

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EDVAGNER FUSTINONI DE SOUZA JUNIOR

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM CHASSI DE UM VEÍCULO DO TIPO
BUGGY**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc2 - Nº de Inscrição - 16)

CURITIBA

2016

EDVAGNER FUSTINONI DE SOUZA JUNIOR

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM CHASSI DE UM VEÍCULO DO TIPO BUGGY

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Marco A. Luersen

CURITIBA

2016

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa "Análise estrutural de um chassi de um veículo do tipo buggy", realizado pelo aluno Edvagner Fustinoni De Souza Junior, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eng, Marco A. Luersen

UTFPR - Damec

Curitiba, 15 de maio de 2016.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa monografia do Projeto de Pesquisa "Análise estrutural de um chassi de um veículo do tipo buggy", realizado pelo aluno Edvagner Fustinoni De Souza Junior, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Marco A. Luersen

Orientador

Prof. Eng. Adriano Gonçalves Dos Passos

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr, Marcio Henrique De Avelar Gomes

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 15 de maio de 2016

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso (ou Programa)

RESUMO

Basicamente existem duas formas construtivas para a estrutura principal de um veículo terrestre: monobloco (carroceria e chassi como uma única peça) e carroceria sobre chassi (chassi como um elemento separado). A maioria dos veículos apresenta o primeiro tipo de construção, pois se tem como vantagens as reduções de peso e do espaço ocupado pela estrutura. Entretanto, devido à robustez e custo de fabricação, chassi em separado da carroceria ainda é utilizado em veículos de transporte pesados como caminhões e furgões, caminhonetes e veículos fora de série como os buggys. Como requisitos de projeto de um chassi são exigidos rigidez e resistência adequadas, de forma a proporcionar conforto e segurança para o condutor e os passageiros e durabilidade para a estrutura. Assim, durante a fase de projeto, realizam-se cálculos e simulações para estimar suas características estruturais e localizar pontos de não conformidade, direcionando as alterações de projeto. Uma ferramenta normalmente utilizada para essas análises é o método de elementos finitos, tendo foco nas regiões mais críticas do chassi, como os pontos de fixação da suspensão e direção. Nesse contexto está inserido o presente trabalho, cujo objetivo é analisar estruturalmente o chassi de um veículo do tipo buggy. As análises foram realizadas no programa comercial de elementos finitos Ansys Workbench. Para a definição dos carregamentos e tipos de simulações realizadas foram utilizadas informações de outros trabalhos acadêmicos, normas da FIA (*Federation Internationale de l'Automobile*) e da SAE (*Society of Automotive Engineers*). Por fim, após análise dos resultados das simulações, sugestões de melhorias do chassi foram apresentadas para sanar ou diminuir os problemas encontrados.

Palavras-chave: Chassi, análise estrutural, buggy

ABSTRACT

Basically there are two constructive forms for the main structure of a land vehicle: monoblock (body and the chassis as a single piece) on body and chassis (chassis as a separate element). Most vehicles has the first type of construction, because it has the advantages of reduced weight and space occupied by the structure. However, due to the robustness and manufacturing cost, separate chassis of the truck is still used in heavy transport vehicles such as trucks and vans, trucks and vehicles out of the ordinary as the buggys. As a chassis design requirements are required stiffness and adequate strength in order to provide comfort and safety for the driver and passengers and strength to the structure. Thus, during the design phase, are carried out calculations and simulations to estimate their structural characteristics and find points of non-compliance, directing the design changes. A tool commonly used for these analyzes is the finite element method, and focus on the most critical regions of the chassis, such as the attachment points of the suspension and steering. In this context it is inserted this study, which aims to structurally analyze the chassis of a vehicle type buggy. Analyses were performed in the commercial finite element program Ansys Workbench. For the definition of loads and types of the simulations were used information from other academic work, standards of the FIA (Federation Internationale de l'Automobile) and SAE (Society of Automotive Engineers). Finally, after analyzing the results of the simulations, chassis improvements suggestions have been made to solve or reduce the problems encountered.

Keywords: chassis, structural analysis, buggy

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos sólidos, (A) tetraédrico, (B) hexaédrico.	17
Figura 2 – Chassi original, fabricado de forma artesanal, (A) vista frontal, (B) vista lateral	19
Figura 3 – Modelo do SolidWorks do chassi real de forma simplificada: (A) vista frontal, (B) vista lateral, (C) vista superior, (D) vista em perspectiva	20
Figura 4 - Malha de elementos finitos do chassi (elementos sólidos tetraédricos)	21
Figura 5 – Pontos de flexibilidade na estrutura, (A) primeiro modo de vibrar do chassi, (B) segundo modo de vibrar do chassi	24
Figura 6 – Tensões obtidas na análise do efeito do peso dos componentes do buggy	25
Figura 7 – Localização do ponto de tensão máxima	25
Figura 8 – Pontos de aplicação das forças e das fixações. A e B representam os pontos de fixações e C e D os pontos de aplicação das forças.	26
Figura 9 – Visão geral das tensões geradas na simulação de cargas dianteiras.	27
Figura 10 – Regiões com alta concentração de tensão na parte traseira devido às cargas aplicadas na dianteira	27
Figura 11 – Localização da maior tensão obtida na estrutura na simulação de carregamento nas rodas dianteiras, localizado em uma região de solda	28
Figura 12– Deslocamento da estrutura devido às cargas aplicadas	28
Figura 13 – Pontos de aplicação das forças e das fixações, sendo pontos A e C fixação e B e D pontos de forças	29
Figura 14 – Tensões encontradas na simulação de carregamento na traseira	30
Figura 15 – Ponto de maior tensão na encontrado na estrutura em carregamento traseira	30
Figura 16 – Pontos de aplicação das forças e das fixações, sendo pontos A, B e D fixação e C ponto de aplicação força.	31
Figura 17 – Tensões encontradas nas simulações com aplicação em roda dianteira, (A) geral, (B) zoom detalhado	32

Figura 18 – Pontos de aplicação das forças e das fixações, sendo pontos A, B e D fixação e C ponto de aplicação força	33
Figura 19 – Tensões na estrutura traseira do chassi	33
Figura 20 – Localização da tensão máxima encontrada na base da estrutura traseira do chassi	34
Figura 21 – Pontos de aplicação das forças e das fixações, sendo pontos A e B fixações e C e D pontos de aplicação das forças	34
Figura 22 - Região pontual com máxima tensão, sendo acima da admissível.	35
Figura 23 – Visão geral sobre as tensões na estrutura do chassi	35
Figura 24 – Modelo do SolidWorks do chassi modificado: (A) vista frontal, (B) vista lateral, (C) vista superior, (D) vista em perspectiva	39
Figura 25 – resultado da simulação referente ao efeito da gravidade	40
Figura 26 – Resultado da simulação referente ao carregamento nas rodas dianteiras	41
Figura 27 – Resultado da simulação referente ao carregamento nas rodas traseiras	41
Figura 28 – Resultado da simulação referente ao carregamento na roda dianteira	42
Figura 29 – Resultado da simulação referente ao carregamento na roda traseira	42
Figura 30 – Resultado da simulação referente ao carregamento cruzado	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição das cargas a serem aplicadas na estrutura.....	15
Tabela 2 – Características da malha de elementos finitos	21
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do material aço AISI 1045	22
Tabela 4- Primeiras frequências naturais do chassi.....	23
Tabela 5 – Resultados das simulações iniciais e propostas de alterações	37
Tabela 6 - Primeiras frequências naturais do chassi após alterações.....	40
Tabela 7 – Comparação entre os resultados das simulações iniciais de após modificações	44

LISTA DE SIGLAS

SAE Society of Automotive Engineers

FIA Federation Internationale de l'Automobile

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contexto do Tema	12
1.2	Caracterização do Problema	12
1.3	Objetivos	13
1.4	Justificativa	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Trabalhos acadêmicos	14
2.2	Normas técnicas	15
2.3	Método dos elementos finitos	16
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E RESULTADOS DO CHASSI ORIGINAL	18
3.1	Modelagem do chassi em ferramenta CAD.	18
3.2	Modelagem por elementos finitos	20
3.3	Descrição das simulações	21
3.3.1	Análise Modal	23
3.3.2	Análise do efeito da gravidade	24
3.3.3	Carregamento nas rodas dianteiras	26
3.3.4	Carregamento nas rodas traseiras	28
3.3.5	Carregamento na roda dianteira	30
3.3.6	Carregamento na roda traseira	32
3.3.7	Carregamento cruzado	34
4	resumo dos resultados e propostas de modificações NA GEOMETRIA DO CHASSI	36
4.1	Análise modal	40
4.2	Análise do efeito da gravidade	40
4.3	Carregamento nas rodas dianteiras	40
4.4	Carregamento nas rodas traseiras	41
4.5	Carregamento na roda dianteira	41
4.6	Carregamento na roda traseira	42
4.7	Carregamento cruzado	42
5	CONCLUSÕES	45
6	referencias bibliográficas	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

No Brasil, os primeiros veículos do tipo buggy surgiram em meados da década de 60, sendo utilizada a plataforma dos veículos VW, sendo mais comum a utilização da plataforma do fusca, com carroceria de fibra de vidro. Assim, ele se tornou um veículo de lazer da classe média brasileira e veículo de trabalho no turismo nordestino, onde turistas são levados a passeio nas dunas das praias daquela região do país.

Com o passar do tempo, a legislação brasileira referente a veículos foi ficando cada vez mais rigorosa. Com isso, adequações nesses veículos tiveram que ser adotadas para se tornarem mais seguros e de maior durabilidade, sendo necessário conhecimento técnico na elaboração de veículos mais modernos, sendo a construção de chassi tubular um aprimoramento aplicado nesta evolução.

O que levou a escolha desse tema para a elaboração do presente trabalho é a iniciação de um empreendimento no segmento de fabricação de veículos fora de série, buscando atender o mercado de turismo da região nordeste do Brasil. Para tal, é necessário atender as necessidades dos clientes de forma segura, com um projeto de engenharia adequado para dar suporte no seu desenvolvimento.

No desenvolvimento do chassi, um dos pontos de partida no projeto de desenvolvimento de veículos, é realizada a modelagem e simulações antes da construção de seus primeiros protótipos, sendo um processo de aprimoramento ao longo do tempo, sempre buscando a melhor forma de fabricar, atendendo os requisitos de projeto pré-estabelecido com menor custo possível.

1.2 Caracterização do Problema

Para fabricar um veículo, a primeira etapa é projetar um chassi. Esse chassi deverá ser durável e seguro para seus ocupantes.

A otimização deste projeto busca por maior confiabilidade do veículo para aplicação de condições de uso severas, como em dunas e regiões remotas, sem estradas adequadas para rodagem com veículos convencionais.

Este projeto engloba várias áreas da engenharia mecânica, entre elas projeto, mecânica estrutural e materiais, envolvendo o re-projeto da modelagem do chassi, seleção de materiais mais apropriados caso seja necessária a troca e análise dos carregamentos que o chassi está submetido.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é realizar simulações numéricas, através do método dos elementos finitos, para verificar o comportamento estrutural de um chassi de buggy. Com os resultados das análises direcionam-se mudanças na estrutura do chassi de forma a se atingir os requisitos de projeto.

1.4 Justificativa

No presente trabalho, como a geometria da estrutura em estudo (chassi) é complexa, métodos analíticos para a determinação das tensões são bastante imprecisos, o que justifica a realização de simulações numéricas por elementos finitos. Além disso, atualmente, o emprego de ferramentas computacionais é fundamental na concepção ou aprimoramento de novos produtos. Com elas pode-se reduzir o tempo de elaboração do projeto, obter economia de matéria prima e/ou redução dos custos de produção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Trabalhos acadêmicos

Um dos pontos de partida para o levantamento de dados para este trabalho foi a busca por estudos similares ao proposto, com o objetivo de encontrar informações sobre magnitudes e pontos de aplicação de cargas sobre o chassi. Durante o processo de busca foi constatado uma escassez de informação sobre o tema, sendo corriqueiro o uso de valores estimados de forças sem alguma fonte para dar credibilidade ao estudo desenvolvido. Provavelmente isso se deve às questões de segredo industrial das montadoras de veículos, ou aos possíveis registros de patentes, que são confidenciais, gerados durante o desenvolvimento de um veículo.

Entre os trabalhos consultados, a seguir são discutidos aqueles utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, além de normas e o método dos elementos finitos que serão abordados em seções posteriores.

Na dissertação de Beltrão (2009), foi desenvolvido o projeto de um kart para crianças na faixa etária de 7 a 12 anos de idade. A análise torcional do chassi foi realizada com o programa de elementos finitos Ansys, utilizando carregamentos arbitrários, sem justificar a obtenção dos valores.

Na dissertação de Peres (2006), foi analisada a suspensão de um semi-reboque de transporte de carga, utilizando ferramenta de elementos finitos para analisar os efeitos dos carregamentos suportados durante a vida útil do veículo, seguindo com uma análise de fadiga dos elementos da suspensão.

No trabalho desenvolvido por Lima (2012), foram realizadas análises estruturais, estática e modal, para validação das condições em que um reboque seria submetido. Como parâmetro para estimar o carregamento estático, um veículo com massa de 1600 Kg é considerado.

Em Furtado (2013), foi verificado que as cargas utilizadas foram aplicadas por estimativa, sem uma fundamentação teórica para justificá-la, considerando partes do chassi como elementos de viga na análise de sua estrutura.

Em outro caso consultado, o trabalho de Lottermann (2014), foi analisado a estrutura de um veículo para a competição de minibaja. Nesse estudo é apresentado

um método de cálculo para obter as forças aplicadas no teste de capotamento, as quais estão apresentadas na tabela 1, sendo aplicadas no ponto mais alto da estrutura em avaliação.

2.2 Normas técnicas

Para a realização de testes de projetos ou de equipamentos experimentais, como protótipos de produtos, existem normas de especificações de como devem ocorrer tais testes, em conformidade com parâmetros de segurança pré-estipulados. Seguindo a linha de desenvolvimento do trabalho de Lottermann (2014), sendo neste analisado a estrutura de um veículo para a competição de minibaja segundo as normas da competição SAE (*Society of Automotive Engineers*) referente a competição de minibaja (2013), apresentando um método de cálculo para obter as forças aplicadas no teste de capotamento, as quais estão apresentadas na tabela 1. Essas forças são aplicadas no ponto mais alto da estrutura em avaliação.

Tabela 1 - Definição das cargas a serem aplicadas na estrutura

Tipo de carregamento	Carga vertical	Carga lateral	Carga frontal
Carga de projeto	4.g.M	1,5.g.M	1.g.M

Fonte: Lottermann, 2014. 38 p.

M= Massa do veículo;

g= Aceleração da gravidade.

Para veículos de competição, onde acidentes são corriqueiros, são exigidos testes de esforços na estrutura do veículo capazes de resistir a capotamentos em alta velocidade mantendo a integridade do alojamento do piloto. Assim, pelo regulamento da FIA (*Federation Internationale de l'Automobile*) da competição de fórmula 4, esforços pré estabelecidos são apresentados para esses testes, tendo como requisito uma deformação máxima admitida na estrutura (FIA, 2015). Segundo o regulamento da FIA, as cargas aplicadas na estrutura tem os seguintes valores: 13,2 KN lateralmente, 49,5 KN longitudinalmente e 66 KN verticalmente.

2.3 Método dos elementos finitos

O método de elementos finitos é amplamente utilizado em diferentes áreas da engenharia. A ideia do método é a utilização de modelos matemáticos que aproximam comportamentos de sistemas físicos, sendo utilizados métodos numéricos para a solução dos modelos matemáticos.

O método de elementos finitos tem como objeto dividir o objeto analisado em diversos elementos, podendo este elemento ter várias formas, como os tetraédricos e hexaédricos utilizados neste trabalho, sendo estes elementos conectados entre si por nós. Pode ser definida como uma função polinomial ou trigonométrica a distribuição da variável sobre cada elemento. A quantidade e o tipo de elementos são selecionados de maneira que fique uma distribuição uniforme sobre o objeto em estudo, fornecendo valores admissíveis, sendo estes próximos dos valores reais quando conhecidos ou sendo uma estimativa inicial mais precisa. O conjunto de elementos e nós são definidos como malha.

Após a discretização, são calculadas as equações governantes de cada elemento, através de equilíbrio, princípios energéticos ou resíduos ponderados. Posteriormente a interação entre cada um deles é realizada, fazendo-se a superposição das equações, e formando assim um sistema de equações que descrevem o comportamento do corpo como um todo e que, para uma análise estática, geralmente toma a seguinte forma:

$$\begin{aligned} k_{11}u_1 + k_{12}u_2 + \dots + k_{1n}u_n &= F_1 \\ k_{21}u_1 + k_{22}u_2 + \dots + k_{2n}u_n &= F_2 \\ k_{n1}u_1 + k_{n2}u_2 + \dots + k_{nn}u_n &= F_n \end{aligned} \quad \text{ou} \quad [\mathbf{k}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde $[\mathbf{k}]$ é uma matriz quadrada, conhecida como matriz de rigidez, $\{\mathbf{u}\}$ é um vetor de incógnitas, podendo ser deslocamentos nodais, temperaturas nodais, etc., dependendo do problema que se está resolvendo; e $\{\mathbf{F}\}$ é denominado vetor de forças nodais, podendo representar forças, fluxos de calor nodalizados, etc.

Após a superposição, aplicam-se as condições de contorno (restrições, valores conhecidos da variável em determinadas posições), modificando alguns termos da

matriz $[k]$ e do vetor $\{F\}$. Em seguida resolve o sistema (equação (1)), já modificado devido à imposição das condições de contorno, obtendo-se o vetor $\{u\}$.

Com a obtenção do vetor de incógnitas $\{u\}$ pode-se calcular outras quantidades de interesse, relacionadas geralmente com as derivadas das incógnitas, sendo as componentes de tensão, fluxo de calor, velocidade de fluidos, campo elétrico, dependendo do problema que está resolvendo (CHAVES e RAMOS, 2011).

O método consiste, portanto na transformação de equações na forma contínua em um sistema de equações cujas incógnitas são valores pontuais, aproximando um meio contínuo por um modelo discreto (LUERSEN, 2000).

Para a realização de análises estruturais, os principais tipos de elementos utilizados são: elementos de barra, de viga, plano, casca, sólido e de contato.

No software *Ansys Workbench*, os principais elementos finitos utilizados são do tipo sólido tetraédrico ou sólido hexaédrico. Este software e estes elementos são empregados nas simulações estruturais do chassi. O elemento sólido tem como característica três graus de liberdade por nó, com esforços suportados nas três direções, (X, Y, Z), sendo utilizado para modelar problemas sólidos em geral. A figura 1 mostra estes dois tipos de elementos sólidos.

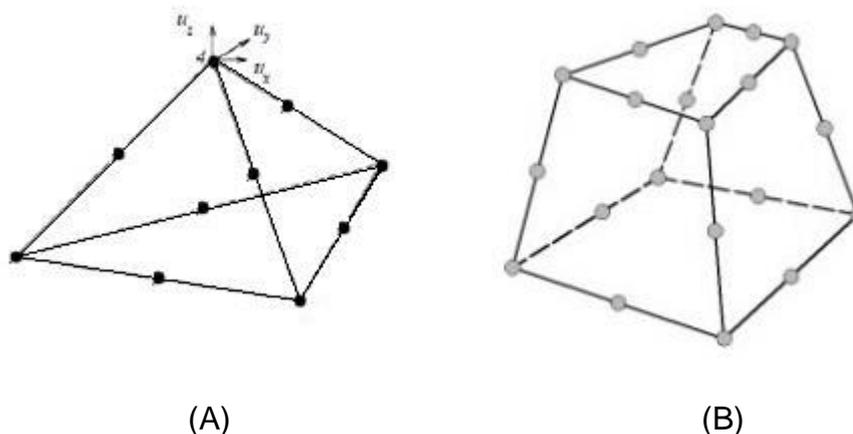


Figura 1 – Elementos sólidos, (A) tetraédrico, (B) hexaédrico.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E RESULTADOS DO CHASSI ORIGINAL

Para as simulações em elementos finitos é necessária a modelagem geométrica do chassi, sendo utilizado como base para a geração dos elementos de corpo sólido. Com o modelo definido são realizadas as simulações numéricas, obtendo valores de tensões através do método de análise adotado, buscando melhorias se necessário quando as tensões obtidas nas simulações não atender as condições de contorno.

3.1 Modelagem do chassi em ferramenta CAD.

O objeto em estudo neste trabalho é um chassi de um veículo do tipo buggy, desenvolvido de modo artesanal. Na construção física foram utilizadas peças comerciais de outros veículos e peças especialmente fabricadas para este veículo. O material utilizado na estrutura do chassi foi o aço carbono 1045. a figura 2 mostra o chassi real.



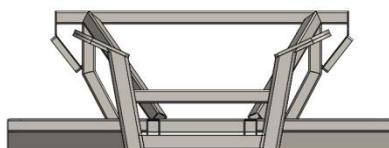
(A)



(B)

Figura 2 – Chassi original, fabricado de forma artesanal, (A) vista frontal, (B) vista lateral

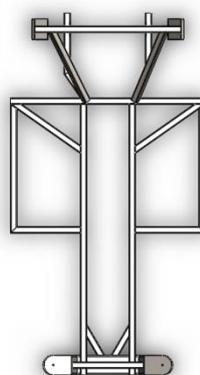
Inicialmente o chassi foi modelado em ferramenta CAD e de forma simplificada. Componentes como suspensão, rodas, sistema de freios entre outros não estão sendo levados em consideração. A figura 3 apresenta, em diferentes vistas, o modelo inicial do chassi original com simplificações na modelagem. A modelagem geométrica foi realizada no programa Solidworks.



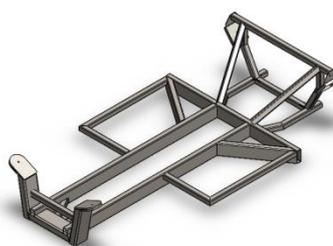
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 3 – Modelo do SolidWorks do chassi real de forma simplificada: (A) vista frontal, (B) vista lateral, (C) vista superior, (D) vista em perspectiva

3.2 Modelagem por elementos finitos

Para se realizar as simulações estruturais foi construído um modelo com elementos finitos sólidos no programa Ansys Workbench, conforme mostrado na figura 4. A geometria foi importada do modelo geométrico criado no SolidWorks.

Mesh
11/05/2016 21:06

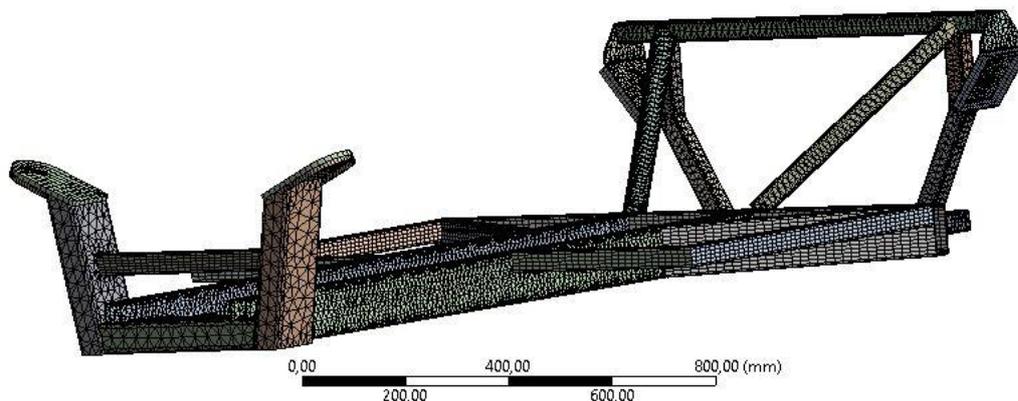


Figura 4 - Malha de elementos finitos do chassi (elementos sólidos tetraédricos)

Durante o processo de geração da malha é possível controlar alguns parâmetros como o tamanho de elemento, inclusão de nós centrais do elemento, entre outros. A tabela 2 apresenta algumas características da malha de elementos finitos gerada.

Tabela 2 – Características da malha de elementos finitos

Tamanho médio dos elementos (mm)	Nó central do elemento	Número de elementos	Número de nós
15	Mantido	136.935	335.906

A definição da malha foi feita de forma visual e iterativa, até um ponto onde não se pôde avançar no seu refinamento devido ao limite na capacidade de processamento do computador utilizado nas simulações. Durante a geração do modelo de elementos finitos também foram constatados alguns erros na geração da malha em relação ao modelo importado do CAD, sendo necessárias algumas simplificações e adequações no desenho.

3.3 Descrição das simulações

As simulações realizadas neste trabalho buscaram representar as condições de uso em terrenos remotos, como encontrado em dunas e estradas de terra. Neste

estudo inicial, onde está sendo feito uma estimativa de condições de rodagem, não sendo encontrados parâmetros para análise e desenvolvimento de projetos para estas aplicações, assim condições de contorno foram adotadas com requisitos de projeto, sendo listados a seguir:

- Desconsideração dos possíveis efeitos de fadiga nos componentes do chassi;
- Coeficiente de segurança considerado igual a 1 devido às altas cargas aplicadas ao chassi nas simulações, sendo estimadas maiores que as cargas reais de rodagem;
- Material linear e isotrópico;
- Estrutura sem defeitos relacionados à soldagem de componentes;
- Fator de carga igual a 1 nas direções dos eixos (X,Y,Z), adotado arbitrariamente;
- Desconsideração de qualquer existência de trinca na estrutura.

A tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas do material utilizado no chassi, o aço AISI 1045.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do material aço AISI 1045

(Fonte: site matweb, acessado em 11 de maio de 2016)

Tensão de ruptura	Tensão de escoamento	Módulo de elasticidade	Coeficiente de Poisson
625 MPa	530 MPa	206 GPa	0,29

As simulações a seguir representam os resultados do método desenvolvido para este trabalho, tendo o objetivo a obtenção de valores de tensões que atendam o limite de escoamento do material utilizado na construção, utilizando o critério de von Mises.

3.3.1 Análise Modal

A primeira análise realizada foi a análise modal, para verificar as frequências naturais, e também encontrar pontos com muita flexibilidade no chassi. Nesta análise consideraram-se os pontos de união do chassi com a suspensão fixos.

Na tabela 4 são mostrados os valores das seis primeiras frequências naturais do chassi.

Tabela 4- Primeiras frequências naturais do chassi

Freq. 1	Freq. 2	Freq. 3	Freq. 4	Freq. 4	Freq. 6
49,79 Hz	65,02 Hz	76,56 Hz	84,54 Hz	97,631Hz	110,62 Hz

Segundo Norton (2013), uma estrutura deve possuir frequências naturais três vezes maior ou três vezes menor que as frequências de excitações, sendo assim tomado como referências a faixa de rotação de uso no cotidiano do motor utilizado, variando de 1000 rpm a 2500 rpm, com frequências de 16,67 Hz e 41,67 Hz respectivamente.

Aplicando um coeficiente de segurança igual a 3 tem-se 50 Hz e 125 Hz, respectivamente, ficando assim dentro dos requisitos de segurança de operação, sem o risco de entrar em ressonância.

Ao analisar o primeiro modo de vibração, foi verificada a existência de regiões flexíveis no chassi (figura 3). Entretanto, tais regiões não possuem função estrutural, mas sim para suportar a carroceria que será utilizada, não havendo a necessidade de mudanças referente a esta situação. A figura 5 mostra os pontos de maior flexibilidade indicado por setas.

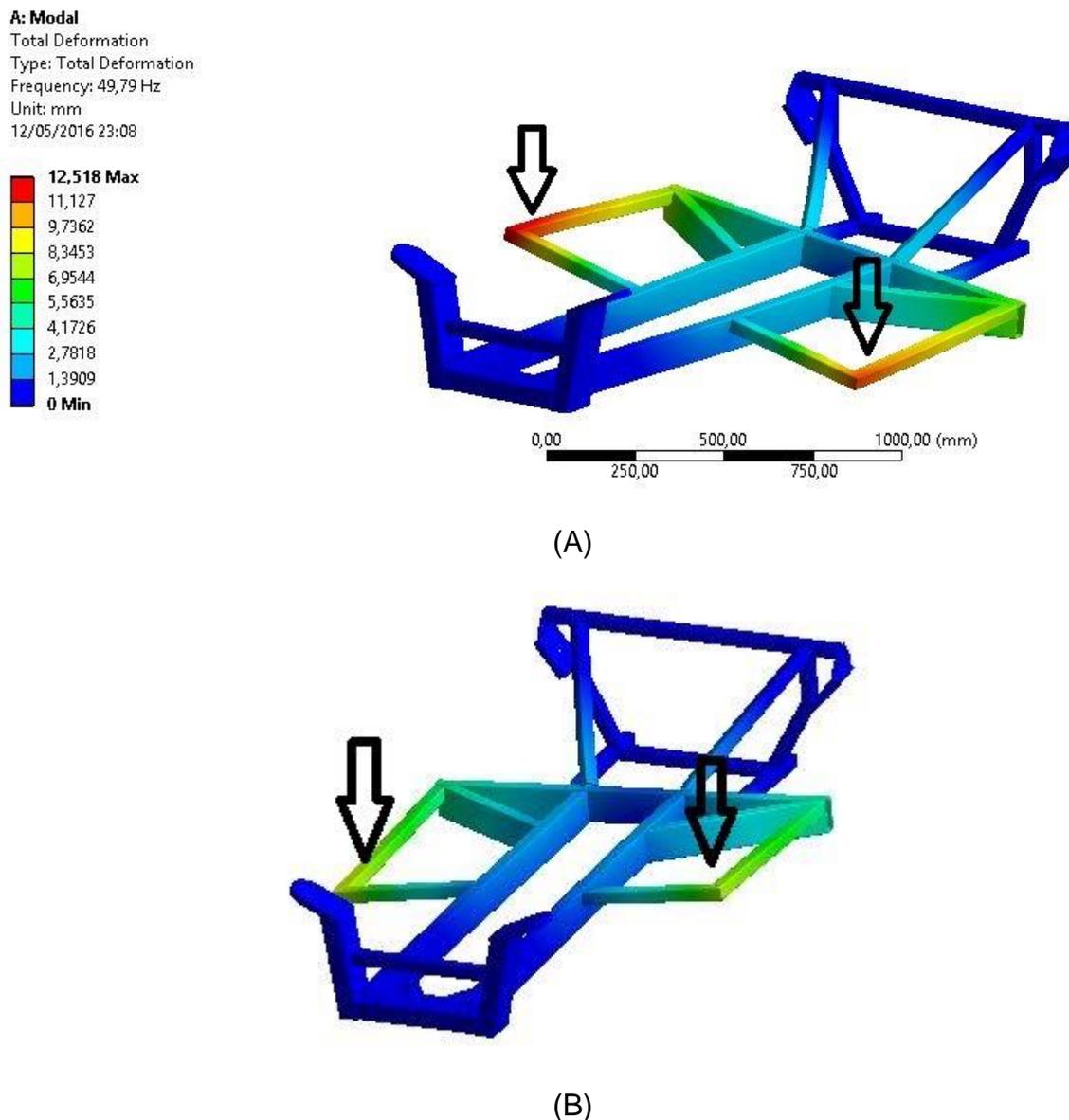


Figura 5 – Pontos de flexibilidade na estrutura, (A) primeiro modo de vibrar do chassi, (B) segundo modo de vibrar do chassi

3.3.2 Análise do efeito da gravidade

A análise de gravidade tem como objetivo simular o efeito do peso dos componentes do buggy e dos ocupantes sobre a estrutura do chassi. Como o peso do buggy é estimado em aproximadamente 8 vezes o peso da estruturado chassi, sendo o peso da estrutura próximo 75 kg. Foi considerado 8 vezes a aceleração da gravidade sobre a estrutura na modelagem de elementos finitos, representando a distribuição do efeito do peso do veículo sobre todas as partes as estrutura. Com estas hipóteses foi verificado se não há alguma parte sobre tensão excessiva

comprometendo a integridade da estrutura. A figura 6 mostra as tensões na estrutura do chassi devido ao peso dos componentes.

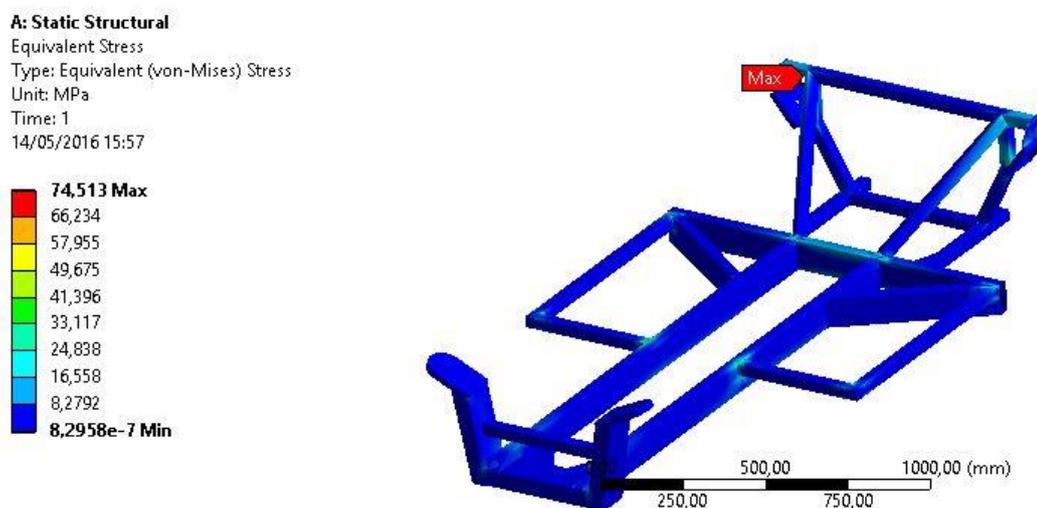


Figura 6 – Tensões obtidas na análise do efeito do peso dos componentes do buggy

A tensão máxima obtida pela simulação foi de 74,5 MPa, valor bem abaixo da tensão de escoamento do material (530 MPa). A localização da tensão máxima foi em um ponto de solda existente na estrutura. A figura 7 mostra a região em que se localiza o ponto de tensão máxima.

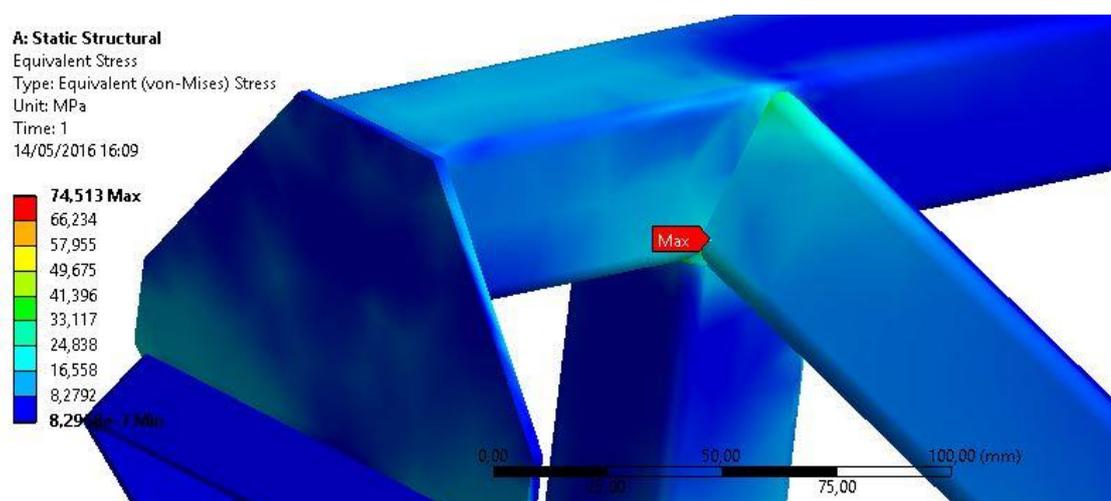


Figura 7 – Localização do ponto de tensão máxima

Desconsiderando a região pontual de tensão máxima, fazendo uma análise visual sobre toda a estrutura, os pontos de tensão possuem valores entre 40 MPa e

50 Mpa. Estes valores ficaram abaixo de 10% da tensão máxima admissível neste projeto, sendo assim então valores aceitáveis obtidos nesta análise.

3.3.3 Carregamento nas rodas dianteiras

A aplicação de carregamentos nas rodas dianteiras tem por objetivo simular o buggy passando por buracos, desníveis ou em um salto onde a carga de impacto é aplicada sobre a suspensão dianteira, sendo conseqüentemente transmitida para a estrutura do chassi.

Fazendo a consideração de que cada roda recebe uma força, sendo esta da magnitude do peso do buggy dividida por 4, em cada uma das 3 direções (X,Y e Z). Realizada a simulação, encontraram-se as tensões geradas na estrutura do chassi, considerando os pontos de fixação do suporte de apoio na parte traseira do chassi, como mostra a figura 8.

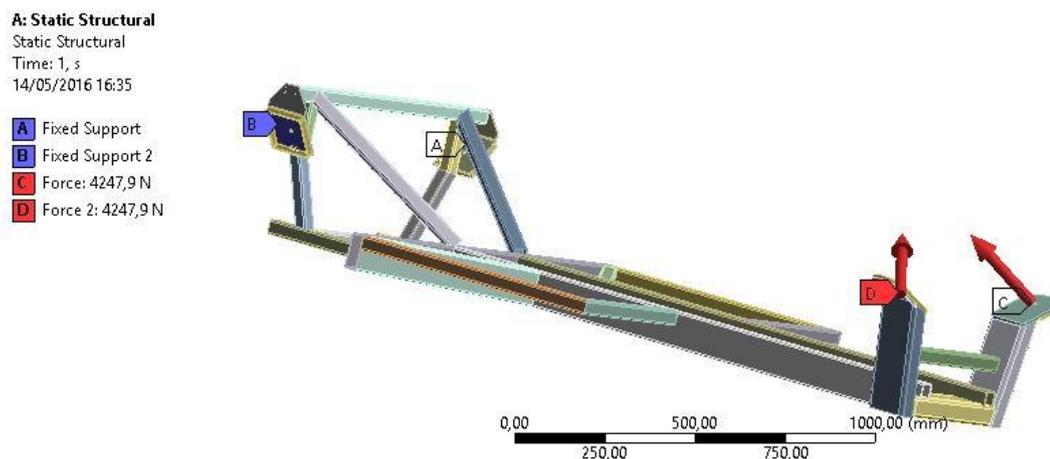


Figura 8 – Pontos de aplicação das forças e das fixações. A e B representam os pontos de fixações e C e D os pontos de aplicação das forças.

O resultado desta simulação constatou algumas regiões de altas tensões, que ultrapassam a tensão limite de escoamento, como mostra a figura 9.

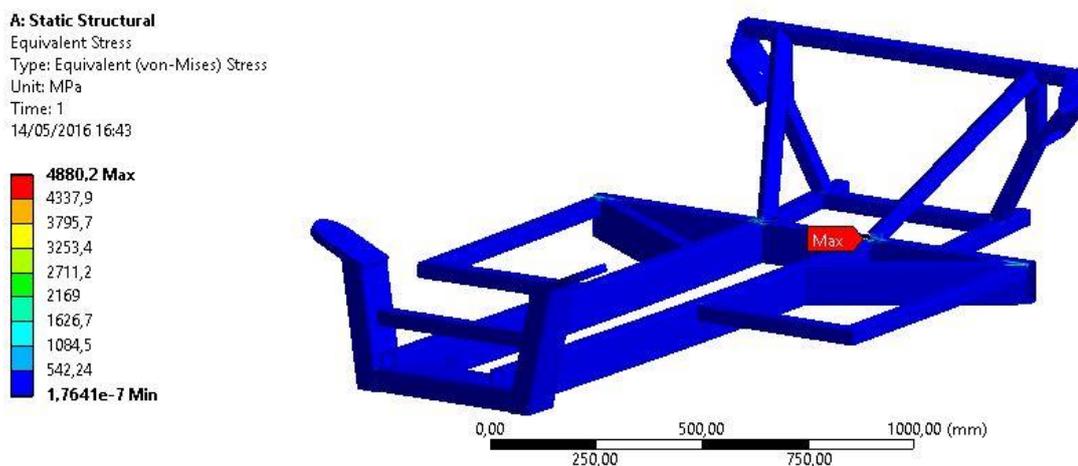


Figura 9 – Visão geral das tensões geradas na simulação de cargas dianteiras.

A sugestão de melhoria é o aumento da espessura dos tubos utilizados na parte traseira, onde se encontram as maiores tensões, como mostra a figura 10.

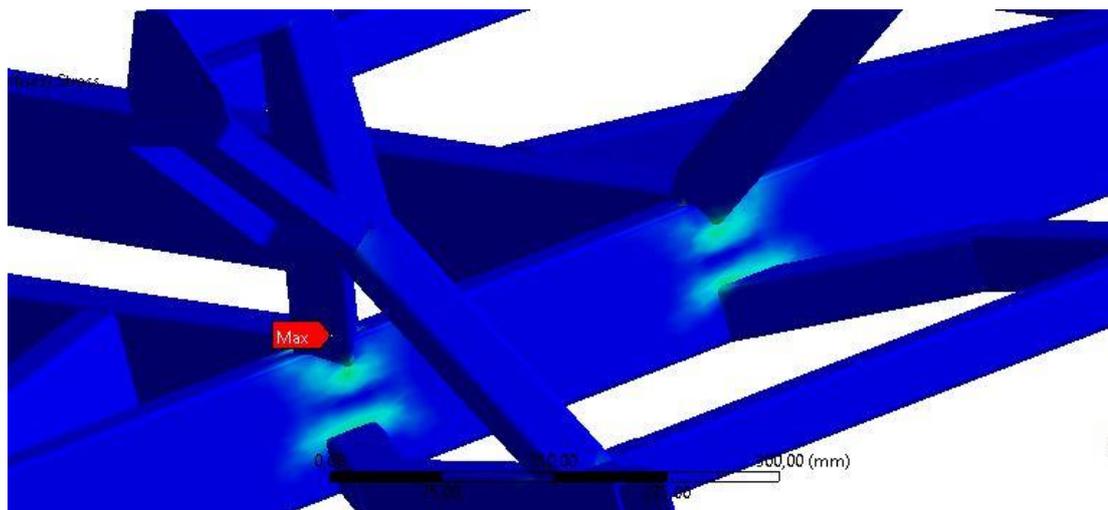


Figura 10 – Regiões com alta concentração de tensão na parte traseira devido às cargas aplicadas na dianteira

A região de maior tensão se encontra em uma solda entre as partes central e traseira do chassi, como mostra a figura 11. Como sugestão de alteração, reforça-se as regiões de soldas, evitando ou minimizando o momento de flexão gerado pela carga aplicada.

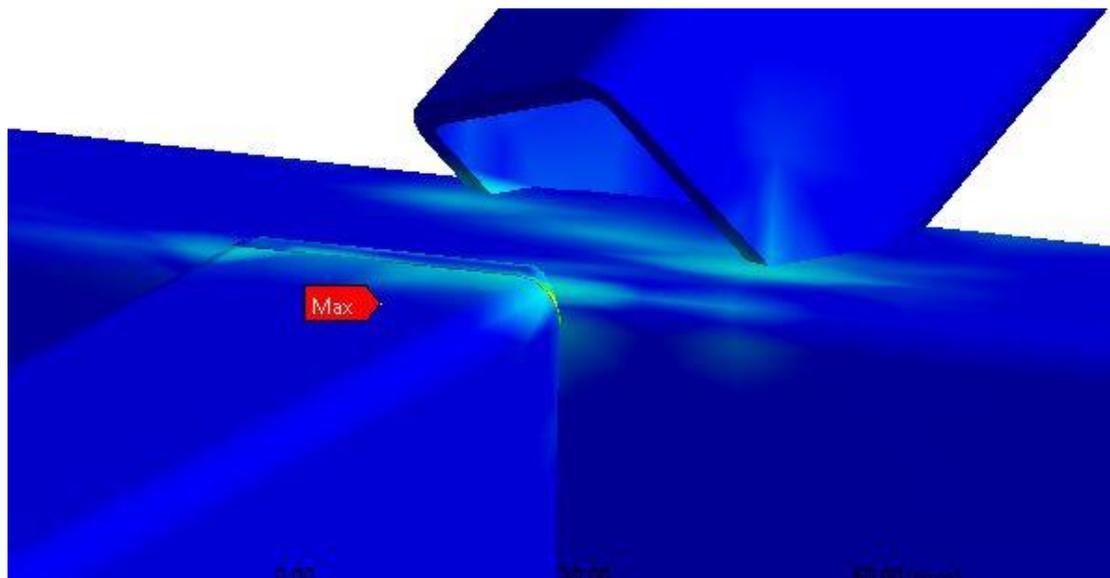


Figura 11 – Localização da maior tensão obtida na estrutura na simulação de carregamento nas rodas dianteiras, localizado em uma região de solda

Outro aspecto observado no comportamento da estrutura foi o deslocamento elevado na região dianteira. Devido ao momento gerado pelas cargas, necessitando uma mudança de geometria na parte central do chassi. É necessário tornar mais rígido nesta parte, evitando o elevado deslocamento da estrutura, como mostra a figura 12.

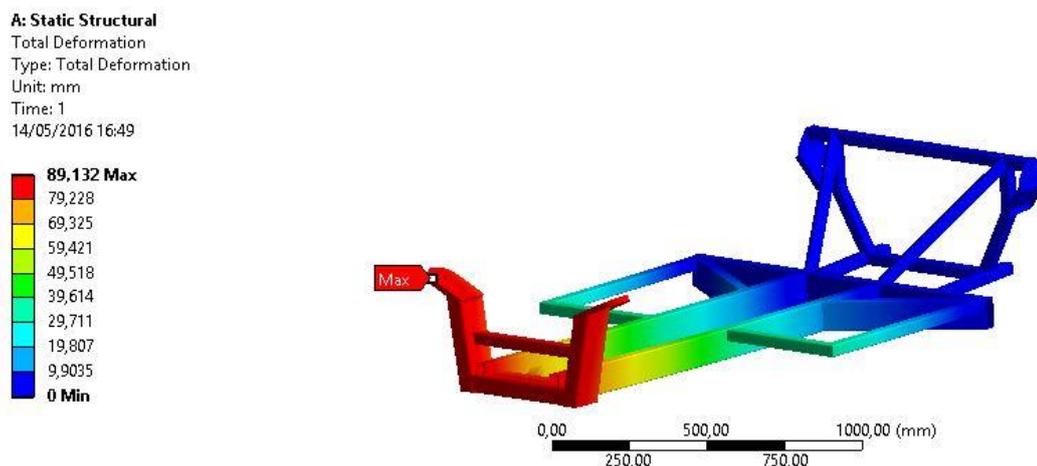


Figura 12– Deslocamento da estrutura devido às cargas aplicadas

3.3.4 Carregamento nas rodas traseiras

Similar à simulação de rodas dianteiras, esta simula a demonstração devido a passagem do buggy por buracos, desníveis ou em um salto onde a carga aplicada

pelo impacto é aplicada sobre a suspensão traseira, sendo conseqüentemente transmitida para a estrutura do chassi.

Fazendo a consideração também similar a simulação de carregamento dianteiro, de que cada roda recebe uma força de magnitude do peso do buggy dividido por 4 em cada uma das 3 direções do eixo cartesiano, X,Y e Z, foi realizada a simulação para se encontrar as tensões geradas na estrutura do chassi, considerando os pontos de fixação do suporte de apoio na parte dianteira do chassi como mostra a figura 13.

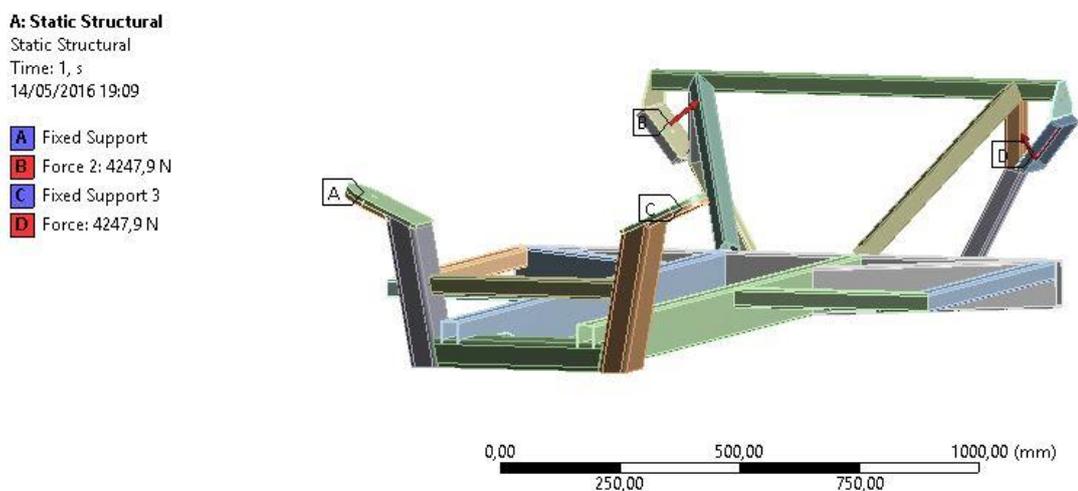


Figura 13 – Pontos de aplicação das forças e das fixações, sendo pontos A e C fixação e B e D pontos de forças

Após a simulação foi constatado uma tensão máxima um pouco acima da tensão de escoamento do material. Portanto, é necessária mudança da espessura do tubo e uma solda bem executada na conexão dos tubos no processo de soldagem para reduzir a tensão pontual encontrada. As figuras 14 e 15 mostram as tensões na região da traseira no chassi e no ponto de maior tensão, respectivamente.

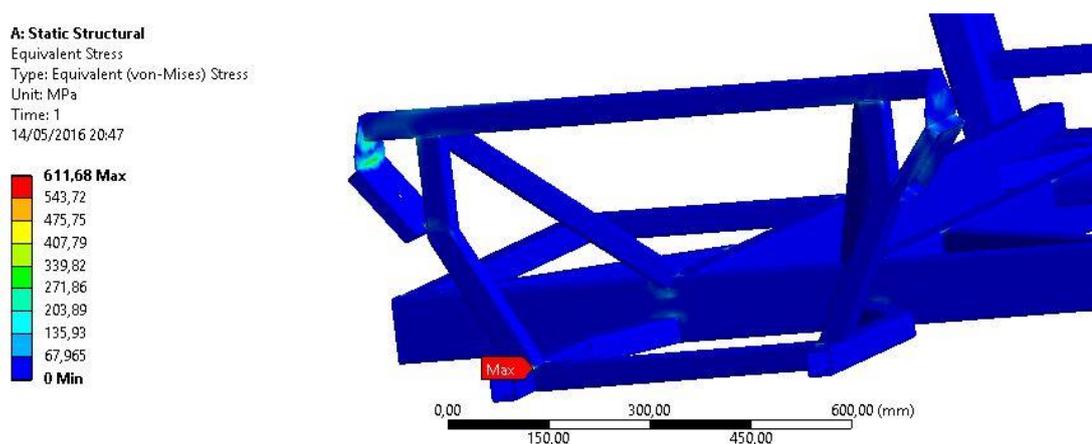


Figura 14 – Tensões encontradas na simulação de carregamento na traseira

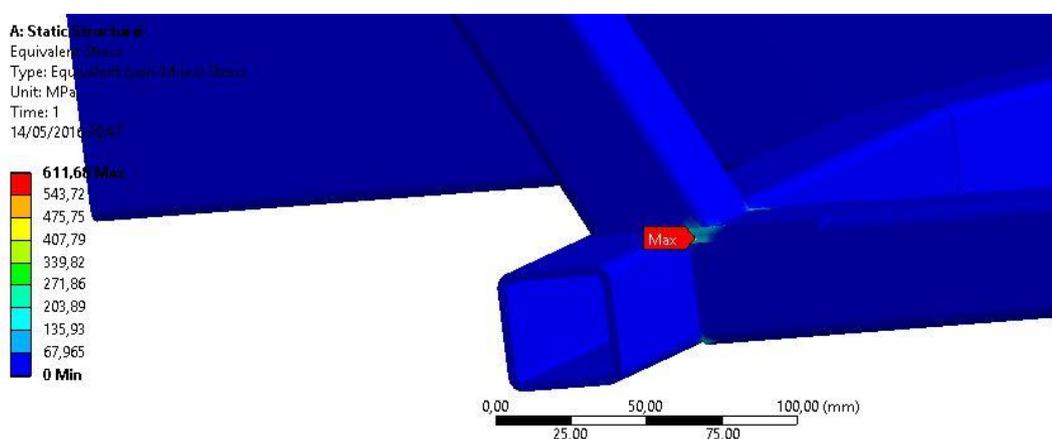


Figura 15 – Ponto de maior tensão na encontrado na estrutura em carregamento traseira

3.3.5 Carregamento na roda dianteira

Este caso simula a passagem do buggy por um buraco. A carga de impacto correspondente é aplicada sobre a suspensão dianteira, do lado onde ocorre o impacto, sendo conseqüentemente transmitida para a estrutura do chassi.

A roda recebe uma força de magnitude do peso do buggy dividido por 4 na direção da componente Y do eixo cartesiano. A figura 16 demonstra os pontos de fixação e de aplicação da força.

A: Static Structural
 Static Structural
 Time: 1, s
 28/06/2016 21:15

- A Fixed Support
- B Fixed Support 2
- C Force: 2452,5 N
- D Fixed Support 3

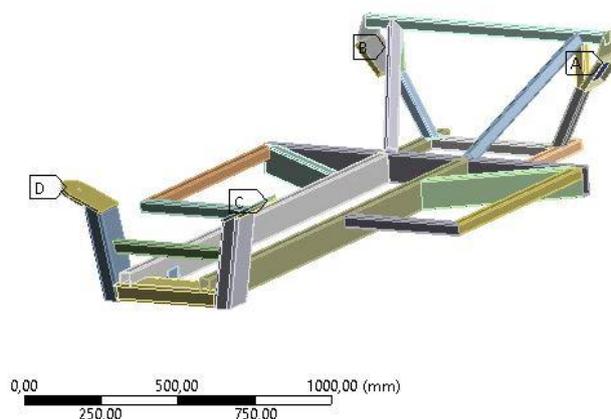
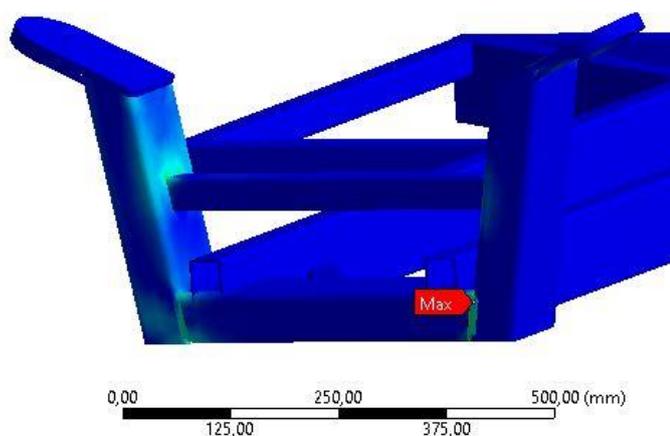
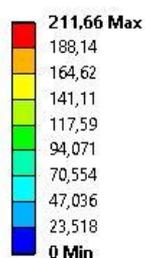


Figura 16 – Pontos de aplicação das forças e das fixações, sendo pontos A, B e D fixação e C ponto de aplicação força.

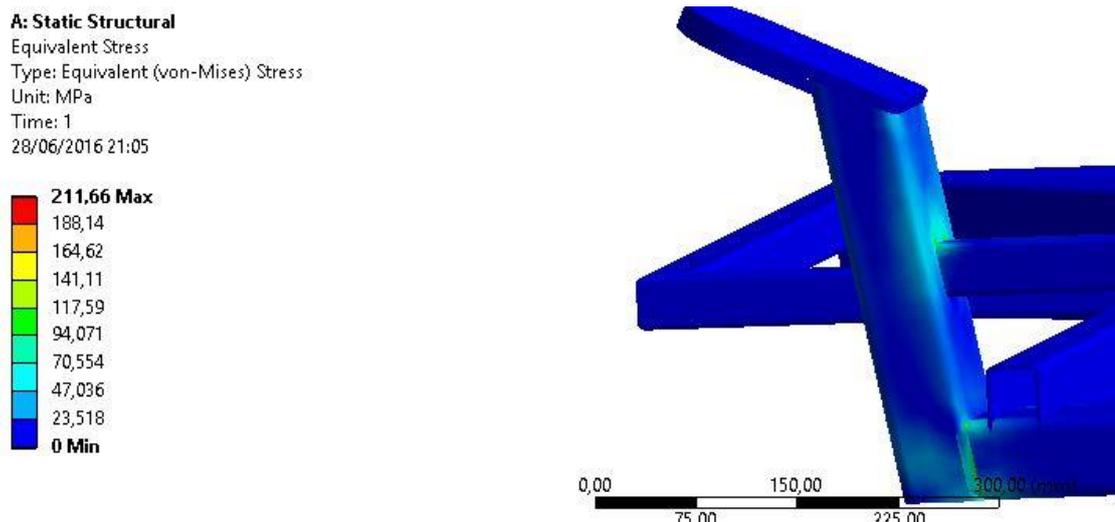
Nesta análise foi constatado que as tensões ficaram abaixo da tensão admissível do material. Em comparação com a simulação de cargas nas rodas dianteiras, pode se concluir que a espessura dos tubos da suspensão dianteira pode ser reduzido, diminuindo o peso da estrutura na região frontal do veículo sem comprometer a integridade da estrutura.

Devido à simetria na estrutura do chassi, foi realizada a simulação apenas em um dos lados. A figura 17 mostra o resultado obtido na simulação de roda dianteira.

A: Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 28/06/2016 21:05



(A)



(B)

Figura 17 – Tensões encontradas nas simulações com aplicação em roda dianteira, (A) geral, (B) zoom detalhado

3.3.6 Carregamento na roda traseira

Esta simulação representa a passagem do buggy por um buraco, onde a carga de impacto é aplicada sobre a suspensão traseira, do lado do impacto, sendo conseqüentemente transmitida para a estrutura do chassi. Neste caso a roda recebe uma força de magnitude do peso do buggy dividido por 4 em cada uma das 3 direções dos eixos cartesianos, similar às simulações anteriores. A figura 18 demonstra os pontos de fixação e de aplicação da força.

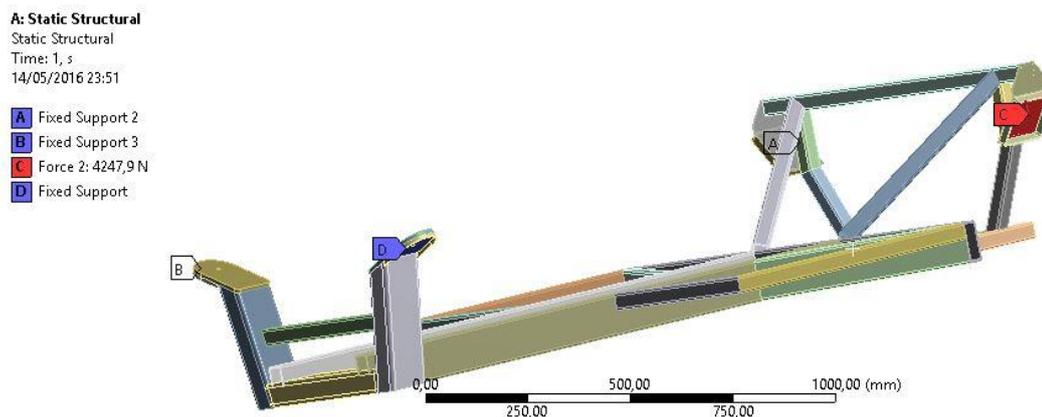


Figura 18 – Pontos de aplicação das forças e das fixações, sendo pontos A, B e D fixação e C ponto de aplicação força

O resultado da simulação mostrou que existem tensões acima da admissível para o material utilizado, sendo necessária a alteração da estrutura. A figura 19 mostra a distribuição de tensões na traseira do chassi.

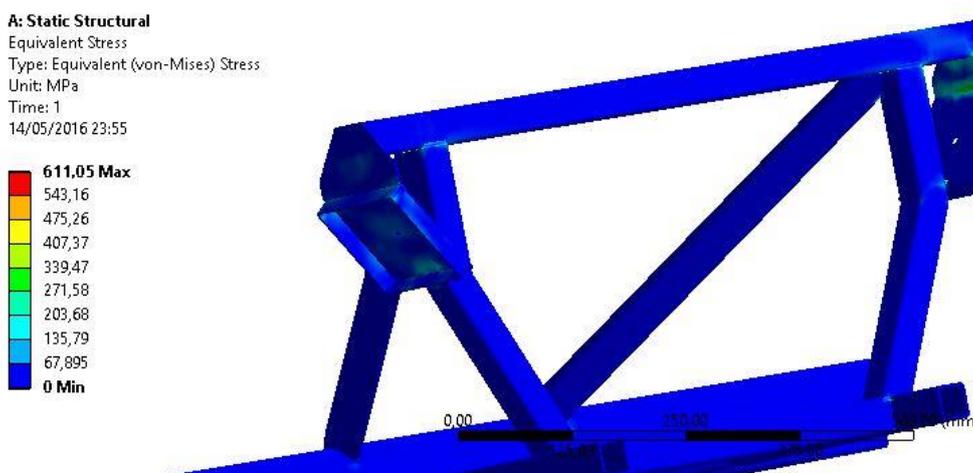


Figura 19 – Tensões na estrutura traseira do chassi

A região de maior tensão se localiza em uma das soldas da base da estrutura traseira. Assim, é necessário um reforço estrutural para distribuir as tensões localizadas na região da solda. A figura 20 mostra a localização do ponto máximo da tensão encontrada.

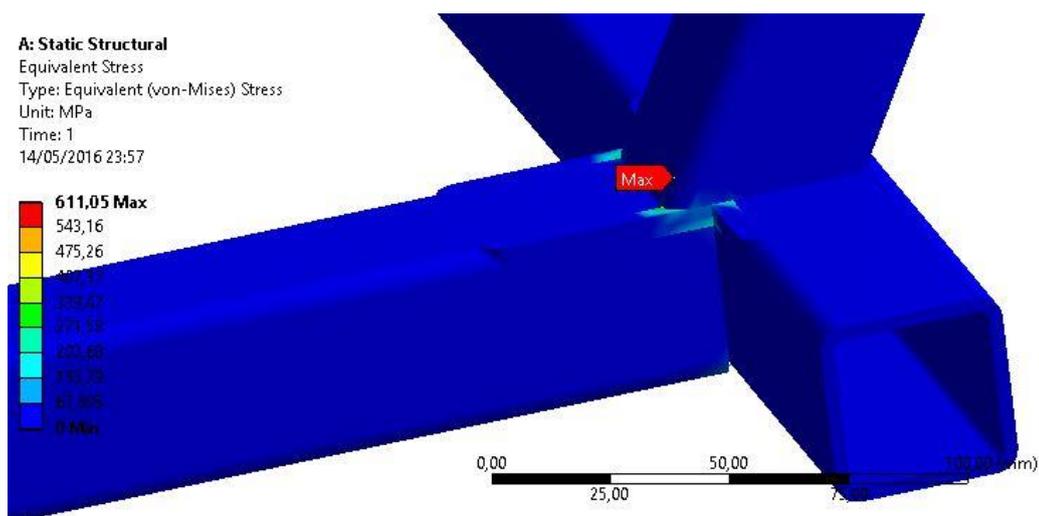


Figura 20 – Localização da tensão máxima encontrada na base da estrutura traseira do chassi

3.3.7 Carregamento cruzado

Esta simulação analisa o efeito de torção do chassi, devido à passagem do buggy por um terreno acidentado. As rodas recebem uma força de magnitude do peso do buggy dividido por 4 em cada uma das 3 direções dos eixos cartesianos, X,Y e Z, de uma forma cruzada, sendo a roda dianteira com lado oposto a traseira. A figura 21 demonstra os pontos de fixação e aplicação das forças recebidas.

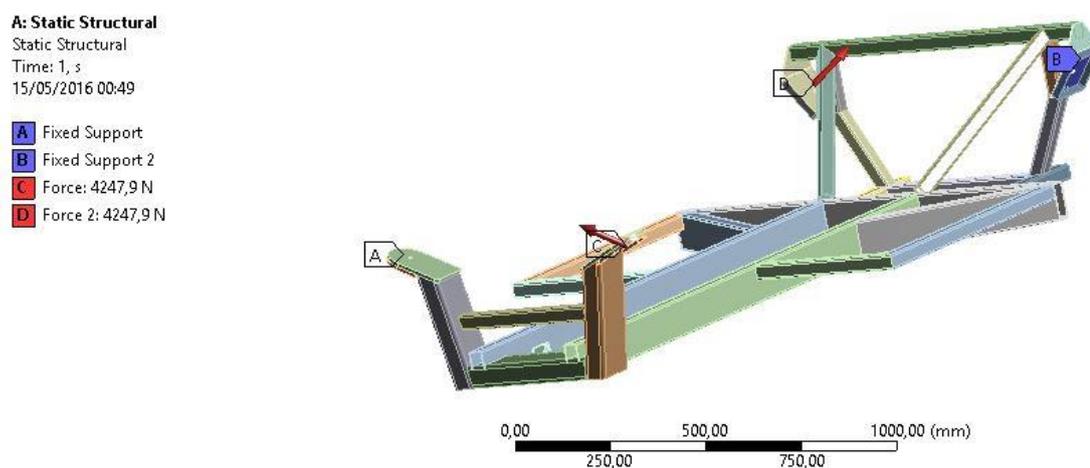


Figura 21 – Pontos de aplicação das forças e das fixações, sendo pontos A e B fixações e C e D pontos de aplicação das forças

Esta análise apresenta tensões acima da admissível em um ponto localizado na parte superior do chassi, como mostra a figura 22, e uma visão geral da estrutura como é visto na figura 23.

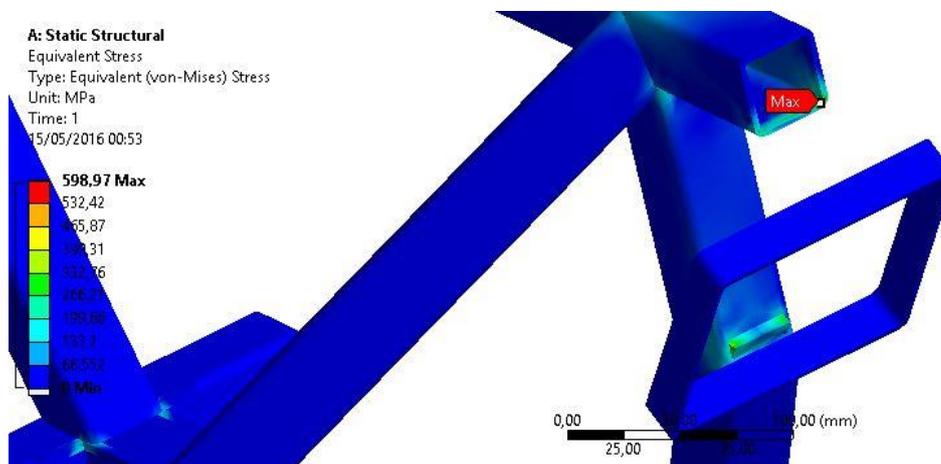


Figura 22 - Região pontual com máxima tensão, sendo acima da admissível.

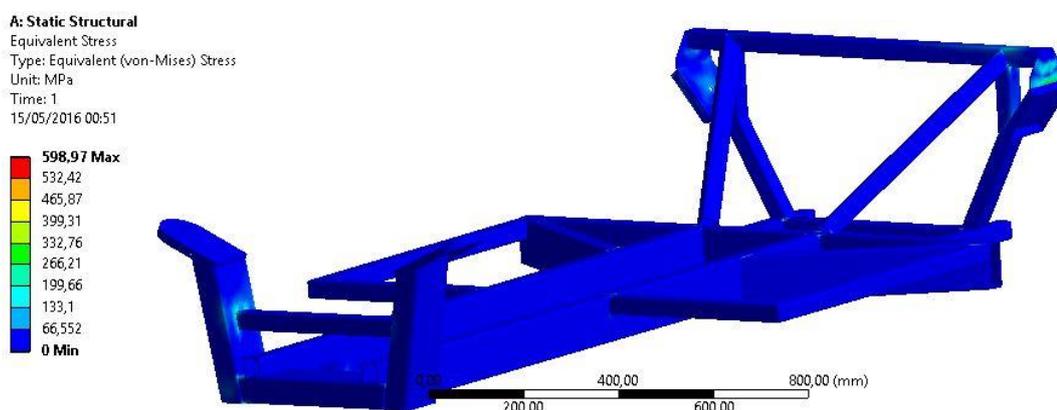


Figura 23 – Visão geral sobre as tensões na estrutura do chassi

Para a correção desta situação, é previsto um aumento na espessura das chapas e tubos, de forma a reduzir as tensões localizadas, buscando um campo de tensões com distribuição mais homogênea e com valores menores.

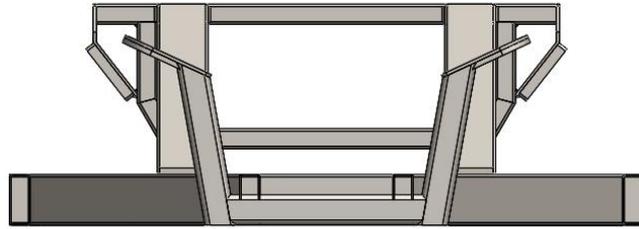
4 RESUMO DOS RESULTADOS E PROPOSTAS DE MODIFICAÇÕES NA GEOMETRIA DO CHASSI

Após a análise dos resultados das simulações do chassi original, algumas modificações foram propostas, tais como alterações de espessura de chapas e tubos para diminuir as tensões, e modificações em algumas regiões para tornar o chassi mais rígido. A tabela 5 mostra um resumo dos resultados obtidos nas simulações iniciais e alterações propostas.

Tabela 5 – Resultados das simulações iniciais e propostas de alterações

Análise	Valor admissível	Valor encontrado na análise	Alterações propostas
Modal	Próximo de 50 Hz	49,79 Hz	-
Gravidade	530 MPa	74,5 MPa	-
Rodas dianteiras	530 MPa	4880 MPa	Alteração de geometria e espessura de tubos e chapas
Rodas traseiras	530 MPa	611,7 MPa	Alteração de espessura de tubos e chapas
Roda dianteira	530 MPa	211,66 MPa	Redução de espessura de tubos e chapas
Roda traseira	530 MPa	611 MPa	Alteração de geometria e espessura de tubos e chapas
Cruzado	530 MPa	599 MPa	Alteração de espessura de tubos e chapas

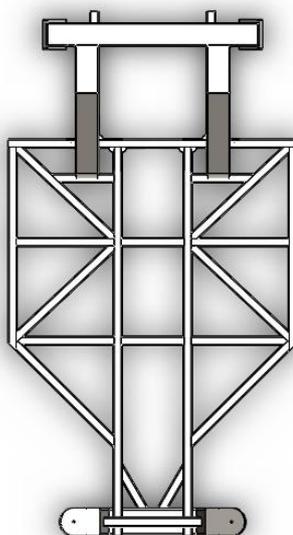
Após as diversas simulações e alterações no chassi, chegou-se a uma nova geometria, para se chegar nesta nova geometria foram feitas várias modificações intermediárias até se chegar a versão final, gerando um ciclo de looping de iterações até o resultado final, o qual está representado na figura 24.



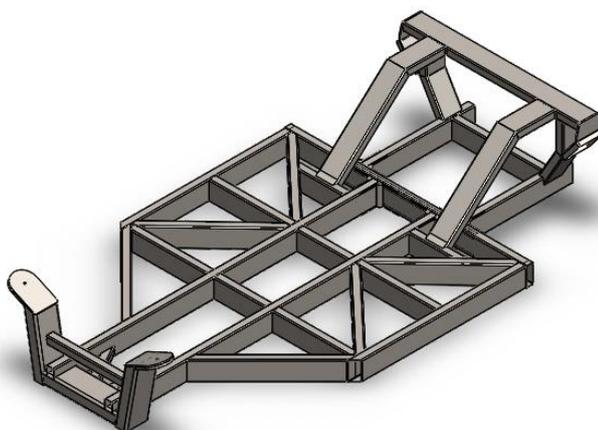
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 24 – Modelo do SolidWorks do chassi modificado: (A) vista frontal, (B) vista lateral, (C) vista superior, (D) vista em perspectiva

4.1 Análise modal

Concluídas as modificações na estrutura, as novas frequências naturais estão mostradas na tabela 6.

Tabela 6 - Primeiras frequências naturais do chassi após alterações

Freq. 1	Freq. 2	Freq. 3	Freq. 4	Freq. 5	Freq. 6
63,77 Hz	70,55 Hz	81,23 Hz	141,83 Hz	167,32 Hz	184,88 Hz

4.2 Análise do efeito da gravidade

Esta análise mostra como será as tensões no chassi com a nova modelagem, tendo tensão máxima de 101,51 MPa como mostra a figura 25.

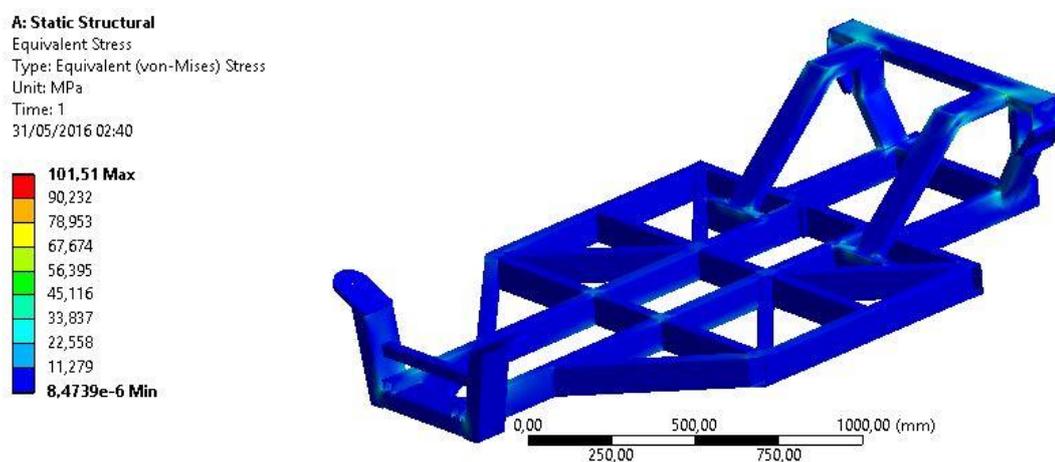


Figura 25 – resultado da simulação referente ao efeito da gravidade

4.3 Carregamento nas rodas dianteiras

A figura 26 mostra as tensões no chassi devido ao carregamento nas rodas dianteiras, com tensão máxima de 501,49 MPa.

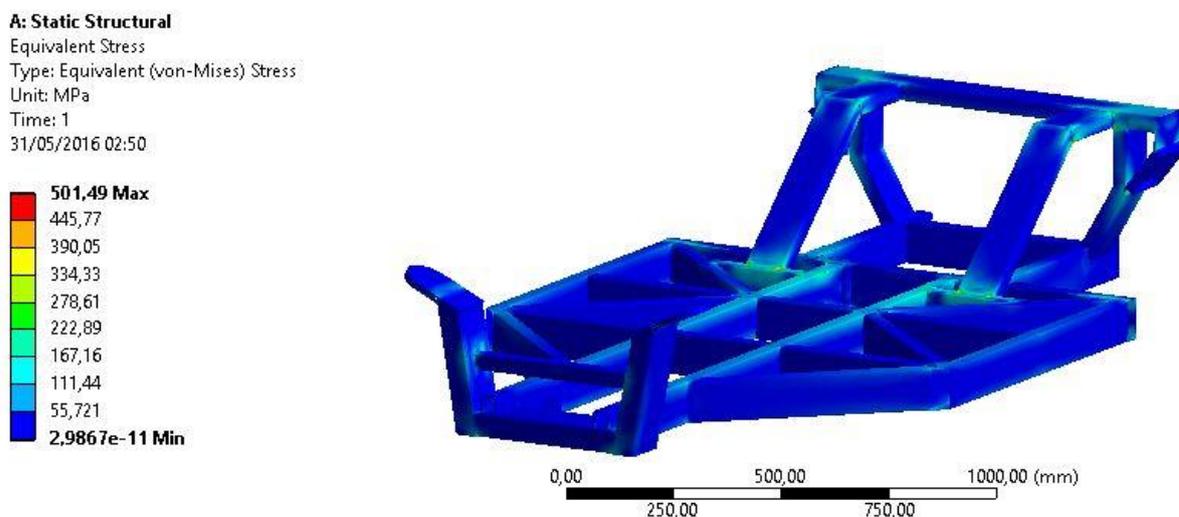


Figura 26 – Resultado da simulação referente ao carregamento nas rodas dianteiras

4.4 Carregamento nas rodas traseiras

A figura 27 mostra as tensões no chassi devido ao carregamento nas rodas traseiras, com tensão máxima de 482,42 MPa.

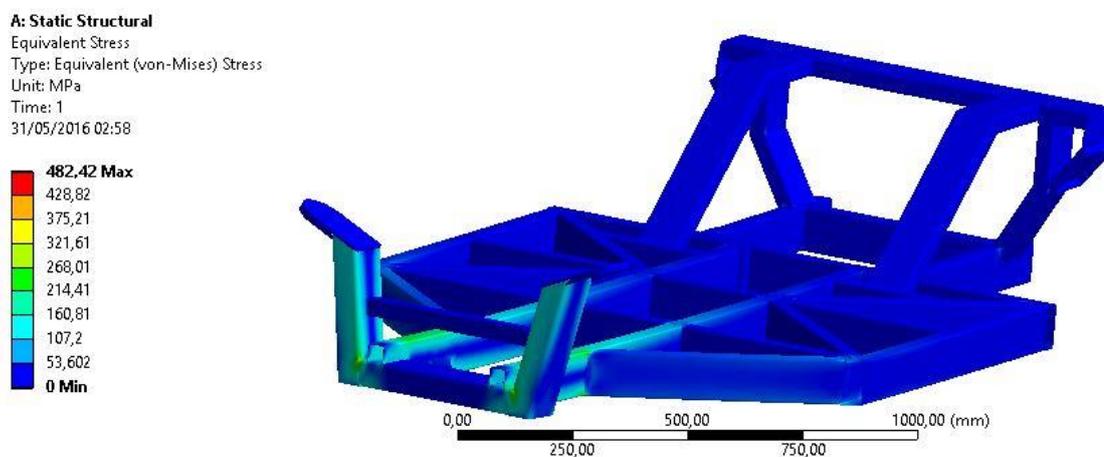


Figura 27 – Resultado da simulação referente ao carregamento nas rodas traseiras

4.5 Carregamento na roda dianteira

A figura 28 mostra as tensões no chassi devido ao carregamento na roda dianteira, com tensão máxima de 319,32 MPa.

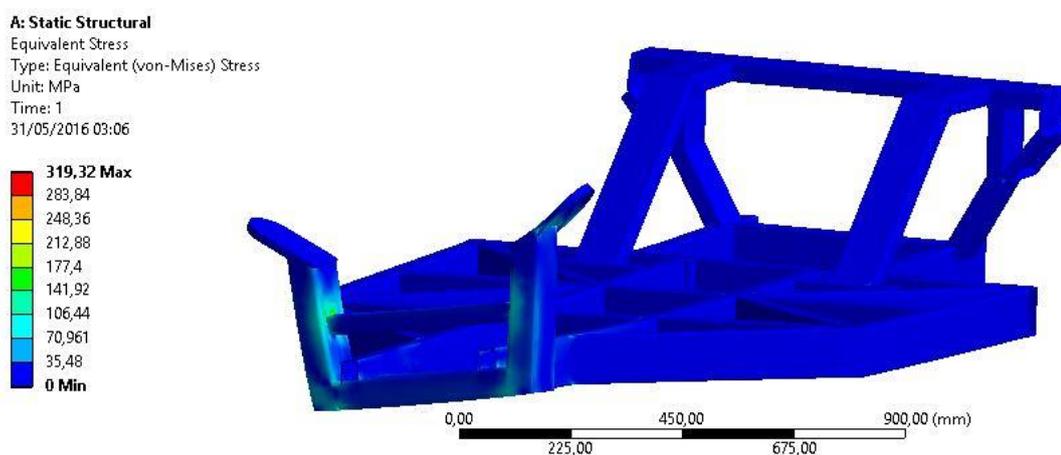


Figura 28 – Resultado da simulação referente ao carregamento na roda dianteira

4.6 Carregamento na roda traseira

A figura 29 mostra as tensões no chassi devido ao carregamento na roda traseira, com tensão máxima de 160,76 MPa.

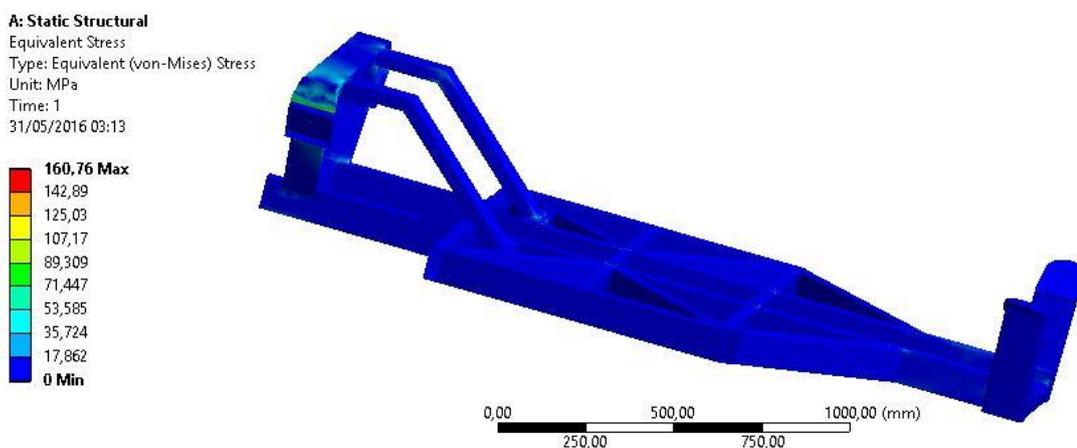


Figura 29 – Resultado da simulação referente ao carregamento na roda traseira

4.7 Carregamento cruzado

A figura 30 mostra as tensões no chassi devido ao carregamento cruzado, com tensão máxima de 297,56 MPa.

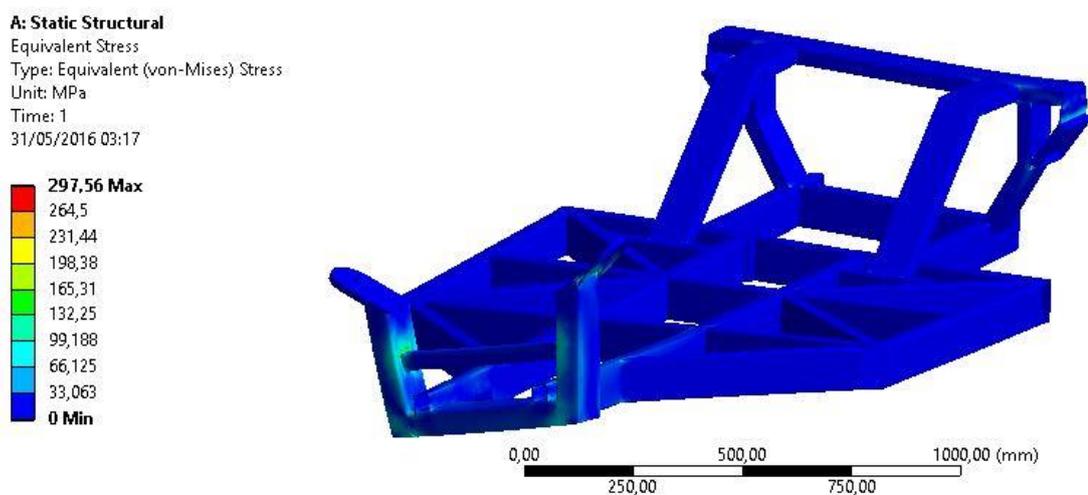


Figura 30 – Resultado da simulação referente ao carregamento cruzado

A tabela 7 trás uma comparação entre os resultados iniciais e os obtidos após as modificações.

**Tabela 7 – Comparação entre os resultados das simulações iniciais de
após modificações**

Análise	Valor admissível	Valor inicial	Valor após modificações
Modal	Próximo de 50 Hz	49,79 Hz	63,77 Hz
Gravidade	530 MPa	74,5 MPa	101,51 MPa
Rodas dianteiras	530 MPa	4880 MPa	501,49 MPa
Rodas traseiras	530 MPa	611,7 MPa	482,42 MPa
Roda dianteira	530 MPa	347,8 MPa	319,32 MPa
Roda traseira	530 MPa	611 MPa	160,76 MPa
Cruzado	530 MPa	599 MPa	297,56 MPa

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se a análise estrutural de um chassi de um veículo tipo buggy. Como ferramentas foram utilizados os softwares SolidWorks para a modelagem geométrica do chassi e o Ansys Workbench para a análise estrutural por elementos finitos, obtendo valores de tensões pelo critério de von Mises, buscando realizar o re-projeto do chassi, fazendo que atendesse os requisitos estabelecidos, tornando o chassi mais rígido e com distribuição de tensões de forma que não atinja a tensão de escoamento.

Nas modificações propostas foi feito a mudança de espessura de tubos e chapas utilizadas na construção, buscando distribuir as tensões de forma mais uniforme e com picos e tensão menores que o valor da tensão de escoamento do material, e após vários looping de simulações e modificações, estes requisitos foram atendidos com êxito.

Como sugestão para trabalhos futuros é a otimização do projeto, partindo para uma segunda etapa de coleta de dados reais do chassi, com sensores instalados sobre os pontos de maior tensão, tendo assim valores mais confiáveis e novos parâmetros de entrada para se realizar simulações mais precisas.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REVISTA AUTO ESPORTE. **Bugues se Modernizam para Conquistar Consumidores Mais Exigentes.** São Paulo, 2013. Disponível em: <http://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2013/03/bugues-se-moderizam-para-conquistar-consumidores-mais-exigentes.html> Acesso em: 15 maio de 2016.

LIMA, Israel Antonio de. **Análise Estrutural e Modal de um chassi de Reboque.** Monografia, Brasília, 2012.

FURTADO, Daniel Canongia. **Análise estrutural de chassi de veículos automotivos.** Brasília, 2013.

BELTÃO, Vítor João Antunes. **Desenvolvimento de Conceito e Análise Estrutural de um Kart que Acompanha o Crescimento da Criança.** Lisboa, Portugal, 2009.

LOTTERMANN, João Pedro Taborda. **Projeto Estrutural de Chassi tipo Gaiola para Veículos Minibaja: Análise Numérica e Experimental.** Monografia, Brasília, 2014.

PERES, Gustavo. **Projeto Estrutural de Chassi tipo Gaiola para Veículos Minibaja: Análise Numérica e Experimental.** Dissertação, Porto Alegre, 2006.

CHAVES, Ana Paula Gonçalves; RAMOS, André Gustavo. **Estudo Comparativo da Rigidez de Uniões Parafusadas sob Carga Estática Utilizando Métodos Analíticos e Numéricos.** Monografia, Curitiba, 2011.

SANTOS, Alexandre Sanguino dos; SILVA, Marcos Paulo Perreira da. **Análise Estrutural de plataforma Elevatória Veicular.** Monografia, Curitiba, 2009.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS – **Regulamento Baja SAE RBSB 7 2013,** São Paulo, 2013.

FEDERATION INTERNATIONALE DE L'AUTOMOBILE - **FIA 2015 FIA Formula 4 Technical Regulations**, Paris, França, 2015.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas – Uma abordagem integrada**. *Bookman Editora*. 4ª Edição, 2013.