

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

Projeto Estrutural de Chassi tipo Gaiola para Veículos Minibaja: Análise Numérica e Experimental

Autor: João Pedro Taborda Lottermann
Orientador: Dr. Lucival Malcher

Brasília, DF
2014



João Pedro Tabora Lottermann

Projeto Estrutural de Chassi tipo Gaiola para Veículos Minibaja: Análise Numérica e Experimental

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Lucival Malcher

Brasília, DF

2014

João Pedro Taborda Lottermann

Projeto Estrutural de Chassi tipo Gaiola para Veículos Minibaja: Análise Numérica e Experimental/ João Pedro Taborda Lottermann. – Brasília, DF, 2014-97 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Lucival Malcher

Trabalho de Conclusão de Curso Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2014.

1. Chassi. 2. Análise. I. Dr. Lucival Malcher. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Projeto Estrutural de Chassi tipo Gaiola para Veículos Minibaja: Análise Numérica e Experimental

CDU 02:141:005.6

João Pedro Tabora Lottermann

Projeto Estrutural de Chassi tipo Gaiola para Veículos Minibaja: Análise Numérica e Experimental

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, dezembro de 2014:

Dr. Lucival Malcher
Orientador

Dr. Henrique Gomes de Moura
Convidado 1

MSc. Saleh Barbosa Khalil
Convidado 2

Brasília, DF
2014

DEDICATÓRIA

João Pedro Taborda Lottermann

2014

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada. Retribuo através deste, bem como todas as minhas demais conquistas, aos meus amados pais Elizete Taborda Lottermann e João Carlos Lottermann, meus irmãos Carlos Eduardo Taborda Lottermann e Muriele Taborda Lottermann, e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida. Agradeço também a todos os professores que me acompanharam durante a graduação, em especial ao Prof. Lucival Malcher, responsável pela realização deste trabalho e estímulo a outras demais atividades. Aos professores Henrique Gomes de Moura e Saleh Barbosa Khalil, é um prazer tê-los na banca examinadora. Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constantes, principalmente os membros integrantes da equipe UnBaja.

Este trabalho é dedicado à Equipe UnBaja que, com garra e esforço foi criada no período da minha graduação.

*“... Esforça-te, e tem bom ânimo;
não temas, nem te espantes;
porque o SENHOR teu Deus é contigo,
por onde quer que andares.”
(Bíblia Sagrada, Josué 1:09.)*

Resumo

Neste trabalho, é feito um estudo relacionado ao projeto estrutural de um chassi tipo gaiola para veículos minibus. Para execução do trabalho, inicialmente foi executada uma análise dos principais requisitos necessários para concepção do chassi, tendo como base o livro de regras disponibilizado pela SAE - Sociedade de Engenharia Automotiva - Filial Brasil. Posteriormente, uma revisão dos principais critérios de projeto sob condições de carregamento estático e dinâmico foi feita, com destaque para os critérios de von Mises e Tresca para carregamento estático. Como Segunda etapa, uma proposta de projeto estrutural foi então realizada, utilizando os critérios e requisitos obtidos na revisão teórica realizada anteriormente. A modelagem do protótipo também é objetivo deste trabalho, bem como a realização de elementos finitos. Durante a realização dos testes experimentais e numéricos, normas internacionais foram seguidas, tendo como função a determinação das forças e pontos de aplicação de cargas que simulam condições críticas de utilização do protótipo. Por fim, uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais é feita, bem como um detalhamento dos principais requisitos necessários para o correto dimensionamento mecânico e fabricação do chassi.

Palavras-chaves: estrutura, chassi, minibus, análise.

Abstract

In this paper, we conduct a research related to the structural design of a cage type chassis for minibaja vehicles. To develop the research, initially the conception of the chassis requires a review of the main requests based on the rulebook available from SAE - Society of Automotive Engineering – Brazilian subsidiary. Subsequently, will be done a review of the main design criteria under conditions of static and dynamic loading, this approach emphasis the criteria of von Mises and Tresca for static loading. As a second step. The fabrication of the proposed structural design will use the criteria and requirements obtained in the literature review performed previously. The fabrication of the prototype it is also one of the aims of this work as well as the realization of finite elements. It is followed International standards during the implementation of the experimental and numerical tests, with the propouse of determining the strengths and points of application of loads that simulate critical conditions of use of the prototype. Finally, It is compared the numerical and experimental results as well as a detailing of the main requirements for the correct mechanical design and fabrication of the chassis.

Key-words: structure, chassis, minibaja, analysis.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Situação real de capotamento em competição.	17
Figura 2 – Vista isométrica da Gaiola (SAE-BRASIL, 2013).	22
Figura 3 – Linhas de Lüder em uma tira de aço doce no seu escoamento (BEER FP E JOHNSTON, 1995).	24
Figura 4 – Teoria da tensão de cisalhamento máxima (MSS) para estado plano de tensão, sendo σ_A e σ_B as duas tensões principais não-nulas (BEER FP E JOHNSTON, 1995).	25
Figura 5 – Teoria da energia de distorção (DE) para estados planos de tensão. Este é um gráfico de pontos obtidos a partir da Equação (2.4) com $\sigma' = S_y$ (BEER FP E JOHNSTON, 1995).	26
Figura 6 – Dados experimentais sobrepostos a teorias de falha (NORTON, 2000).	27
Figura 7 – Definição do espaço de segurança para o piloto.	29
Figura 8 – Gráfico Tensão[MPa] x Deformação.	31
Figura 9 – Gaiola em elementos de linha.	32
Figura 10 – Modelo 3D da gaiola em CAD.	33
Figura 11 – Desenho técnico com algumas cotas da gaiola feita com tubo 02.	34
Figura 12 – Modelo Físico.	35
Figura 13 – Principais etapas da abordagem de um problema estruturas (FIALHO, 2008).	37
Figura 14 – Posicionamento das cargas aplicadas.	38
Figura 15 – Propriedades do material em fase Elástica.	40
Figura 16 – Propriedades do material em fase plástica.	40
Figura 17 – Propriedades do material em fase plástica.	41
Figura 18 – Carga concentrada.	41
Figura 19 – Aplicação da carga, exemplo frontal.	42
Figura 20 – Ação de engastamento.	42
Figura 21 – Tipo de elemento da malha.	43
Figura 22 – Triangulação de Delaunay.	43
Figura 23 – Dimensões da malha.	44
Figura 24 – Geometria quadrática.	45
Figura 25 – Geometria malhada (a) Gaiola inteira, (b) Detalhe da malha.	45
Figura 26 – Caso estático deflexão elástica para tubo 01 devido carga vertical.	49
Figura 27 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 01 devido carga vertical.	50
Figura 28 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 01 para carga vertical.	51
Figura 29 – Caso estático deflexão elástica para tubo 02 devido carga vertical.	52

Figura 30 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 02 devido carga vertical.	53
Figura 31 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 02 para carga vertical.	54
Figura 32 – Caso estático deflexão elástica para tubo 01 devido carga lateral. . . .	55
Figura 33 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 01 devido carga lateral. .	56
Figura 34 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 01 para carga lateral.	57
Figura 35 – Caso estático deflexão elástica para tubo 02 devido carga lateral. . . .	58
Figura 36 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 02 devido carga lateral. .	59
Figura 37 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 02 para carga lateral.	60
Figura 38 – Caso estático deflexão elástica para tubo 01 devido carga frontal. . . .	61
Figura 39 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 01 devido carga frontal. .	62
Figura 40 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 01 para carga frontal.	62
Figura 41 – Caso estático deflexão elástica para tubo 02 devido carga frontal. . . .	63
Figura 42 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 02 devido carga frontal. .	64
Figura 43 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 02 para carga frontal.	65
Figura 44 – Bancada com vista isométrica apresentando todos os componentes. . . .	69
Figura 45 – Bancada principal de apoio CELETTE (CELETTE, 2013).	70
Figura 46 – Trilho e robô (CELETTE, 2013).	70
Figura 47 – Robô NAJA Evolution (CELETTE, 2013).	71
Figura 48 – Robô NAJA Evolution (CELETTE, 2013).	71
Figura 49 – Bancada com ênfase nos pórticos (preto e cinza).	72
Figura 50 – Pistões hidráulicos e seus limites disponíveis.	73
Figura 51 – Exemplo do suporte utilizado para fixação do pistão.	74
Figura 52 – Atuador e relógio com sua escala.	75
Figura 53 – Eixo de coordenadas seguido pelo NAJA Evolution.	75
Figura 54 – Eixo de coordenadas seguido pelo Software Abaqus/CAE e pelo equipamento NAJA Evolution.	76
Figura 55 – Modelo fixo e detalhes da fixação dianteira e trazeira.	77
Figura 56 – Pistão e atuador disponível para ensaio de cargas.	78
Figura 57 – Alcance do equipamento para escolha dos pontos de aquisição.	78
Figura 58 – Pontos a serem pegos como referência.	79
Figura 59 – Aferição de alinhamento e nivelamento.	80
Figura 60 – Régua de aferição fixada na gaiola.	81
Figura 61 – Tela de trabalho do software NAJA Evolution onde é mostrada a aferição da máquina.	82

Figura 62 – Ensaio vertical com chapa.	83
Figura 63 – Fixação pistão de atuação frontal.	83
Figura 64 – Carregamento frontal.	84
Figura 65 – Carregamento lateral.	85
Figura 66 – Situação onde houve deslocamento do pistão.	86
Figura 67 – Deslocamento permanente visível.	89

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tubos disponíveis no mercado que atendem às especificações da norma.	29
Tabela 2 – Cargas aplicadas na gaiola.	38
Tabela 3 – Resultados para gaiola 01.	65
Tabela 4 – Resultados para gaiola 02.	65
Tabela 5 – Cargas aplicadas na gaiola em Tonelada-força [tnf].	77
Tabela 6 – Resultados carregamento vertical.	86
Tabela 7 – Resultados carregamento frontal.	87
Tabela 8 – Resultados carregamento lateral.	88
Tabela 9 – Comparação entre Numérico e Experimental.	89

Sumário

I	INTRODUÇÃO	15
1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Comentários iniciais	16
1.2	Objetivo e contribuições	18
1.3	Organização do trabalho	18
II	ASPECTOS TEÓRICOS	20
2	ASPECTOS TEÓRICOS	21
2.1	Normas Baja 2013 RBSB 7	21
2.1.1	Gaiola	21
2.1.1.1	Objetivo	21
2.1.1.2	Requisitos da gaiola	21
2.1.1.2.1	Elementos da gaiola	21
2.1.1.3	Especificações sobre os materiais da gaiola	23
2.2	Teoria de falha	23
2.2.1	Teoria da tensão máxima de cisalhamento para materiais dúcteis	23
2.2.2	Teoria da energia de distorção para materiais dúcteis	25
2.2.3	Resumo das falhas de materiais dúcteis	26
III	CONCEPÇÃO DA GAIOLA	28
3	CONCEPÇÃO DA GAIOLA	29
3.1	Material disponível no mercado	29
3.2	Propriedades dos materiais	30
3.3	Desenho da gaiola	31
3.4	Modelo físico	34
IV	SIMULAÇÕES	36
4	SIMULAÇÕES	37
4.1	Cargas aplicadas	38
4.2	Malha de elementos finitos	39
4.3	Condições gerais de contorno	46

V	RESULTADOS NUMÉRICOS	47
5	RESULTADOS NUMÉRICOS	48
5.1	Resultados devido às cargas aplicadas	48
5.1.1	Carga Vertical	48
5.1.1.1	Gaiola 01	49
5.1.1.2	Gaiola 02	52
5.1.2	Carga Lateral	54
5.1.2.1	Gaiola 01	55
5.1.2.2	Gaiola 02	58
5.1.3	Carga Frontal	60
5.1.3.1	Gaiola 01	61
5.1.3.2	Gaiola 02	63
5.2	Discussão dos resultados	65
VI	ENSAIO EXPERIMENTAL	67
6	NORMAS DE TESTE E SEU HISTÓRICO	68
6.1	Descrição da bancada	69
6.2	Procedimentos para ensaio	76
6.2.1	Carregamento Vertical	82
6.2.2	Carregamento Frontal	83
6.2.3	Carregamento Lateral	84
6.3	Resultados experimentais	85
6.3.1	Resultados carregamento vertical	86
6.3.2	Resultados carregamento frontal	87
6.3.3	Resultados carregamento lateral	87
6.4	Discusão dos resultados	88
VII	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
7.1	Conclusões	91
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	92
	Referências	94

VIII	ANEXOS	96
8	ANEXOS	97
8.1	Rotina matlab	97

Parte I

INTRODUÇÃO

1 Introdução

1.1 Comentários iniciais

A indústria automotiva para se manter competitiva em cenário nacional e internacional depende do grau de qualidade de seus produtos. Segundo Back e Forcellini (BACK, 2002), a competitividade baseia-se nos requisitos de qualidade, custo e tempo, fatores que estão diretamente ligados a função projeto.

A utilização de novos conceitos e tecnologias, que venham tornar a atividade de projeto mais eficiente, acarreta uma maior probabilidade de sucesso no desenvolvimento de seus produtos. Não é de hoje que pesquisas vem sendo desenvolvidas na área automobilística com o intuito de prevenir e simular o comportamento de sistemas mecânicos veiculares. Atualmente as indústrias vem utilizando o Método de Elementos Finitos para a construção de modelos numéricos, os quais permitem uma pré análise, tornando o modelo algo bastante fiel ao comportamento de um veículo real.

O chassi é a estrutura utilizada em um veículo automotor para sustentar seus subsistemas e, em parte, garantir a segurança de seus ocupantes. Devido à disponibilidade de normas e apresentar-se inserido em uma competição, foi escolhido um chassi tipo gaiola para mini-baja a fim de serem feitos estudos com método de elementos finitos objetivando uma melhor performance, atendendo às normas.

Considerando-se a importância da integridade estrutural do mini-baja em caso de capotar (Figura 1), este trabalho pretende dimensionar de forma segura a estrutura do veículo de pequeno porte para uma pessoa atuando em uma competição off-road. No Brasil, a competição é organizada pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE-Brasil) a qual propõe um desafio aos estudantes de engenharia, oferecendo a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, visando incrementar sua preparação para o mercado de trabalho. A estrutura do tipo gaiola é dimensionada a partir do conhecimento das normas técnicas preestabelecidas (SAE-BRASIL, 2013).



Figura 1 – Situação real de capotamento em competição.

Os alunos que participam do Projeto Baja SAE devem formar equipes que apresentarão a Instituição de Ensino Superior ao qual estão ligados. Estas equipes são desafiadas anualmente a participar da Competição Baja SAE, evento que reúne os estudantes e promove a avaliação comparativa dos projetos. No Brasil a competição nacional recebe o nome de Competição Baja SAE BRASIL. Essa tipo de evento faz com que a motivação seja alcançada, onde um projeto bem elaborado se sobressaia com relação aos demais, levando a equipe ao objetivo que é o aprendizado e quando merecida, a vitória.

É fundamental a realização de testes em estruturas que tem o objetivo de proteger a vida de pessoas. Essa avaliação é dada através da aplicação de cargas estimadas em casos de capotamento e ou tombamento, sendo divididas em verticais, frontais e laterais, dependentes da massa do veículo com todos seus componentes inclusive piloto e passageiros. Existe atualmente muitos órgãos que especificam normas para o teste de ROPS (Roll

Over Protection Structure) ou EPCC (Estrutura de Proteção Contra Capotamento), como por exemplo SAE, NBR, ISO, e OECD onde todas elas são muito semelhantes onde há a aplicação de cargas que tem o objetivo de simular forças exercidas na estrutura quando submetida ao acidente. Quanto mais pesada for o veículo, mais a estrutura deve resistir.

1.2 Objetivo e contribuições

O objetivo principal deste trabalho, é propor uma formulação matemática apropriada para o caso de capotamento e ou tombamento, de forma a obter melhores resultados nas etapas de desenvolvimento de projeto em estruturas veiculares. O modelo proposto será validado através de um modelo experimental, onde suas respostas serão avaliadas, comparadas e criticadas.

É factível mostrar que esses métodos apresentados neste trabalho é de suma importância e ampla aplicação em vários projetos de equipamentos, como máquinas agrícolas, aeronáutica e claro na área automotiva, se tornando uma metodologia generalista. Espera-se chegar a um resultado de um modelo teórico eficiente. Esta eficiência é essencial para o encurtamento na fase de projeto, pois reduz custos com relação à experimentação de protótipos, diminuindo o investimento no desenvolvimento de novos produtos.

A ideia inicial é utilizar como aplicativo a estrutura, mais conhecida como gaiola, de um carro do tipo mini-baja. A estrutura foi construída na UnB para fins de ensaios, por grupo de alunos envolvidos nas competições do mini-baja/SAE Brasil com a orientação dos professores colaboradores deste projeto.

Realização de ensaios experimentais com mesmas condições de contorno estipuladas nas análises numéricas computacionais onde a comparação dos resultados é objetivo do trabalho, fazendo uma validação do modelo numérico com o experimental.

1.3 Organização do trabalho

Para questões de visualização, a estrutura deste trabalho será dividida em capítulos como descrito a seguir:

- Capítulo II, será apresentado os aspectos teóricos, onde é exibida as normas que devem ser seguidas para a construção da gaiola e também é feita uma revisão bibliográfica dos principais artigos e livros que abordam assuntos relacionados a este trabalho.
- Capítulo III, é feito um estudo dos tubos e materiais existentes no mercado que atendam as dimensões e propriedades disponíveis no regulamento apresentando uma curva tensão x deformação para o aço 1020 laminado a frio. A gaiola é concebida,

ou seja, desenhos técnicos seguindo toda a regulamentação disponível no Capítulo II e o modelo em 3D disponível para análises numéricas.

- Capítulo IV, serão feitas as simulações do modelo teórico, apresentando os resultados após a aplicação de cargas na vertical, frontal e lateral de acordo com especificações internacionais (AUSTRALIAN, 2012).
- Capítulo V será exibido os resultados provenientes das simulações feitas no ambiente ABAQUS/CAE 6.13-1 pelo método de elementos finitos.
- Capítulo VI é apresentado de maneira clara como foi realizado os ensaios experimentais assim como toda a descrição da bancada disponível para este procedimento. Mostra em forma de tabelas os resultados retirados da análise em todos os casos.
- Capítulo VII, são expostas as conclusões, enfatizando os principais resultados, deficiência e observações do presente trabalho, também sendo propostas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Parte II

ASPECTOS TEÓRICOS

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Normas Baja 2013 RBSB 7

Esta seção reúne os requisitos mínimos de segurança que devem ser avaliados nos veículos Baja SAE. Será abordado os principais pontos que devem ser seguidos para a construção do chassi tipo gaiola de acordo com o Regulamento BAJA SAE Brasil. Para maiores informações, encontra-se disponível no site da competição ([SAE-BRASIL, 2013](#)), porém foi feita tradução de uma parte da mesma nos próximos passos.

2.1.1 Gaiola

2.1.1.1 Objetivo

O objetivo da gaiola é proporcionar um espaço tridimensional mínimo em torno do condutor. A gaiola deve ser concebida e fabricada para evitar qualquer falha de sua integridade. Obriga-se ter o tamanho suficiente para:

- Capacete do condutor ter uma distância mínima de 152,4 mm (6 polegadas) de distância de qualquer dos tubos no cockpit do carro.
- Tronco, joelhos, ombros, cotovelos, mãos e braços do condutor ter um mínimo de 76,2 mm (3 polegadas) de espaço livre criado pela estrutura do carro (é feito o teste através da aplicação de uma régua entre qualquer ponto nas bordas externas do SIM e RHO).

2.1.1.2 Requisitos da gaiola

2.1.1.2.1 Elementos da gaiola

Os elementos da gaiola que devem atender a especificação de material em 2.1.1.3 são os seguintes:

- RRH: Corta-fogo;
- RHO: Tubo superior;
- LFS: Tubo inferior lateral;
- FBM: Tubo frontal;
- LC e FLC: Travamento junção lateral e travamento frontal inferior;

Membros adicionais necessários estão listados abaixo:

- LDB: Travamento corta-fogo;
- SIM: Membros de impacto lateral;
- USM: Membro sob o assento
- FAB: Travamento vertical. Liga RHO a SIM;
- RLC: Travamento transversal traseiro;

Estes membros adicionais devem ser de aço e são obrigados a ter apenas espessura mínima de 0,89 mm (0,035 in) e diâmetro externo mínimo de 25,4 mm (1,0 polegadas).

Nota1: Quando as dimensões mínimas são dadas, são medidas a partir da linha central dos membros, já quanto a uma folga para o motorista, ela é definida pelas bordas externas dos membros, do tubo da gaiola menos o preenchimento instalado.

Nota 2: Todas as dobras dos tubos que tiverem um raio maior que 152 mm (6 polegadas) não podem ter um comprimento maior que 711mm (28 polegadas), a não ser que haja um suporte.

Definição: Para o piloto da equipe, deve ser utilizado um homem com percentil de no máximo 95 devidamente adaptado e usando um capacete.

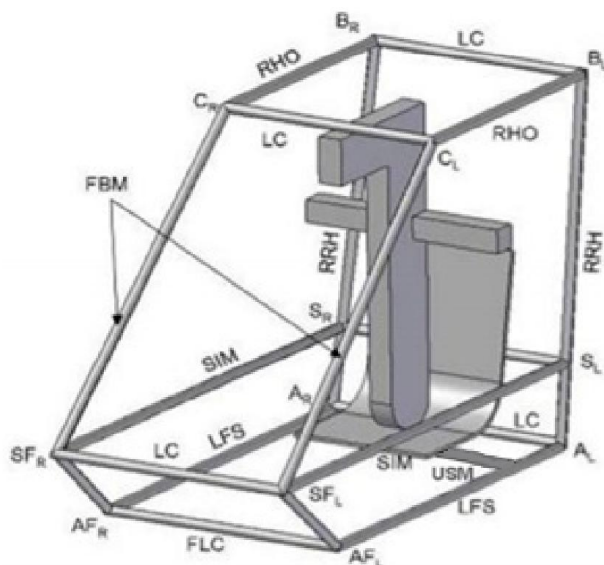


Figura 2 – Vista isométrica da Gaiola (SAE-BRASIL, 2013).

2.1.1.3 Especificações sobre os materiais da gaiola

O material utilizado para os membros da gaiola especificadas em 2.1.1.2.1 (RRH, RHO, LFS, FBM, LC, FLC e qualquer parte em que os cintos de segurança são afixados) deve, no mínimo, ser:

(a) um tubo de aço circular com um diâmetro externo de 25,4 mm (1 polegada) e uma parede com espessura de 3,05 mm (0,120 polegada) e um teor de carbono de pelo menos 0,18%.

(b) elemento de aço com rigidez a flexão e resistência à flexão iguais ou maiores que os tubos especificados na alínea (a) acima, desde que a espessura da parede seja igual ou maior que 1,57 mm (0,062 polegadas).

NOTA: O uso de aço de liga não permite que a espessura da parede a ser mais fina do que 1,57 mm (0,062 polegadas).

A resistência à flexão e da rigidez de flexão têm de ser calculados sobre um eixo que resulta no menor valor. Rigidez de flexão é proporcional ao produto EI e a resistência à flexão é dada pelo valor de $\frac{S_y I}{c}$, (para o aço 1018 os valores são: $S_y = 370$ MPa (53,7 Ksi) $E=205$ GPa (29.700 ksi)).

E= Modulo de elasticidade;

I= Momento de inércia da seção transversal sobre o eixo com o menor valor;

S_y = Resistência ao escoamento do material em unidades de força por unidade de área;

c = Distância a partir do eixo neutro da fibra extrema.

NOTA: As equipes são obrigadas a fornecer cálculos sobre rigidez à flexão e resistência à flexão para o tubo utilizado. Esta análise, deve ser anexado à ficha de Roll Cage Specification.

2.2 Teoria de falha

As teorias de falha são fundamentais para a determinação de critérios que tem como objetivo a previsão de falha em um determinado material submetido a tensões. A seguir serão apresentados alguns dos critérios mais clássicos para materiais dúcteis.

2.2.1 Teoria da tensão máxima de cisalhamento para materiais dúcteis

Esta teoria se aplica somente a materiais dúcteis também conhecida como teoria de Tresca ou de Guest. De acordo com Shigley, Joseph Edward e Mischke (SHIGLEY, 2005) "Prevê que o escoamento começa sempre que a tensão máxima de cisalhamento em

qualquer elemento iguala-se ou excede à tensão máxima de cisalhamento em uma espécime de ensaio de tração do mesmo material quando aquele espécime começa a escoar".

Grandes teorias são criadas com base em testes de tração, onde as linhas de escoamento formam um ângulo de 45° com o eixo do corpo de prova, assim como mostrado na Figura 3. Essas linhas concebem o início do escoamento, onde as linhas de fratura também são observadas a um ângulo de 45° .



Figura 3 – Linhas de Lüder em uma tira de aço doce no seu escoamento (BEER FP E JOHNSTON, 1995).

Para tensão de tração, $\sigma = \frac{P}{A}$, onde a tensão máxima de cisalhamento é $\tau_{máx} = \frac{\sigma}{2}$. Assumindo que S_y é a resistência ao escoamento, no momento de escoamento, $\tau_{máx} = \frac{S_y}{2}$. Para um estado duplo de tensões, sabe-se que a máxima tensão de corte é:

$$\tau_{máx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \frac{S_y}{2} \quad (2.1)$$

Importante: Nesta teoria $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$

Pode-se notar ainda que a resistência ao escoamento em cisalhamento seja metade do limite de escoamento à tração.

$$S_{sy} = 0.5S_y \quad (2.2)$$

É necessário incorporar um fator de segurança, n .

$$\tau_{máx} \geq \frac{S_y}{2n} \quad (2.3)$$

A Figura 4 ilustra o gráfico para a teoria da tensão máxima de cisalhamento em problemas biaxiais, onde uma das tensões principais é nula.

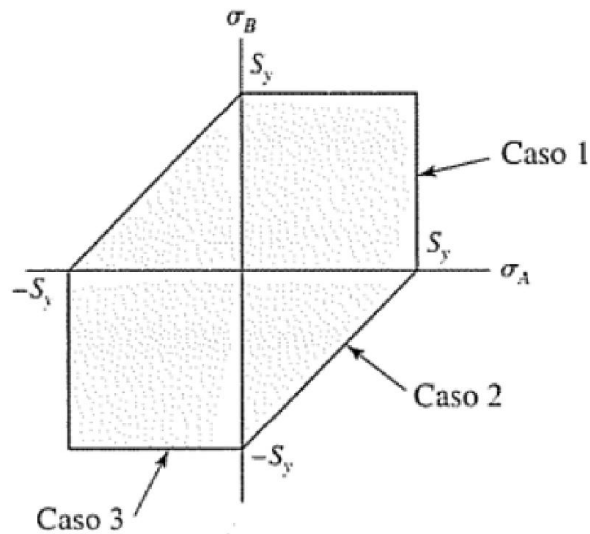


Figura 4 – Teoria da tensão de cisalhamento máxima (MSS) para estado plano de tensão, sendo σ_A e σ_B as duas tensões principais não-nulas (BEER FP E JOHNSTON, 1995).

2.2.2 Teoria da energia de distorção para materiais dúcteis

Também conhecida como teoria da energia de cisalhamento e teoria de von-Mises-Hencky, se originou quando foi observado que materiais dúcteis tensionados hidrostaticamente (tração ou compressão iguais) possuíam limite de escoamento muito maiores do que os valores dados pelo ensaio de tração simples. Huber-von Mises-Hencky postularam que o escoamento não era um simples fenômeno de tração ou compressão, mais do que isso, era relacionado de algum modo à distorção angular do elemento tensionado (BEER FP E JOHNSTON, 1995).

A energia de distorção é obtida subtraindo da energia total de deformação a energia usada para provocar uma variação de volume. Onde para tensão plana, considerando σ_A , σ_B , as duas tensões principais não-nulas. Então, obtemos:

$$\sigma' = (\sigma_A^2 - \sigma_A\sigma_B + \sigma_B^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

A teoria de von Mises prevê que a falha por escoamento ocorre sempre que:

$$\sigma' \geq S_y \quad (2.5)$$

De modo semelhante, prevê-se a segurança por

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \quad (2.6)$$

onde n é o fator de segurança.

A Figura 5 exibe a elipse criada pela Equação (2.4) no plano σ_A, σ_B com $\sigma' = S_y$. As linhas tracejadas representam a teoria da tensão máxima de cisalhamento, demonstrando um maior conservadorismo quando comparada com a teoria da energia de distorção.

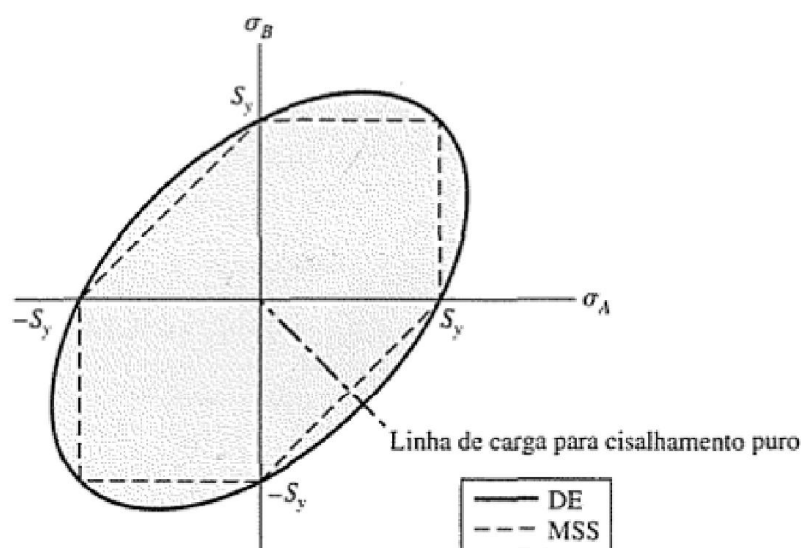


Figura 5 – Teoria da energia de distorção (DE) para estados planos de tensão. Este é um gráfico de pontos obtidos a partir da Equação (2.4) com $\sigma' = S_y$ (BEER FP E JOHNSTON, 1995).

Essa teoria é um pouco mais difícil de ser empregada do que a teoria de tensão de cisalhamento máxima, devido a sua maior complexidade com relação a cálculos, porém é mais precisa.

2.2.3 Resumo das falhas de materiais dúcteis

Esse trabalho está focado em materiais que irão falhar de uma forma dúctil, portanto será limitado para este caso.

Joseph Marin (MARIN, 1952) foi um dos primeiros a desenvolver material disponível relacionado à falha de elementos de engenharia, o qual coletou dados de muitas fontes. Pontos de referência utilizados estão apresentados no gráfico da Figura 6, no qual

alguns estão dispostos ao longo da linha divisória horizontal superior, em que $\sigma_B \geq \sigma_A$. A Figura 6 comprova que tanto a teoria da tensão máxima de cisalhamento quanto a da energia de distorção são aceitáveis para projeto e análise de materiais que falham de uma forma dúctil.

A decisão de uma dessas duas teorias será abordado logo à frente. A teoria da tensão máxima de cisalhamento é mais fácil, rápida de usar e conservadora. A teoria da energia de distorção é mais aconselhada quando se precisa saber por qual motivo alguma peça falhou, pois possui melhores aproximações com os dados coletados, conforme a Figura 6.

O fato de a teoria da energia de distorção ser aceita como a correta significa que a teoria da tensão cisalhante máxima sempre conduz a resultados do lado da segurança e que a teoria da tensão máxima de cisalhamento levará a resultados seguros somente se os sinais das duas tensões principais forem iguais (SHIGLEY, 1984).

A Figura 6 também destaca a linha referente à teoria da tensão normal máxima, porém ela é destinada para materiais frágeis os quais tendem a falhar subitamente por fratura sem escoamento aparente.

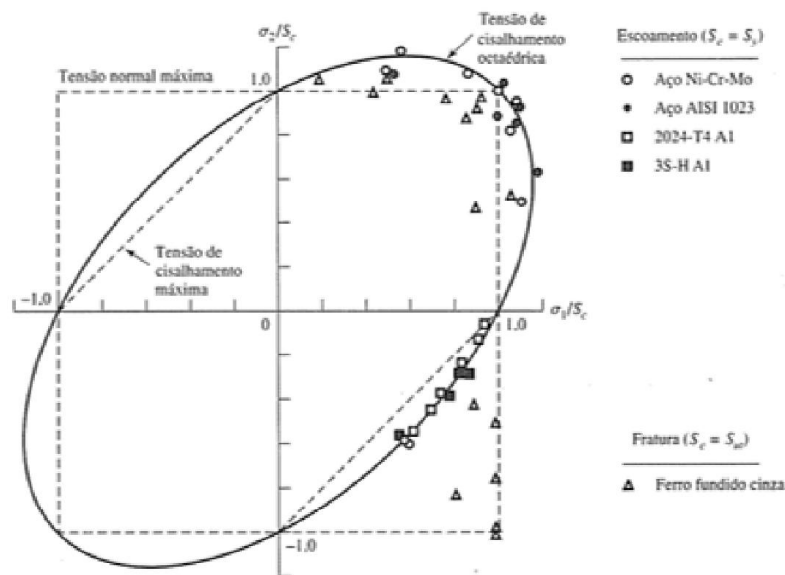


Figura 6 – Dados experimentais sobrepostos a teorias de falha (NORTON, 2000).

Parte III

CONCEPÇÃO DA GAIOLA

3 CONCEPÇÃO DA GAIOLA

A gaiola deve seguir todas as normas citadas na seção 2.1, diante disso, foi projetada para que atenda aos requisitos mínimos de segurança que devem ser avaliados para veículos Baja SAE. Todas as avaliações referentes à confiabilidade, integridade, conforto, a segurança em geral do piloto, são feitas por técnicos credenciados de segurança no dia da prova.

De acordo com as normas SAE-baja (SAE-BRASIL, 2013), deve haver uma distância mínima de 152.4 mm entre o capacete do piloto e o tubo superior da gaiola, bem como um espaço de pelo menos 76.2 mm entre qualquer membro e as laterais da gaiola. A Figura 7 mostra um esquema referente à área ocupada pelo piloto.

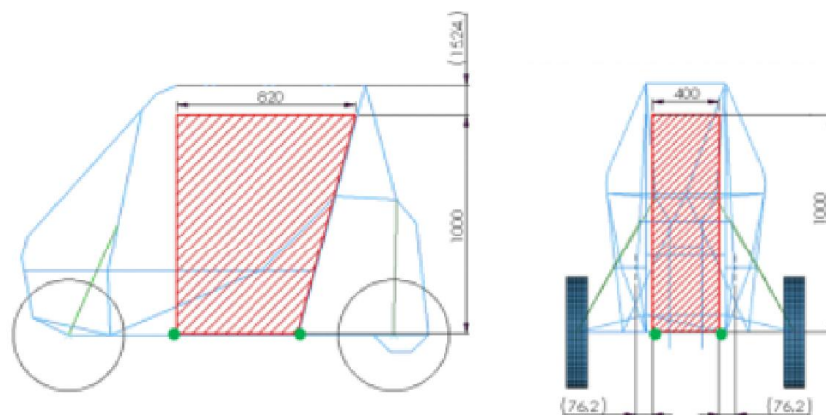


Figura 7 – Definição do espaço de segurança para o piloto.

3.1 Material disponível no mercado

Seguindo as especificações de regulamento 2.1.1.2.1, a gaiola é desenhada com dimensões de tubos disponíveis no mercado. São usados dois tipos de tubo (Tabela 1) para que então sejam feitas as simulações.

Tabela 1 – Tubos disponíveis no mercado que atendem às especificações da norma.

Tubos	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Momento de Inércia (mm^4)
01	25.4	3.05	13620.897
02	31.75	2	20773.474

- Aço 1020 laminado a frio

Os produtos de aço laminados a frio (LF) são gerados a partir da redução de espessura, a frio, dos aços laminados a quente. São amplamente aplicados no segmento automotivo onde existe a necessidade de estampagem simples ou conformação extra profunda (alto grau de deformação), aliada a exigências de qualidade superficial (LEALFER, 2014).

O aço 1020 é um dos aços ao carbono mais comuns utilizado como aço para cementação com excelente relação custo benefício comparado com aços mais ligados para o mesmo propósito. Possui excelente plasticidade e soldabilidade. Após cementação é beneficiado, mas possui menor capacidade de endurecimento (METALS, 2014).

3.2 Propriedades dos Materiais

Esta seção vem com a finalidade de apresentar algumas propriedades disponíveis para o material utilizado na construção da gaiola. Todas as informações necessárias para a realização dos cálculos do dimensionamento encontram-se abaixo. A apresentação do cálculo da resistência à flexão é obrigatório às equipes competidoras (2.1.1.3).

- Módulo de Elasticidade (E): 205 GPa;
- Tensão de Escoamento (S_y): $S_y=390$ MPa;
- Distância até a fibra externa tubo 01 (c): $c=12,7$ mm;
- Distância até a fibra externa tubo 02 (c): $c=15,875$ mm;

- Cálculo de equivalência de rigidez à flexão

- Tubo 01

$$EI = 205GPa.13620,897mm^4 = 2792283,788KN.mm^2 \quad (3.1)$$

- Tubo 02

$$EI = 205GPa.19058,501mm^4 = 4258562,298KN.mm^2 \quad (3.2)$$

- Cálculo de equivalência de resistência à flexão

- Tubo 01

$$\frac{S_y I}{c} = \frac{390MPa.13620,897mm^4}{12,7mm} = 418279,5142N.mm \quad (3.3)$$

- Tubo 02

$$\frac{S_y I}{c} = \frac{390 \text{ MPa} \cdot 20773.474 \text{ mm}^4}{15.875 \text{ mm}} = 510340,479 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (3.4)$$

O diagrama Tensão x Deformação mostra uma relação entre estas duas grandezas através de uma linha definida em um gráfico x/y onde o eixo x representa as deformações e o eixo y representa as tensões. A obtenção do diagrama tensão x deformação deve ser realizada para os diferentes tipos de material podendo ser feita através de um ensaio de tração.

A Figura 8 representa a curva σ x ε utilizada neste trabalho para o aço 1020 laminado a frio, onde foi feito a leitura de dados ensaiados experimentalmente através do software Matlab. A rotina de implementação está disponível em anexo 8.1.

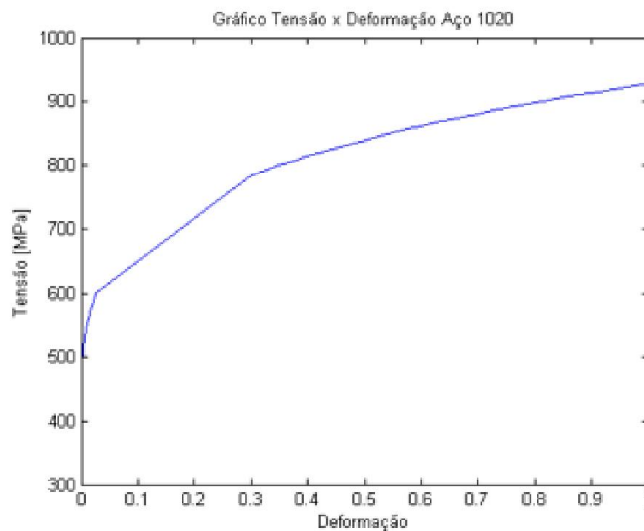


Figura 8 – Gráfico Tensão[MPa] x Deformação.

3.3 Desenho da gaiola

A concepção de um chassi tipo gaiola para veículos Baja, passa por uma série de etapas. Primeiramente se realiza a definição da forma da estrutura através de elementos de linhas (Figura 9). Em seguida, se tem a determinação das dimensões como altura, largura e comprimento das diversas partes da estrutura, todas essas sendo especificadas em regulamento com suas medidas mínimas e máximas.

A segurança e qualidade do projeto estão intimamente ligadas com a correta definição das dimensões do chassi. Como terceira etapa, é feito um preenchimento dos elementos de linhas com as devidas medidas dos possíveis tubos existentes no mercado (Figura 10).

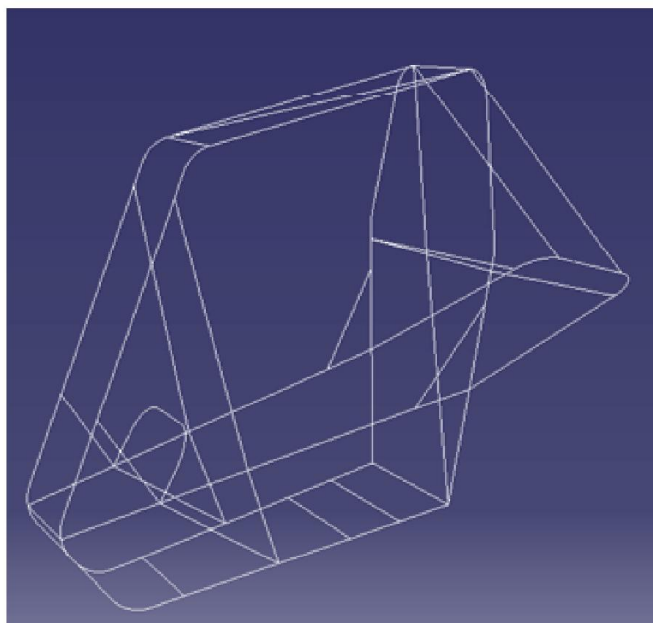


Figura 9 – Gaiola em elementos de linha.

A Figura 10 ilustra, esquematicamente, o modelo da gaiolas feito com o auxílio de um programa CAD (CATIA V5R19).

Usando o modelo de elementos de linhas apresentado na Figura 9 é criado um plano em cada uma das linhas contínuas da gaiola, e então é gerado um “Sketch” com o perfil externo do tubo utilizado na gaiola. Com o auxílio da ferramenta “Rib” será gerado um elemento sólido o qual deve ser definido dois módulos, primeiro é feita a seleção do “Sketch” criado anteriormente, logo após a linha, para esse perfil poder seguir. Esse procedimento é feito para toda a gaiola, preenchendo-a com tubos rígidos.

A próxima etapa é a criação de um “Sketch” com o perfil interno, momento onde vai haver a determinação da espessura do tubo. Para finalizar o modelo em CAD 3D é usada a ferramenta “Slot” onde seleciona-se o “Sketch” interno e a linha para se seguida, fazendo a retirada do material, gerando o tubo de parede espessa com as dimensões disponíveis no mercado.

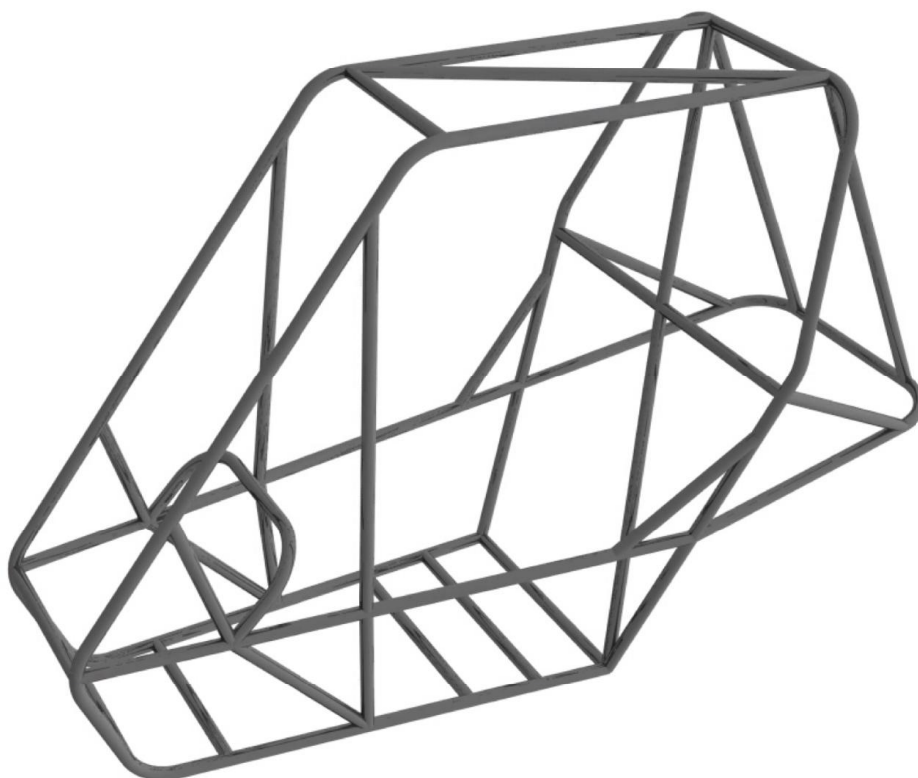


Figura 10 – Modelo 3D da gaiola em CAD.

A Figura 11 expõe um desenho técnico com algumas cotas importantes na construção do modelo de gaiola com tubo 02, na qual não é apresentada todas as dimensões para que o desenho não fique sobre carregado. O desenho técnico referente à gaiola feita com dimensões do tubo 01 é muito semelhante, sendo que as diferenças serão mais perceptíveis somente no corte A-A', momento em que as dimensões do tubo serão mostradas.

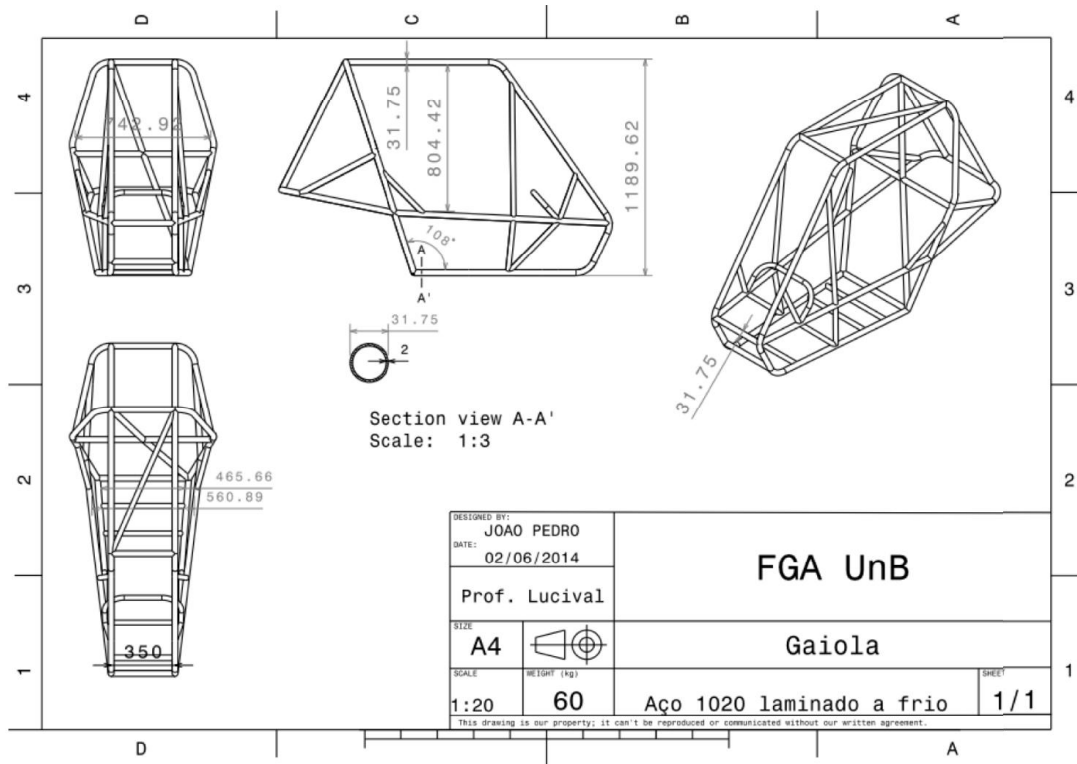


Figura 11 – Desenho técnico com algumas cotas da gaiola feita com tubo 02.

3.4 Modelo físico

O modelo físico encontra-se disponível no Laboratório de Processos de Fabricação da Faculdade UnB Gama, localizado no galpão da instituição. Ele foi feito com o intuito de serem realizadas simulações e testes para fins acadêmicos e ajudar no desenvolvimento de novos projetos veiculares. Segue algumas imagens do protótipo:



Figura 12 – Modelo Físico.

Parte IV

SIMULAÇÕES

4 SIMULAÇÕES

Para a análise de tensões provenientes das cargas aplicadas na gaiola sob situações de carregamento estático e dinâmico, foi utilizado para modelagem computacional do problema o programa de elementos finitos ABAQUS/CAE 6.13-1, com licença disponível dentro do laboratório de GFFM (Grupo de Fadiga Fratura e Materiais) da UnB. Este software tem caráter bastante geral e de grande versatilidade para aplicações em muitas áreas da engenharia, consiste de vários módulos como exemplo representado na Figura 13.

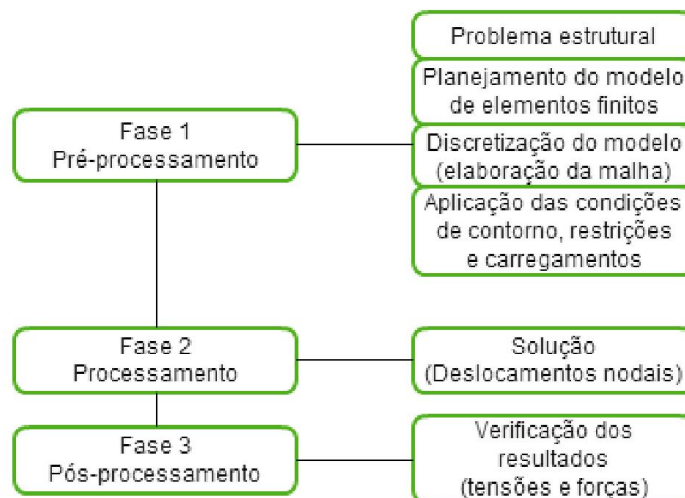


Figura 13 – Principais etapas da abordagem de um problema estruturas (FIALHO, 2008).

Inicialmente precisou-se dominar o programa ABAQUS com relação à importação de documentos do software CATIA V5R19 utilizado para modelagem 3D para que o modelo fosse integrado no software escolhido para executar a simulação.

O programa ABAQUS exige conhecimentos de resistência dos materiais e métodos numéricos para entendimento e aplicação correta dos seus recursos. Com o aprendizado atual, se pretende seguir para os próximos passos.

O pré-processador ABAQUS consiste de uma interface gráfica que permite ao usuário uma rápida e eficiente definição da geometria do problema, atribuição das propriedades dos diferentes materiais, aplicação dos carregamentos e das condições de contorno do problema, seleção do número de etapas pretendidas na análise e, finalmente, geração da malha de elementos finitos correspondente ao corpo analisado. Acaba por ser uma ferramenta de ótimo desempenho em análises numéricas, gerando bons resultados para o devido projeto.

4.1 Cargas aplicadas

Devido às características do problema, para ser feita a avaliação das condições estruturais de uma gaiola, há a necessidade de verificar o comportamento da estrutura quando submetida à cargas verticais, laterais e frontais que simulem um possível tombamento e capotamento em circunstâncias críticas. Diante disso, é seguido um protocolo Australiano e Norma FIA para veículos de competição (AUSTRALIAN, 2012), (UNB, 2012). Os níveis de carga, de acordo com esse protocolo e norma, os níveis de carga nas direções vertical, lateral e frontal estão especificados na Tabela 2. É estimado um valor aproximado de $M=300\text{Kg}$ para a massa total do veículo, assumindo que o ocupante também esteja presente.

Tabela 2 – Cargas aplicadas na gaiola.

Tipo de carregamento	Carga vertical	Carga lateral	Carga frontal
Carga de projeto	$4.g.M=$ 11760 N	$1,5.g.M=$ 4440 N	$1.g.M=$ 2940 N

A aplicação de cargas verticais, laterais, e frontais, simula uma condição real de esforços que agem sob a gaiola em caso de capotamento ou tombamento. Mera semelhança é percebida na Figura 1 a qual representa um capotamento e tombamento típico de competição SAE-Baja, tal figura enfatiza a importância da aplicação desse tipo de carga. Os pontos de aplicação são estabelecidos de acordo com a Figura 14.



Figura 14 – Posicionamento das cargas aplicadas.

Para que o trabalho realizado seja bem fundamentado, é necessário apresentar algo já existente que sirva de comparação para com os resultados obtidos, tendo como meta a validação do sistema, sendo assim, o protocolo Australiano é utilizado como referência. Esse protocolo apresenta cargas e limites máximos permitidos para deflexão em determinadas estruturas que servem de proteção ao condutor. Esses critérios serão avaliados após os testes e será feita uma análise que mostrará se a estrutura segue o protocolo, caso siga, consequentemente será válida para competição, emq que os níveis exigidos pelo protocolo são mais rigorosos do que os previstos no regulamento SAE ([SAE-BRASIL, 2013](#)).

4.2 Malha de elementos finitos

Como dito anteriormente, o programa ABAQUS exige o conhecimento de resistência dos materiais, no qual deve ser inserido condições pré-definidas para as propriedades do aço, nas fases elástica e plástica utilizado na concepção da gaiola. Dois parâmetros devem ser inseridos para o regime elástico (Figura 15).

- O módulo de Young ou módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido e sua ordem de grandeza está na ordem de MPa, ou seja 205000 MPa ou 205 GPa;
- Coeficiente de Poisson, ν , mede a deformação transversal (em relação à direção longitudinal de aplicação da carga) de um material homogêneo e isotrópico é um valor adimensional e sua ordem é 0.3.

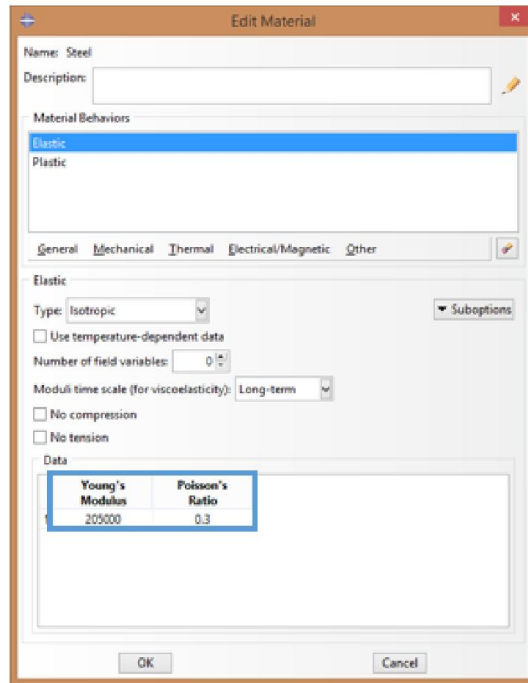


Figura 15 – Propriedades do material em fase Elástica.

Para o regime plástico, uma curva Tensão x Deformação com respectivos dados retirados de ensaios laboratoriais (Figura 8) é inserida no ABAQUS (Figura 16) para que o modelo possa ser ensaiado.

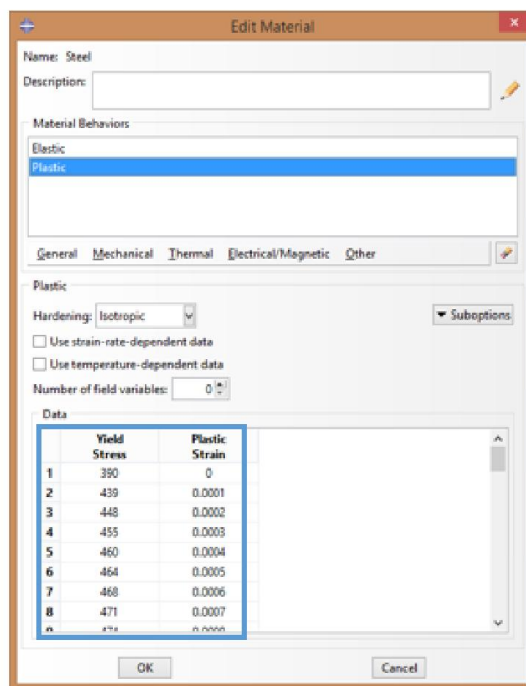


Figura 16 – Propriedades do material em fase plástica.

A função “Nlgeom” deve ser ativada (Figura 17) para admitir geometrias não-lineares (NL – não-linear, geom – geometria). Deformações plásticas, viscoelasticidade, análise de grandes deformações, são exemplos de não linearidade. Como pretende-se esperar grandes deformações, a opção “Nlgeom” permite medidas de deformação para explicar termos de ordem superior.

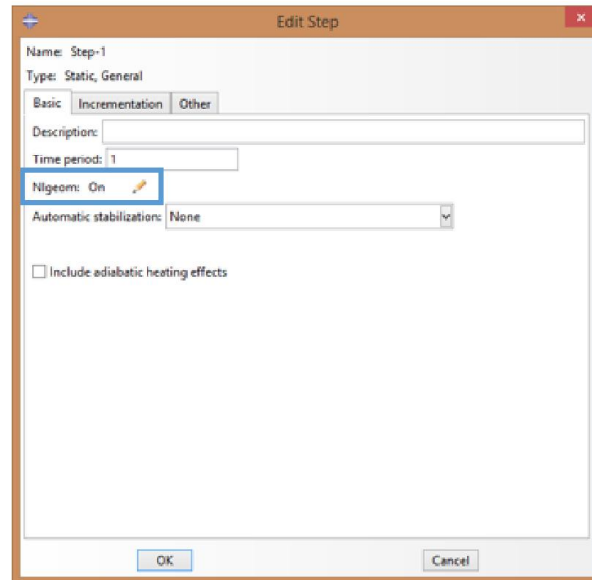


Figura 17 – Propriedades do material em fase plástica.

A próxima etapa é a aplicação das cargas, frontal, lateral e vertical as quais estão especificadas no tópico 4.1, como por exemplo na Figura 19. O carregamento é aplicado pontualmente (Figura 18) de uma maneira concentrada gerando o caso crítico.

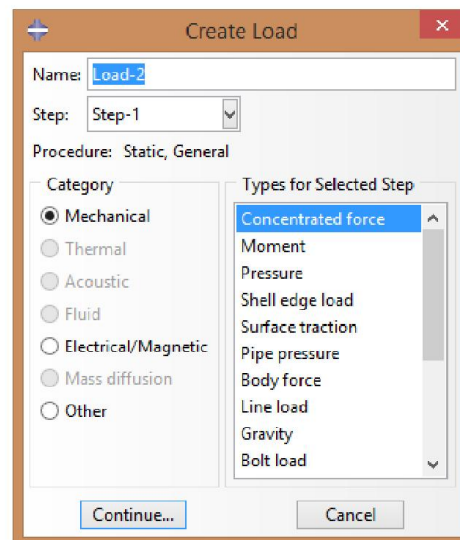


Figura 18 – Carga concentrada.

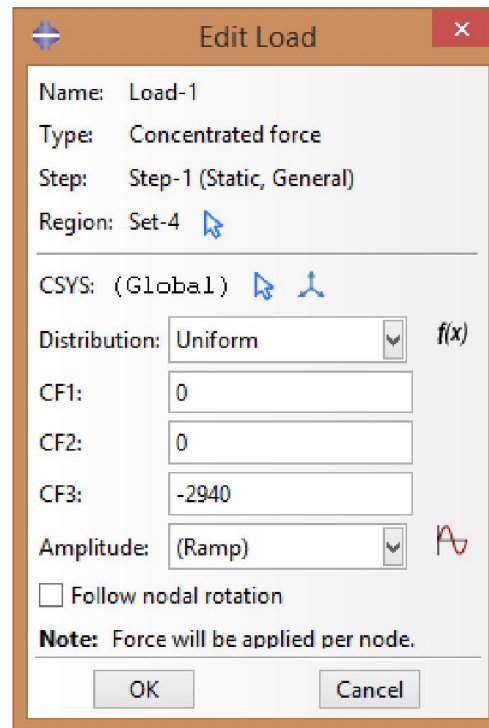


Figura 19 – Aplicação da carga, exemplo frontal.

Ações de engastamento também são aplicadas a pontos específicos da gaiola, restringindo o movimento em qualquer direção (Figura 20).

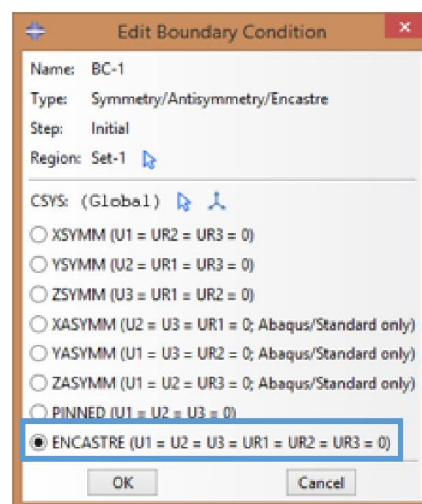


Figura 20 – Ação de engastamento.

A malha utilizada neste trabalho é do tipo não estruturada com elementos tetraédricos de 10 nós (Figura 21), cada nó compõe um número de elementos diferente conforme a região da malha. Nesse tipo de malha, os elementos triangulares são os elementos básicos

para a geração de malhas bidimensionais usadas hoje em métodos de elementos finitos (MEF) (BATISTA, 2005). O método utilizado para essa discretização foi o método da Triangulação de Delaunay o qual decompõe poliedros convexo gradados por conjuntos de pontos de modo único satisfazendo ao critério da “esfera vazia”. Este critério assegura q o círculo circunscrito a qualquer triângulo pertencente à triangulação não contenha pontos em seu interior (Figura 22).

A malha é então construída tendo 141653 elementos, 281833 nós para a gaiola com perfil de tubo 01 e 133284 elementos, 266013 nós para a gaiola com perfil de tubo 02.

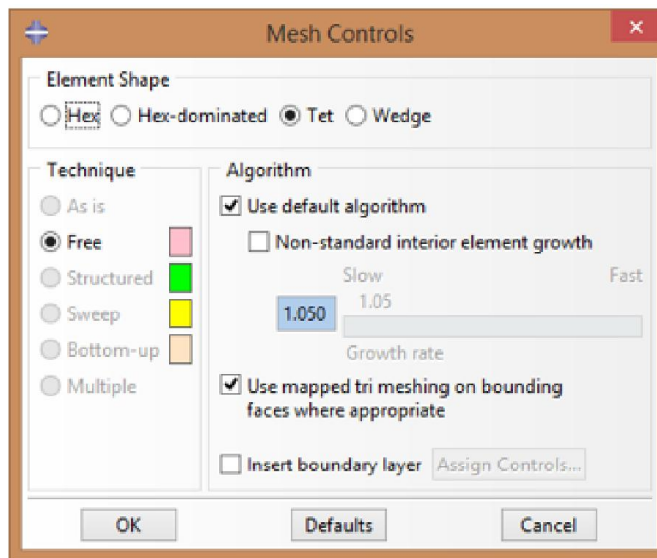


Figura 21 – Tipo de elemento da malha.

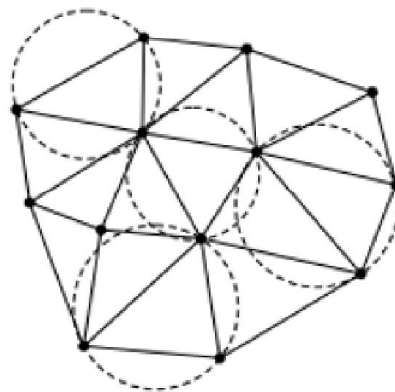


Figura 22 – Triangulação de Delaunay.

Uma das principais características dos geradores de nós baseados nessa triangulação é a produção de mais elementos por nó inserido. Uma vantagem da triangulação de

Delauney é que a malha final deve conter triângulos com maior qualidade, ou seja, triângulos mais próximos de equiláteros evitando a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos (AKEL, 2010).

A Preferência por triângulos e tetraedros em malhas não-estruturadas é justificável. Em meados da década de 70 já se sabia que estes são aplicáveis à análise bidimensional e tridimensional. Sabia-se ainda que malhas triangulares e tetraédricas são capazes de se adaptar a contornos de domínios complexos e permitir transição suave de tamanho de elemento (AKEL, 2010).

A malha utilizada apresenta propriedades que estão ilustradas na Figura 23.

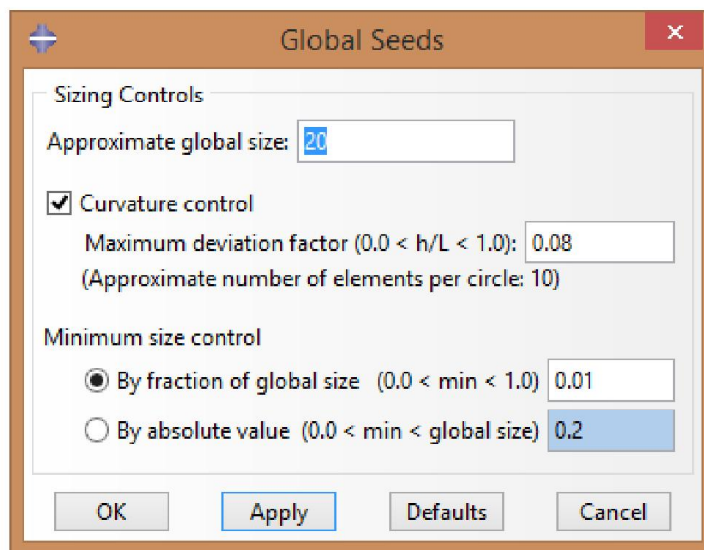


Figura 23 – Dimensões da malha.

Se trata de uma malha tetraédrica quadrática com 10 nós (Figura 24), com tamanho suficiente à precisão desejada para os resultados.

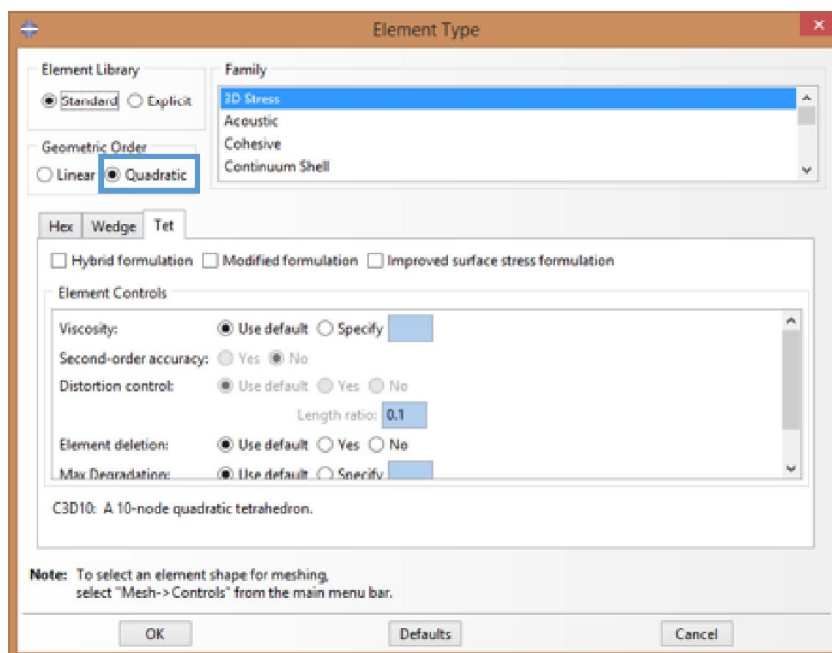


Figura 24 – Geometria quadrática.

Na geometria projetada, a malha se apresenta como na Figura 25

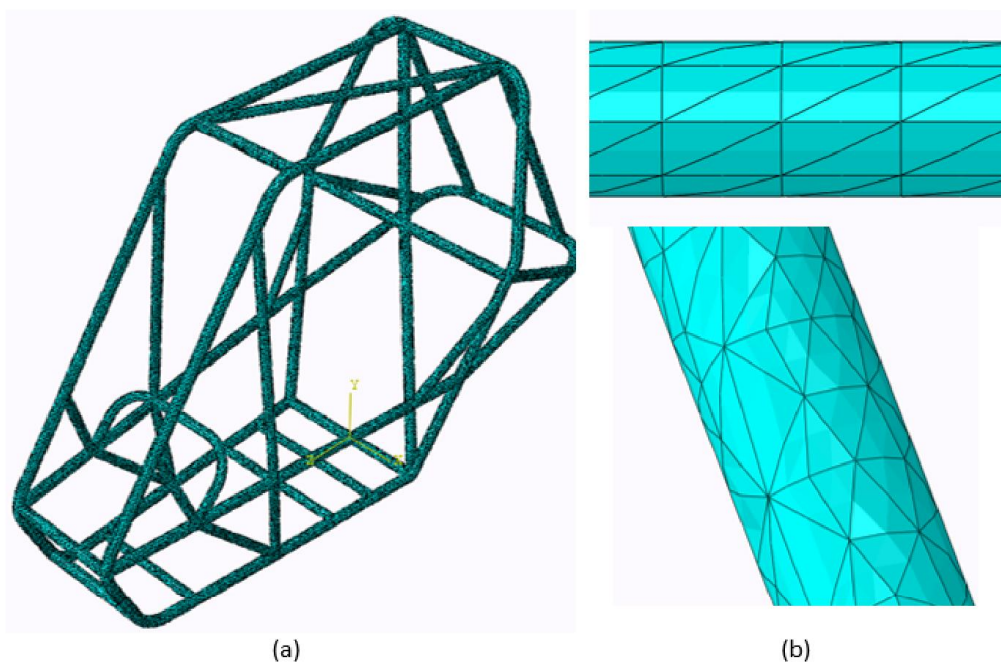


Figura 25 – Geometria malhada (a) Gaiola inteira, (b) Detalhe da malha.

4.3 Condições gerais de contorno

De acordo com as normas e protocolo citados (SAE-BRASIL, 2013), (UNB, 2012), (AUSTRALIAN, 2012), para que o piloto se mantenha em segurança dentro da estrutura, a gaiola pode apresentar uma deflexão máxima nas três dimensões (lateral/vertical/longitudinal) de até 152,4 milímetros para a norma SAE-Baja e 100 milímetros para o protocolo australiano. A menor deflexão admitida será assumida como caso crítico quando sujeita às cargas destacadas na Tabela 2 e dados os pontos de aplicação exibidos nas Figura 14. Obedecida esta condição de contorno, a estrutura possuirá então um nível de rigidez adequado.

A fixação em dois tubos da parte inferior do chassi serve como condição de contorno, simulando o mesmo de maneira estática.

Além disso, segundo a gaiola já disponível em modelo físico, o material utilizado para fabricação deste tipo de estrutura possui um limite de escoamento de 390MPa com suas propriedades disponível no tópico 3.1. É importante ressaltar que a seleção de materiais com limite de escoamento na faixa inferior ao do material da gaiola, vai resultar em uma seção transversal mais robusta para a estrutura, ou seja, maior diâmetro externo e espessura da seção tubular. Isto poderá acarretar em uma estrutura com elevado peso próprio. Desta forma, de acordo com (UNB, 2012), se recomenda uma ponderação entre as propriedades materiais e as dimensões estruturais de maneira a se obter uma estrutura adequada.

Parte V

RESULTADOS NUMÉRICOS

5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da análise pelo método dos elementos finitos (MEF) do chassi tubular tipo gaiola para veículos BAJA, que foi submetido aos carregamentos pontuais disponíveis no tópico 4.1.

Os modelos foram processados no ambiente ABAQUS/CAE 6.13-1 realizando-se uma análise do tipo estrutural estática. Os modelos MEF foram sendo criados conforme a obtenção dos resultados de tensão equivalente à máxima de von-Mises e equivalentes máxima à deformação plástica mostrando a localização desta concentração de tensões.

Os resultados serão agrupados de acordo com a orientação das cargas aplicadas, em que é possível verificar as deformações para todos os esforços distribuídos em gaiolas modeladas com tubos de diâmetros diferentes, sendo feita, dessa forma, a verificação se a estrutura resiste a esses tipos de carregamento.

5.1 Resultados devido às cargas aplicadas

5.1.1 Carga Vertical

As Figuras das próximas subseções 5.1.1.1 e 5.1.1.2, representam o contorno das deflexões, tensões de Von-Mises e deformações plásticas equivalentes obtidas através da simulação em elementos finitos da estrutura, tendo como base as duas gaiolas modeladas e com a aplicação de uma carga vertical disponível no tópico 4.1. Se observa nas simulações que o ponto de máxima deformação plástica equivalente está no chamado anel central da estrutura, sendo desconsiderada as tensões neste arredores devido as cargas aplicadas serem de forma pontual.

5.1.1.1 Gaiola 01

- Deflexão elástica (U) [mm]

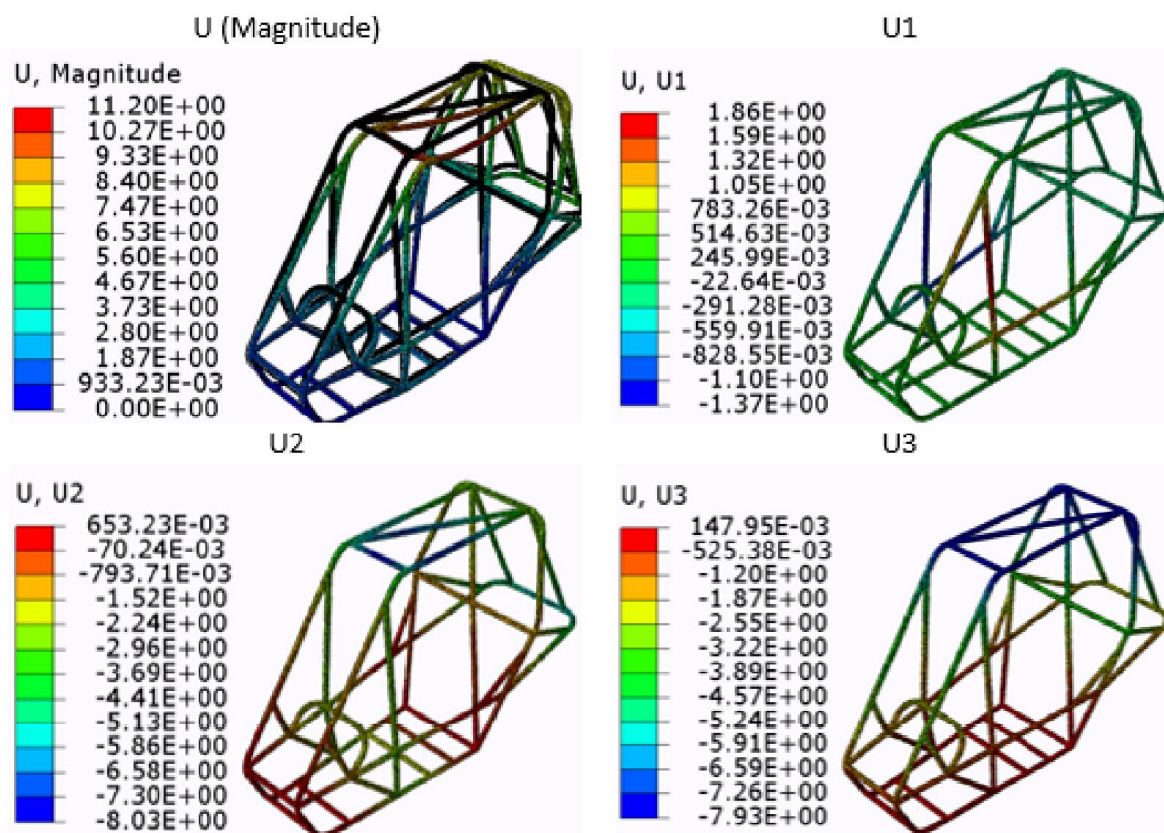


Figura 26 – Caso estático deflexão elástica para tubo 01 devido carga vertical.

- Tensão de von-Mises (S) [MPa]

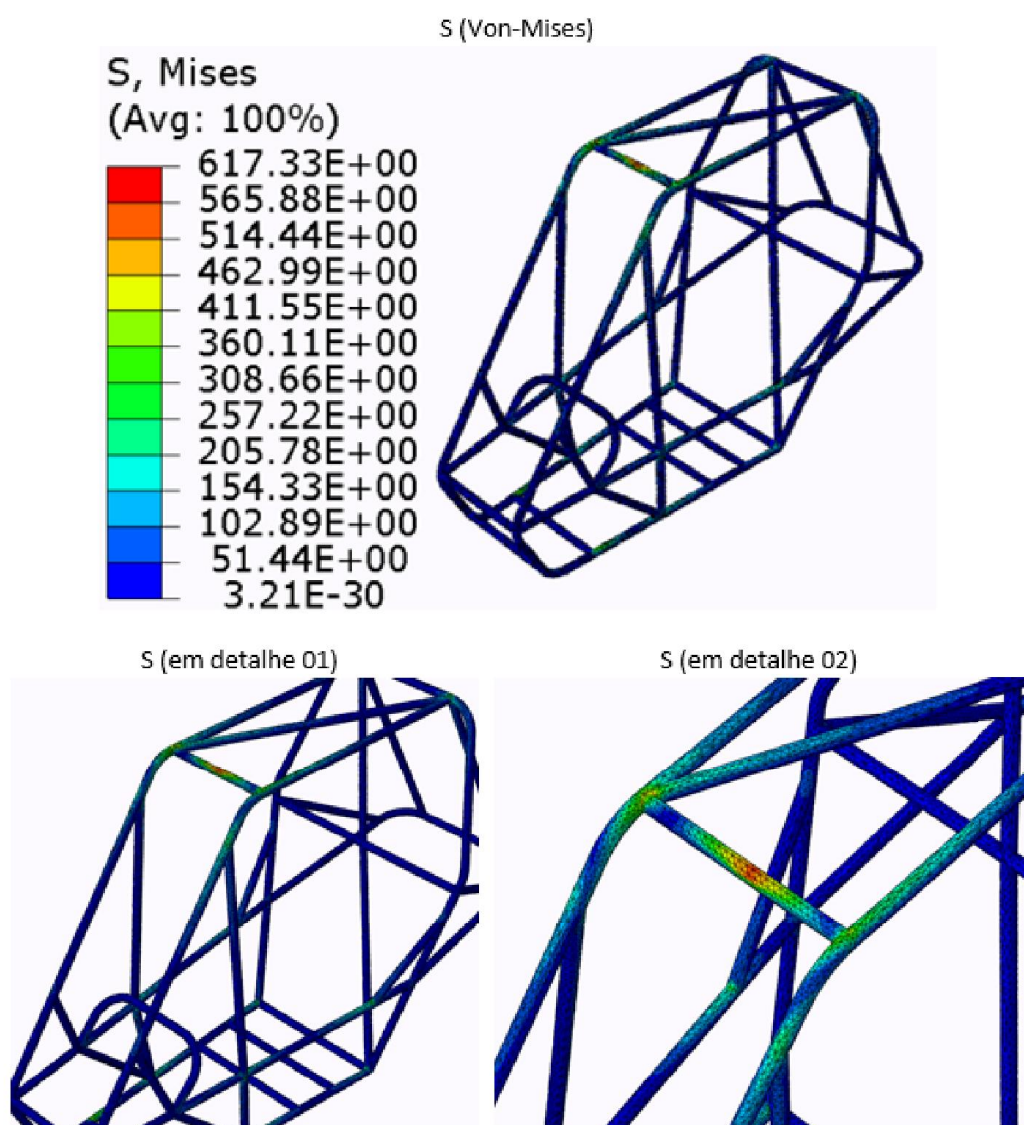


Figura 27 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 01 devido carga vertical.

- Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ)

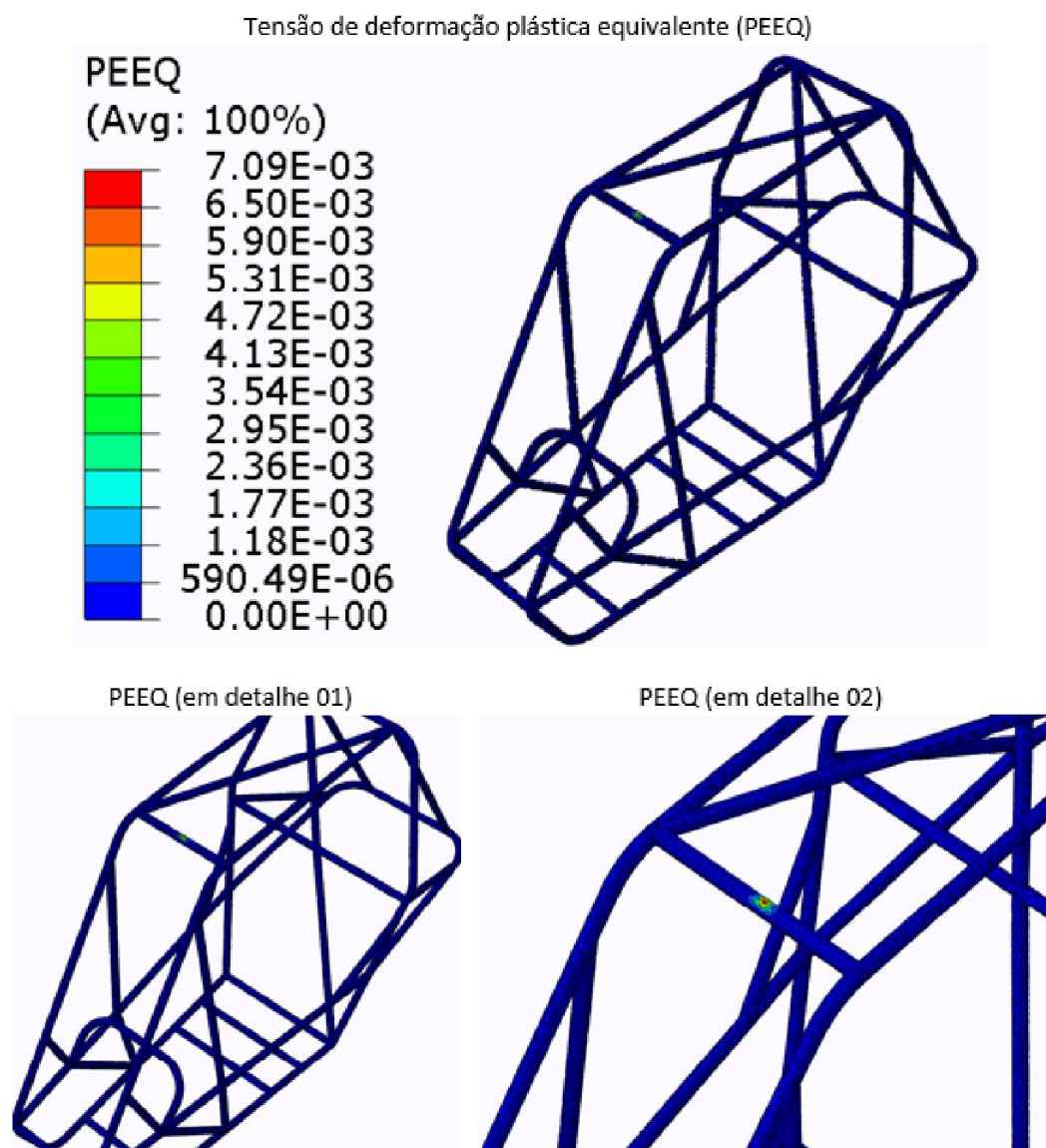


Figura 28 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 01 para carga vertical.

5.1.1.2 Gaiola 02

- Deflexão elástica (U) [mm]

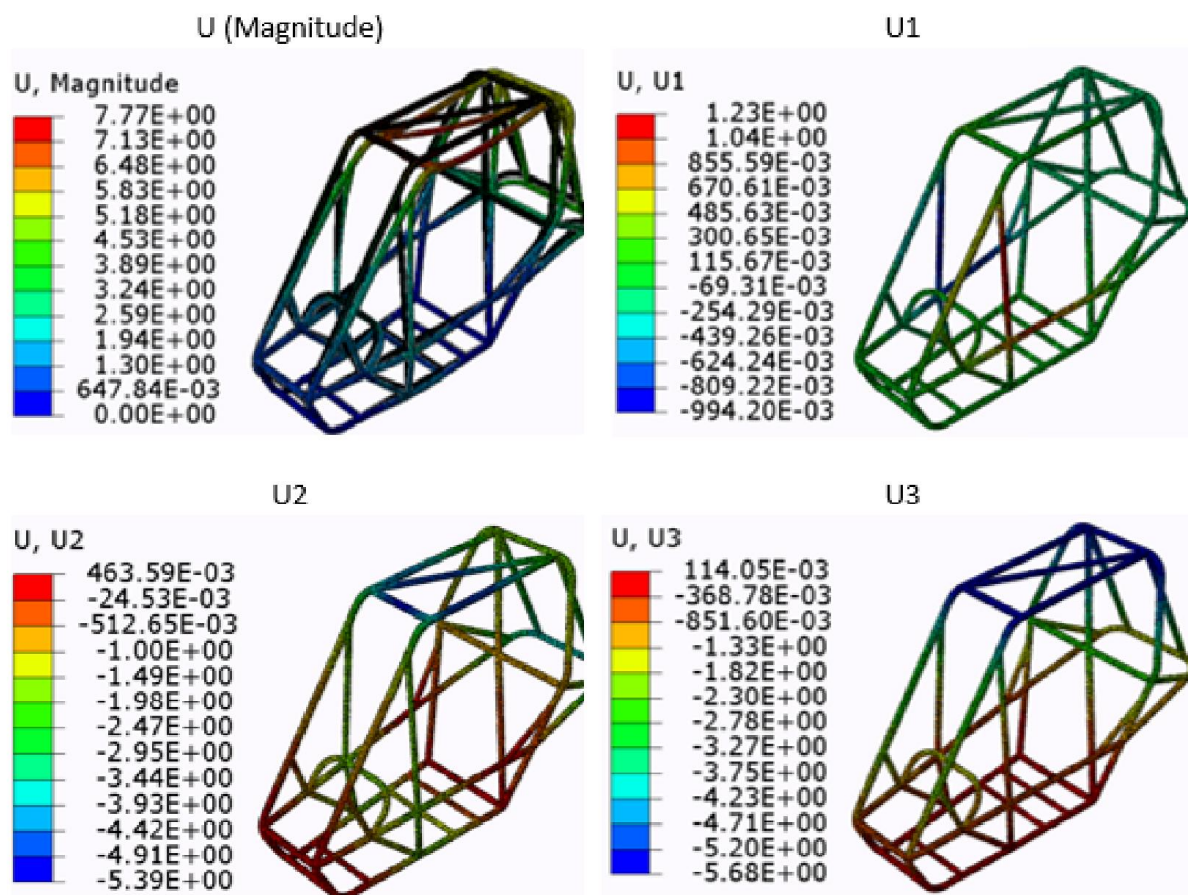


Figura 29 – Caso estático deflexão elástica para tubo 02 devido carga vertical.

- Tensão de von-Mises (S) [MPa]

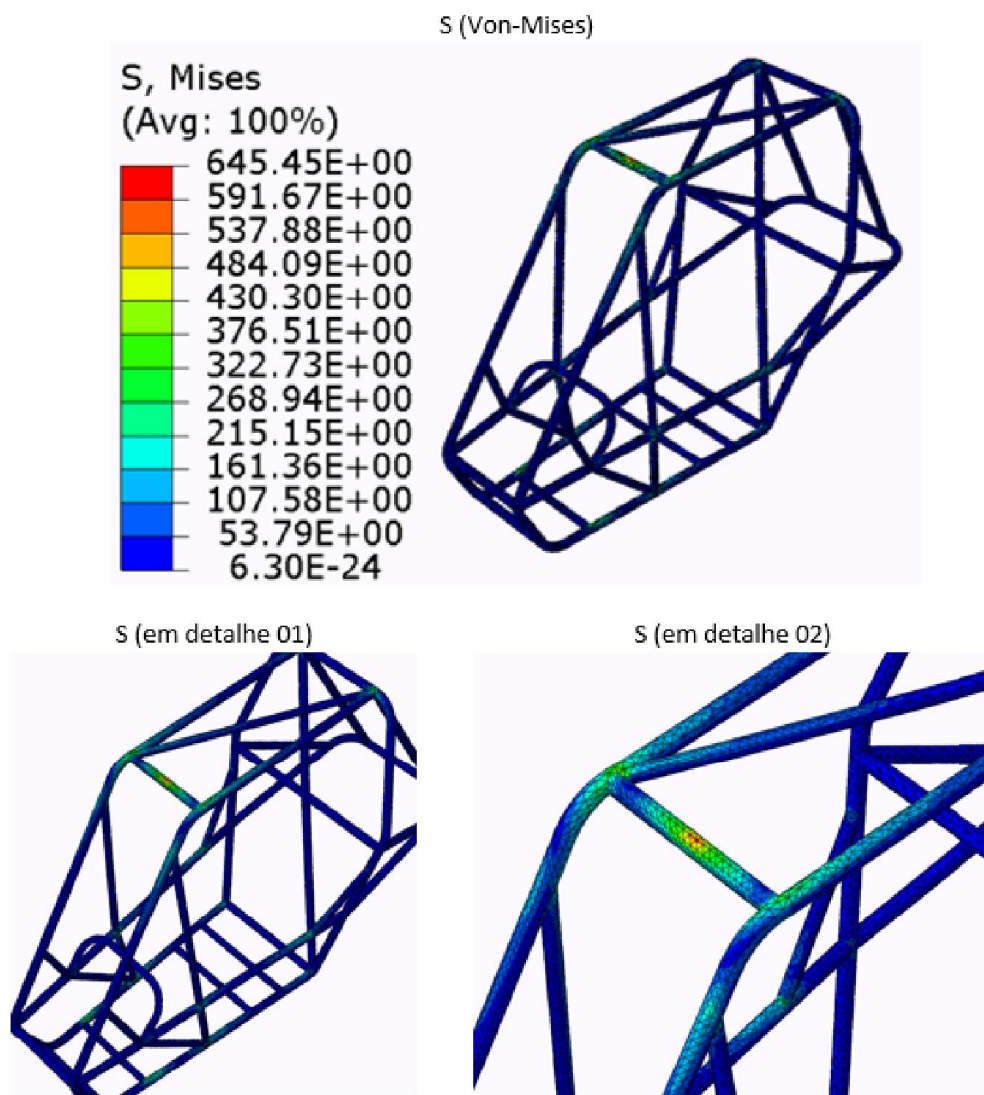


Figura 30 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 02 devido carga vertical.

- Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ)

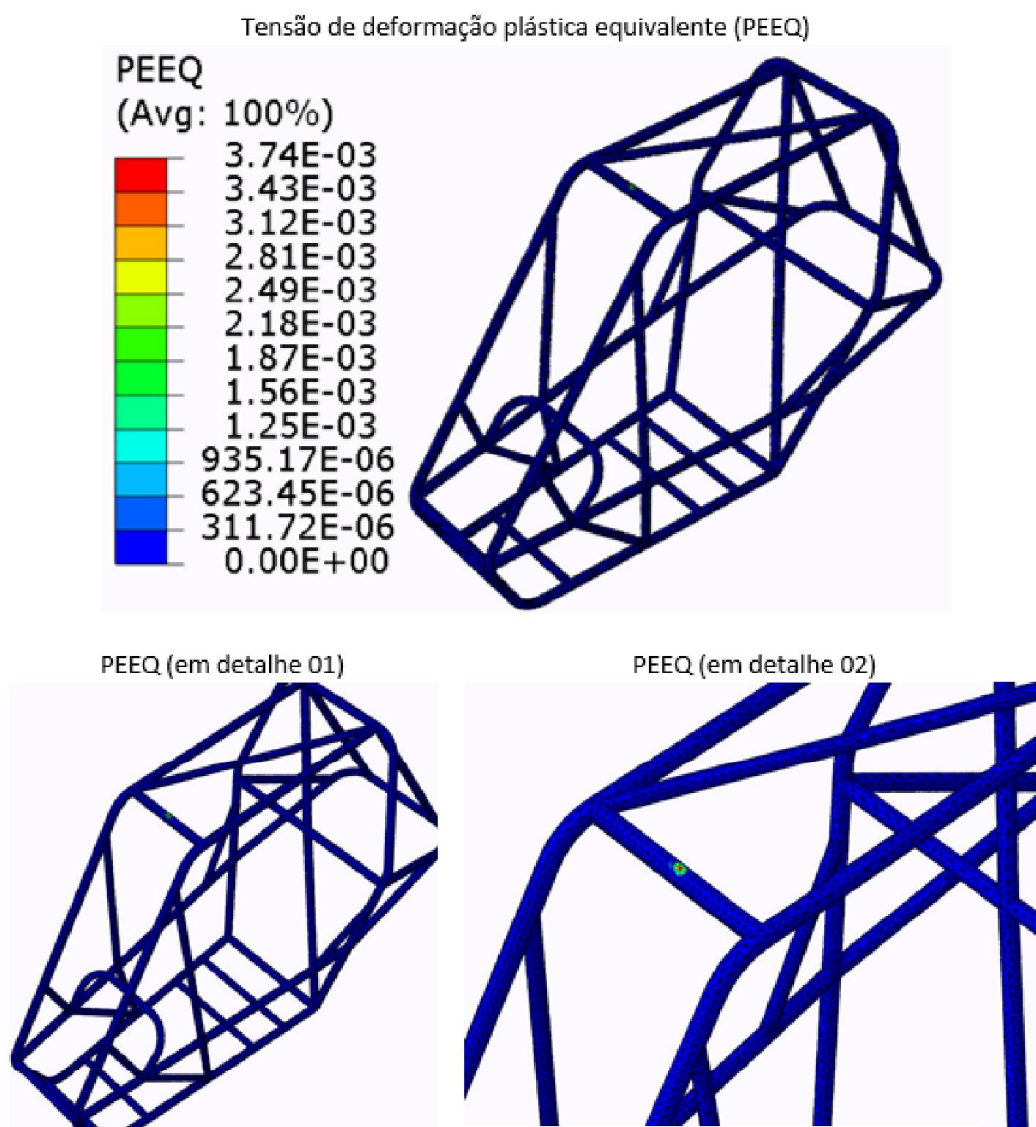


Figura 31 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 02 para carga vertical.

5.1.2 Carga Lateral

As Figuras das próximas subções 5.1.2.1 e 5.1.2.2 exibem o contorno das deflexões, tensões de Von-Mises e deformações plásticas equivalentes obtidas por meio da simulação em elementos finitos da estrutura, tendo como base as duas gaiolas modeladas e com a aplicação de uma carga lateral disponível em 4.1. Se observa nas simulações, que o ponto de máxima deformação plástica equivalente está com um valor muito pequeno quando feita a análise no gráfico Tensão x Deformação.

5.1.2.1 Gaiola 01

- Deflexão elástica (U) [mm]

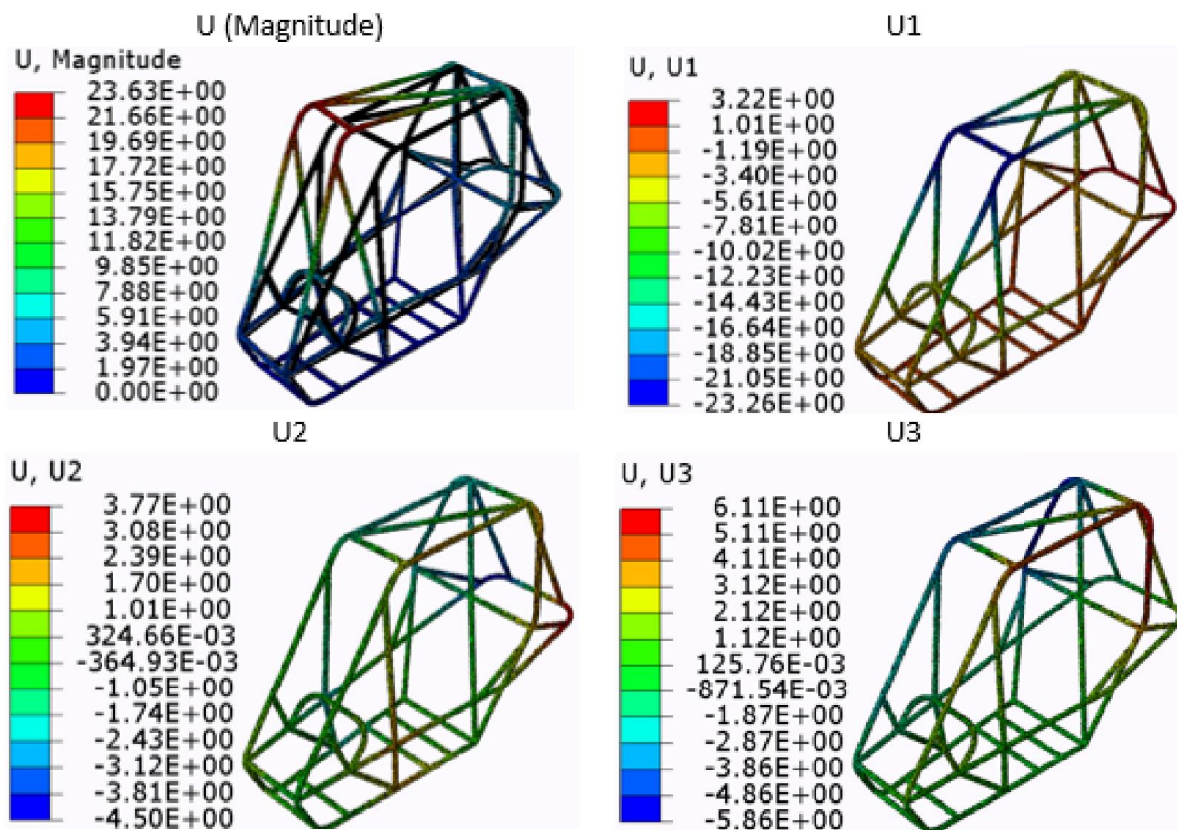


Figura 32 – Caso estático deflexão elástica para tubo 01 devido carga lateral.

- Tensão de von-Mises (S) [MPa]

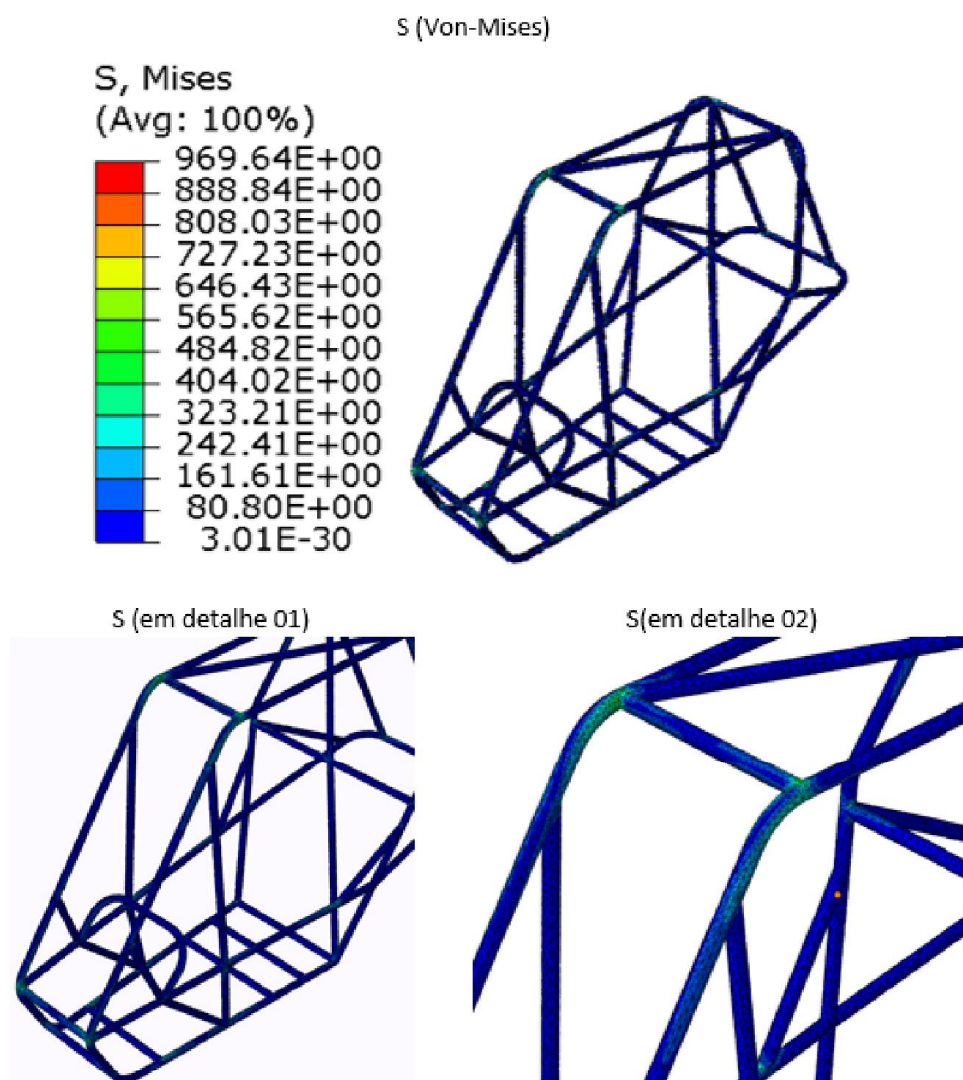


Figura 33 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 01 devido carga lateral.

- Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ)

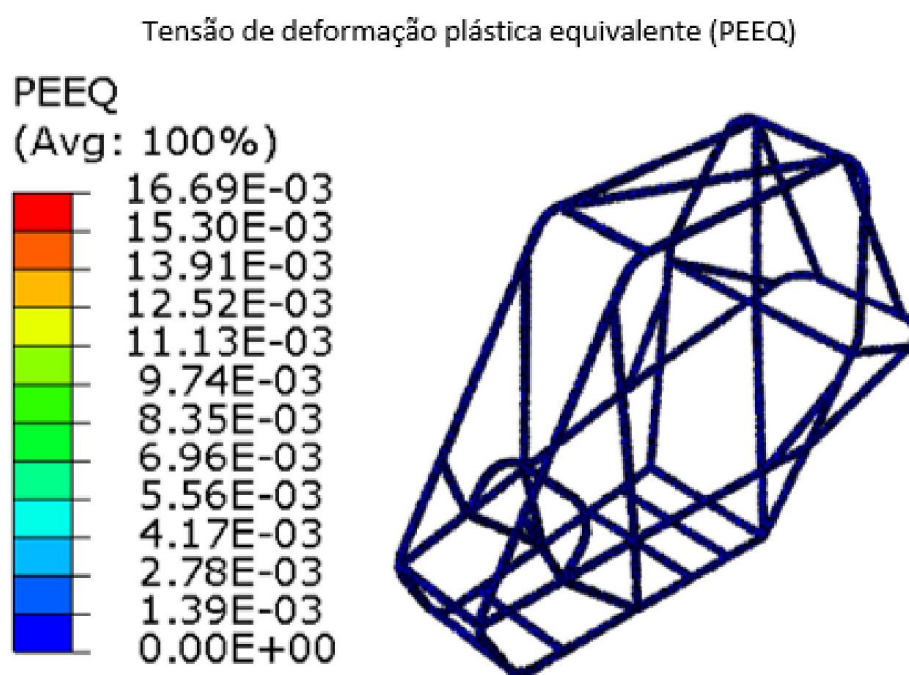


Figura 34 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 01 para carga lateral.

5.1.2.2 Gaiola 02

- Deflexão elástica (U) [mm]

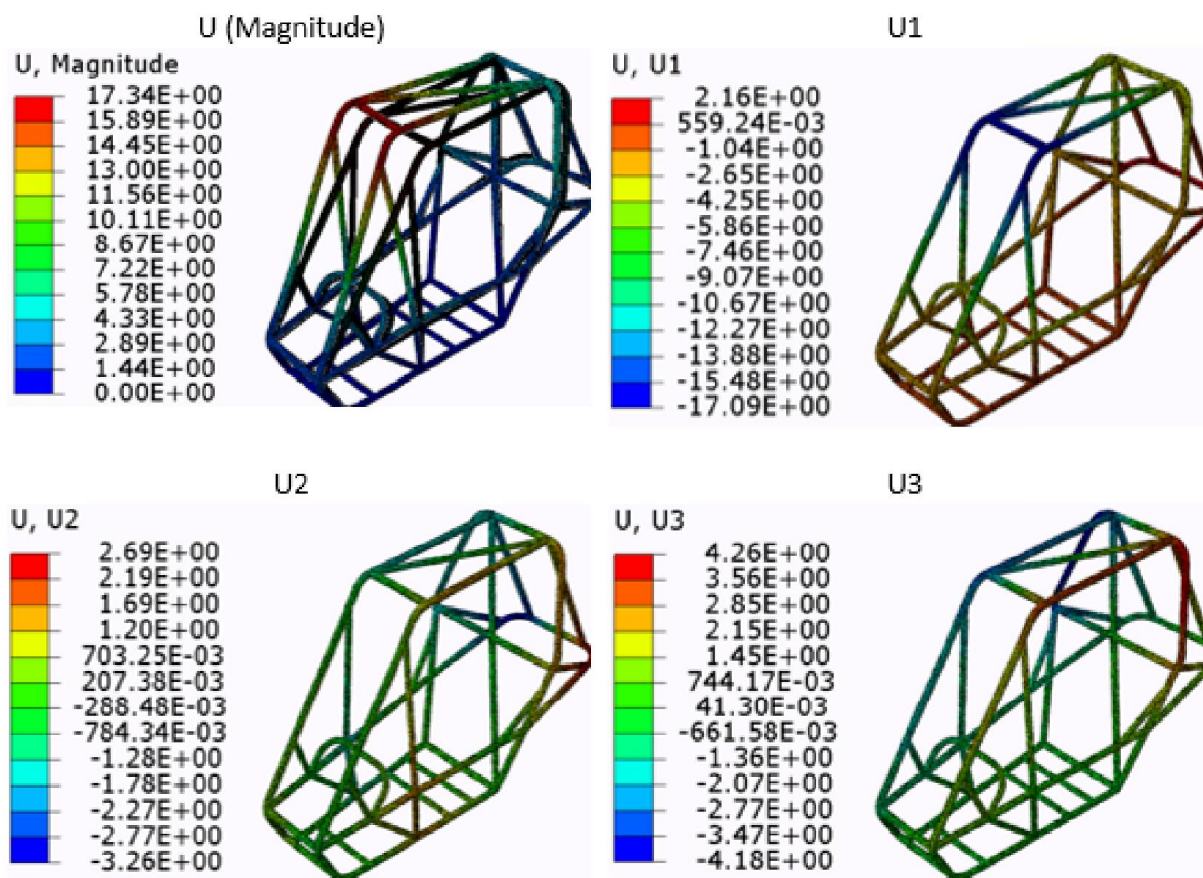


Figura 35 – Caso estático deflexão elástica para tubo 02 devido carga lateral.

- Tensão de von-Mises (S) [MPa]

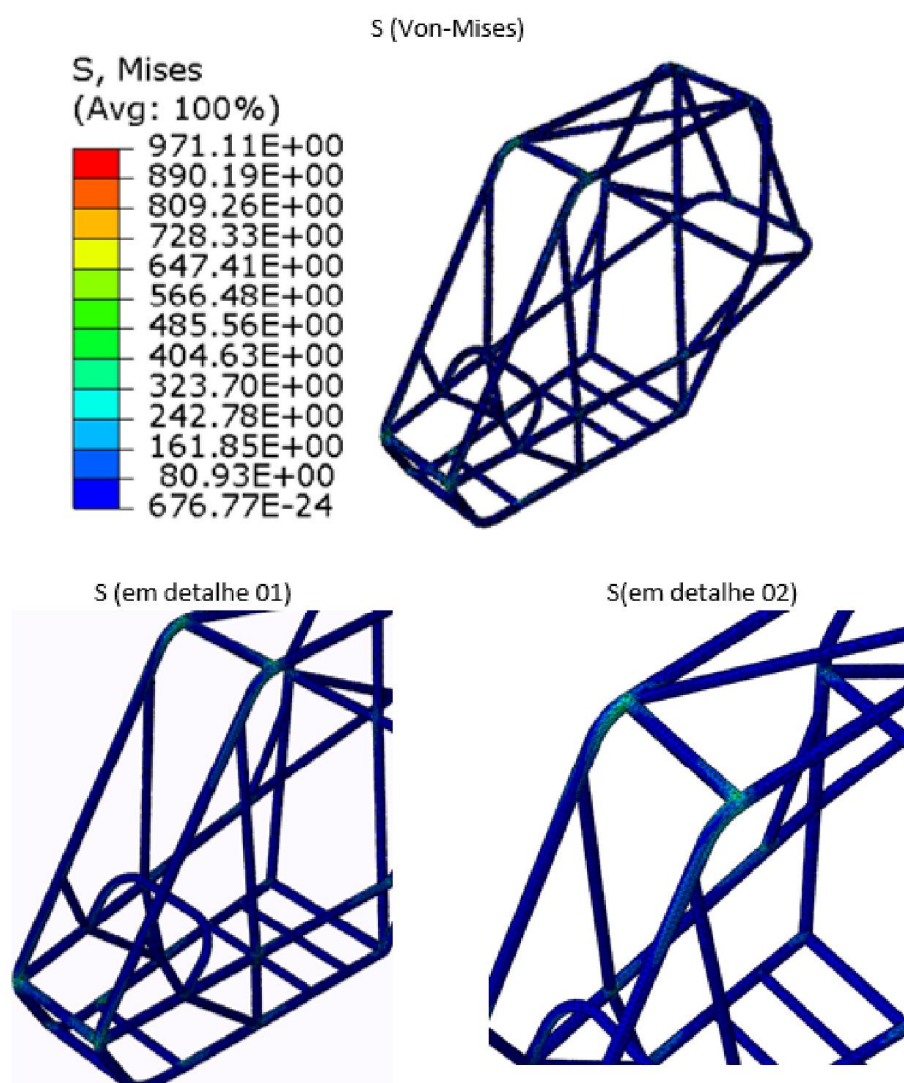


Figura 36 – Caso estático tensão de von-Mises para tubo 02 devido carga lateral.

- Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ)

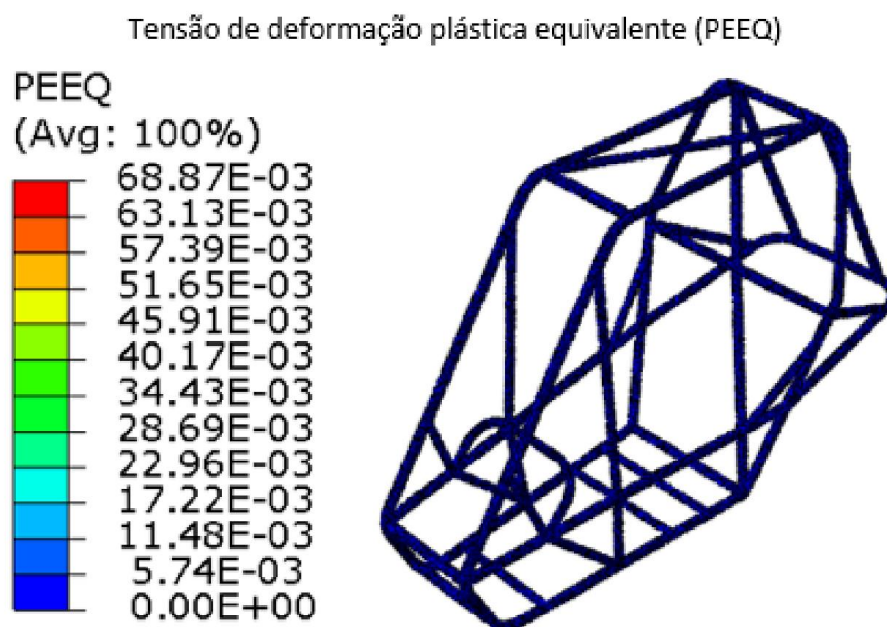


Figura 37 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 02 para carga lateral.

5.1.3 Carga Frontal

As Figuras das próximas subções 5.1.3.1 e 5.1.3.2 expõem o contorno das deflexões, tensões de Von-Mises e deformações plásticas equivalentes obtidas durante a simulação em elementos finitos da estrutura, tendo como base as duas gaiolas modeladas e com a aplicação de uma carga frontal disponível em 4.1. Se observa nas simulações, que o ponto de máxima deformação plástica equivalente está com um valor muito pequeno quando feita a análise no gráfico Tensão x Deformação.

5.1.3.1 Gaiola 01

- Deflexão elástica (U)

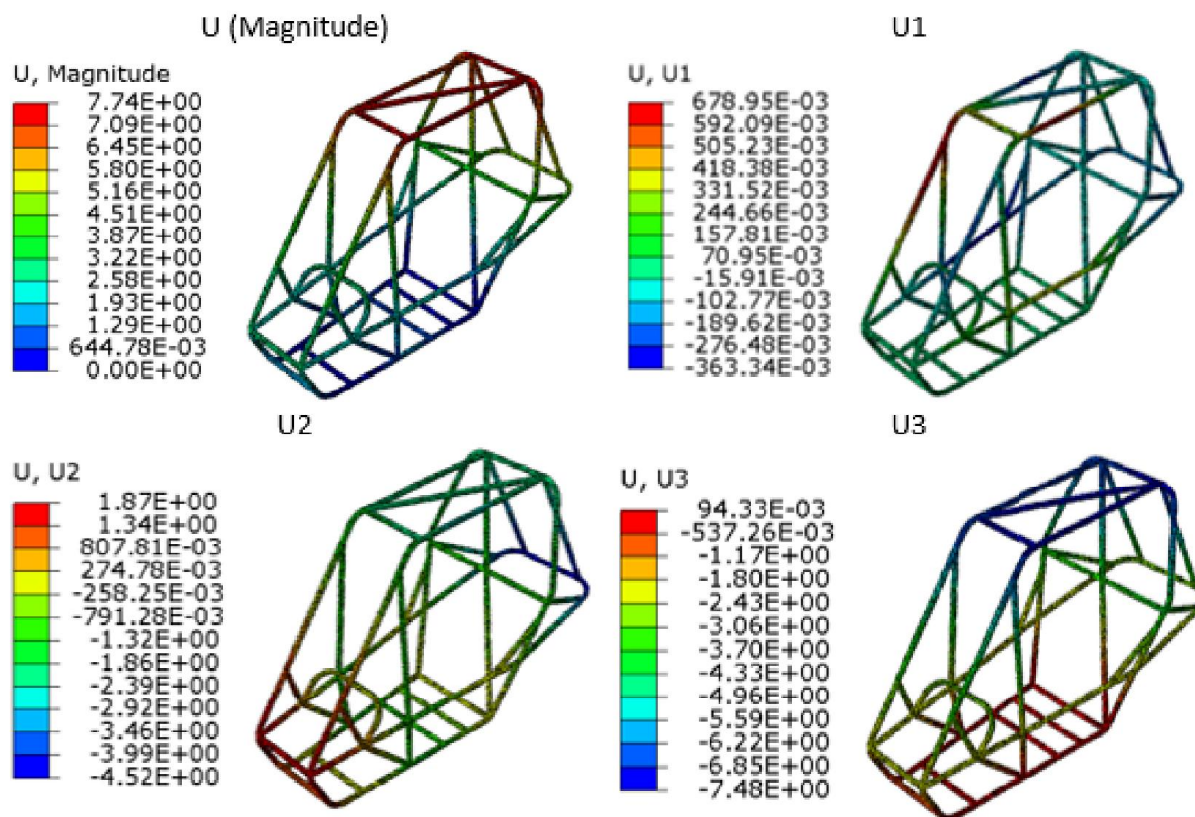


Figura 38 – Caso estático deflexão clássica para tubo 01 devido carga frontal.

- Tensão de von-Mises (S)

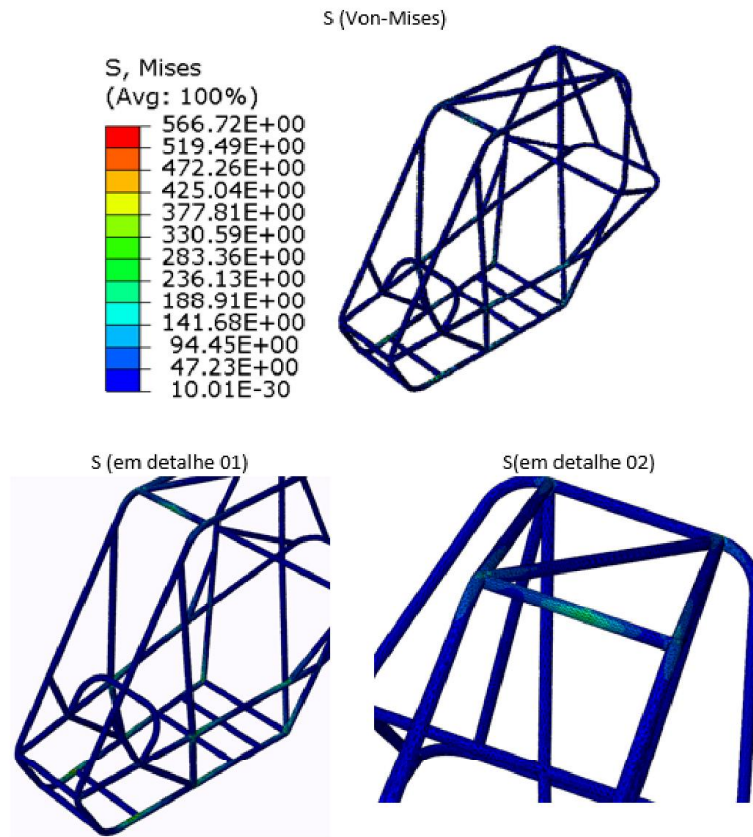


Figura 39 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 01 devido carga frontal.

- Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ)

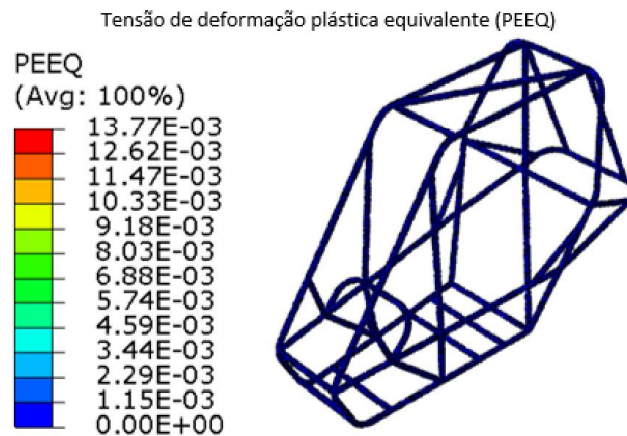


Figura 40 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 01 para carga frontal.

5.1.3.2 Gaiola 02

- Deflexão elástica (U)

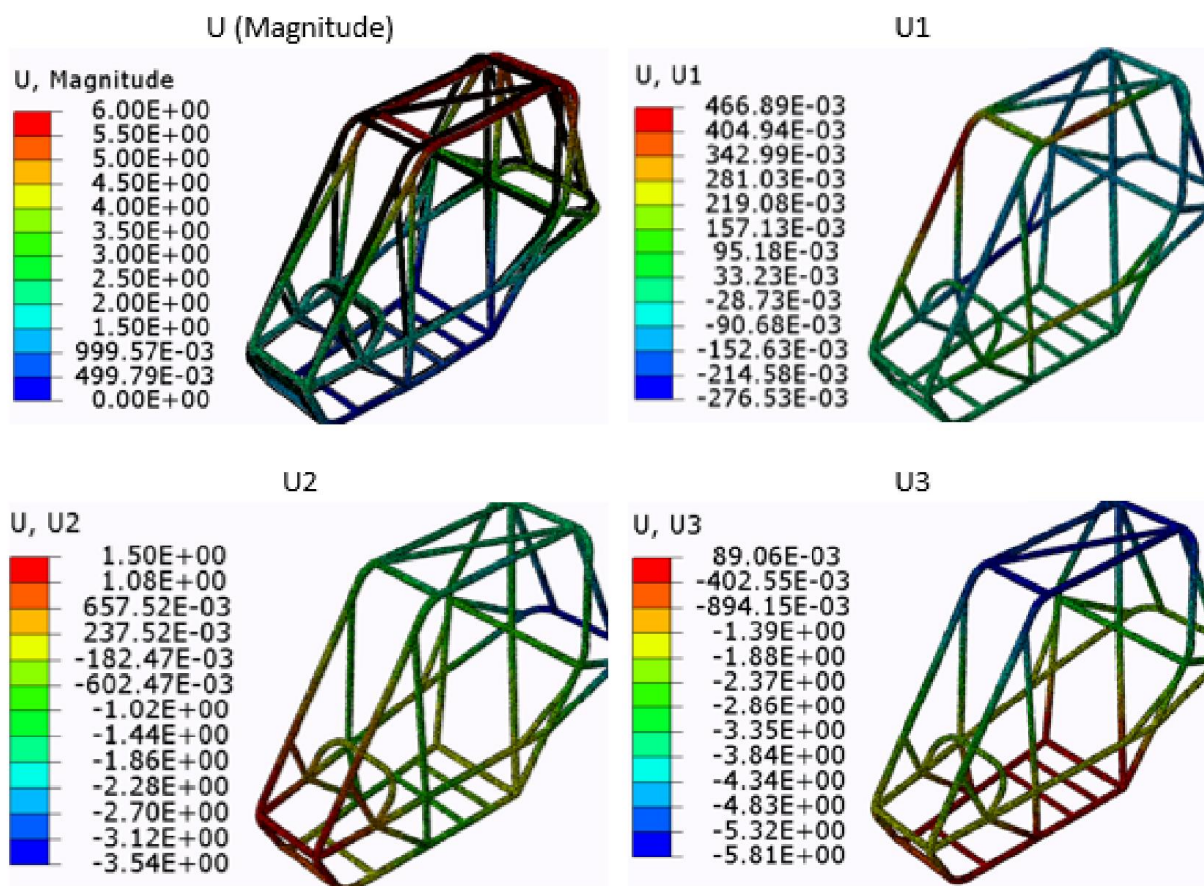


Figura 41 – Caso estático deflexão elástica para tubo 02 devido carga frontal.

- Tensão de von-Mises (S)

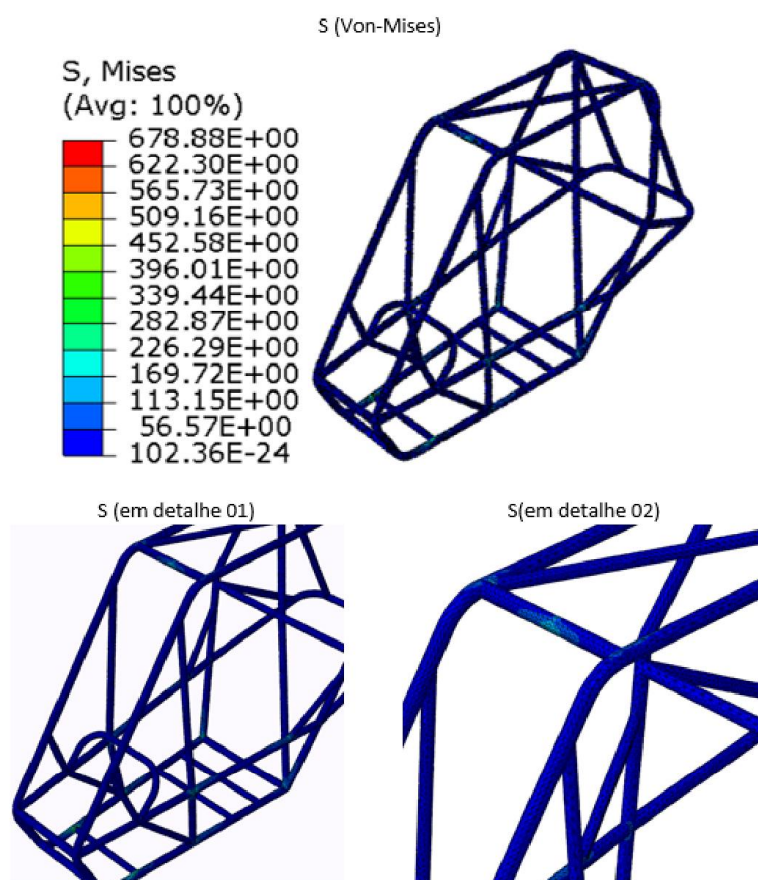


Figura 42 – Caso estático tensão de von-Misses para tubo 02 devido carga frontal.

- Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ)

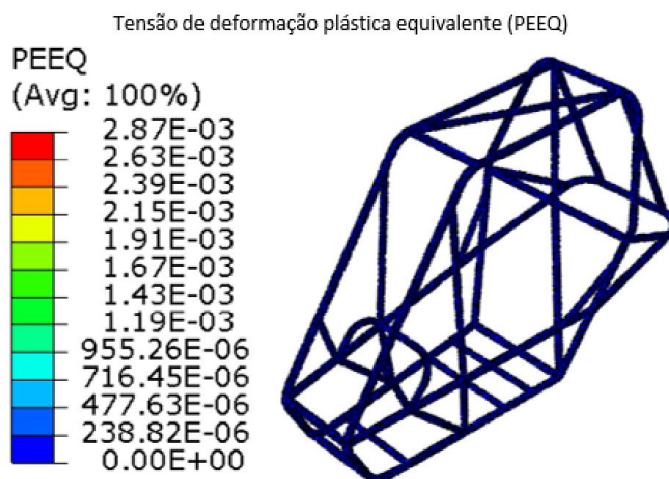


Figura 43 – Tensão de deformação plástica equivalente (PEEQ) caso tubo 02 para carga frontal.

5.2 Discussão dos resultados

A Tabela 3 e 4 exibe um resumo das deflexões, tensões equivalentes e tensões de deformação plástica equivalente após a aplicação das cargas usadas como condições de contorno. As tensões visualizadas ao redor da carga pontual são desconsideradas.

Tabela 3 – Resultados para gaiola 01.

Carga	U Mag(mm)	U1(mm)	U2(mm)	U3(mm)	S(Von-Mises) MPa	PEEQ
Vertical F=11760N	11.20	1.86	8.03	7.93	360.11	7.09e-3
Lateral F=4410N	23.63	23.26	4.50	6.11	565.62	16.69e-3
Frontal F=2940N	7.74	678e-3	4.52	7.48	330.59	13.77e-3

Tabela 4 – Resultados para gaiola 02.

Carga	U Mag(mm)	U1(mm)	U2(mm)	U3(mm)	S(Von-Mises) MPa	PEEQ
Vertical F=11760N	7.77	1.23	5.39	5.68	376.51	3.74e-3
Lateral F=4410N	17.34	17.09	3.26	4.26	566.48	68.87e-3
Frontal F=2940N	6.00	466e-3	3.54	5.81	396.01	2.87e-3

As deflexões observadas nos resultados apresentaram níveis baixos o suficiente para dizer que cada modelo de gaiola oferece uma certa rigidez que passa pelos pré-requisitos de

regulamento, normas e protocolos, mesmo com o grau de deflexão, tensões de Von-Mises e deformações plásticas sendo diferentes para cada estrutura.

As condições de contorno aplicadas nas simulações computacionais causam na estrutura não apenas um simples fenômeno de tração ou compressão, mais do que isso, causa de algum modo a distorção angular dos elementos tensionados (BEER FP E JOHNSTON, 1995). Isso faz com que a utilização do critério de Von-Mises para analisar os níveis de escoamento seja o mais coerente possível.

A tensão máxima de escoamento do material escolhido é $S_y = 390MPa$ sendo ultrapassada em alguns dos resultados através do método de Von-Mises. Isso demonstra que o limite de escoamento do material foi atingido, passado para o regime plástico.

Mesmo atingindo o regime plástico, a estrutura não se desintegra devido as deformações serem pequenas, encontradas em uma escala de 10^{-3} . Contudo, partindo do princípio de as mesmas estarem já no regime plástico, a posterior utilização da estrutura torna-se inviável.

As maiores tensões e maiores deslocamentos alcançados foram verificados quando aplicada a carga lateral no modelo proposto. Mesmo passando pelo limite de escoamento do material, as tensões de deformação plástica com magnitudes quase desprezíveis revela mais uma vez que o limite plástico atingido pela estrutura é muito pequeno garantindo a não ruptura da estrutura.

As duas propostas de gaiola passaram pelos testes aplicados em método dos elementos finitos, que pode ser comprovado nas Tabelas 3 e 4, que a gaiola 01 apresentou maiores deflexões/deformações entretanto menores tensões de Von-Mises comparada com a gaiola 02.

Um projeto bem elaborado possui zonas de absorção de impactos, ou zonas de deformação, as quais são projetadas para proteger o ocupante do carro em caso de acidentes (VOLKSWAGEN, 2014). Essas zonas são projetadas para absorver a energia durante colisões, de forma que a maior parte das forças resultantes seja dissipada fora do compartimento dos passageiros. Este efeito ocorre através da deformação de modo controlado.

Tudo isso acaba mostrando que o projeto está reagindo de uma boa maneira, no qual a gaiola apresenta uma rigidez boa o suficiente e deformações controladas que vem apenas a garantir segurança ao piloto quando sujeito a acidentes.

Parte VI

ENSAIO EXPERIMENTAL

6 NORMAS DE TESTE E SEU HISTÓRICO

As normas do teste de ROPS foram desenvolvidas por uma necessidade de proteger o piloto ou mesmo operador de máquinas, pois o rápido aumento do uso de equipamentos móveis na década de 1950 levou a problemas de segurança devido a mortes resultantes de capotamentos. Estas mortes foram atribuídas a uma variedade de fatores, incluindo erro do operador, falta de formação do operador e inclinação do terreno onde o veículo trabalha além de pilotos que levam seus carros a limites que podem gerar acidentes quando submetido a uma competição. Diversas autoridades a nível mundial decidiram que a utilização de ROPS que garantam segurança aos ocupantes fosse a melhor opção para evitar mortes, uma vez que iria eliminar tanto o julgamento do operador quanto a incerteza de um dispositivo de segurança que opere com rapidez e precisão (CESA; OLIVEIRA, 2011).

Os estudos iniciais de todas as normas e protocolos propostos para o ROPS foram feitos com capotamentos reais das estruturas com variedade de pistas e terrenos para estabelecer a quantidade de energia que seria necessário ser absorvida pelo ROPS (UNB, 2012). Algumas incertezas com relação à repetibilidade do capotamento levaram ao desenvolvimento de testes laboratoriais. No primeiro momento foram submetidos a impactos de pêndulos metálicos na estrutura, definidos como métodos dinâmicos, mas ultimamente também foram concebidos métodos estáticos, que são definidos por terem as cargas aplicadas a velocidades inferiores à 5 mm/s. Os órgãos responsáveis pelas normas deixam a opção de escolha entre ensaios dinâmicos ou estáticos por possuírem resultados semelhantes. Ambos ensaios apresentam suas características, onde o estático permite uma avaliação mais detalhada dos pontos fracos e fortes da estrutura, enquanto o dinâmico permite representar melhor as reais condições de deformação pois leva em consideração a fragilização dos materiais devido à alta velocidade de deformação da estrutura.

Devido à possibilidade de avaliação mais detalhada da deformação da estrutura e apresentar critérios de comparação com normas e protocolos já existentes, foi escolhida a metodologia de teste estático para a realização deste trabalho. Para o critério de aplicação da carga, várias normas e protocolos seguem um mesmo padrão, em que a utilização do Protocolo Australiano ADR 59 (AUSTRALIAN, 2012) serviu de parâmetro, onde suas características são mais rigorosas quando comparadas com as do regulamento SAE Baja (SAE-BRASIL, 2013).

6.1 Descrição da bancada

A bancada de ensaio apresenta-se de uma forma bastante didática, que permite ensaiar protótipos com diferentes geometrias e aplicações. É robusta e de grande rigidez, minimizando possíveis influências nas medições. Está disponível no laboratório de processos de fabricação da Universidade de Brasília campus Gama apresentando os seguintes componentes:



Figura 44 – Bancada com vista isométrica apresentando todos os componentes.

Sua mesa principal é composta por perfis "I" e chapas de 9mm de aço que permite a disposição dos suportes em vários locais, aumentando a viabilidade de execução de projetos díspares. Estas chapas estão afixadas sobre a bancada que serve de apoio para o sistema de medição concebido pela NAJA (Figura 45). O trilho (Figura 46) responsável por apoiar o robô é solto, devendo ser fixo em algum local para que facilite a obtenção dos pontos de referência.



Figura 45 – Bancada principal de apoio CELETTE (CELETTE, 2013).



Figura 46 – Trilho e robô (CELETTE, 2013).

O sistema de obtenção das coordenadas de referência é permitido através da utilização do robô NAJA Evolution (Figura 47), onde os pontos de controle são retirados movendo a cabeça de medição juntamente com uma haste comprida que apresenta um sensor em sua extremidade que detecta em qual ponto do espaço se encontra o local desejado. A comunicação do robô com o computador portador do software é sem fio pelo método "bluetooth". Sua precisão é de 0.1 milímetros, o que garante uma boa confiabili-

dade desse sistema nas devidas condições. Faz o reconhecimento automático dos pontos desejados e não há interferência acústica nos resultados.



Figura 47 – Robô NAJA Evolution (CELETTE, 2013).

Os sensores (Figura 48) vem em um conjunto que possibilita, através de seus diferentes formatos, uma maior opção de mapeamento dos pontos de referência, no qual a geometria pode exigir a utilização vários deles.



Figura 48 – Robô NAJA Evolution (CELETTE, 2013).

Dois pórticos são disponíveis para aumentar a possibilidade de ensaios (Figura 49). São feitos de aço em forma de viga ou perfil "I" com resistência suficiente para aguentar

os esforços exigidos nos ensaios. O maior está disponível na transversal aparafusado junto ao chão, fazendo a fixação do atuador na vertical e frontal. O menor deles está fixo sobre a bancada principal CELETTE sendo responsável por realizar a fixação do atuador na lateral.



Figura 49 – Bancada com ênfase nos pórticos (preto e cinza).

O laboratório disponibiliza dois tipos de pistões hidráulicos com pressão de carga de 10 até 25 toneladas (Figura 50). Serão fixos nos pórticos com o auxílio de suportes, parafusos ou sargentos (Figura 51).



Figura 50 – Pistões hidráulicos e seus limites disponíveis.



Figura 51 – Exemplo do suporte utilizado para fixação do pistão.

Os pistões não apresentam sistemas eletrônicos para aplicação da pressão, porém são providos de atuadores mecânicos com relógios que mostram unidades em força tonelada métrica (cor vermelha) com variação 0.5 até 25 toneladas e outro com variação de 0.2 até 10 toneladas e ambos com grandeza kgf/cm^2 (cor cinza) com variação de 10 até 700 kgf/cm^2 (Figura 52).



Figura 52 – Atuador e relógio com sua escala.

O equipamento NAJA Evolution segue um parâmetro referente ao eixo de coordenadas (Figura 53). Esses eixos se assemelham aos disponíveis no software da seguinte maneira: X se refere ao U1, Y se refere ao U3 e Z se refere ao U2 (Figura 54). Essa informação é importante para um bom entendimento da seção 6.3, na qual as variações nos eixos de coordenadas vão demonstrar em qual sentido a gaiola está se defletindo quando comparada com o software.

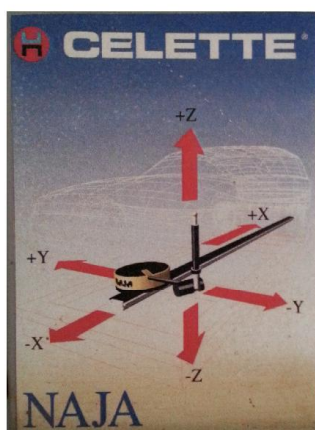


Figura 53 – Eixo de coordenadas seguido pelo NAJA Evolution.

Na Figura 54 é possível verificar o eixo de coordenadas do software juntamente com o eixo de coordenadas do equipamento (setas pretas), eliminando qualquer dúvida com relação aos eixos de referência.

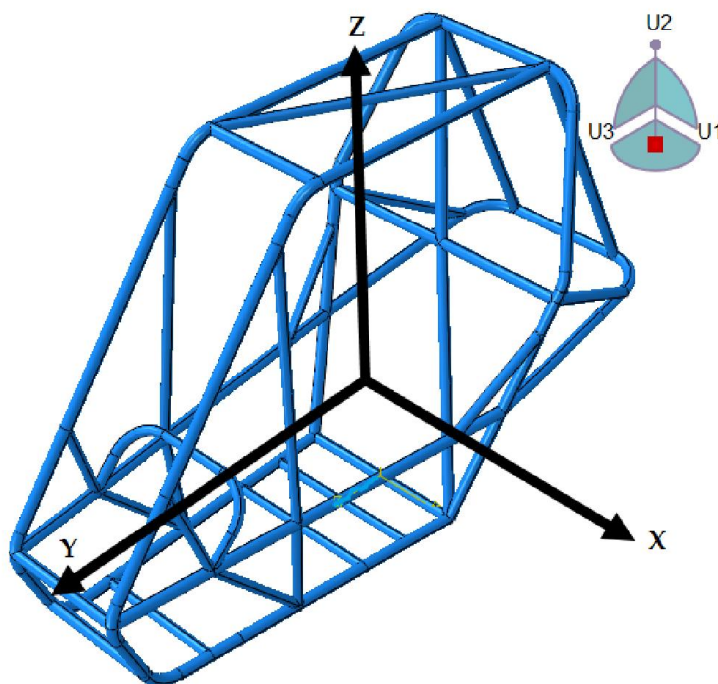


Figura 54 – Eixo de coordenadas seguido pelo Software Abaqus/CAE e pelo equipamento NAJA Evolution.

6.2 Procedimentos para ensaio

O primeiro passo a ser realizado é a fixação da gaiola na bancada de testes, sendo apoiada em estruturas e aparafusada com o auxílio de grampos (Figura 55) para que se possa manter no regime estático. Deve estar disposta de maneira que os pistões possam aplicar as cargas desejadas assim como o modelo numérico obtido pelo software ABAQUS (Figura 14).



Figura 55 – Modelo fixo e detalhes da fixação dianteira e trazeira.

Com a gaiola fixa nos suportes, são utilizados pistões hidráulicos (Figura 56) para simular as forças de esmagamento, torção e de impacto frontal que a estrutura sofreria em caso de capotamento ou tombamento. As cargas aplicadas em Newtons estão disponíveis na Tabela 2 calculadas de acordo com um valor estimado para a massa total do veículo, porém os pistões apresentam unidades de medida em Tonelada-força havendo a necessidade da conversão de unidades disponível na Tabela 5.

Tabela 5 – Cargas aplicadas na gaiola em Tonelada-força [tnf].

Tipo de carregamento	Carga vertical	Carga lateral	Carga frontal
Carga de projeto	1,2 tnf	0,453 tnf	0,3 tnf



Figura 56 – Pistão e atuador disponível para ensaio de cargas.

Os pontos de referência para a aquisição da deflexão para que seja feito um possível mapeamento do sistema, foram retirados de acordo com o alcance do equipamento NAJA Evolution (Figura 57), entretanto sempre seguindo os pontos críticos obtidos pelo resultado no processo numérico disponível no Capítulo V. Sendo assim foram selecionados 10 pontos os quais estão disponíveis na Figura 58.

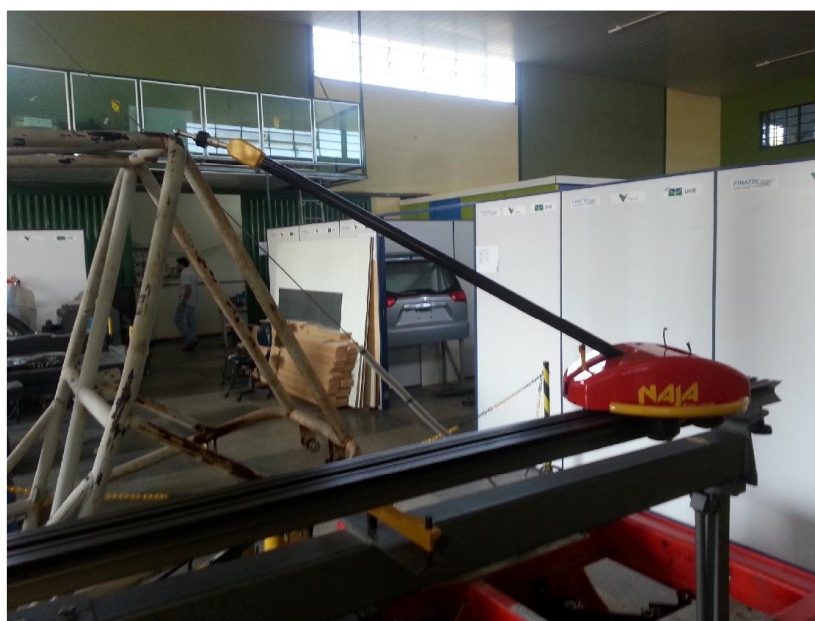


Figura 57 – Alcance do equipamento para escolha dos pontos de aquisição.

Foram retirados 7 baterias de pontos com a seguinte ordem de execução:

- Inicialmente sem aplicação de carregamento;
- Durante a aplicação da carga vertical;
- Após a aplicação da carga vertical;
- Durante a aplicação da carga frontal;
- Após a aplicação da carga frontal;
- Durante a aplicação da carga lateral;
- Após a aplicação da carga lateral;

A necessidade de verificar o quanto a gaiola sofre em cada ensaio exige a retirada dos pontos antes, durante e após cada teste, fazendo com que a diferença entre esses pontos seja o que realmente é procurado - mapear o quanto a gaiola defletiu experimentalmente.

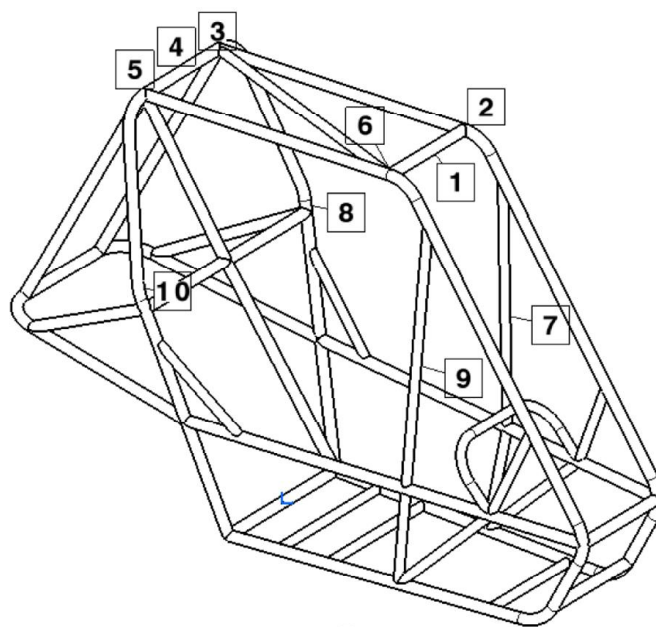


Figura 58 – Pontos a serem pegos como referência.

Para a medição da deflexão sofrida pela gaiola, é utilizado o equipamento NAJA Evolution disponível no laboratório de processos de fabricação da Universidade de Brasília campus Gama, o qual possibilita apresentar coordenadas através de pontos estipulados anteriormente. O instrumento deve ser devidamente posicionado sendo alinhado e nivelado para que possa ser retirada as devidas medidas da gaiola (Figura 59).



Figura 59 – Aferição de alinhamento e nivelamento.

Após a bancada se apresentar de maneira adequada e pronta para a realização dos ensaios, o equipamento NAJA Evolution necessita de uma averiguação na sua calibração, na qual é testado se o dispositivo encontra-se aferido. É utilizada uma régua de aferição

(Figura 60) disponibilizada pela própria máquina que é fixa em algum lugar que seja alcançado pela cabeça de medição sendo que a medida atual deve apresentar-se dentro dos limites estipulados pelo sistema, ou seja, são dado três pontos que apresentam a diferença na medida entre os mesmos de 350.05mm e 349.95mm ambas com precisão de $\pm 0.2\text{mm}$ na temperatura de 20°C .

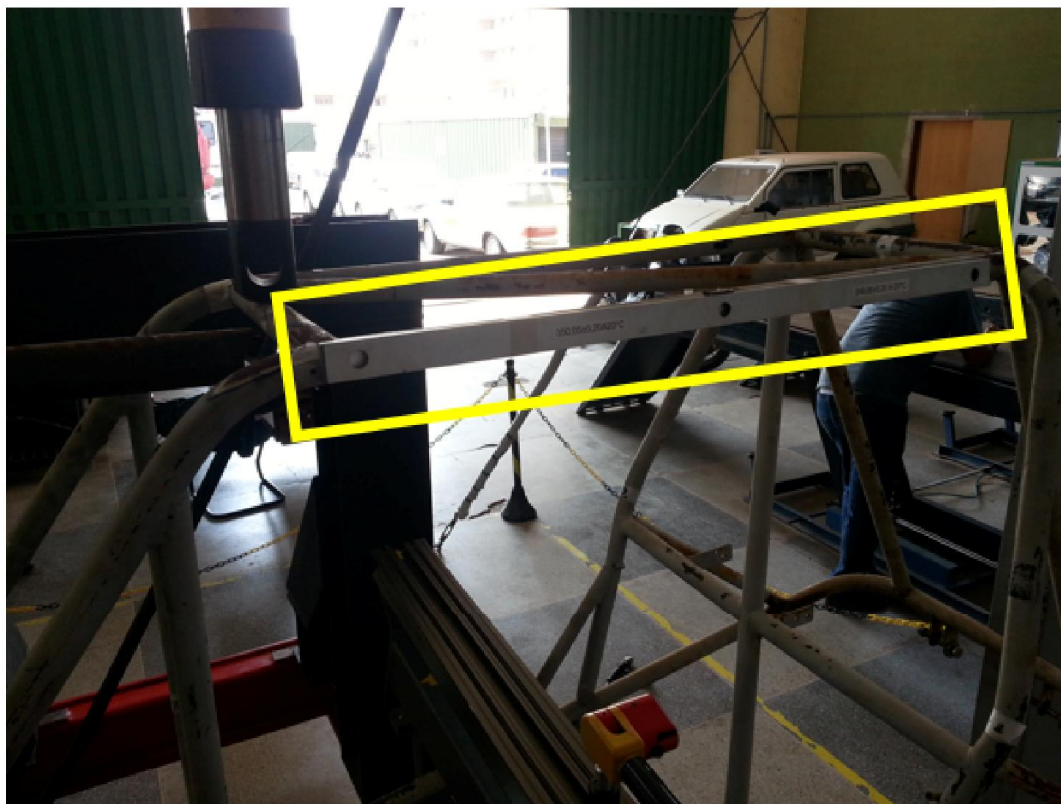


Figura 60 – Régua de aferição fixada na gaiola.

A Figura 61 mostrada a tela de trabalho do software NAJA Evolution com a aferição feita no mesmo dia em que foram realizados os ensaios. A máquina realizou a medida de 350.0mm para o caso de 349.95mm e 350.2mm para o caso de 350.05mm, ambas as medidas se enquadram nos limites estipulados pela máquina ($\pm 0.2\text{mm}$ A 20°C), apresentando-se calibrada para a realização dos ensaios.

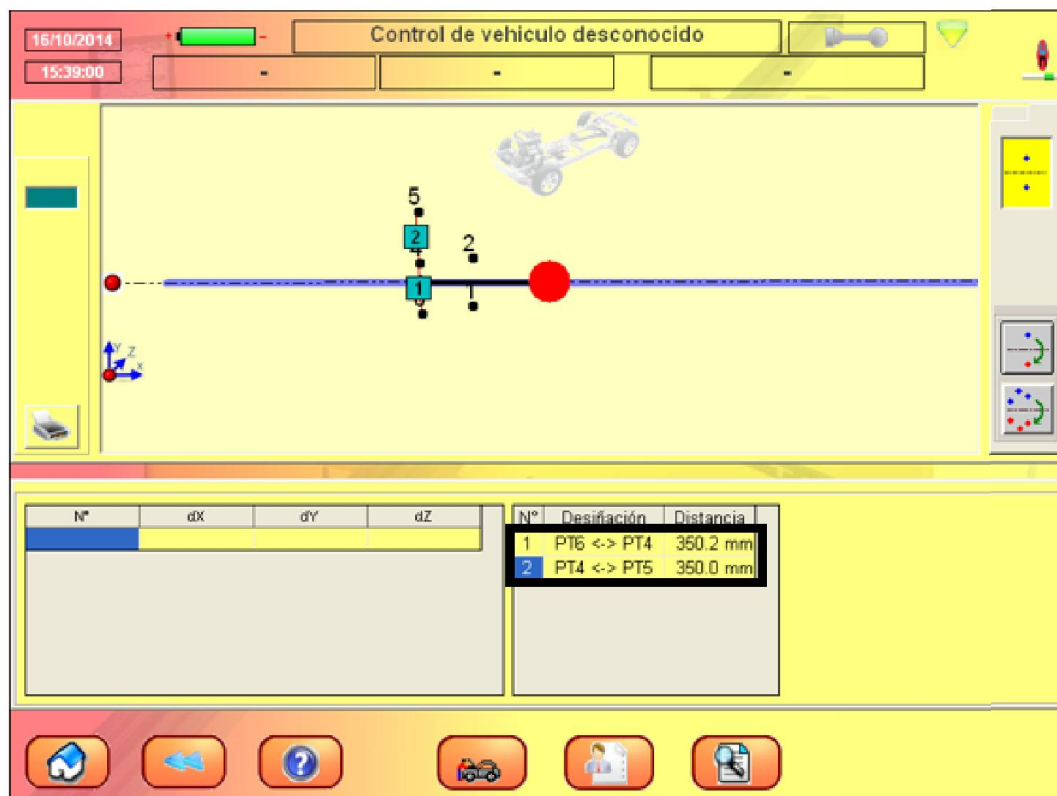


Figura 61 – Tela de trabalho do software NAJA Evolution onde é mostrada a aferição da máquina.

6.2.1 Carregamento Vertical

O carregamento vertical foi o primeiro ensaio a ser realizado. Foi aplicada uma carga de 1.2 tonelada força. A bancada foi toda adaptada para que esse procedimento fosse executado com sucesso, em que o atuador e pistão foram devidamente posicionados. O pistão foi fixo no pórtico maior em sua parte horizontal, onde apresentou uma disposição bastante favorável para aplicação da carga.

No primeiro momento o pistão estava atuando de forma pontual, porém ao ser aplicada a carga percebeu-se que a estrutura, mais especificamente o tubo aonde estava sendo exercida a força, iria falhar de uma forma muito agressiva e rápida, não chegando ao nível de carga exigida pelo projeto. Como solução para esse fato, optou-se por colocar uma chapa sobre a estrutura com dimensões de 390x245x45 mm de aço (Figura 62) e então continuar com o ensaio.



Figura 62 – Ensaio vertical com chapa.

6.2.2 Carregamento Frontal

O carregamento frontal foi o segundo ensaio a ser realizado mantendo a gaiola em sua posição original. A carga inicialmente proposta era de 0.3 tonelada força, contudo pela falta de um atuador que apresentasse uma variação menor, a carga aplicada neste caso foi de 0.4 tonelada força. O pistão foi fixado no pórtico maior em sua base na vertical utilizando um suporte, barras roscadas, parafusos e uma chapa de apoio (Figura 63)



Figura 63 – Fixação pistão de atuação frontal.

Devido à grande distância entre o pistão e a barra que foi aplicada a carga, houve a necessidade de fabricação de uma extensão para que o esforço fosse passado para a estrutura de forma adequada e principalmente com segurança. Foi feita uma extensão com um cilindro de aço que apresenta em sua extremidade uma rosca, a qual é rosqueada impedindo que o alongamento flambe durante a aplicação da carga. Para aumentar ainda mais o curso, foi colocado na outra extremidade um tubo para que o curso de atuação do pistão fosse ainda mais reduzido (Figura 64).



Figura 64 – Carregamento frontal.

6.2.3 Carregamento Lateral

O carregamento lateral foi realizado por último devido ao fato de representar o caso crítico na simulação numérica. A carga aplicada neste caso foi de 0.5 tonelada força, onde foi utilizado o atuador com variação de 0.5 até 25 toneladas força. O pistão foi fixado no pórtico menor com a ajuda de um sargento, sendo mantido na posição transversal à gaiola.

Em virtude da restrição do curso de atuação do pistão, foi necessário a adaptação de um suporte para que a carga seja transferida à estrutura antes que o pistão chegasse ao seu ponto final (Figura 65).

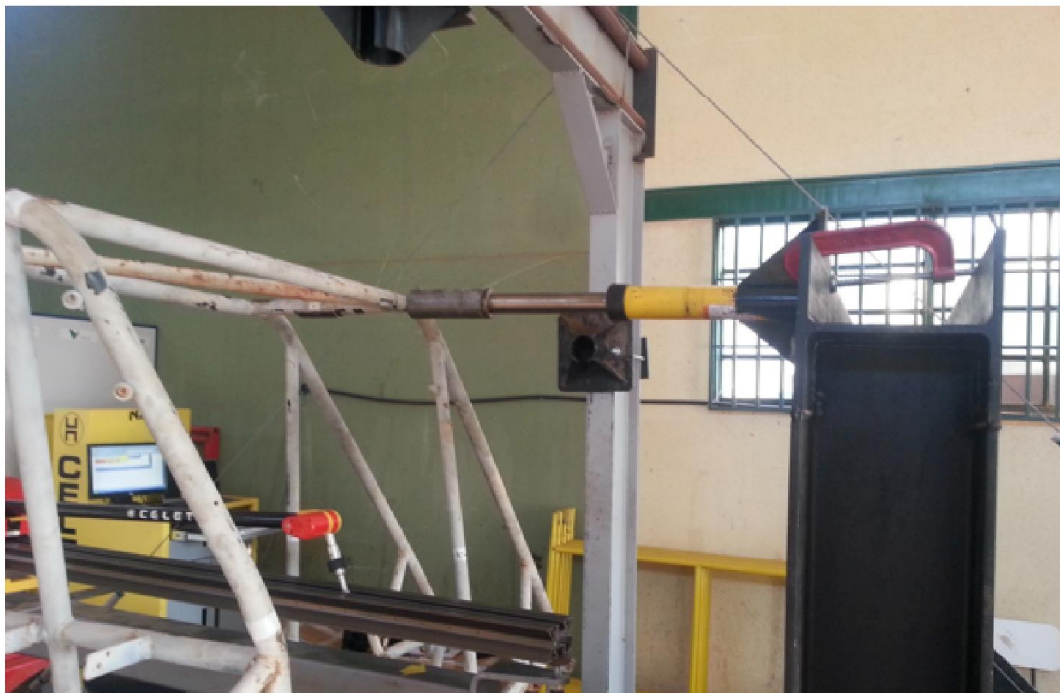


Figura 65 – Carregamento lateral.

6.3 Resultados experimentais

A bancada juntamente com o equipamento NAJA Evolution possibilita ao usuário a obtenção de pontos geométricos que vão servir de referência para medir o nível de deformação sofrido pela estrutura durante e após os ensaios com as cargas exigidas em projeto. Observou-se alguns problemas durante a medição, visto que a máquina não apresenta um sistema de travamento no ponto medido, proporcionando uma leve variação nos resultados na ordem dos centésimos de mm. Essa variação do valor é algo que não interfere de maneira significativa, uma vez que o regulamento e protocolo permitem deflexões sendo essas não detalhadas na ordem do centésimo.

Foram retirados pontos antes, durante e após a aplicação das cargas. Essa metodologia permite poder avaliar qual foi o deslocamento sofrido pela estrutura durante e após a imposição das forças. Primeiro foi feito o mapeamento da estrutura em descanso, esses pontos iniciais serviram como critério de comparação para o carregamento vertical. Os próximos pontos a serem retirados foram durante o primeiro carregamento, o vertical. Após a retirada desse esforço, foi feita novamente a aquisição dos pontos, permitindo visualizar qual foi a deflexão e a deformação plástica da estrutura em estudo.

Os resultados vão ser divididos em três partes referentes às cargas, vertical, frontal e lateral nessa mesma ordem onde vai ser apresentado dois tipos de tabela para cada caso que mostrará as variações em X, Y e Z (ΔX , ΔY e ΔZ).

A primeira tabela representa a diferença das medidas no caso inicial sem carga (X_0, Y_0 e Z_0) e com a aplicação de carga (X_{carga}, Y_{carga} e Z_{carga}) a qual representa o caso crítico de projeto, momento em que a gaiola sofre as maiores deflexões. Já a segunda tabela representa a diferença das medidas no caso inicial sem carga (X_0, Y_0 e Z_0) e com o sistema descarregado ($X_{descarga}, Y_{descarga}$ e $Z_{descarga}$) mostrando a deflexão irreversível da gaiola.

6.3.1 Resultados carregamento vertical

Tabela 6 – Resultados carregamento vertical.

Pontos	ΔX	ΔY	ΔZ	Pontos	ΔX	ΔY	ΔZ
1	4,11	-55,85	42,76	1	4,81	-41,99	29,59
2	4,79	-56,03	33,22	2	5,1	-42,53	22,93
3	4,71	-55,03	24,6	3	3,9	-42,84	17,71
4	3,64	-55,29	24,01	4	2,45	-42,6	17,24
5	3,56	-53,84	22,62	5	2,96	-42,49	17,25
6	3,78	-57,12	38,37	6	4,42	-43,93	25,11
7	1,64	-26,74	21,99	7	2,19	-22,07	13,64
8	3,57	-32,01	13,36	8	2,39	-25,09	9,79
9	3,82	-31,14	14,06	9	3,36	-25,49	9,49
10	6,78	-23,01	23,85	10	3,06	-18,56	12,85

Como era de se esperar no caso do carregamento vertical, as maiores deflexões ocorrem no eixo Y e Z e isso aconteceu pois não foi possível restringir que o pistão exercesse movimento somente na vertical (Z) perceptível na Figura 66. A disposição dos eixos de referência se encontra disponível na Figura 54 em que é possível avaliar qual foi o sentido da deflexão.



Figura 66 – Situação onde houve deslocamento do pistão.

Os pontos que sofreram maior deflexão foram os pontos 1, 2 e 6, sua localização exata está disponível na Figura 58. Isso demonstra que os pontos de maior deflexão no caso vertical se encontram próximos à aplicação da carga. O caso crítico de deflexão para esse carregamento se deu na ordem de -57,12mm (ponto 6 da primeira tabela), negativo pois seu deslocamento ocorreu no sentido contrário ao positivo do eixo de coordenadas estabelecido pelo NAJA Evolution.

6.3.2 Resultados carregamento frontal

Tabela 7 – Resultados carregamento frontal.

Pontos	ΔX	ΔY	ΔZ	Pontos	ΔX	ΔY	ΔZ
1	-3,15	-95,08	11,13	1	-2,37	-47,4	6,72
2	-2,95	-94,99	11,61	2	-11	-80,77	27,67
3	-4,9	10,34	92,55	3	-10,91	-48,43	-1,92
4	4,93	-93,15	40,84	4	-1,99	-4,59	16,38
5	9,89	-90,19	49,5	5	32,04	-24,56	61,74
6	-3,66	-90,43	8,33	6	-3,03	-44,55	7,63
7	-3,8	-55,58	0,49	7	-0,3	-30,84	3,5
8	12,2	-52,61	9,79	8	0,71	-29,29	11,9
9	1,73	-52,94	24,93	9	0,15	-26,2	11,19
10	-2,55	-56,81	-1,09	10	-1,54	-28,09	5,33

Os resultados para o carregamento frontal seguiram perfeitamente ao esperado, onde as maiores deflexões se deram no sentido do eixo Y (Figura 54), ou seja, mesmo sentido de aplicação da carga.

Os pontos que sofreram maior deflexão foram os pontos 1, 2 e 4, sua localização exata está disponível na Figura 58. Isso demonstra que os pontos de maior deflexão no caso frontal se encontram próximos à aplicação da carga. O caso crítico de deflexão para esse carregamento se deu na ordem de -95,08mm (ponto 1 da primeira tabela), negativo porque seu deslocamento ocorreu no sentido contrário ao positivo do eixo de coordenadas estabelecido pelo NAJA Evolution. Apresentou um deslocamento alto, entretanto não houve falha e a estrutura reagiu bem, se deslocando de maneira homogênea.

6.3.3 Resultados carregamento lateral

Os resultados apresentados para o carregamento lateral também seguiram a lógica esperada, em que as maiores deflexões observadas se deram no sentido do eixo X (Figura 54), se deslocando no mesmo sentido da aplicação da carga.

Os pontos que sofreram maior deflexão foram os pontos 1, 5 e 6, sua localização exata está disponível na Figura 58. Isso demonstra que os pontos de maior deflexão no caso lateral se encontram próximos à aplicação da carga. O caso crítico de deflexão para

Tabela 8 – Resultados carregamento lateal.

Pontos	ΔX	ΔY	ΔZ	Pontos	ΔX	ΔY	ΔZ
1	-86,4	-12,44	-0,05	1	-27,37	-6,08	-1,72
2	-77,32	17,78	-9,17	2	-17,36	28,07	-17,68
3	-56,71	-13,35	33,22	3	-14,89	-5,28	23,92
4	-66,45	-52,69	0,18	4	-23,81	-48,58	-0,74
5	-104,65	-28,04	-61,62	5	-62,4	-29,04	-50,36
6	-101,44	-9,55	0,57	6	-32,52	-6,24	4,12
7	-49,39	-11,66	11,21	7	-14,67	-7,03	4,48
8	-43,5	-14,81	16,14	8	-16,75	-7,99	4,41
9	-46,28	-7,63	-26,72	9	-18,85	-9,75	-10,91
10	-49,33	-11,55	-16,68	10	-14,61	-9,88	-7,15

esse carregamento se deu na ordem de -104,65mm (ponto 5 da primeira tabela), negativo pois seu deslocamento ocorreu no sentido contrário ao positivo do eixo de coordenadas estabelecido pelo NAJA Evolution. Apresentou um deslocamento alto, porém não houve falha e a estrutura reagiu bem, se deslocando de maneira homogênea.

Foi observado que a estrutura reagiu de forma bastante elástica, onde a diferença entre a deflexão elástica e permanente disponível se deu em ordens razoáveis, basta fazer uma breve comparação entre a primeira e a segunda tabela, como por exemplo no ponto 5, a diferença foi de 42,25mm.

6.4 Discussão dos resultados

Todos os ensaios seguiram os parâmetros de cargas exigidos pelo protocolo Australiano (AUSTRALIAN, 2012) para que pudesse ser comparado com algo já existente. Assim como dito anteriormente, o limite de deflexão permitido pelo protocolo é de 100mm, já a norma Baja SAE RBSB 7 (SAE-BRASIL, 2013) não especifica a deflexão, porém exige uma distância mínima de 152mm de qualquer tubo até a cabeça do piloto.

Assim como na parte numérica, utilizando o método dos elementos finitos, se nota na parte experimental que o caso crítico é visualizado no carregamento lateral, no qual a gaiola permite maiores deslocamentos quando comparado com as outras solicitações. Os outros maiores deslocamentos foram proporcionados pela carga frontal, sendo as cargas verticais as detentoras dos menores deslocamentos sofridos pela gaiola.

A gaiola sofreu deslocamentos permanentes visíveis (Figura 67), todavia não houve falha na questão de rompimento do material realizando a função de deixar o piloto protegido durante o acidente. A mesma não está apta para novos testes muito menos para entrar em uma nova competição SAE Baja devido aos critérios de segurança.



Figura 67 – Deslocamento permanente visível.

Visualmente percebe-se que os deslocamentos previstos pelo software ABAQUS/CAE foram realmente seguidos nos ensaios experimentais, contudo houve disparidade quando comparado os deslocamentos detectados. Essa discrepância é resultado da não confiabilidade no material utilizado, soldas mal elaboradas, idade e condições que foi mantida essa gaiola, entre outros quesitos que podem alterar significativamente os resultados dos ensaios.

Os ensaios demonstram o que realmente acontece na prática, em que não é possível obter junções (soldas) perfeitas entre tubos, conseguir material com 100% de confiabilidade, aparecimento de ferrugens em certos pontos da estrutura. Todos esses pontos e outros não especificados interferem de maneira significativa no resultado dos ensaios, mas que devem ser considerados para que seja garantida a total proteção dos pilotos em casos críticos.

A tabela a seguir (Tabela 9) faz uma comparação entre os resultados obtidos pelo ensaio numérico e experimental. É possível verificar o quanto houveram diferenças entre os resultados, isso está ligado à falta de dados do material utilizado na construção da gaiola, as soldas nas junções não proporcionarem à estrutura uma condição ideal, fixação que não gera condição estática perfeita, obtenção de pontos de maneira inadequada, aplicação de carga de maneira imprecisa, entre outros pontos que podem causar tais discrepâncias.

Tabela 9 – Comparação entre Numérico e Experimental.

Comparação	Gaiola	Vertical	Lateral	Frontal
Numérico	01	11,20	23,63	7,74
	02	7,77	17,34	6,00
Experimental	02	57,12	104,65	95,08

Parte VII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA
TRABALHOS FUTUROS

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre aspectos teóricos altamente difundido na literatura que envolvem toda a teoria de falhas para materiais dúcteis, onde foi usado como modelo a teoria da energia de distorção para materiais dúcteis a qual prevê falha por escoamento sempre que $\sigma' \geq S_y$. Esse modelo apresenta um estudo sobre o comportamento mecânico de materiais dúcteis, como por exemplo o efeito da pressão hidrostática (tração ou compressão).

Para realização das simulações numéricas e evolução do modelo elasto-plástico estudados, duas estruturas de gaiola foram modeladas com diferentes perfis de tubo com material em aço 1020 laminado a frio sendo suas dimensões definidas na seção 3.1. Foram aplicadas cargas determinadas de acordo com o protocolo internacional (AUSTRALIAN, 2012) para simular condições críticas de capotamento ou tombamento. Sendo realizado pelo método de elementos finitos uma análise de esforços provenientes de cargas verticais, laterais e frontais para gaiola de minibaja.

Com a utilização da gaiola nas simulações numéricas, se observa uma estrutura bastante rígida e poucas diferenças entre os dois modelos utilizados, onde o regime plástico não foi alcançado de uma maneira significativa para que a estrutura falhe.

Ambas as gaiolas apresentaram níveis baixos de deformação para o ensaio numérico, atendendo em todos os casos ao protocolo e normas regulamentadoras (AUSTRALIAN, 2012) e (SAE-BRASIL, 2013). Suas deflexões também demonstraram níveis com grau suficiente para que seja comprovado uma boa rigidez da estrutura. A conclusão de maior relevância para os resultados numéricos, é que através dos métodos dos elementos finitos utilizando a plataforma ABAQUS, as duas estruturas ensaiadas reagiram de uma maneira a satisfazer às normas e protocolos utilizados como referência, protegendo de forma adequada o piloto do veículo.

Grandes diferenças entre ensaio numérico e experimental foram detectadas, houve uma certa discrepância que é bastante perceptível, porém isso era algo esperado. Quando o modelo é inserido no software, ele é reconhecido como um tipo ideal e sem imperfeições, além de não reconhecer soldas, micro fissuras no material, homogeneidade, isso tudo serve de base para que essa desconformidade seja aceita.

No ensaio experimental, a gaiola não passou pelas determinações do protocolo

Australiano (AUSTRALIAN, 2012), pois quando aplicado a carga lateral, a maior deflexão sofrida pela gaiola foi de 104,65mm ultrapassando os 100mm permitido pelo protocolo. Porém isso não quer dizer que a mesma seja considerada como ineficiente dado que a norma RBSB 7 SAE-Baja (SAE-BRASIL, 2013) exige uma distância mínima de qualquer tubo até a cabeça de 152mm.

Para que a gaiola realmente não atenda às necessidades, seria necessário que a mesma falhasse no sentido de romper alguma de suas ligações, deixando o piloto sem nenhuma proteção ou ter ultrapassado os 152mm exigidos pela norma SAE RBSB 7.

Devido ao tubo demonstrar pouca rigidez durante o ensaio vertical quando aplicada carga pontual, houve a necessidade de adaptação de uma placa de aço quando aplicada a carga vertical, porém isso não interferiu nos resultados, onde o objetivo que era impor cargas e verificar se a estrutura se enquadrava nos parâmetros do protocolo e norma foi alcançado e feita a devida discussão dos resultados.

As deformações e deflexões causadas pelo carregamento externo armazenam energia, ocorrendo a diminuição do impacto no piloto, com isso as chances de sair sem ferimentos aumentam significativamente.

Com os resultados obtidos, é perceptível que o cuidado maior deve ser voltado para os dados provenientes das cargas laterais, as quais apresentaram as maiores tensões e deflexões comparado com as demais forças aplicadas tanto computacionais como experimental.

Com o bom entendimento do trabalho, é possível verificar e ter capacidade de discutir sobre quais são os possíveis erros e em que pode-se melhorar um projeto estrutural de um chassi, avaliando quais são os pontos críticos e qual deve ser o melhor caminho para que a estrutura chegue em um nível de excelência.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como as simulações feitas geraram resultados bastante satisfatórios, não será necessária uma remodelagem do sistema. A estrutura está se comportando de uma maneira consideravelmente rígida, onde as cargas aplicadas não deformam ou defletem a estrutura o suficiente para que passe a ocupar o espaço disponível do piloto, mantendo o mesmo sob segurança.

Em virtude de ser comum a venda de materiais no mercado que não seguem as características que deveriam seguir, é interessante a prática de ensaios metalográficos e estudos com relação à confiabilidade do material utilizado na fabricação da gaiola, ou seja, execução de experimentos a níveis de tração, compressão e flexão do tubo adotado. Ensaio que comprovem o quanto a estrutura perde quando feitas as devidas soldas nas

juntas dos tubos também é viável.

Para que o critério de comparação possa ser mais rigoroso entre normas, protocolos, regulamentos e também entre ensaio numérico e experimental, melhores fixações que garantam a estrutura permanecer totalmente estática durante a aplicação de cargas é fundamental.

A aquisição dos pontos antes, durante e após a aplicação das cargas deve ser repensada para que possa diminuir os erros com relação à obtenção dessas medidas. É possível a fabricação de suportes que sejam fixados nos locais desejados para que não haja mudança no ponto de acesso à região que deve ser mapeada pelo equipamento NAJA Evolution.

Deve-se pensar em um sistema de câmeras dispostas em posições estratégicas para que o monitoramento do ensaio experimental seja melhor acompanhado. Atuadores comandados eletronicamente também iriam diminuir a quantidade de erros, onde a precisão com relação ao carregamento na disposição atual, não é boa. Aplicação de sensores que detectam a deflexão na estrutura poderia aumentar o nível de certeza dos dados, onde a medição manual pode vir a falhar ou mudar dependendo do operador.

Um possível estudo de calibração do software pode vir a ser um trabalho futuro, pois com a oportunidade de realização de múltiplos ensaios experimentais, permite poder fazer alterações e conseqüentemente correções no software, podendo transforma-lo em uma ferramenta que elimine totalmente a necessidade do ensaio experimental.

Referências

- AKEL, A. F. Estudo sobre a geração de malhas de elementos finitos para a modelagem numérica do método mcsem. In: *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 44.
- AUSTRALIAN, G. Australian design rule adr59. Omnibuses Rollover Protective Structures, 2012. Citado 7 vezes nas páginas 19, 38, 46, 68, 88, 91 e 92.
- BACK, N. Forcellini. fa projeto de produtos. *Apostila do curso de pós graduação em Engenharia Mecânica da UFSC. Florianópolis*, 2002. Citado na página 16.
- BATISTA, V. H. F. *Geração de Malhas Não-Estruturadas Tetraédricas Utilizando um Método de Avanço de Fronteira*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2005. Citado na página 43.
- BEER FP E JOHNSTON, J. *Resistência dos Materiais, 3. Ed.*, [S.l.]: Makron Books, 1995. Citado 5 vezes nas páginas 8, 24, 25, 26 e 66.
- CELETTE, C. *CELETTE Online*. 2013. Disponível em: <<http://www.celette.com/>>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 70 e 71.
- CESA, T. R.; OLIVEIRA, B. F. d. Aplicação do método de elementos finitos na simulação de uma estrutura de proteção contra capotamento. *Design & tecnologia [recurso eletrônico]*. Porto Alegre, RS. Vol. 2, n. 3 (2011), p. 22-32, 2011. Citado na página 68.
- FIALHO, A. B. *Cosmos: plataforma CAE do SolidWorks 2008*. [S.l.]: Érica, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 37.
- LEALFER. *lealfer Indústria e Comércio de aço*. 2014. Disponível em: <<http://www.lealfer.com.br/>>. Citado na página 30.
- MARIN, J. *Engineering materials*. 1952. Citado na página 26.
- METALS, G. *Aços Construção Mecânica*. 2014. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/>>. Citado na página 30.
- NORTON, R. L. *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem*. [S.l.]: Artmed, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 27.
- SHIGLEY, J. E. *Elementos de Máquinas*. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 1984. Citado na página 27.
- SHIGLEY, M. C. R. R. G. B. J. E. *Projeto de Engenharia Mecânica*. [S.l.]: Bookman, 2005. Citado na página 23.
- SOCIEDADE DE ENGENHEIROS AUTOMOTIVOS. *Baja 2013 RBSB 7 – Requisitos Mínimos de Segurança – Emenda 3*. Av. Paulista, 2073 - Ed. Horsa II - Conj. 1003 - SP - Brasil, 2013. Citado 11 vezes nas páginas 8, 16, 21, 22, 29, 39, 46, 68, 88, 91 e 92.

UNB. Projeto estrutural de um sistema de proteção contra impactos e capotagem (rops) para veículos 4x4. v. 47, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 38, 46 e 68.

VOLKSWAGEN. *Volkswagen Das Auto*. 2014. Disponível em: <<http://vwbr.com.br/>>. Citado na página 66.

Parte VIII

ANEXOS

8 ANEXOS

8.1 Rotina matlab

Rotina em Matlab para plote da curva Tensão x Deformação:

```
close all
clear all
clc
curva = load('curva.txt');% leitura dados1
sigma=curva(:,1);% separar colouna 1
def=curva(:,2);% separar coluna 2
figure (1)
plot(def,sigma)% plotar resultado dados1
xlabel ('Deformação')
ylabel ('Tensão [MPa]')
title('Gráfico Tensão x Deformação Aço 1020');
```