

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA RIGIDEZ TORCIONAL DE UM VEÍCULO BAJA PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

por

Pietro Gabriel Ramos Cunico

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

Gabriel Ramos Cunico, Pietro
ANÁLISE DA RIGIDEZ TORCIONAL DE UM VEÍCULO BAJA
PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS / Pietro Gabriel
Ramos Cunico. -- 2021.
25 f.
Orientador: Daniel Milbrath De Leon.

Trabalho de conclusão de curso (Especialização) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. BAJA SAE. 2. Elementos finitos. 3. Simulação
numérica. 4. Rigidez torcional. I. Milbrath De Leon,
Daniel, orient. II. Título.

Pietro Gabriel Ramos Cunico

ANÁLISE DA RIGIDEZ TORCIONAL DE UM VEÍCULO BAJA PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientados: Prof. Daniel Milbrath De Leon

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Daniel Milbrath De Leon

Porto Alegre, maio de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por me proporcionarem todas as oportunidades de realizar uma graduação sem dificuldades, sem eles este trabalho não seria possível.

Agradeço à equipe TCHÊ BAJA SAE por ser o projeto de extensão que me proporcionou o maior avanço como estudante e profissional dentro da faculdade.

À minha namorada Mariana, que me apoiou incondicionalmente e, principalmente, emocionalmente durante os altos e baixos de humor e motivação durante este período.

À todos os meus amigos e colegas, que durante este período de faculdade, me proporcionaram experiências e conversas que me fizeram ser a pessoa que sou hoje.

Cunico, P. G. R. **ANÁLISE DA RIGIDEZ TORCIONAL DE UM VEÍCULO BAJA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021

RESUMO

A rigidez de um chassi é a propriedade fundamental para o correto funcionamento de todos os mecanismos de um automóvel. Garantir que um veículo tenha alta rigidez e pouca massa são indicadores essenciais de qualquer automóvel. No entanto, esses indicadores geralmente estão em conflito entre si, já que o aumento da rigidez é acompanhado com o aumento do peso do veículo. Este trabalho estuda, especificamente, a rigidez torcional de um veículo BAJA SAE. Através do método dos elementos finitos é possível obter resultados de rigidez torcional e validá-los com dados experimentais. A partir destes resultados, propõe-se novas geometrias a fim de maximizar a rigidez torcional

PALAVRAS-CHAVE: BAJA SAE, elementos finitos, simulação numérica, rigidez torcional

Cunico, P. G. R. **ANALYSIS OF TORSIONAL STIFFNESS OF A BAJA SAE VEHICLE BY THE FINITE ELEMENT ANALYSIS**. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021

ABSTRACT

The rigidity of a chassis is a fundamental property for the correct functioning of the systems of a vehicle. Therefore, to ensure the vehicle has a high torsional stiffness and low weight is one of the best indicators. However, these indicators are usually in conflict because a high rigidity increases the vehicle's mass. This paper studies, specifically, the torsional stiffness of a BAJA's vehicle. Through the finite element method, it is possible to obtain the results of torsional stiffness and compare them with experimental tests. Once validated, it is possible to study different geometries that can improve the torsional stiffness.

KEYWORDS: BAJA SAE, finite element, numerical simulation, torsional stiffness

NOMENCLATURA

T	Torque	[Nm]
F	Força aplicada ao veículo	[N]
L	Distância da força aplicada com relação ao eixo simétrico do veículo	[m]
K_t	Rigidez torcional	[Nm/°]
T	Torque	[Nm]

Símbolos Gregos

θ	Deflexão angular com relação aos deslocamentos	[°]
δ_e	Deslocamento vertical esquerdo no ponto de referência em relação a vista frontal do chassi	[m]
δ_d	Deslocamento vertical direito no ponto de referência em relação à vista frontal do chassi	[m]

Abreviaturas e acrônimos

CAD	<i>Computer Assisted Engineering</i> ou Engenharia Assistida por computador
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> ou Análise de Elementos Finitos
SAE	<i>Society of Automotive Engineer</i> ou Sociedade de Engenheiros da Mobilidade
RATBSB	Regulamento Administrativo e Técnico BAJA SAE BRASIL

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1. Chassi.....	2
2.2. Tipos de chassi.....	2
2.3. Chassi BAJA SAE.....	3
2.4. Rigidez torcional.....	4
2.5. Ensaio de rigidez torcional.....	4
3. METODOLOGIA	5
3.1. Construção do modelo.....	6
3.2. Definição das condições de contorno.....	6
3.3. Análise da Rigidez Torcional.....	7
4. RESULTADOS	8
4.1. Resultados de Simulação Numérica.....	8
4.2. Comparação de Resultados.....	9
4.3. Observação da simulação.....	10
5. PROPOSTA DE GEOMETRIA	10
5.1. Soluções propostas.....	11
5.2. Resultados.....	11
5.3. Comparação de resultados.....	12
6. CONCLUSÃO	13
7. REFERÊNCIAS	15
8. APÊNDICE A	16
9. APÊNDICE B	17

1. INTRODUÇÃO

O projeto BAJA SAE é um desafio lançado aos estudantes de Engenharia para desenvolver um veículo off road, desde sua concepção, projeto e fabricação com o intuito de estimulá-los a aplicar o conhecimento adquirido em sala de aula. A competição inicialmente começou em 1976 nos Estados Unidos e chegou no Brasil no ano de 1995 e no mesmo ano a Equipe Tchê BAJA SAE UFRGS foi fundada. Anualmente há duas competições, uma para etapa regional que acontece em diferentes cidades de cada região e uma competição nacional que tradicionalmente é disputada em São Paulo e conta com aproximadamente 60 equipes. As competições são compostas de uma prova que tem o objetivo de avaliar a etapa de projeto dos subsistemas de direção, freio, suspensão, chassi e powertrain e provas específicas para avaliar o desempenho do veículo, como: manobrabilidade, suspensão e tração, velocidade, aceleração e enduro.

Apesar da equipe ter sido fundada em 1995, muitas vezes não participou das competições pela falta de integrantes e de um projeto bem estruturado. Desde 2017 a equipe vem se reestruturando e participou de todas as disputas pelo BAJA SUL e alcançando a classificação de 7º lugar em 2019. A Figura 1 demonstra o protótipo de testes utilizado pela equipe que uma vez a cada dois anos elabora um novo projeto, conforme as diretrizes da competição. Apesar da equipe ter obtido uma classificação expressiva em 2019, foram relatados problemas de movimentos bruscos na direção do veículo durante o uso, assim como o atraso na resposta da suspensão durante seu trajeto.

Figura 1 - Veículo da equipe Tchê BAJA SAE para realização de testes



Um dos fatores que influenciam diretamente a resposta da suspensão e garante a estabilidade da direção é a rigidez estrutural do veículo. Este parâmetro indica a capacidade do veículo se deformar sob efeitos de forças externas e a rigidez torcional mede a capacidade do chassi se deformar a partir de um momento torçor aplicado. Para avaliar esta característica, propõe-se um modelo em elementos finitos e compara-se com os dados experimentais obtidos.

Diversos autores estabelecem a importância da geometria do chassi de um veículo em função de seu comportamento na pista. Milliken (1995) estabelece que o processo de concepção do chassi é realizado iterativamente por estar sempre se adaptando aos demais subsistemas do

veículo. E como todo memorial de cálculos dos subcomponentes é realizado levando em conta a rigidez do chassi e dos demais componentes, é imprescindível que o chassi se deforme o mínimo possível para garantir os dados de projeto. Assim, a rigidez de um chassi é um dos aspectos mais importante de se levar em conta na sua concepção.

Autores como Sampò (2011) citam que para avaliar a qualidade de um chassi automotivo os indicadores analisados são rigidez e peso. Geralmente, estas duas características estão em conflito entre si, já que o aumento da rigidez frequentemente é acompanhado de um aumento de massa. Assim, um chassi adequado é aquele que relaciona as duas partes de modo a ter uma baixa quantidade de massa e um alto valor de rigidez.

Trabalhos como (RILEY e GEORGE, 2002), (TEBBY, ESMAILZADEH e BARARI, 2011) e Oyama (2009) definem uma metodologia assertiva para a utilização do método de elementos finitos para obter a rigidez torcional de um chassi. Assim como a estrutura para se obter os dados experimentais para um ensaio de rigidez torcional.

Gambôa (2020) fornece os dados experimentais utilizados neste trabalho para comparação e validação do modelo computacional para o mesmo veículo em estudo.

Tendo em vista que a rigidez torcional de um chassi é um dado de entrada para o projeto dos subsistemas de um veículo, é necessário que se tenha estes resultados em fases iniciais, o que nem sempre é possível. Assim, o presente trabalho estabelece como objetivos:

- Criar um modelo capaz de avaliar a rigidez torcional de um chassi BAJA SAE pelo método dos elementos finitos.
- Validar o modelo através da comparação dos dados experimentais.
- Propor alterações na geometria que produzam um acréscimo na rigidez torcional.
- Avaliar as propostas de geometria a fim de maximizar sua rigidez para o menor incremento de massa possível.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Chassi

De acordo com Seward (2015), o termo chassi pode ser utilizado para se referir a carroceria incluindo suspensão, direção e rodas. Contudo, é majoritariamente utilizado para se referir a sua estrutura. É possível realizar um comparativo com o esqueleto humano o qual mantém todos os órgãos vitais nos locais corretos e em pleno funcionamento. Suas características são:

- Providenciar segurança para o piloto e para os subcomponentes (motor, tanque, bateria)
- Prover força e rigidez suficientes para resistir aos esforços da suspensão, condução, frenagem e impactos

Segundo Sampò (2011), o chassi é definido como a estrutura básica do veículo ou como a estrutura o qual o veículo é construído. De certo modo é o esqueleto que os subcomponentes (suspensão, direção, freio e motor) são ligados e fazem conexão entre si. Desta forma, é necessário que resista aos esforços de seus componentes e os absorva sem grandes deformações.

2.2. Tipos de chassi

Os chassis são separados por categorias de funcionalidade, segundo Castro (2008) existem dois tipos básicos de estrutura veicular: o clássico quadro de chassis e o tipo monobloco. O quadro de chassis suporta diretamente as suspensões, o conjunto propulsor e os

subcomponentes, enquanto o monobloco integra chassis e carroceria em uma única peça. Algumas classes de carroceria são:

- *Backbone*: Constituído de uma única peça central como membro estrutural tornando-o bastante robusto. É a geometria mais simples dentre as outras, por isso é comumente utilizado em veículos esportivos menores.
- *Monocoque*: Utilizado principalmente em veículos de Fórmula 1 por apresentarem alta proteção contra impactos. É constituído de um arranjo inteiro que define toda a forma do veículo.
- *Monobloco*: Atualmente 95% dos veículos utilizam este tipo de estrutura que é caracterizada pelos componentes fabricados por estampagem e unidos por solda ponto em uma linha de produção com diferentes níveis de automatização.
- *Spaceframe*: A estrutura é composta por membros tubulares de pequeno diâmetro unidos em uma configuração tridimensional. Também chamado de “estrutura de gaiola”, é principalmente fabricado em uma produção de baixa escala pela dificuldade de fabricação e montagem dos tubos que requerem altas precisões.

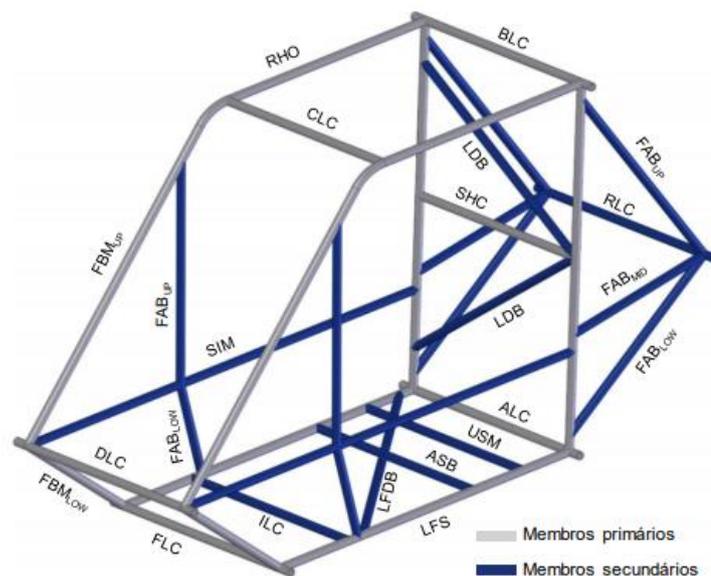
As figuras referentes às diferentes categorias de chassi podem ser visualizadas no APÊNDICE A.

2.3. Chassi BAJA SAE

A gaiola de proteção utilizada para o projeto é do tipo *Spaceframe* e é regulamentada pelo seu comitê técnico e administrativo BAJA SAE Brasil (RATBSB) que define o escopo do programa e suas atividades correlatas. Cada um dos membros estruturais tem uma denominação pré-definida, conforme Figura 2, que será utilizada no respectivo trabalho para indicar as posições dos tubos do chassi a fim de facilitar a compreensão.

Conforme o regulamento sugere, o objetivo é criar uma gaiola com espaço mínimo ao redor do piloto, que deve ser projetada e fabricada para prevenir qualquer falha, sempre com o propósito de proteger o piloto. É necessário que o material do chassi seja feito com tubos de aço com, no mínimo, 0,18% de carbono. Membros primários têm seção mínima estipulada e amostras de solda devem ser feitas para comprovar a integridade da estrutura.

Figura 2 - Chassi BAJA-SAE. Fonte (RATBSB – Emenda 3)



2.4. Rigidez torcional

É possível observar que grande parte dos autores considera a rigidez torcional como uma das principais características de um veículo, pois afeta a dirigibilidade e seu comportamento vibracional. Assim, é importante limitar suas deformações, visto que esforços podem afetar a operação do veículo causando a alteração de suas propriedades inerciais estipuladas, conforme Seward (2015).

Sabe-se que aumentar a rigidez torcional do veículo é essencial para que se tenha o dimensionamento de seus componentes de modo confiável. No entanto, é necessário estipular um limite para que ocorra o acréscimo da rigidez sem que afete as demais características do veículo, como é o caso da massa do chassi. É conhecido que o aumento da rigidez causa um acréscimo na massa do veículo indesejada, contudo é possível tornar o chassi mais rígido apenas com a adição estratégica de componente estruturais (THOMPSON, RAJU e LAW, 1998). Deste modo, é possível visualizar na Tabela 1 valores comuns de rigidez torcional para diferentes tipos de veículos.

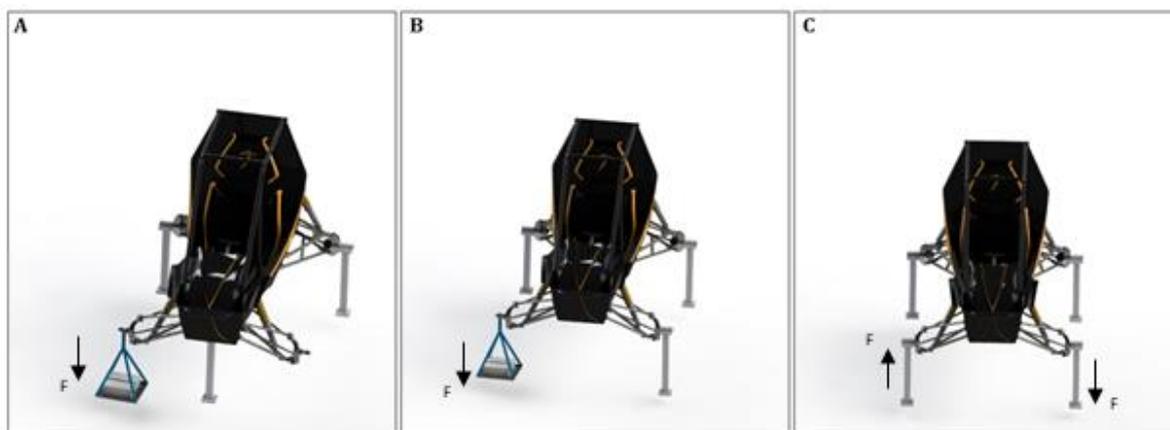
Tabela 1 - Valores típicos de rigidez torcional de veículos. Fonte Sampò (2010). Adaptado Barbosa (2015)

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

2.5. Ensaio de rigidez torcional

Para modelagem experimental e numérica existem três configurações possíveis que são descritas conforme a posição de seus suportes dianteiros que sustentam a estrutura (Sampò, 2011). A configuração de pivô de centro é composta por uma bancada de testes onde o chassi está fixado em dois pontos na traseira e um no centro da dianteira, onde a força é aplicada em um dos lados para gerar o momento torçor no chassi. A disposição de pivô de canto se assemelha a primeira configuração com dois pontos de contato rígidos na traseira, porém um ponto fixo é aplicado em uma das laterais do chassi e a carga é colocada na sua outra extremidade. A última configuração é chamada de dois suportes rígidos onde há dois pontos de contato fixos na traseira e dois pontos de contato na dianteira que aplicam uma força binária ao veículo a partir de atuadores exercendo uma força contrária entre si. A Figura 3 apresenta um esquema das configurações descritas.

Figura 3 - Ensaio de rigidez torcional a) Pivô central b) Pivô de canto e c) dois suportes rígidos



Outro fator que influencia a rigidez é o local de aplicação da carga. Caso a aplicação da carga for realizada nas massas não suspensas (cubo de roda e suspensão) o valor resultante será a rigidez torcional do veículo inteiro, caso a aplicação da carga for feita diretamente na estrutura, o valor resultante será a rigidez torcional do chassi. Para o ensaio no veículo inteiro, usualmente, é retirado os amortecedores e incluído barras rígidas para anular o efeito de estabilidade do veículo causado pelo componente.

3. METODOLOGIA

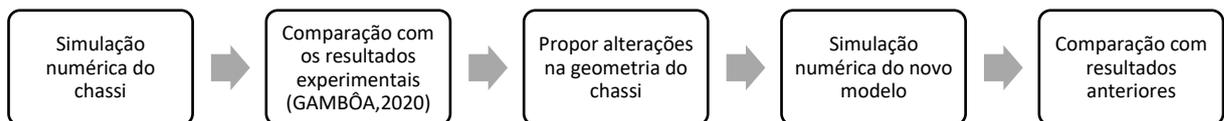
O presente estudo foi estruturado para validar um modelo de elementos finitos a partir dos dados experimentais existentes para o chassi atual. Isto é, o trabalho tem como objetivo central apresentar um modo de legitimar o modelo numérico para propor melhorias de projeto, sendo algumas delas feitas nesta monografia a partir dos resultados obtidos. As geometrias utilizadas, propriedades do material e demais características aplicadas foram baseadas em Gambôa (2020) para que seja possível a comparação dos resultados minimizando os erros entre si, uma vez que, o veículo em questão é exatamente igual ao do objeto de estudo presente.

A equipe Tchê BAJA SAE da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a partir da licença concedida pela empresa *Dassault Systemes* que dá apoio estudantil para membros de equipes BAJA, têm seu modelo CAD projetado no software Solidworks 2019. O programa possibilita a obtenção dos pontos de interseção dos tubos do chassi de maneira precisa, o que demonstra maior confiabilidade no modelo proposto. É possível importar os pontos para o ANSYS, através da licença obtida pela UFRGS, onde é realizada a simulação e realizar, assim, a ligação destes pontos para dar forma à estrutura do chassi. Com a estrutura pronta, realiza-se criação das seções desejadas e se aplica às linhas correspondentes. Define-se as propriedades do material utilizadas com o módulo de elasticidade de 200 GPa, coeficiente de Poisson de 0,29 e se faz a escolha do elemento a ser utilizado (BEAM 189). Em virtude dos deslocamentos dos nós se utiliza o elemento de viga que satisfaz as condições sem que haja um custo computacional tão elevado em comparação com a utilização de um elemento sólido.

Definido o modelo e as propriedades do material é necessário aplicar as condições de contorno e com os resultados dos deslocamentos calcular a rigidez torcional do chassi. Com os resultados obtidos da simulação numérica é necessário compreender se o valor está próximo do real, para isso, os dados alcançados serão comparados com o trabalho de Gambôa (2020) onde foi testado experimentalmente o mesmo chassi. Espera-se que a comparação entre os resultados

obtidos por simulação numérica e experimental resultem em valores próximos para que seja possível legitimar a análise por elementos finitos. Com a análise validada é possível realizar pequenas modificações na estrutura com a inclusão de tubos e verificar as alterações na sua rigidez. A Figura 4 engloba as etapas necessárias para obtenção da nova geometria otimizada.

Figura 4 – Fluxograma do trabalho apresentado



3.1. Construção do modelo

Para que seja possível a simulação por elementos finitos para obtenção da rigidez torcional do chassi e do veículo inteiro é necessário realizar adaptações no modelo a ser utilizado para simulação, uma vez que se optou por não utilizar a geometria exata de um veículo BAJA com soldas, elementos de fixação e uniões perfeitas de tubos. Optou-se por utilizar duas configurações de geometria para o trabalho proposto, a primeira apenas na forma de um chassi tubular sem a modelagem dos demais subcomponentes (freio, direção, motor, suspensão) onde não houve alterações ou modificações na geometria de projeto prevista pela equipe. E a segunda com uma estrutura que considera as massas não suspensas do veículo, como a suspensão. A Figura 5b mostra o detalhe do projeto da suspensão que exerce o papel de amortecimento das forças externas sobre o veículo, assim, é necessário retirar o amortecedor, que exerce esta função, e substituí-lo por uma barra fixa com as mesmas dimensões que Gambôa (2020) utilizou, a Figura 5a e Figura 5c apresentam as alterações realizadas no modelo para simulação e no ensaio experimental, respectivamente.

Figura 5 – Detalhe da adaptação de geometria realizada em a) Simulação b) Modelo CAD original e c) Ensaio Experimental

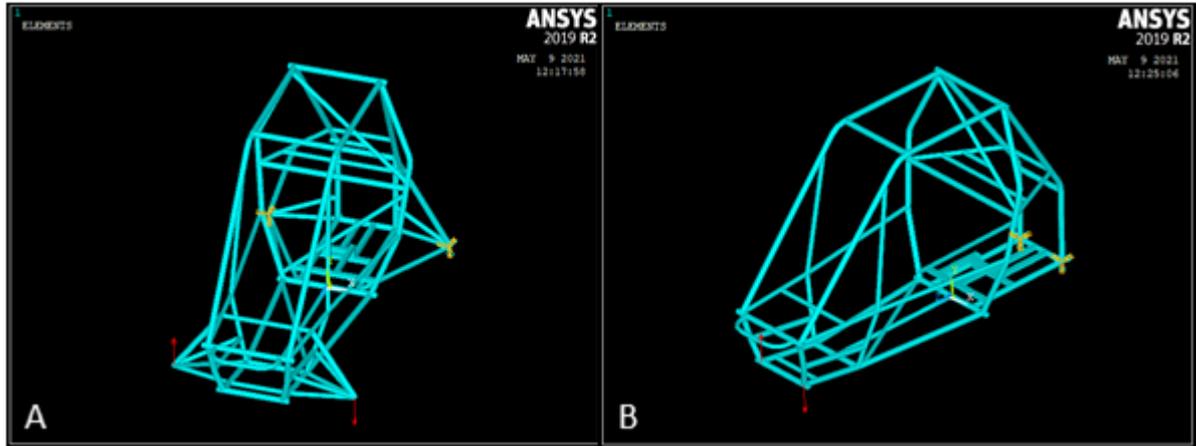


3.2. Definição das condições de contorno

Conforme a Figura 3 é possível verificar que há três configurações possíveis para a determinação da rigidez torcional. Escolheu-se avaliar a rigidez do chassi e do veículo a partir do método da aplicação de um binário de forças na parte dianteira do veículo e restringir o movimento na parte traseira do chassi. A Figura 6 demonstra as condições de contorno aplicadas ao chassi e ao veículo inteiro. Para as duas configurações foi restringindo a sua traseira e aplicado a força em algum ponto da dianteiro do veículo. Para chassi, foi restringindo

a parte traseira e aplicado a força em sua própria estrutura. E para o modelo do veículo inteiro houve a restrição de movimento e aplicação de força na união dos tubos que representam a suspensão.

Figura 6 - Condições de contorno para obtenção da rigidez torcional com a) binário de forças na suspensão b) binário de forças no chassi



3.3. Análise da Rigidez Torcional

Para obter a rigidez torcional do chassi é necessário aplicar uma força ao modelo e verificar os deslocamentos nos nós de interesse. Para este trabalho foi realizada a medição conforme avaliação experimental de Gambôa (2020). A rigidez torcional K_t da estrutura é obtido a partir da Equação 1, segundo (RILEY e GEORGE, 2002)

$$K_t = \frac{T}{\theta} [N \cdot m/^\circ] \quad (1)$$

onde T é definido como o torque (Nm) aplicado ao chassi e θ como a deflexão angular ($^\circ$) obtida a partir dos deslocamentos dos nós. O torque aplicado produz uma torção no chassi que não produz deslocamentos idênticos pois o chassi não é simétrico. Segundo (RILEY e GEORGE, 2002) é possível obter a rigidez torcional de um modelo numérico a partir de

$$T = F \cdot L \quad (2)$$

onde L (m) é a distância de uma força aplicada com relação ao eixo simétrico e F (N) a magnitude das forças. A deflexão angular pode ser decomposta em função do resultado dos deslocamentos verticais do modelo, para

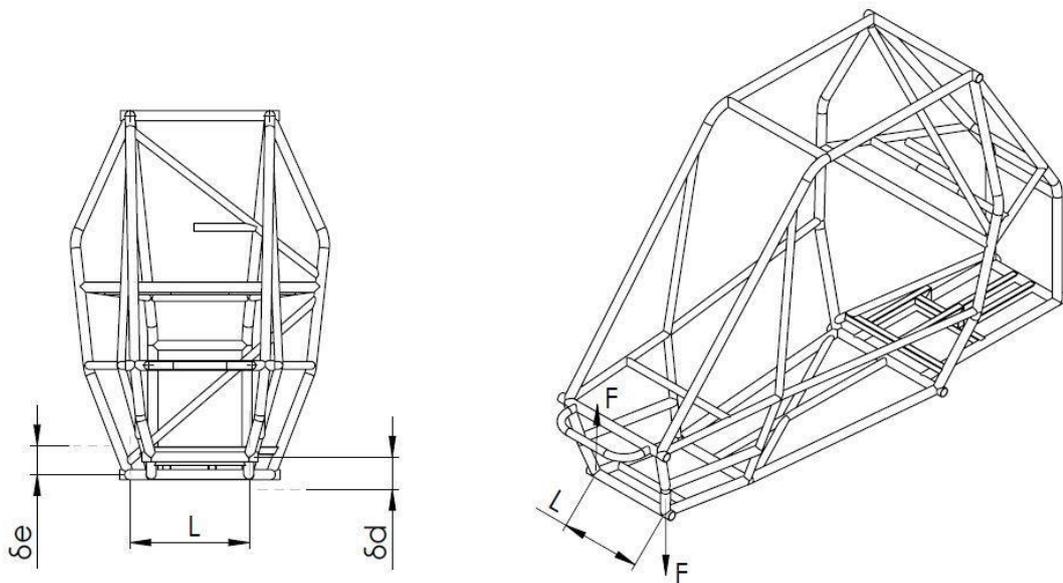
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_e + \delta_d}{L} \right) \quad (3)$$

resultando na equação 4, onde a rigidez de um veículo é definida como

$$K = \frac{F \cdot \frac{L}{2}}{\tan^{-1}\left(\frac{\delta_e + \delta_d}{L}\right)} \quad (4)$$

onde δ_e (m) se refere ao deslocamento vertical máximo na seção transversal esquerda, enquanto δ_d (m) se refere ao deslocamento vertical máximo na seção transversal direita, L (m) é atribuído a distância entre as forças F (N) aplicadas. A Figura 7 indica um esquema das forças e cotas de deslocamento mencionadas no chassi.

Figura 7 – Representação do diagrama de forças aplicado ao chassi



4. RESULTADOS

4.1. Resultados de Simulação Numérica

A partir da vista frontal do chassi e do veículo inteiro demonstrados na Figura 8, é possível notar que a região onde foi aplicada a força apresenta os maiores deslocamentos quando analisado o chassi com a adaptação na suspensão. Contudo, quando analisado apenas o chassi, os maiores deslocamentos estão concentrados na parte superior dianteira do habitáculo do piloto. Apesar de haver regiões com deslocamentos consideráveis, será avaliado os pontos de interesse conforme Gambôa (2020) para que seja possível a comparação entre magnitudes.

Cada uma das geometrias analisadas por elementos finitos têm o objetivo de obter a rigidez torcional da estrutura, porém, seus resultados têm respostas diferentes por abordarem diferentes metodologias. O resultado do modelo que há a adaptação na suspensão refere-se à rigidez do veículo inteiro, enquanto o modelo que considera apenas a geometria do chassi se relaciona com a rigidez do chassi. Utilizando a Equação 4 é possível obter os valores da rigidez torcional dos dois modelos propostos, a partir dos deslocamentos avaliados conforme Apêndice B, e seus resultados são expostos na Tabela 2.

Figura 8 - Vista frontal dos deslocamentos transversais do a) veículo com adaptação na suspensão b) chassi

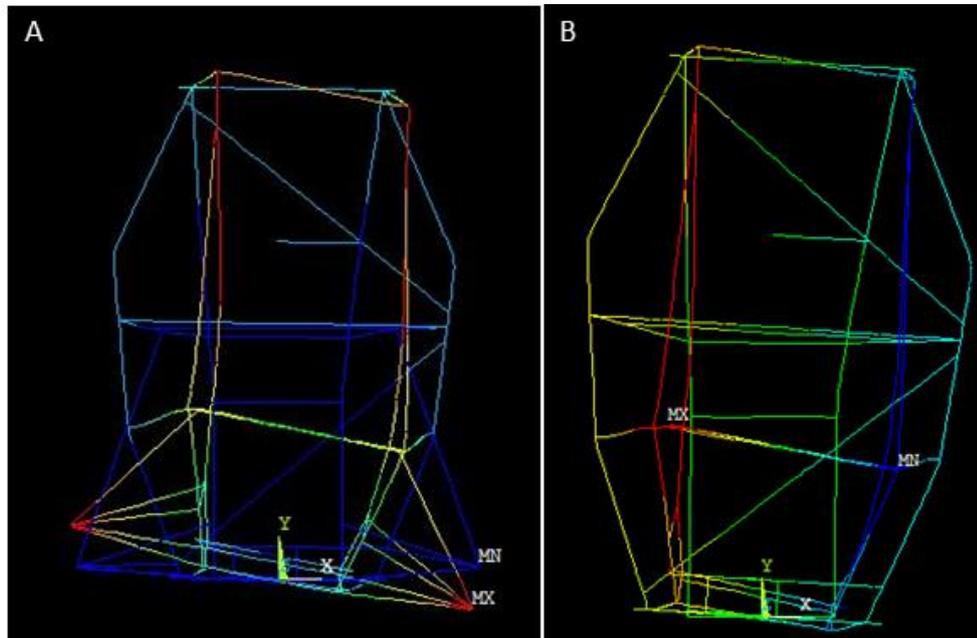


Tabela 2 - Resultados das simulações numérica dos modelos utilizados

Tipo de ensaio	Rigidez do chassi (Nm/°)	Rigidez do veículo inteiro (Nm/°)
Chassi	1559,44	-
Chassi com adaptações na suspensão	-	885,86

4.2. Comparação de Resultados

Os resultados utilizados para comparação estão baseados em dados experimentais realizados conforme a Figura 4b onde é aplicado a restrição de movimento nas duas suspensões traseiras e em uma das suspensões dianteira, e para torcer o chassi são utilizados pesos na suspensão oposta. O ensaio experimental consistiu em aplicar a força em cada um dos lados da suspensão e resultou em valores de rigidez divergentes entre si. Como a simulação numérica consiste em aplicar um binário de forças no chassi, este valor é único e não avalia a torção aplicada em apenas um de seus lados. Então, a comparação de resultados da Tabela 3 é dada a partir da média dos resultados obtidos para o ensaio na suspensão direita e o ensaio na suspensão esquerda de Gambôa (2020).

Tabela 3 - Comparação de resultados obtidos por simulação numérica e experimental

Tipo de ensaio	Simulação numérica	Ensaio experimental	Diferença
Rigidez torcional chassi	1559,44	1287,5	20%
Rigidez torcional veículo inteiro	885,86	844,5	3%

Comparado com o trabalho de Gambôa (2020), o valor obtido para rigidez torcional do veículo inteiro teve uma aproximação de 3 %, porém quando comparado os resultados apenas do chassi a diferença de rigidez ficou na faixa de 20%. O método dos elementos finitos

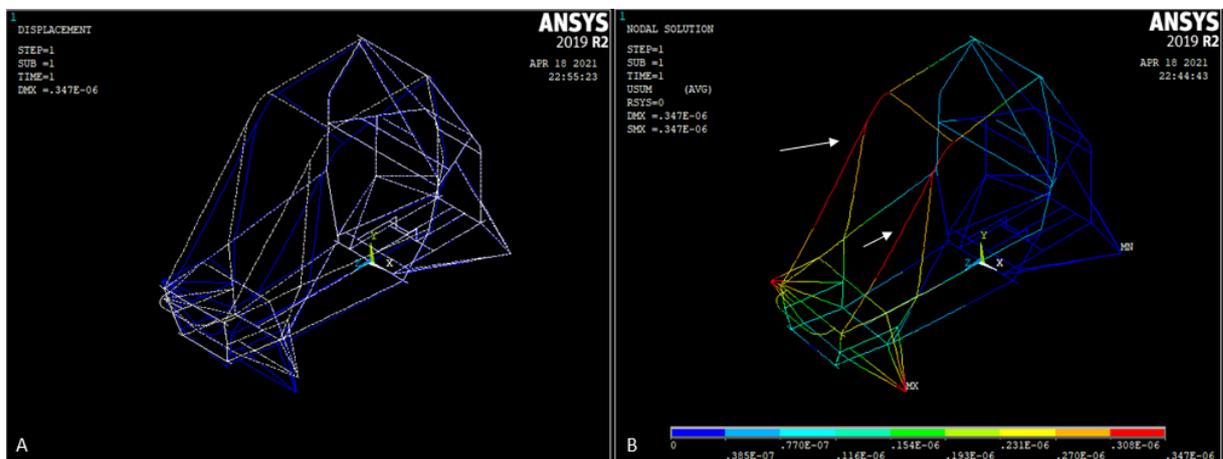
apresenta uma aproximação do resultado do projeto em condições perfeitas, no entanto, é conhecido que muitos fatores influenciam para esta divergência de resultados.

A divergência entre os resultados experimentais e numéricos pode ser explicada pela falta de afinidade entre os dois modelos ocasionados pelas inúmeras adaptações que são realizadas pela representação computacional. No modelo numérico são desconsiderados os alinhamentos entre soldas, uniões e ângulos não definidos entre os elementos estruturais, assim, a soma dessas imperfeições resultam em valores divergentes dos obtidos por ensaio experimental e ensaio numérico. O modelo utilizado para representar o veículo inteiro apresentou resultados aceitáveis para utilização do modelo real. Entretanto, o modelo representado pelo chassi resultou em valores de rigidez incoerentes com o modelo real, o que faz com que o modelo não reproduza de forma segura as condições existentes do veículo e não possa ser utilizado, com segurança, para validações.

4.3. Observação da simulação

Conforme os ensaios obtidos da Figura 9 para a obtenção da rigidez torcional do veículo inteiro, é possível observar que a geometria do chassi tem regiões de maior deslocamento. Como esperado, os maiores deslocamentos da geometria são nos locais de aplicação da força, nas suspensões, mas também se nota que na parte dianteira do habitáculo do piloto composta pelos membros FBM_{UP} , região apontada na Figura 9b, houve deslocamentos consideráveis quando realizada a simulação.

Figura 9 - Simulação do veículo inteiro a) linhas em branco apontam o chassi original, enquanto as linhas em azul sinalizam o chassi deformado b) deslocamentos do chassi após aplicação das condições de contorno



Com base nas observações feitas é viável de se propor pequenas modificações na geometria, a partir da inclusão de tubos que farão um reforço colaborando com que o chassi não deforme em demasia.

5. PROPOSTA DE GEOMETRIA

Conforme observado na seção 4.3 e na Figura 8 é possível notar deslocamentos consideráveis quando aplicado uma torção ao chassi. Assim, a partir da geometria de saída serão

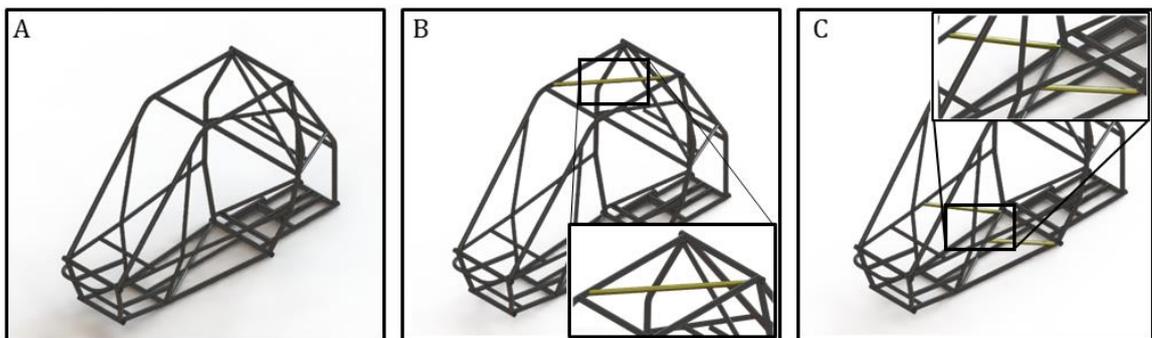
propostas novas combinações que elevem a rigidez torcional original sem que haja um excedente de massa do chassi.

5.1. Soluções propostas

A geometria do chassi é projetada em concordância com os demais subsistemas sem que afetem seu funcionamento. No entanto, as partes restantes têm a função de garantir a integridade da estrutura, seja para a segurança e conforto do piloto ou para evitar o rompimento do chassi.

Analisando os deslocamentos aplicados à simulação da rigidez torcional do chassi e validação com teste experimental é possível notar segmentos de deslocamentos relevantes, correspondentes às linhas vermelhas da Figura 8. Deste modo, a norma RATBSB permite algumas modificações na geometria sem exigência específica. Assim, analisa-se dois modelos com acréscimo de tubos a fim de aumentar a rigidez torcional do chassi, correspondentes à Figura 10b e Figura 10c.

Figura 10 - Geometrias de estudos para otimização da rigidez torcional a) Chassi original b) reforço superior e c) reforço inferior no habitáculo do piloto



Espera-se que as geometrias propostas apresentem um resultado melhor que a geometria original por ter membros estruturais em maior quantidade. No entanto, o que se deseja é obter o melhor arranjo com a menor quantidade de massa possível. Dessa forma, serão analisadas as características com a mesma metodologia utilizada na seção 4 para obtenção da rigidez. Como visto, a rigidez do veículo inteiro apresentou resultados mais próximos do resultado experimental (Tabela 3), assim, será este o modelo adotado para comparação com as demais geometrias.

5.2. Resultados

A Figura 11a apresenta os resultados dos deslocamentos obtidos para a proposta de geometria com reforço superior, enquanto a Figura 11b apresenta o resultado dos deslocamentos obtidos para a proposta de geometria com reforços inferiores. É possível ter uma comparação qualitativa apenas com a observação dos resultados da Figura 11, os deslocamentos do chassi com reforço inferior (Figura 11b) apresentam valores expressivos nos membros FBM_{UP}, semelhantes ao chassi original, enquanto os valores obtidos para a estrutura com reforço superior (Figura 11a) minimizaram estes resultados.

Os resultados da rigidez torcional obtidos pela simulação estão apresentados na Tabela 4, a qual demonstra que a rigidez para o chassi com reforço superior apresentou um valor de 978,11 Nm/° enquanto o chassi com travamento inferior apresentou uma rigidez de 1354,24 Nm/°.

Figura 11 - Resultado dos deslocamentos aplicados às propostas de geometria a) com reforço superior b) com reforços inferiores

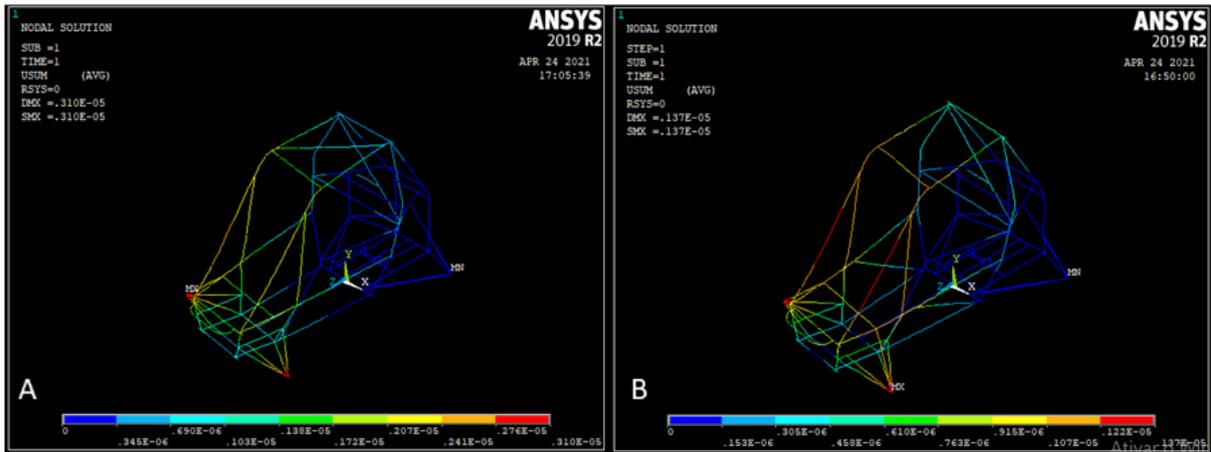


Tabela 4 - Rigidez torcional obtida por simulação para as propostas de geometria

	Veículo original	Reforço superior (Nm/º)	Reforços inferiores (Nm/º)
Rigidez torcional	885,86	978,11	1354,24

Os dois resultados obtidos indicam uma melhora na rigidez em comparação com o chassi original, o que é uma escolha de geometria indicada quando se está realizando um projeto e se quer maximizar a rigidez torcional do veículo. A geometria com travamento superior ainda aponta uma melhor escolha caso o objetivo seja a solidez no lugar onde ficam acoplados o fluido de freio, a barra de direção e os pedais que se localizam na frente do piloto, visto que, esse local não apresentou deslocamentos consideráveis. Os resultados das simulações podem ser vistos no Apêndice B na Tabela 2.

Apesar da geometria com travamento superior apresentar um valor de aumento de rigidez, é notável que a nova configuração faz com que o chassi não seja mais simétrico. Assim, a simulação proposta com a aplicação de um binário de forças no sentido horário (Figura 6a) terá um resultado diferente caso fosse no sentido anti-horário. Isto afeta diretamente uma situação de condução do veículo, onde será mais penalizado dependendo do sentido e direção em que as forças externas causarão ao mesmo.

5.3. Comparação de resultados

Apesar das propostas de geometria apresentarem valores de rigidez torcional maiores do que comparados com o chassi original, conforme esperado, é preciso obter o maior valor para o menor incremento de massa possível. A Tabela 5 apresenta os resultados de rigidez e massa das configurações analisadas.

Tabela 5 - Comparação de massa e rigidez entre as geometrias propostas e o chassi original

	Massa (Kg)	Rigidez Torcional (Nm/º)	Incremento de massa	Incremento de rigidez
Chassi Original	32,19	885,86	-	-
Reforço Superior	33,50	978,11	4%	10%
Reforços Inferiores	34,84	1354,24	8%	52%

As duas geometrias apresentadas foram propostas baseadas nas imagens que demonstram os resultados das simulações do chassi original, porém, inúmeras configurações poderiam ter sido testadas e apresentariam respostas diferentes. A configuração com reforço superior apresenta um incremento de 4% na massa do veículo e um aumento de 10% na rigidez, enquanto a geometria com os reforços inferiores apresentou 8% no aumento de massa no chassi e 52% de aumento da rigidez torcional. Analisando as disposições é considerável o acréscimo de rigidez que os reforços inferiores oferecem ao chassi, sendo que com o dobro de massa, quando comparada com o reforço superior, a resposta da rigidez aumenta em mais de cinco vezes.

A proposta de geometria com reforços inferiores apresenta a melhor configuração proposta, já que exibe um ganho de massa pequeno quando comparado com o acréscimo da rigidez. Caso se tenha o conhecimento de que a estrutura frontal do piloto, onde estão acoplados os componentes da direção e freio, tenham tolerâncias pequenas de dimensões e projeto é possível adotar a geometria com o reforço superior, visto que, apresenta uma maior solidez dos elementos estruturais localizados na região quando comparados com o chassi original.

6. CONCLUSÃO

A proposta de obter a rigidez torcional a partir de resultados computacionais é uma alternativa interessante quando não há a possibilidade de se obter os dados reais. Seja para ensaios destrutivos que acabam por inutilizar o modelo ou por falta de equipamentos técnicos para realizar as medições.

Apesar do método dos elementos finitos obter resultados, nem sempre estes são confiáveis. Assim, é necessário validá-los para que o modelo e as adaptações realizadas descrevam um resultado mais próximo do real. Essa divergência entre os modelos tem que ser conhecida, estimadas e minimizadas para que haja concordância entre elas.

Utilizou-se o método dos elementos finitos no software ANSYS para estimar os valores de rigidez torcional a partir de dois modelos diferentes, assim, chegou-se em resultados diferentes para rigidez torcional do chassi e do veículo inteiro. A validação dos resultados foi obtida a partir do trabalho de Gambôa (2020) que realizou um ensaio experimental no mesmo chassi analisado. Os resultados divergiram, como esperado, em pequenos valores que podem ser considerados como divergências entre o modelo teórico e o modelo real. Apesar disto, o resultado da rigidez torcional do veículo inteiro foi considerável aceitável e o modelo proposto para obtenção da rigidez torcional do chassi foi considerado incoerente, já que apresentou resultados defasados no modelo real. Assim, é necessário realizar um arranjo de geometria que represente o modelo real de forma mais fidedigna. Foram propostos dois arranjos, a partir do modelo numérico do veículo inteiro, com pequenas inclusões de elementos estruturais a fim de maximizar sua rigidez.

As duas geometrias propostas apresentaram valores consideráveis no aumento da rigidez torcional, no entanto, quando utilizado o arranjo com os reforços inferiores não se obteve altas penalizações no acréscimo de peso do veículo, e por isto, é a melhoria indicada para o chassi original. Apesar disso, caso haja pequenas tolerâncias de projeto para a parte frontal do veículo, é recomendado a utilização da configuração com reforço superior.

Conforme analisado, é evidente que se pode obter ganhos de rigidez com alterações na geometria do chassi sem que os demais subsistemas sejam afetados. A análise foi baseada no resultado obtido a partir do chassi original, no entanto, não é conhecido se os reforços incluídos indicam o melhor resultado de rigidez por massa incrementada. Assim, recomenda-se a

avaliação das duas configurações realizadas (reforços inferiores e superior) no mesmo chassi e para futuros projetos que irão iniciar a partir de um novo projeto, recomenda-se um estudo sobre a influência dos ângulos dos membros estruturais, FAB_{UP} e FBM_{UP} , para a rigidez torcional do veículo.

7. REFERÊNCIAS

BARBOSA, L. F. F. M. **Avaliação da Rigidez Torcional do Chassi de um Protótipo BAJA SAE Através do Método de Elementos Finitos e Ensaio Experimental**. Universidade Estadual Paulista, 2015.

CASTRO, M. S. D. **Uma Metodologia para Melhoria da Rigidez Torcional de Componentes Estruturais Automotivos**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos: A base da Tecnologia CAE**. 6ª. ed. [S.l.]: Érica, 2009.

GAMBÔA, T. L. **Desenvolvimento de um equipamento para determinação da rigidez torcional de um chassi tipo SPACEFRAME da equipe BAJA SAE da UFRGS**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

MILLIKEN, W. F. **Race Car Vehicle Dynamics**. [S.l.], 1995.

OYAMA, D. **Torsion Fixture Final Design Report**. [S.l.]. 2009.

Regulamento Administrativo e Técnico BAJA SAE Brasil. RATBSB - Emenda 03. [S.l.]. 2019.

RILEY, W. B.; GEORGE, A. R. **Design, Analysis and Testing of Formula SAE Car Chassi**. SAE Technical Paper Series, Cornell University, 2002.

SAMPO, E. **Chassis Torsional Stiffness: Analysis of the Influence on Vehicle Dynamics**, University of Surrey, 2010.

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

SEWARD, D. **Race Car Design**. [S.l.]: Palgrave MacMilan, 2015.

TEBBY, S; ESMAILZADEH, E; BARARI, A. **Methods to Determine Torsion Stiffness in an Automotive Chassis**. Computer-Aided Design, University of Ontario Institute of Technology, 2011.

THOMPSON, L.; RAJU, S.; LAW, E. H. **Design of a Winston Cup Chassis**. SAE Technical Paper Series 983053, 1998.

8. APÊNDICE A

Figura 1 – Representação de um chassi *backbone*. Fonte: (GENTA,2009)

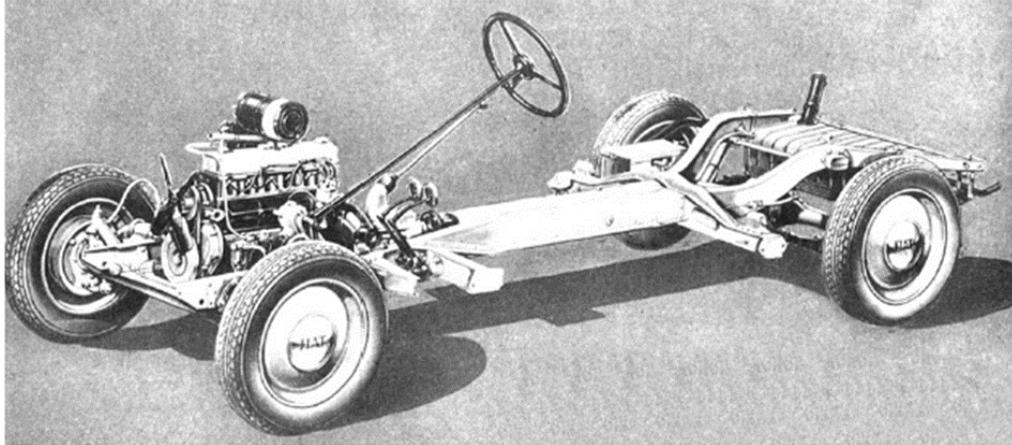
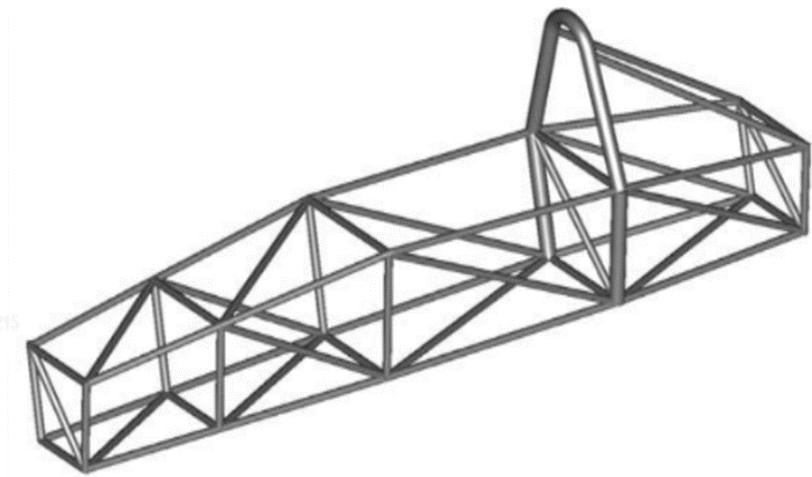


Figura 2 – Representação de um chassi monocoque. Fonte: Seward (2015)



Figura 3 – Representação de um chassi *Spaceframe*. Fonte: Seward (2015)



9. APÊNDICE B

Tabela 1 – Resultados de rigidez torcional obtidos do chassi a partir das simulações realizadas

Simulação	Torque (Nm)	θ (°)	Rigidez torcional (Nm/°)	Média (Nm/°)
Rigidez torcional chassi	52,16	0,03	1559,97	1559,44
	114,78	0,07	1559,39	
	177,18	0,11	1559,34	
	236,32	0,15	1559,36	
	297,54	0,19	1559,34	
	356,94	0,23	1559,38	
	418,82	0,27	1559,37	
	467,29	0,30	1559,38	
Rigidez torcional do veículo inteiro	52,16	0,06	885,74	885,86
	114,78	0,13	885,82	
	177,18	0,20	885,93	
	236,32	0,27	885,86	
	297,54	0,34	885,87	
	356,94	0,40	885,87	
	418,82	0,47	885,89	
	467,29	0,53	885,92	

Tabela 2 – Resultado da rigidez torcional das propostas de geometria

Simulação	Torque (Nm)	θ (°)	Rigidez torcional (Nm/°)	Média (Nm/°)
Proposta de chassi com reforço superior	104,3	0,08	978,13	978,11
	229,5	0,17	978,10	
	354,3	0,26	978,07	
	472,6	0,35	978,10	
	595,0	0,44	978,06	
	713,9	0,53	978,19	
	837,6	0,62	978,08	
	Proposta de chassi com reforços inferiores	104,3	0,08	
229,5		0,17	1354,6	
354,3		0,26	1354,23	
472,6		0,35	1354,23	
595,0		0,44	1354,23	
713,9		0,53	1354,23	
837,6		0,62	1354,24	