

Instituto Federal De Educação Ciência e Tecnologia Do Piauí
Amaury Sousa Sá

Análise estrutural do chassi do protótipo “Velho monge” da equipe EcoOpala de
eficiência energética

TERESINA / 2018

AMAURY SOUSA SÁ

Análise estrutural do chassi do protótipo “Velho monge” da equipe EcoOpala de eficiência energética

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia (IFPI, Piauí) como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Helder Pontes Gomes

TERESINA / 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S474a Sá, Amaury Sousa
Análise estrutural do chassi do protótipo ?Velho monge? da equipe EcoOpala de eficiência energética / Amaury Sousa Sá - 2018.
86 p. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, Bacharelado em Engenharia Mecânica, 2018.

Orientador : Prof Dr. Helder Pontes Gomes.

1. Analise estrutural. 2. Chassi. 3. Método de elementos finitos. 4. Protótipo. 5. Convergência da malha. I.Título.

CDD 620

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus professores, amigos e familiares, pois todos contribuíram direto e indiretamente para que pudesse concluir este trabalho com sucesso.

Agradeço também em especial aos meus pais, Avelar e Katia, que me deram todo o apoio necessário para que pudesse está me graduando em Bacharelado em Engenharia Mecânica.

A Equipe EcoOpala que ajudei a fundar e que me fez crescer muito profissionalmente e como pessoa.

RESUMO

O presente trabalho visa à realização de um dimensionamento e análise estrutural de um chassi pertencente ao protótipo “Velho Monge”, da equipe EcoOpala, de eficiência energética, que participa da (Shell Eco-Marathon) SEM. O chassi de um automóvel é o principal componente de um veículo capaz de suportar todos os esforços dinâmicos e estáticos e, por isso, responsável pela segurança dos passageiros. O dimensionamento do chassi foi realizado com a utilização do *Software SolidEdge ST8*. A análise estrutural foi realizada com a utilização de dois métodos, o primeiro foi método de elementos finitos (MEF) através *Software SolidWorks*, para isso foi realizado um estudo de convergência da malha, para assim otimizar o tempo sem o comprometimento dos resultados logo após aplicados os esforços previstos no regulamento. O segundo método empregado foi o estudo experimental do chassi já construído pela equipe. Para isso, foram construídos suportes afim de garantir a fixação do chassi nos mesmos pontos que foram fixados no método de elementos finitos e, em seguida, aplicados os mesmos esforços, para assim encontrar as deformações realizar um comparativo entre os dois métodos. No final dos estudos foi observado que o chassi proposto não apresentava rigidez suficiente e por isso são propostas alterações na geometria para assim atender o regulamento Shell Eco-Marathon.

Palavras – chave: Análise estrutural. Chassi. Método de elementos finitos. Protótipo. Convergência da malha.

ABSTRACT

The present paper aims to design and proceed a structural analysis of a vehicle frame. The chassis is destined to the ultra-energy-efficient vehicle called “Velho Monge” of the EcoOpala Team, which participates of Shell Eco-marathon Brazil. The chassis is the main component of a vehicle, responsible to support every dynamic or static load, thus being responsible for the security of passengers. The software SolidEdge ST8 was used to design the chassis. The structural analysis was accomplished by two methods. The first is the finite element method that was accomplished through the software SolidWorks, where the grid convergence study was performed to reduce the analysis time with great final results. The second method was experimental analysis of the chassis. Performing the experiment, support brackets were built to fix the chassis in the same fixing points of the finite element analysis and the same loads were applied. Posteriorly, an analysis was made in order to compare the results of both methods. The final studies were concluded that the chassis do not showed the stiffness requirements of the project, thus were presented design changes as suggested.

Key - words: Structural analysis. Chassis. Finite element method. Prototype. Convergence of the mesh.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Shell Eco-Marathon Brasil.....	14
Figura 2. Exemplo chassi tipo escada.	16
Figura 3. Exemplo de chassi tipo spaceframe.....	17
Figura 4. Exemplo de chassi tipo monobloco	19
Figura 5. Exemplo de chassi tipo backbone.	20
Figura 6. Cubo de tensões.....	22
Figura 7. Equilíbrio de um elemento quadrado sujeito a tensões cisalhante.	23
Figura 8. Componentes cartesianos da deformação.....	25
Figura 9. Digrama tensão-deformação.	26
Figura 10. Diferentes tipos de elementos finitos.	30
Figura 11. Malha de elementos finitos.	31
Figura 12. a) graus de liberdade de um ponto; b) graus de liberdade de um corpo rígido. ...	31
Figura 13. Posição da barra de rolagem.	33
Figura 14. Posição da barra de rolagem.	33
Figura 15. Aplicação da força na barra de rolagem.....	34
Figura 16. Modelagem do chassi no SolidEdge ST8.....	35
Figura 17. Elemento de viga.....	36
Figura 18. Convergência de malha.	37
Figura 19. Pontos fixos e barra que receberá o carregamento.	39
Figura 20. Aplicação da carga vertical.....	40
Figura 21. Aplicação da carga horizontal.	Erro! Indicador não definido.
Figura 22. Aplicação da carga perpendicular.	40
Figura 23. Limite superior axial e curvatura, carga vertical.	41
Figura 24. Deslocamento estático máximo, carga vertical.	41
Figura 25. Limite superior axial e curvatura, carga horizontal.	42
Figura 26. Deslocamento estático máximo, carga horizontal.....	42
Figura 27. Limite superior axial e curvatura, carga perpendicular.....	43
Figura 28. Deslocamento estático máximo, carga perpendicular.....	43
Figura 29. Limite superior axial e curvatura, carga vertical.	44
Figura 30. Deslocamento estático máximo, carga vertical.	44
Figura 31. Limite superior axial e curvatura, carga horizontal.	45
Figura 32. Deslocamento estático máximo, carga horizontal.....	45
Figura 33. Limite superior axial e curvatura, carga perpendicular.....	46
Figura 34. Deslocamento estático máximo, carga perpendicular.....	46
Figura 35. Limite superior axial e curvatura, carga vertical.	47
Figura 36. Deslocamento estático máximo, carga vertical.	47
Figura 37. Limite superior axial e curvatura, carga horizontal.	48
Figura 38. Deslocamento estático máximo, carga horizontal.....	48
Figura 39. Limite superior axial e curvatura, carga perpendicular.....	49
Figura 40. Deslocamento estático máximo, carga perpendicular.....	49
Figura 41. Limite superior axial e curvatura, carga vertical.	50

Figura 42. Deslocamento estático máximo, carga vertical.	50
Figura 43. Limite superior axial e curvatura, carga horizontal.	51
Figura 44. Deslocamento estático máximo, carga horizontal.....	51
Figura 45. Limite superior axial e curvatura, carga perpendicular.....	52
Figura 46. Deslocamento estático máximo, carga perpendicular.....	52
Figura 47. Suporte dianteiro vista isométrica.....	54
Figura 48. Suporte traseiro vista isométrica.....	55
Figura 49. Exemplo de parabolts.	55
Figura 50. Alteração no projeto inicial.	56
Figura 51. Suporte para aplicação da carga horizontal.....	57
Figura 52. Suporte para aplicação da carga perpendicular.....	57
Figura 53. Pontos de fixação dianteiro do chassi.....	58
Figura 54. Pontos de fixação dianteiro do chassi.....	58
Figura 55. Exemplo de aplicação de carga.	59
Figura 56. Relógio comparador.....	59
Figura 57. Relógio comparador antes da aplicação da carga vertical.	60
Figura 58. Aplicação da carga vertical.	60
Figura 59. Relógio comparador após a aplicação da carga vertical.	61
Figura 60. Relógio comparador antes da aplicação da carga horizontal.	61
Figura 61. Aplicação da carga horizontal.	62
Figura 62. Relógio comparador após a aplicação da carga horizontal.....	62
Figura 63. Relógio comparador antes da aplicação da carga perpendicular.....	63
Figura 64. Relógio comparador após a aplicação da carga perpendicular.....	63
Figura 65. Suporte danificado.	64
Figura 66. Distancias para cálculo de rotação.....	65
Figura 67. Geometrias antes e após a rotação.	66
Figura 68. Máquina universal de ensaios, SHIMADZU, modelo Autograph AG-X 300kN.	67
Figura 69. Corpo de prova analisado.....	68
Figura 70. Gráfico de deslocamento.	68
Figura 71. Corpo de prova no SolidWorks.	69
Figura 72. Corpo de prova no SolidWorks após a análise.	70
Figura 73. Proposta de chassi.....	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Tipos de perfis.....	35
Quadro 2. Estudo da convergência das malhas.....	37
Quadro 3. Propriedades do alumínio ASTM 6061 T6.	38
Quadro 4. Carregamentos aplicados no arco de proteção.....	39
Quadro 5. Resumo dos resultados.....	53
Quadro 6. Deformações reais.	64
Quadro 7. Valores encontrados para o deslocamento.....	67
Quadro 8. Resumo dos deslocamentos.	70
Quadro 9. Resultados da simulação com o chassi proposto.	72
Quadro 10. Valor da barra de cada perfil.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Lepac - Laboratório Francês de Estudos Prospectivos e Cartográficos

SEM – Shell Eco-Marathon

EDO - Equações Diferenciais Ordinárias

EDP - Equações Diferenciais Parciais

MEF - Método de Elementos Finitos

CAD - Computer Aided Design

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ - Somatório

Δ - Delta

σ – Tensão normal

τ - Tensão de cisalhamento

l - Comprimento

ϵ - Deformação normal

S – Comprimento

θ – Ângulo

γ - Deformação por cisalhamento

E - Módulo de elasticidade longitudinal

C - Coeficientes elásticos

ν - Coeficiente de Poisson

G - Modulo de elasticidade transversal

U_d - Energia de distorção

σ_{VM} - Tensão de von Mises

N - Newton

Cm – Centímetro

Kg – Quilograma

Mm – Milímetro

Mpa – Megapascal

s - Segundo

m – Metro

Q – Carregamento

GHz – Gigahertz

GB – Gigabyte

% - Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.1.1	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1	CHASSI	16
2.1.2	Chassi Spaceframe	17
2.1.3	Chassi monobloco	18
2.1.4	Chassi backbone	20
2.2	RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	21
2.2.1	Princípio da resistência dos materiais	21
2.2.2	Tensões	22
2.2.3	Deformação	24
2.2.4	Lei de Hooke	25
2.3	TEORIA DE FALHAS	27
2.3.1	Teoria da energia de distorção (von Mises)	28
2.4	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS	29
2.4.1	Método de elementos finitos	30
2.5	SOFTWARE SOLIDEDGE	32
2.6	SOFTWARE SOLIDWORKS	32
2.7	REGULAMENTO DA SHELL ECO-MARATHON	32
3	MODELAGEM, MEDIÇÃO E ANÁLISE	35
3.1	A GEOMETRIA DO PROTÓTIPO	35
3.2	ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS E CONVERGÊNCIA DA MALHA	36
3.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL	38
3.4	CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO	38
3.4.1	Carregamentos	39
3.5	SIMULAÇÕES	40
4	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	54
4.1	BANCADA	54
4.2	ENSAIOS	58
4.2.1	Aplicação da carga vertical	60
4.2.2	Aplicação da carga horizontal	61

4.2.3	Aplicação da carga perpendicular	62
4.2.4	Deformações.....	64
5	DISCUSSÕES.....	71
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	74
6.1	CONCLUSÃO	Erro! Indicador não definido.
6.2	TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERENCIAS	76
	Anexo A.....	78
	Anexo B.....	79
	Anexo C.....	80
	Anexo D.....	81
	Anexo E 1/4	82
	Anexo E 2/4	83
	Anexo E 3/4	84
	Anexo E 4/4	85

1 INTRODUÇÃO

Segundo a pesquisa realizada pelo jornal O dia, entre 2001 e 2012, a frota brasileira mais que dobrou, passando de 24 milhões para 50 milhões de veículos. Essa não é só uma tendência brasileira, mas sim de todo o mundo. O Lepac - Laboratório Francês de Estudos Prospectivos e Cartográficos estima que existia cerca de 360 milhões de carros em todo o mundo na década de 80 e que em 20 anos esse número será apenas a quantidade existente na China.

Nos veículos, o chassi é um componente de grande importância para o desempenho assim como para segurança dos passageiros. Para o melhor desempenho ele precisa ter uma estrutura leve, já no que diz respeito à segurança o chassi deve ser capaz de suportar impactos devido a colisões ou capotamento.

O grau de complexidade de chassis dificultam a análise desse tipo de estrutura. Para solucionar essa problemática utiliza-se um método de soluções aproximadas que pode ser aplicado em qualquer estrutura e com todos os tipos de carregamento. Nesse método a estrutura é subdividida em partes pequenas, passando a representar um domínio contínuo do problema, possibilitando assim a resolução de problemas complexos. O método propõe que um número infinito de variáveis desconhecidas, sejam substituídos por um número limitado de elementos de comportamento bem definido.

O chassi que será analisado pertence a um protótipo de eficiência energética que participa da SEM (Shell Eco-Marathon), que é uma competição onde estudantes das mais diversas engenharias são desafiados a desenvolverem um protótipo que tenha a maior eficiência energética possível.

A competição remonta a 1939, quando os funcionários Shell Oil Company nos EUA fizeram uma aposta amigável sobre quem poderia viajar mais longe com a mesma quantidade de combustível. Desde então, ela está se expandindo para mais dois continentes, incluindo muitos tipos de combustíveis e expectativas em torno do futuro da energia e mobilidade.

Na SEM Brasil existem três categorias de protótipos: o elétrico, etanol e gasolina, onde a única exigência é com relação aos protótipos à combustão, que é obrigatória a utilização de um motor de quatro tempos. Todo o veículo deve ser

construído seguindo o regulamento da competição, assim o protótipo terá sua segurança aprovada. E ainda que já tenha passado em todas as inspeções de segurança, os veículos são reavaliados pela equipe técnica para só assim serem liberados para a pista, a fim de garantirem uma maior segurança ao piloto e aos outros competidores.

Figura 1. Shell Eco-Marathon Brasil



Fonte: Site da Shell, 2017.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo a realizar a análise estrutural no chassi do protótipo da equipe EcoOpala de Eficiência Energética, quando submetido a esforços determinados pelo regulamento da competição, a fim de garantir a segurança do piloto e a partir dessa análise determinar qual perfil tubular é mais adequado para a construção do chassi. Para modelagem do chassi será utilizado *Software SolidEdge ST8* e as análises numéricas serão realizadas no *Software SolidWorks 2016*, com isso verificar se a estrutura é capaz de atender aos pré-requisitos do regulamento.

1.1.1 Objetivos Específicos

- 1 Modelar o chassi para o protótipo utilizando o SolidEdge ST8;
- 2 Estudar a convergência das malhas de elemento finito;
- 3 Analisar o comportamento estático do chassi após a aplicação das cargas, utilizando o método de elementos finitos;
- 4 Analisar o comportamento estático do chassi após a aplicação das cargas, utilizando um método experimental;
- 5 Estudar os possíveis perfis tubulares a serem utilizados para a construção do chassi.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 CHASSI

Chassi de um automóvel é o principal componente de um veículo, pois é ele quem suporta todos os esforços estáticos e dinâmicos, com isso torna-o um dos grandes responsáveis pela segurança de seus passageiros, sendo também, o componente que liga todas as partes do veículo.

Existem vários tipos de chassis, porém nesse trabalho serão apresentados os conceitos, vantagens e desvantagens de cada tipo citado a seguir:

- Chassi em escadas;
- Chassi Spaceframe;
- Chassi monocoque;
- Chassi backbone.

2.1.1 Chassis em escadas

Os primeiros automóveis que foram construídos em estruturas no formato de escada, onde nela eram fixados a carroceria. Essa carroceria por sua vez não tinha grandes contribuições para a estrutura do veículo, pois eram feitos de madeira, que tem uma rigidez muito baixa se comparado com o chassi (Happian-Smith et al, 2002).

Figura 2. Exemplo chassi tipo escada.



Fonte: Site bestcars.uol.com.br, 2017.

Esse tipo de chassi é constituído por duas vigas longitudinais chamados longarinas e vigas transversais chamados travessas. É normalmente construído com

tubos de perfis fechados retangulares, redondos, em perfis abertos tipo C, sendo os fechados mais utilizados em veículos de passageiros, pois oferecem uma maior rigidez à estrutura. As longarinas são os principais membros estruturais que suportam os carregamentos provenientes da aceleração e frenagem, e as travessas são responsáveis por fornecer resistência às forças laterais além de garantir o travamento à estrutura completa.

Segundo Venâncio (2013) as vantagens e desvantagens para esse tipo de chassi são:

Vantagens:

- Capacidade de lidar com cargas pesadas;
- Grande variedade de formas e de tipos de carroçarias.

Desvantagem:

- Rigidez torcional pouca elevada (por se tratar de chassis 2D)

2.1.2 Chassi Spaceframe

Esse tipo de chassi é construído em uma forma 3D como o próprio nome já sugere, eles são construídos utilizando tubos, geralmente de secção circular (alguns podem usar a secção quadrada para facilitar a conexão de painéis, embora a seção circular seja a que fornece a força máxima). Por se tratar de uma estrutura treliçada em três dimensões torna esse tipo de estrutura bastante rígida, capaz de resistir a esforços originados de diversas direções.

Figura 3. Exemplo de chassi tipo spaceframe.



Fonte: Site <http://www.performanceracing.com>, 2017.

Oliveira (2007) relata que os primeiros projetos de chassi spaceframe foi desenvolvido por um aviador inglês durante a Segunda Guerra Mundial, para com isso proporcionar às aeronaves uma maior capacidade de suportar possíveis danos, se comparada a outras aeronaves da época.

Começou a ser utilizado em veículos pela General Motors Corporation, para a produção de veículos de alto desempenho.

Segundo Venâncio (2013) as vantagens e desvantagens para esse tipo de chassi são

Vantagens:

- Alta precisão;
- Alta rigidez torcional;
- Grande variedade de materiais utilizáveis.

Desvantagens:

- Construção exclusivamente manual;
- Muito trabalho para a produção (cortar, serrar e soldar os tubos).

2.1.3 Chassi monobloco

Esse tipo de chassi parte do princípio onde o chassi e a carroceria do veículo são uma estrutura única. Sua primeira utilização foi em 1922, quando um dos fundadores da marca Lancia, Vincenzo Lancia, durante uma viagem de barco, quando ficou entusiasmado com a força e a resistência do casco do barco. Atualmente o nome mais utilizado pela indústria automotiva é monocoque.

O monobloco pode ser feito dos mais diversos materiais, contudo, os mais utilizados são: aço, alumínio, fibra de carbono, kevlar e para as mais diversas combinações desses materiais. A grande maioria dos automóveis atualmente utiliza-se desse tipo de chassi, que em geral são fabricados de chapas de aço ou alumínio onde elas passam por um processo de estampagem e logo em seguida são unidas por um processo de soldagem.

Os automóveis atuais, em grande maioria, utilizam chassi tipo monobloco de aço, graças a seu baixo custo de produção, velocidade, já que todo o processo dura apenas alguns minutos e ainda sua maior facilidade para que o processo de fabricação seja robotizado, onde chapas são estampadas e unidas utilizando um processo de soldagem.

Figura 4. Exemplo de chassi tipo monobloco



Fonte: <http://automotivexist.blogspot.com.br>, 2017

Segundo Venâncio (2013) as vantagens e desvantagens para esse tipo de chassi são:

Vantagens:

- Eficiência de espaço, porque o chassi é o envelope externo do carro;
- Bom para produção em massa;
- Barato para produzir na produção em massa;
- Maior resistência do conjunto do veículo;
- Maior resistência em caso de choque ou de acidente.

Desvantagens:

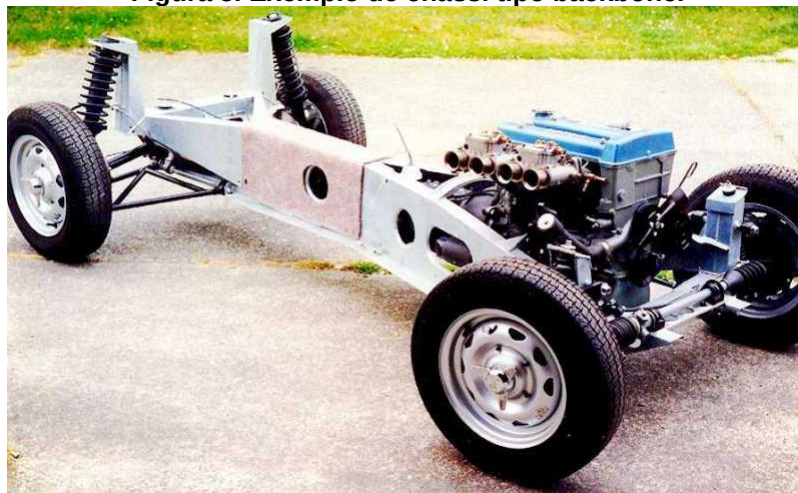
- Baixa rigidez, pois, o metal prensado não é tão rígido como os perfis tubulares;
- Custos de concepção e fabricação mais elevados.

2.1.4 Chassi backbone

O chassi backbone foi criado pelo fundador da Lotus durante um experimento para a construção de um monobloco de fibra de vidro, com isso ele descobriu um chassi forte e barato.

O backbone ou espinha dorsal (Figura 5) é bem simples por se tratar de um sólido tubular (geralmente em secção retangular) ligando o eixo dianteiro ao traseiro. Por dentro desse sólido passa um eixo de transmissão, caso o motor seja dianteiro e tração traseira, geralmente esse tipo de chassi é construído de fibra de vidro, sendo forte o suficiente para a utilização em carros esportivos menores.

Figura 5. Exemplo de chassi tipo backbone.



Fonte: Site <http://aermech.com/chassis-frames/>, 2017

Vantagens:

- Suficiente para carros esportivos pequenos;
- Fácil fabricação manual;
- Baixo custo para produção.

Desvantagens:

- Não é forte o suficiente para carros esportivos grandes;
- Não oferece proteção contra impactos laterais;
- Dificuldade para produção em massa.

2.2 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

2.2.1 Princípio da resistência dos materiais

A resistência dos materiais é um ramo da mecânica responsável pelo estudo do comportamento de corpos sólidos que sofrem os mais diversos tipos de carregamento, fornece meios para quantificar e garantir a operação segura de cada componente de uma estrutura partindo de um princípio onde é limitado o valor das tensões que atuam em uma determinada região do componente. Assim, é possível garantir a segurança, integridade e disponibilidade operacional ao longo de sua vida útil. (Bosch, 2005)

Os conceitos fundamentais na resistência dos materiais são tensão e deformação. Para que fosse possível entender melhor sobre como essas tensões e deformações podem ser geradas, deve-se primeiro apresentar como acontece o equilíbrio de um corpo deformável.

Todo corpo deformável pode sofrer com os mais diversos tipos de forças externas e essas forças podem ser resumidas em dois grupos, que são forças de superfície e as forças de corpo. As forças de superfícies como o próprio nome já sugere, são oriundas do contato físico entre os corpos. E as forças de corpo são as forças que um corpo realiza sobre o outro sem que exista um contato direto entre os corpos envolvidos, por exemplo, a gravidade e um campo eletromagnético.

Para que exista a força de superfície nos pontos de contatos entre os corpos, esse contato deve restringir total ou parcialmente pelo menos um dos corpos de realizar algum tipo de movimento, como por exemplo: impedir translação em uma determinada direção, surgindo aí uma reação na mesma direção em sentido contrário.

Para que se tenha o equilíbrio de um corpo é preciso que exista equilíbrio das forças (F) e equilíbrio de momentos (M) que estão agindo nesse determinado corpo. Matematicamente essas condições podem ser expressas pelas duas equações a seguir:

$$\sum F = 0 \quad (1)$$

$$\sum M_0 = 0 \quad (2)$$

2.2.2 Tensões

As tensões podem ser divididas em dois tipos, sendo elas normais ou tangenciais.

A tensão normal é dada em intensidade da força ΔF que age perpendicularmente a área ΔA por unidade de área ΔA , e é identificada pela letra grega σ (sigma).

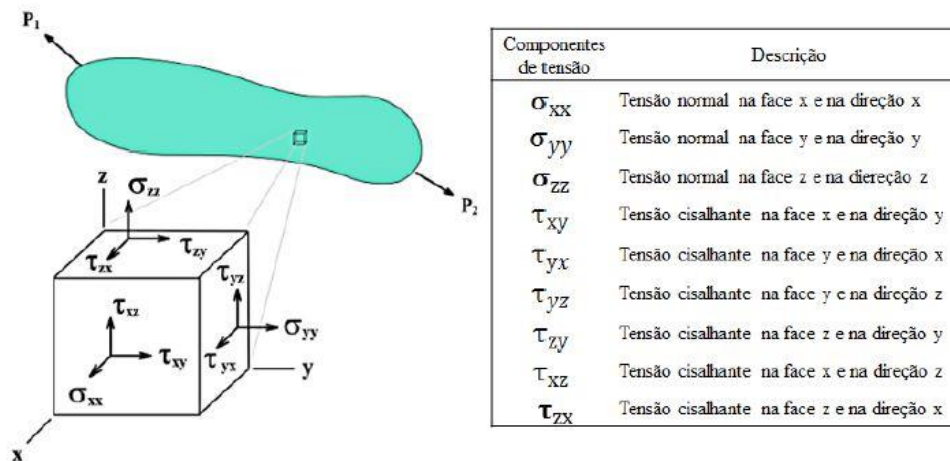
$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (3)$$

A tensão de cisalhamento, uma tensão tangencial, por sua vez, é determinada pela intensidade de força ΔF que age tangencialmente a área por unidade de área ΔA , e é identificada pela letra grega τ (tau).

$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad (4)$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (5)$$

Figura 6. Cubo de tensões.



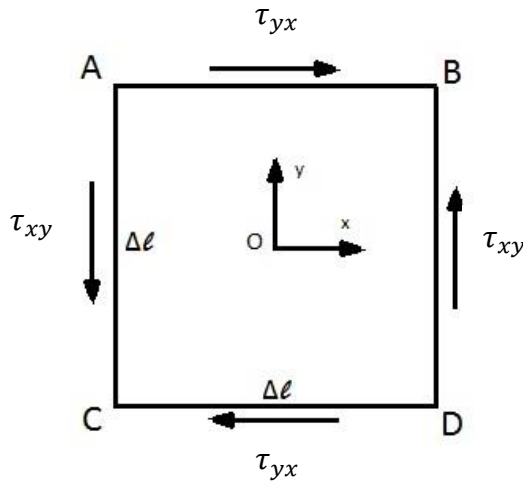
Fonte: (Kim et al., 2011)

Segundo Kim (2011), de uma forma matricial é possível determinar em três dimensões a tensão $[\sigma]$ em qualquer ponto de um corpo seguindo a matriz:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Seguindo a simetria da matriz de tensão os nove componentes da matriz podem ser reduzidos para seis. A figura 7 representa uma porção infinitesimal ($\Delta l \times \Delta l$) com tensões cisalhantes agindo em sua superfície (KIM,2011).

Figura 7. Equilíbrio de um elemento quadrado sujeito a tensões cisalhante.



Fonte: (Kim et al., 2011)

Como o corpo está em equilíbrio estático, a soma dos momentos em torno do eixo z deve ser igual a zero. Então utilizando desse princípio é possível determinar que as tensões τ_{xy} e τ_{yx} são iguais entre si.

$$\sum M_z = \Delta l(\tau_{xy} - \tau_{yx}) = 0 \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (8)$$

Seguindo o método aplicado anteriormente podemos garantir a seguinte relação:

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (9)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} \quad (10)$$

Desta forma, são necessários apenas seis componentes para representar perfeitamente as tensões em qualquer ponto. Para alguns casos, a tensão em um ponto é escrita como pseudovetor 6x1, como mostrado a seguir.

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

2.2.3 Deformação

Segundo Hibbeler (2013, p 47) “sempre que uma força é aplicada a um corpo, esta tende a mudar a forma e o tamanho dele. Essas mudanças são denominadas deformações e podem ser visíveis ou praticamente imperceptíveis se não forem utilizados equipamentos que façam medições precisas”.

As deformações podem ser classificadas em dois tipos, deformações normais e deformações tangenciais.

A deformação normal é o prolongamento ou encolhimento de um corpo dividido pelo seu comprimento inicial (HIBBELER, 2013).

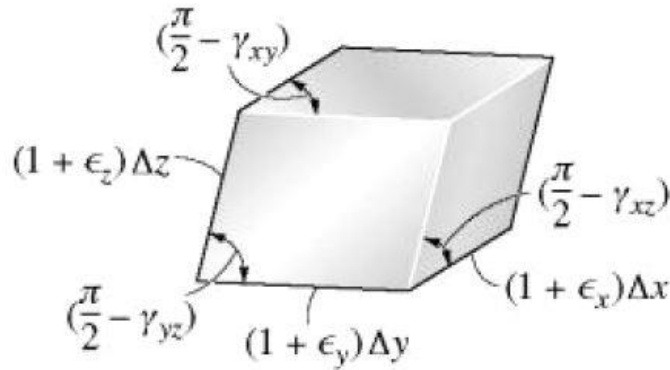
$$\epsilon = \frac{\Delta S' - \Delta S}{\Delta S} \quad (12)$$

$$\Delta S' \approx (1 + \epsilon)\Delta S \quad (13)$$

E a deformação por cisalhamento, que é uma deformação tangencial, é a alteração provocada por uma força no ângulo entre dois segmentos de retas que inicialmente são perpendiculares (HIBBELER, 2013).

$$\gamma_{yz} = \frac{\pi}{2} - \lim_{\substack{B \rightarrow A \text{ ao longo de } n \\ C \rightarrow A \text{ ao longo de } t}} \theta' \quad (14)$$

Figura 8. Componentes cartesianos da deformação.



Fonte: (HIBBELER, 2013).

Assim como a tensão, segundo Kim (2011), a deformação pode ser expressa em qualquer ponto de um sólido em três dimensões conforme a matriz $[\epsilon]$:

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{yx} & \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{zy} \\ \epsilon_{xz} & \epsilon_{yz} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

É possível representar a deformação, assim como o vetor das tensões, como um pseud.=vetor por se tratar de uma matriz simétrica:

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

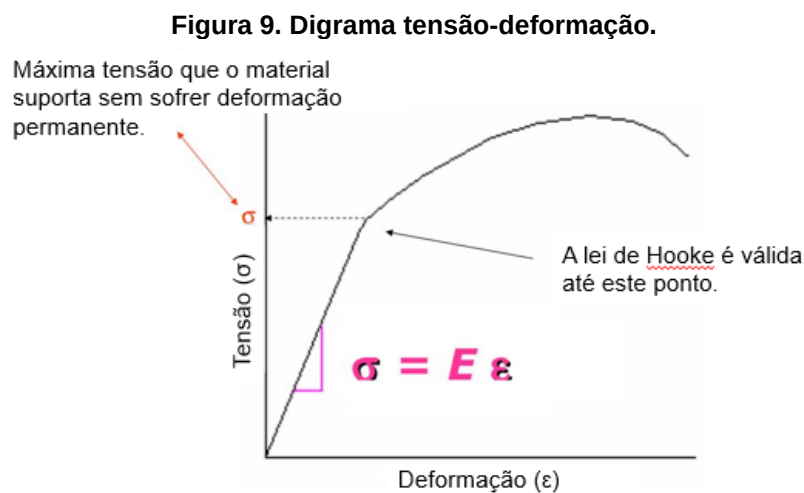
2.2.4 Lei de Hooke

A lei de Hooke é uma lei de proporcionalidade entre a deformação elástica e tensão, ela foi desenvolvida por Robert Hooke, em 1676, observando o comportamento de uma mola, onde percebeu que a deformação elástica da mola era proporcional à força aplicada na mesma. Aplicando essa lei para o comportamento elástico dos materiais observou-se que, assim como nas molas, se tratava de um

comportamento linear entre a tensão e deformação e pode ser expressa matematicamente pela equação:

$$\sigma = E\epsilon \quad (17)$$

Nesta equação, E representa a constante de proporcionalidade, nomeada de módulo de elasticidade ou módulo de Young. O módulo de elasticidade é uma propriedade de rigidez do material. Na figura a seguir mostra-se o diagrama tensão-deformação de um material dúctil.



Fonte: (<https://pt.slideshare.net/felipecrosa9/aula-6-propriedades-mecnicas>, 2014)

Para uma relação tridimensional das tensões e deformações são utilizados os pseudovetores da equação 11 e 16 aplicando na equação a baixo.

$$\{\sigma\} = [C] * \{\epsilon\} \quad (18)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (19)$$

A matriz [C] é uma matriz simétrica por ser originada de duas matrizes simétricas e por isso o número de coeficientes elásticos são apenas 21. Para muitos

materiais presentes na natureza, tais como ossos, madeiras e alguns materiais manufaturados pelo homem, como compósitos reforçados por fibra, podem ser modelados como um material ortotrópico com nove constantes elásticas independentes. Contudo, a grande maioria dos materiais são isotrópicos e para tais materiais são apenas 21 constantes elásticas independentes na matriz [C] que podem ser expressas utilizando apenas duas constantes independentes. E para materiais isotrópicos a relação entre tensão e deformação pode ser escrita como (KIM, 2011).

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad (21)$$

Na equação 20 o modulo de Young (modulo de elasticidade longitudinal) é representado pela letra E, o coeficiente de Poisson são duas constantes elásticas independentes identificadas pela letra ν , G é modulo de elasticidade transversal que é encontrado conforme a equação a seguir

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (22)$$

Sempre que um material elástico sofre uma ação de uma força, as deformações longitudinais e transversais se desenvolvem segundo uma proporção entre elas. O coeficiente de Poisson, que é a razão entre a deformação longitudinal e a deformação transversal, exprime esta proporção.

$$\nu = \frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{long}} \quad (23)$$

2.3 TEORIA DE FALHAS

A falha dos materiais de engenharia pode ser classificada basicamente em dúctil e frágil. A maioria dos materiais é dúctil e sua falha se dá pelo

escoamento. Por isso, a resistência ao escoamento caracteriza sua falha. As cerâmicas e alguns polímeros são frágeis e eles se rompem ou se fraturam quando a tensão supera determinado valor máximo. O comportamento de sua tensão-deformação é linear até o ponto de falha, e eles falham abruptamente (Kim, 2011, p.35)

Em materiais dúcteis, quando ocorre um deslizamento dos átomos entre si, esse fenômeno é denominado de escoamento. A tensão ou energia necessária para que ocorra escoamento é muito inferior a necessária para separar os átomos.

A ruptura "prematura" de materiais frágeis acontece por estes não possuírem a propriedade de permitir este "deslizamento", os planos atômicos se separam antes deste deslizamento. Entretanto, o alto valor de tensão exigido é fornecido pontualmente em regiões de concentração de tensões. E com isso a região de concentração se torna instável, causando uma ruptura.

As principais teorias que quantificam tensões que agem em materiais dúcteis são a teoria da energia de distorção (von Mises) e teoria da máxima tensão cisalhante (Tresca), e em materiais frágeis a teoria da tensão principal máxima (Rankine). Nesse trabalho só será apresentado a teoria de von Mises, pois ela é considerada a teoria mais conservativa para matérias dúcteis e foi a utilizada para análise de falhas no chassi produzido em alumínio dúctil.

2.3.1 Teoria da energia de distorção (von Mises)

De acordo com Kim (2011), quando um sólido sofre a aplicação de uma força e essa força venha a provocar alguma alteração do seu formato e suas dimensões, junto com isso é armazenado no sólido uma energia potencial que é denominada de energia de deformação. Essa energia pode ser decomposta em duas componentes, uma devido à variação de volume (energia de dilatação) e outra devido à distorção ou variação no formato (energia de distorção). A energia de distorção pode ser encontrada utilizando a equação (24) e σ_{VM} (tensão de von Mises) é determinada pela equação (26).

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_y^2 \quad (24)$$

$$\frac{1+\nu}{3E} \sigma_{VM}^2 \geq \frac{1+\nu}{3E} \sigma_y^2 \quad (25)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy}-\sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz}-\sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (26)$$

De acordo com a teoria da energia de distorção, um material dúctil só irá escoar quando a energia de distorção atingir ou superar o valor crítico para o determinado material. Quando o sólido estiver submetido apenas a tensões de cisalhamento o material escoará quando $\tau_{max} \geq 0,577\sigma_y$.

2.4 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Vários dos problemas encontrados na engenharia podem ser demonstrados utilizando equações diferenciais ordinárias (EDO) e equações diferenciais parciais (EDP). Alguns problemas práticos da engenharia, devido à complexidade, tornam as soluções analíticas inviáveis ou até mesmo impossíveis de serem encontradas. Por essa dificuldade foi desenvolvido o método de elementos finitos (MEF), uma técnica capaz de encontrar soluções numéricas aproximadas. O MEF, inicialmente, foi desenvolvido para a análise estática de sistemas estruturais, mas nos dias atuais esse método pode ser usado para estudar os mais diversos problemas, tais como, nos domínios da mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, transmissão de calor e eletromagnetismo (Rade, 2011)

O método de elementos finitos (MEF) é um dos métodos numéricos para resolver equações diferenciais que descrevem muitos problemas de engenharia. O MEF, que teve origem na área da mecânica estrutural, foi estendido a outras áreas da mecânica dos sólidos e posteriormente a outros campos como transferência de calor, dinâmica dos fluidos e eletromagnetismo. Na realidade, o MEF foi reconhecido como uma ferramenta poderosa para resolver equações diferenciais e equações integral diferenciais e, em um futuro próximo, pode se tornar o método numérico preferido de muitas áreas da engenharia e das ciências aplicadas. Um dos

motivos para sua popularidade é que o método resulta em programas computacionais naturalmente versáteis (Kim et al., 2011, p. 49).

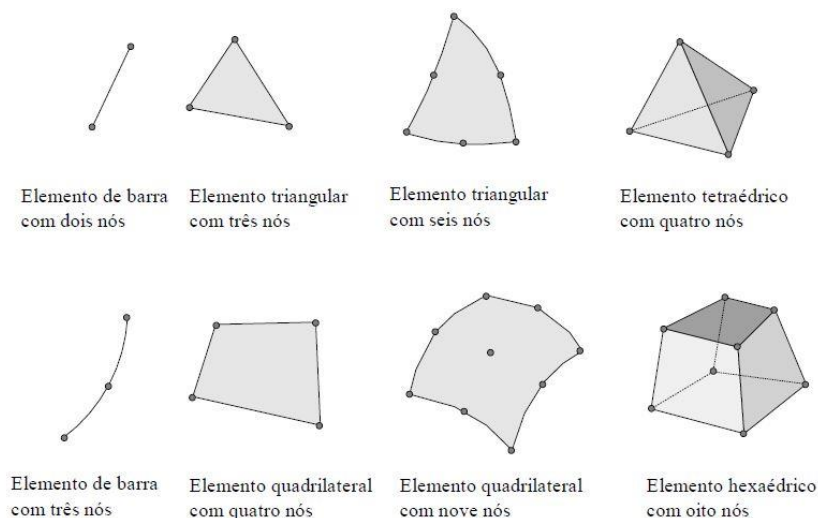
Para que fosse possível compreender o comportamento físico de sistemas mecânicos são utilizados modelos matemáticos como também esquemas em escalas reduzidas. Com o passar dos anos foi surgindo grandes melhorias nos modelos matemáticos, possibilitando cada vez mais modelagens mais realistas e confiáveis, otimizando os processos de desenvolvimento e fabricação de projetos de engenharia.

2.4.1 Método de elementos finitos

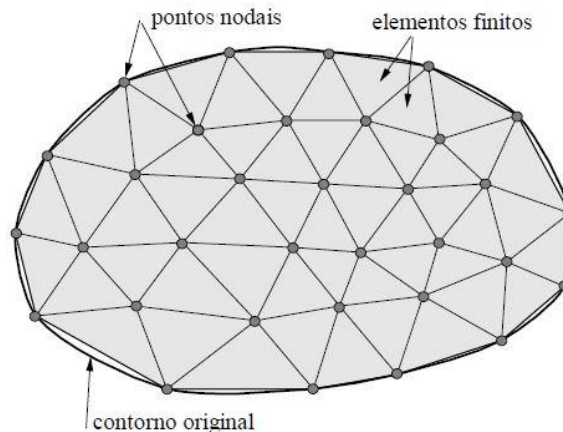
Segundo Rade (2011, p. 2) “O MEF é essencialmente um processo de discretização, que visa transformar um problema infinito-dimensional em um problema finito-dimensional, com número finito de incógnitas”.

Segundo Bosch (2005), qualquer corpo, seja ele sólido, líquido ou gasoso, pode ser analisado, basta que seja dividido em elementos mais simples na forma (reta, triângulo, quadrado, tetraedro, pentaedro ou hexaedro), como mostrado na figura 10, tão pequenos quanto possível e que estejam ligados entre si pelos seus vértices (nós). Quanto menores forem os elementos, maior será a aproximação do comportamento do corpo com realidade.

Figura 10. Diferentes tipos de elementos finitos.

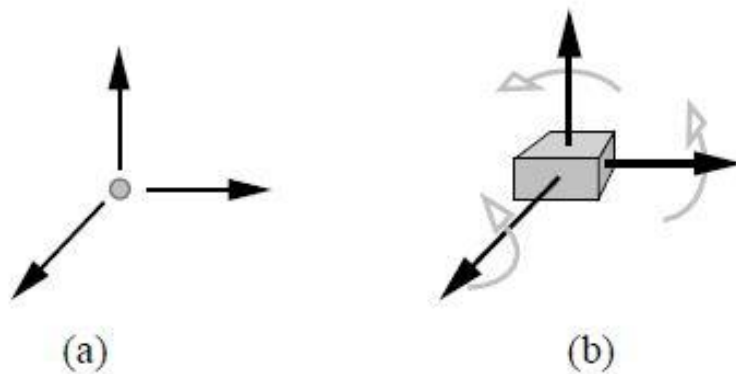


Fonte: Souza, 2003.

Figura 11. Malha de elementos finitos.

Fonte: Souza, 2003

Uma rede de elementos e nós que divide uma região é conhecida como malha. Conforme Alves (2012), citando Budynas (2006), os nós são entidades fundamentais dos elementos, pois é a partir desses nós que os elementos interagem entre si, como também é onde as propriedades estáticas dos elementos são estabelecidas e junto com elas as forças e condições de contorno são determinadas. Cada nó possui um número de graus de liberdade que identifica os possíveis movimentos rotacionais e translacionais que podem sofrer, como mostrado na figura 12.

Figura 12. a) graus de liberdade de um ponto; b) graus de liberdade de um corpo rígido.

Fonte: Souza, 2003.

Os graus de liberdade de um ponto como observado na figura 12a são limitados a três movimentos o vertical, horizontal e perpendicular a um plano. Já os graus de liberdade de um corpo rígido, figura 12b, além dos três movimentos apresentados anteriormente um corpo rígido pode sofrer rotação em relação aos três eixos.

Nesse trabalho será utilizado um elemento de barra, pois o tipo de chassi é o spaceframe que é uma estrutura treliçada, por isso não sofre esforços transversais, as condições de contorno estão situadas nos nós da estrutura, que possuem três graus de liberdade, o que já é satisfatório para a obtenção dos resultados não sendo necessário a utilização de elementos finitos de sólido.

2.5 SOFTWARE SOLIDEDGE

É um Software CAD (computer-aided design) desenvolvido pela Siemens PLM, utilizado para modelagem em três dimensões de peças e estruturas. Foi escolhido esse CAD para a modelagem do chassi devido a sua maior facilidade para trabalhar com tubos. Para construir chassi é feito um esboço em linhas e utilizado como guia para uma seção transversal do perfil desejado. Os arquivos foram exportados no formato “Parasolid Text Transmit Document (.x_t)”.

2.6 SOFTWARE SOLIDWORKS

A Dassault Systèmes SolidWorks Corp oferece ferramentas de software 3D que permitem que crie, simule, publique e gerencie seus dados. O foco do SolidWorks é facilitar o uso e permitir que engenheiros, projetistas e outros profissionais de tecnologia aproveitem a tecnologia 3D para darem vida aos seus projetos. Nesse trabalho foi utilizada a ferramenta de simulação de MEF, devido o maior conhecimento da ferramenta nesse Software e por se tratar de um sistema bastante conhecido e reconhecido pela sua qualidade.

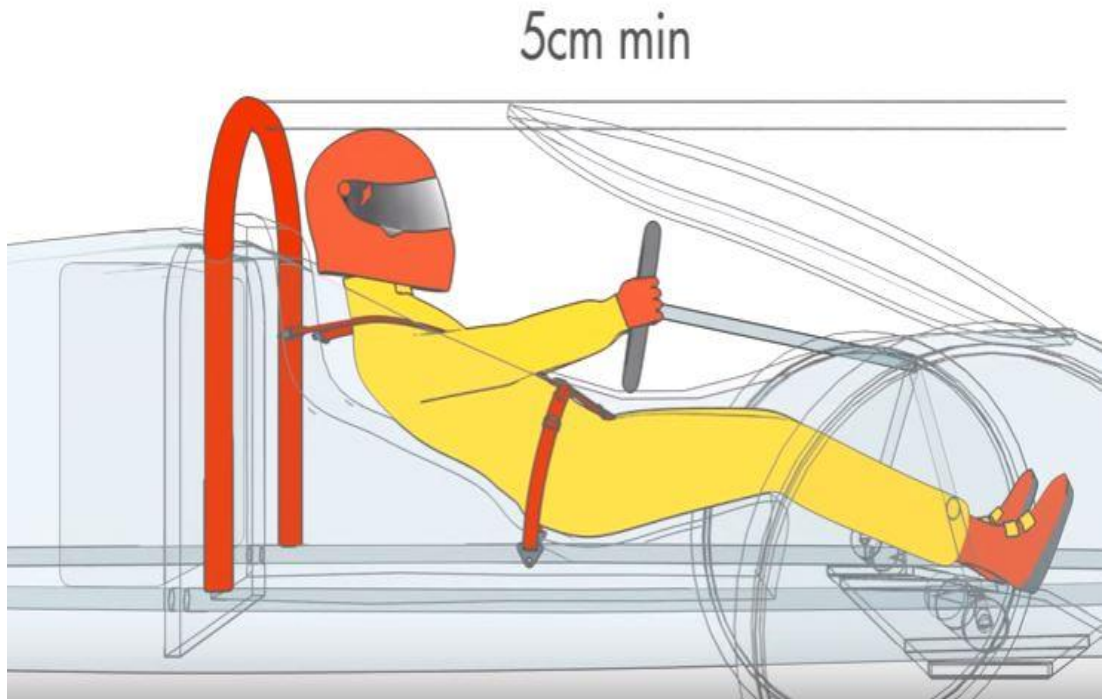
2.7 REGULAMENTO DA SHELL ECO-MARATHON

O regulamento determina que cada protótipo deve seguir as seguintes regras:

1. A equipe deve garantir que o chassi do veículo ou monocoque seja projetado de forma ampla e longa o suficiente para que proteja efetivamente o corpo do motorista em caso de colisão ou capotagem.
2. O chassi do veículo deve estar equipado com uma barra rolante efetiva que se estenda por 5 cm em torno do capacete do condutor, quando o

mesmo estiver sentado em posição para condução normal e com os cintos de segurança presos.

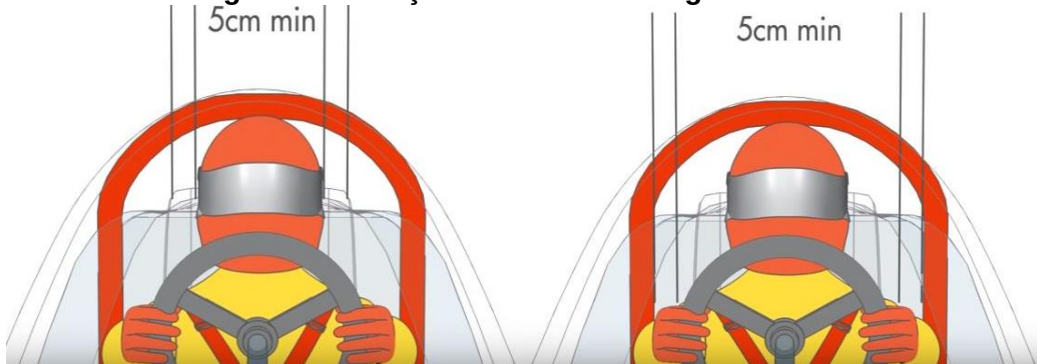
Figura 13. Posição da barra de rolagem.



Fonte: Tech Tpis Shell Eco-Marathon, 2017.

3. Esta barra de rolagem deve se estender na largura além dos ombros do motorista quando sentado na posição normal de condução e com os cintos de segurança presos. É permitido usar uma barra de rolagem do tipo tubular ou de painel. Se for utilizada uma "barra de rolagem tubular" deve ser feito de metal.

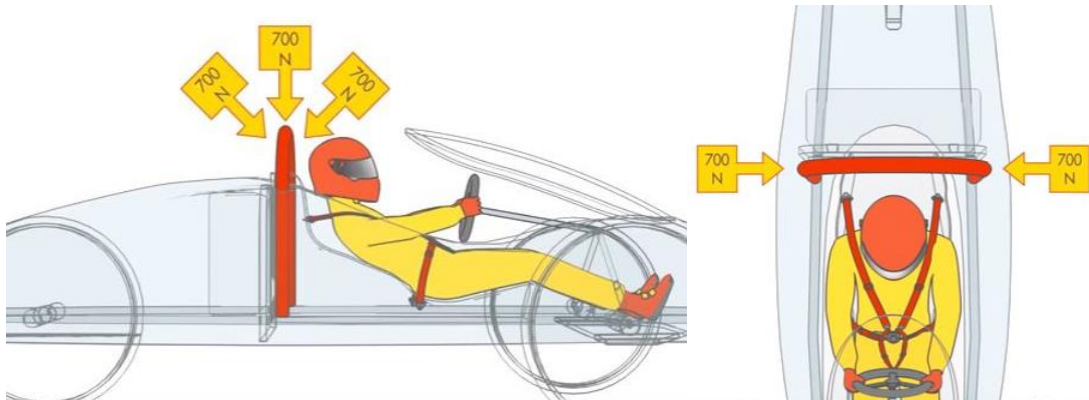
Figura 14. Posição da barra de rolagem.



Fonte: Tech Tpis Shell Eco-Marathon, 2017.

4. Qualquer barra de rolagem deve ser capaz de suportar uma carga estática de 700 N (~ 70 kg) aplicada em uma direção vertical, horizontal ou perpendicular, sem grande deformação (isto é, em qualquer direção). Como o regulamento não estipula um valor permitido para a deformação estipulou uma deformação máxima de 5 mm para qualquer direção.

Figura 15. Aplicação da força na barra de rolagem.



Fonte: Tech Tpis Shell Eco-Marathon, 2017.

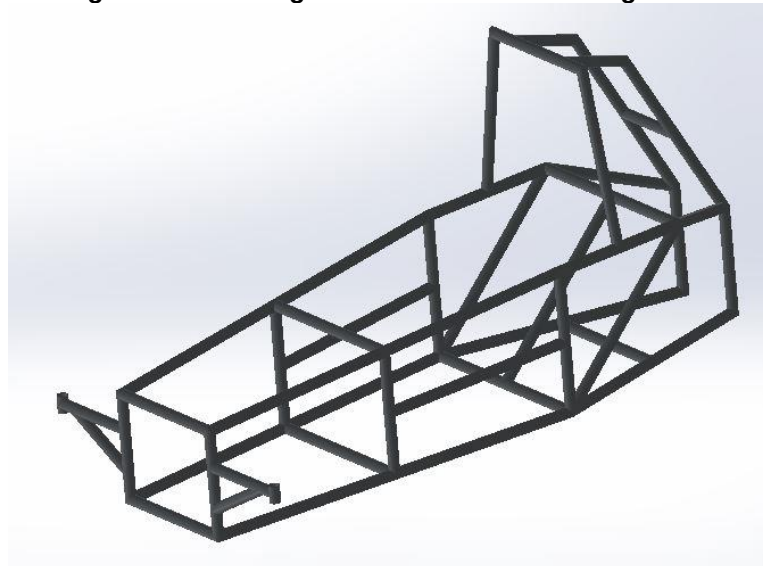
5. O peso mínimo para o piloto é de 50 quilogramas;
6. Dimensões:
- Altura máxima: 100 cm;
 - Largura mínima (medida entre os pontos onde as rodas tocam o solo): 50 cm;
 - Largura máxima: 130 cm;
 - Altura máxima dividida pela largura deve ser menos que 1,25;
 - Distância entre eixos traseiro e dianteiro mínima: 100 cm;
 - Comprimento máximo: 350 cm;
 - Peso máximo (sem o piloto): 140 kg.

3 MODELAGEM, MEDIÇÃO E ANÁLISE

3.1 A GEOMETRIA DO PROTÓTIPO

A geometria do protótipo foi modelada no *Software SolidEdge ST8* seguindo todas as determinações do regulamento e a partir disso foram feitos quatro modelos de chassi cada um com um tipo de perfil tubular redondo diferente conforme o quadro 1, todos são perfis comerciais, foram exportados no formato “Parasolid Text Transmit Document (.x_t)” para que fossem feitas as simulações no *Software SolidWorks*, simulações essas que serão usadas para determinar qual o perfil mais indicado para esse chassi.

Figura 16. Modelagem do chassi no SolidEdge ST8.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Para facilitar a compreensão e a utilização durante o trabalho cada um dos perfis recebeu uma identificação utilizando as letras de A, B, C e D, onde o perfil A tem 25,4 mm de diâmetro externo e parede com espessura de 2 mm e assim sucessivamente conforme o quadro 1.

Quadro 1. Tipos de perfis.

Perfil	Diâmetro externo	Espessura
A	25,4 mm	2 mm
B	25,4 mm	1,5 mm
C	22,225 mm	2 mm
D	22,225 mm	1,5 mm

Fonte: Autoria própria, 2017.

3.2 ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS E CONVERGÊNCIA DA MALHA

Para uma análise por elementos finitos um dos pontos principais a se observar é o nível de refinamento da malha. É com ela que se define o custo computacional e a precisão da simulação que depende da complexidade da geometria a ser analisada e o tipo de elemento finito utilizado (Canut, 2014).

Foi escolhido um elemento de viga existente no banco de dados da *Software SolidWorks*. Este elemento possui dois nós como mostrado na figura 17.

Figura 17. Elemento de viga.

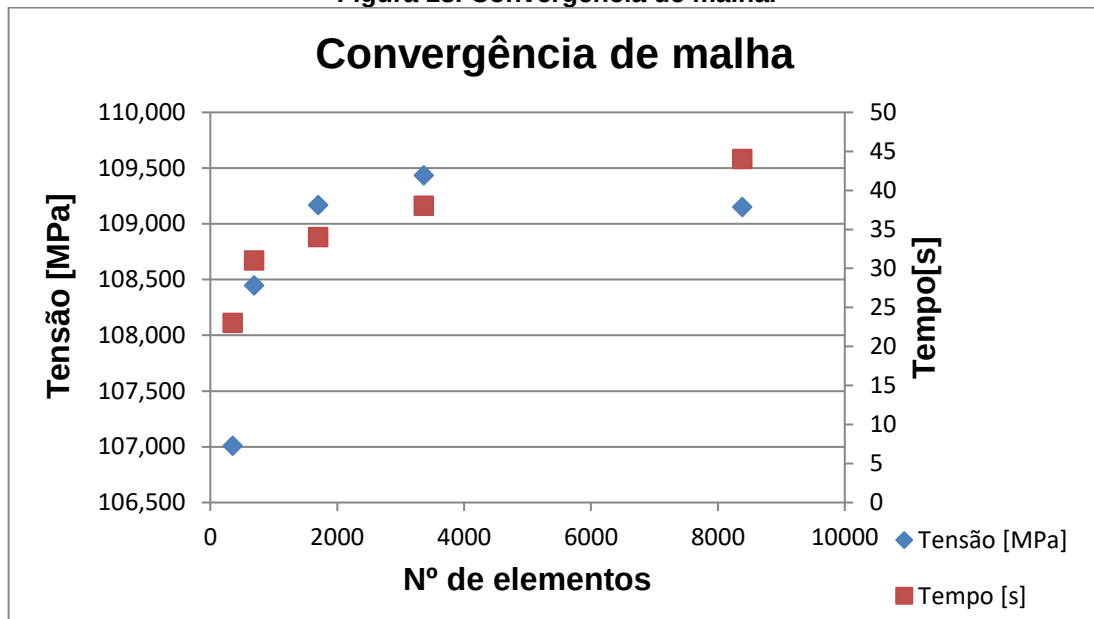


Fonte: Autoria própria, 2017.

Para que se tenha uma análise otimizada sem a perda de recursos e garantir uma maior confiabilidade dos resultados é preciso que se determine o tamanho médio do elemento finito a ser adotado e para isso foi utilizado um estudo de convergência de malha. A fim de realizar este estudo deve se aplicar um carregamento à estrutura e realizar simulações para perceber a influência da malha nos resultados obtidos. É observado que a partir de um determinado grau de refinamento os resultados começam a variar cada vez menos e é nesse momento que há uma convergência da malha. Para que escolha o grau de refinamento mais adequado são levadas em consideração duas variáveis, o menor erro dos resultados e os recursos computacionais gastos.

No referido estudo foi determinada a tensão de Von Mises como critério de verificação do erro e o tempo como o custo computacional para aferir a convergência (figura 18). A partir desse estudo foi escolhida a malha contendo elementos de aproximadamente 10 mm de comprimento, como indicado no quadro 2.

Figura 18. Convergência de malha.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Quadro 2. Estudo da convergência das malhas.

Convergência das malhas			
Tamanho aproximado dos elementos [mm]	Nº de elementos	Tempo de simulação [s]	Tensão equivalente máxima de von Mises [MPa]
2	8384	44	109,151
5	3364	38	109,435
10	1697	34	109,168
25	691	31	108,447
50	353	23	107,007

Fonte: Autoria própria, 2017.

Considerando que quanto mais refinada for a malha maior será a aproximação dos resultados obtidos com o da estrutura real, com isso foi determinado a malha com 2 mm de comprimento como a mais correta e a partir disso a malha escolhida de 10 mm se deve ao fato de ter uma variação de apenas 0,016% na tensão von Mises e com um tempo menor em 23%, fazendo com que se obtenha os resultados mais rapidamente.

3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL

Para que seja possível realizar uma análise por elementos finitos é necessário que se determinem as propriedades do material utilizado na construção do chassi, essas propriedades podem serem obtidas através de ensaios ou disponibilizadas pelo fabricante. O material escolhido para a construção foi a liga de alumínio ASTM 6061 T6 que é uma liga composta de alumínio, magnésio e silício que passou por um tratamento térmico por solubilização e então envelhecido artificialmente. As propriedades desse material estão no banco de dados do *Software SolidWorks*, conforme a quadro 3.

Quadro 3. Propriedades do alumínio ASTM 6061 T6.

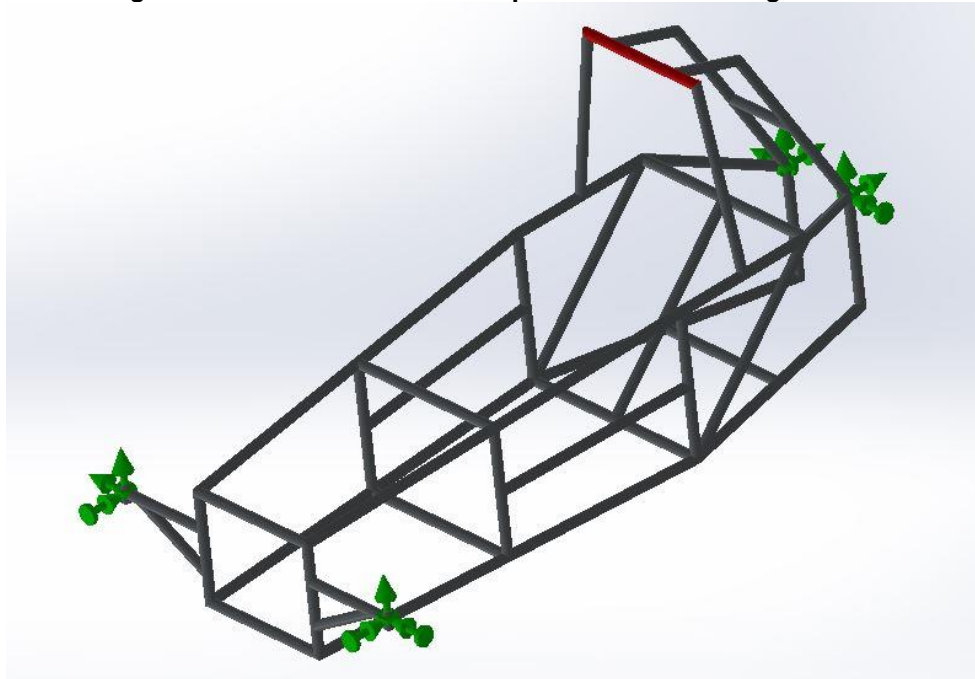
Nome:	6061-T6 (SS)
Tipo de modelo:	Isotrópico linear elástico
Critério de falha predeterminado:	Tensão de von Mises máxima
Limite de escoamento:	2.75e+008 N/m²
Resistência à tração:	3.1e+008 N/m²
Módulo elástico:	6.9e+010 N/m²
Coeficiente de Poisson:	0.33

Fonte: Banco de dados do SolidWorks, 2016.

3.4 CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

De acordo com o regulamento da Shell Eco-Marathon determina que a barra de rolagem do protótipo deve suportar uma determinada carga, para que assim possa comprovar que é capaz de proteger o piloto em caso de capotamento. O local onde será aplicado o carregamento, representado na barra em vermelho, e os pontos onde a estrutura é fixa, representado por pontos em verde, pode ser observado na figura 19.

Figura 19. Pontos fixos e barra que receberá o carregamento.



Fonte: Autoria própria, 2017.

3.4.1 Carregamentos

Segundo o regulamento o arco deve suportar uma carga estática de 700 N sem que sofra uma grande deformação. Além da carga exigida em cada carregamento foi aplicado um fator de segurança de $n=1,5$ para que possa dar uma maior segurança ao piloto. Com isso a carga aplicada no arco de rolagem ficou conforme a equação.

$$Q_x' = nQ \quad (27)$$

$$Q_y' = nQ \quad (28)$$

$$Q_z' = nQ \quad (29)$$

Quadro 4. Carregamentos aplicados no arco de proteção.

Carregamento	Carga (N)
Q_x'	1050
Q_y'	1050
Q_z'	1050

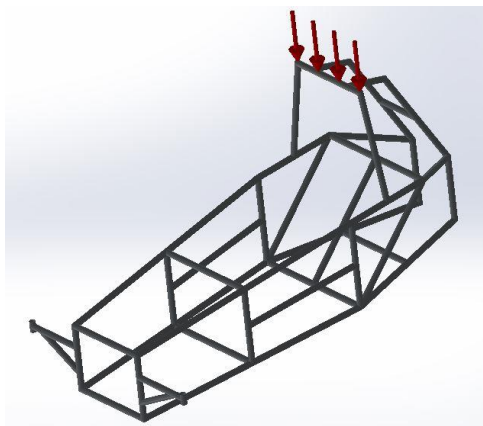
Fonte: Autoria própria, 2017.

3.5 SIMULAÇÕES

Foram realizadas simulações no *Software SolidWorks* instalado em um computador com um processador Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU @ 1.70GHz a 2.40 GHz com uma memória RAM de 4,00GB para assim determinar qual é o perfil mais indicado para a construção do protótipo.

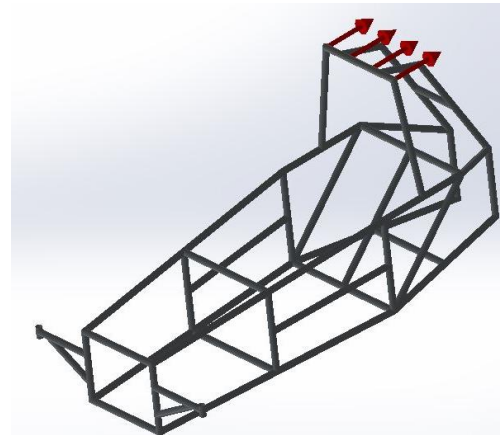
As cargas foram aplicadas conforme as figuras 20, 21 e 22:

Figura 20. Aplicação da carga vertical.



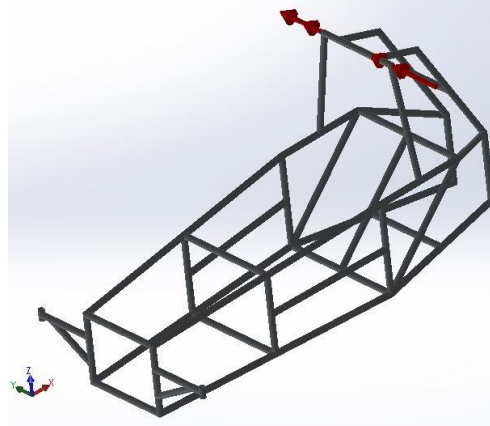
Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 21. Aplicação da carga horizontal



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 22. Aplicação da carga perpendicular.



Fonte: Autoria própria, 2017.

A seguir são mostrados os resultados encontrados nas simulações para o determinado chassi com os tipos de perfis diferentes. Nas figuras 23 a 46 são apresentados os resultados das análises pelo MEF, as figuras apresentam algumas esferas em lilás, elas não fazem parte dos resultados são apenas junções entre cada viga.

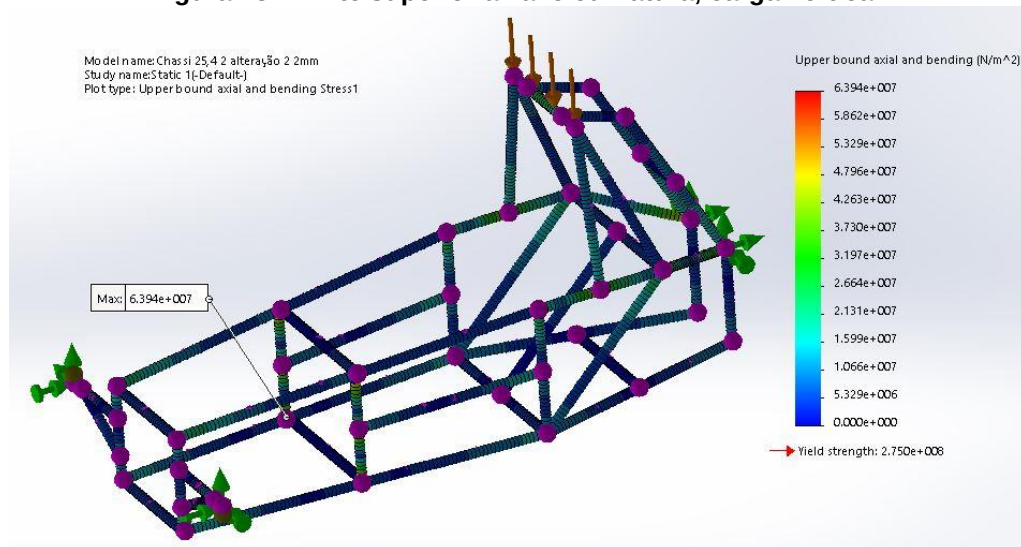
1. Chassi com perfil de 25,4mm de diâmetro e 2mm de espessura.

a) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção vertical.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

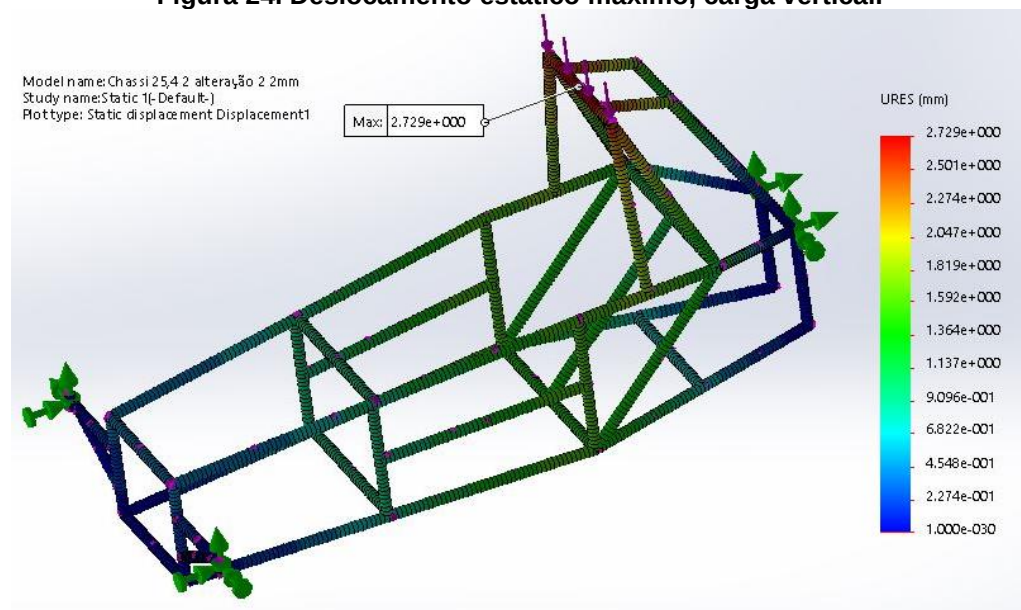
- Limite superior axial e curvatura de 63,6 MN/m², o local onde ocorreu é apresentado na figura 23;
- Deslocamento estático máximo de 2,729 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem, como mostra na figura 24;
- Massa do chassi 6,436 kg.

Figura 23. Limite superior axial e curvatura, carga vertical.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 24. Deslocamento estático máximo, carga vertical.



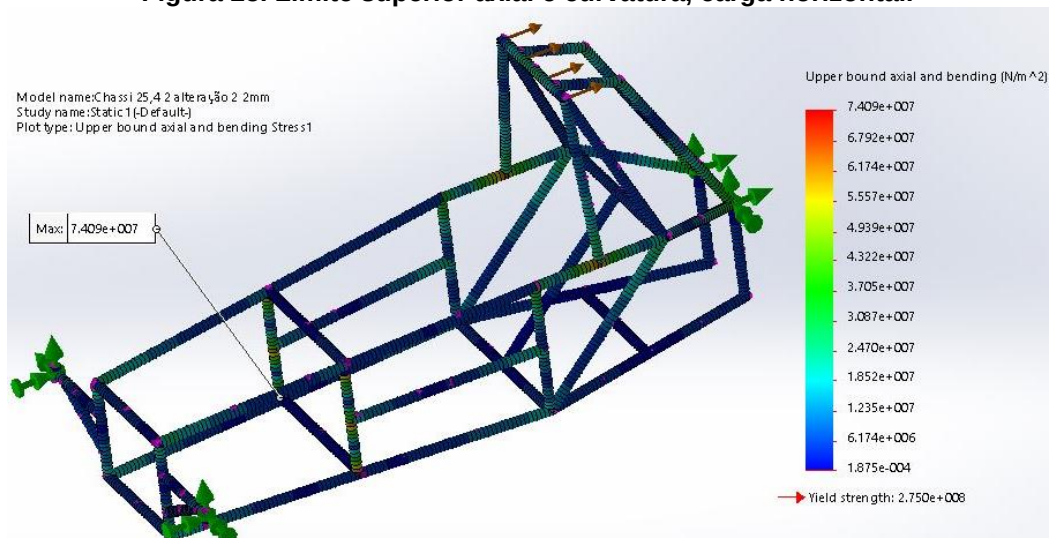
Fonte: Autoria própria, 2017.

b) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção horizontal.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

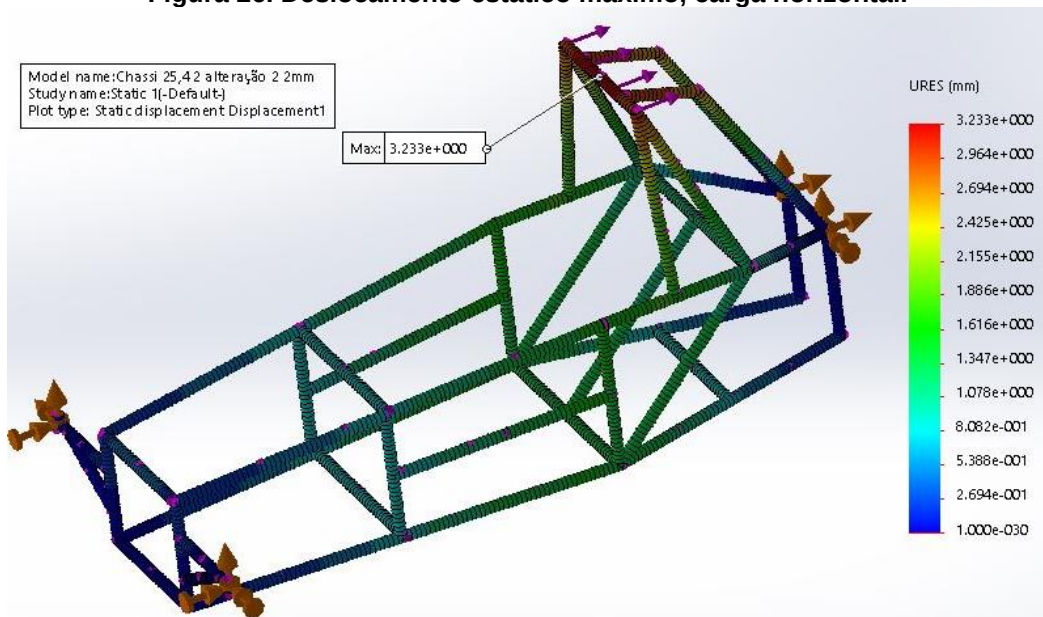
- Limite superior axial e curvatura de 74,09 MN/m², o local onde ocorreu é apresentado na figura 25;
- Deslocamento estático máximo de 3,233 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem, como mostra na figura 26;
- Massa do chassi 6,436 kg.

Figura 25. Limite superior axial e curvatura, carga horizontal.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 26. Deslocamento estático máximo, carga horizontal.



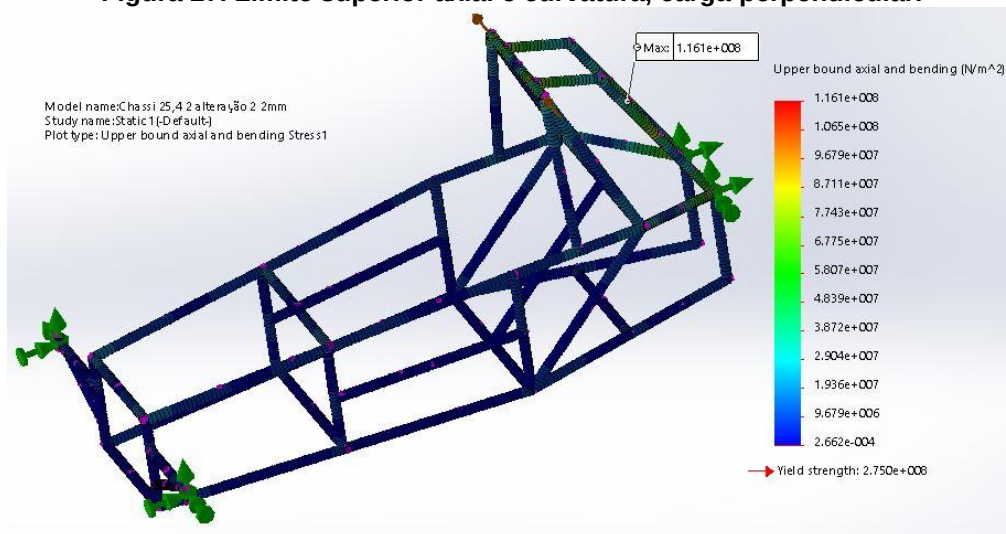
Fonte: Autoria própria, 2017.

c) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção perpendicular.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

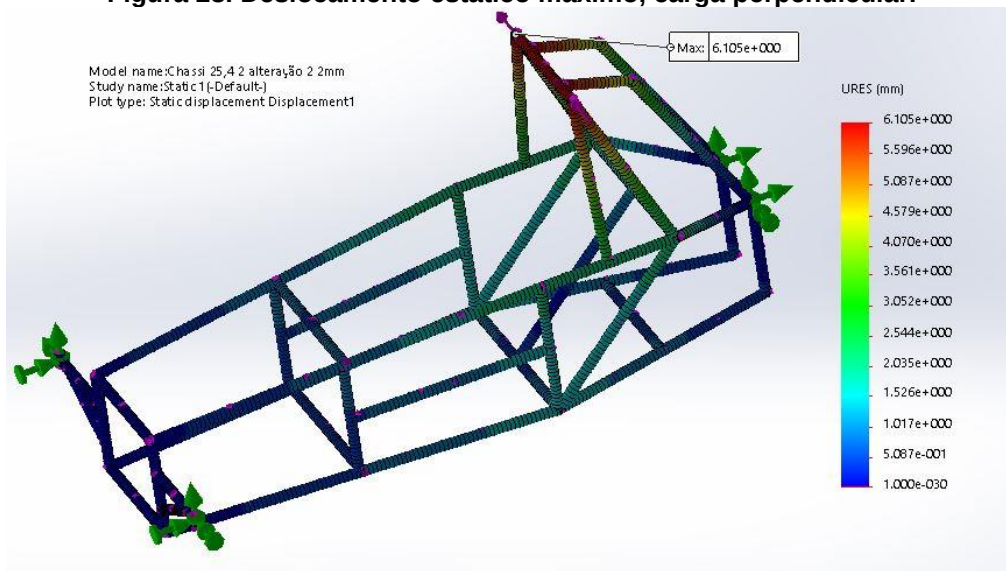
- Limite superior axial e curvatura 116,1 MN/m², o local onde ocorreu é apresentado na figura 27;
- Deslocamento estático máximo de 6,105 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem, como mostra na figura 28;
- Massa do chassi 6,436 kg.

Figura 27. Limite superior axial e curvatura, carga perpendicular.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 28. Deslocamento estático máximo, carga perpendicular.



Fonte: Autoria própria, 2017.

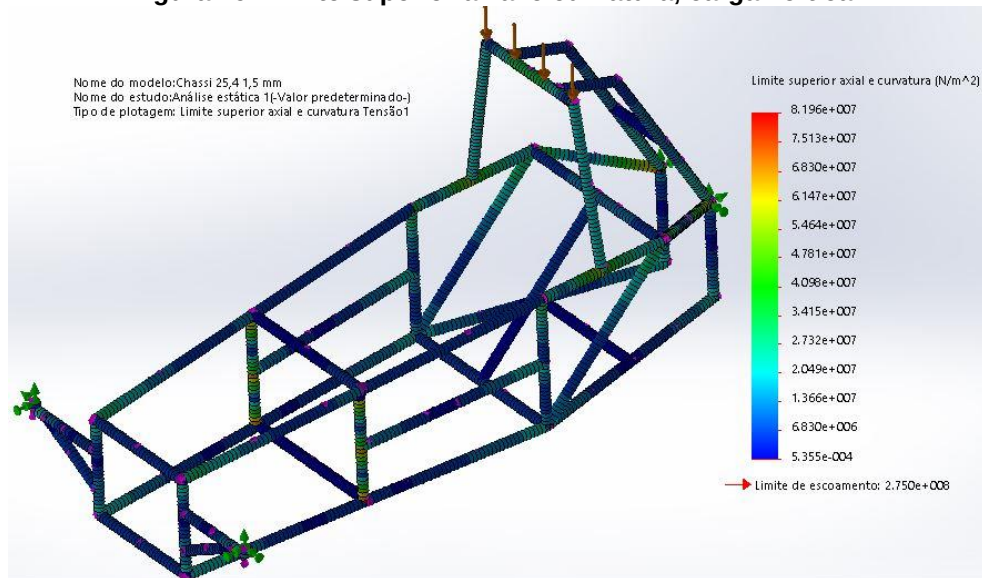
2. Chassi com perfil de 25,4mm de diâmetro e 1,5mm de espessura.

a) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção vertical.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

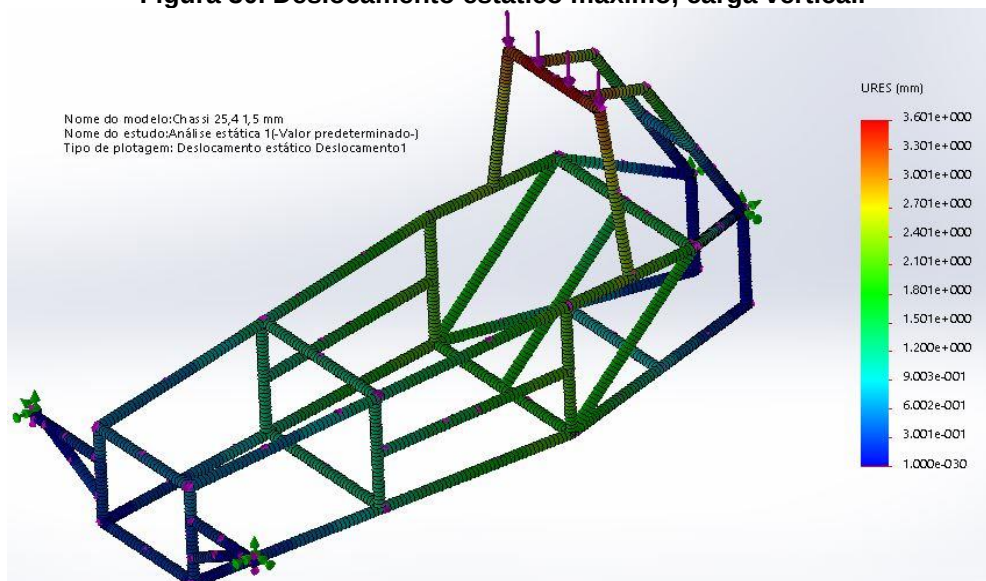
- Limite superior axial e curvatura de 81,96 MN/m², o ponto de máximo foi encontrado no mesmo ponto do apresentado na figura 23;
- Deslocamento estático máximo de 3,601mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem assim como na figura 24;
- Massa do chassi 4,929 kg.

Figura 29. Limite superior axial e curvatura, carga vertical.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 30. Deslocamento estático máximo, carga vertical.



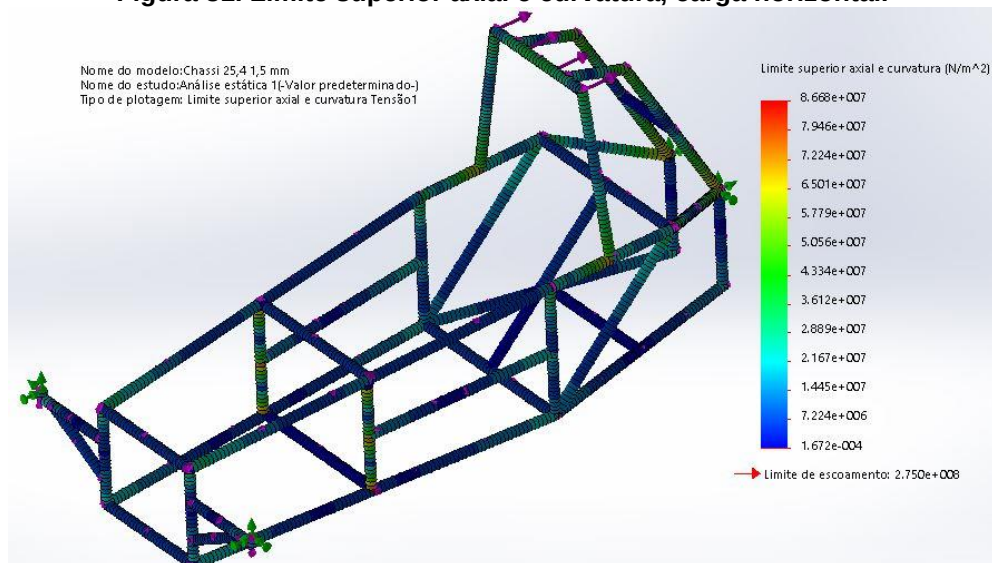
Fonte: Autoria própria, 2017.

b) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção horizontal.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

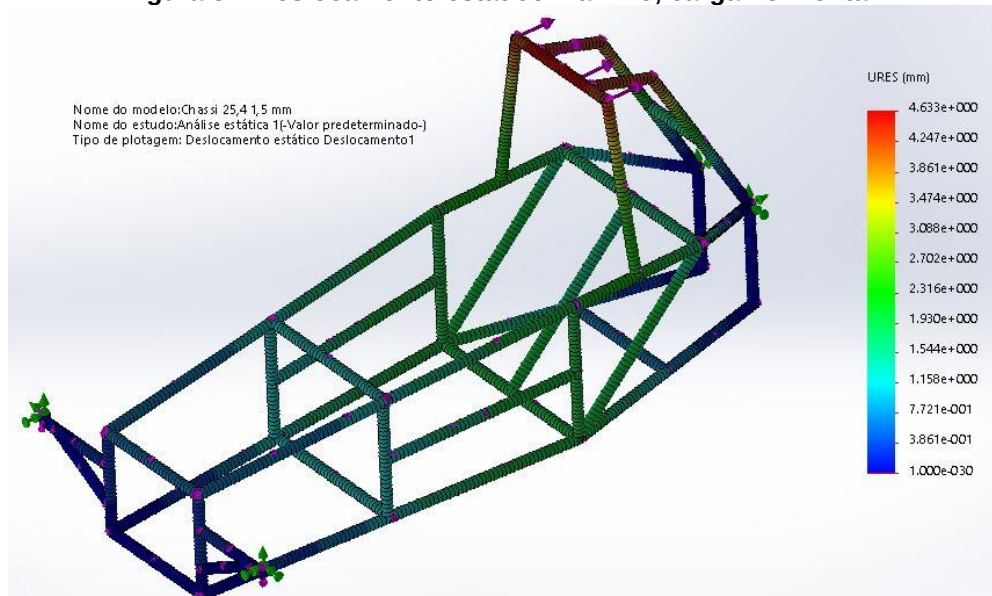
- Limite superior axial e curvatura de 86,68 MN/m², o ponto de máximo foi encontrado no mesmo ponto do apresentado na figura 25;
- Deslocamento estático máximo de 4,633 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem assim como na figura 26;
- Massa do chassi 4,929 kg.

Figura 31. Limite superior axial e curvatura, carga horizontal.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 32. Deslocamento estático máximo, carga horizontal.



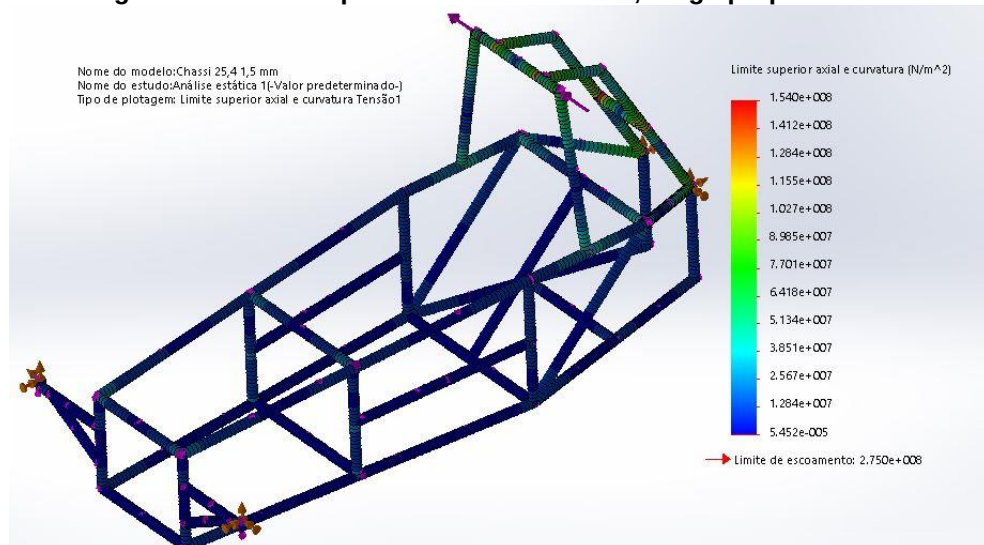
Fonte: Autoria própria, 2017.

c) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção perpendicular.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

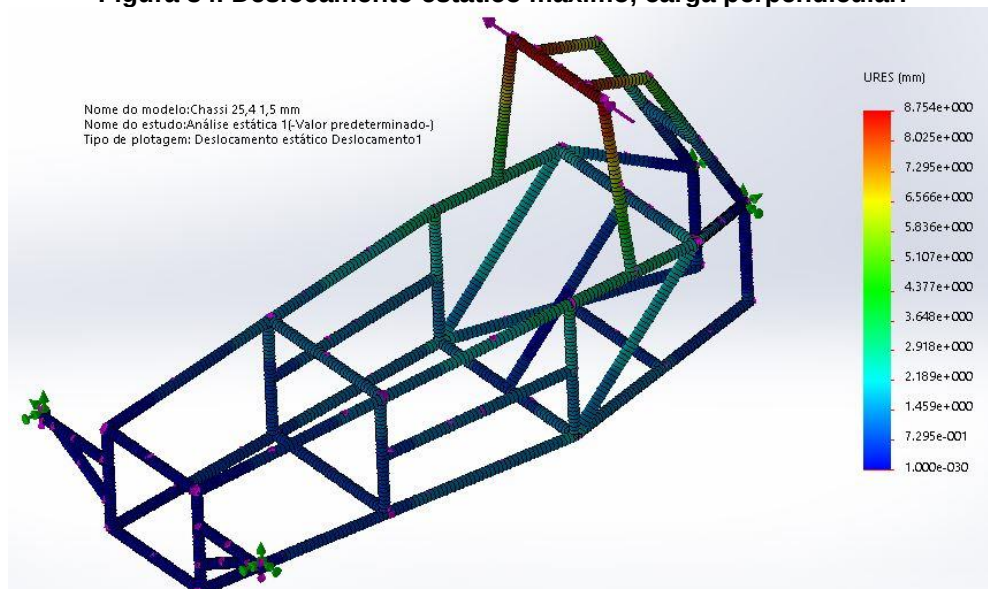
- Limite superior axial e curvatura de 154,00 MN/m², o ponto de máximo foi encontrado no mesmo ponto do apresentado na figura 27;
- Deslocamento estático máximo de 8,754 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem assim como na figura 28;
- Massa do chassi 4,929 kg.

Figura 33. Limite superior axial e curvatura, carga perpendicular.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 34. Deslocamento estático máximo, carga perpendicular.



Fonte: Autoria própria, 2017.

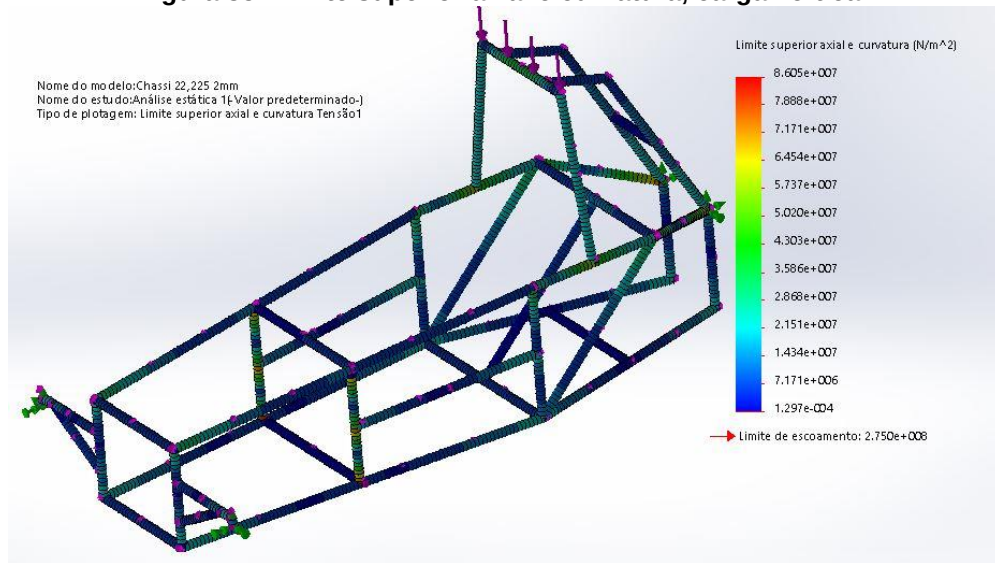
3. Chassi com perfil de 22,225mm de diâmetro e 2mm de espessura.

- a) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção vertical.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

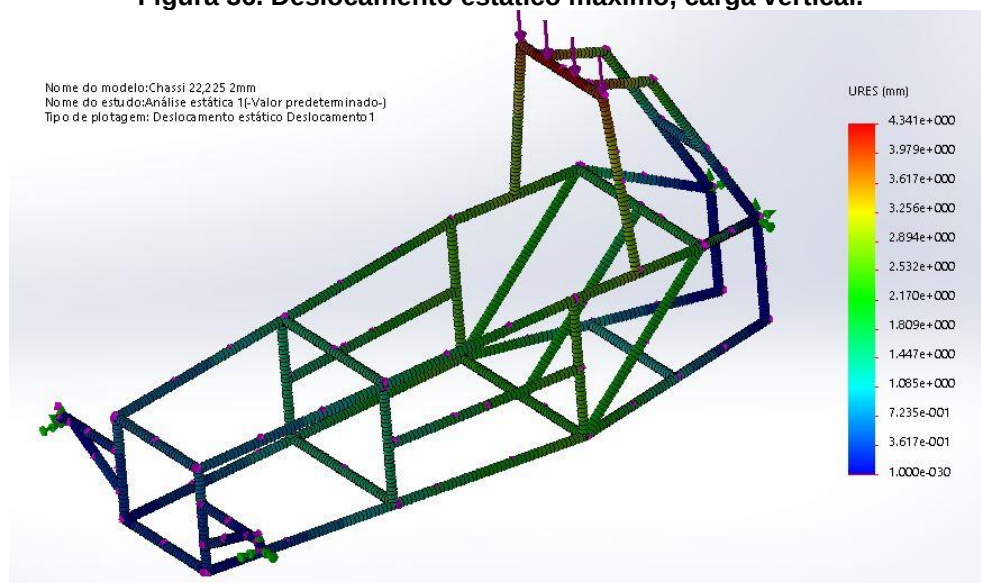
- Limite superior axial e curvatura de 86,05 MN/m², o ponto de máximo foi encontrado no mesmo ponto do apresentado na figura 23;
- Deslocamento estático máximo de 4,341 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem assim como na figura 24;
- Massa do chassi 5,592 kg.

Figura 35. Limite superior axial e curvatura, carga vertical.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 36. Deslocamento estático máximo, carga vertical.



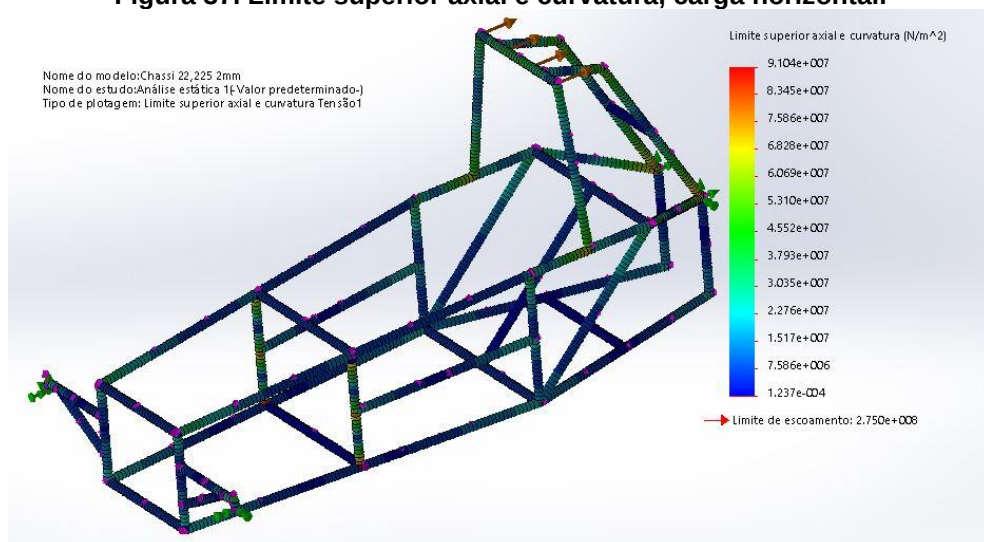
Fonte: Autoria própria, 2017.

b) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção horizontal.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

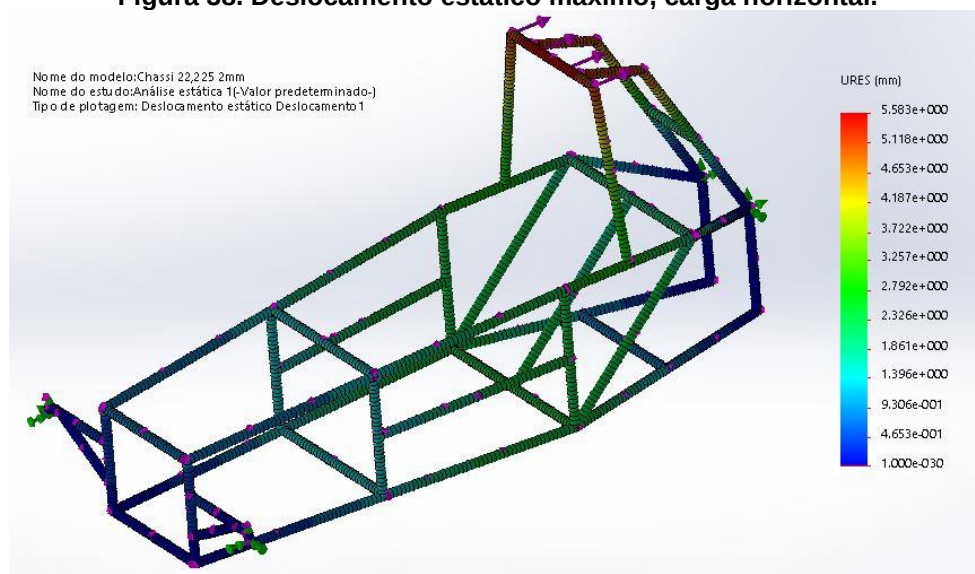
- Limite superior axial e curvatura de 91,04 MN/m², o ponto de máximo foi encontrado no mesmo ponto do apresentado na figura 25;
- Deslocamento estático máximo de 5,583 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem assim como na figura 26;
- Massa do chassi 5,592 kg.

Figura 37. Limite superior axial e curvatura, carga horizontal.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 38. Deslocamento estático máximo, carga horizontal.



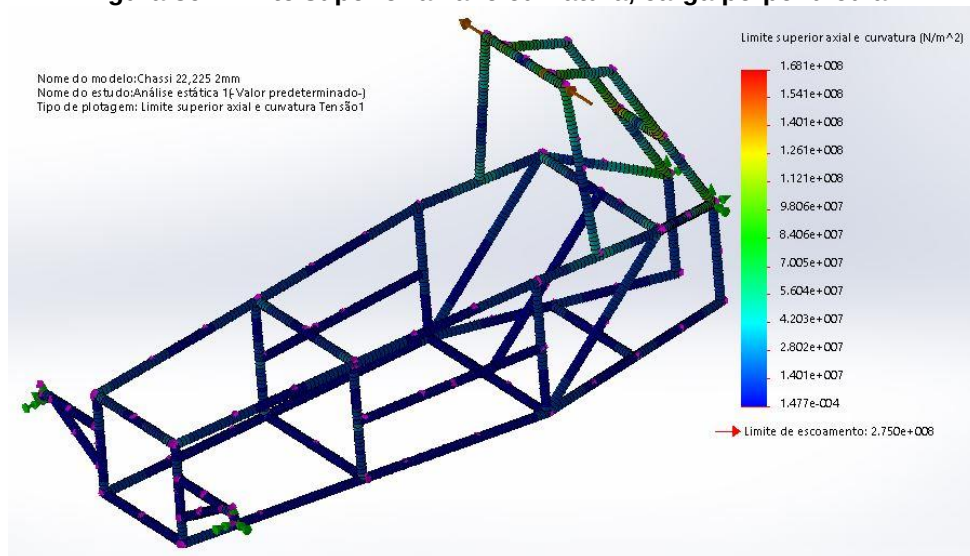
Fonte: Autoria própria, 2017.

c) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção perpendicular.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

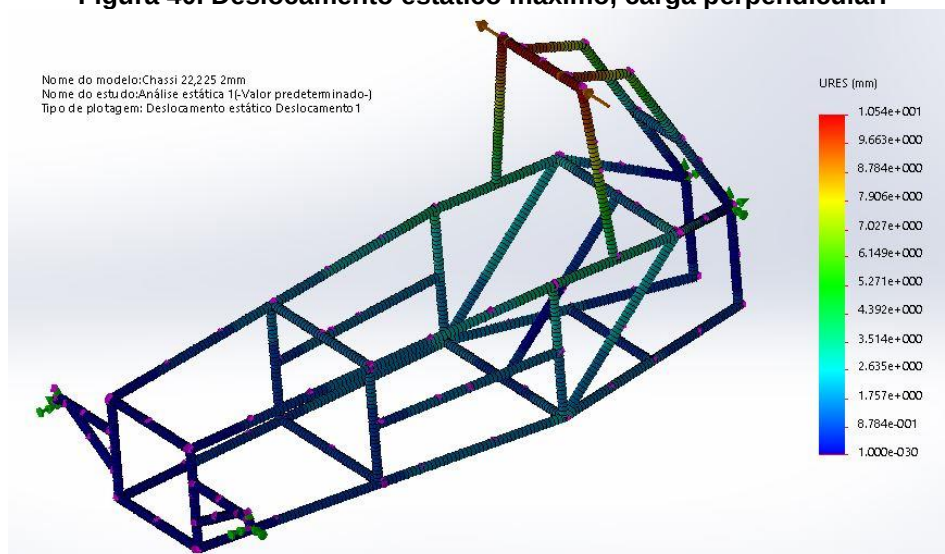
- Limite superior axial e curvatura de 168,1 MN/m², o ponto de máximo foi encontrado no mesmo ponto do apresentado na figura 27;
- Deslocamento estático máximo de 10,54 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem assim como na figura 28;
- Massa do chassi 5,592kg.

Figura 39. Limite superior axial e curvatura, carga perpendicular.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 40. Deslocamento estático máximo, carga perpendicular.



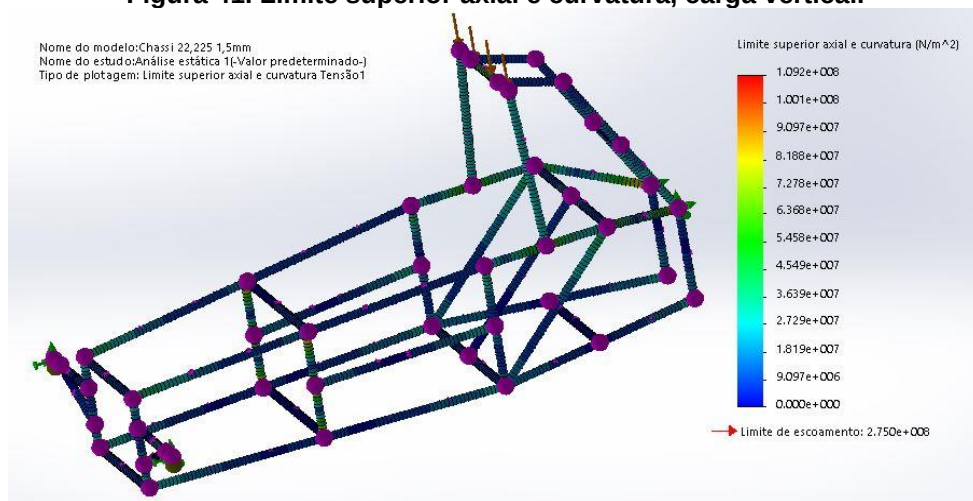
Fonte: Autoria própria, 2017.

4. Chassi com perfil de 22,225mm de diâmetro e 1,5mm de espessura.
- a) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção vertical.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

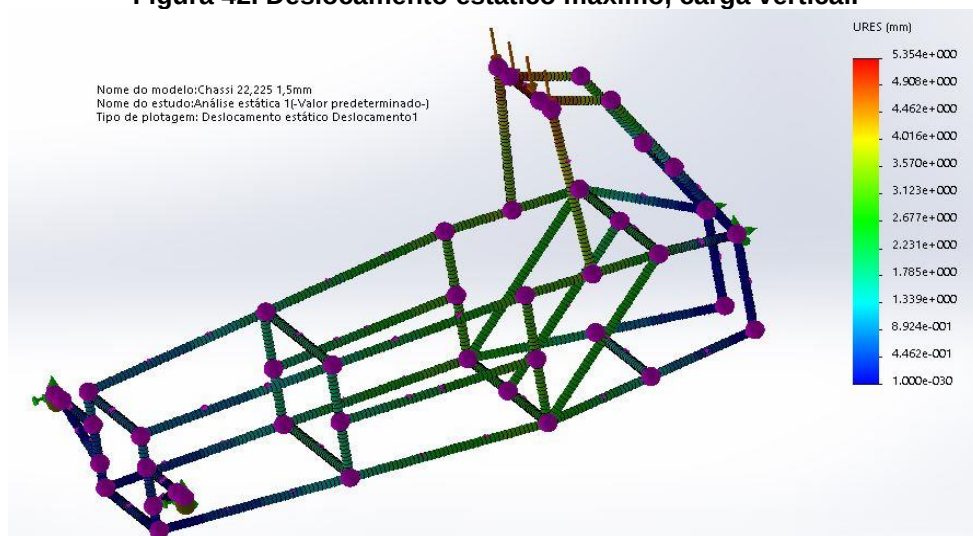
- Limite superior axial e curvatura de 108,2 MN/m², o ponto de máximo foi encontrado no mesmo ponto do apresentado na figura 23;
- Deslocamento estático máximo de 5,354 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem assim como na figura 24;
- Massa do chassi 4,297 kg.

Figura 41. Limite superior axial e curvatura, carga vertical.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 42. Deslocamento estático máximo, carga vertical.



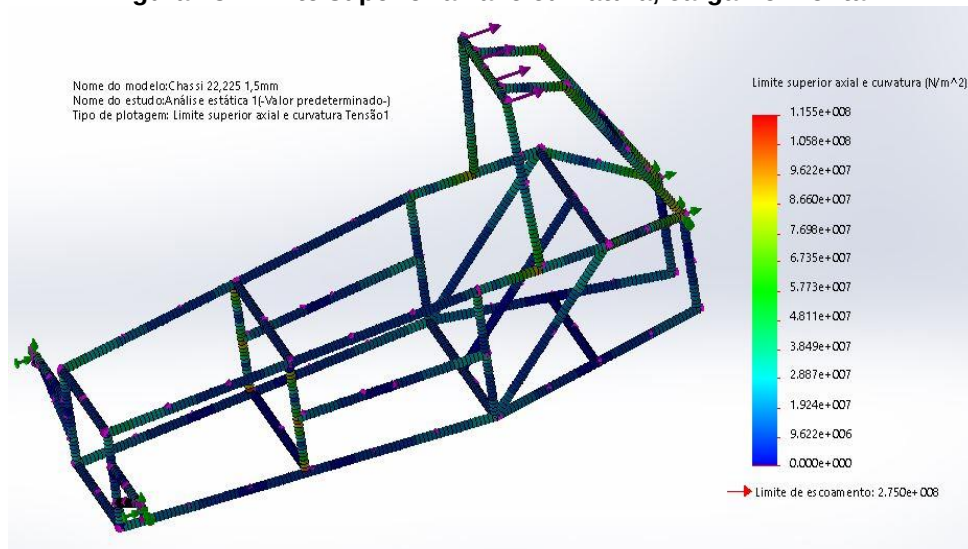
Fonte: Autoria própria, 2017.

b) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção horizontal.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

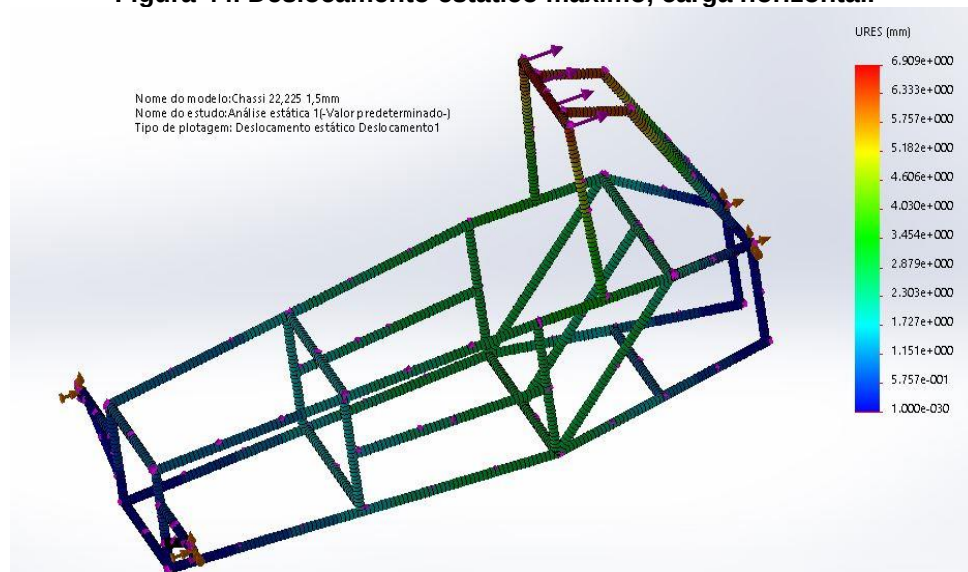
- Limite superior axial e curvatura de 115,5 MN/m², o ponto de máximo foi encontrado no mesmo ponto do apresentado na figura 25;
- Deslocamento estático máximo de 6,909 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem assim como na figura 26;
- Massa do chassi 4,297 kg.

Figura 43. Limite superior axial e curvatura, carga horizontal.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 44. Deslocamento estático máximo, carga horizontal.



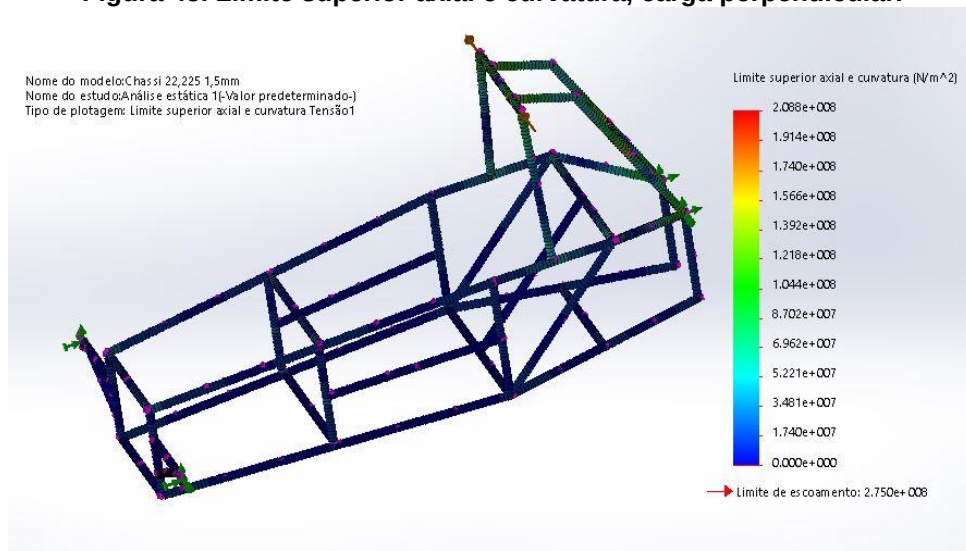
Fonte: Autoria própria, 2017.

c) Foi aplicada uma carga de 1050 N na direção perpendicular.

Feitas as simulações, foram encontrados os seguintes resultados:

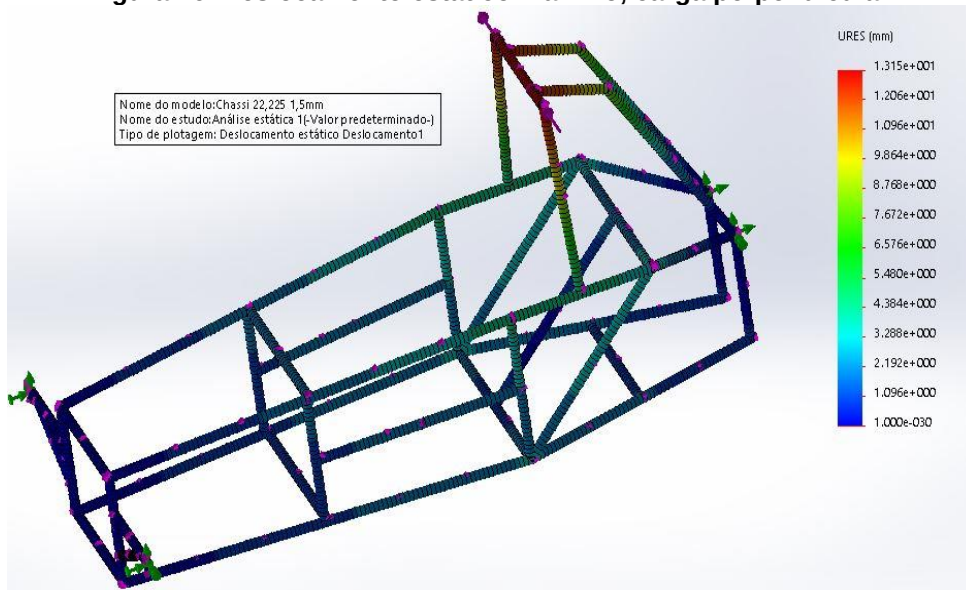
- Limite superior axial e curvatura de 208,8 MN/m², o ponto de máximo foi encontrado no mesmo ponto do apresentado na figura 27;
- Deslocamento estático máximo de 13,15 mm ocorreu como já esperado na barra de rolagem assim como na figura 28;
- Massa do chassi 4,297 kg.

Figura 45. Limite superior axial e curvatura, carga perpendicular.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 46. Deslocamento estático máximo, carga perpendicular.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Quadro 5. Resumo dos resultados.

Resultados das simulações do Chassi (deformação)				
Perfil	Massa (Kg)	Horizontal (mm)	Vertical (mm)	Perpendicular (mm)
A	6,436	3,233	2,729	6,105
B	4,929	4,633	3,601	8,754
C	5,592	5,583	4,341	10,54
D	4,297	6,909	5,354	13,15

Fonte: Autoria própria, 2017.

4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

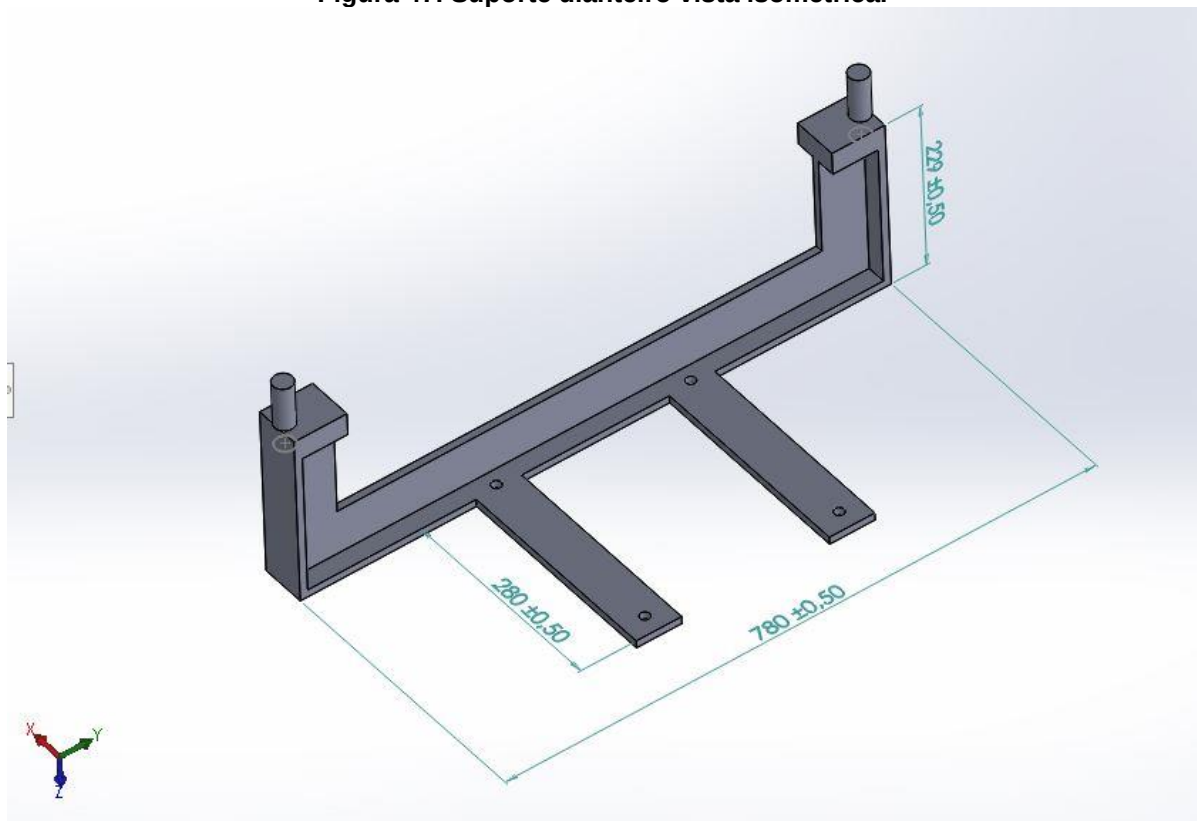
4.1 BANCADA

A fim de uma confirmação dos dados encontrados pelo MEF foi construída uma bancada para testar o chassi, e assim, a partir dos valores encontrados, validar os resultados encontrados pelo método numérico.

Para a confecção da bancada de ensaio foram construídos dois suportes para serem fixados em duas colunas de concreto, como também dois suportes para auxílio na aplicação da carga.

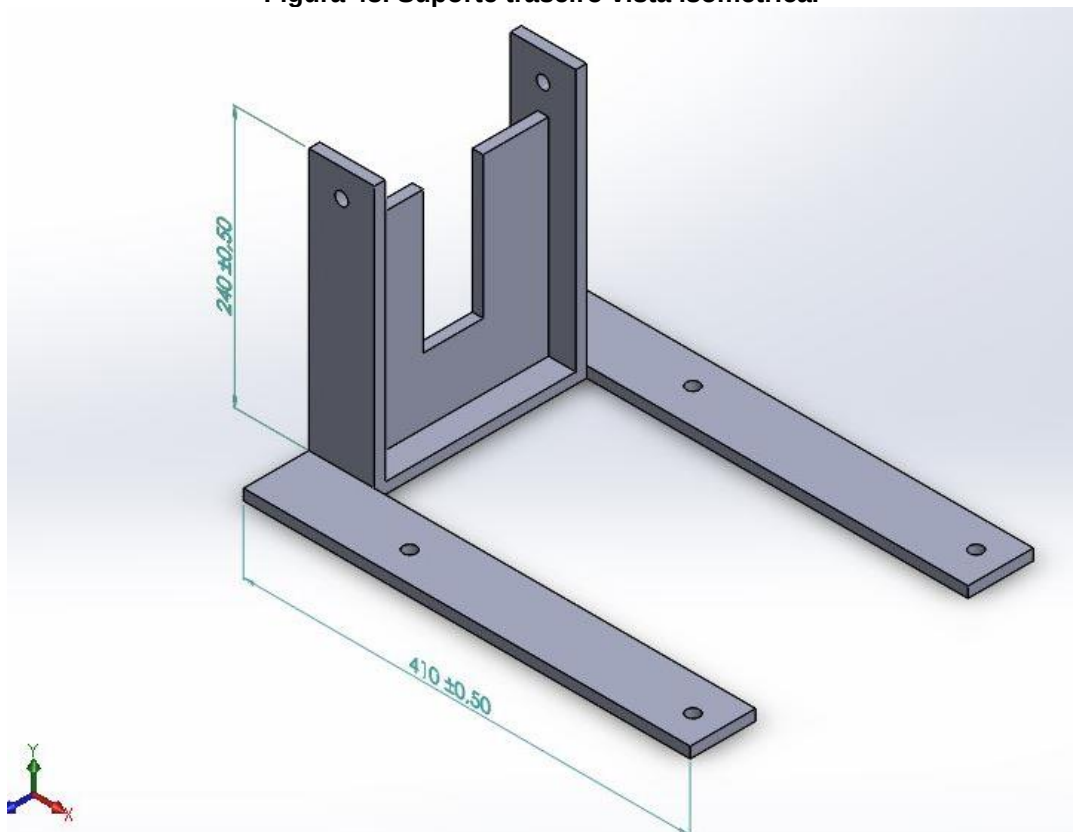
Todos os suportes foram construídos utilizando um perfil retangular 10 mm x 50 mm em aço SAE 1020. As figuras 47 e 48 apresentam como ficaram os suportes do chassi e nas figuras 51 e 52 os suportes para as cargas (medidas em milímetros).

Figura 47. Suporte dianteiro vista isométrica.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 48. Suporte traseiro vista isométrica.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Cada um dos suportes apresentados anteriormente foi fixado em uma base de concreto utilizando quatro parabolts como o exemplo a baixo.

Figura 49. Exemplo de parabolts.



Fonte: Catálogo da fabricante, 2017.

Após a construção dos suportes para o chassi foi observado que o suporte dianteiro sofria com uma deformação torcional e para solucionar esse problema acrescentou-se uma chapa nas exterminadas formando uma viga em “I”, como apresentado na figura a seguir.

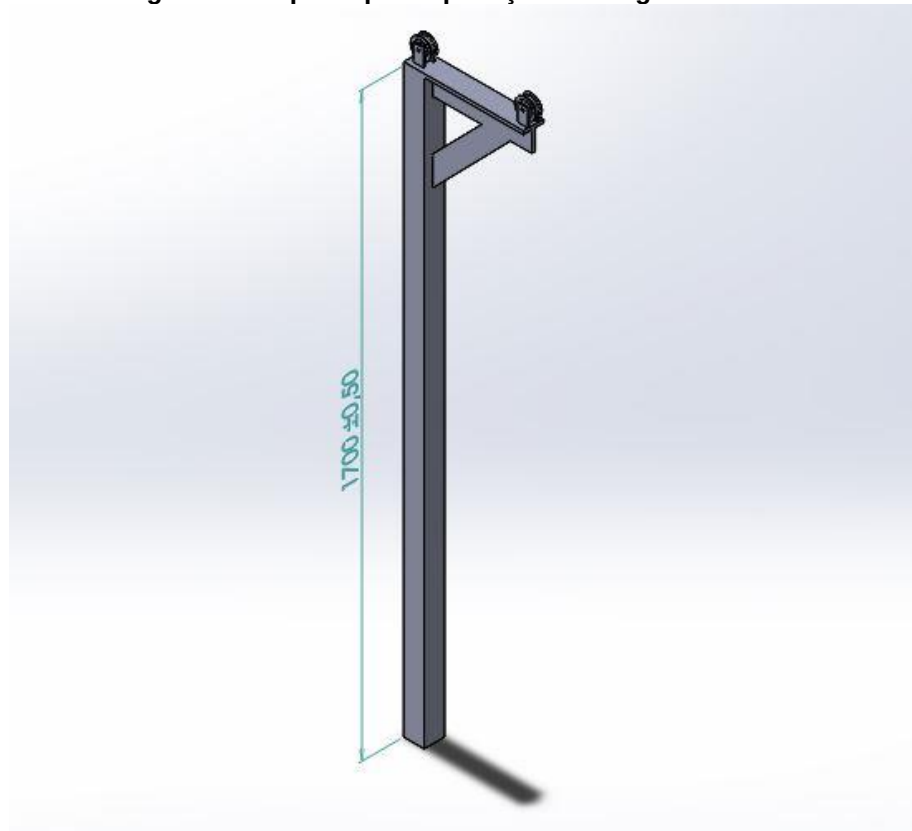
Figura 50. Alteração no projeto inicial.



Fonte: Autoria própria, 2017.

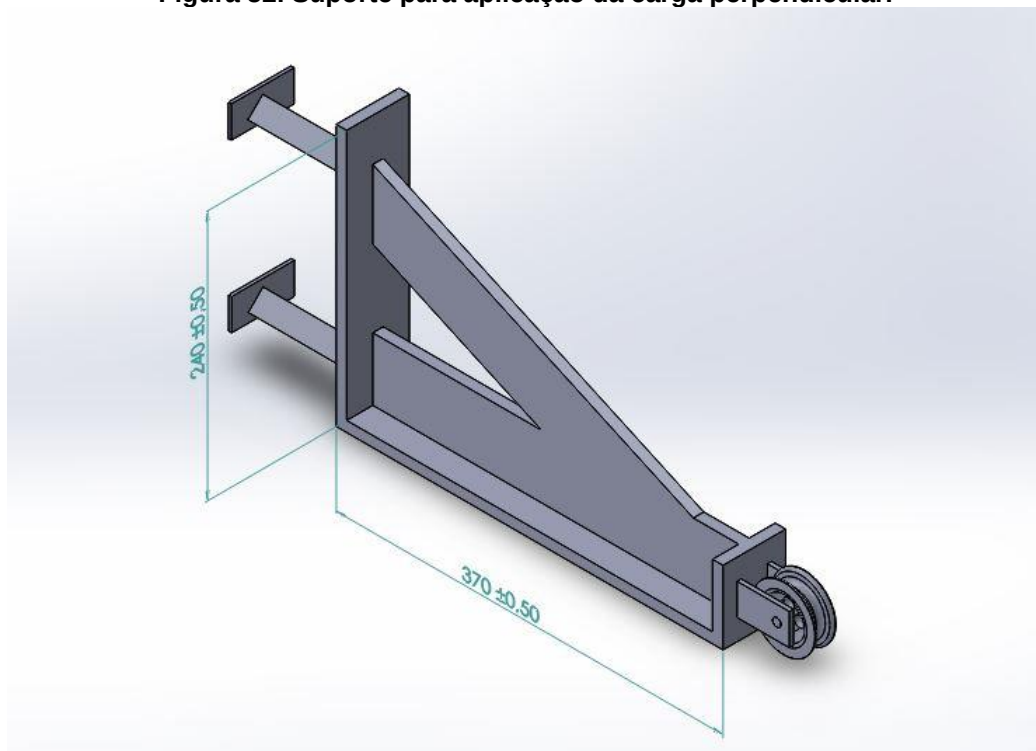
Para que fosse possível a aplicação das cargas nas direções estabelecidas pelo regulamento foi construída dois suportes, um para aplicação da carga horizontal e outro para aplicação da carga perpendicular (medidas em milímetros), assim como os suportes de fixação do chassi, foi utilizado o perfil retangular 10 mm x 50 mm em aço SAE 1020 porem foi acrescentado o perfil quadrado de 50 mm x 50 mm em aço SAE 1020.

Figura 51. Suporte para aplicação da carga horizontal.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 52. Suporte para aplicação da carga perpendicular.



Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2 ENSAIOS

Assim como nas simulações realizadas pelo MEF, os ensaios foram realizados aplicando uma carga de 1050 N nos mesmos sentidos determinados pelo regulamento e os pontos de fixação também foram os mesmos utilizados no software. O chassi utilizado para esse ensaio utiliza o perfil “A”.

Figura 53. Pontos de fixação dianteiro do chassi.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 54. Pontos de fixação dianteiro do chassi.

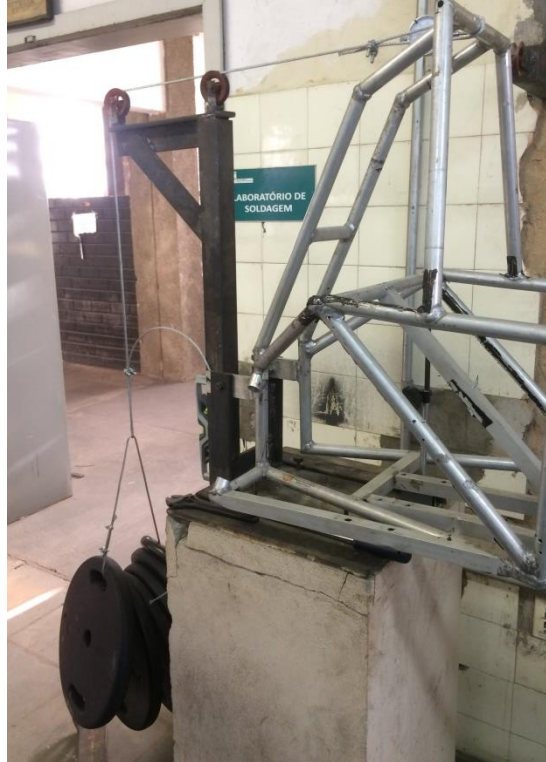


Fonte: Autoria própria, 2017.

Para aplicação das cargas foram utilizados cinco anilhas de academia de 20 kg e um anilha de 5 Kg, formando assim 105 Kg aproximadamente 1050 N, admitindo-se à aceleração da gravidade em 10 m/s^2 . As anilhas foram unidas utilizando um cabo

de aço de 8 mm de diâmetro e foram suspensas e ligadas por um segundo cabo de aço ao ponto onde se queria aplicar a carga.

Figura 55. Exemplo de aplicação de carga.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Foi utilizado um relógio comparador com precisão de 0,01 mm, figura 58, para que assim fosse possível quantificar a deformação que o chassi sofreu após a aplicação da carga. O relógio comparador foi colocado em contato com o chassi aproximadamente no ponto onde este sofreu a maior deformação.

Figura 56. Relógio comparador.



Fonte: Site www.lojadomecanico.com.br, 2017

4.2.1 Aplicação da carga vertical

Para a aplicação da carga foi erguida a massa com o auxílio de um guincho hidráulico para que fosse possível aplicar lentamente a carga e não provocar um grande momento, o que poderia influenciar nos resultados.

Figura 57. Relógio comparador antes da aplicação da carga vertical.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 58. Aplicação da carga vertical.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 59. Relógio comparador após a aplicação da carga vertical.

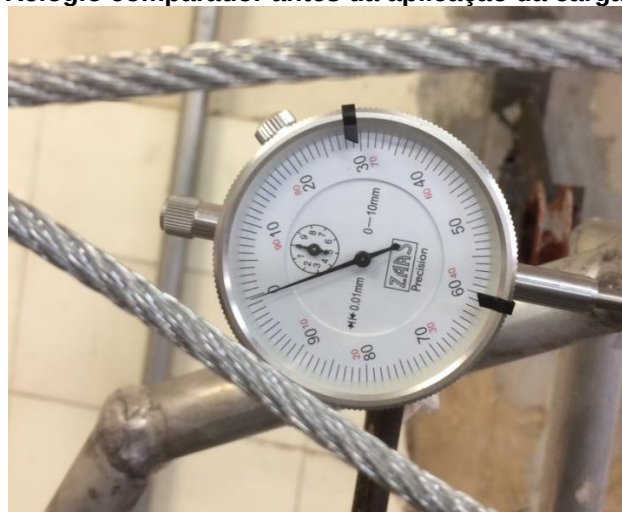


Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.2 Aplicação da carga horizontal

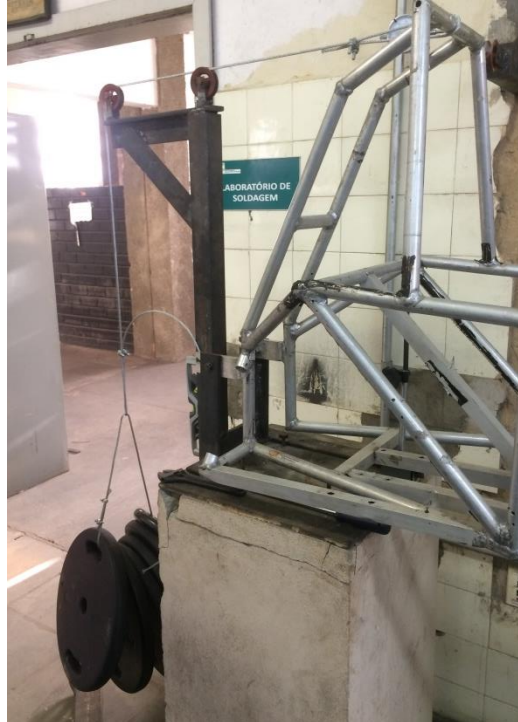
Assim como na aplicação da carga anterior, foi utilizado um guincho hidráulico.

Figura 60. Relógio comparador antes da aplicação da carga horizontal.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 61. Aplicação da carga horizontal.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 62. Relógio comparador após a aplicação da carga horizontal.



Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.3 Aplicação da carga perpendicular

Foi aplicada a carga perpendicular com o auxílio de uma talha manual devido à dificuldade do acesso ao local. A forma ideal para aplicação desse carregamento seria seguindo um plano onde o aumento da carga seria gradual e já predefinido, para assim evitar o efeito de impacto no ponto de aplicação. Para a medição dessa

deformação, devido à dificuldade encontrada, foi feito o inverso, o relógio comparador foi posicionado de uma forma onde a ponta já estava marcando um deslocamento e logo após a aplicação da carga ela irá se deslocar buscando sua posição de estado normal, com isso o deslocamento do chassi será encontrado através da subtração da marcação do estado inicial com a marcação final.

Figura 63. Relógio comparador antes da aplicação da carga perpendicular



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 64. Relógio comparador após a aplicação da carga perpendicular.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Como é possível visualizar na figura 64, a deformação encontrada foi maior que a abertura máxima do relógio comparador, que é de 10 mm, e isso ocorreu devido a uma falha estrutural não esperada na base de concreto, que não foi capaz de suportar a carga e acabou sofrendo uma fratura, como mostrado na figura a seguir.

Figura 65. Suporte danificado.



Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.4 Deformações

Após ensaios apresentados no item anterior, as medições mais significativas realizadas são apresentadas no quadro 4.

Quadro 6. Deformações reais.

Posição	Marcação		
	Inicial (mm)	Final (mm)	Resultado (mm)
Horizontal	0,00	0,86	0,86
Perpendicular	8,00	Não determinado	Não determinado
Vertical	1,00	2,63	1,63

Fonte: Autoria própria, 2017.

Devido ao problema encontrado durante a análise na posição perpendicular só foi possível determinar a deformação nas posições horizontal e vertical. Por isso, para as próximas análises serão utilizados apenas os dois resultados encontrados.

Como a estrutura foi comprometida durante o ensaio de carregamento na posição perpendicular, durante os outros ensaios de carregamentos em outras direções, esta falha na fixação do suporte traseiro também não deve ter proporcionado a condição fundamental de indeslocabilidade dos apoios, apesar da utilização de parabolts.

A diferença entre as leituras dos relógios comparadores e os resultados obtidos no Software SolidWorks deve ter sido motivada por esta falha de fixação dos suportes nas peças de concreto que serviram de base para os experimentos.

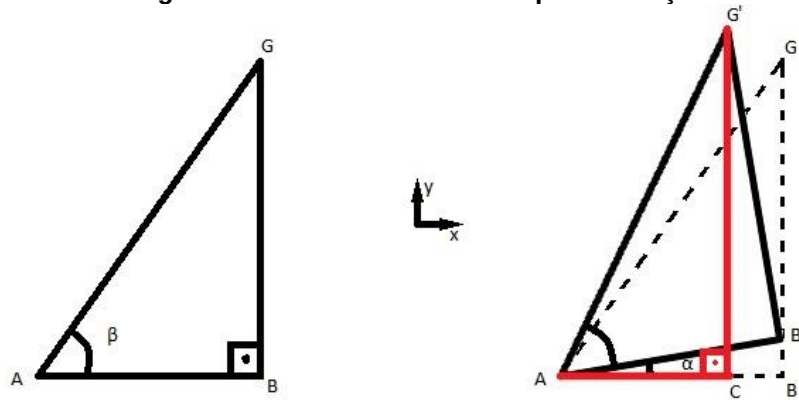
Para demonstrar que por menor que tenha sido o deslocamento do suporte quando da aplicação da carga durante os ensaios, imperceptível a olho nu, basta uma análise simplificada da situação. Com uma rotação do suporte traseiro de apenas $0,5^\circ$ no sentido anti-horário já se obtém valores significativos de deslocamentos da barra de rolagem. Na figura a seguir o comprimento “AC” é a distância, no eixo x, entre o ponto fixo no suporte e a projeção da barra de rolagem e o comprimento “BG” é a distância, no eixo y, deste ponto até a própria barra de rolagem.

Figura 66. Distancias para cálculo de rotação.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 67. Geometrias antes e após a rotação.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Foi utilizado uma trena para encontrar os comprimentos “AB” e “CG” e com a utilização delas nas equações trigonométricas é possível encontrar o valor do ângulo β . Como apresentado na figura anterior a estrutura sofreu uma rotação de α graus o que fez com que os vértices G e B se deslocasse. Sendo o principal objetivo encontrar as coordenadas do ponto G', que é o ponto onde se encontra o relógio comparador, descartaremos as coordenadas do ponto B' e utilizaremos apenas a do ponto G'. A forma utilizada para encontrar as coordenadas do ponto G' foi criar um novo triângulo reto imaginário acrescentando o vértice C, o novo triângulo é formado com os vértices A, C e G', com isso é possível descobrir os comprimentos de AC e CG' através da trigonometria. Para encontrar o deslocamento de vértice G se utiliza duas equações uma para o deslocamento no eixo “x”(equação 33) e outra para o eixo “y” (equação 34).

$$\sin \phi = \frac{\text{Medida do cateto oposto ao angulo}}{\text{Hipotenusa}} \quad (30)$$

$$\cos \phi = \frac{\text{Medida do cateto adjacente ao angulo}}{\text{Hipotenusa}} \quad (31)$$

$$\tan \phi = \frac{\text{Medida do cateto oposto ao angulo}}{\text{Medida do cateto adjacente ao angulo}} \quad (32)$$

$$\Delta G_x = |\overline{AB} - \overline{AC}| \quad (33)$$

$$\Delta G_y = |\overline{BG} - \overline{CG'}| \quad (34)$$

Quadro 7. Valores encontrados para o deslocamento.

Parte	Uní. MM	Ângulos	Uní. Graus	Uní. Rad.
BG	516,73	α	0,500	0,009
AB	755,49	β	34,371	0,600
AC	750,95	Deslocamentos		Uní. MM
AG	915,30	Dx		4,54
CG'	523,30	Dy		6,57

Fonte: Autoria própria, 2017.

O motivo pelo qual não foi construído um novo suporte para realizar os ensaios experimentais é que todo o material disponibilizado pela instituição foi utilizado para a construção do primeiro suporte o que tornou inviável a aquisição de novos materiais, como também necessitaria de uma nova base de concreto pois a primeira sofreu uma falha e não existia disponibilidade de local e nem de material. O caminho encontrado foi a realização de uma validação dos resultados encontrados no *Software*, como apresentado no próximo tópico.

4.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS POR MEF

Devido às dificuldades de validação dos resultados encontrados pelo MEF na análise de todo o chassi, decidiu-se buscar uma nova forma de validação, que foi a de simplificar o corpo estudado para um corpo de prova, onde essa amostra foi testada em uma máquina universal de ensaios, SHIMADZU, modelo Autograph AG-X 300kN, figura 70 e 71.

Figura 68. Máquina universal de ensaios, SHIMADZU, modelo Autograph AG-X 300kN.



Fonte: Autoria própria, 2017.

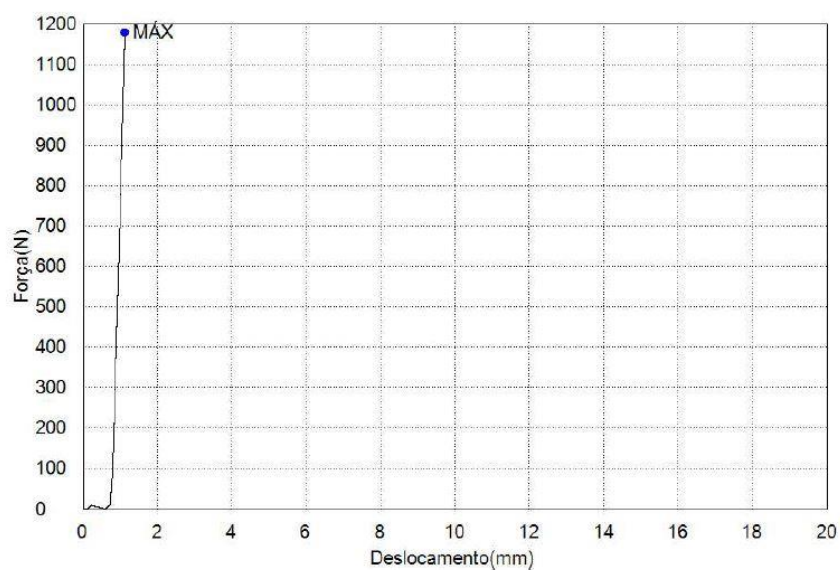
O perfil tubular utilizado para o ensaio é feito do mesmo material empregado no chassi, a liga de alumínio ASTM 6061 T6. As dimensões são 175 mm de comprimento, 25,4 mm de diâmetro e espessura de 2 mm. Foi aplicada uma carga até que ela atingisse 1178,46 N no meio do vão de 160 mm do suporte de apoio do tubo. Os resultados encontrados são os apresentados no gráfico na figura 70.

Figura 69. Corpo de prova analisado.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 70. Gráfico de deslocamento.

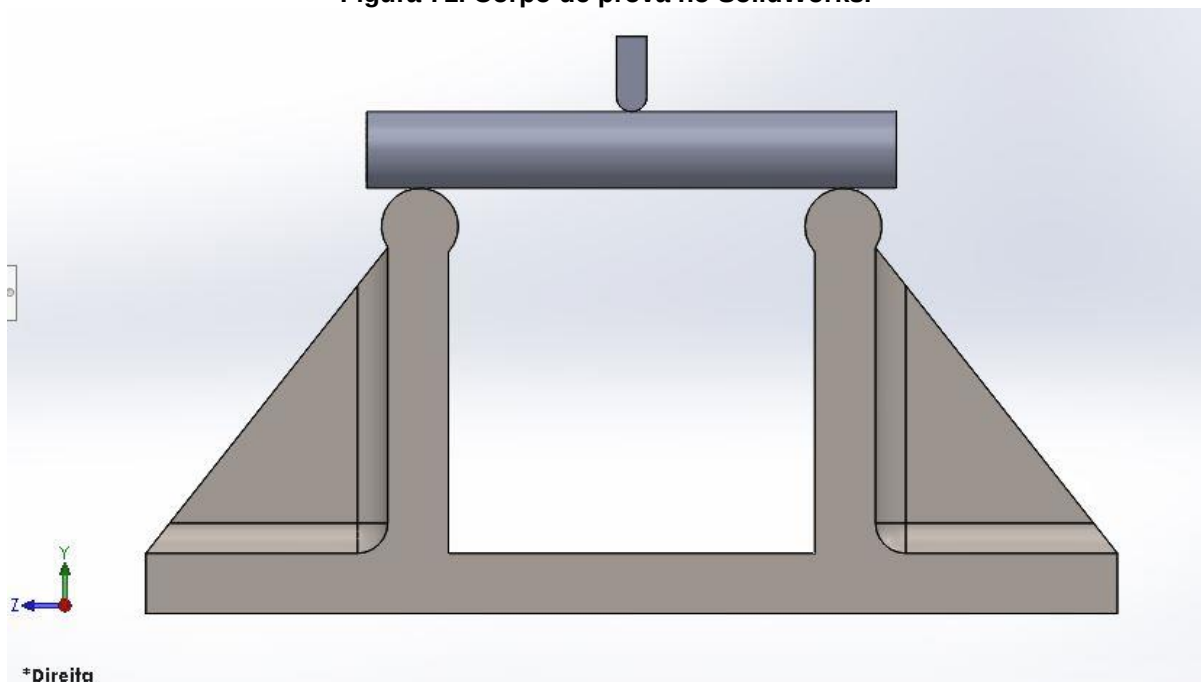


Fonte: Autoria própria, 2017.

A partir desse gráfico foi possível determinar o deslocamento do tubo. É possível notar que o gráfico tem uma parte onde a força aplicada é zero, mas o deslocamento é crescente e isso se deve ao ajuste da máquina e não deve ser considerado, considerando-se assim apenas que o deslocamento real se inicia quando a força fica maior que zero. Para determinar o ponto onde se inicia o deslocamento foi dividido a cada 2 mm em 15 unidades, a partir disso foi possível perceber que o ponto aproximado onde se iniciou o deslocamento foi no ponto 5,5 e utilizando-se da proporcionalidade ele representa um deslocamento de 0,7333 mm, a máquina de ensaios apontou que o deslocamento máximo foi de 1,1212 mm, portando o deslocamento real foi de 0,3879 mm.

Assim como realizado no chassi, foi feito uma análise desse corpo de prova no *Software SolidWorks*, submetendo as mesmas condições encontradas na máquina, como apresentado na figura a seguir.

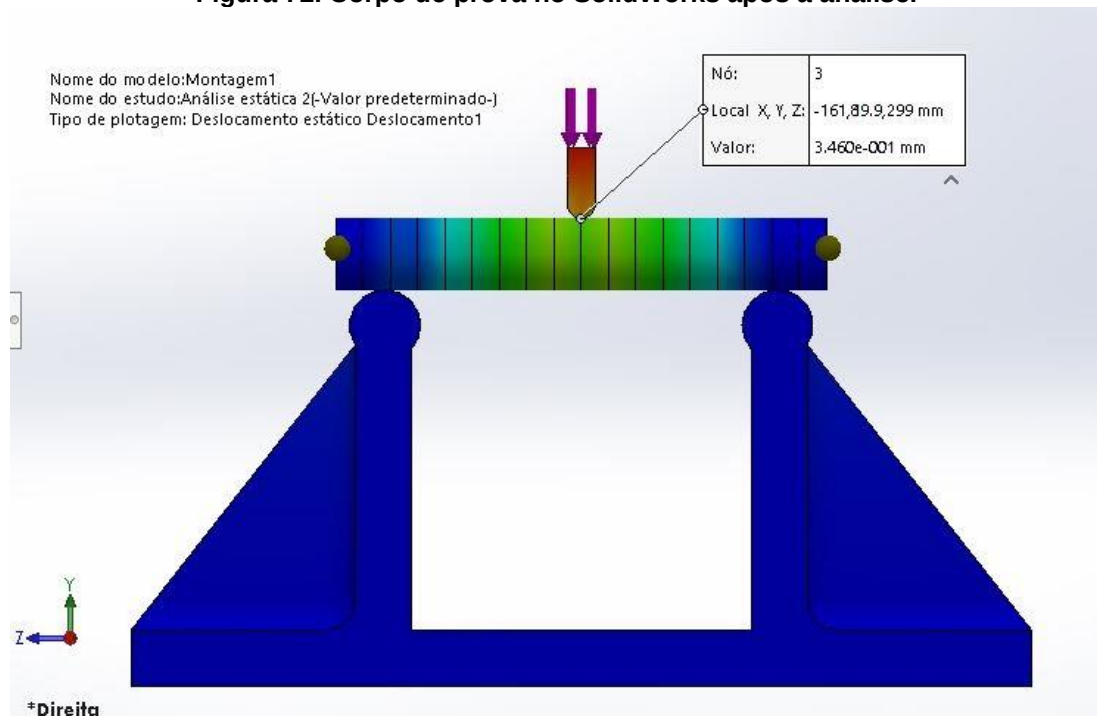
Figura 71. Corpo de prova no SolidWorks.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Os resultados encontrados no *Software SolidWorks* são os apresentados na figura a seguir, onde mostra que o deslocamento sofrido foi de 0,3460 mm.

Figura 72. Corpo de prova no SolidWorks após a análise.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Com os resultados encontrados é possível admitir como confiável o método de elementos finitos (MEF) do *Software SolidWorks*, por ter um desvio de 10,8% com relação ao resultado da análise real.

Quadro 8. Resumo dos deslocamentos.

Método	Análise no corpo real	Análise no <i>SolidWorks</i>
Deslocamento	0,3879 mm	0,3460 mm
Desvio	0	-10,8%

Fonte: Autoria própria, 2017.

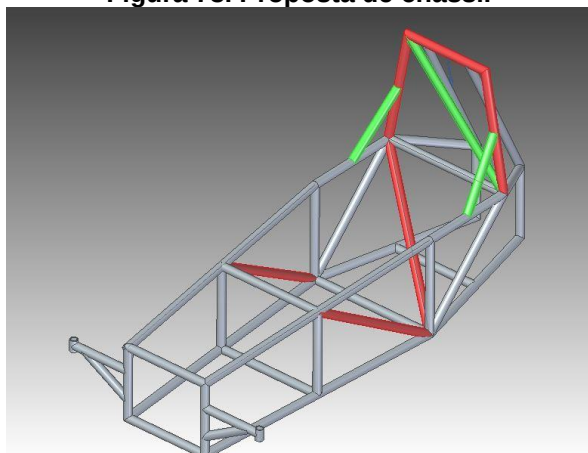
5 DISCUSSÕES

Devido aos problemas encontrados na análise do chassi real, para esse trabalho a análise real será utilizada apenas como uma forma de garantir que essas deformações estão não iram comprometer a segurança do piloto.

Utilizando apenas as análises de MEF é possível notar que o chassi não apresentou em nenhum dos casos uma rigidez onde a deformação ficasse em dentro da faixa aceitável, máxima de 5 mm, o que pode comprometer a segurança do piloto em caso de capotamento. Porém, com as simulações foi possível perceber que com os perfis A e B o chassi obteve resultados com maior rigidez.

Como solução para aumentar a rigidez buscou-se alterar a geometria do chassi, acrescentando e reposicionando algumas barras. Na figura 73 é apresentada uma das possíveis soluções, as barras em verde acrescentadas e as vermelhas reposicionadas. Com o acréscimo das duas barras frontais adicionou mais uma forma de travamento para o arco quando submetidos a esforços horizontais. Já com o acréscimo da barra transversal no arco adiciona uma contenção que melhora o desempenho e reduz os deslocamentos provocados por esforços perpendiculares. O reposicionamento das barras no arco de proteção foi buscou uma melhor acomodação do piloto já as outras barras o objetivo é que na região onde se concentrara a massa do piloto seja mais rígida. Com essas alterações o chassi aumentou sua rigidez em todas as direções quando submetido as cargas definidas pelo regulamento, tornando-o mais seguro para o piloto.

Figura 73. Proposta de chassi.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Refazendo as simulações, com as mesmas condições de contorno e as mesmas cargas, com o novo chassi utilizando os perfis A e B, os resultados obtidos foram como mostrados no quadro 7.

Quadro 9. Resultados da simulação com o chassi proposto.

Resultados das simulações (deformação)			
Chassi com o perfil A			
	Antigo	Proposto	Redução
Horizontal (mm)	3,648	3,232	-11,40%
Vertical (mm)	2,827	1,563	-44,71%
Perpendicular (mm)	6,948	2,831	-59,25%
Peso (Kg)	6,436	6,878	6,87%
Chassi com o perfil B			
Modelo	Antigo	Proposto	Redução
Horizontal (mm)	4,633	4,074	-12,07%
Vertical (mm)	3,601	1,969	-45,32%
Perpendicular (mm)	8,754	3,574	-59,17%
Peso (Kg)	4,929	5,267	6,86%

Fonte: Autoria própria, 2017.

Utilizando-se dos resultados mostrados anteriormente e acrescentando mais um item, custo das barras, conforme quadro 8, é possível determinar o perfil B como o mais indicado para a construção desse chassi por apresentar deformações aceitáveis e próximas aos encontrados com o perfil A, no entanto com peso e custo inferiores ao encontrados se utilizado o perfil A.

Quadro 10. Valor da barra de cada perfil.

Quadro de custo perfil		
Perfil	Comprimento	Valor unitário
A	6 m	R\$ 215,00
B	6 m	R\$ 183,00

Fonte: Autoria própria, 2017.

Embora não tenha sido possível uma validação dos resultados de MEF através das análises experimentais no chassi devido os problemas encontrados, citados

durante o trabalho, a sua validação utilizando um corpo de prova apresentou resultados bem satisfatórios pois foram resultados muito próximos se comparados os valores encontrados pelo MEF e pela máquina de ensaio universal.

6 CONSIDERAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONSIDERAÇÕES

Para a modelagem do chassi foi escolhido o *Software SolidEdge ST8*, pois durante o processo de modelagem é preciso fazer várias alterações no dimensionamento e requer velocidade para realizar essas alterações e o programa escolhido foi o que mais se adequou as necessidades.

A análise pelo MEF foi feita no *Software SolidWorks 2016*, que é um programa bem-conceituado no mercado para se realizar diversos tipos de simulação. E isso foi possível se confirmar com a análise estrutural realizadas no chassi do protótipo da equipe EcoOpala de Eficiência Energética, através dos valores de deslocamento que são bem próximos dos encontrados no ensaio experimental.

A geometria do chassi proposto não se mostrou adequada para o protótipo, principalmente por ter sofrido grandes deformações após a aplicação das cargas previstas no regulamento o que pode comprometer a participação da equipe na competição, devido o chassi não garantir a segurança do piloto. Para solucionar o problema foi sugerido uma nova geometria para o chassi e também a troca do perfil tubular, com essas alterações foi possível obter um chassi mais rígido e assim conseguir atender ao regulamento. Com todas essas modificações foi possível tornar o protótipo mais competitivo pois se tornou mais leve e econômico com um menor custo para sua produção.

A bancada para os ensaios experimentais não apresentou as características ideais para os ensaios. A falta de um plano de carregamento, onde essa carga é aumentada gradativamente, fez com que ao aplicar à carga a estrutura sofreu um impacto e isso provocou uma fissura na base onde foram fixados os suportes, ocasionando deslocamentos dos suportes e como não foi monitorada essa movimentação, os resultados encontrados de deslocamento no chassi não são confiáveis.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que seja projetada e construída uma nova bancada para realizar ensaios de chassis facilitando não só a fixação como também a forma de aplicação da carga desejada, para que assim seja possível encontrar as deformações com uma maior exatidão. É preciso ainda que se tenha um monitoramento de como a bancada se comporta durante os ensaios a fim de se garantir a indeslocabilidade e, por conseguinte se realizar ensaios mais adequados e que produzam resultados mais consistentes e confiáveis. Para obter uma maior precisão e medir as deformações é aconselhável a utilização de extensômetros elétricos.

Outra possibilidade é projetar um chassi de outro tipo com a utilização de compósitos, buscando-se reduzir ainda mais o peso do veículo sem comprometer a segurança do piloto.

REFERENCIAS

AERMECH. Chassis and frames. Disponível em: <<http://aermech.com/chassis-frames/>>. Acesso em: 29 set. 2017.

AUTOMOTIVEXIST. Apa itu chassis monokok ? mengenal chassis mobil model monokok. Disponível em: <<http://automotivexist.blogspot.com.br/2016/09/apa-itu-chassis-monokok-mengenal-chassis-monocoque.html>>. Acesso em: 29 set. 2017.

BESTCARS. Chassi tubular: a melhor opção para esportivos e carros de corrida. Disponível em: <<http://bestcars.uol.com.br/ct/chassi.htm>>. Acesso em: 06 set. 2017.

INFOPEDIA. Artigos de apoio. Disponível em: <[https://www.infopedia.pt/\\$lancia](https://www.infopedia.pt/$lancia)>. Acesso em: 19 jul. 2017.

ODIA. Frota de carros no brasil mais que dobra em dez anos. Disponível em: <<https://odia.ig.com.br/rio-de-janeiro/observatorio/2016-02-29/frota-de-carros-no-brasil-mais-que-dobra-em-dez-anos.html>>. Acesso em: 19 jul. 2017.

PERFORMANCERACING. Fury race cars purchases lfr chassis. Disponível em: <<http://www.performanceracing.com/news/fury-race-cars-purchases-lfr-chassis>>. Acesso em: 29 set. 2017.

Happian-Smith, J., “An Introduction to modern vehicle desing”. Butterworth Heinemann, 2002

OLIVEIRA, F. C. G. Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo Spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurístico de otimização numérica. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

Venâncio N. F. Projeto do chassi de uma viatura de fórmula, Dissertação do mestrado integrado em engenharia mecânica. Universidade do Porto, junho de 2013.

HIBBELER, R. C. Resistência dos Materiais. [S.l.]: São Paulo, 2013.

KIM, N.-H. S. B. Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos. [S.l.]: Rio de Janeiro, 2011.

BOSCH, ROBERT. Manual da tecnologia automotiva. Trad. de H. Madjderey, G. W. Prokesch, E. J. Zerbini e S. Pfeferman. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2005.

BUDYNAS, G. RICHARD; NISBETT, KEITH J.; Shigley’s Mechanical Engineering Design. 8ed. Estados Unidos: McGraw-Hill Primis, 2006.

ALVES, Renan Tassinari. análise estrutural estática do sistema de descarga de uma colheitadeira utilizando o software ansys. Trabalho Final de Curso - Faculdade Horizontina, 2012.

Rade, D. A., Método dos Elementos Finitos. Apostila da disciplina Método dos Elementos Finitos aplicados a Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, (2006).

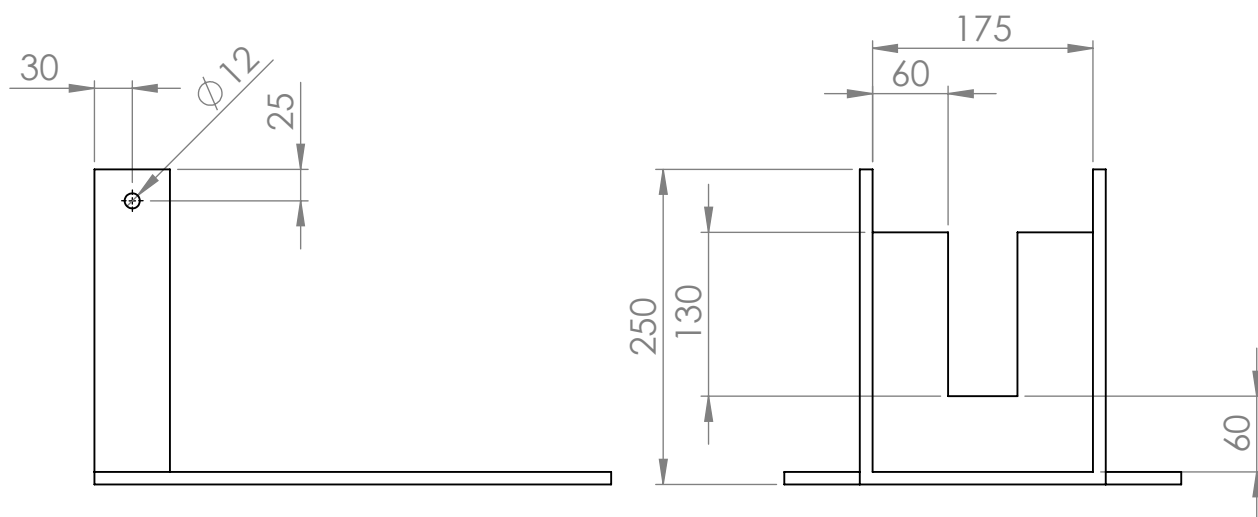
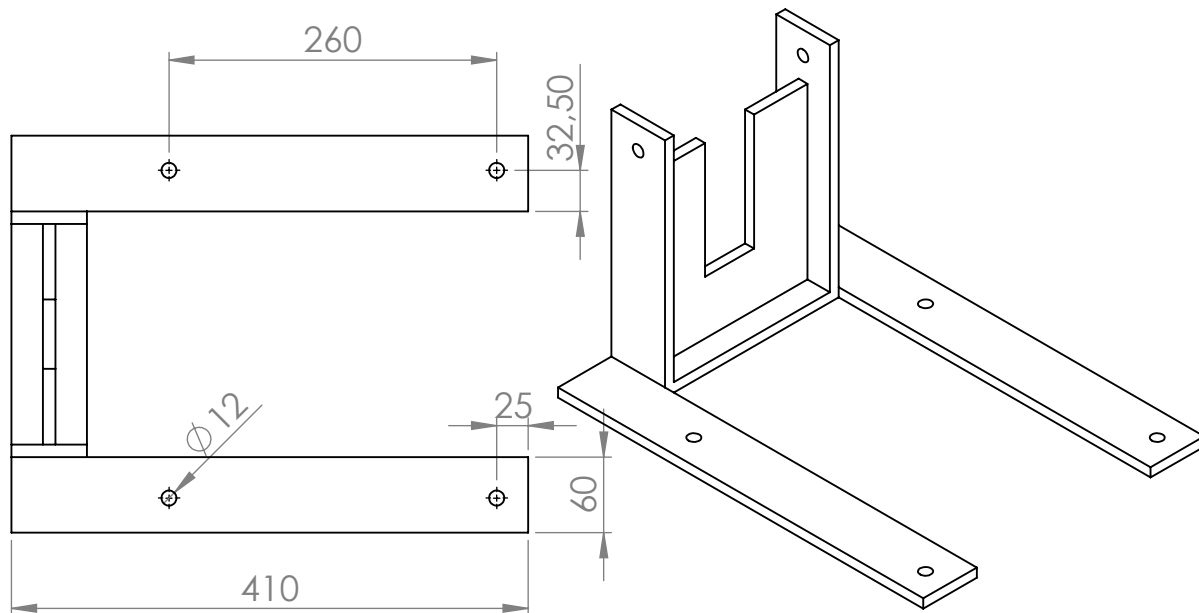
SORIANO, HUMBERTO LIMA. Método de elementos finitos em Análise de Estruturas. São Paulo: Edusp, 2003.

Remo M. de Souza; O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor. Apostila - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 2003.

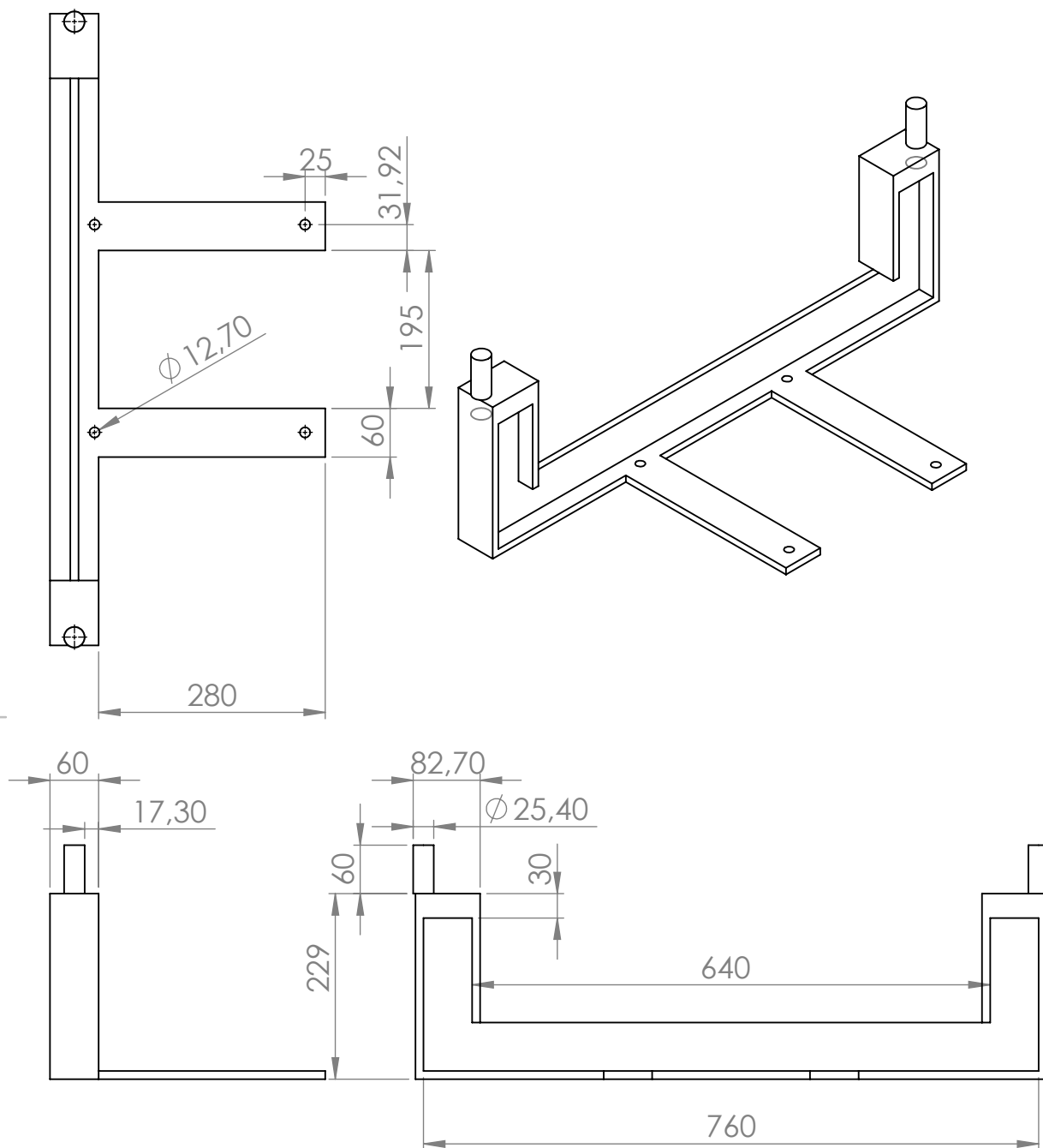
CANUT, Felipe Azevedo. Análise estrutural do chassi de um veículo fórmula sae pelo método de elementos finitos. Trabalho Final de Curso - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2014

Chandra, M. R., Sreenivasulu, S., Hussain, S. T., “Modeling and Structural Analysis of Heavy Vehicle Chassis Made of Polymeric Composite Material by Three Different Cross Sections”, Journal of Mechanical and Production Trans Stellar, 2012

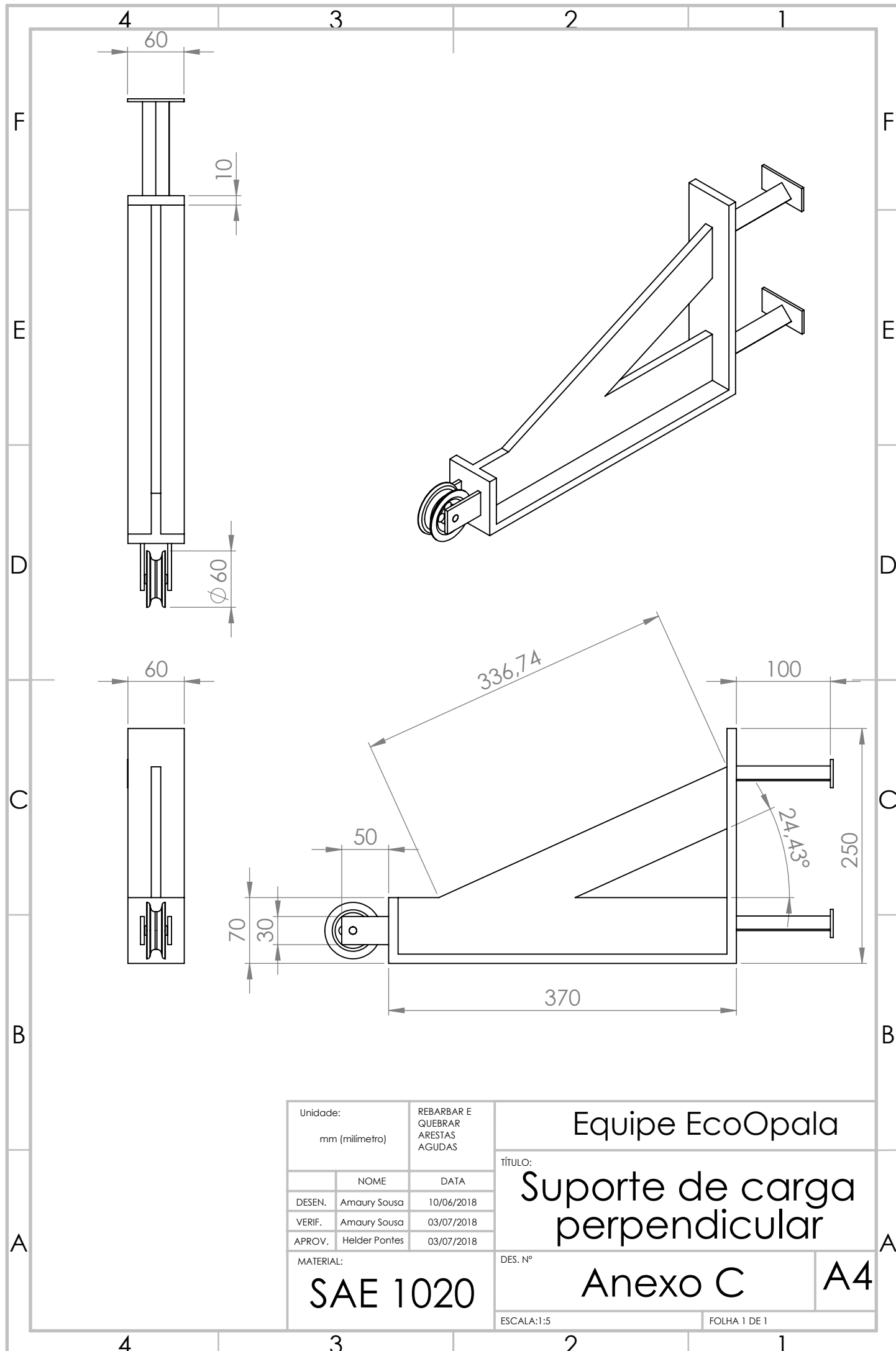
SOUZA. R. M. O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor. Belém, 2003.



Unidade: mm (milímetro)		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	Equipe EcoOpala	
			TÍTULO:	
	NOME	DATA	Apoio traseiro	
DESEN.	Amaury Sousa	10/06/2018		
VERIF.	Amaury Sousa	03/07/2018		
APROV.	Helder Pontes	03/07/2018		
MATERIAL:			DES. Nº	
SAE 1020			Anexo A	A4
			ESCALA:1:6	FOLHA 1 DE 1

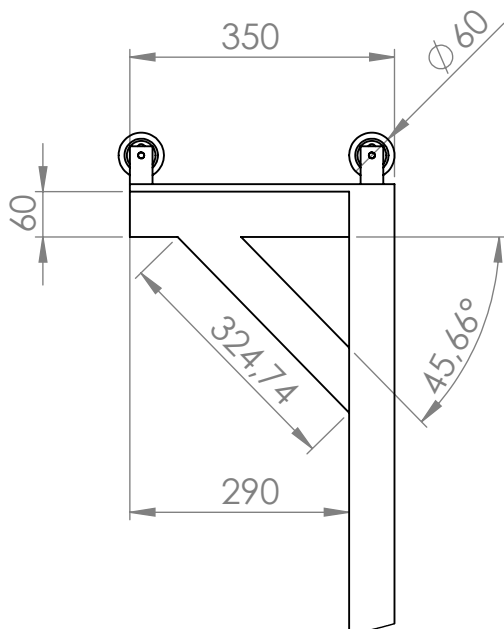


Unidade: mm (milímetro)		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	Equipe EcoOpala	
			TÍTULO:	
			Apoio dianteiro	
			DES. Nº	
MATERIAL:			Anexo B	
SAE 1020			A4	
			ESCALA:1:8	
			FOLHA 1 DE 1	

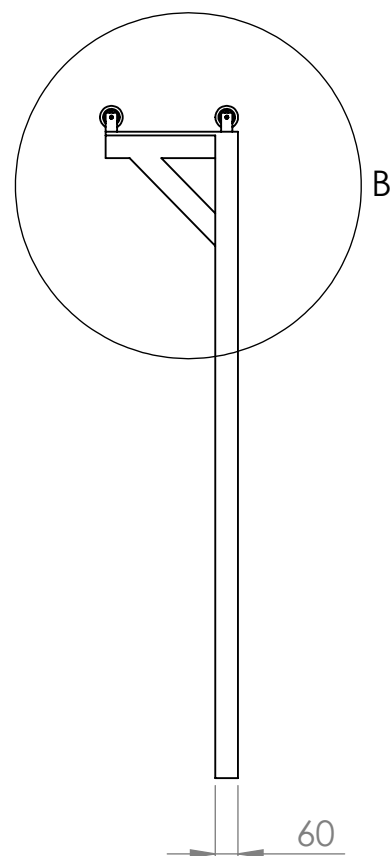
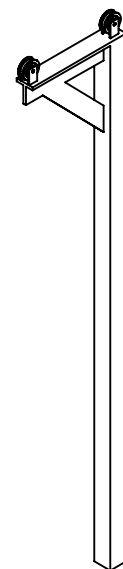
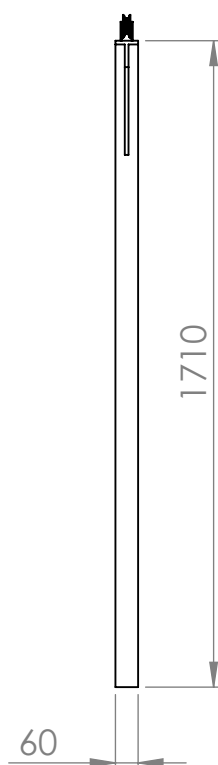


Unidade: mm (milímetro)		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	Equipe EcoOpala	
			TÍTULO: Suporte de carga perpendicular	
	NOME	DATA	DES. Nº Anexo C	
DESEN.	Amaury Sousa	10/06/2018		
VERIF.	Amaury Sousa	03/07/2018		
APROV.	Helder Pontes	03/07/2018		
MATERIAL: SAE 1020			FOLHA 1 DE 1	

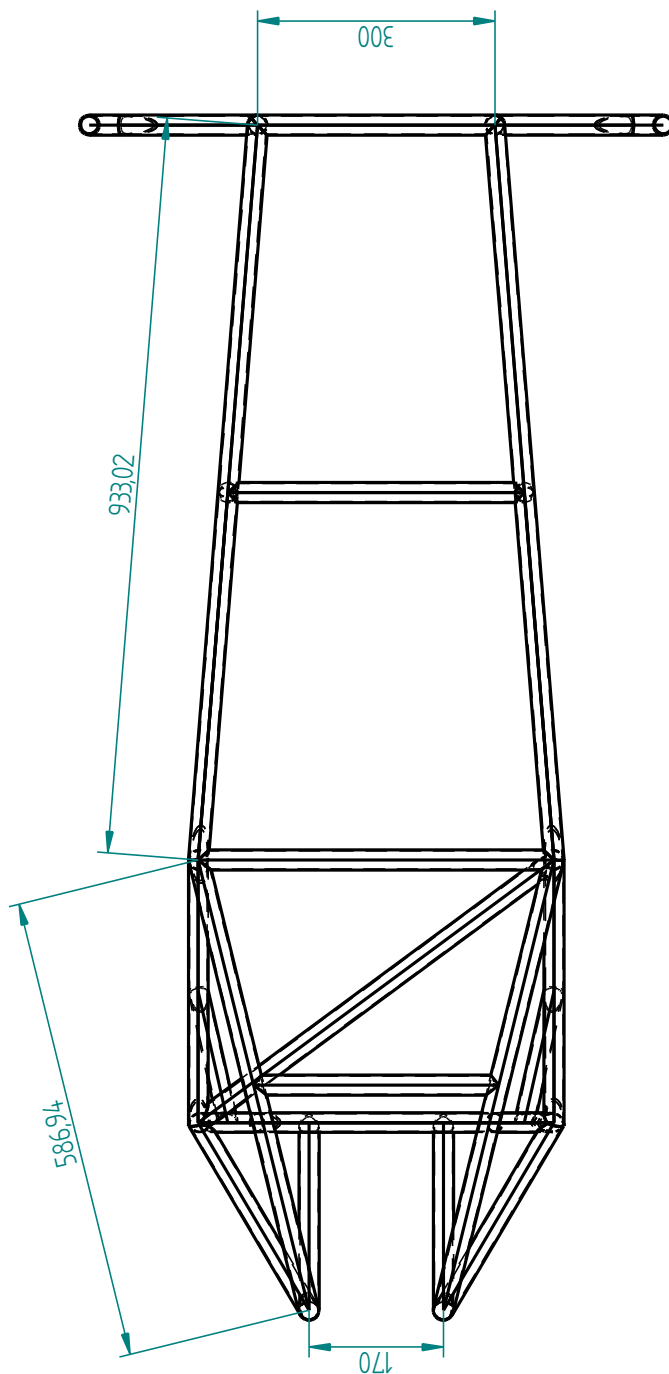
A4



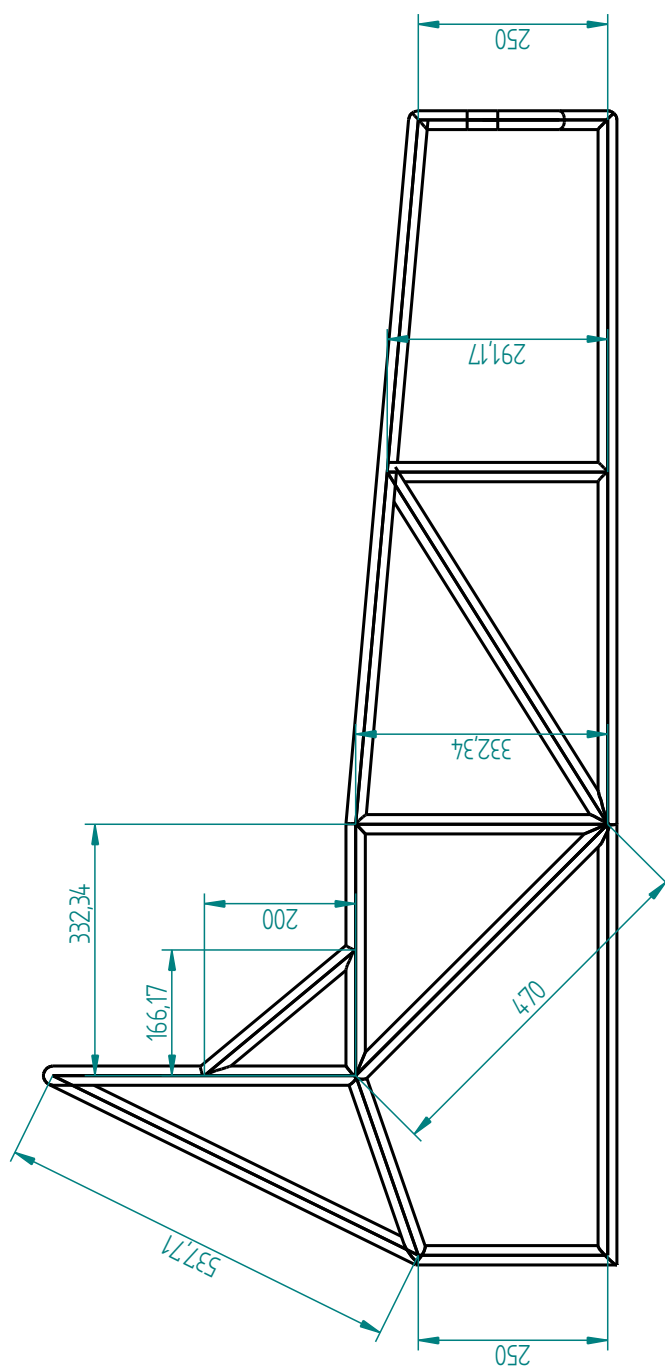
DETALHE B
ESCALA 1 : 10



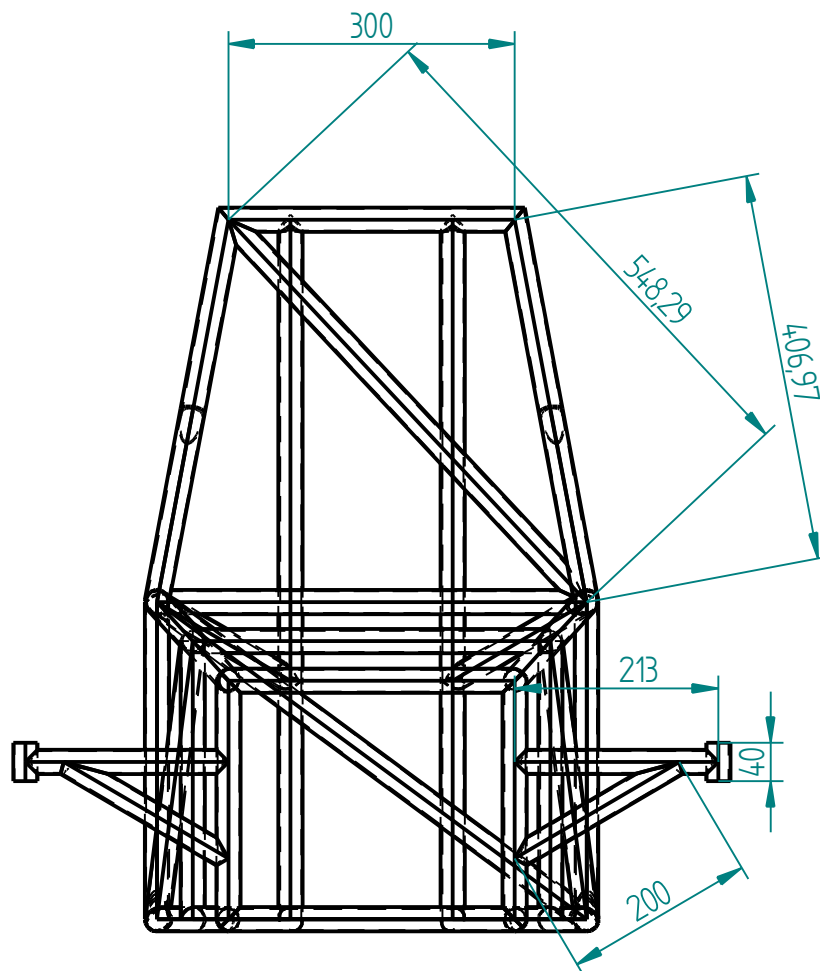
Unidade: mm (milímetro)		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	Equipe EcoOpala	
			TÍTULO:	
			Suporte de carga horizontal	
MATERIAL:			DES. Nº	A4
SAE 1020			ESCALA:1:20	FOLHA 1 DE 1



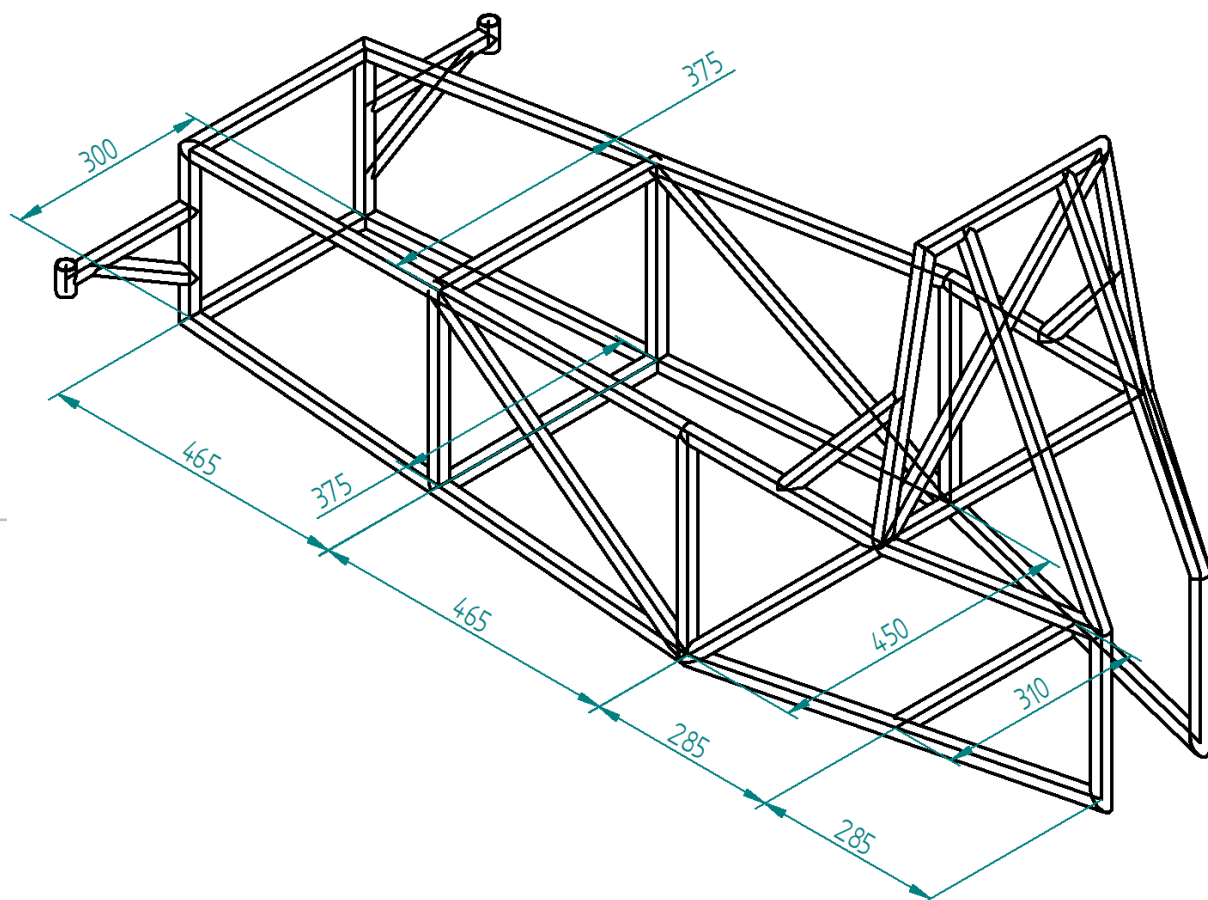
Unidade: mm (milímetro)		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	Equipe EcoOpala	
			TÍTULO:	Chassi Velho Monge
	NOME	DATA		
DESEN.	Amaury Sousa	10/06/2018		
VERIF.	Amaury Sousa	03/07/2018		
APROV.	Helder Pontes	03/07/2018		
MATERIAL: ASTM 6061 T6			DES. Nº	Anexo E
			ESCALA: 1:8	A4
			FOLHA 1 DE 4	



Unidade:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		Equipe EcoOpala	
mm (milímetro)				TÍTULO:	
	NOME		DATA	Chassi Velho	
DESEN.	Amaury Sousa		10/06/2018	Monge	
VERIF.	Amaury Sousa		03/07/2018	Anexo E	
APROV.	Helder Pontes		03/07/2018	A4	
MATERIAL:				DES. Nº	
ASTM 6061 T6				ESCALA: 1:8	FOLHA 2 DE 4



Unidade: mm (milímetro)		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	Equipe EcoOpala	
			TÍTULO:	
			Chassi Velho	
			Monge	
			Anexo E	
			A4	
MATERIAL:		ASTM 6061 T6	DESC. Nº	
			ESCALA: 1:8	
			FOLHA 3 DE 4	



Unidade:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		Equipe EcoOpala	
mm (milímetro)				TÍTULO:	
	NOME		DATA	Chassi Velho	
DESEN.	Amaury Sousa		10/06/2018	Monge	
VERIF.	Amaury Sousa		03/07/2018	Anexo E	
APROV.	Helder Pontes		03/07/2018	A4	
MATERIAL:				DES. Nº	
ASTM 6061 T6				ESCALA:1:6	FOLHA 4 DE 4