

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

GABRIEL ROMANOSKI

PROJETO PRELIMINAR DE UM SUBFRAME APLICADO A UM CHASSI DE
VEÍCULO FÓRMULA SAE

Joinville
2021

GABRIEL ROMANOSKI

PROJETO PRELIMINAR DE UM SUBFRAME APLICADO A UM CHASSI DE
VEÍCULO FÓRMULA SAE

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

Orientador: Prof. Dr. Andrea Piga Carboni

Joinville
2021

GABRIEL ROMANOSKI

PROJETO PRELIMINAR DE UM SUBFRAME APLICADO A UM CHASSI DE
VEÍCULO FÓRMULA SAE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 16 de Dezembro de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Andrea Piga Carboni
Orientador
Presidente

Prof. Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Membro
UFSC - Joinville

Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo
Membro
UFSC - Joinville

RESUMO

O chassi é responsável por resistir as forças que são aplicadas ao veículo e suportar os seus componentes, como a suspensão por exemplo. O parâmetro mais importante no projeto do chassi é sua rigidez torcional, que por definição é a resistência do chassi à um carregamento de torção. Este trabalho tem como objetivo analisar a implementação de um subframe no chassi do ano de 2021 da equipe Fórmula CEM. Para esta análise, a metodologia PRODIP foi utilizada para a definição dos requisitos de projeto. Algumas geometrias foram propostas e simuladas utilizando o método dos elementos finitos e com o resultado foi possível calcular a rigidez para cada caso. A massa do chassi atual foi estimada, assim como a massa das geometrias propostas. Uma comparação foi realizada para entender qual o ganho em rigidez e o incremento de massa quando aplicamos um subframe ao chassi.

Palavras-chave: Fórmula SAE. Subframe. Chassi. Rigidez torcional

ABSTRACT

The chassis is responsible for resist to different forces which are applicated on the vehicle and also support the vehicle components, such as the suspension system. The main parameter foi chassis project is the torsional stiffness, that is definited as the chassis resistance to a torsion load. This work's objective is to analyse a subframe implementation in the chassis of Fórmula CEM team. To develop this analysis, the PRODIP methodology was used to define the project requirements. Some geometries were proposed a simulated using the finite elements methody, using the results it was possbile to calculate the torsional stiffness to each case. The actual chassis mass were evaluated, such as the mass of another geometries that were proposed. A comparation were made to evaluate the stiffness and mass increment when a subframe is applied to the chassis.

Keywords: Fórmula SAE. Subframe. Chassis. Torsional Stiffness

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Foto da parte traseira do veículo de 2019 da equipe Fórmula CEM .	11
Figura 2 – Chassi do tipo ladder frame utilizado em um Fiat 1905	15
Figura 3 – Chassi do tipo viga central de um Fiat 1500 ano 1935	16
Figura 4 – Chassi do tipo escada	17
Figura 5 – Chassi multi tubular utilizado por um Cooper Mônaco	18
Figura 6 – Exemplo de triangulação utilizada em chassis space frame	18
Figura 7 – Chassi do tipo space frame	19
Figura 8 – Chassi do tipo monobloco	20
Figura 9 – Subframe utilizado pelo Lancia	21
Figura 10 – Valores típicos de rigidez torcional	22
Figura 11 – Aplicação de forças em uma curva	22
Figura 12 – Ilustração da transferência de carga lateral	23
Figura 13 – Exemplo de estrutura discretizada	24
Figura 14 – Modelo de um elemento de viga	25
Figura 15 – Modelo de análise considerando os braços de suspensão	26
Figura 16 – Modelo de análise desconsiderando os braços de suspensão	26
Figura 17 – Chassi 2021 da equipe Fórmula CEM	27
Figura 18 – Ilustração das fases e macro fases do PRODIP	29
Figura 19 – Exemplo de diagrama de Mudge	29
Figura 20 – Exemplo de matriz de Pugh	30
Figura 21 – Exemplo de matriz de Pugh ponderada	31
Figura 22 – Modelo simplificado para cálculo de rigidez torcional	32
Figura 23 – Modelo de análise da rigidez do chassi com aplicação da força nos dois lados	33
Figura 24 – Modelo de análise da rigidez do chassi com aplicação da força somente em um lado	34
Figura 25 – Subframe utilizado pela equipe de San Diego	35
Figura 26 – Chassi e subframe utilizados pelas equipe de San Diego	36
Figura 27 – Luva utilizada pela equipe CalPoly	36
Figura 28 – Subframe e chassi utilizado pela equipe Cal Poly	37
Figura 29 – Subframe utilizado pela equipe Cal Poly	37
Figura 30 – Posicionamento aproximado do motor no chassi 2021	38
Figura 31 – Orelha para fixação do tubo	39

Figura 32 – Luva para fixação do tubo	40
Figura 33 – Conexão para fixação dos tubos	40
Figura 34 – Propriedades do aço Dual Phase 980	41
Figura 35 – Ordem de relevância	43
Figura 36 – Diagrama de Mudge	43
Figura 37 – Pontuação com base na relação entre necessidades e requisitos	44
Figura 38 – Matriz QFD	45
Figura 39 – Requisitos do projeto em ordem de importância	45
Figura 40 – Matriz de Pugh	46
Figura 41 – Eixos de coordenadas	47
Figura 42 – Chassi original	48
Figura 43 – Primeiro modelo de subframe	49
Figura 44 – Segundo modelo de subframe	50
Figura 45 – Terceiro modelo de subframe	50
Figura 46 – Linhas e pontos que representam o chassi	51
Figura 47 – Modelo simplificado para avaliação da hipótese simplificadora	52
Figura 48 – Modelo simplificado com luvas para avaliação da hipótese simplificadora	52
Figura 49 – Condições de contorno aplicadas no Ansys	53
Figura 50 – Análise de convergência de malha do chassi original	54
Figura 51 – Análise de convergência de malha do primeiro subframe	54
Figura 52 – Análise de convergência de malha do segundo subframe	54
Figura 53 – Análise de convergência de malha do terceiro subframe	55
Figura 54 – Resultado da simulação no chassi original	56
Figura 55 – Resultado da simulação no chassi com a primeira geometria de subframe	56
Figura 56 – Resultado da simulação no chassi com a segunda geometria de subframe	57
Figura 57 – Resultado da simulação no chassi com a terceira geometria de subframe	57
Figura 58 – Estimativa de massas das diferentes configurações de chassi	58
Figura 59 – Proposta de montagem do motor, o chassi e o subframe são montados conforme indicação das setas	59
Figura 60 – Conexão entre chassi e subframe	60
Figura 61 – Rigidez torcional específica	60
Figura 62 – Incremento de massa percentual	61
Figura 63 – Incremento de rigidez torcional percentual	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEM	Centro de Engenharias da mobilidade
FSAE	Fórmula SAE
NeDIP	Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
PRODIP	Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
QFD	Quality Function Deployment
SAE	Society of Automotive Engineers
SES	Structural Equivalency Spreadsheet

LISTA DE SÍMBOLOS

Θ	Ângulo de torção
T	Torque
F	Força
L	Distância
Δ_y	Deslocamento nodal

SUMÁRIO

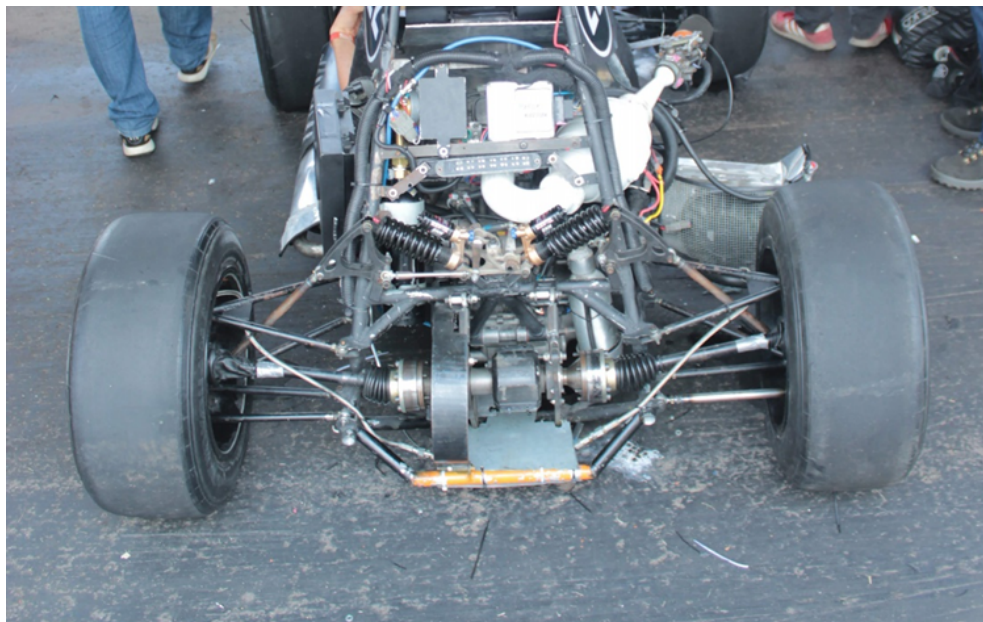
1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS GERAIS	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	REVISÃO TEÓRICA	14
2.1	Definição de Chassi estrutural	14
2.2	História do chassi automotivo	14
2.3	Tipos de chassi	16
2.3.1	Chassi escada ou Ladder Frame	16
2.3.2	Chassi Multi Tubular	17
2.3.3	Chassi Spaceframe	18
2.3.4	Chassi monocoque ou monobloco	19
2.4	Subframe	20
2.5	Rigidez torcional	21
2.6	Método dos elementos finitos	23
2.6.1	Simulação em chassis spaceframe	24
2.7	Chassi de Fórmula SAE	27
3	METODOLOGIA	28
3.1	Desenvolvimento de produtos utilizando o PRODIP	28
3.1.1	Projeto Informacional	29
3.1.2	Projeto conceitual	30
3.1.3	Projeto preliminar	31
3.1.4	Projeto detalhado	31
4	CÁLCULO DA RIGIDEZ TORCIONAL	32
4.1	Geometrias de subframe	35
4.2	Análise do regulamento	38
4.3	Material do chassi	40
5	RESULTADOS	42
5.1	Projeto informacional	42
5.1.1	Função global	42
5.1.2	Necessidades do cliente	42
5.1.3	Diagrama de Mudge	43
5.1.4	Requisitos de projeto	44
5.1.5	Matriz da casa da qualidade(QFD)	44

5.2	Projeto conceitual	45
5.3	Projeto Preliminar	47
5.4	Definição dos eixos de coordenadas	47
5.5	Modelo CAD do chassi e subframe	48
5.5.1	Tratamento da geometria	50
5.6	Definição das condições de contorno	51
5.7	Análise de convergência de malha	53
5.8	Cálculo da rigidez torcional	55
5.8.1	Chassi Original	55
5.8.2	Subframe 1	56
5.8.3	Subframe 2	57
5.8.4	Subframe 3	57
5.9	Estimativa da massa do chassi	58
5.10	Análise da montagem do motor	58
5.11	Discussão dos resultados	60
6	CONCLUSÕES	63
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A	67

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho surge da necessidade de melhoria no chassi do veículo à combustão da equipe Fórmula (CEM)(Centro de Engenharias da mobilidade) para os próximos anos. O chassi do tipo tubular utilizado atualmente é inteiramente soldado. A equipe projetou o chassi com a menor distância entre eixos permitida pelo regulamento, esta modificação foi feita para otimizar o desempenho dinâmico do carro. Entretanto, os componentes têm um espaço reduzido para que sejam fixados, como é possível observar na imagem 1.

Figura 1 – Foto da parte traseira do veículo de 2019 da equipe Fórmula CEM



Fonte: Elaborado pelo autor

Um dos problemas, por exemplo, é a falta de espaço para se realizar um movimento angular com uma chave. Vários movimentos de pequena amplitude são necessários para conseguir apertar um parafuso. Outro problema é a limitação de pessoas que conseguiam trabalhar simultaneamente no carro, principalmente na parte traseira onde havia os sistemas de transmissão, suspensão e o motor. Normalmente os setores não conseguem trabalhar ao mesmo tempo, sendo necessário a confecção de cronogramas detalhados para a montagem e manutenção do veículo.

Além disso, a equipe sempre busca aumentar o desempenho dinâmico do carro. O parâmetro do chassi que contribui para este desempenho é a rigidez torcional do

chassi, por consequência este trabalho buscou a otimização deste parâmetro também.

A competição Fórmula (SAE)(Society of Automotive Engineers) teve origem nos anos de 1980 nos Estados Unidos substituindo uma versão anterior denominada mini Indy e alavancada pela carência de engenheiros especializados em veículos de alta performance. No Brasil, a primeira competição ocorreu em 2004 e em 2016 o número de inscritos passou de 1000. A competição consiste em provas estáticas e dinâmicas que avaliam o desempenho de cada carro na pista além das provas técnicas, de custos e de marketing das equipes.(SAE, 2019)

A utilização de um subframe na parte traseira é implementada em alguns veículos de (FSAE)(Fórmula SAE) em competições fora do país, o objetivo de implementar este sistema em uma equipe Brasileira tem a finalidade de facilitar a manutenção dos subsistemas do carro, diminuindo o tempo de montagem e desmontagem, possibilitando que pessoas de diferentes setores trabalhem simultaneamente. Além disso, é desejado que a rigidez torcional do chassi seja incrementada. A implementação de um projeto inovador na competição nacional, contribuirá para melhorar a pontuação da equipe.

O projeto é uma adaptação do chassi projetado pela equipe em 2021, mantendo a metade dianteira do chassi igual e focando na implementação do subframe na parte traseira. Para este projeto serão avaliados e comparados os parâmetros de massa e rigidez torcional, onde a implementação do subframe terá como objetivo reduzir o primeiro e aumentar o segundo. Estes parâmetros são importantes para aumentar o desempenho de veículos de competição. Todas as análises serão feitas utilizando o método dos elementos finitos implementado no programa Ansys.

Utilizando a metodologia (PRODIP)(Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos), a implementação do subframe é avaliada. Posteriormente, é feita a definição de como o subframe será fixado ao chassi, podemos então definir algumas geometrias possíveis para a implementação do subframe.

O método dos elementos finitos é utilizado para avaliar os deslocamentos nodais e a rigidez torcional pode ser calculada a partir deste resultado. A massa é avaliada utilizando de uma modelagem numérica para que seja possível a comparação entre as diferentes geometrias.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Realizar o projeto preliminar de um subframe para o chassi do ano 2021 da equipe Fórmula CEM utilizando a metologia PRODIP.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Determinar quais as necessidades do cliente e os requisitos de projeto
- Avaliar qual a melhor geometria e fixação para o subframe
- Analisar, pelo método dos elementos finitos, a rigidez torcional do chassi utilizando o subframe
- Comparar o chassi antigo e as geometrias propostas em termos de massa e rigidez torcional

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Definição de Chassi estrutural

Segundo Genta e Morello (2009), a função do chassi é fixar os componentes e suportar os esforços internos e externos. O chassi pode ser montado separado da carroceria ou unido à ela formando um único corpo.

Podemos fazer uma analogia onde o chassi se compara ao esqueleto humano, suportando todas as partes vitais que seriam o motor e sistema de transmissão, por exemplo, no centro e as partes móveis nas extremidades, que seria o sistema de suspensão.(SEWARD, 2014)

As forças externas decorrem do contato entre o pneu e a pista, passam pelo sistema de suspensão e são suportados pelo chassi. Também há forças geradas devido ao arrasto aerodinâmico. (GENTA; MORELLO, 2009)

As forças internas são causadas pelo carregamento do veículo, ou seja, os passageiros e bagagens, também temos forças significantes provenientes das forças de reação do power train.(GENTA; MORELLO, 2009)

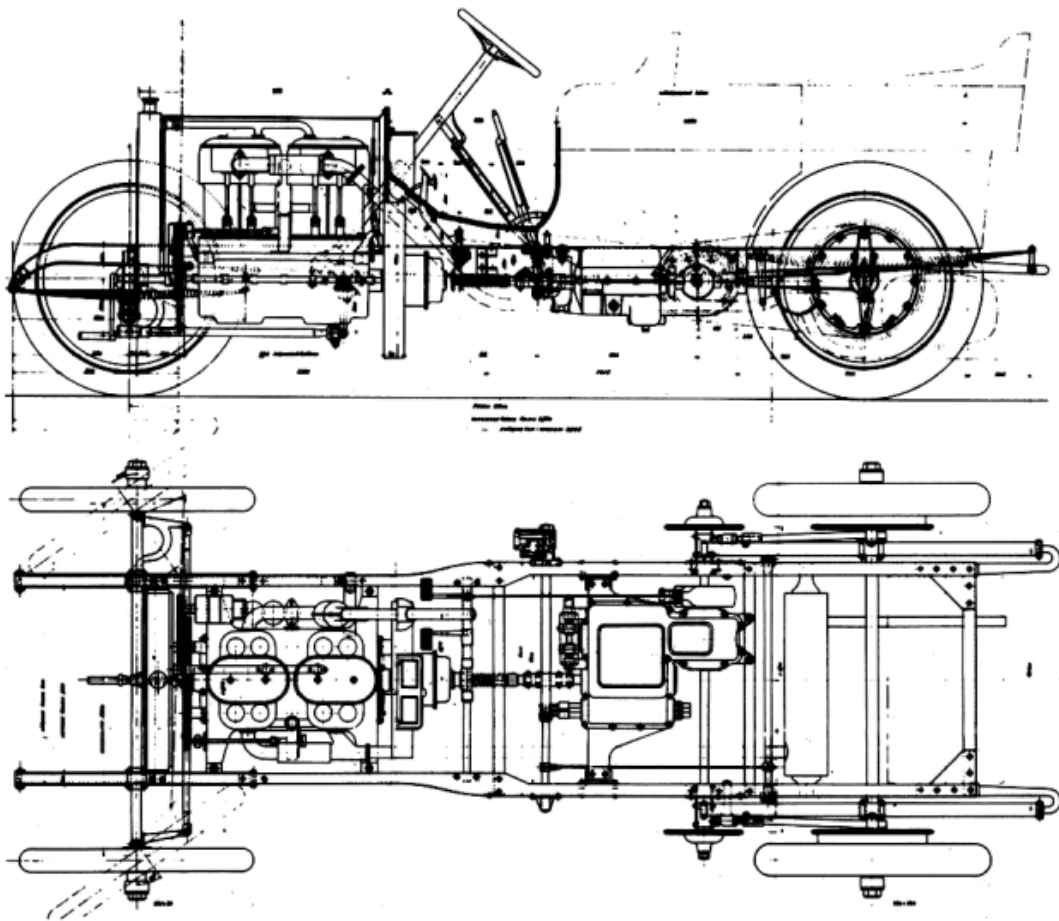
Além do chassi, podemos utilizar estruturas auxiliares que vão ajudar na distribuição destes esforços e suportar os subsistemas como motor, suspensão e transmissão. Estas estruturas são nomeadas em inglês de "*underbody*" e "*sub frame*".(GENTA; MORELLO, 2009)

2.2 História do chassi automotivo

No início da indústria automobilística o chassi não era considerado de extrema importância no desenvolvimento das pesquisas e de novas tecnologias. As empresas utilizavam o conceito que era empregado nas carroças da época e concentravam seus esforços no aprimoramento de sub sistemas que eram considerados mais complexos, como motor, transmissão e suspensão.(COSTIN; PHIPPS, 1961)

O chassi era dividido em duas partes, o chassi propriamente dito e o "*body*" ou carroceria. Os chassis eram do tipo escada ou ladder frame e eram fabricados em aço, utilizando as tecnologias da época para usinar e estampar o material.(COSTIN; PHIPPS, 1961)

Figura 2 – Chassi do tipo ladder frame utilizado em um Fiat 1905



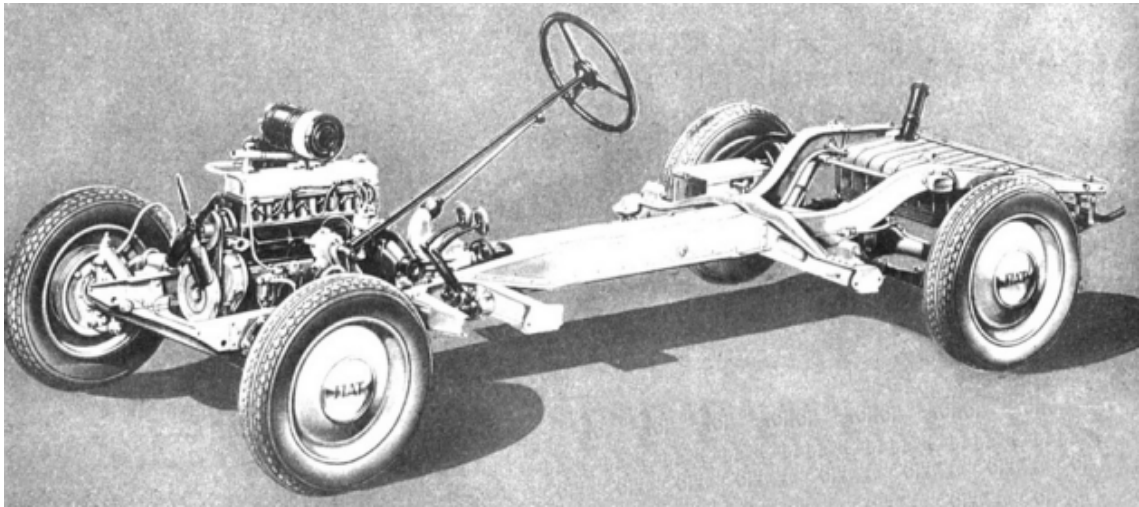
Fonte: Adaptado de Genta e Morello (2009, 47)

Já a carroceria era normalmente feita por um outra empresa que utilizava madeira como matéria prima, como consequência, diversas empresas fabricantes de carroceria foram criadas. (COSTIN; PHIPPS, 1961)

A integração da fabricação do chassi e carroceria começou em meados de 1920 primeiramente nos Estados Unidos e depois o sistema foi imitado na Europa. O modelo de chassi utilizado era o de viga central, como podemos ver na figura 3.

Esta tipologia facilitou a fabricação e o controle da massa do carro, isto aconteceu devido ao projeto considerar a adição de material somente nos pontos críticos do chassi. Tem como grande desvantagem a baixa rigidez torcional, o que era característica dos veículos desta época. (GENTA; MORELLO, 2009)

Figura 3 – Chassi do tipo viga central de um Fiat 1500 ano 1935



Fonte: Adaptado de Genta e Morello (2009, 48)

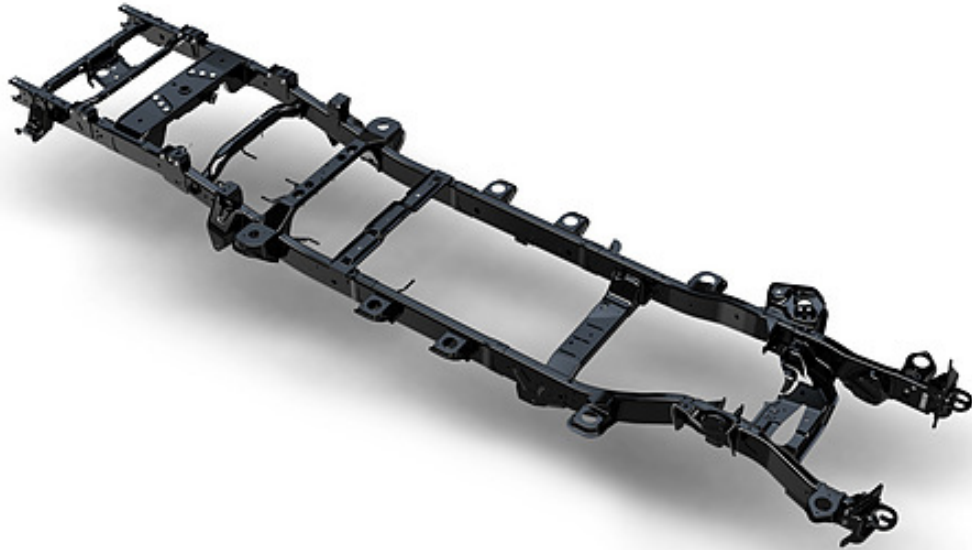
O chassi começou a ter mais recursos investidos no seu projeto na década de 50, quando esforços foram concentrados em aumentar a rigidez do chassi de carros de competição, principalmente adicionando estrutura tubular aos chassi já existentes. O ano de 1952 teve marcos importantes no desenvolvimento dos chassis, dois carros surgiram apresentando os primeiros chassis com o princípio do spaceframe, o Lotus Mark Six que foi construído com poucos recursos e muita mão de obra em meio período e o Mercedes Bens 300SL que veio de uma montadora já consolidada na época. Ambos obtiveram grande sucesso como carros esportivos ou de competição, levando o chassi do tipo space frame a ser amplamente utilizado nestas categorias. (COSTIN; PHIPPS, 1961)

2.3 Tipos de chassi

2.3.1 Chassi escada ou Ladder Frame

Esta tipologia de chassi é construída a partir de duas vigas paralelas que são interligadas por algumas vigas transversais, assemelhando-se à uma escada se considerarmos a vista superior. Esse tipo de construção é normalmente utilizada em veículos de grande porte devido à sua grande capacidade de carga, fácil acesso aos componentes, o que facilita a manutenção. O chassi escada não é muito utilizado em veículos leves devido ao seu peso elevado e baixa rigidez torcional. (AZEVEDO, 2020)

Figura 4 – Chassi do tipo escada

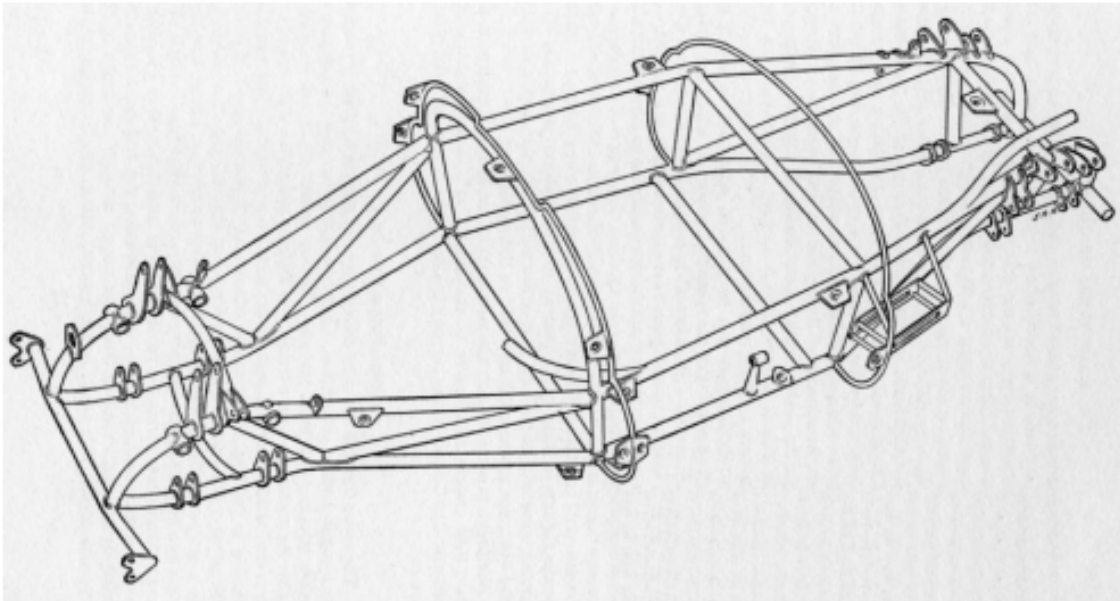


Fonte: Adaptado de CarBikeTech (2019)

2.3.2 Chassi Multi Tubular

O chassi multi tubular pode ser classificado como um híbrido entre o chassi escada e o chassi spaceframe. Este tipo de chassi não é muito eficiente em termos de rigidez torcional, entretanto foi muito utilizado por apresentar um bom compromisso entre este parâmetro e o custo de fabricação. Na prática, a rigidez torcional do chassi multi tubular vai depender da quantidade de tubos empregados na construção e do seu diâmetro, mas ainda sim será muito menor do que a rigidez de um chassi spaceframe semelhante porque não há a presença de triangulações entre os tubos. (COSTIN; PHIPPS, 1961)

Figura 5 – Chassi multi tubular utilizado por um Cooper Mônaco

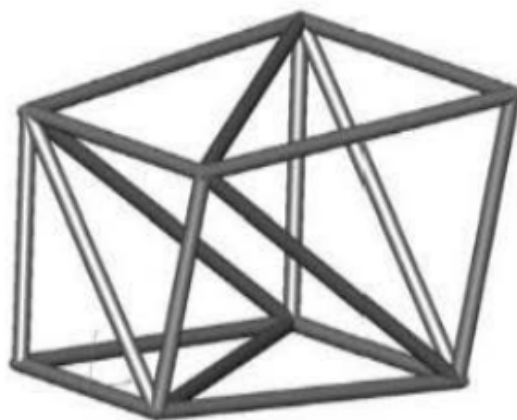


Fonte: Adaptado de Costin e Phipps (1961, 11)

2.3.3 Chassi Spaceframe

Segundo Seward (2014), a principal característica do chassi space frame é a triangulação dos elementos, ou seja, as linhas centrais axiais dos tubos são conectadas de modo que triângulos sejam formados. O nó é definido como um ponto no espaço onde os elementos (tubos) são conectados e para o elemento estar devidamente triangulado, no mínimo 3 elementos devem estar conectados ao nó como é mostrado na figura 6.

Figura 6 – Exemplo de triangulação utilizada em chassis space frame



Fonte: Adaptado de Seward (2014, 38)

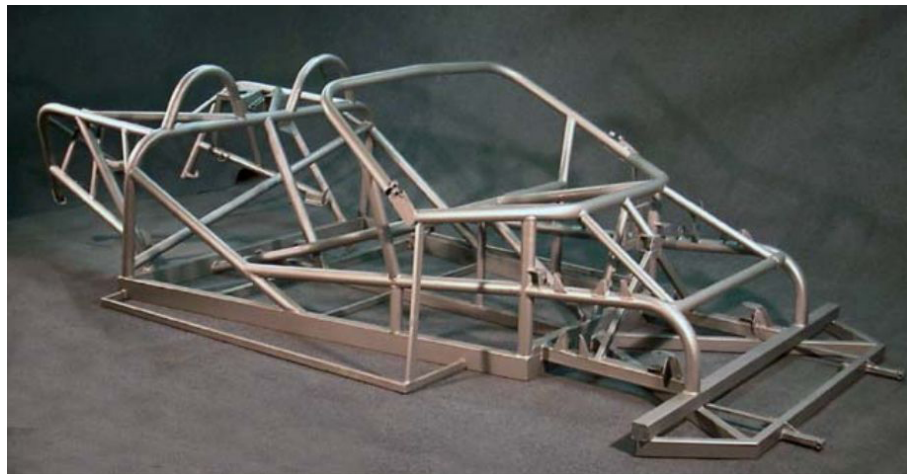
Segundo Chignola et al. (2002), os chassis do tipo space frame são comumente

usados em veículos de competição de baixo custo porque não necessitam de um ferramental complexo para serem construídos e são facilmente reparados. Com um bom desenho de chassi, conseguimos atingir um nível rigidez torcional maior do que seria possível utilizando outras tipologias.

Segundo Costin e Phipps (1961) o chassi do tipo space frame é o tipo mais eficiente que podemos construir artesanalmente. Isso se deve ao fato de que podemos construir um chassi de baixo custo e alta rigidez torcional. Além disso, este tipo de chassi permite fácil montagem e desmontagem dos outros subsistemas que compõem o carro, o que é vital para um carro de competição precisa de manutenção com uma certa frequência. Podemos ver uma ilustração desta tipologia de chassi na imagem 7.

Há a possibilidade de se utilizar tubos removíveis, caso algum dos tubos esteja posicionado de forma a dificultar a montagem ou desmontagem de outro componente. Esta técnica nos permite manter o alto nível de rigidez do chassi sem prejudicar o processo de manutenção do veículo. (COSTIN; PHIPPS, 1961)

Figura 7 – Chassi do tipo space frame



Fonte: Adaptado de CarBikeTech (2019)

2.3.4 Chassi monocoque ou monobloco

Os chassis do tipo monocoque ou monobloco possuem uma alta rigidez torcional e baixo peso. Estas estruturas são normalmente utilizadas em produção em série, neste caso o alto investimento em ferramental se justifica. O molde de estampo representa grande parte do custo de produção, entretanto quando uma vez que o ferramental está pronto, muitas peças podem ser produzidas utilizando o mesmo molde. Grande parte do automóveis de passeio utiliza este tipo de chassi. (STORTO, 2011)

Este tipo de chassi também é utilizado em carros de competição, no entanto o custo permanece alto porque nestes casos a produção é muito limitada.

Figura 8 – Chassi do tipo monobloco



Fonte: Adaptado de CarBikeTech (2019)

2.4 Subframe

Segundo Genta e Morello (2009), o subframe é uma estrutura auxiliar do chassi monobloco que tem as seguintes funções:

1. Suportar o sistema de suspensão, motor e transmissão do veículo
2. Agir como um sistema de suspensão secundária devido aos coxins aplicados na fixação com o chassi, filtrando vibrações do motor e suspensão
3. Deformar e absorver energia em caso de colisão
4. Servir como suporte para vários itens, facilitando a organização da montagem
5. Reduzir dimensões totais do veículo

O subframe é amplamente utilizado na indústria automotiva, podendo ser instalado na parte dianteira ou traseira do veículo, onde os componentes da suspensão, transmissão e motor podem ser acoplados. Também podemos ter variações onde o subframe é montado na parte traseira para carros que possuem motor traseiro. Um exemplo de subframe é mostrado na figura 9.

Figura 9 – Subframe utilizado pelo Lancia



Fonte: Genta e Morello (2009, p.357)

No caso da aplicação em Fórmula SAE, o subframe será montado na parte traseira do veículo, devido às regras da competição e o tipo do chassi ser um subframe, o método de fixação será por parafuso e a função de número 2 não será válida nesta aplicação.

2.5 Rigidez torcional

De acordo com Costin e Phipps (1961), alta rigidez torcional é a característica principal de um chassi de alta performance e, portanto, o parâmetro que deve ser utilizado como critério no design.

Um veículo com grande deformações no chassi pode ter o funcionamento do seu sistema de suspensão afetado, causando impactos na dirigibilidade. A figura 10 abaixo mostra valores de rigidez típicos de certos tipos de veículos.(SAMPO et al., 2010)

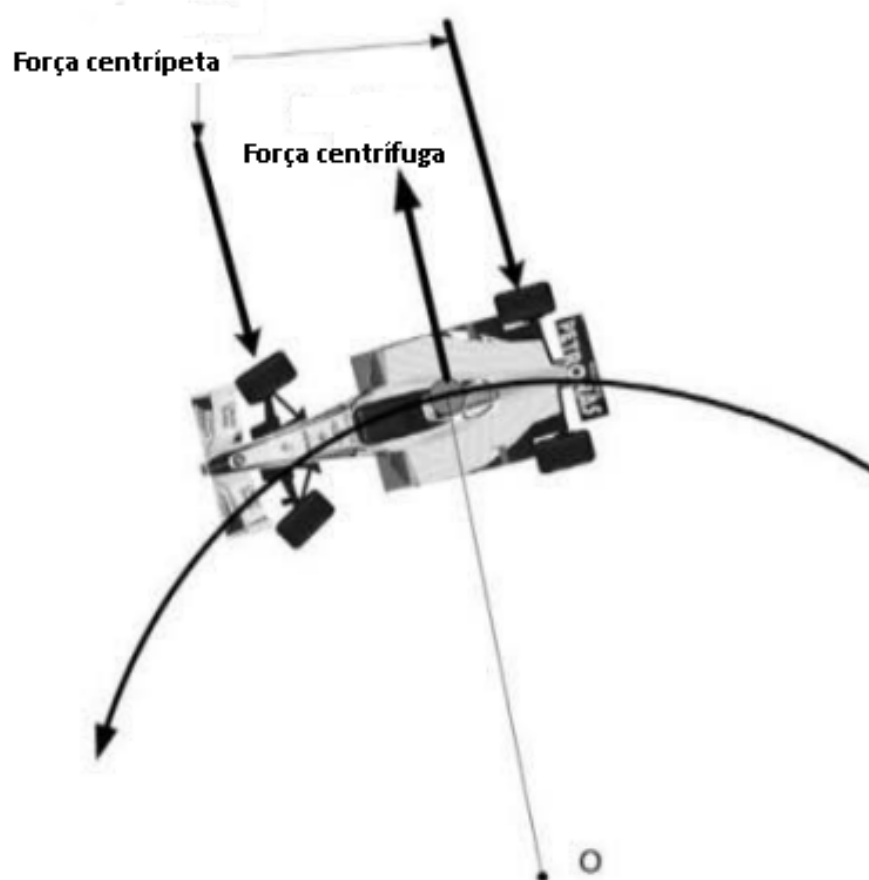
Figura 10 – Valores típicos de rigidez torcional

Vehicle	Chassis torsional stiffness [Nm/deg]
Formula SAE car	300 - 3000
Passenger car	5000 - 25000
Winston Cup racing car	15000 - 30000
Sports car	5000 - 50000
Formula One car	5000 - 10000

Fonte: Adaptado de Sampo et al. (2010, p.19)

A transferência de carga lateral ocorre quando um carro está percorrendo uma curva. Nesta condição, temos a força centrípeta atuando no carro em direção do centro da curva e seu ponto de aplicação é no contato entre pneu e pista. A força centrífuga possui a mesma magnitude, mas sentido oposto e seu ponto de aplicação é no centro de massa do veículo. Esta condição é mostrada na figura 11. (SEWARD, 2014)

Figura 11 – Aplicação de forças em uma curva

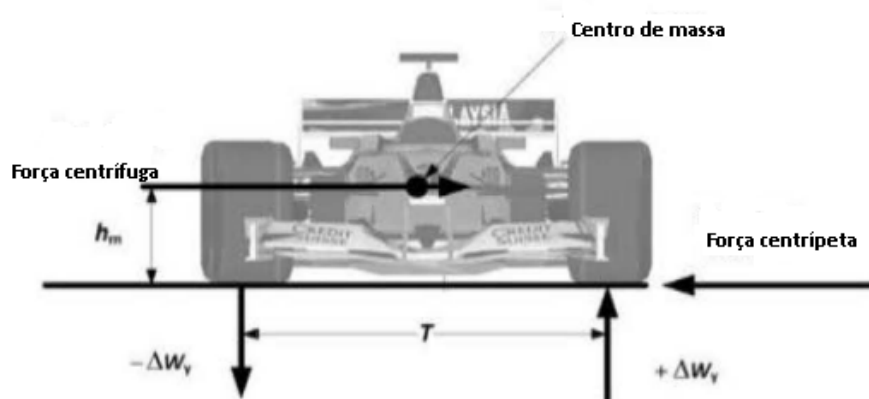


Fonte: Adaptado de Seward (2014, p.19)

O centro de massa do carro sempre terá uma altura ao longo do eixo x do veículo, a aplicação da força centrífuga neste ponto irá resultar em um momento.

Este momento é responsável por aumentar a força normal nos pneus externos a curva e diminuir nos pneus internos como é mostrado na figura 12. O aumento da força normal causa um aumento da força de atrito entre pneu e pista nos pneus externos à curva.

Figura 12 – Ilustração da transferência de carga lateral



Fonte: Adaptado de Seward (2014, p.20)

2.6 Método dos elementos finitos

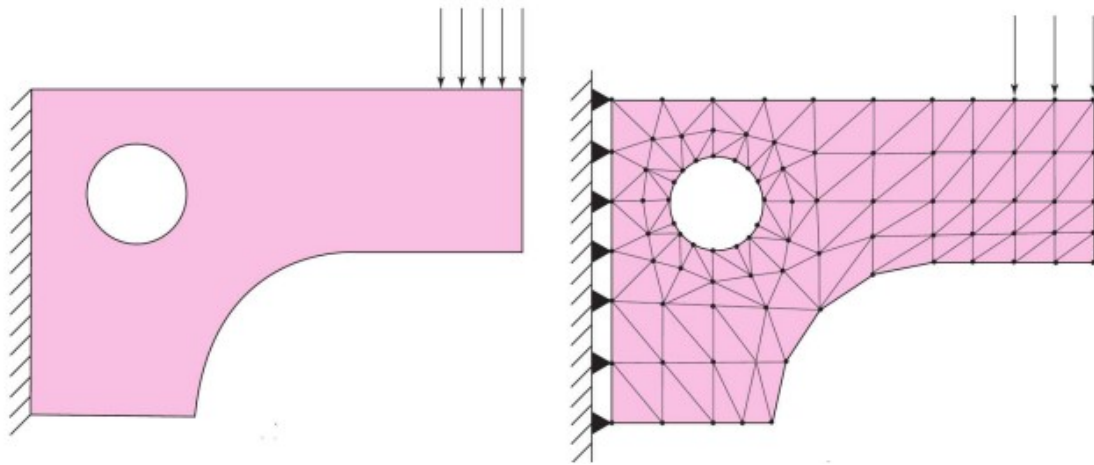
O método dos elementos finitos consiste, de forma geral, em discretizar um corpo contínuo em partes conectadas entre si por meio de pontos. Essa discretização gera equações algébricas estabelecidas que podem ser solucionadas por procedimentos padrões aplicáveis à estes sistemas. Além disso, há vários programas comerciais que resolvem essas equações a partir da entrada de uma geometria em CAD e a definição das condições de contorno apropriadas. (BUDYNAS, 2011; FILHO, 2000)

Componentes mecânicos simplificados, como barras, vigas, etc, podem ser analisados de forma relativamente fácil utilizando soluções analíticas desenvolvidas ao longo do tempo. No entanto, problemas reais não tem uma solução analítica pronta e nesses casos a opção de análise utilizando o método de elementos finitos é muito utilizada. (BUDYNAS, 2011)

O processo de divisão em elementos é chamado de discretização, com o emprego desta técnica, obtemos o modelo finito ao qual é possível aplicar e resolver as equações de mecânica dos materiais. Os elementos são geometrias conhecidas e que podemos descrever matematicamente, como triângulos, retângulos, hexágonos, pentágonos, etc. Os vértices destes elementos são chamados de nós e é neles que as

forças são aplicadas e os deslocamentos são calculados.(BUDYNAS, 2011)

Figura 13 – Exemplo de estrutura discretizada



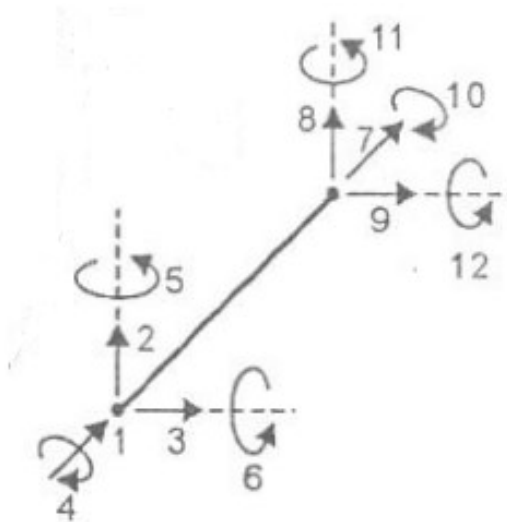
Fonte: Adaptado de Budynas (2011, p.962)

Como utilizamos um método para aproximar uma geometria contínua por vários elementos finitos os erros são inevitáveis. Temos dois tipos de erros, o primeiro vem dos arredondamentos realizados nos cálculos, entretanto os programas de simulação são desenvolvidos para minimizar este tipo de erro restando ao projetista a preocupação com o segundo tipo que é o erro proveniente da discretização. Algumas técnicas podem ser empregadas para minimizar estes erros, como aumentar o número de elementos ou alterar a geometria do elemento utilizando elementos mais complexos como tetraedros por exemplo. O objetivo destas correções é aumentar o número de nós e graus de liberdade dos elementos e por consequência minimizar as distorções causadas pela discretização. Devemos ter um compromisso entre a discretização e o tempo de análise, buscando sempre o melhor custo benefício.(BUDYNAS, 2011; FILHO, 2000)

2.6.1 Simulação em chassis spaceframe

O elemento de viga é um elemento unidimensional, que pode transmitir além de força axial, momento fletor, torção e cisalhamento. Este elemento terá 12 graus de liberdade, 6 para cada nó, como podemos observar na figura 14. Este elemento possui uma matriz de rigidez de ordem 12x12, conforme aumentamos o número de nós, as matrizes aumentam também e o custo computacional fica maior.(FILHO, 2000)

Figura 14 – Modelo de um elemento de viga



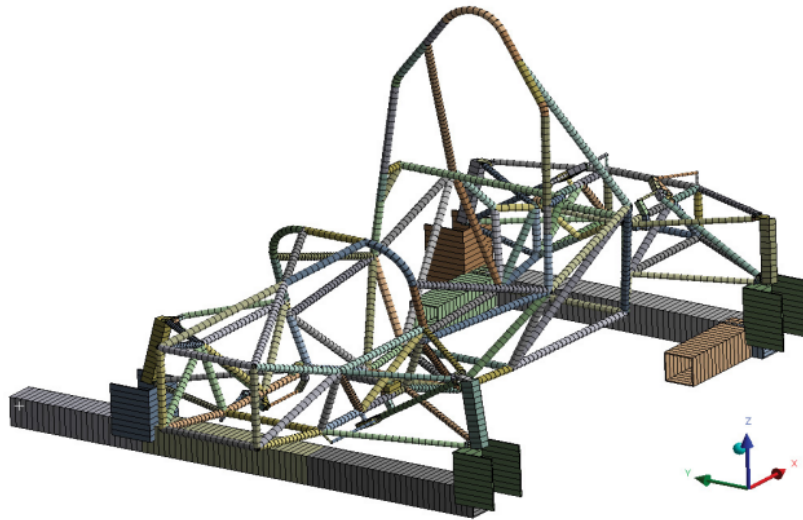
Fonte: Adaptado de Filho (2000, p.98)

A escolha de um elemento de viga deve ser feita de modo que haja uma boa representação do modelo real com o menor número de elementos possíveis.

Para a análise do chassi tipo spaceframe utilizaremos elementos de viga. Este elemento representa bem os tubos do chassi e é simples para que a simulação não tenha um grande custo computacional. O elemento de viga é comumente utilizado na análise de chassis de Fórmula e Baja SAE, como podemos ver nos trabalhos de Azevedo (2020), Burba (2015) e Krzikalla et al. (2015).

Em relação às condições de contorno, podemos adotar dois tipos de abordagem para analisar o chassi. O primeiro é utilizado em Krzikalla et al. (2015) e adota a aplicação das forças nos braços de suspensão, este tipo de análise é mais completa e tende a fornecer um resultado mais preciso em relação à rigidez torcional do chassi.

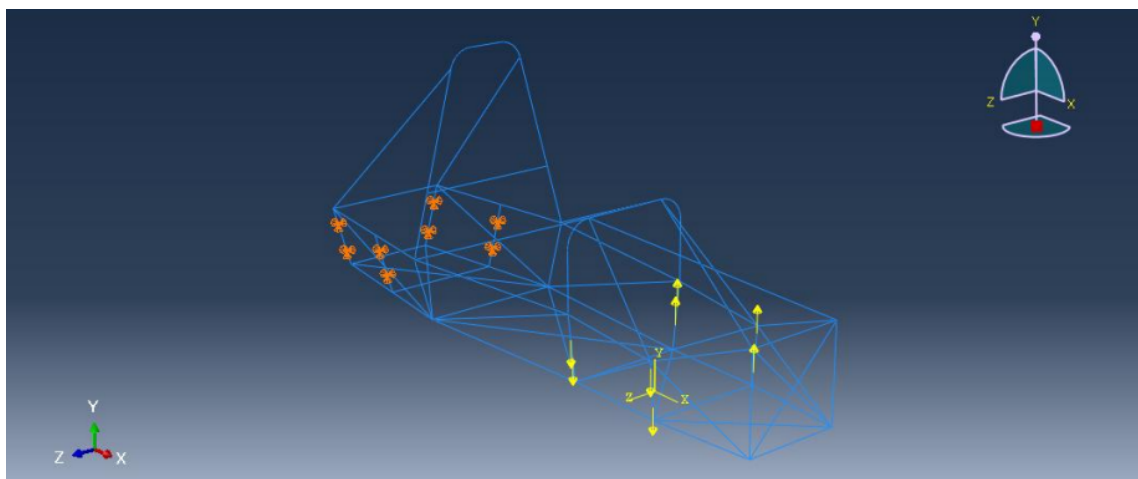
Figura 15 – Modelo de análise considerando os braços de suspensão



Fonte: Adaptado de Krzikalla et al. (2015, p.3)

A segunda abordagem é mais simplificada, podemos ver a aplicação nos trabalhos de Azevedo (2020) e Burba (2015). Esta abordagem desconsidera os braços duplo A da suspensão e aplica as forças nos pontos de fixação dos braços no chassi. (AZEVEDO, 2020), cita que podemos ter um enrijecimento do chassi próximo aos pontos de suspensão traseiros que estão fixados, isto se deve ao fato de omitirmos o comportamento dos terminais rotulares, que permite rotação em torno do ponto de fixação.

Figura 16 – Modelo de análise desconsiderando os braços de suspensão

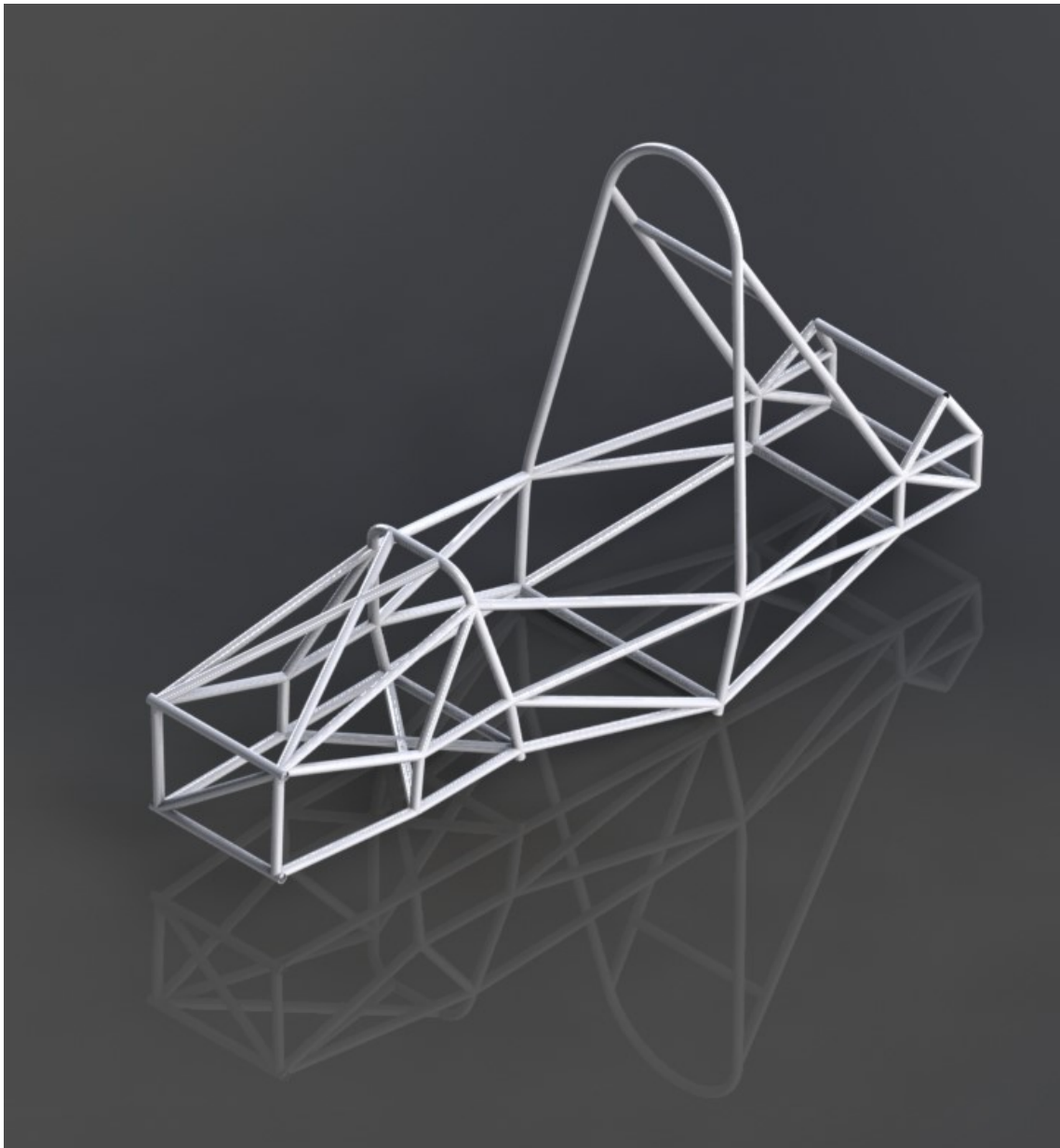


Fonte: Adaptado de Burba (2015, p.59)

2.7 Chassi de Fórmula SAE

As equipes de Fórmula SAE normalmente utilizam chassis do tipo space frame em seus protótipos devido as suas características de bom desempenho e baixo custo. Entretanto algumas equipes que possuem acesso à um orçamento maior fabricam chassis do tipo monocoque, que no geral possui um melhor desempenho do que o space frame.

Figura 17 – Chassi 2021 da equipe Fórmula CEM



Fonte: Elaborado pelo autor

3 METODOLOGIA

3.1 Desenvolvimento de produtos utilizando o PRODIP

O desenvolvimento de produtos faz parte da vida humana desde os primórdios, entretanto somente a partir da década de 60, com a globalização e o aumento da competitividade, os primeiros estudos foram realizados para entender os processos de produção e desenvolver metodologia de projeto de produto. Atualmente, os processos de desenvolvimento de produto são considerados de extrema importância para a competitividade das empresas. A metodologia PRODIP nasceu com base em pesquisas e experiências desenvolvidas pelo (NeDIP)(Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos) e contribui para sistematizar e tornar mais formal o processo de desenvolvimento de produtos. (BACK et al., 2008)

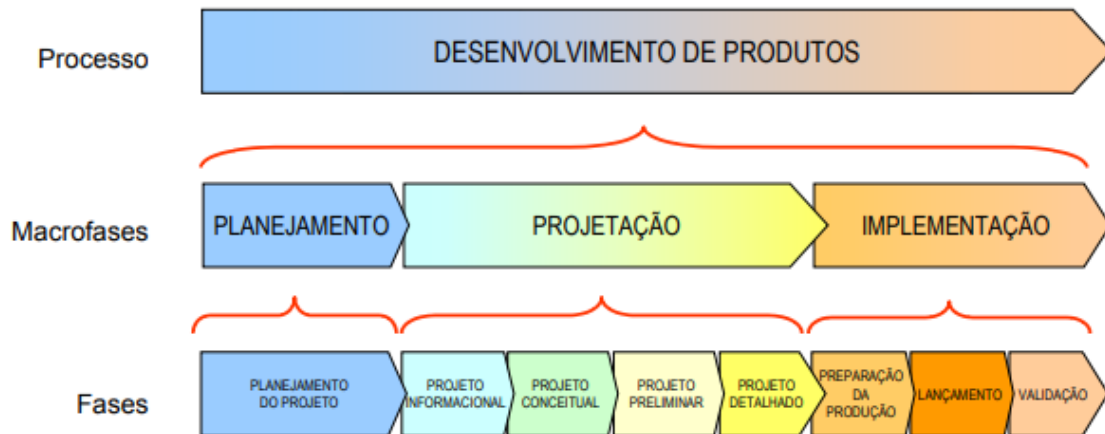
O termo projeto é definido como um esforço temporário para um produto ou serviço, podendo ser algo totalmente novo ou apenas uma melhora. Independente do produto a ser desenvolvido, precisamos controlar o processo de desenvolvimento e normalmente isto é feito dividindo o trabalho em diversas fases, que compõem a elaboração progressiva do produto, desde sua fase inicial até o lançamento no mercado. A conclusão de uma fase é caracterizada por uma saída esperada, a qual deve ser tangível e verificável, como por exemplo um requisito do projeto. (ROMANO, 2003)

O modelo PRODIP é proposto com base em pesquisas e experiências desenvolvidas pelo NeDIP, esse novo modelo busca mostrar o conhecimento sobre os processos que envolvem o desenvolvimento de um produto, com o intuito de auxiliar no entendimento e na prática do processo. O método divide o processo de desenvolvimento de produto em várias fases, em que indicam as tarefas lógicas a serem feitas.(BACK et al., 2008)

O PRODIP possui 3 macro fases, planejamento, projeção e desenvolvimento que são divididas em fases. Na macro fase de planejamento, deve ser realizado o planejamento do produto e do projeto. Na projeção os planos são colocados em prática e o produto é devidamente desenvolvido, passando pelas etapas de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. Durante a implementação, o produto é fabricado, lançado e validado pelo cliente.(ROMANO, 2003)

A figura 18 mostra a relação entre fases e macro fases.

Figura 18 – Ilustração das fases e macro fases do PRODIP



Fonte: Adaptado de (ROMANO, 2003)

3.1.1 Projeto Informacional

O projeto informacional é a fase onde devemos identificar as necessidades dos clientes e traduzi-las em requisitos de projeto que possam ser verificados no final desta fase. Projetos mais complexos podem ter muitas necessidades e torna-se difícil entender a relação entre elas.

Podemos utilizar alguns métodos para identificar quais as necessidades são mais importantes para o cliente, desta forma poderemos focar nestes e entregar um produto que agregará mais valor. Um dos métodos é a matriz de Mudge, proposto por Reis et al. (2002). A construção desta matriz é feita realizando uma comparação, par a par, entre as necessidades do cliente, definimos que uma necessidade pouco importante tem o valor 1, importante com o valor 3 e muito importante com o valor 5. O somatório das pontuações é feito e depois as necessidades são ranqueadas como é mostrado no exemplo na figura 19.

Figura 19 – Exemplo de diagrama de Mudge

Requisitos		2	3	4	5	6	7	Soma	%	
1	1B		3A	1A	5B	1B	7C	11	16	
	2		3A	2B	2B	6A	7C	06	08	
		3		3A	3B	3C	3C	20	28	
	Requisitos		4		5C	6A	7A	00	00	
				5		6A	7A	04	06	
					6		7C	15	21	
						7		14	21	
								Total	70	100

Fonte: Adaptado de Reis et al. (2002, p.6)

Para analisar qual a relação entre as necessidades do cliente e os requisitos de projeto, utilizamos a matriz da casa da qualidade. Esta matriz foi desenvolvida por Yoji Akao e Shigeru Mizuno na década de 60, durante o grande crescimento industrial japonês, buscando garantir a qualidade desde as fases iniciais do projeto.(CARNEVALLI et al., 2004)

Segundo Carnevalli et al. (2004), as empresas adotam a (QFD)(Quality Function Deployment) para a melhorar o processo de desenvolvimento de produtos e aumentar a satisfação dos clientes. Utilizando a matriz, é possível avaliar e quantificar os requisitos que vão de encontro às necessidades dos clientes e, com isso, reduzir os custos e o tempo gasto no seu desenvolvimento.

3.1.2 Projeto conceitual

Nesta fase as tarefas realizadas buscam definir a estrutura funcional do produto. A partir desta definição, são idealizadas algumas soluções capazes de atender as necessidades do cliente e após uma análise comparativa entre as mesmas, levando em conta diversos fatores como custo, prazos, requisitos do projeto, riscos e complexidade.(BACK et al., 2008)

Algumas metodologias podem ser empregadas para auxiliar na elaboração e seleção das soluções, como por exemplo a matriz de Pugh que é recomendada por Back et al. (2008) e foi apresentada em Pugh (1991). Para utilizar este método elaboramos alguns conceitos. Estes conceitos precisam cumprir os requisitos de projeto, depois de definidos os conceitos, adotamos uma referência e comparamos todos os demais em relação à esta. Para cada requisito do cliente é atribuído um valor (+) ou (-), indicando se o conceito é melhor ou pior que a referência quando avaliado determinado requisito como é mostrado na figura 20.

Figura 20 – Exemplo de matriz de Pugh

	Conceito A	Conceito B	Conceito C	Conceito D
Requisito 1		+		
Requisito 2		+		-
Requisito 3			+	--
Requisito 4		-	-	+
Requisito 5			-	
Soma (+)	0	2	1	1
Soma (-)	0	1	2	-2
Total	0	1	-1	-1

Fonte: Adaptado de Cane (2020, p.33)

Há também a matriz de Pugh ponderada, este método é utilizado por Floriani et al. (2011) consiste em utilizar o peso obtido por um método que faça a valoração dos requisitos e multiplicar os pesos pelo resultado da matriz de Pugh tradicional.

Figura 21 – Exemplo de matriz de Pugh ponderada

Critério de Comparação	Peso	Concepção					Referencia
		1	2	3	4	5	
Custo	5	-	-	-	-	-	
Peso	3	=	-	-	-	-	
Tempos de fabricação e montagem	4	-	=	-	-	-	
Tempo de transformação	2	=	=	-	+	-	
Resistência a pressão	3	=	+	+	+	+	
Interação com o usuário	3	-	-	-	-	=	
Facilidade de programação e montagem da eletrônica embarcada	4	=	=	-	-	-	
Facilidade de encontrar os componentes	4	-	=	-	-	-	
Resistência a choques mecânicos	4	=	=	+	+	+	
Precisão dos dados	3	=	=	+	+	=	
Quantidade de bps (bytes por segundo) transmitidos	4	=	=	=	=	=	
Total	Positivo	0	3	10	12	7	
	Negativo	-16	-11	-25	-23	-22	
	Global	-16	-8	-15	-11	-15	0

Fonte: Adaptado de Floriani et al. (2011, p.13)

3.1.3 Projeto preliminar

Nesta fase, buscamos estudar e iniciar o detalhamento do conceito escolhido. Ferramentas de análise, simulação e desenho são necessárias para que possamos definir a geometria final do produto, além disso precisamos detalhar também os materiais necessários para fabricação.(CANE, 2020)

A saída desta fase deve ser o leiaute definitivo da concepção escolhida. (ROMANO, 2003)

3.1.4 Projeto detalhado

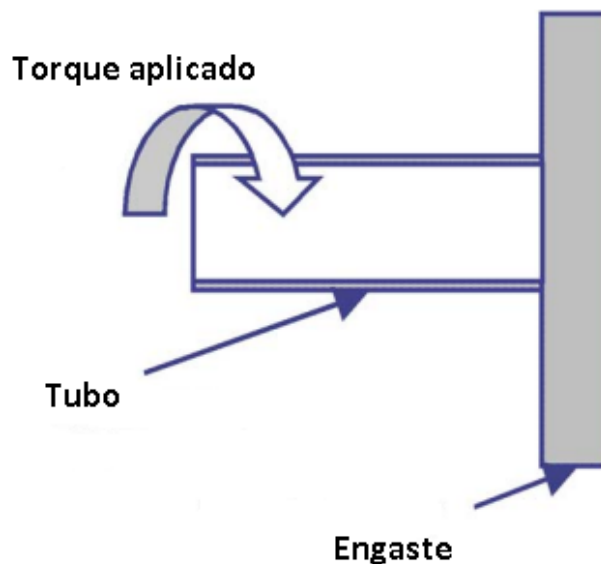
O projeto detalhado é a fase na qual a saída é toda a documentação necessária para a fabricação do produto como por exemplo, desenhos técnicos, folhas de processo e descrição do ferramental à ser usado. A finalização desta etapa garante que o produto atenderá às necessidades do cliente e o lançamento do produto é viabilizado.(CANE, 2020)

4 CÁLCULO DA RIGIDEZ TORCIONAL

Na literatura, há diferentes formas que são utilizadas para calcular a rigidez torcional de um veículo, cada uma com pontos positivos e negativos. A maior diferença observada entre elas é o fato de se utilizar ou não o sistema de suspensão na análise. A análise utilizando o sistema de suspensão é mais complexa e tende a retornar um valor mais próximo do valor real. Quando o sistema de suspensão não é levado em consideração, criamos uma situação que não é a mais próxima da real e o valor tende a ser maior do que temos na realidade. Isto acontece porque fixamos os pontos de suspensão traseira, causando um enrijecimento do chassi.

Uma metodologia simplificada para o cálculo da rigidez torcional é apresentada por Riley e George (2002). Neste método consideramos que o chassi é um tubo engastado e um torque é aplicado na outra extremidade, conforme é mostrado na figura 22.

Figura 22 – Modelo simplificado para cálculo de rigidez torcional



Fonte: Adaptado de Riley e George (2002, p.12)

O engaste é aplicado aos pontos da suspensão traseira e o torque aplicado

aos pontos da suspensão dianteira, podemos calcular a rigidez torcional pela equação 1.

$$K = \frac{T}{\Theta} \quad (1)$$

Onde:

T = Torque aplicado em N.m

Θ = Ângulo em graus

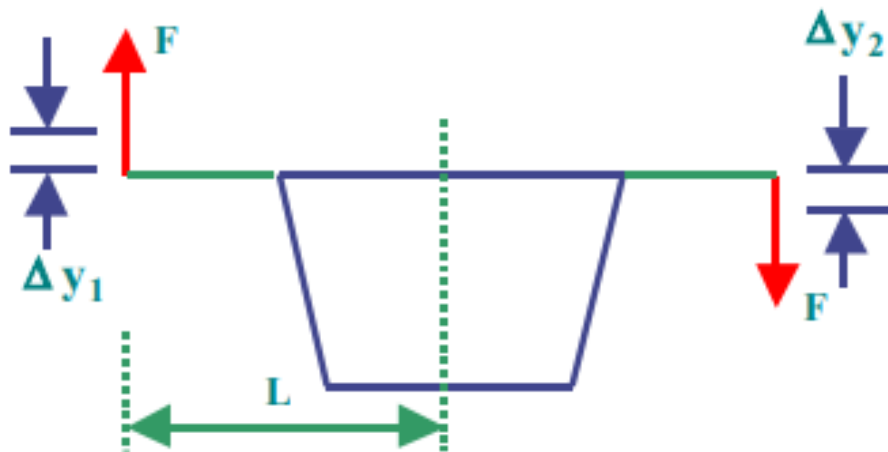
K = Rigidez torcional em $\frac{N.m}{\circ}$

Para o cálculo do ângulo de deformação, utilizamos a equação 2.

$$\Theta = \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2 \cdot L} \quad (2)$$

Considerando a imagem 23, podemos realizar a substituição dos termos da equação 1 para facilitar seu uso quando a simulação numérica for realizada, a saída será os deslocamentos dos nós e não o ângulo de torção.

Figura 23 – Modelo de análise da rigidez do chassi com aplicação da força nos dois lados



Fonte: Adaptado de Riley e George (2002, p.12)

Podemos substituir os termos na equação 1 e reescrevê-la como é mostrado na equação 3.

$$K = \frac{F \cdot L}{\tan^{-1} \left[\frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2 \cdot L} \right]} \quad (3)$$

Onde:

F = Força aplicada em N

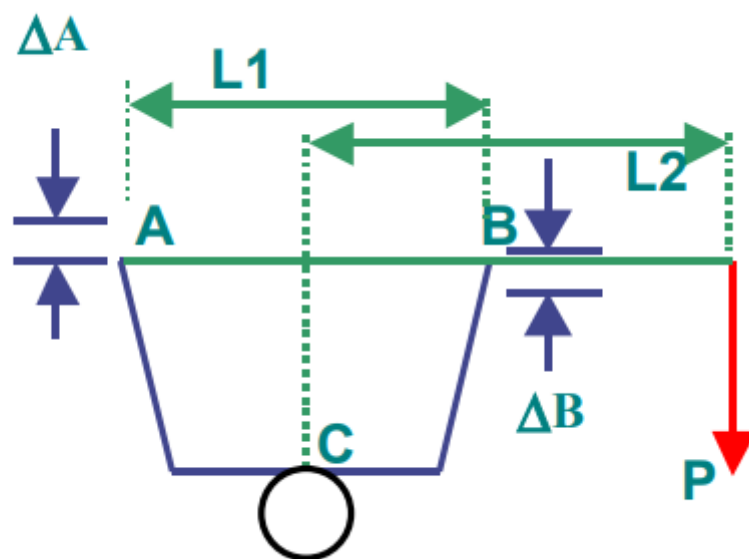
L = Distância entre a aplicação da força e o plano central do chassi em mm

Δy_1 e Δy_2 = Deslocamentos nodais em mm

Este método citado por Riley e George (2002), foi utilizado também nos trabalhos de Burba (2015) e Azevedo (2020). É um método simplificado e que na prática é difícil de ser aplicado, porque seria necessário criar uma força que aponta no sentido oposto da gravidade. Outro ponto é que este método deverá ter alguns erros por não considerar a ação da suspensão, na parte traseira isto causa um enrijecimento do chassi que não ocorre na realidade, isto tende a nos fornecer um valor maior de rigidez. Além disso, na parte dianteira, consideramos que a força é totalmente vertical, mas na realidade a direção desta força varia com o trabalho da suspensão.

Para facilitar a validação experimental, podemos adotar um sistema em que a força é aplicada somente em um dos lados do chassi, como mostra a figura 24.

Figura 24 – Modelo de análise da rigidez do chassi com aplicação da força somente em um lado



Fonte: Adaptado de Riley e George (2002, p.13)

Nesta configuração, o braço de alavanca é fixado aos pontos A e B, o chassi é suportado por um rolamento no ponto C e um determinado peso é aplicado na extremidade do braço de alavanca gerando uma força P. A rigidez torcional pode ser calculada pela equação 4.

$$K = \frac{P \cdot (L_1 + L_2)}{\tan^{-1} \left[\frac{\Delta A + \Delta B}{2 \cdot L_1} \right]} \quad (4)$$

Onde:

P = Força peso em N

L_1 = Largura do chassi em mm

L_2 = Distância entre a extremidade do braço de alavanca e o plano central do chassi em mm

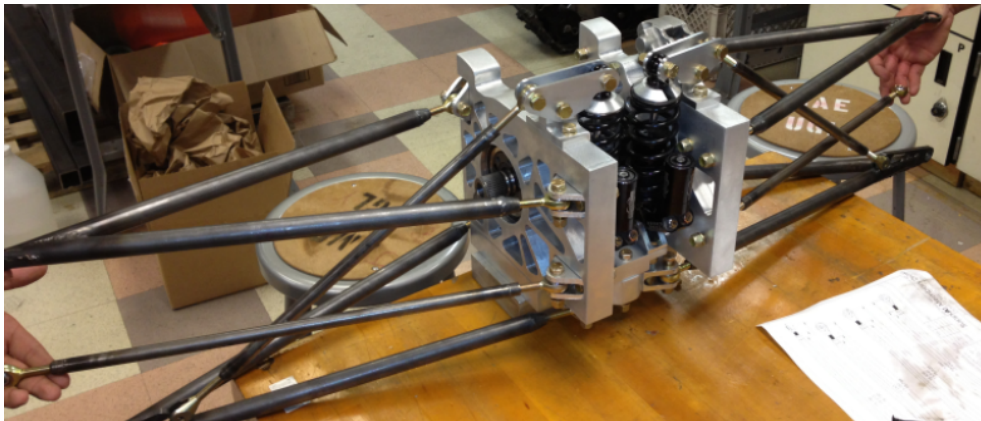
ΔA e ΔB = Deslocamentos nodais em mm

4.1 Geometrias de subframe

Assim como há diversas formas de arranjar os tubos para se construir um chassi do tipo spaceframe, temos diferentes geometrias de subframe que podem ser implementadas. Uma delas é mostrada na figura 25 e é utilizada pela equipe da Universidade de San Diego, este arranjo consiste em duas placas de alumínio que são usinadas para alívio de massa e depois montadas fixadas por parafuso, comportando o sistema de suspensão e diferencial.

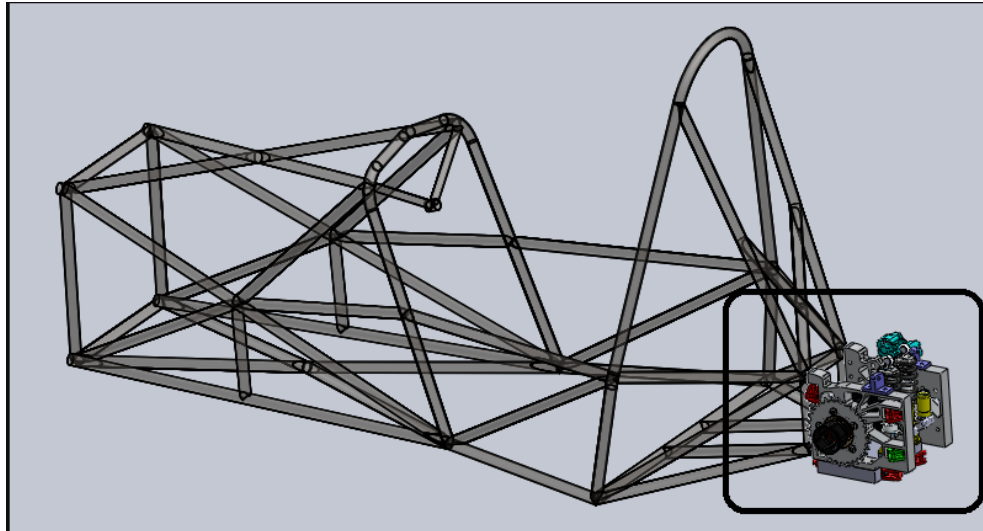
O chassi é adaptado para que o subframe seja encaixado como mostra a figura 26. Podemos notar que o arranjo dos tubos traseiros é fechado, ou seja, há pouco espaço para que o motor seja encaixado, isso só é possível porque esta equipe possui um motor elétrico pequeno.

Figura 25 – Subframe utilizado pela equipe de San Diego



Fonte: UC San Diego (2011, p.1)

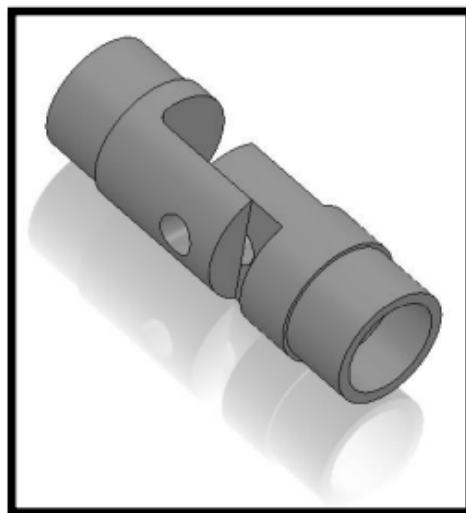
Figura 26 – Chassi e subframe utilizados pelas equipe de San Diego



Fonte: UC San Diego (2011, p.1)

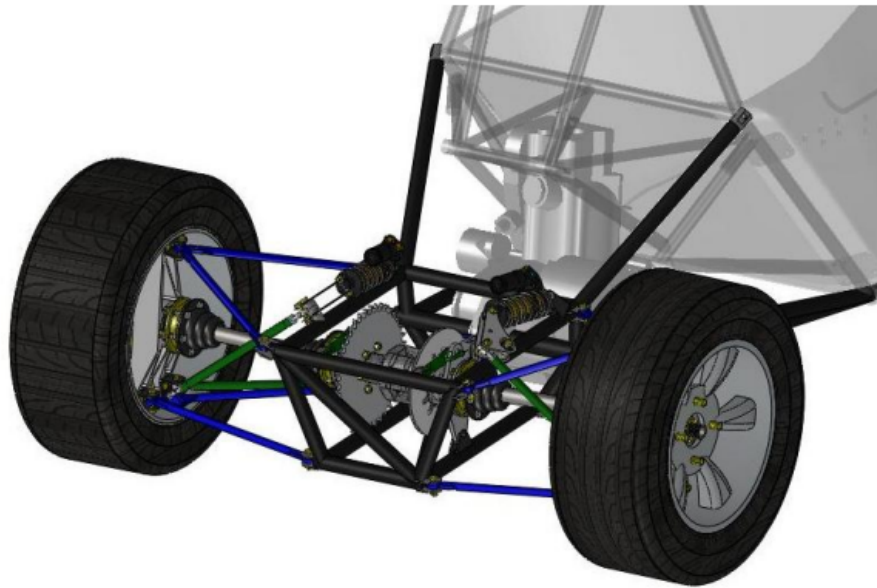
Outra configuração possível é utilizada pela equipe FSAE Cal Poly da Universidade Politécnica da Califórnia, mostrado nas imagens 28 e 29, onde temos uma geometria semelhante à um chassi spaceframe comum, entretanto a parte traseira é fixada por parafusos, para esta fixação a equipe utiliza luvas soldadas às pontas do tubo e que possuem a furação para transpassar o parafuso. Um problema notado é que as luvas são fixadas por parafusos em cisalhamento simples como é mostrado na figura 27, o que torna a união menos confiável.

Figura 27 – Luva utilizada pela equipe CalPoly



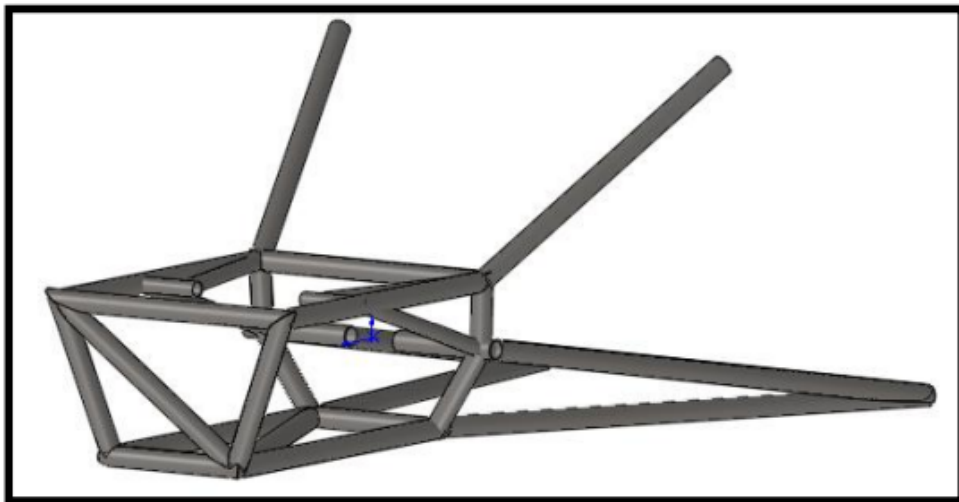
Fonte: McCune et al. (2009, p.34)

Figura 28 – Subframe e chassi utilizado pela equipe Cal Poly



Fonte: McCune et al. (2009, p.34)

Figura 29 – Subframe utilizado pela equipe Cal Poly



Fonte: McCune et al. (2009, p.34)

Outras geometrias de subframe podem ser encontradas, entretanto todas são variações destes dois tipos apresentadas, o primeiro tipo inclui chapas metálicas na construção e o segundo é construído a partir de corte nos próprios tubos do chassi. A fixação é sempre parafusada.

Para este trabalho, será adotado uma configuração semelhante à utilizada pela equipe Cal Poly, onde os tubos serão cortados em pontos definidos e um luva será colocada para consolidar a união parafusada. Nesta união, não usaremos parafusos em cisalhamento simples, mas sim um modelo proposto pelo regulamento que será discutido em um dos tópicos abaixo.

Podemos notar a geometria original do chassi na imagem , o ponto que chama a atenção é o grande espaço entre os bracing arms que estão destacados em azul, conforme é mostrados na figura 30 , este espaço é necessário para que motor seja retirado no sentido que a seta indica.

Figura 30 – Posicionamento aproximado do motor no chassi 2021



Fonte: Elaborado pelo autor

Este movimento de retirada do motor se torna difícil devido à grande massa do mesmo, ele precisa ser erguido à uma altura aproximada de 1,5 metros a partir do chão e depois posicionado no suporte do motor. Naturalmente imaginamos que a rigidez torcional é comprometida pela ausência de um tubo nesta região. O projeto do subframe busca diminuir esta lacuna de forma a aumentar a rigidez e facilitar a montagem do motor, o componente mais pesado do veículo.

4.2 Análise do regulamento

Para obter sucesso na implementação de qualquer alteração no projeto do veículo, precisamos seguir as diretrizes do regulamento. Portanto, todos os trechos que tem influência neste projeto serão discutidos.

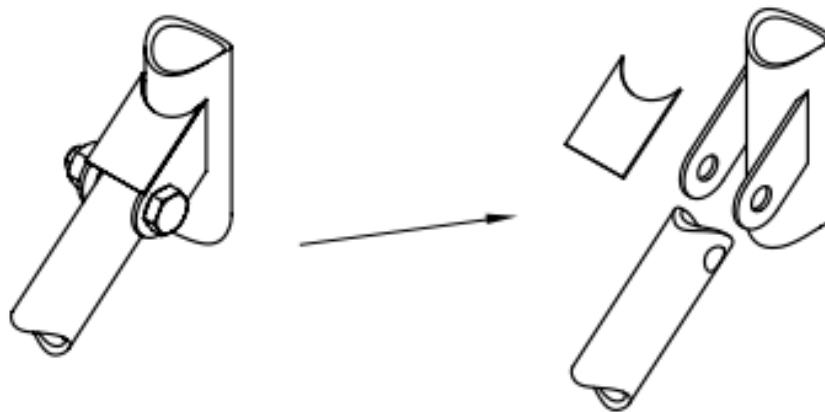
Os tubos do chassi são divididos em tubos estruturais e não estruturais, estes tubos têm diretrizes de construção como pode exemplo, mínimo diâmetro externo, espessura mínima de parede, etc. Além disso há boas praticas de triangulação, distâncias especificadas para alguns tubos, entre outras diretrizes. O chassi utilizado pela equipe, mostrado na figura 17, já cumpre todos os requisitos descritos pelo chassi, portanto o foco será nas mudanças propostas por este trabalho. O subframe e o

chassi, terão uma conexão parafusada. O item F.5.3 descreve como os furos devem ser feitos.(SAE, 2021)

O regulamento exige que todos os furos sejam documentados e os documentos anexados no (SES)(*Structural Equivalency Spreadsheet*), que é um documento onde todo o projeto do chassi é detalhado e apresentado aos juízes para avaliação técnica, além disso faz menção à inspeção que será feita durante a competição.

A seção F.5.10 do regulamento, mostra algumas diretrizes para a fixação do main hoop bracing. Serão estas as conexões adotadas para unir as duas partes neste projeto. Este trecho menciona "critical fasteners", que são por definição parafusos posicionados em partes críticas do veículo e que se falharem podem causar danos graves. Estes parafusos são regidos pela norma da SAE e seu grau e diâmetro são identificados nas partes que necessitam deste tipo de parafuso. Também é descrito e mostrado como que a conexão deve ser feita quando a conexão é feita pela extremidade tubo em um orelha, como ilustra a figura 31.

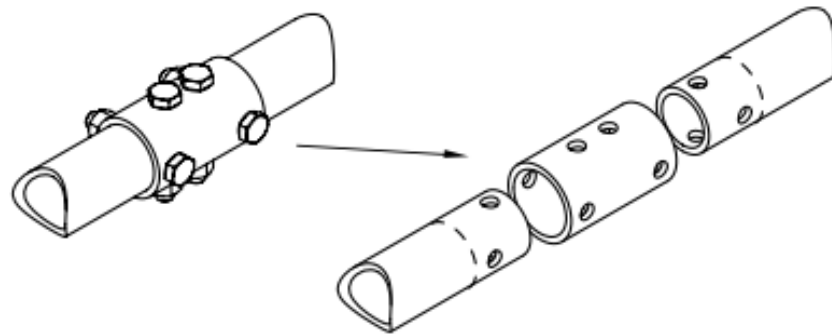
Figura 31 – Orelha para fixação do tubo



Fonte: SAE (2021)

Temos também a opção de fazer a fixação em algum ponto ao longo do tubo, neste caso utilizamos uma luva parafusada. A geometria da luva é determinada pelo regulamento, as tolerâncias precisam ser pequenas para garantir um encaixe com pouca folga e a luva precisa ter espessura de parede igual ou maior que os tubos.(SAE, 2021)

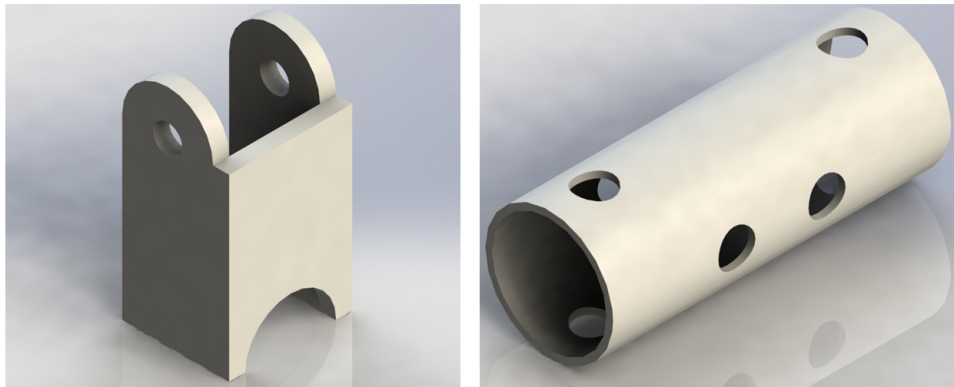
Figura 32 – Luva para fixação do tubo



Fonte: SAE (2021)

Com esta análise, podemos definir qual será o tipo de conexão e a geometria do subframe pois estes pontos estão diretamente conectados. Mantendo a ideia de ter um projeto simplificado, adicionaremos poucos tubos aos chassi, mas em pontos estratégicos para que a rigidez torcional seja maximizada e o incremento de massa minimizado. Os modelos de fixação projetados são mostrados na figura 33.

Figura 33 – Conexão para fixação dos tubos



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Material do chassi

Para a construção do chassi, equipe utiliza atualmente o aço Dual Phase 980, na forma de chapa fina com 1,47 mm de espessura. Os tubos possuem diâmetro externo de 25,4 mm e foram produzidos utilizando trefilação à frio e costura longitudinal através do processo de soldagem por indução. Nesse trabalho consideraremos este aço e suas propriedades para o estudo, porque já é um material validado pela equipe.

A imagem 34, mostra as propriedades utilizadas nas simulações numéricas¹.

Figura 34 – Propriedades do aço Dual Phase 980

Classe de aço	Aço Arcelor Mittal DP980
Tensão de Ruptura 990MPa	990 MPa
Tensão de escoamento	700MPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade	7850 kg/m ³

Fonte: Equipe Fórmula CEM¹

¹ Dados obtidos em parceria com a equipe Fórmula CEM

5 RESULTADOS

5.1 Projeto informacional

Nesta fase, são realizadas tarefas que buscam as necessidades do cliente que serão traduzidas em requisitos do projeto, como por exemplo, confiabilidade, resistência, adequação a normas, etc. Uma avaliação de mercado, comparativa, é feita com o intuito de verificar soluções que atendem aos requisitos do projeto.

5.1.1 Função global

A função global do chassi é ser rígido suficiente para suportar os subsistemas acoplados a ele. Como função complementar, temos que o chassi deve fornecer segurança ao piloto.

5.1.2 Necessidades do cliente

Os requisitos do projeto são a definição dos requisitos técnicos de vão impactar nas necessidades do cliente. No objeto deste estudo, o cliente é a equipe Fórmula CEM. Suas necessidades para o chassi são:

- A Alta rigidez torcional
- B Facilidade de acesso aos componentes
- C Baixa massa
- D Segurança para o piloto
- E Conformidade com o regulamento

A necessidade de alta rigidez torcional diz respeito à ter um chassi rígido para garantir um bom desempenho dinâmico do carro.

A necessidade de facilidade de acesso aos componentes traz um ponto que pode ser um diferencial para carros de competição, é necessário ter fácil acesso aos componentes para que se possa fazer a substituição ou manutenção dos mesmos da forma mais rápida possível, em veículos FSAE a demora na substituição de algum componente pode implicar na não participação da equipe em alguma prova pois todas as provas são agendadas e a pontualidade é necessária.

A necessidade de baixa massa também é básica em todos os veículos de competição, maior massa significa que uma maior potência é necessária para colocar

o veículo em movimento, o que impacta em perda de desempenho e aumento do consumo.

A necessidade de segurança é primordial em todas as competições, o chassi é o primeiro componente a sofrer danos em caso de colisão e tem que ser resistente o suficiente não deformar excessivamente, protegendo o piloto.

Para veículos de competição, o descumprimento de algum ponto do regulamento implica em desclassificação, portanto a necessidade de seguir o regulamento torna-se imperativa.

5.1.3 Diagrama de Mudge

Utilizamos o diagrama de Mudge para definir quais as necessidades são mais importantes e devem requerer maior atenção. O diagrama nos auxilia nesta definição por meio da comparação entre as necessidades. Os pesos foram definidos com base na experiência do autor dentro da equipe e uma conversa com os membros atuais.

Figura 35 – Ordem de relevância

Ordem de relevância	
Pouco mais importante	1
Mais importante	3
Muito mais importante	5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36 – Diagrama de Mudge

Item	Requisitos do cliente
A	Alta Rigidez torsional
B	Facilidade de acesso aos componentes
C	Baixa massa
D	Segurança para o piloto
E	Conformidade com o regulamento

A	B	C	D	E	SOMA	%
A	A3	A3	D3	E3	6	17%
	B	B3	D5	E5	3	8%
		C	D5	E5	0	0%
			D	D1	14	39%
				E	13	36%
				TOTAL	36	100%

Fonte: Elaborado pelo autor

As necessidades são classificadas em ordem de importância na lista abaixo

1. Segurança para o piloto
2. Conformidade com o regulamento
3. Alta rigidez torcional
4. Facilidade de acesso aos componentes
5. Baixa massa

5.1.4 Requisitos de projeto

O passo seguinte é traduzir estas necessidades em parâmetros técnicos objetivos, os quais devemos tomar como base para saber se o projeto atende ou não as necessidades do cliente.

As necessidades de segurança e cumprimento do regulamento são parâmetros que não serão abordados, para definir se um chassi é realmente seguro, devemos executar um teste de impacto e avaliar a deformação do chassi, algo que não foi feito pela equipe devido ao alto custo de perder um chassi em um ensaio destrutivo. Desta forma, vamos assumir que um item que é proposto pelo regulamento chamado atenuador de impacto é responsável pela segurança do veículo. Este item absorve toda a energia de um possível impacto frontal. Segundo o regulamento, este item tem que ser capaz de absorver 7kJ de energia.(SAE, 2021)

Para garantir o cumprimento do regulamento, ele será citado a cada modificação feita no chassi. Partiremos do chassi utilizado pela equipe em 2021, uma vez que o objetivo deste trabalho é promover mudanças por meio da implementação de um subframe. O chassi original cumpre o regulamento em todos os sentidos.

As outras necessidades são traduzidas para requisitos tomando como base a literatura apresentada e os dados de peso do último chassi construído.

- Rigidez torcional entre 2000 e 3000N/°
- Espaço para que o motor seja extraído ao longo do eixo x
- Massa total menor que 36Kg
- Utilização do atenuador de impacto
- Atender ao regulamento

5.1.5 Matriz da casa da qualidade(QFD)

Após definir as necessidades do cliente e os requisitos do projeto, podemos avaliar qual a sua relação por meio da matriz QFD. Utilizamos os símbolos mostrados na figura 37 para representar as interações entre necessidades e requisitos, após é feita a atribuição de um grau de importância de 1 a 5 às necessidades do cliente.

Figura 37 – Pontuação com base na relação entre necessidades e requisitos

Reações entre necessidades e requisitos

Relações fortes ● - 9

Relações médias ○ - 3

Relações fracas △ - 1

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38 – Matriz QFD

Necessidades do cliente	Importância	Requisitos de projeto					
		Rigidez Torcional	Espaço para retirada do motor	Massa total	Utilização do atenuador de impacto	Atender ao regulamento	
Alta rigidez torcional	4	●	△	○		○	
Facilidade de acesso aos componentes	2		●			○	
Baixa massa	2			●			
Segurança para o piloto	5	●			●		
Conformidade com o regulamento	5				●	●	
Importância Absoluta		81	22	30	90	63	0
Importância Relativa		2	5	4	1	3	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Neste trabalho, foi analisado apenas a relação entre as necessidades do cliente e os requisitos do projeto. Isto se deve ao fato de não haver relação entre requisitos, portanto a parte do telhado da casa da qualidade foi desconsiderada nesta análise. Podemos ver na figura 38 que os valores de importância absoluta mostram que o requisito mais importante é a utilização do atenuador de impacto. Este resultado é esperado uma vez que este item é obrigatório pelo regulamento e garante a segurança do piloto. Os demais itens são mostrados ranqueados na figura 39.

Figura 39 – Requisitos do projeto em ordem de importância

Requisitos do projeto	Pontuação QFD
Utilização do atenuador de impacto	90
Rigidez Torcional	81
Atender ao regulamento	63
Massa total	30
Espaço para retirada do motor	22

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 Projeto conceitual

Com os requisitos do projeto definidos e valorados, podemos definir as soluções que serão responsáveis por atender aos requisitos. Para esta definição, pode-se usar

alguns métodos como a matriz morfológica e a matriz de avaliação, que auxiliam na elaboração das soluções. Quando se trata de um chassi spaceframe aplicado à um veículo Fórmula SAE, as concepções são inúmeras porque podemos arranjar os tubos de diversas maneiras diferentes de modo que o produto ainda sim cumpra o regulamento, isso é observável nas competições onde cada equipe apresenta um conceito diferente de chassi. A análise dessas várias concepções se torna inviável, tanto que normalmente as equipes optam por poucas mudanças nos chassi que já utilizam e essas mudanças ocorrem devido à um item no regulamento que obriga as equipes a realizar mudanças nos seus chassis a cada duas competições.

Desta forma, este trabalho se limitará a analisar duas concepções, a primeira é o chassi utilizado pela equipe em 2021 e foi apresentado na figura 17 . A segunda é o chassi utilizando o subframe traseiro.

Para a comparação destas duas concepções, será utilizada a matriz de Pugh, onde o chassi atual é adotado como referência e avaliaremos o chassi com subframe em relação aos requisitos do projeto. As pontuações foram atribuídas com base nas referências bibliográficas e em conversas com os membros da equipe.

Com a implementação de um subframe, será possível que componentes de difícil acesso sejam montados mais facilmente porque haverá a possibilidade de retirar os tubos que atrapalhavam, algo que não acontece com o chassi inteiramente soldado.

Também é esperado que a possibilidade de desmontar o chassi facilite o acesso aos componentes e agilize as manutenções corretivas e preventivas que são necessárias em um carro de competição. Provavelmente adicionaremos massa ao chassi porque a ideia é colocar mais tubos para aumentar a rigidez torcional, entretanto o percentual de massa adicionada deve ser pequeno quando comparado à massa total do carro, portanto espera-se que o ganho em rigidez seja muito mais relevante que o ganho de massa. Não haverá grande mudança na parte de ergonomia e segurança para o piloto porque as modificações serão feitas na parte traseira do carro. O regulamento precisará ser cumprido em ambas as situações.

Figura 40 – Matriz de Pugh

Requisitos	Pesos	Space Frame	Space Frame + Subframe
Alta Rigidez torsional	17%	0	++
Facilidade de acesso aos componentes	8%	0	+
Baixa massa	0%	0	-
Segurança para o piloto	39%	0	0
Conformidade com o regulamento	36%	0	0
Total		0	42%

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise da matriz indica que a solução utilizando o subframe é a melhor

escolha, portanto seguiremos com o desenvolvimento deste conceito.

5.3 Projeto Preliminar

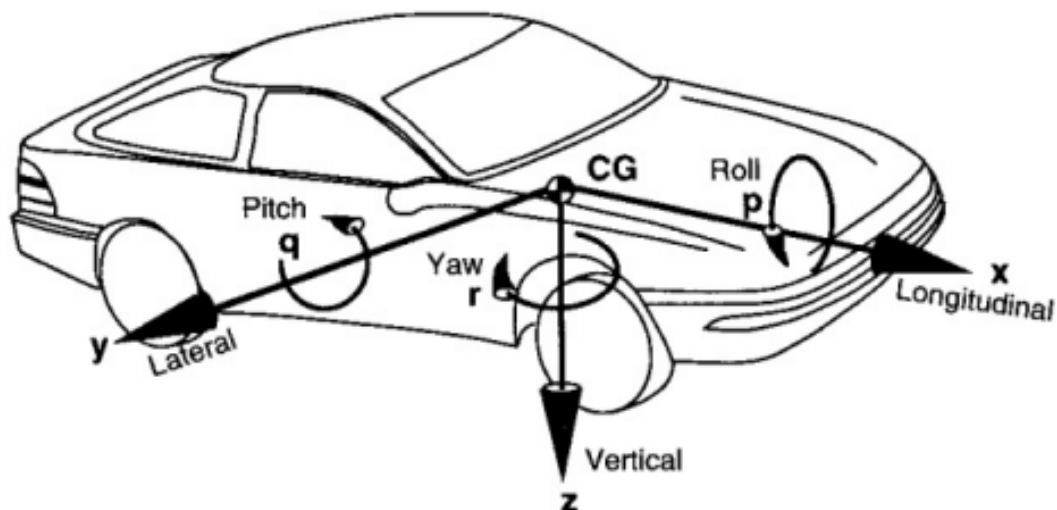
Na etapa do projeto preliminar temos o objetivo de desenvolver o conceito escolhido. Partiremos da geometria atual do chassi, uma modificação para o uso do subframe será realizada e posteriormente a análise pelo método dos elementos finitos para avaliar qual o ganho percentual em termos de rigidez com relação a geometria original.

5.4 Definição dos eixos de coordenadas

Para iniciar a análise é necessário que tomemos um sistema de coordenadas como referência, isto auxiliará na avaliação dos resultados posteriormente e facilitará a compreensão do leitor.

Será utilizado a definição feita por Gillespie (1996), onde temos o eixo x ao longo do eixo longitudinal do veículo, o eixo y apontando para o lado direito e o eixo z direcionado para baixo. Além disso, é definido o momentos de pitch como sendo a rotação em torno do eixo y, yaw em torno de z e roll em torno de x, como é mostrado na figura 41.

Figura 41 – Eixos de coordenadas

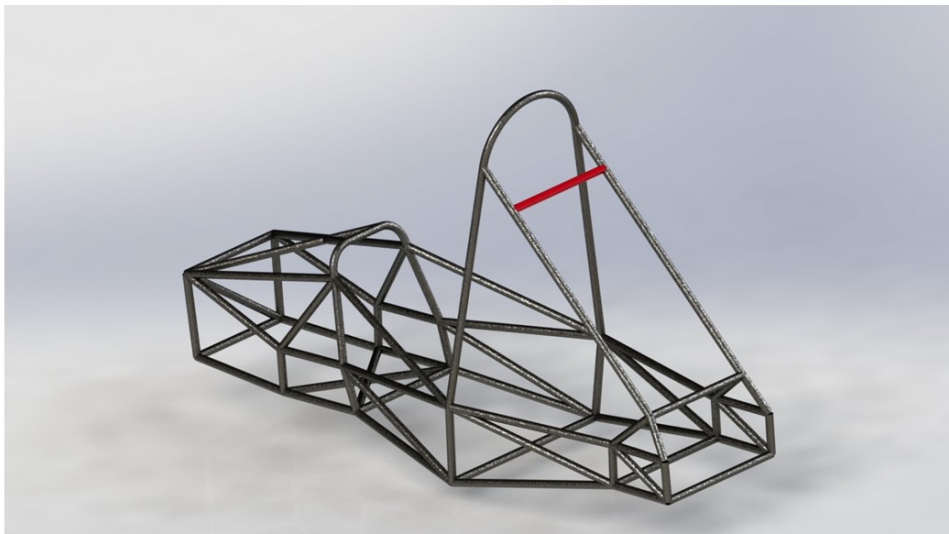


Fonte: Gillespie (1996, p.8)

5.5 Modelo CAD do chassi e subframe

Levando em consideração os resultados dos trabalhos que serviram como referência, foram propostas algumas modificações no chassi original. Desta forma, três simulações foram realizadas. A primeira considerou o chassi original, onde o objetivo é obter a rigidez torcional atual do veículo. A figura 42 mostra o chassi original e em vermelho um tubo que será removido para a implementação das concepções de subframe.

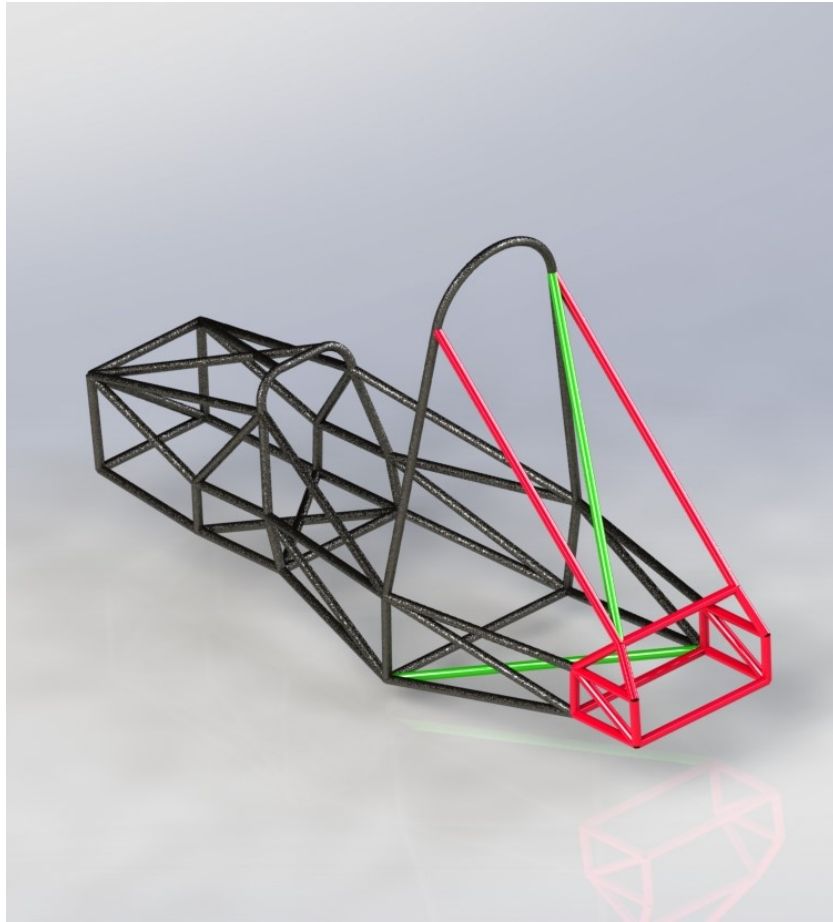
Figura 42 – Chassi original



Fonte: Elaborado pelo autor

Na segunda, será considerado umas das geometrias possíveis de subframe. O tubo mostrado na figura 42 foi retirado e dois tubos destacados em verde foram adicionados, um na parte inferior do local onde o motor é fixado. Outro tubo é adicionado entre os tubos bracing arms. Os tubos vermelhos em conjunto com os tubos verdes, formam o subframe. A geometria é mostrada na figura 43.

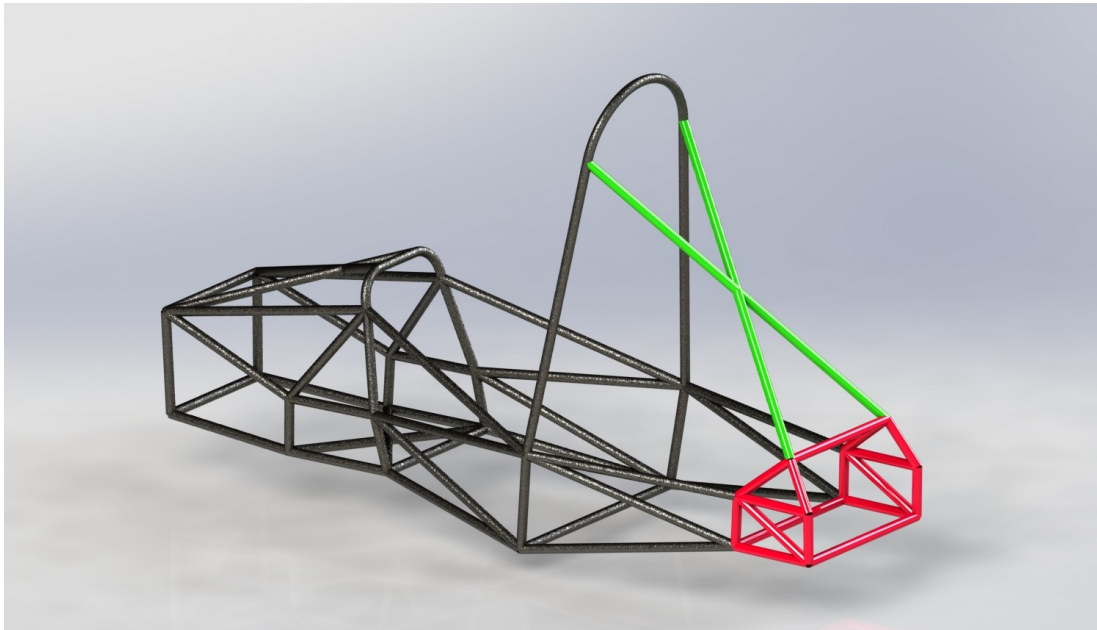
Figura 43 – Primeiro modelo de subframe



Fonte: Elaborado pelo autor

Na terceira, os tubos bracing arms são cruzados e nenhum outro tubo é adicionado. Novamente os tubos vermelhos e verdes, formam a geometria do subframe. A geometria é mostrada na imagem 44.

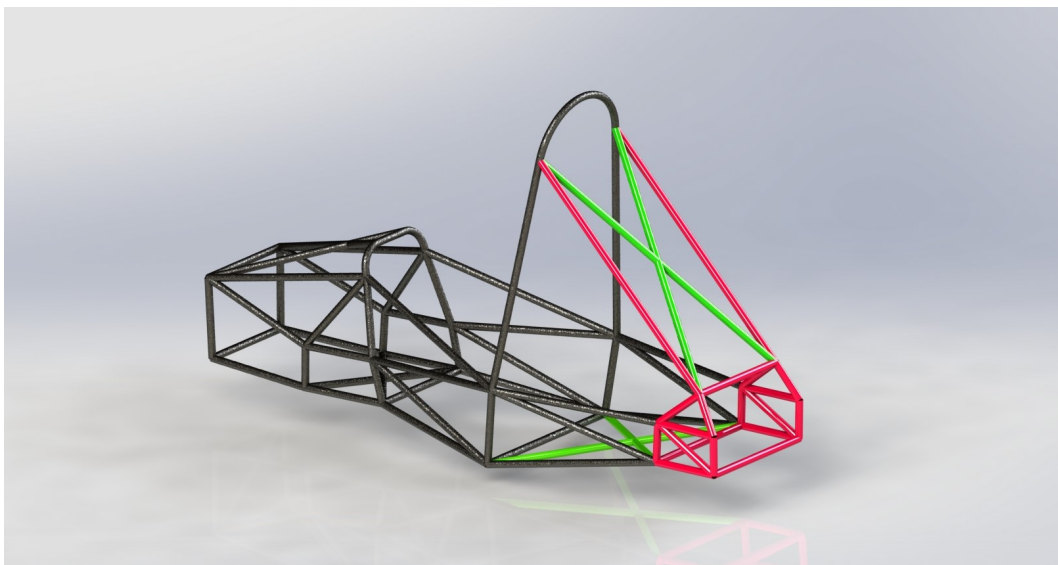
Figura 44 – Segundo modelo de subframe



Fonte: Elaborado pelo autor

A quarta simulação é uma situação extrema, onde dois tubos cruzados são adicionados entre os bracing arms e dois tubos cruzados são adicionados na parte inferior. É esperado que esta geometria retorne o maior valor de rigidez torcional.

Figura 45 – Terceiro modelo de subframe



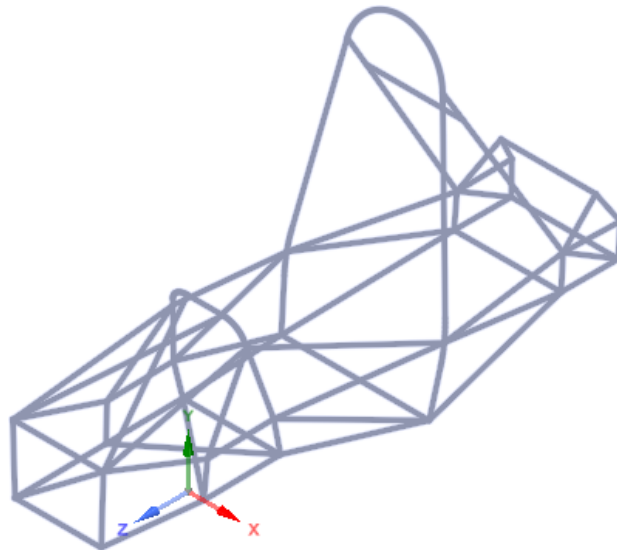
Fonte: Elaborado pelo autor

5.5.1 Tratamento da geometria

A geometria inicial foi obtida em parceria com a equipe que forneceu o arquivo em Solidworks do seu chassi. Para que a simulação seja realizada utilizando elementos de viga, precisamos realizar um tratamento do arquivo. Este é exportado em formato

parasolid para que seja importado no programa SpaceClaim. O perfil dos tubos é extraído e apenas suas linhas e pontos permanecem visíveis representando a geometria do chassi, como mostra a figura 46.

Figura 46 – Linhas e pontos que representam o chassi



Fonte: Elaborado pelo autor

5.6 Definição das condições de contorno

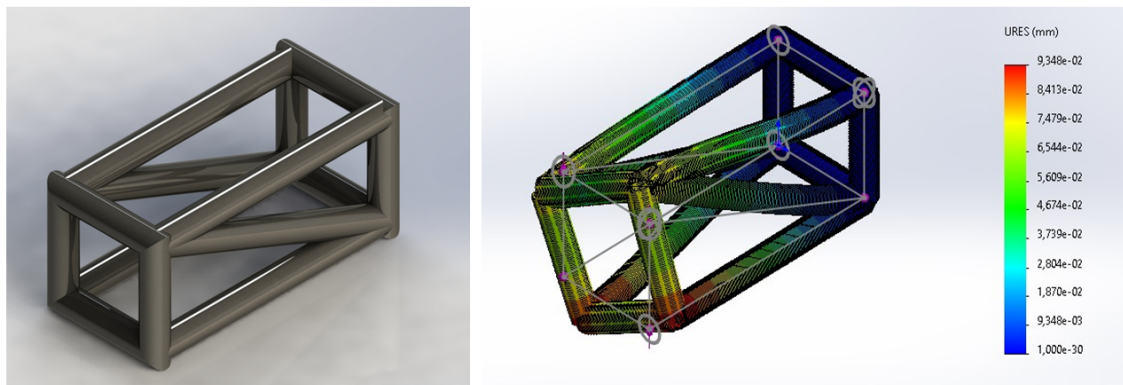
Podemos então definir as condições de contorno. Como o objetivo é efetuar uma comparação entre chassis, todas as simulações envolvendo diferentes geometrias devem adotar as mesmas simplificações e condições de contorno. Serão adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Será considerado apenas a região elástica de deformação do material
- O material é considerado isotrópico e livres de trincas
- As soldas são consideradas perfeitas
- As cargas serão aplicadas onde as orelhas de suspensão são fixadas, na parte dianteira do chassi
- O ponto onde as orelhas fixam a suspensão traseira, serão adotados como pinos fixos
- O efeito da suspensão será desconsiderado
- As luvas parafusadas serão desconsideradas

As luvas serão desconsideradas porque estamos aumentando a área de seção transversal do tubo, desta forma é esperado que haja um enrijecimento

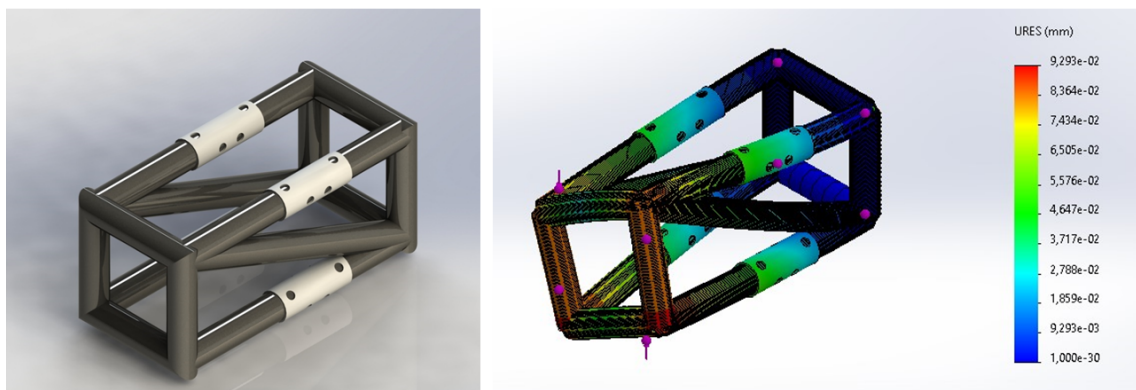
do tubo e desconsiderando a adição da luva, estamos considerando o pior caso. Uma simulação foi realizada utilizando uma geometria simplificada, utilizando o SolidWorks para avaliar esta hipótese. Os resultados são mostrados nas figuras 47 e 48. As condições de contorno são as mesmas aplicadas nas simulações do chassi.

Figura 47 – Modelo simplificado para avaliação da hipótese simplificadora



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 48 – Modelo simplificado com luvas para avaliação da hipótese simplificadora



Fonte: Elaborado pelo autor

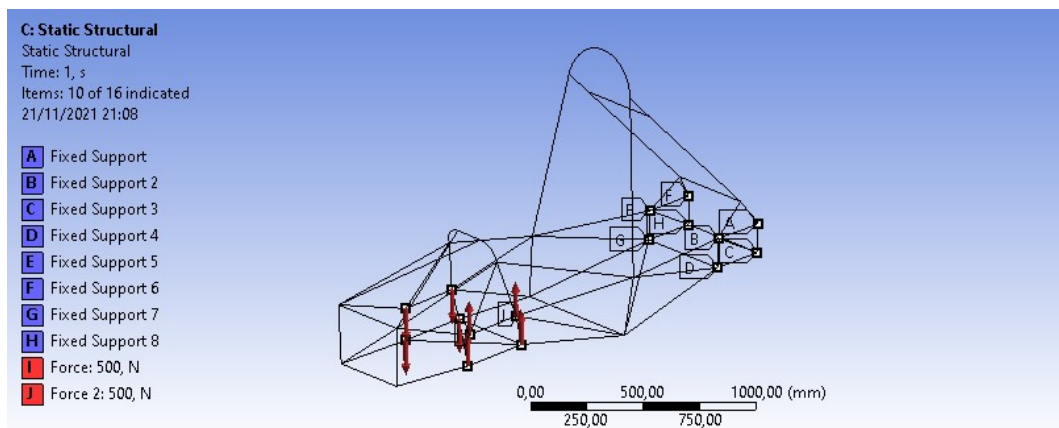
O resultado mostra que utilizando as luvas a deformação teve uma redução de 1,15%, mostrando que é razoável assumir esta hipótese simplificadora.

Considerando que a parte que a deformação angular do sistema tem relação linear com o torque aplicado, podemos adotar qualquer valor de torque para o cálculo da rigidez torcional.(BURBA, 2015)

Desta forma, foi assumido 500N em cada ponto de aplicação, totalizando 2kN aplicados.

A figura 49 ilustra a aplicação das forças na parte dianteira e o travamento do pontos na parte traseira.

Figura 49 – Condições de contorno aplicadas no Ansys



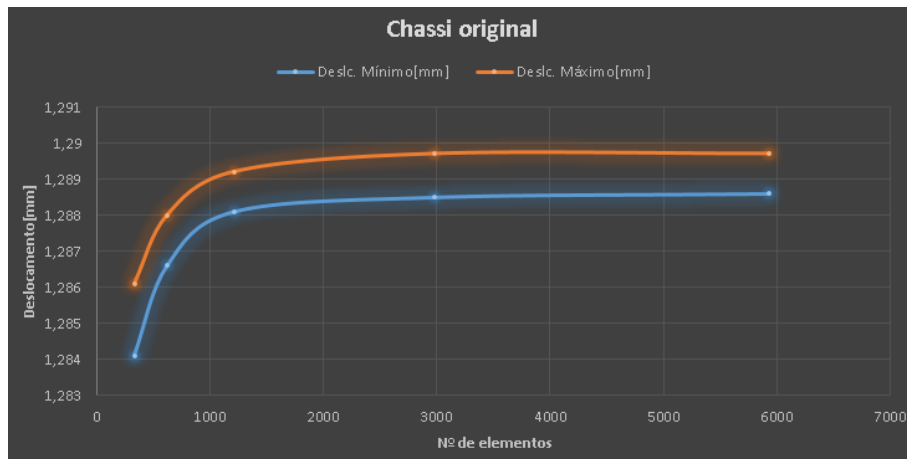
Fonte: Elaborado pelo autor

5.7 Análise de convergência de malha

A malha gerada pode ter grande influência no resultado de uma simulação por elementos finitos. Desta forma, uma análise é necessária para garantir que o resultado não depende da malha gerada. O procedimento é efetuado refinando a malha e observando a variação do resultado final, a tendência é que o resultado tenha uma convergência para um determinado valor.

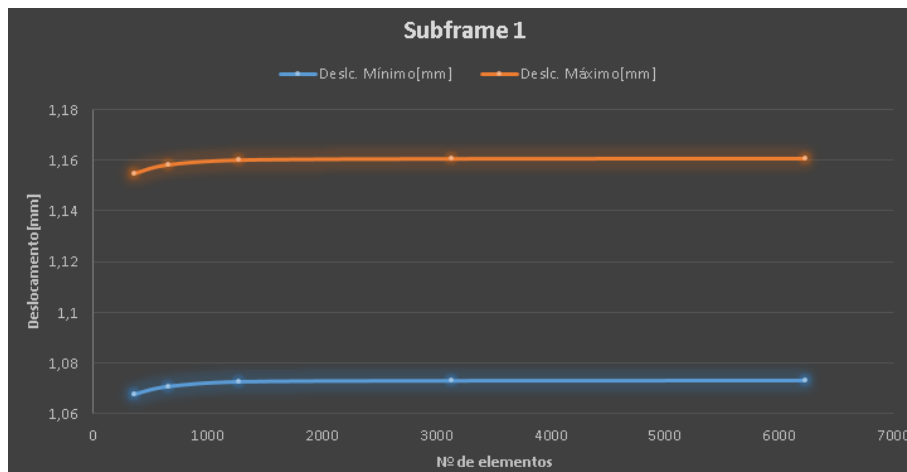
Como foi discutido no capítulo 2, uma análise de convergência de malha é necessária para garantir a independência da malha no resultado. Desta forma, foi a análise foi realizada para as 4 simulações e os resultados são mostrados nas figuras 50,51,52 e 53.

Figura 50 – Análise de convergência de malha do chassi original



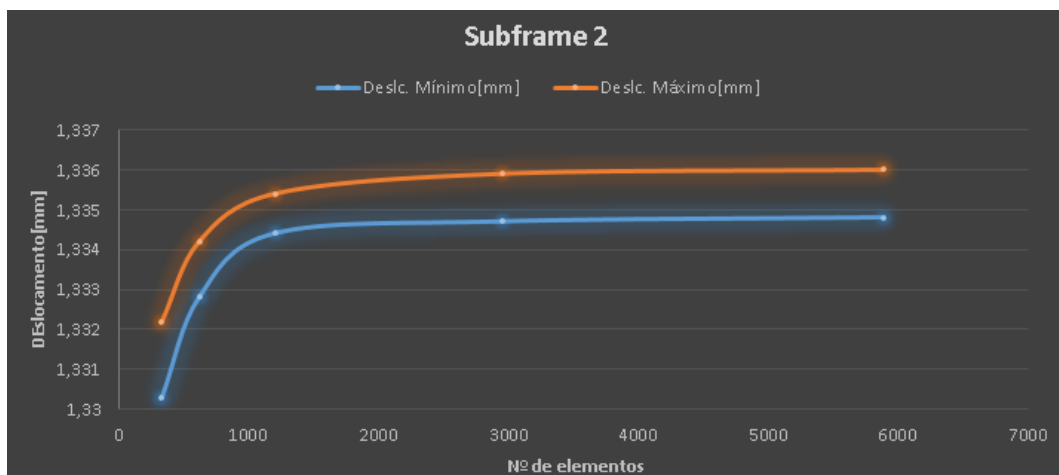
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 51 – Análise de convergência de malha do primeiro subframe



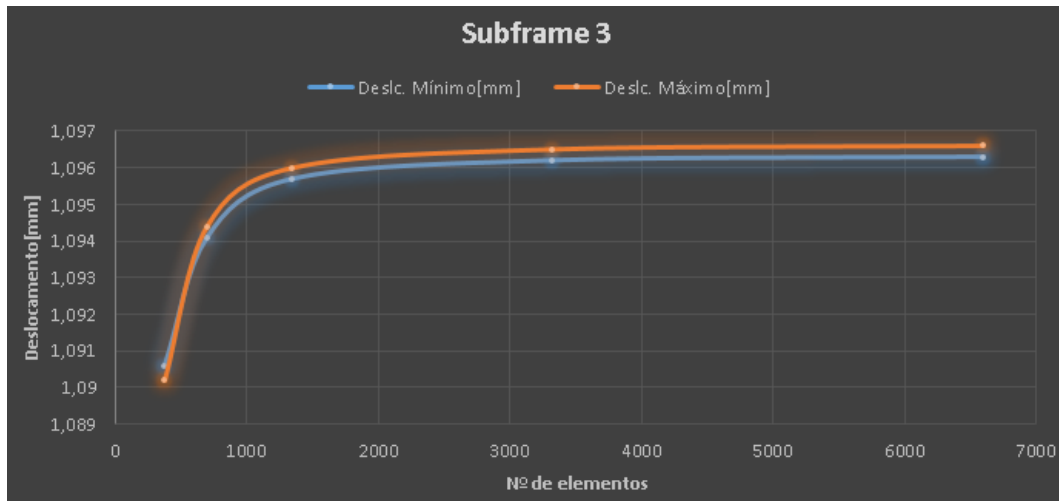
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 52 – Análise de convergência de malha do segundo subframe



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 53 – Análise de convergência de malha do terceiro subframe



Fonte: Elaborado pelo autor

5.8 Cálculo da rigidez torcional

Após a análise de convergência de malha, podemos adotar o resultado obtido pela simulação para o cálculo da rigidez torcional, que foi discutido na seção 3.3.2.

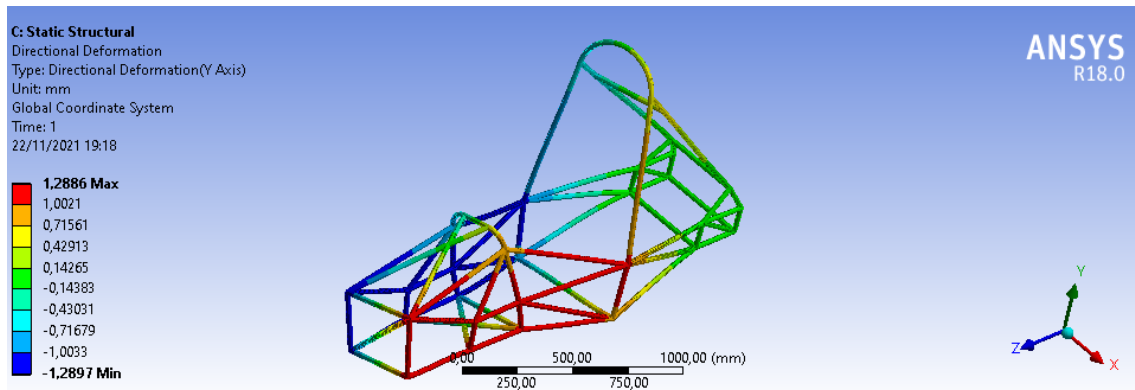
Neste trabalho, foi adotada a situação onde duas forças são aplicadas nos pontos da suspensão dianteira. Estas forças tem a mesma magnitude e direção mas os sentidos são opostos como foi mostrado na imagem 49. Para o cálculo da rigidez torcional, utilizamos a equação 3.

A distância L é a distância entre o plano central do chassi e o ponto da suspensão, neste caso $L = 210mm$. Os deslocamentos Δ_1 e Δ_2 , são os deslocamentos máximos dos nós onde as cargas foram aplicadas.

5.8.1 Chassi Original

Simulando o chassi original, foi obtido um valor de deslocamento direcional de 1,28 mm e 1,28 mm, ilustrado pela figura 42.

Figura 54 – Resultado da simulação no chassi original



Fonte: Elaborado pelo autor

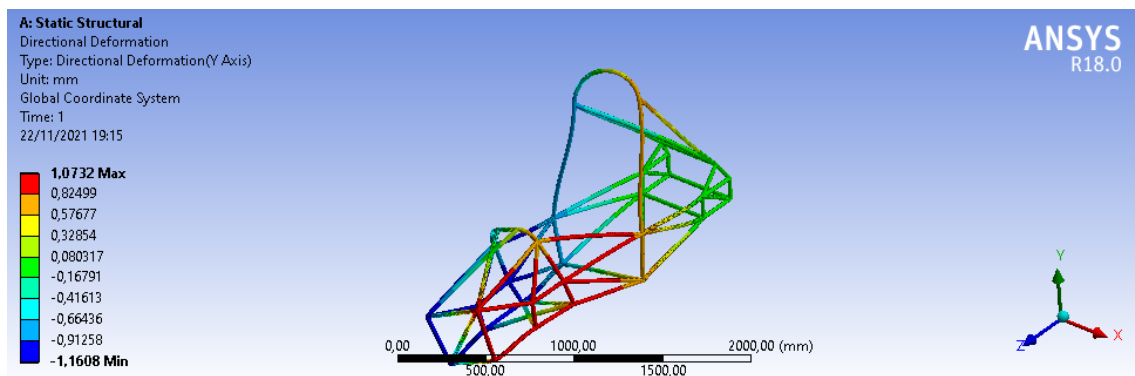
É possível então realizar o cálculo da rigidez torcional, substituindo o valores conforme é mostrado na equação 1.

$$K = \frac{2000 \cdot 210 \cdot 10^{-3}}{\tan^{-1} \left[\frac{1,2886 + 1,2897}{2 \cdot 210} \right]} = 2388,4 \frac{N \cdot m}{\circ} \quad (1)$$

5.8.2 Subframe 1

Obtemos um deslocamento nodal de 1,07 mm e 1,16 mm, mostrado na figura 55 para esta geometria.

Figura 55 – Resultado da simulação no chassi com a primeira geometria de subframe



Fonte: Elaborado pelo autor

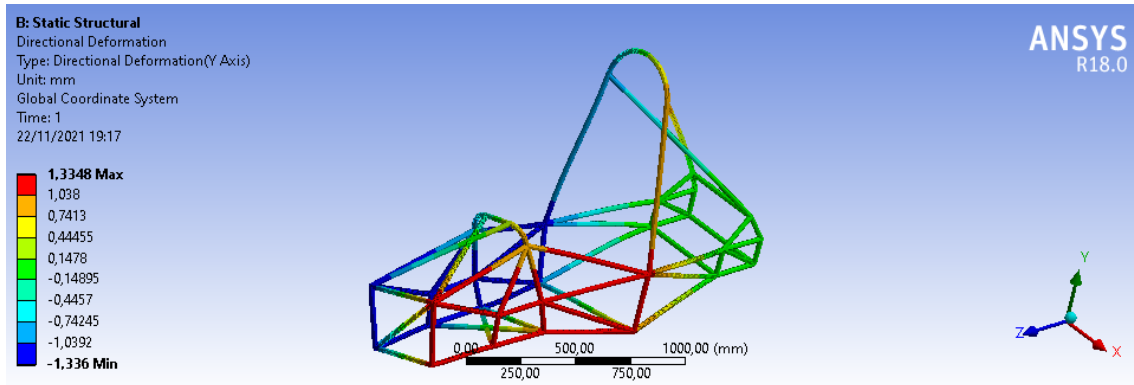
Podemos então realizar o cálculo de rigidez torcional que é mostrado na equação 2.

$$K = \frac{2000 \cdot 210 \cdot 10^{-3}}{\tan^{-1} \left[\frac{1,0732 + 1,1608}{2 \cdot 210} \right]} = 2756,80 \frac{N \cdot m}{\circ} \quad (2)$$

5.8.3 Subframe 2

Como é mostrado na figura 56, os deslocamentos para esta geometria foram de 1,33 mm e 1,33 mm, o cálculo de rigidez é mostrado na equação 3.

Figura 56 – Resultado da simulação no chassi com a segunda geometria de subframe



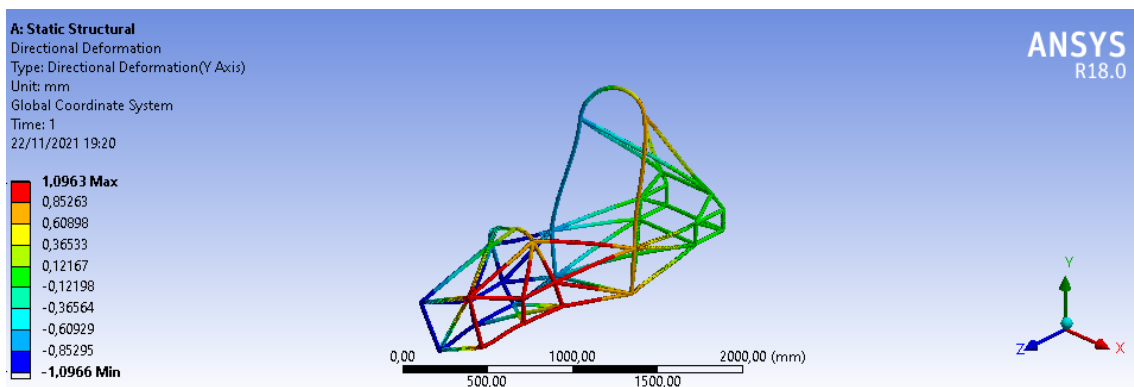
Fonte: Elaborado pelo autor

$$K = \frac{2000 \cdot 210 \cdot 10^{-3}}{\tan^{-1} \left[\frac{1,3348 + 1,13360}{2 \cdot 210} \right]} = 2305,80 \frac{N \cdot m}{\circ} \quad (3)$$

5.8.4 Subframe 3

Os deslocamentos para a terceira configuração de subframe são mostrados na figura 57 e foram de 1,09 mm e 1,09 mm.

Figura 57 – Resultado da simulação no chassi com a terceira geometria de subframe



Fonte: Elaborado pelo autor

O cálculo de rigidez torcional é mostrado na equação 4.

$$K = \frac{2000 \cdot 210 \cdot 10^{-3}}{\tan^{-1} \left[\frac{1,0963 + 1,0966}{2 \cdot 210} \right]} = 2877,56 \frac{N \cdot m}{\circ} \quad (4)$$

5.9 Estimativa da massa do chassi

A estimativa de massa dos diferentes chassis será feita no programa SolidWorks. A massa adicionada pelo processo de solda foi desconsiderada e as propriedades do aço Dual Phase foram adicionadas no programa para o cálculo.

A massa dos parafusos da junta foi medida experimentalmente, este valor será multiplicado pela quantidade de itens utilizados.

Figura 58 – Estimativa de massas das diferentes configurações de chassi

	Massa dos tubos[kg]	Massa da luvas e parafusos[kg]	Total
Chassi original	25,55	0	25,55
Subframe 1	26,82	2,4	29,22
Subframe 2	25,34	1,92	27,26
Subframe 3	28,44	2,88	31,32

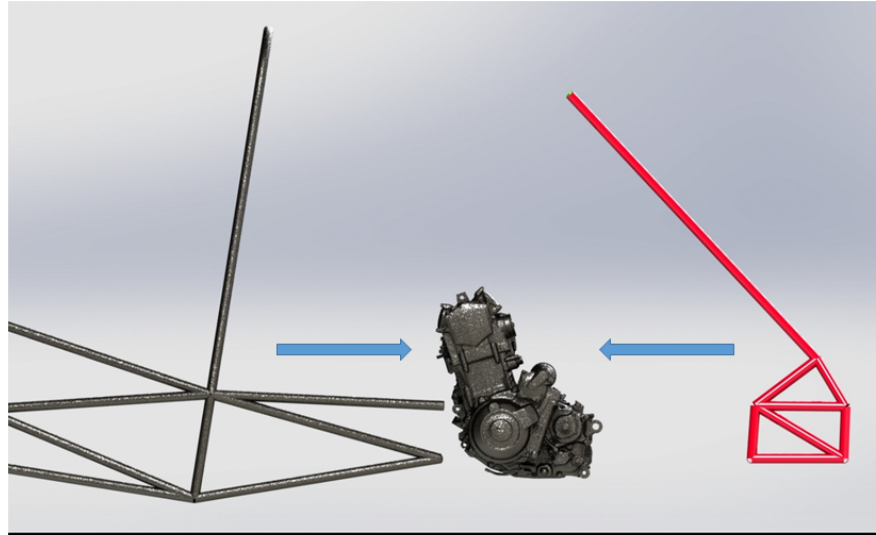
Fonte: Elaborado pelo autor

5.10 Análise da montagem do motor

Considerando o subframe 1, que foi aquele com a melhor relação rigidez por massa, podemos fazer uma análise de como seria montagem do motor.

O estudo foi feito utilizando o recurso de montagem do SolidWorks, o subframe é mostrado desmontado do chassi e o motor poderia ser colocado ao longo do eixo y do carro. A imagem 59 mostra como a montagem do motor pode ocorrer, com a implementação do subframe, será possível apoiar o motor e montar o chassi e o subframe conforme as setas indicam. Desta forma, é esperado que a montagem se torne mais fácil porque a massa do chassi e do subframe é menor que a massa do motor, isto facilitará o manuseio dos componentes pelos membros da equipe.

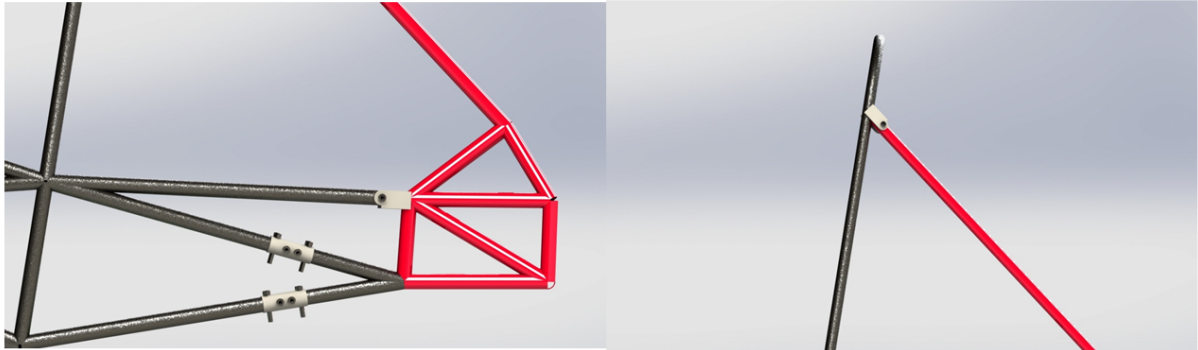
Figura 59 – Proposta de montagem do motor, o chassi e o subframe são montados conforme indicação das setas



Fonte: Elaborado pelo autor

A fixação do modelo de subframe 1 é mostrada na figura 60, O subframe é representado em vermelho e as conexões em branco. A imagem na esquerda mostra como será a conexão na parte inferior e a direita na parte superior. as conexões são espelhadas no outro lado do chassi.

Figura 60 – Conexão entre chassi e subframe



Fonte: Elaborado pelo autor

Outro ponto importante é que o subframe terá os sistemas da transmissão e suspensão acoplados. Desta forma será possível que os membros do setor do motor à combustão trabalhem em um local e os membros da suspensão e transmissão trabalhem ao mesmo tempo em outro local. Isto facilitará o acesso a diversos componentes do carro, contribuindo para aumentar a facilidade e a velocidade da manutenção do veículo.

5.11 Discussão dos resultados

Com os valores calculados, é possível realizar alguns comparativos para analisar qual é a melhor configuração. A imagem 61 mostra os valores de rigidez torcional e de massa para cada chassi. Também é mostrado o valor de rigidez específica, para que possamos avaliar qual o impacto na rigidez com o aumento do número de tubos, conseqüentemente de massa.

Figura 61 – Rigidez torcional específica

	Rigidez torcional[N.m/°]	Massa [kg]	Rigidez torcional específica[N.m/°/kg]
Chassi original	2388,4	25,55	93,48
Subframe 1	2756,81	29,22	94,35
Subframe 2	2305,8	27,26	84,59
Subframe 3	2877	31,32	91,86

Fonte: Elaborado pelo autor

As configurações de subframe 2 e 3 têm uma rigidez específica pior que o chassi original.

No caso do subframe 2, há uma diminuição da rigidez torcional. Este resultado era esperado porque um tubo foi retirado e apenas a geometria dos bracing arms foi modificada. Neste caso, a alteração da geometria não foi eficaz, diminui a rigidez e aumentou a massa devido à colocação das luvas.

O subframe 3, apresenta a maior rigidez torcional. Este comportamento foi mencionado na literatura e já era esperado, a rigidez torcional tende a aumentar conforme aumentamos a quantidade de tubos, entretanto a massa também aumenta.

No subframe, 1 tanto o incremento de rigidez torcional quanto o de massa foram medianos, comparando com as configurações apresentadas, entretanto foi aquele que obteve a melhor rigidez específica.

Podemos comparar também o incremento percentual em relação a massa original do chassi e a massa total do carro. Será considerado a última medição de massa realizada no veículo, que foi na competição em 2019 e o valor é de 273kg. A comparação entre o incremento percentual de rigidez torcional em relação ao chassi original também será realizada.

Figura 62 – Incremento de massa percentual

	Incremento de massa[kg]	% em relação ao chassi	% em relação ao carro
Subframe 1	3,72	15%	1%
Subframe 2	1,76	7%	1%
Subframe 3	5,82	23%	2%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 63 – Incremento de rigidez torcional percentual

	Incremento de rigidez [N.m/°]	% em relação ao chassi original
Subframe 1	368,41	15%
Subframe 2	-82,6	-3%
Subframe 3	488,6	20%

Fonte: Elaborado pelo autor

Pelas figuras 62 e 63, vemos que os incrementos de massa e rigidez não são lineares em todos os casos, logo a conclusão é de que a posição dos tubos na geometria tem influência. O melhor resultado foi obtido adicionando apenas um tubo cruzado em uma das direções onde havia uma grande espaço sem triangulação.

A adição de um segundo tubo fazendo um cruzamento em X neste espaço não se mostrou muito eficiente, o incremento percentual de massa foi maior que o de rigidez.

A situação onde um tubo foi retirado e houve alteração na geometria de outros dois tubos, também não foi eficiente. Além de haver um incremento de massa, houve

um decréscimo na rigidez. Este resultado também mostra que a importância da posição dos tubos na geometria.

Comparando o resultado obtido com os resultados da literatura fica claro que o método de avaliação tem muita influência no resultado final. O trabalho de Bauler (2021), obteve valores em torno de $600 \frac{N \cdot m}{\circ}$, enquanto este trabalho obteve valores acima dos $2000 \frac{N \cdot m}{\circ}$. A principal diferença é a consideração do sistema de suspensão na análise, além deste modelo não promover o enrijecimento dos chassi de forma irreal, o ponto de maior deslocamento será onde está localizada a manga de eixo, desta forma o deslocamento máximo será maior mesmo que o ângulo de torção seja igual.

Entretanto, podemos comparar os resultados com os trabalhos de Burba (2015) e Azevedo (2020) que utilizaram a mesma metodologia de avaliação deste trabalho. Nestes casos, os valores ficaram entre $1500 \frac{N \cdot m}{\circ}$ e $3000 \frac{N \cdot m}{\circ}$. Devemos então ter cuidado ao comparar valores quando métodos estes são obtidos por métodos diferentes, também é necessária a validação destes valores experimentalmente.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo sobre a implementação de um subframe ao chassi da equipe Fórmula CEM.

Através da utilização da metodologia PRODIP foi possível a identificação das necessidades do cliente, no caso a equipe, e a tradução das mesmas em requisitos de projeto. Com o auxílio do diagrama de Mudge e da matriz de Pugh, foi possível identificar quais as necessidades mais importantes.

A geometria e tipo de fixação do subframe foi decidida após uma análise crítica do resultado de uma pesquisa e do regulamento. Com base no modelo analisado, algumas variações da geometria foram propostas e posteriormente simuladas utilizando o método dos elementos finitos. Foi escolhida uma metodologia de cálculo de rigidez torcional, que se mostrou eficaz retornando resultados que estão dentro de faixas obtidas em outros trabalhos semelhantes.

Com estes resultados, foi possível realizar uma comparação entre o chassi atual da equipe e as diferentes geometrias de subframe propostas

Conclui-se que há ganho de rigidez torcional quando implementamos um subframe à um chassi de Fórmula SAE, entretanto este ganho depende da disposição dos tubos tanto do chassi, quanto do subframe. Em todas as situações, haverá um incremento de massa quando comparado ao chassi sem o subframe, entretanto este acréscimo não é muito significativo quando comparamos percentualmente com a massa total do veículo. Desta forma, a implementação do subframe surge como uma alternativa para aumentar a rigidez e, conseqüentemente, o desempenho do veículo.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros são listadas abaixo:

- Incluir o sistema de suspensão na análise do chassi com subframe
- Desenvolver o suporte para o motor
- Avaliar qual a diferença entre uma união de tubos soldada e outra parafusada por meio da simulação apresentada no tópico 5.5.1.
- Realizar o projeto detalhado e validar o subframe experimentalmente

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, G. V. de. **ANÁLISE DE RIGIDEZ TORCIONAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI TUBULAR MODELO BAJA SAE.** Monografia (TCC) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.
- BACK, N. et al. **Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e moldagem.** 1. ed. Barueri: Manole, 2008.
- BAULER, O. J. **PROJETO DE BANCADA PARA AVALIAÇÃO DE RIGIDEZ TORCIONAL PARA VEICULOS FORMULA SAE.** Monografia (TCC) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.
- BUDYNAS, R. **Elementos de Máquinas de Shigley.** Porto Alegre: AMGH, 2011.
- BURBA, L. T. **ANÁLISE DA RIGIDEZ TORCIONAL DO CHASSI DE UM VEÍCULO FÓRMULA SAE.** Monografia (TCC) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- CANE, R. I. **PROJETO INFORMACIONAL E CONCEITUAL PARA A ELETRIFICAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UM VEÍCULO DE PASSEIO.** Monografia (TCC) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.
- CARBIKETECH. **Chassis.** 2019. Disponível em: <<https://carbiketech.com/chassis/>>. Acesso em: 01/10/2021.
- CARNEVALLI, J. A.; SASSI, A. C.; MIGUEL, P. A. C. Aplicação do qfd no desenvolvimento de produtos: levantamento sobre seu uso e perspectivas para pesquisas futuras. **Scielo**, Scielo, v. 11, n. 1, 2004.
- CHIGNOLA, S. et al. **ON THE DESIGN OF A LOW-COST RACING CAR CHASSIS.** Dubrovnik: [s.n.], 2002.
- COSTIN, M.; PHIPPS, D. **Racing and Sports Car Chassi Design.** 1. ed. London: B.T. Bastford LTD, 1961.
- FILHO, A. A. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE.** 1. ed. São Paulo: Érica, 2000.
- FLORIANI, B. L.; DIAS, A.; ROCHA, C. R. Aspectos metodológicos no projeto informacional e conceitual de um veículo remotamente operado subaquático. **Conference: VI Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia**, 2011.
- GENTA, G.; MORELLO, L. **The automotive Chassis - Volume 1 : Components design.** 1. ed. Torino, Italy: Springer, 2009.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics.** Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc, 1996.

KRZIKALLA, D. et al. Analysis of torsional stiffness of the frame of a formula student vehicle. **Journal of Applied Mechanical Engineering**, 2015.

MCCUNE, M. et al. Formula sae interchangeable independent rear suspension design. **FSAE Final Report**, 2009.

PUGH, S. **Total Design**. 1. ed. London: Prentice Hall, 1991.

REIS Ângelo Vieira dos; ANDRAD, L. F. S.; FORCELLINI, F. A. SistematizaÇÃo da tarefa de valoraÇÃo dos requisitos dos clientes para uso no qfd. **II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2002.

RILEY, W. B.; GEORGE, A. R. Design, analysis and testing of a formula sae car chassis. **SAE International**, 2002.

ROMANO, L. N. **MODELO DE REFERÊNCIA PARA O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SAE. **Formula SAE Brasil**. 2019. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil>>. Acesso em: 24/09/2019.

SAE. **Formula SAE Rules 2021**. 2021. Disponível em: <<https://www.fsaeonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=51cf7622-651e-4b57-8c9c-e0391bc08edc>>. Acesso em: 20/09/2021.

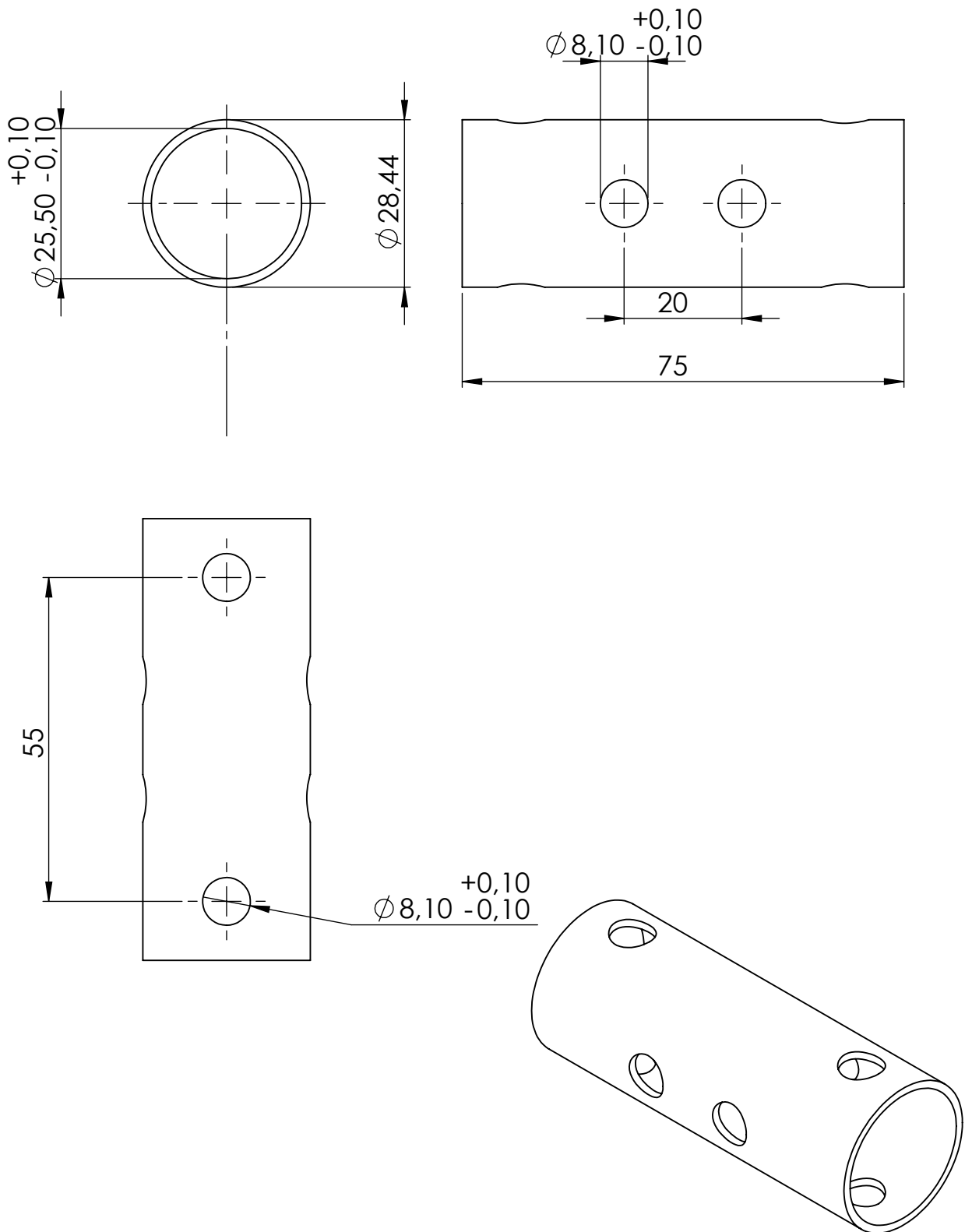
SAMPO, E.; SORNIOTTI, A.; CROCOMBE, A. Chassis torsional stiffness: Analysis of the influence on vehicle dynamics. **SAE International**, 2010.

SEWARD, D. **Race Car Design**. New York: Palgrave, 2014.

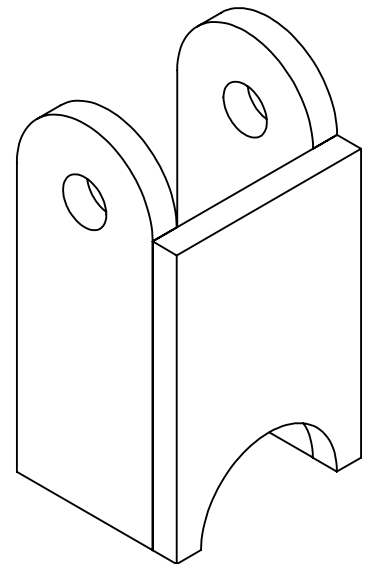
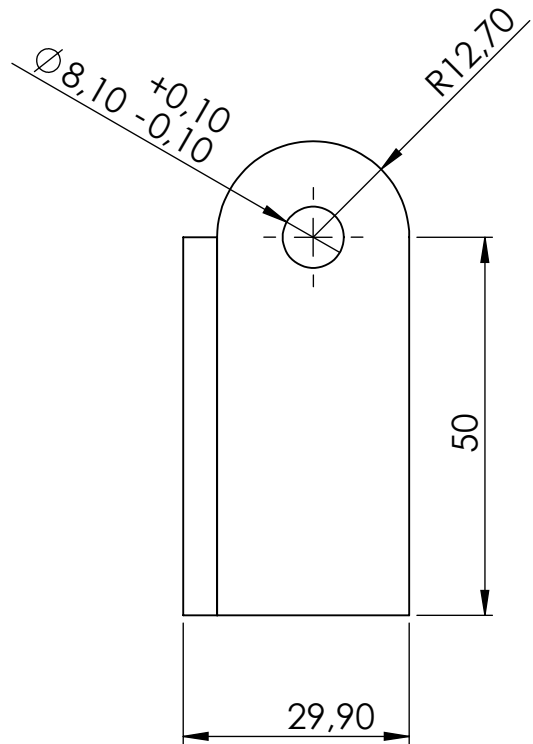
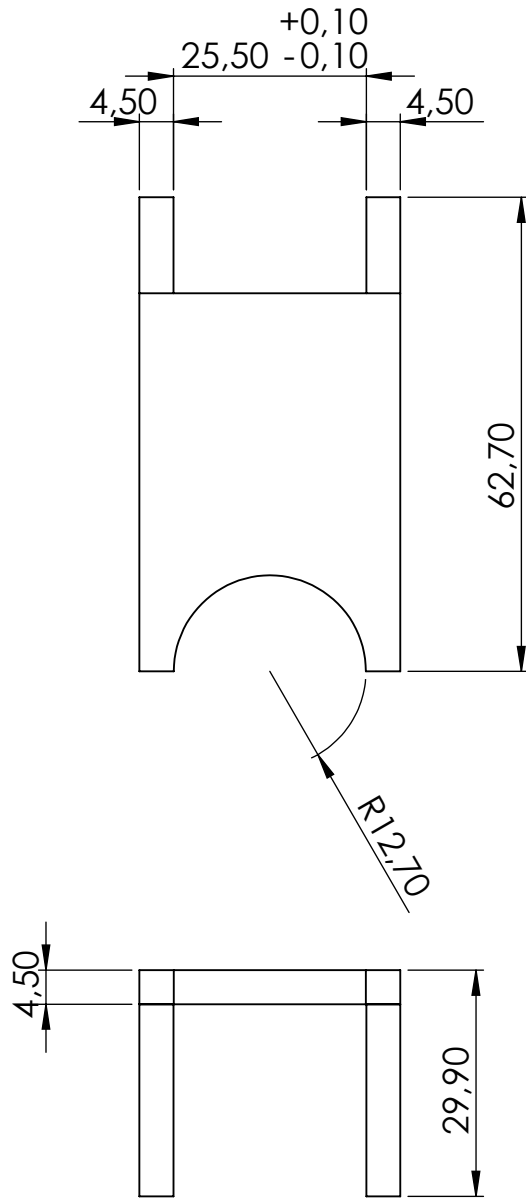
STORTO, F. H. G. **PROJETO DE MONOCOQUE PARA VEÍCULO FORMULA SAE UTILIZANDO MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA**. Monografia (TCC) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

UC SAN DIEGO. **SAE Race Car Rear Sub-Frame**. 2011. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/eng.ucsd.edu/156b-2013-spring-team7/?tmpl=\%2Fsystem\%2Fapp\%2Ftemplates\%2Fprint\%2F&showPrintDialog=1>>. Acesso em: 15/10/2021.

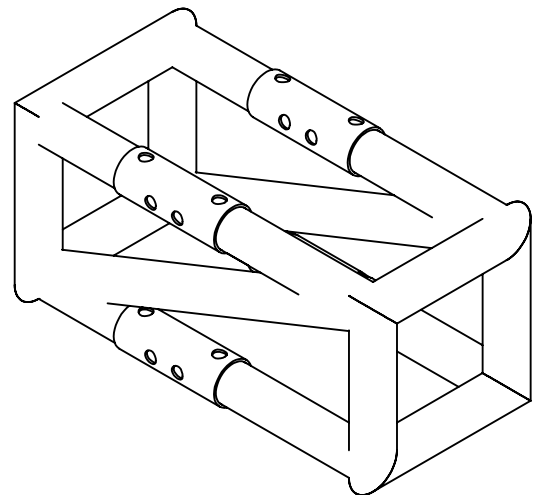
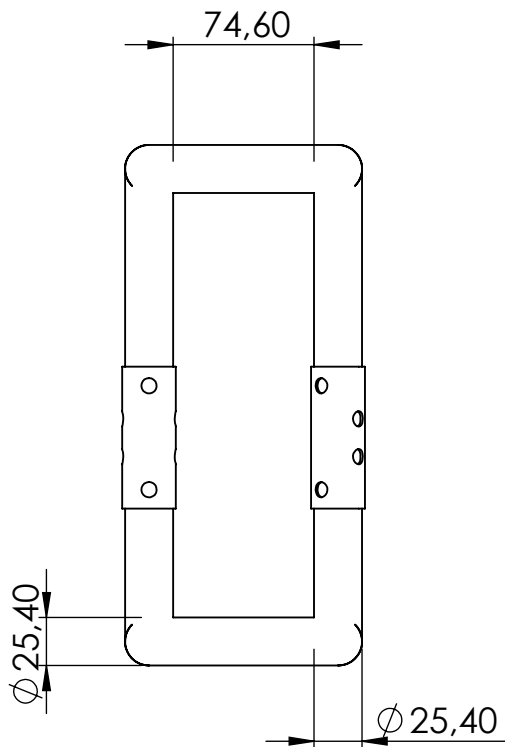
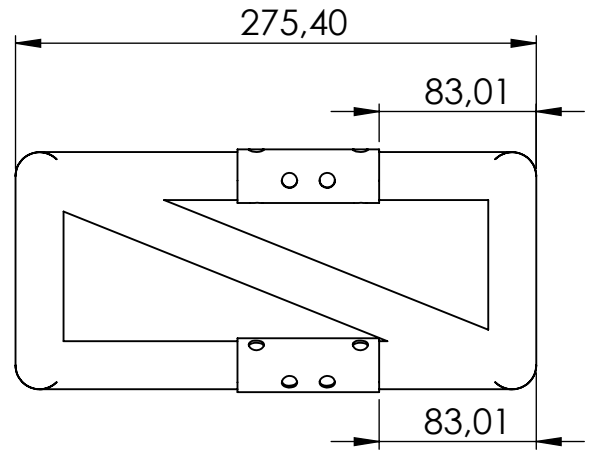
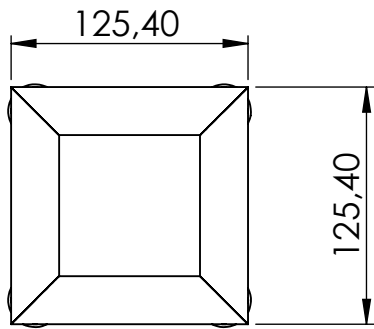
APÉNDICE A



Responsável: Gabriel Romanoski		Data: 30/11/2021
1	Luva -Subframe	
Quantidade	Denominação	
	Código: FR-0001	Escala: 1:1
	Material: DP-980	Formato: A4
	Processo: Corte a laser	



Responsável: Gabriel Romanoski		Data: 30/11/2021
1	Orelha - Subframe	
Quantidade	Denominação	
	Código: FR-0002	Escala: 1:1
	Material: DP-980	Formato: A4
	Processo: Corte a laser e solda	



Responsável: Gabriel Romanoski		Data: 30/11/2021
1	Teste - Tubos triângulados	
Quantidade	Denominação	
	Código: FR-0003	Escala: 1:5
	Material: DP-980	
	Processo: Corte a laser e solda	Formato: A4