



**Gustavo Albring Guth**

**ANÁLISE DINÂMICA NÃO LINEAR DE UM CHASSI DE  
BAJA SAE UTILIZANDO A METODOLOGIA DE  
ELEMENTOS FINITOS**

**Horizontina**

**2015**

**Gustavo Albring Guth**

**ANÁLISE DINÂMICA NÃO LINEAR DE UM CHASSI DE BAJA SAE  
UTILIZANDO A METODOLOGIA DE ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Anderson Dal Molin, MsC.

COORIENTADOR: Mehrdad Asadi, Dr.

**Horizontina**

**2015**

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:**

**“Análise dinâmica não linear de um chassi de baja SAE utilizando a metodologia de elementos finitos”**

**Elaborada por:**

**Gustavo Albring Guth**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 05/11/2015  
Pela Comissão Examinadora**

---

**MsC. Anderson Dal Molin  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

---

**Dr. Richard Thomas Lermen  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

---

**Dr. Adriano Roberto da Silva Carotenuto  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina  
2015**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todos que acreditaram no meu esforço ao longo do caminho percorrido.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Em especial aos meus pais Claci e Paulo, ao meu Irmão Felipe e a minha namorada Vanessa que sempre me apoiaram.

Aos professores que compartilharam comigo um pouco de seus conhecimentos durante esta jornada, em especial ao meu orientador Anderson Dal Molin que sempre esteve disponível nos momentos necessários.

Aos meus companheiros de pesquisa, Aloysio Romeira e professor Mehrdad Asadi.

“Construímos muros de mais e pontes  
de menos.”

(Isaac Newton)

## RESUMO

O projeto BAJA SAE é destinado para estudantes de engenharia e tem como objetivo principal a busca constante de melhorias para o projeto e, conseqüentemente, o desenvolvimento tecnológico. O principal elemento estrutural dos veículos Off road BAJA é o chassi, objeto de estudo desta pesquisa, que objetiva a criação (e resolução) de um modelo de elementos finitos (FEM) para ser analisado dinamicamente e de forma não linear através do software LS-DYNA, a fim de compreender melhor o comportamento do *frame* e de apontar os pontos fracos do design numa possível colisão. A revisão de bibliografia acerca do regulamento do BAJA SAE, do funcionamento do software e de metodologias de ensaio pelo parâmetro CAI (*crashworthiness*) utilizadas na indústria automobilística serve como base para a criação da análise. Os principais parâmetros empregados na simulação foram a definição do tempo da colisão, do *timestep* (intervalo de tempo que o software leva para realizar o novo cálculo), a inserção das massas nos respectivos centros de gravidade, a criação da parede rígida e propriedades dos materiais. Após a resolução do FEM foi possível perceber que a velocidade empregada na simulação (54 km/h) foi elevada para esse tipo de veículo, resultando em uma energia cinética de 23 kJ além de grandes deformações da estrutura, o que expôs a grande fragilidade do chassi, que teve sua gaiola de proteção ao motorista completamente deformada.

**Palavras-chaves:** BAJA SAE, Modelo de Elementos Finitos (FEM), Análise, Não-linear.

## **ABSTRACT**

The BAJA SAE project is developed by engineering students and its main goal is the car constant improvements and, consequently, the technological development. The BAJA SAE vehicle main structural element is the chassis, which will be studied in this research. This paper principal objective is to create and solve a dynamic non-linear finite element model (FEM), using the software LS-DYNA in order to understand the frame behavior in a possible collision. The literature review based on the BAJA SAE rules, how the software works and the crash test methodologies used in industry (based on the crashworthiness – CAI) will be the analysis basis. The main parameters used in the simulation were the definition of the collision time, the software time step, the insertion of the masses in their gravity center, the creation of the rigid wall and the material properties. After solve the FEM and analyze the results it was possible to realize that the speed used on the simulation was too high to the vehicle category, resulting in a kinetic energy of 23 kJ and high levels of deformation which shown the chassis fragility, which had its protective cage completely deformed.

**Keywords:** BAJA SAE, Finite element method (FEM), Analysis, Non-linear.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento não linear de um grampo (Força x Deslocamento) .....	16
Figura 2 - Corpos em contato no instante t .....	17
Figura 3 - Colisão frontal.....	18
Figura 4 - Colisão frontal parcial .....	19
Figura 5 - Teste de colisão lateral .....	19
Figura 6 - Fluxograma do método de desenvolvimento.....	21
Figura 7 - Centro de massa dos principais componentes.....	23
Figura 8 – Criação de nós rígidos da suspensão dianteira e cinto de segurança.....	24
Figura 9 - Nós rígidos da parte traseira do veículo.....	24
Figura 10 – Geometria utilizada na simulação do chassi .....	26
Figura 11 - Malha criada para o FEM.....	27
Figura 12 - Resultado da aplicação de malha local .....	28
Figura 13 - FEM desenvolvido .....	30
Figura 14 - Velocidade (mm/s) x tempo (s) .....	30
Figura 15 - Gráfico das energias do sistema.....	31
Figura 16 - Tensão equivalente de Von-misses na colisão .....	31
Figura 17 - Deformação do chassi 0,005 segundos após a colisão.....	32
Figura 18 - Deformação do chassi 0,01 segundos após a colisão .....	32
Figura 19 - Deformação do chassi 0,05 segundos após a colisão .....	33
Figura 20 - Deformação final do chassi após colisão (0,1s) .....	33

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1. JUSTIFICATIVA .....	11
1.2. OBJETIVOS .....	12
1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>13</b>
2.1. CHASSI DO CARRO OF ROAD BAJA SAE BRASIL .....	13
2.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	13
2.3. LS-DYNA .....	14
2.4. ANÁLISE NÃO-LINEAR.....	15
2.4.1. INTEGRAÇÃO NO TEMPO.....	17
2.5. RESISTÊNCIA AO IMPACTO ( <i>CRASHWORTHINESS – CAI</i> ) .....	18
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>21</b>
3.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS .....	21
3.1.1. ADEQUAÇÃO DO MODELO 3D DE CAD E CRIAÇÃO DE ELEMENTOS DE CASCA .....	22
3.1.2. DESENVOLVIMENTO DA MALHA .....	22
3.1.3. INSERÇÃO DOS PARÂMETROS E CONDIÇÕES DE CONTORNO DA SIMULAÇÃO.....	22
3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	25
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>26</b>
4.1. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DESENVOLVIDO.....	26
4.2. MALHA .....	26
4.3. PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO .....	28
4.4. VELOCIDADE, ENERGIA E DEFORMAÇÃO .....	30
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>34</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>35</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>36</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O principal objetivo do projeto BAJA SAE, que é destinado aos alunos de engenharia, é projetar, construir, testar e competir um veículo Off Road capaz de enfrentar obstáculos em condições adversas de terreno e clima. Um desafio recorrente é implementar diferentes conceitos e materiais ao projeto de engenharia automobilística.

A notória evolução tecnológica das Competições Baja SAE Brasil exige das equipes participantes o aperfeiçoamento contínuo de seus veículos e o desenvolvimento de novas tecnologias, com o intuito de se manterem competitivas. Tendo em vista que todos as equipes utilizam um motor padrão de 4 tempos e potência de 10 hp, o peso final do protótipo é de fundamental importância, sendo que, teoricamente, quanto mais leve o veículo, melhor será sua performance. A redução de peso que pode ser alcançada através da seleção de materiais que agregam resistência e leveza é, portanto, uma busca constante. A integridade estrutural do protótipo e a integridade física do piloto são outros fatores que demandam estudo e atenção.

Com o propósito de analisar o comportamento do veículo no momento de uma colisão, um método avaliativo utilizado na indústria é o parâmetro chamado “*crashworthiness*” (CAI), que é conceituado como a capacidade ou habilidade da estrutura ou parte do veículo de absorver a energia cinética resultante de um impacto e manter a integridade no espaço do(s) ocupante(s). Essa característica visa minimizar os efeitos que venham a ocorrer a partir de uma colisão.

O objeto de estudo deste trabalho vem a ser o chassi do veículo, seu principal componente estrutural, desta forma, levou-se em consideração vários parâmetros característicos das competições BAJA SAE para o desenvolvimento do trabalho. O design do chassi é fortemente influenciado por regras de segurança desenvolvidas pelos organizadores da competição, por conseguinte, o chassi abordado nesse estudo é em conformidade com o regulamento BAJA SAE Brasil 2013.

Essa pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios da Anglia Ruskin University de Chelmsford (Reino Unido), sendo assim, todos as licenças dos softwares utilizados são de propriedade e podem ser encontrados na universidade citada.

## 1.1. JUSTIFICATIVA

Ao iniciar um projeto estrutural, assim como em qualquer outro projeto, deve-se partir da determinação da tarefa que o produto deve cumprir. Neste estudo, o chassi foi desenvolvido afim de atender os requisitos impostos no regulamento da competição de BAJA SAE, nesse contexto, o desenvolvimento de um trabalho focado na análise dinâmica não linear do chassi se demonstra de significativa relevância, tendo em vista que este é o principal componente estrutural do veículo e, portanto, responsável por uma parte significativa da massa agregada ao projeto, além de ser o principal meio de absorção da energia em casos de impacto, conseqüentemente, também é de fundamental importância para a segurança física do piloto.

Testes de colisão, a partir do parâmetro CAI que avalia e classifica a segurança dos veículos com notas entre uma e cinco estrelas, são regulamentados e obrigatórios para a venda de veículos em vários países, a exemplo de Japão, Austrália e União Europeia. Essas exigências trouxeram vários benefícios aos consumidores desses países, principalmente pela necessidade das fabricantes de atingir as metas de segurança impostas. Tendo que melhorar sua performance, incrementou-se o investimento em tecnologia e qualidade e, conseqüentemente, aumentou a segurança oferecida.

Nos dias atuais, testes de CAI não são obrigatórios no Brasil, contudo, o Projeto de Lei (PL-6995/2013) está em trâmite em caráter conclusivo na Câmara dos Deputados e “estabelece que os veículos só podem transitar quando atendidos requisitos de segurança estabelecidos no código e em normas do Contram” e que “a adoção do teste de colisão na indústria nacional permitirá a visualização da qualidade do veículo quanto à segurança dos ocupantes” (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2015).

Tendo em vista que simulações utilizando a metodologia de elementos finitos a fim de antecipar e compreender o comportamento de componentes e estruturas é uma forma menos onerosa, com resultados confiáveis e amplamente utilizada na indústria automobilística, esta ferramenta foi utilizada para estudos estruturais do projeto em questão.

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa foi a criação e resolução de um modelo de elementos finitos (FEM) concebido a partir de um chassi de BAJA SAE.

### 1.2.1. Objetivos específicos

Este estudo tem como objetivos específicos:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica acerca dos princípios básicos do funcionamento do software LS-DYNA;
- Verificar as metodologias de ensaio utilizadas na indústria;
- Criar malha de forma adequada a fim de obter precisão nos resultados;
- Realizar a simulação do FEM no software LS-DYNA;
- Definir as energias envolvidas no sistema;
- Analisar resultados com o propósito identificar pontos onde o chassi sofre maior deformação.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

No referencial teórico são abordados assuntos relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, a exemplo do chassi, elementos finitos, funcionamento do software e das realizações de testes de colisão (*crash tests*).

### 2.1. CHASSI DO CARRO OFF ROAD BAJA SAE BRASIL

O propósito da gaiola de proteção (chassi), segundo o RBSB (2013), é de prover um espaço tridimensional mínimo em torno do condutor sendo projetada e construída a fim de evitar qualquer falha da sua integridade estrutural. O regulamento também restringe as angulações entre os componentes do chassi com intuito de fornecer a segurança mínima necessária durante a competição. Podem-se destacar também as seguintes imposições:

- “O veículo deve ter quatro ou mais rodas e ser capaz de transportar pessoas com até 1,90m de altura, pesando 113,4 kg”;
- A largura do veículo também é limitada em “1,62m, medida entre os pontos de maior largura, com os pneus apontando para frente.”;
- O comprimento do veículo é irrestrito, “contudo os circuitos construídos para os Baja SAE baseiam-se em protótipos de 2,75 m de comprimento.”;
- O chassi deve ser construído ou de aço tubular, de pelo menos 0,18% de carbono sem costura, diâmetro externo de 25,4 mm e parede de 2,1mm, ou material com equivalência em resistência e módulo de flexão.

### 2.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Datam de 1906 os primeiros princípios matemáticos que posteriormente seriam consolidados no Método dos Elementos Finitos. Segundo COOK et al (2002), naquela época foi proposto um mecanismo de modelagem do contínuo por um modelo de barras elásticas afim de demonstrar que os deslocamentos nos nós representa uma aproximação para os deslocamentos do contínuo.

Segundo HUEBNER (1982) na engenharia esse método de análise foi utilizado pela primeira vez em 1960 por Clough (veio a ser considerado o fundador do Método dos Elementos Finitos) em estudos relacionados à problemas de elasticidade plana, originalmente implantando tal método para estudar o

comportamento de tensões em aeronaves. A partir desse trabalho, a utilização de tal método deu-se cada vez com mais frequência para análises de tensões lineares, deflexões e vibrações. Contudo, a utilização do método para conjuntos mais complexos era limitada pela falta de capacidade de processamento (custo computacional incompatível com a tecnologia existente).

O método de elementos finitos em simulações de colisão teve grande avanço nos últimos anos, potencializado principalmente pela evolução tecnológica computacional que aconteceu de forma paralela através do desenvolvimento de novo programas e de hardware compatível para a execução de tais análises. Atualmente, de acordo com LS-DYNA (2015), a partir da utilização desse método é possível simular de forma confiável problemas reais e complexos de diversas aplicações, sendo usado, por exemplo, na indústria automobilística, aeroespacial e de construção.

### 2.3. LS-DYNA

O LS-DYNA é um software de propósito geral para simulação multifísica para o cálculo de diversos problemas do mundo real, tendo como base de cálculo a análise de elementos finitos (FEA) de dinâmicas transitórias não lineares, utilizando-se da integração temporal explícita (LS-DYNA, 2015). O software apresenta várias opções de material, contato e demais parâmetros que influenciam na simulação.

O chassi é construído em aço SAE 1020, as propriedades mecânicas deste material estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1020

<b>Propriedades Mecânicas e Dimensões do material</b>	<b>Valor (unidade)</b>
Densidade	7860 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	210 GPa
Limite de resistência à tração	420 Mpa
Limite de resistência à tração ( <i>Yield</i> )	315 Mpa
Modulo de elasticidade	186 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29
Diâmetro externo do tubo	25,4 mm
Espessura	1,6 mm

**Fonte:** Adaptado de MatWeb (2015).

No software LS-DYNA, também se faz necessária a seleção de um dos materiais da lista de “materiais matemáticos”, que são responsáveis por simular o

comportamento dos componentes que fazem parte do FEM. O material matemático *\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC*, segundo LS-DYNA (2011), é um material adequado para modelos isotrópicos que evitam a plasticidade generalizada. Podendo ser utilizados em elementos de vigas, elementos de casca e elementos sólidos

Segundo o LS-DYNA (2011), em modelos complexos com vários componentes se faz necessária a definição de como será realizado o contato entre os componentes que integram o modelo. Em tal software, a opção *CONTACT\_TIED\_SURFACE\_TO\_SURFACE*, formula de maneira automática os contatos entre componentes.

A parede rígida planar (*\*RIGIDWALL\_PLANAR*) é uma opção que fornece uma maneira simples de contato entre uma superfície rígida e um corpo deformável. Esse parâmetro é usado para definir uma superfície planar rígida, com tamanho finito. A parede também pode possuir massa ou uma velocidade inicial de movimento, caso essas informações não sejam inseridas o software assume que a mesma é estática.

#### 2.4. ANÁLISE NÃO-LINEAR

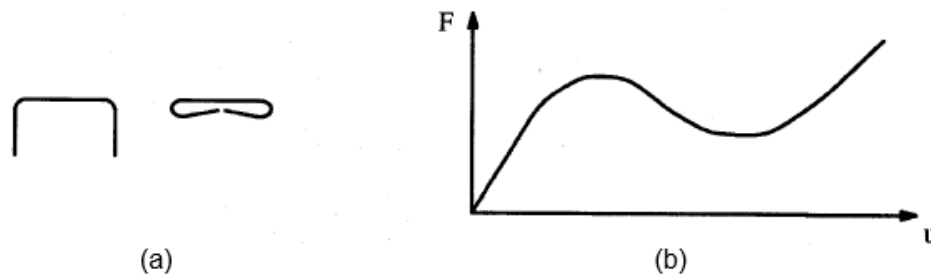
A análise não-linear, de acordo com LS-DYNA (2011), ocorre quando pelo menos uma das seguintes complicações acontecem durante a análise:

- Mudança das condições de contorno (a exemplo do contato entre partes que muda ao longo do tempo);
- Grandes deformações (a exemplo do amassamento de peças de chapas metálicas);
- Materiais não-lineares que apresentam comportamento elástico não ideais (a exemplo de polímeros termoplásticos).

Segundo ANSYS (2013), pode-se observar o comportamento de não linearidade, por exemplo, ao grampear papéis, onde o material do grampo sempre se comporta de diferentes formas, conforme Figura 1, onde a Figura 1(a) mostra o desenho esquemático de um grampo, e a Figura 1(b) mostra o gráfico da Força (F) em função do deslocamento (u).



Figura 1 - Comportamento não linear de um grampo (Força x Deslocamento)



Fonte: ANSYS (2013).

De acordo com BATHE (1996), para a solução de problemas dinâmicos utiliza-se a Equação (1) do movimento:

$$[M]\{\partial^2 u\} + [C]\{\partial u\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \quad (1)$$

Onde:  $[M]$  = matriz de massa;

$[C]$  = matriz de amortecimento;

$[K]$  = matriz de rigidez;

$(\partial^2 u)$  = vetor aceleração;

$(\partial u)$  = vetor de velocidade;

$(u)$  = vetor deslocamento;

$(F^a)$  = vetor de forças aplicadas

No caso de uma análise estática, os vetores de aceleração e velocidade são iguais a zero (nulos) sendo assim, a equação (1) se torna (2):

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (2)$$

As equações tornam-se não lineares quando a matriz de rigidez  $[K]$  é dependente do deslocamento  $\{x\}$  ou de suas derivadas. Sendo assim, as equações (1) e (2) ficam respectivamente (3) e (4) da seguinte forma:

$$[M]\{\partial^2 x(t)\} + [C]\{\partial x(t)\} + [K(x(t))]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

$$[K(x(t))]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (4)$$

Matematicamente a equação (1) representa um sistema de equações lineares de segunda ordem, sendo assim, a solução pode ser obtida através de padrões de solução de equações diferenciais. Entretanto, em modelos com grande

número de elementos a ordem das matrizes será muito grande, tornando bastante onerosa sua solução, sendo assim, o software ANSYS utiliza-se de procedimentos alternativos para a solução dessas equações (BATHE, 1996) e (ANSYS, 2013).

#### 2.4.1. Integração no tempo

A integração do tempo é feita por passos de tempo que, pela velocidade, transformam-se em incrementos de deslocamentos, conforme Equação (5).

$$\partial u(t) = \frac{\Delta x(t)}{\Delta t} \quad (5)$$

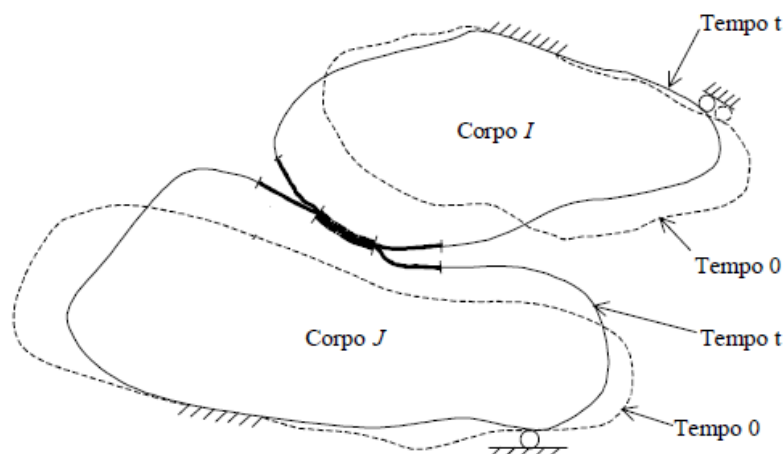
Segundo BATHE (1996), a cada passo da integração no tempo, encontra-se o incremento de deslocamento que é usado para calcular o contato, o qual permite achar as deformações e tensões, sendo assim, é possível encontrar:

$$\Delta t, \quad x(t), \quad x(t) = \frac{\partial \Delta x(t)}{\Delta t} \quad e \quad x(t) = \frac{\partial^2 \Delta x(t)}{\Delta t}$$

Sendo assim, com o valor de  $\Delta x(t)$  calcula-se a nova situação de contato e a nova matriz de rigidez  $[K(x(t))]$ .

No que diz respeito ao contato, assim como nos processos de conformação de metais, colisões e testes de impacto são eventos altamente não lineares e difíceis de analisar. Vários corpos estão em contato a cada instante ( $t$ ) ocasionando interferência entre si. A Figura 2 exemplifica o funcionamento do contato em incrementos de deslocamento.

Figura 2 - Corpos em contato no instante  $t$



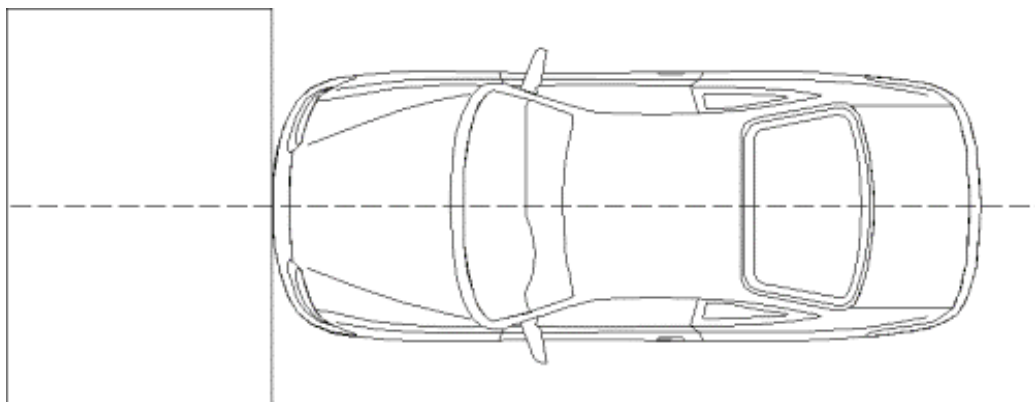
## 2.5. RESISTÊNCIA AO IMPACTO (*CRASHWORTHINESS* – CAI)

O parâmetro CAI de veículos, de acordo com BOIS at all (2004), apresenta como principais conceitos: o controle sobre níveis de tolerância das forças que são aplicadas ao ocupante; providenciar formas de absorver energia de colisão mantendo ao mesmo tempo a segurança do espaço de sobrevivência dos ocupantes; manter os ocupantes dentro do espaço de sobrevivência durante a colisão evitando a ejeção dos mesmos; e proteger os ocupantes de riscos após a colisão.

Com o intuito de controlar os testes de impacto, existem normas que regulamentam os testes de colisão de veículos ao redor do mundo. No Brasil não há legislação acerca de CAI, sendo assim, este estudo baseou-se nas normas da agência federal de normas de segurança de veículos (FMVSS's), e são regulamentadas pela administração nacional de segurança de rodovias (NHTSA), uma agência ligada ao departamento de transportes dos Estados Unidos e que são semelhantes às metodologias utilizadas na União Europeia.

➤ Colisão frontal contra uma barreira rígida (Figura 3): Consiste em submeter toda a parte frontal do veículo a uma colisão contra uma parede rígida, conforme norma FMVSS 208 (1999). Isto proporciona ao modelo uma desaceleração que permite avaliar efeitos sobre ocupantes e desempenho de cintos e air bags.

Figura 3 - Colisão frontal

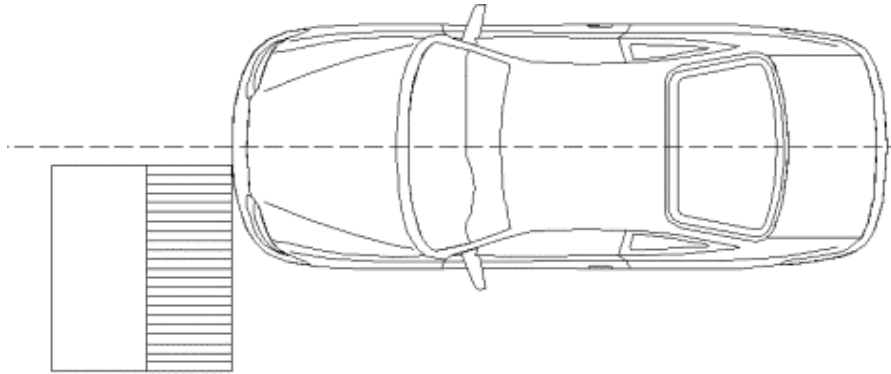


**Fonte:** FMVSS 208 (1999).

➤ Colisão frontal parcial: Consiste em submeter o lado do motorista do veículo a uma colisão frontal, conforme Figura 4, contra uma barreira de alumínio (feita de células do tipo colmeia) que pode ser deformada durante a colisão, conforme norma FMVSS 208 (1999). Neste tipo de teste, a maior parte do impacto

será absorvido pela estrutura do veículo e o impacto no ocupante será pouco, porém haverá grande deformação da estrutura do veículo, tornando o teste conveniente para avaliar-se lesões causadas por invasão ao espaço de sobrevivência dos ocupantes.

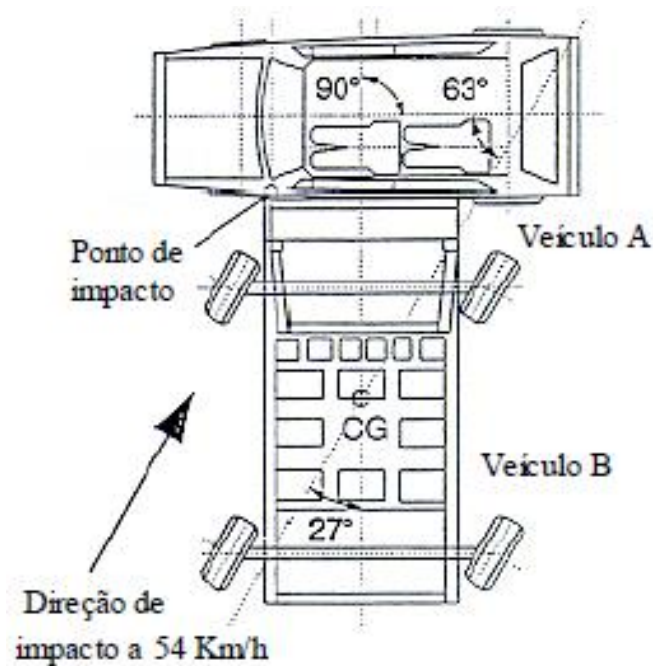
Figura 4 - Colisão frontal parcial



Fonte: FMVSS 208 (1999).

➤ Teste de impacto lateral - FMVSS 214: Neste teste, o veículo estacionado é colidido por um carrinho que possui um painel de alumínio (feito de células do tipo colmeia) que pode ser deformado durante a colisão. A colisão é realizada contra o lado do motorista (Figura 5) conforme norma FMVSS 214;

Figura 5 - Teste de colisão lateral



Fonte: FMVSS 208 (1999).

Existem ainda diversas legislações acerca de testes CAI ao redor do mundo, algumas delas estão exibidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Regulamentação de ensaios de CAE de vários países

<b>País</b>	<b>Norma</b>	<b>Método de teste</b>
<b>Estados Unidos</b>	Colisão frontal (FMVSS 208) (frontal impact)	Contra barreira rígida, colisão frontal total, velocidade de 48 km/h
	Colisão lateral (FMVSS 214) (side impact)	Barreira móvel, velocidade de 54 km/h
<b>União Européia</b>	Colisão frontal (EC Directive 96/79/EC)	Contra barreira deformável, colisão frontal parcial, velocidade de 56 km/h
	Colisão lateral (EC Directive 96/27/EC)	Barreira móvel, velocidade de 50 km/h
<b>Austrália</b>	Colisão frontal (ADR 69)	Contra barreira rígida, colisão frontal total, velocidade de 48 km/h
	Colisão frontal parcial (offset frontal crash)	Contra uma barreira deformável, velocidade de 64 km/h
	Colisão lateral	Barreira móvel (trolley) de 950 kg, velocidade de 50km/h.
<b>Japão</b>	Colisão frontal (Article 18, Safety Regulations for Road Vehicles)	Contra barreira rígida, colisão frontal total, velocidade de 50 km/h
	Colisão lateral (Article 18, Safety Regulations for Road Vehicles)	Barreira móvel, velocidade de 50 km/h

Fonte: NASVA (2015).

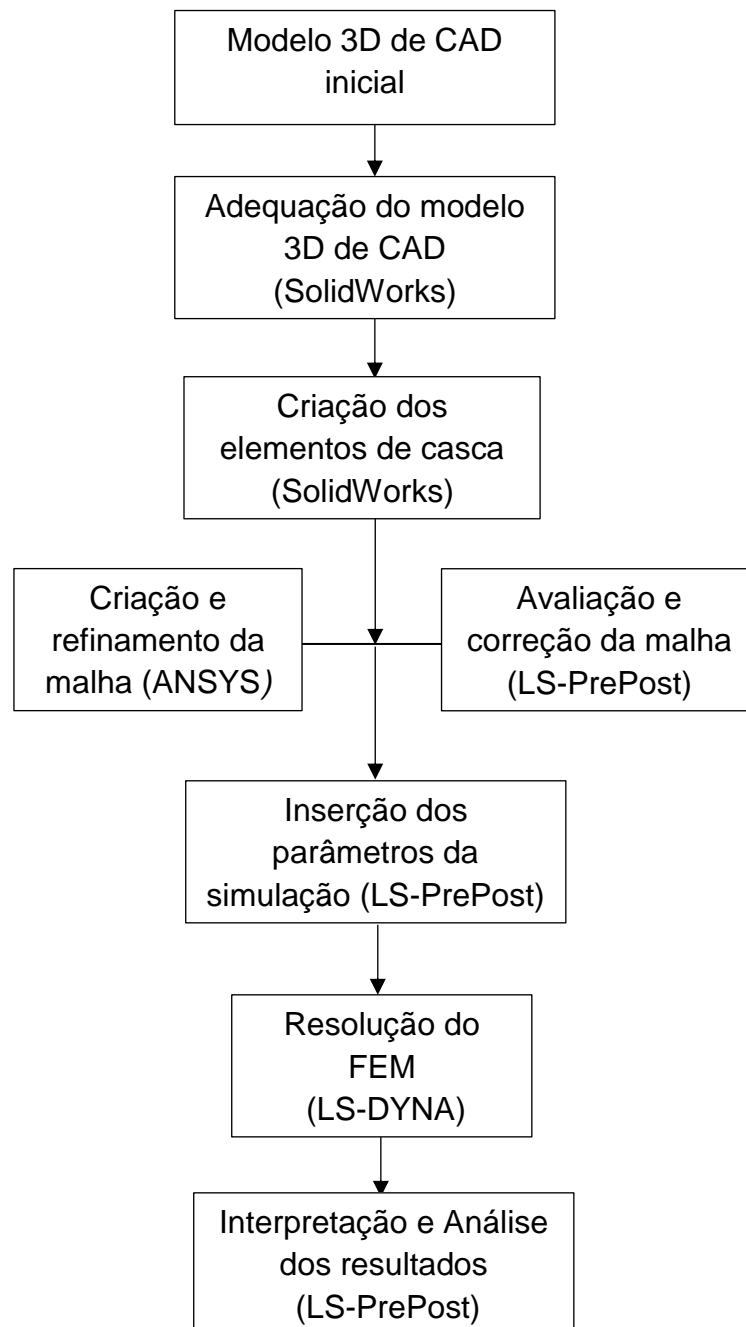
O programa de avaliação de carros novos para a América Latina e o Caribe iniciou em 2010 e em 2014 foi criada como uma associação e, de acordo com LATINNCAP (2015), “os testes de impacto frontal baseiam-se nos desenvolvidos pelo Comitê Europeu para a Melhora da Segurança nos Automóveis, embora a velocidade de impacto tenha sido incrementada em 8 km/h, sendo assim, o impacto frontal se produz a 64 km/h.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

A metodologia utilizada para a análise do chassi do BAJA SAE pode ser visualizada de forma genérica na Figura 6, que mostra os principais passos envolvidos no processo de desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 6 - Fluxograma do método de desenvolvimento utilizado



### **3.1.1. Adequação do modelo 3D de CAD e criação de elementos de casca**

Primeiramente o modelo 3D de CAD do chassi a ser simulado foi adequado/simplificado a análise utilizando-se do software SolidWorks 2015 da empresa SOLIDWORKS Corp. Componentes que não exercem funções estruturais devem ser removidos com a finalidade de diminuir o tempo de processamento computacional. Também devem ser criados filetes nas áreas de dobras e junções dos tubos, a fim de se fazer possível a criação dos elementos de casca.

Uma vez que as alterações realizadas no modelo 3D de CAD estejam concluídas, atingindo-se assim o design final que será utilizado na simulação, os elementos de casca devem ser criados utilizando-se da ferramenta “*Offset Surface*” do SolidWorks.

### **3.1.2. Desenvolvimento da malha**

Em seguida, utilizando-se do software ANSYS 14.0, a malha deve ser criada com tamanho máximo de elemento igual ou menor a 3mm. Os elementos da malha precisam ser em sua maioria simétricos e prevalentemente quadriláteros. Deve-se obter pelo menos três (3) elementos nos locais onde existirem raios a fim de não ocorrer erros na simulação e/ou inconsistência nos resultados. Sendo assim, se faz necessária a criação da malha local nessas áreas, com tamanho máximo de elementos igual ou inferior a 1 mm para a obtenção desses parâmetros. Com a finalidade de garantir que não existam erros na construção da malha, foi gerado um relatório na ferramenta *Mesh check* do LS-PrePost.

### **3.1.3. Inserção dos parâmetros e condições de contorno da simulação**

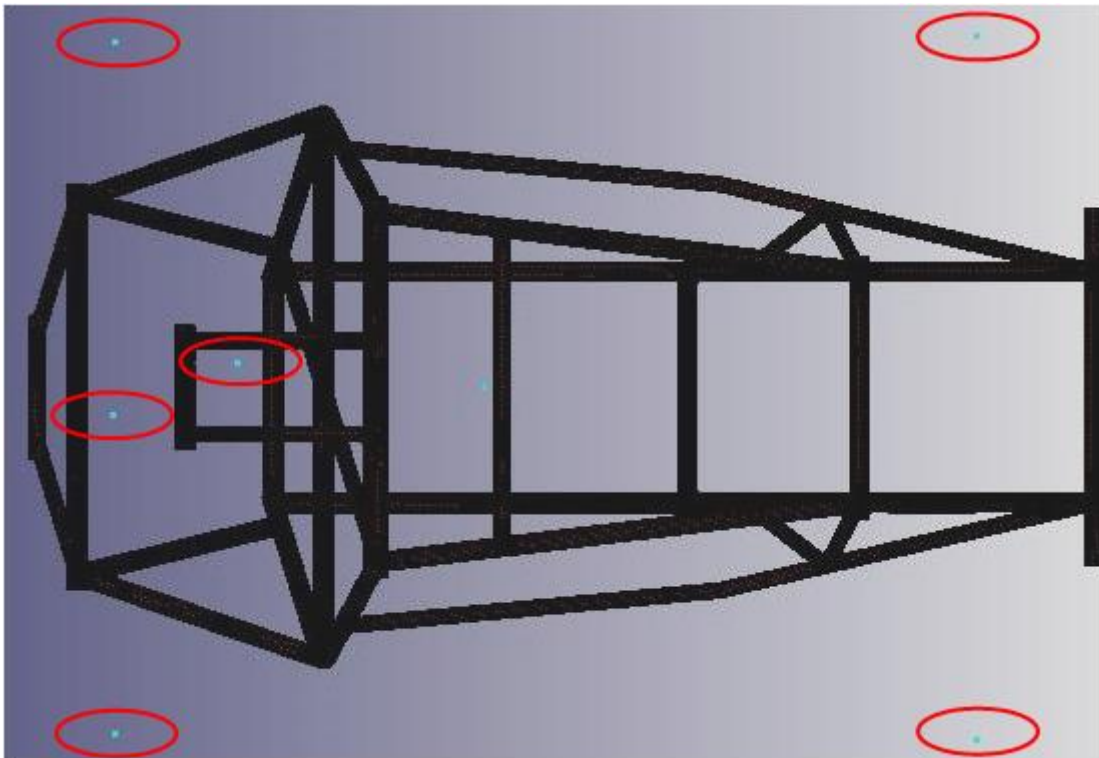
No próximo passo utilizando-se do software LS-PrePost 4.2, realiza-se a seleção e a configuração dos parâmetros da simulação. Dentre os parâmetros estão incluídos as propriedades mecânicas dos materiais, propriedade de seção, velocidade de deslocamento dos componentes, restrições de deslocamento (onde deve-se configurar uma superfície como “mestre” e então restringi-la), o centro de massa dos componentes e as condições de carregamento.

Com o intuito de diminuir o custo computacional da simulação tornando-a assim possível de realizar, todos os componentes que não exerçam função

estrutural no do veículo são excluídos, a exemplo da suspensão, motor, caixa de engrenagens, banco, etc. Contudo, a massa desses componentes influenciará de forma significativa nos resultados da análise, bem como a massa do motorista que estará presente no momento de uma possível colisão e precisam ser consideradas.

Uma vez as massas mediadas e coletadas, se faz necessário a definição dos centros de gravidade. Para a obtenção desses pontos, as propriedades dos materiais dos principais componentes devem ser inseridas no modelo CAD no software SolidWorks, onde se faz possível a verificação do centro de massa através do sistema de coordenadas. O centro de gravidade do motorista é obtido adicionando um modelo CAD de um humano (*dummy*) de tamanho regular (1,70m de altura e 75 kg). A Figura 7 exibe os pontos dos centros de massa criados neste processo.

Figura 7 - Centro de massa dos principais componentes



Para conectar esses pontos de centro de massa no FEM, se faz necessária a verificação das áreas do chassi onde esses componentes exercem força (contato), para então selecionar os elementos da malha em tais locais e uni-los, fazendo a criação de nós rígidos (*rigid nodes*) que atuam como braços que conectam os pontos de centro de massa aos elementos da malha criada na área determinada, todos os



pontos conectados irão se deslocar juntamente, como se fosse apenas um corpo, conforme representações das Figuras 8 e 9.

Figura 8 – Criação de nós rígidos da suspensão dianteira e cinto de segurança

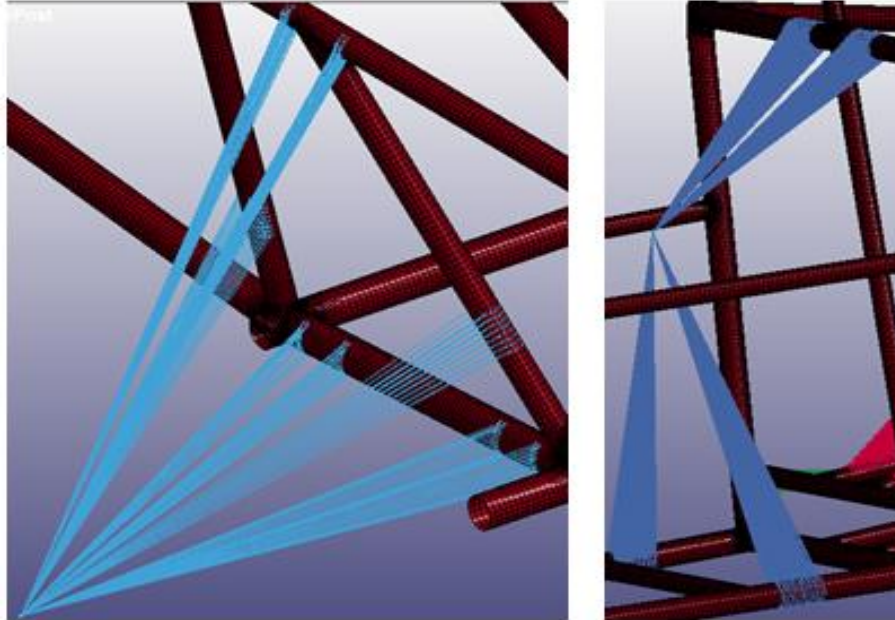
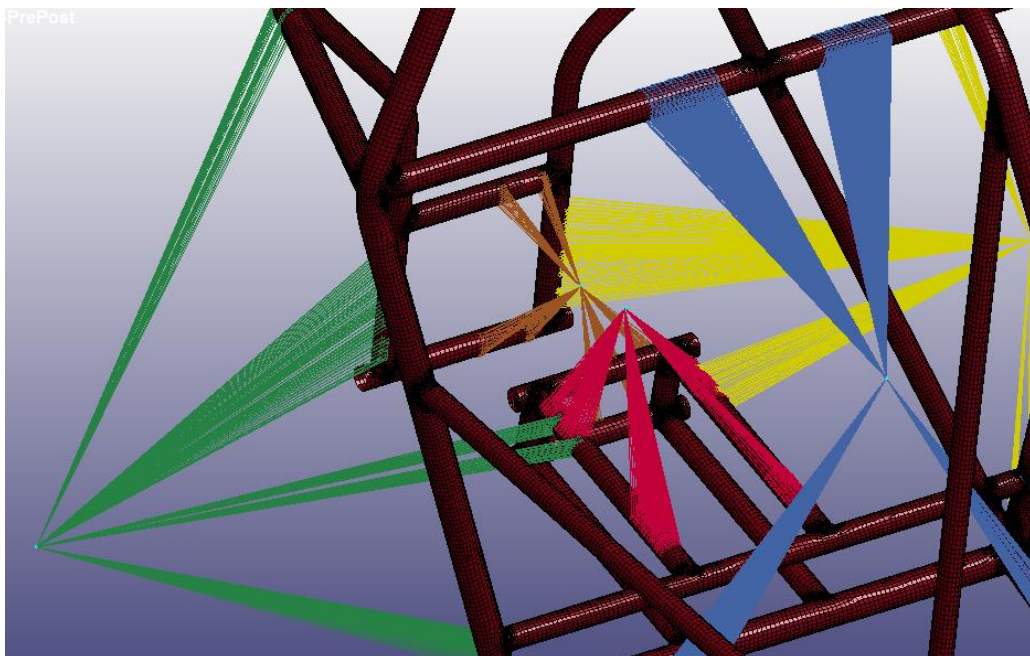


Figura 9 - Nós rígidos da parte traseira do veículo



Em seguida, utilizando-se do software LS-DYNA a simulação do FEM foi efetuada e, para finalizar, utilizando-se do software LS-PrePost, os resultados foram interpretados e analisados.

### 3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Nesse tópico serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa. Em virtude de o trabalho ser baseado em uma simulação computacional, os softwares utilizados foram:

- SolidWorks: software de CAD (*computer aided design*) que baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares (SOLIDWORKS BRASIL, 2015).
- LS-PrePost: software avançado de pré e pós processamento e de edição de modelo da empresa Livermore Software Technology Corp. (LSTC), por esse software é possível inserir dados e processar os resultados das análises do software LS-DYNA de várias formas, sendo elas em forma de gráficos, tabelas ou animações. A licença para esse software é gratuita. (LS-DYNA, 2015).
- LS-DYNA: descrito no tópico 2.3 desta pesquisa.
- ANSYS, Inc: desenvolvedor de programas de simulação para engenharia (engenharia assistida por computador, ou CAE). Amplamente utilizado na indústria automobilística e aeroespacial para simulações de FEM e para criação de malhas em modelos complexos. (Ansys Inc, 2015).

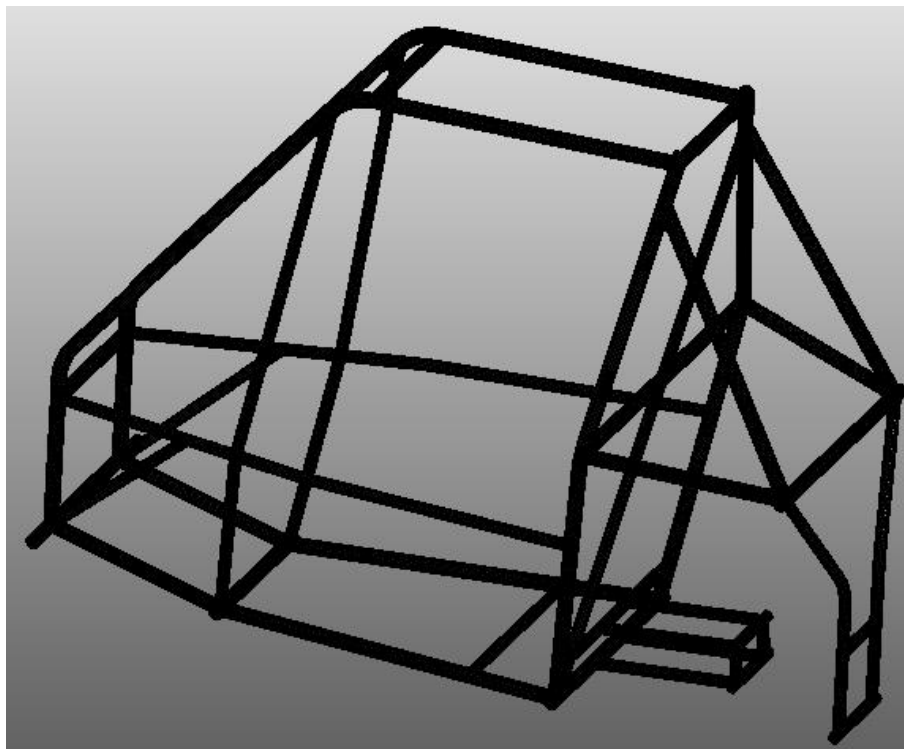
## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tendo como ponto de partida o fato de que todos os parâmetros foram inseridos e que todas as diretrizes da metodologia foram cumpridas, esse capítulo interpretará os resultados gerados nesta pesquisa.

### 4.1. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DESENVOLVIDO

As alterações realizadas no CAD e transferidas para o FEM, como a criação de filetes nos locais de solda, remoção de elementos que não exercem funções estruturais para a criação dos elementos de casca estão representadas na Figura 10, onde é possível verificar a geometria que será utilizada na simulação.

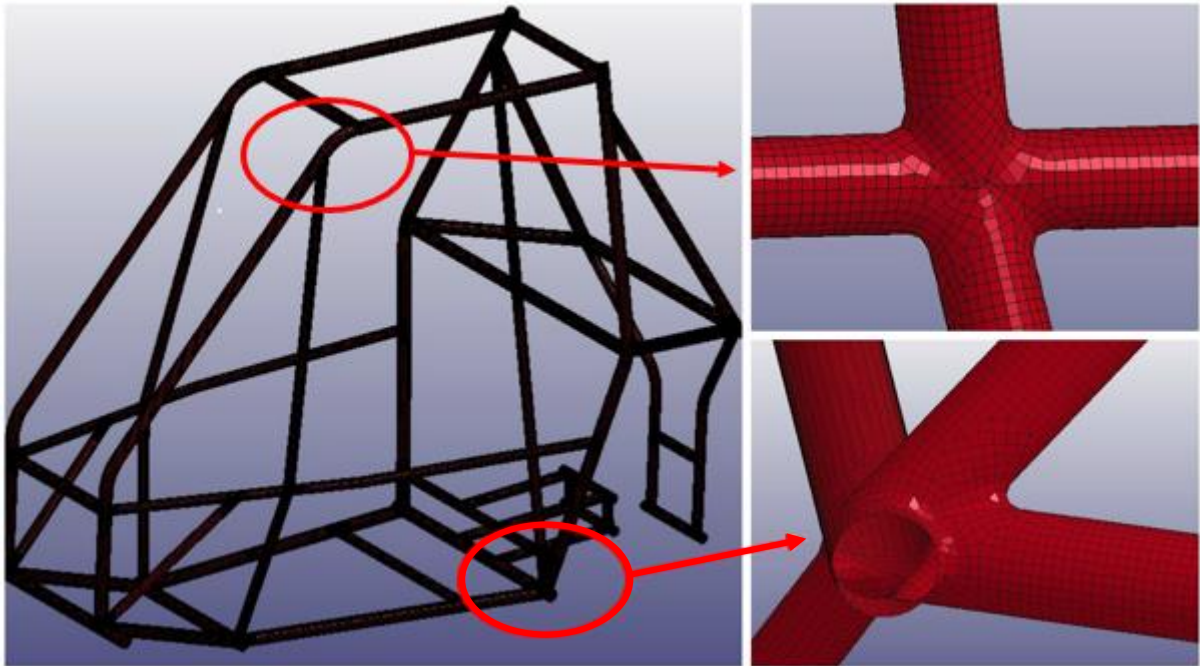
Figura 10 – Geometria utilizada na simulação do chassi



### 4.2. MALHA

Na Figura 11 pode ser observada a aparência da malha gerada, com tamanho de elemento igual ou menor a 3 mm para todos os componentes do chassi, possuindo, em um primeiro momento, o total de 114.415 elementos.

Figura 11 - Malha criada para o FEM



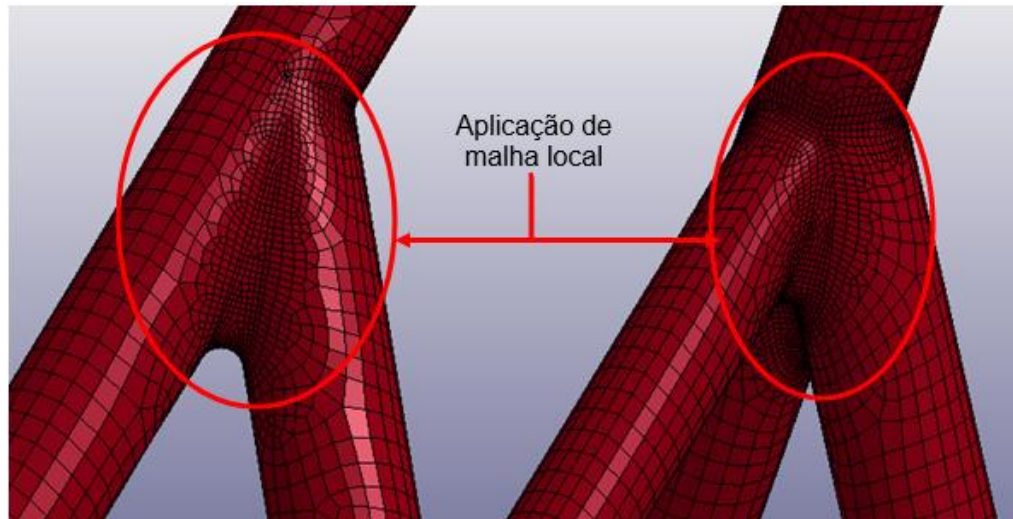
Pode-se perceber também a partir da Figura 11 que a malha criada apresenta distribuição uniforme e simetria, principalmente nos locais onde não existem dobras, sendo assim, o tamanho máximo de elemento igual a 3mm foi mantido nessas superfícies. Conforme descrito no tópico 3.1.2, uma característica desejada na malha deste estudo estrutural é a prevalência de elementos quadriláteros, o que foi atingido e também pode ser observado na Figura 11.

Por outro lado, nos locais de dobra, filetes e encontro de tubos, o número de elementos é menor do que o necessário, apresentando em alguns casos, menos de 2 elementos por raio, sendo assim, se fez necessária a criação da malha local. A criação e refinamento da malha local implicaram em um número total de 187.530, de acordo com características apresentadas na Tabela 3 e representadas na Figura 12.

Tabela 3 - Propriedades e características da malha

<b>Propriedade / Característica</b>	<b>Valor</b>
Elementos quadriláteros	185855 (99,1%)
Elementos triangulares	1675 (0,893%)
Tamanho mínimo de elemento malha geral	3 mm
Tamanho mínimo de elemento na malha local	1 mm
Suavização	Alta
Taxa de crescimento máxima de elementos	1,2

Figura 12 - Resultado da aplicação de malha local



Percebe-se a partir da Figura 12 que o número de elementos aumentou nos locais de filetes e dobras, sendo que a prevalência desses elementos apresenta perfil quadriláteros e simétricos, atingindo os resultados esperados. Posteriormente a malha foi avaliada no software LS-PrePost onde não se encontrou nenhuma falha de elementos.

#### 4.3. PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

A massa dos componentes que exercem influência nos resultados da simulação podem ser verificadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Massas dos componentes e do motorista do veículo

Descrição	Massa
Suspensão dianteira esquerda	12,579 kg
Suspensão dianteira direita	12,579 kg
Suspensão traseira esquerda	18,996 kg
Suspensão traseira direita	18,996 kg
Transmissão	11,968 kg
Motor	25,700 kg
Motorista	75,000 kg

Tendo em vista que o banco do motorista é conectado ao chassi apenas por um fixador consistido de ganchos e laços (*velcro*), que não oferece resistência (tem como função principal o posicionamento), os pontos onde foram conectados a massa do motorista se referem as áreas onde o cinto de segurança é fixado, pois no

momento de uma colisão, este dispositivo será responsável por assegurar que o motorista não seja lançado do veículo.

O tempo total utilizado na simulação da colisão é de 0,1s, sendo que os cálculos serão realizados a cada 0,001s (*time step*).

A velocidade máxima atingida pelo veículo de BAJA SAE abordado nesta pesquisa é de 54 km/h (15 m/s) portanto, tal velocidade foi aplicada em todos os nós da malha, afim de que todos se movam de forma ordenada na direção que a superfície mestre se deslocar. É importante ressaltar que a velocidade usada não reflete a maioria dos acidentes, pois antes da colisão, normalmente o piloto do veículo faz uso do sistema de frenagem, diminuindo assim a velocidade da colisão, contudo, a fim de simular um caso extremo, de se aproximar aos parâmetros utilizados na união europeia em veículos comerciais e de deixar mais claros os pontos frágeis do chassi, esta velocidade, mesmo considerada alta, foi utilizada.

O material utilizado para a construção do veículo é o aço tubular SAE 1020 com diâmetro externo de 25,4mm e seção de 1,6 mm, sendo assim, as propriedades deste material, que podem ser observadas na Tabela 1 (tópico 2.3.1) foram inseridas no FEM. Já no que diz respeito ao material que simulará o comportamento dos componentes, foi selecionado a opção de *\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC* (material adequado para modelos isotrópicos que evitam a plasticidade generalizada).

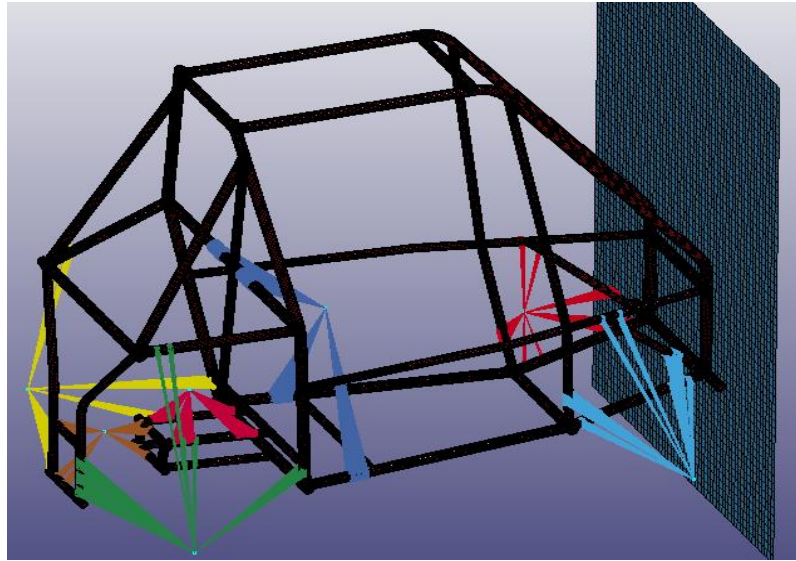
Nesta pesquisa, os contatos existentes são entre os tubos do chassi, entre chassi e suspensão, chassi e transmissão, chassi e motor e, finalmente pelo chassi e o motorista (através do cinto de segurança), sendo que em todos esses casos os componentes ou são soldados ou montados de forma que não permitam o movimento dos componentes em relação ao chassi. Afim de simular tais efeitos de maneira equivalente, a forma de contato entre superfícies *\*CONTACT\_TIED\_SURFACE\_TO\_SURFACE* que é responsável por formular de maneira automática os contatos entre componentes, foi selecionada.

Afim de seguir a regulamentação de CAI utilizada em vários países, que utilizam-se de paredes rígidas para o ensaio, uma parede rígida planar (*\*RIGIDWALL\_PLANAR*) foi criada em frente ao veículo para que a colisão exista. Não foi inserida nenhuma velocidade a esta parede, sendo assim, seu comportamento será estático.

Após a inserção de todos esses parâmetros, chegou-se ao FEM final, que pode ser observado na Figura 13.



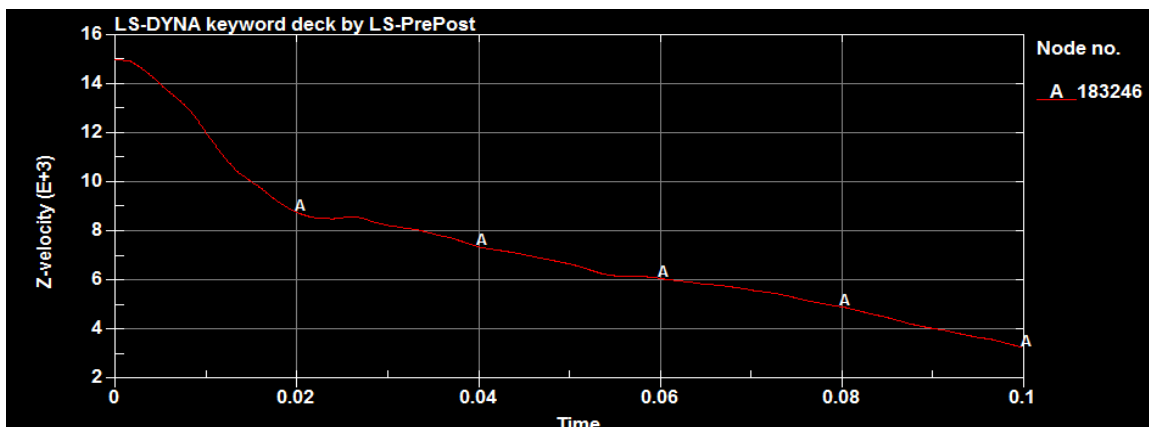
Figura 13 - FEM desenvolvido



#### 4.4. VELOCIDADE, ENERGIA E DEFORMAÇÃO

A Figura 14 representa a velocidade do chassi no momento da colisão. Pode-se observar que a velocidade no momento do impacto é de 15 m/s (54 km/h), reduzindo de forma gradual até chegar a menos de 3 m/s, 0,1s após a colisão (tempo de simulação configurado).

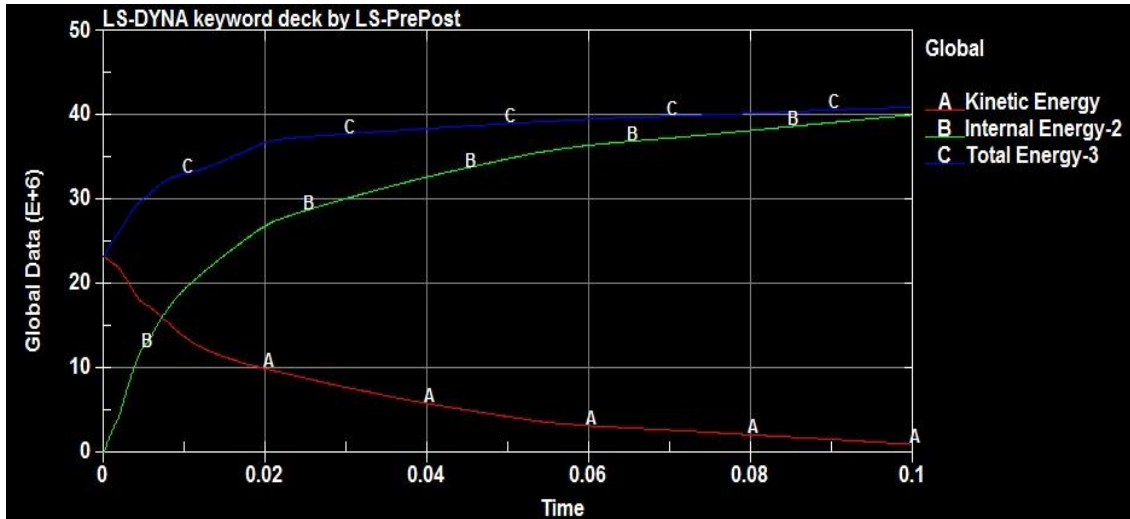
Figura 14 - Velocidade (mm/s) x tempo (s)



A diminuição da velocidade em virtude da colisão, ocasiona também a transformação da energia cinética do chassi em energia interna do sistema. Pode-se perceber a partir da Figura 15, que instantes antes da colisão ( $t=0$ ), a energia cinética é de aproximadamente 24 kJ e a energia interna é igual a zero. Durante o impacto, a energia cinética é convertida em energia interna (energia de deformação) e esse acréscimo irá resultar na diminuição da energia externa (parte da energia é

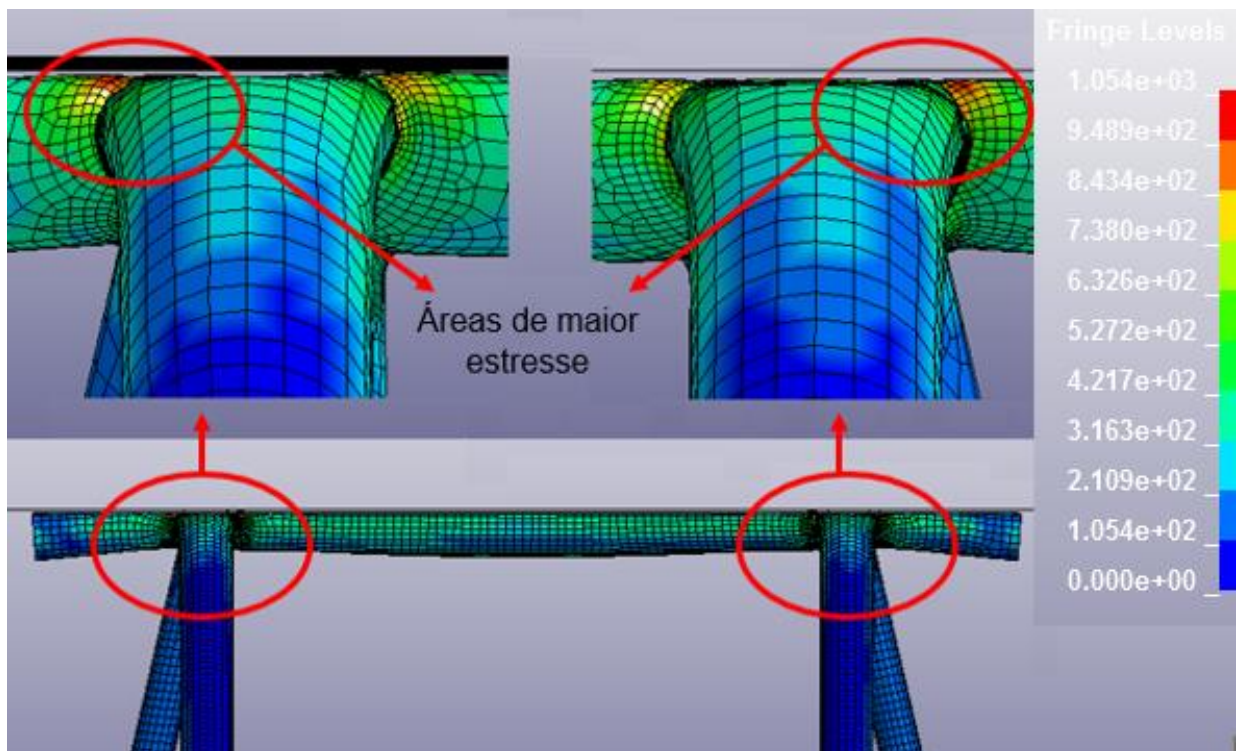
absorvida pelo material). Após cerca de 0.01s de colisão, energia cinética e a energia interna do sistema se igualam, em aproximadamente 15 kJ. Percebe-se também o produto da soma da energia cinética e da energia interna é igual a energia total durante toda a colisão.

Figura 15 - Gráfico das energias do sistema



A Figura 16 demonstra a tensão equivalente de Von-misses no momento do impacto, que chega a ser de 1,054 GPa nos elementos que estão em contato com parede rígida.

Figura 16 - Tensão equivalente de Von-misses na colisão





A tensão sobre os tubos é elevada, resultando na deformação (esmagamento/compressão) dos mesmos. Inicialmente essa tensão está localizada na parte frontal do veículo e, no decorrer do tempo, se espalha para todos os pontos, principalmente nos locais de concentração de tensão (conexões e tubos dobrados).

Conforme descrito, pela transformação da energia cinética em energia de deformação (pela elevada tensão nos tubos) acrescentado ao fato de que a velocidade utilizada na simulação é elevada, podem-se observar altos índices de deformação no sistema. As Figura 17, 18 demonstram a deformação do chassi nos momentos iniciais da colisão, principalmente nos locais circulado em vermelho, que são pontos críticos (mais frágeis) do sistema.

Figura 17 - Deformação do chassi 0,005 segundos após a colisão

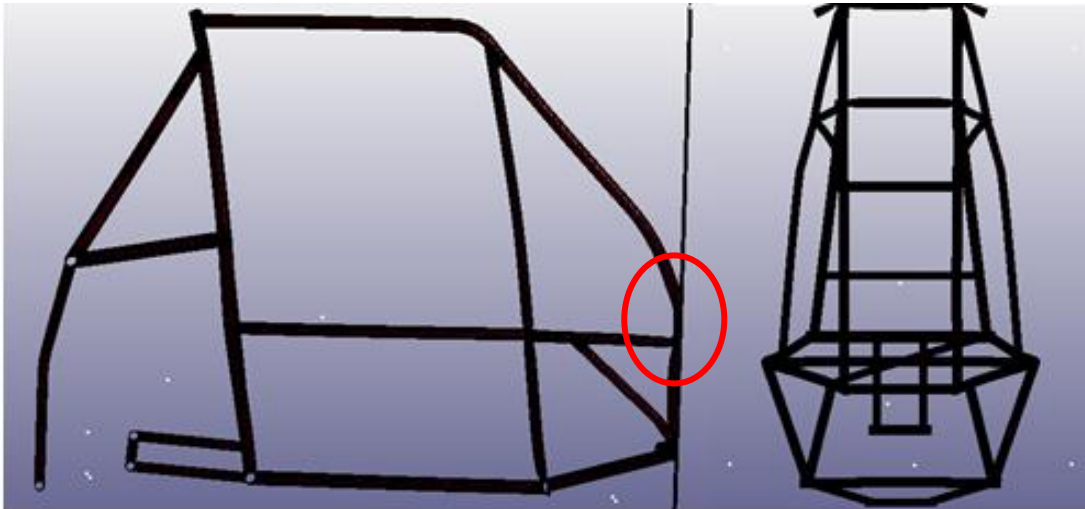
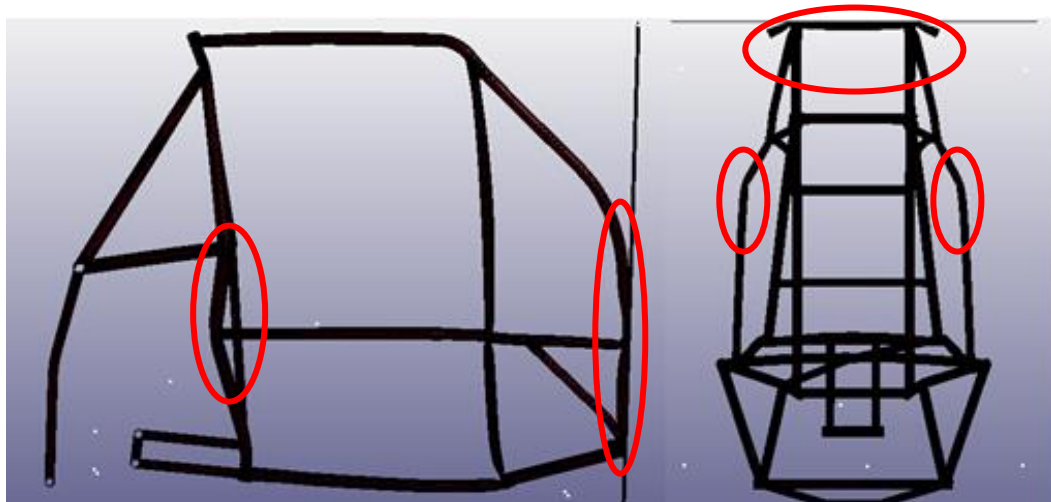
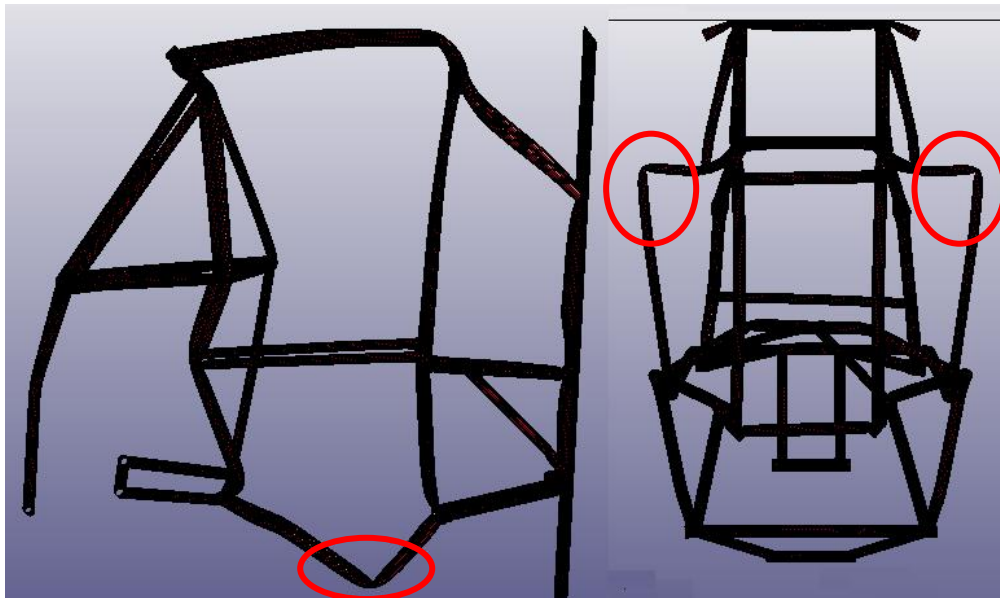


Figura 18 - Deformação do chassi 0,01 segundos após a colisão



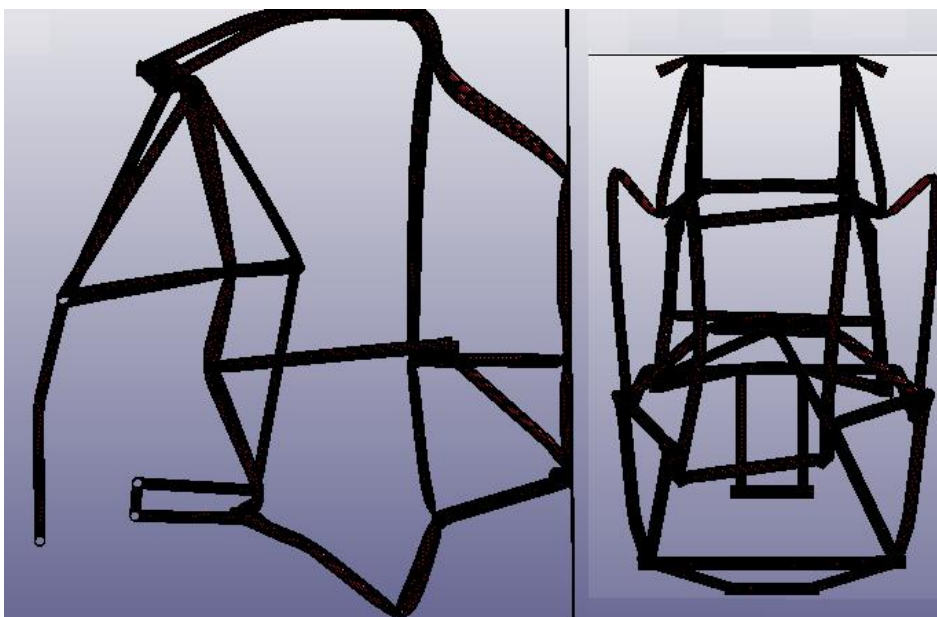
É possível perceber a partir da Figura 19, que a deformação na parte frontal do veículo é elevada, porém não coloca em risco a segurança do motorista. Contudo, os tubos laterais do modelo apresentam dobras que potencializam a deformação (circuladas em vermelho) e permitem o deslocamento para a frente de toda a parte traseira do veículo (onde encontram-se o motor e caixa de transmissão, por exemplo).

Figura 19 - Deformação do chassi 0,05 segundos após a colisão



Na Figura 20 é possível observar a gaiola de proteção completamente danificada, o que poderia ocasionar graves danos ao motorista.

Figura 20 - Deformação final do chassi após colisão (0,1s)



## 5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa objetivou a criação e a resolução de um modelo dinâmico não-linear de elementos finitos, concebido a partir de um chassi de BAJA SAE que foi colidido contra uma parede rígida. Utilizou-se de uma metodologia de teste semelhante à utilizada na indústria, desenvolvendo uma malha adequada e definindo todas as condições de carregamento e contorno necessárias.

A realização da pesquisa bibliográfica acerca dos princípios básicos do funcionamento de análises dinâmicas não-lineares a partir do software LS-DYNA e das metodologias de ensaio utilizadas na indústria, serviram como base para o desenvolvimento do FEM, que uma vez criado, possibilitou interações com o intuito de ajustar as condições de contorno e os parâmetros da simulação, de acordo com a necessidade da análise. A criação da malha de forma adequada assegurou a qualidade dos resultados, onde foi possível verificar as energias envolvidas no sistema e as deformações. Tendo isso em vista, pode-se afirmar que todos os objetivos da pesquisa foram atingidos.

Em posse dos resultados, pôde-se observar a fragilidade estrutural do chassi quando tratando-se de colisões frontais em velocidade máxima (semelhantes às velocidades e metodologia de teste utilizadas em ensaios na indústria de veículos europeia). O chassi não apresenta elementos estruturais, a exemplo de treliças ou tubos sem dobras, nem dispositivos de absorção de impacto, a exemplo de um sistema de para-choques, o que resultou em altos índices de deformação, prejudicando de forma severa a gaiola de proteção do piloto, o que pode ocasionar danos graves a segurança do piloto.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em posse dos resultados do presente trabalho, sugere-se como possibilidade de trabalhos futuros:

- O levantamento de informações referentes as colisões que ocorrem nas competições do BAJA SAE, afim de adequar as condições de contorno à realidade do projeto, que é diferente da metodologia utilizada em veículos comerciais e utilizadas nessa pesquisa;
- O modelamento da suspensão no FEM desenvolvido nessa pesquisa, inserindo elementos de amortecimento antes do chassi, a fim de obter a absorção dos amortecedores tornando os resultados mais precisos;
- A inserção de um modelo humano na simulação (*dummy*), onde é possível configurar acelerômetros em pontos determinados a fim de se observar a o comportamento e a energia que será direcionada para o piloto;
- Realizar um estudo teórico de deformações e comparar com os resultados obtidos neste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, Inc. **ANSYS Mechanical User's Guide**. Canonsburg: Ed SAS IP, Inc, 2013.

ANSYS, Inc. **Simulation Driven Product Development**. Canonsburg, 2015. Disponível em: <<http://www.ansys.com/>>. Acesso em: 10 outubro 2015.

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BOIS at all. **Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection**. Southfield, Michigan: American Iron and Steel Institute, 2004.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Comissão aprova teste de colisão obrigatório em carros fabricados no País**. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/noticias/TRANSPORTE-E-TRANSITO/490270-COMISSAO-APROVA-TESTE-DE-COLISAO-OBRIGATORIO-EM-CARROS-FABRICADOS-NO-PAIS.html>>. Acesso em: 10 setembro 2015.

COOK, R. D. Et al. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4. ed. University of Wisconsin, Madison: John Wiley & Sons, 2002.

FMVSS 208. **Federal Motor Vehicle Safety Standards**. Washington DC. Disponível em: <<http://www.nhtsa.gov/cars/rules/import/FMVSS/#SN208>>. Acesso em: 10 Julho 2015.

HUEBNER, K.; THORNTON, E. **The finite element method for engineers**. New York: John Wiley & Sons, 1982.

LATINNCAP. **Nossos testes**. Montevideo, 2015. Disponível em: <<http://www.latinncap.com/po/explicacoes-dos-testes>>. Acesso em: 15 outubro 2015.

LS-DYNA. **Keyword User's Manual**. 2. ed. California: Livermore, 2011.

LS-DYNA. **Livermore Software Technology Corporation**. Livermore, 2015. Disponível em: <<http://www.lstc.com/products/ls-dyna>>. Acesso em: 23 agosto 2015.

MATWEB. **Mechanical Properties 1020 steel**. 2015. Disponível em: <<http://www.matweb.com/>>. Acesso em 13 agosto 2015.

NASVA. **National Agency for Automotive Safety & Victim's Aid**. 2015. Disponível em: <<http://www.nasva.go.jp/mamoru/en/>>. Acesso em: 23 Julho 2015.

RBSB. **Regulamento Baja SAE Brasil**. Piracicaba, 2013. Disponível em: <[http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas\\_estudantis/baja2013/Regras.aspx](http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/baja2013/Regras.aspx)>. Acesso em: 15 julho 2015.

SOLIDWORKS. **SolidWorks Professional**. 2015. Disponível em: <<http://www.solidworks.com/sw/products/3d-cad/solidworks-professional.htm>>. Acesso em: 15 setembro 2015.