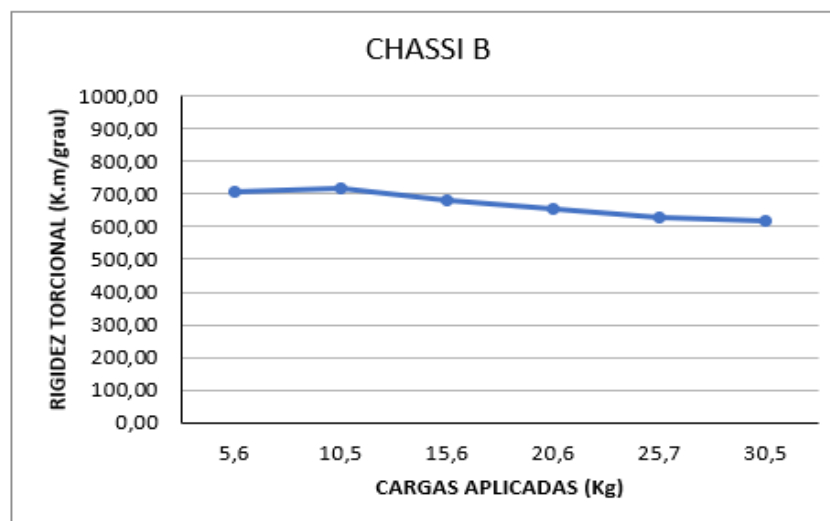


Figura 33: Comportamento da rigidez torcional de acordo com a variação das cargas aplicadas no chassi B no ensaio experimental

Fonte: Autores

Os valores de rigidez torcional encontrados no teste chassi A estão em conformidade com a Tabela 1. Já os valores obtidos no ensaio do chassi B são inferiores ao recomendado pela literatura, e isso pode ser explicado pela remoção do tubo mediano presente na parte dianteira do veículo (Figura 21).

4.3 COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS

Através dos resultados obtidos nos ensaios experimental e computacional é possível analisar as variações entre cada tipo de configuração de chassi, e entre os tipos de ensaio, conforme tabela 12 e 13:

Tabela 12: Comparativo entre a rigidez torcional do modelo computacional e do modelo experimental

Chassis	Kt Computacional	Kt Experimental	Comparativo entre os Métodos
A	1010,51	753,41	25,4%
B	865,65	668,56	22,8%

Fonte: Autores

Tabela 13: Comparativo entre a rigidez torcional do chassi A e do chassi B

Métodos	Kt Chassi A	Kt Chassi B	Comparativo entre os Chassis
Computacional	1010,51	865,65	14,34%
Experimental	753,41	668,56	11,26%

Fonte: Autores

5 CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica realizou um estudo comparativo entre os modelos experimentais e computacionais de um chassi baja, para medir a deformação próxima aos pontos de fixação da suspensão. O foco principal da pesquisa foi analisar a influência da rigidez torcional no projeto de suspensão do veículo, visto que esta é uma propriedade que impacta na manobrabilidade do carro.

Observou-se que o resultado da rigidez torcional apresentada pelo modelo computacional mostrou-se superior ao obtido experimentalmente, conforme Tabela 12. Pode-se pontuar que uma parcela dessa variação se dá pelo processo de fabricação do chassi, pois a mão de obra utilizada para construção da estrutura não é ideal para que se garanta todas as medidas corretas do projeto, recomendando-se assim realizar uma medição dos tubos utilizados e também de toda a estrutura para que estes valores possam ser incorporados no modelo numérico. Além desse fator, o chassi não foi testado logo após a sua fabricação, mas sim depois de ter sido utilizado em duas competições. Como consequência, a estrutura foi submetida a esforços cíclicos, que podem ter gerado mudanças microestruturais que não foram previstas na análise computacional.

Outro fator que foi possível observar no ensaio experimental foi a variação da rigidez torcional quanto à geometria do chassi. O chassi A tinha em sua dianteira um tubo no meio da face frontal, mencionado anteriormente como tubo mediano, que permitiu que a dissipação de cargas no teste fosse mais efetiva. Já o chassi B não possuía o tubo mediano, o que resultou em uma rigidez torcional inferior à apresentada pelo chassi A, como pode ser observado na tabela 13. Além da retirada do tubo mediano, notou-se que o tubo frontal inferior (Front Lateral Cross Member) estava fletido, o que pode ter contribuído para a variação dos resultados encontrados.

Os ensaios experimentais e as simulações da estrutura forneceram métodos de análise a serem aplicados em novas geometrias, contribuindo assim para futuras pesquisas e desenvolvimento de chassis da equipe Mud Runner.

6 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros são recomendáveis os seguintes tópicos para análise:

- Projetar novas geometrias de chassis para análise torcional, buscando melhorar a rigidez torcional do veículo e reduzir os custos de fabricação;
- Refinar a mão de obra ainda mais, para que o resultado prático esperado esteja perto do projetado;
- Analisar numericamente novos tipos de carregamentos e geometrias da estrutura, a fim de atingir as metas de rigidez estrutural;
- Estudar a influência da rigidez torcional do chassi, na dinâmica veicular.

7 REFERÊNCIAS

3D Content Central. **Spaceframe Chassis**. 2020. Disponível em: <https://www.3dcontentcentral.com/download-model.aspx?catalogid=171&id=1324135>. Acesso em: 28/12/2022.

ANDRADE, Guilherme A. M. **ANÁLISE ESTRUTURAL – BAJA PAMPA** - Alegrete, Universidade Federal do Pampa, 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 –** Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2015.

CASA e video. **Balança Digital de Vidro G-Tech Glass10 com Capacidade de 150kg**. 2023. Disponível em: <https://www.casaevideo.com.br/balanca-digital-de-vidro-com-capacidade-de-150kg-g-tech-glass10/p>. Acesso em 15/05/2023.

COISAS de engenheiro. **O que é a transferência dinâmica de peso**. 2017. Disponível em: <https://coisasdeengenheiro.wordpress.com/category/dinamica-da-frenagem/>. Acessado em: 15/01/2023.

DIGIMESS. **Relógios Comparadores (0,01 mm)**. 2023. Disponível em: <https://www.digimess.com.br/relogios-comparadores-001mm>. Acesso em: 15/05/2023.

GRABCAD. **Formula student monocoque frame**. 2017. Disponível em: <https://grabcad.com/library/formula-student-monocoque-frame-1>. Acesso em: 28/12/2022.

KAGGLE. **Car Yaw Prediction from Images - Baseline**. 2020. Disponível em: <https://www.kaggle.com/code/alvaroibrain/car-yaw-prediction-from-images-baseline>. Acesso em: 28/01/2023.

LUZ, Gelson. **Aço SAE 1020 Propriedades (e Fornecedores do Aço 1020)**. 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 24/05/2023.

MILLIKEN, William F.; MILLIKEN, Douglas L.; **Race car vehicle dynamics**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1995. 890 p.

RILEY, William B.; GEORGE, Albert R.; **Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis**. SAE Technical Paper Series 2002-01-3300, 2002.

SAE Brasil. **Universitários de São Paulo e Pernambuco vencem a 27ª Competição Baja SAE BRASIL – Etapa.** 2022. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/noticias/universitarios-de-sao-paulo-e-pernambuco-vencem-a-27a-competicao-baja-sae-brasil-etapa-nacional/>. Acesso em: 23/05/2023.

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

SAMPÒ, Enrico; SORNIOTTI, Aldo; CROCOMBE, Andrew. **Chassis Torsional Stiffness: Analysis of the Influence on Vehicle Dynamics.** SAE Technical Paper 2010-01-0094, 2010.

SEWARD, Derek. **Race Car Design.** Department of Engineering Design – Lancaster University. 2014. 287 p.

SINGH, R.P., **Structural Performance Analysis of Formula SAE Car**, Jurnal Mekanikal, n. 31, pp. 46-61, 2010.

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.

YOUTUBE. O passo a passo para validação da gaiola Baja SAE. 2019. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=wRA6-jaDW7s&list=PLGxv5J6ymX6sCD_4nHkUVORFZrKDCp6DR

APÊNDICE A – Simulações realizadas no Ansys

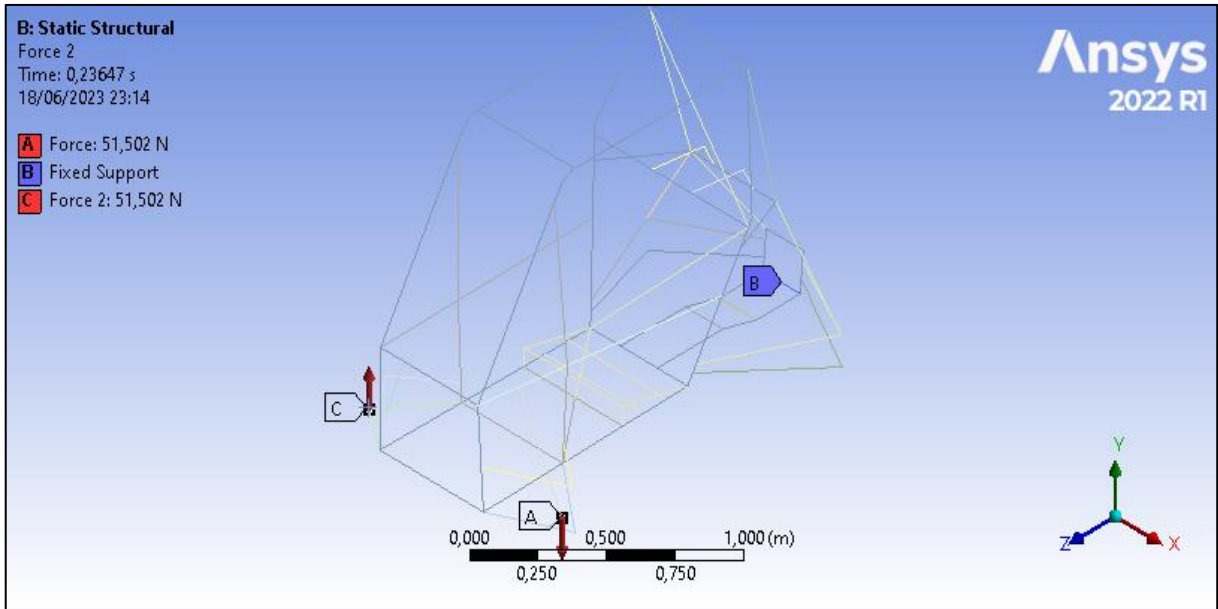


Figura 34: Condições de contorno do ensaio 2 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

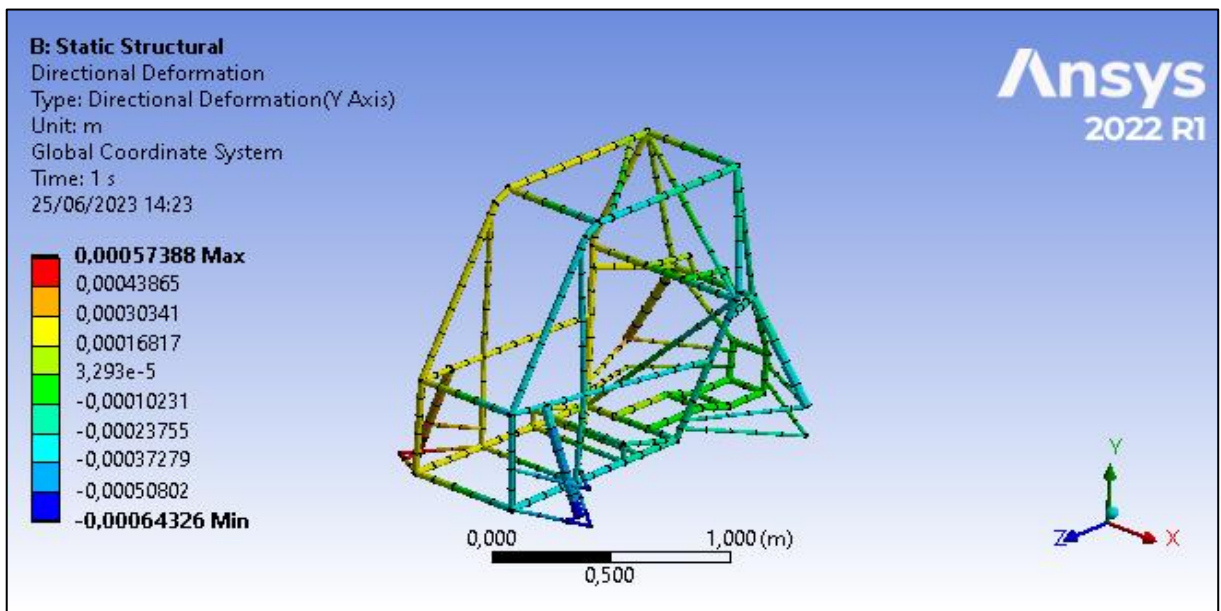


Figura 35: Deslocamento vertical do ensaio 2 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

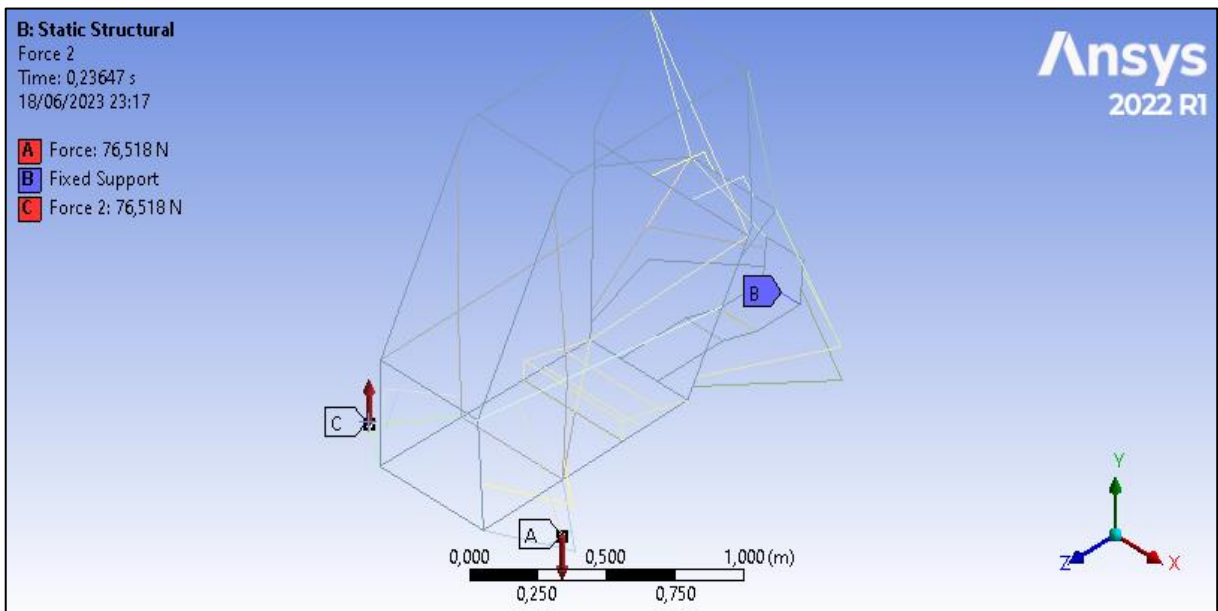


Figura 36: Condições de contorno do ensaio 3 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

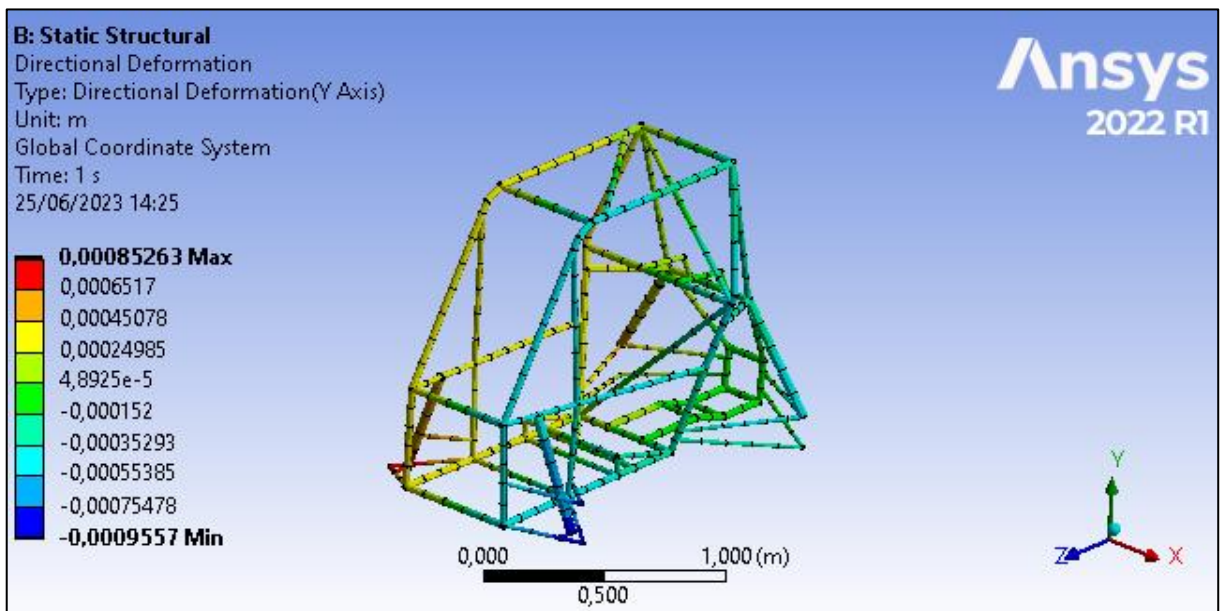


Figura 37: Deslocamento vertical do ensaio 3 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

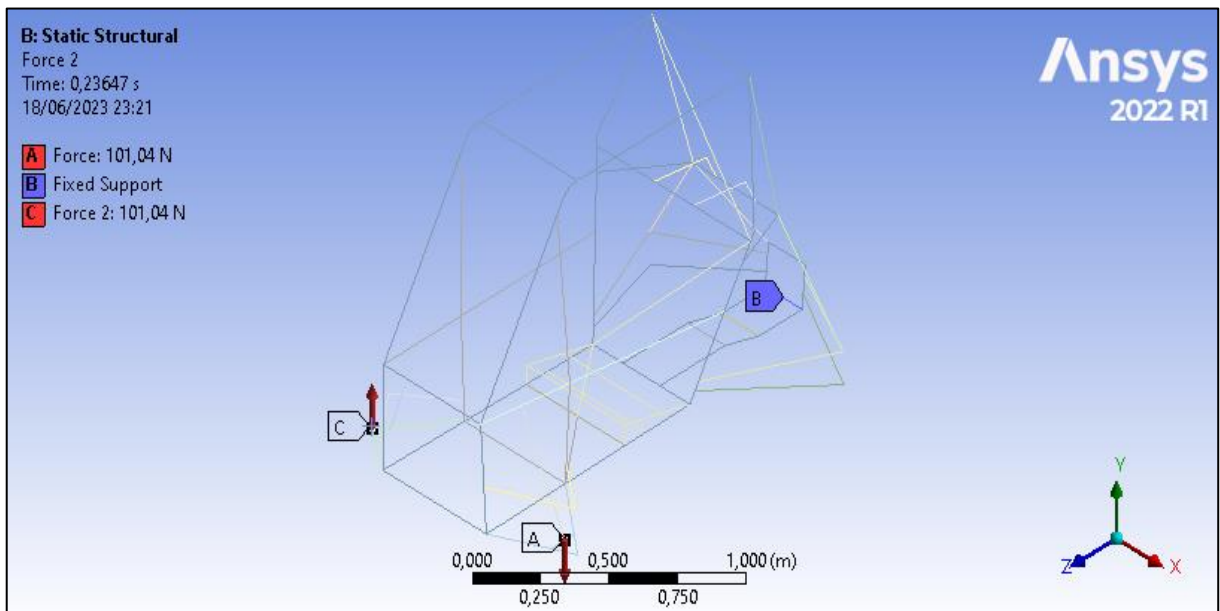


Figura 38: Condições de contorno do ensaio 4 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

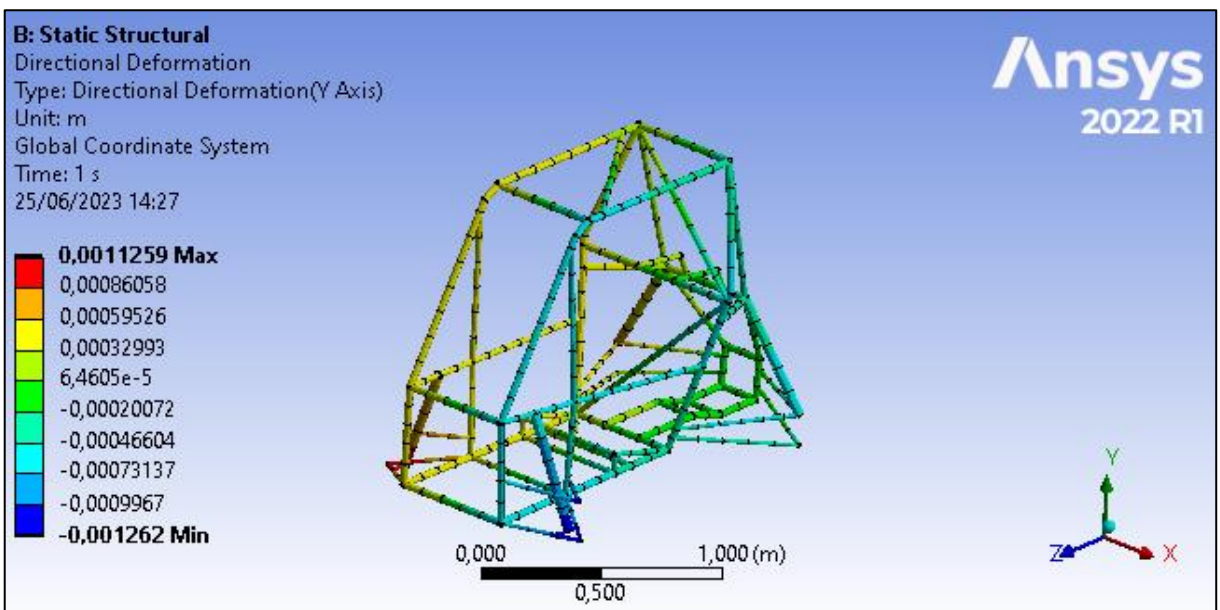


Figura 39: Deslocamento vertical do ensaio 4 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

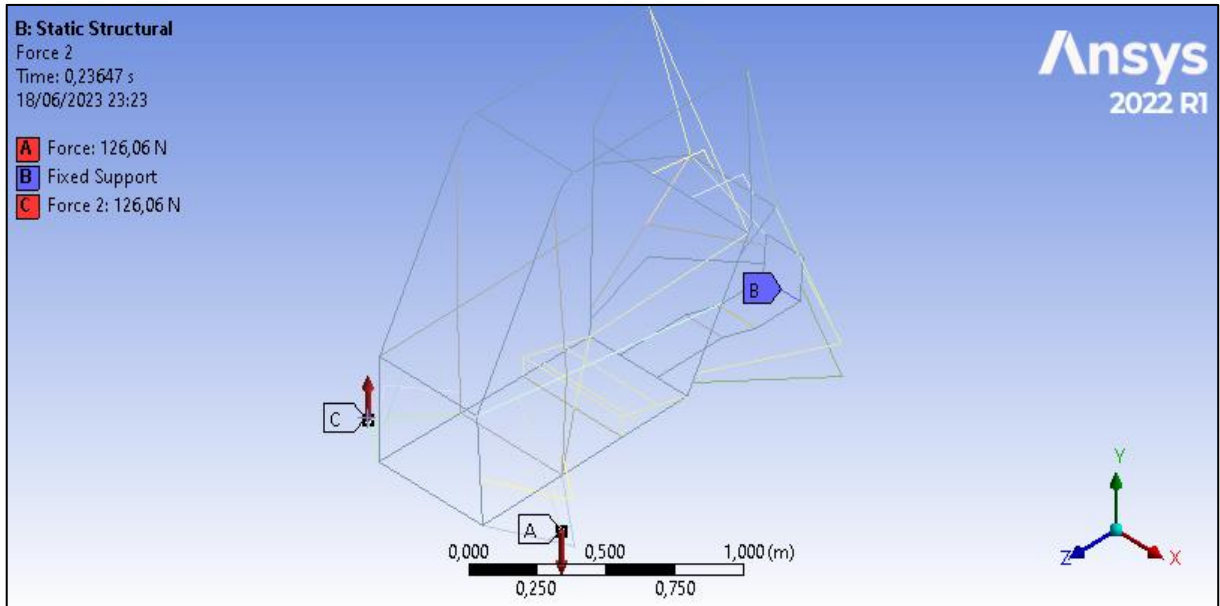


Figura 40: Condições de contorno do ensaio 5 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

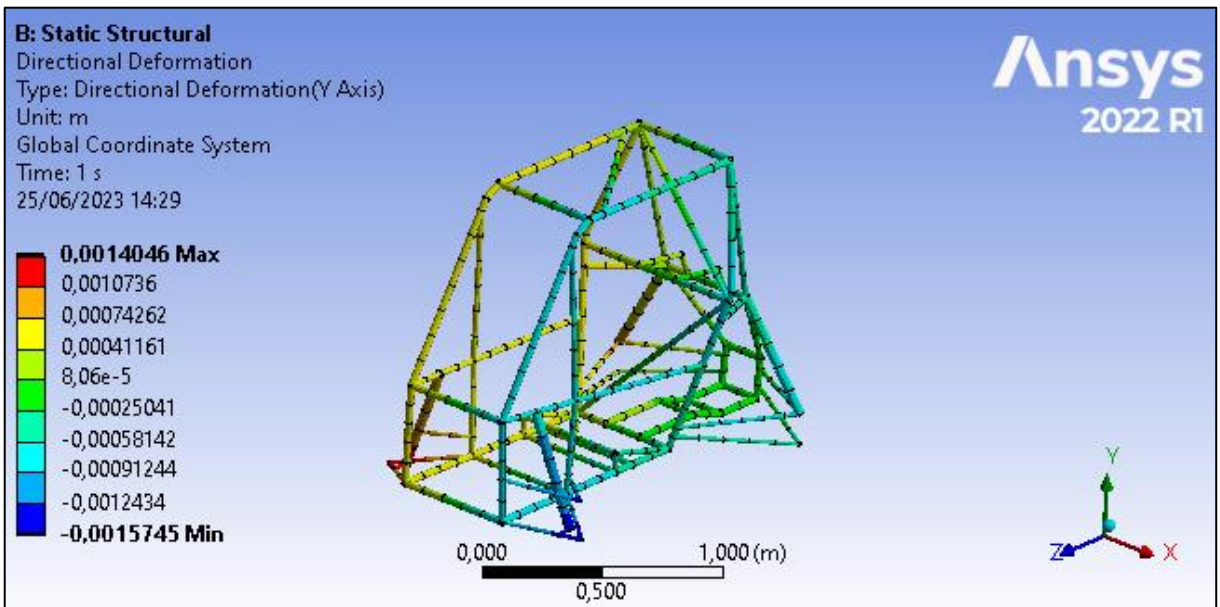


Figura 41: Deslocamento vertical do ensaio 5 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

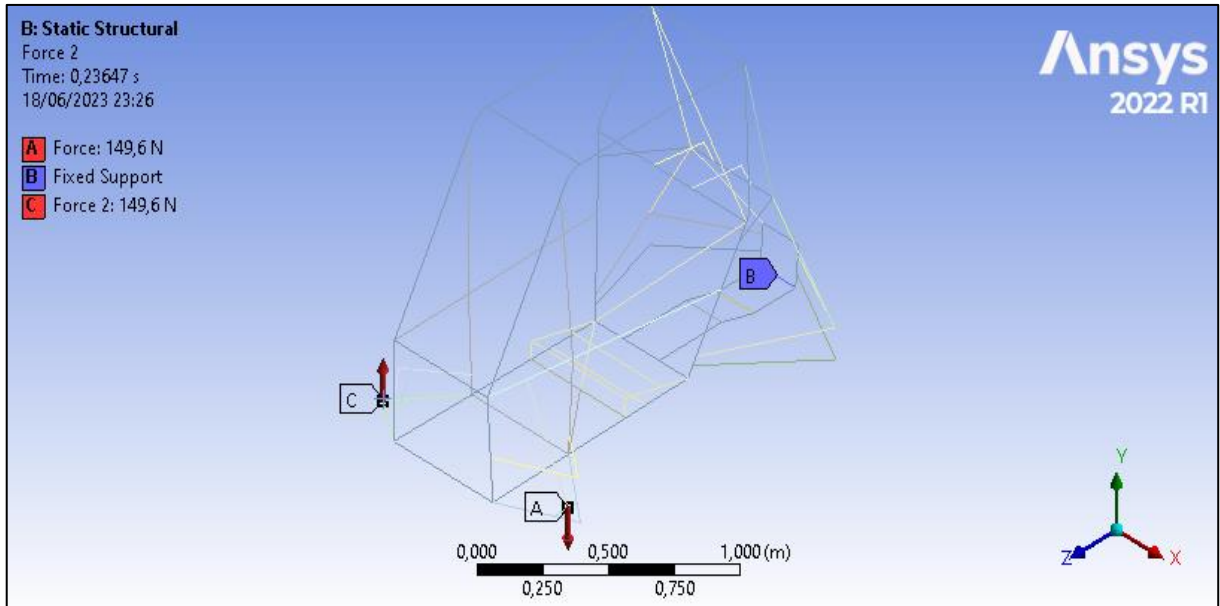


Figura 42: Condições de contorno do ensaio 6 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

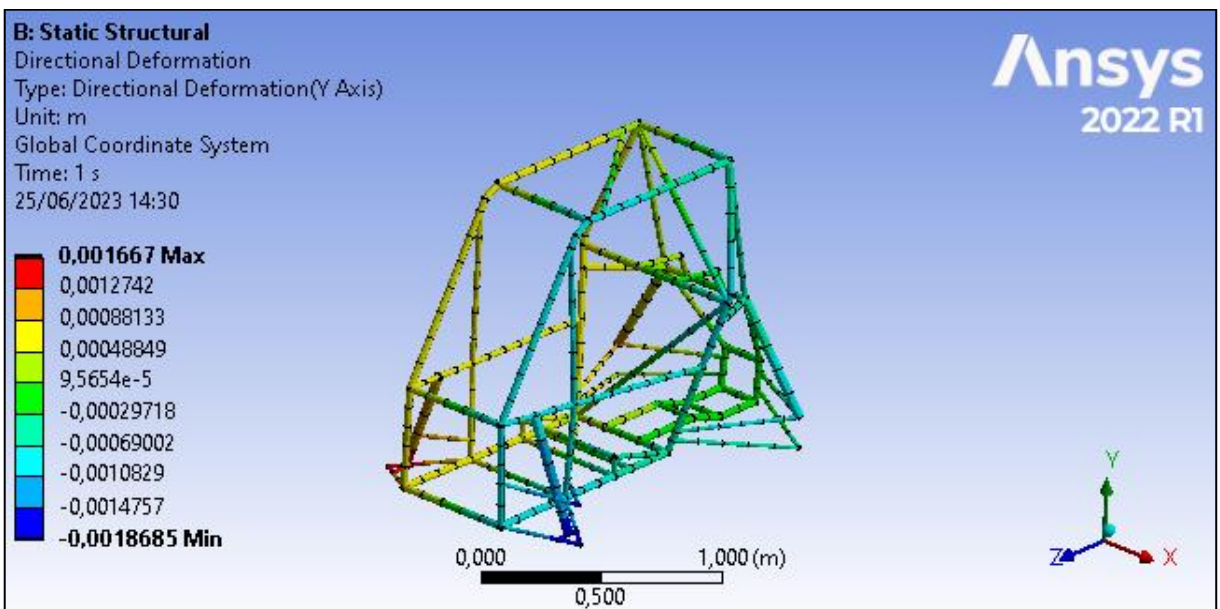


Figura 43: Deslocamento vertical do ensaio 6 no Ansys – chassi B

Fonte: Autores

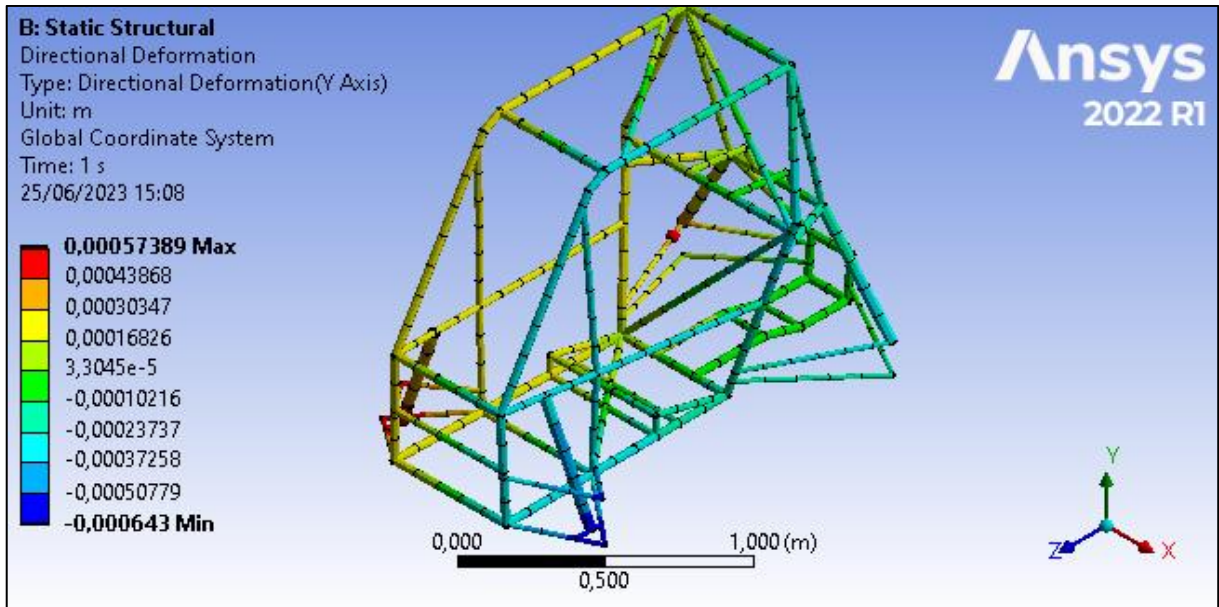


Figura 44: Deslocamento vertical do ensaio 2 no Ansys – chassi A

Fonte: Autores

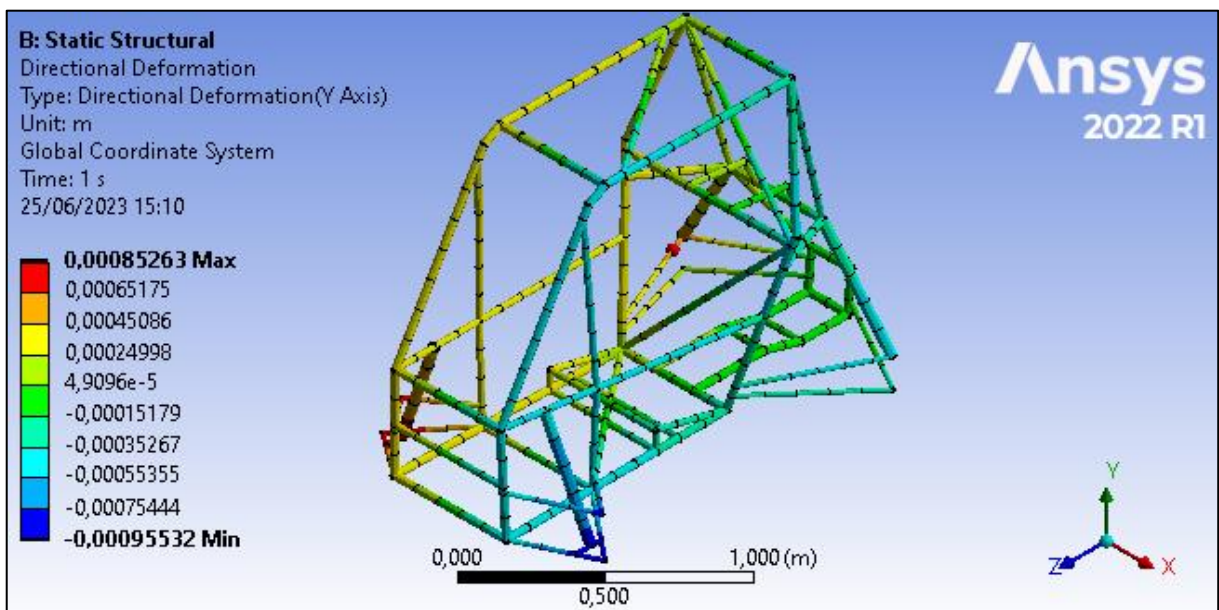


Figura 45: Deslocamento vertical do ensaio 3 no Ansys – chassi A

Fonte: Autores

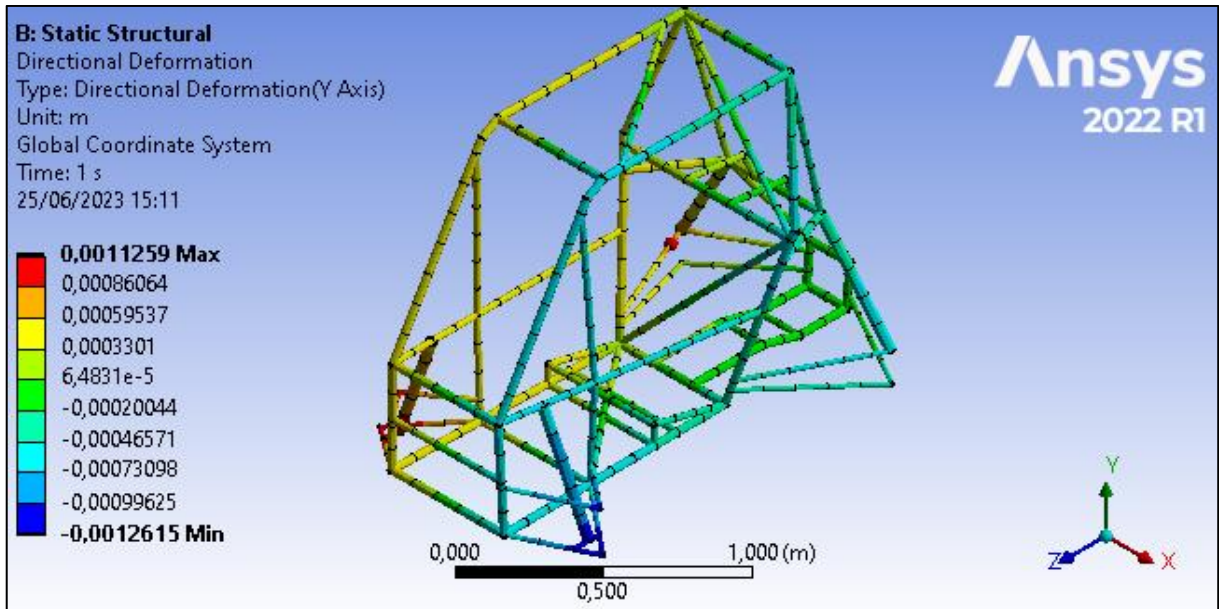


Figura 46: Deslocamento vertical do ensaio 4 no Ansys – chassi A

Fonte: Autores

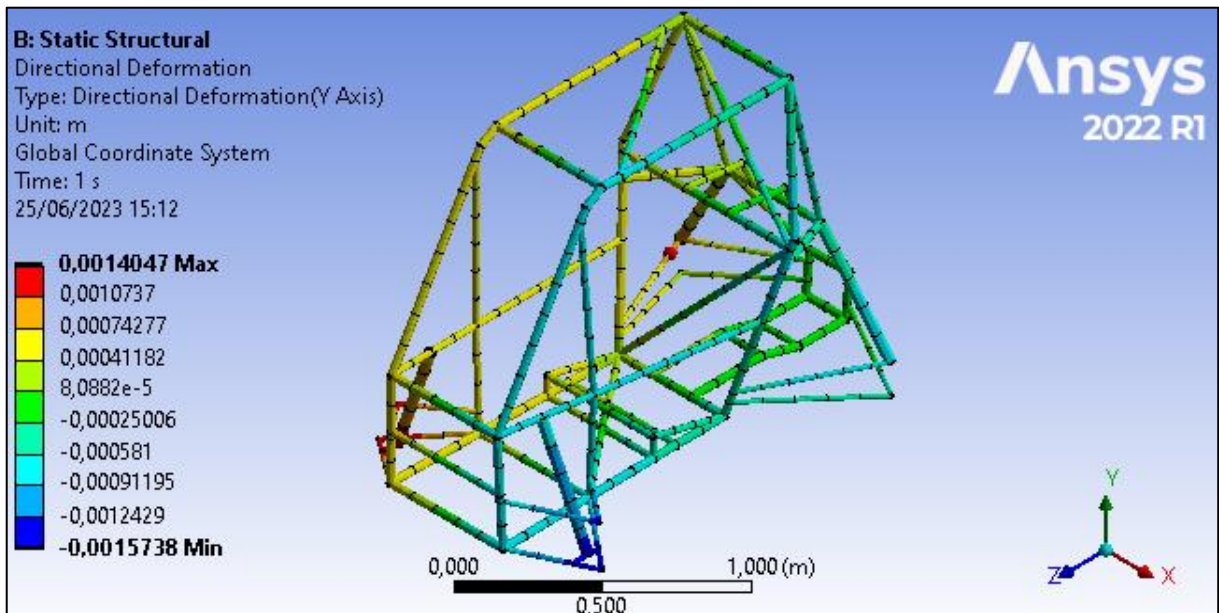


Figura 47: Deslocamento vertical do ensaio 5 no Ansys – chassi A

Fonte: Autores

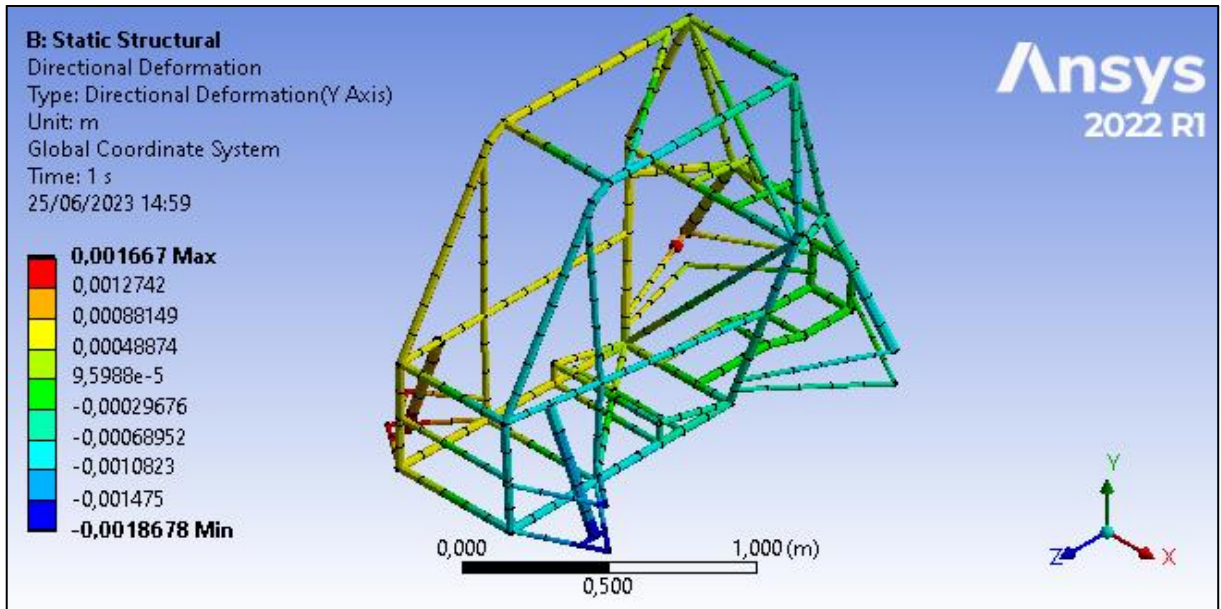


Figura 48: Deslocamento vertical do ensaio 6 no Ansys – chassi A

Fonte: Autores