

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

LUCAS STAKE

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO IMPACTO DA ESTRUTURA TUBULAR DE UM
VEÍCULO BAJA SAE**

CAXIAS DO SUL

2020

LUCAS STAKE

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO IMPACTO DA ESTRUTURA TUBULAR DE UM
VEÍCULO BAJA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vieceli

CAXIAS DO SUL

2020

LUCAS STAKE

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO IMPACTO DA ESTRUTURA TUBULAR DE UM
VEÍCULO BAJA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 29/02/2020

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Adelair Lino Colombo
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Vagner do Nascimento
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Os veículos baja SAE, estruturas tubulares do tipo gaiola utilizadas para competições *off-road* com obstáculos, são desenvolvidos anualmente por equipes compostas de estudantes universitários orientados por professores a fim de competir com outras universidades em competições promovidas pela SAE. Para desenvolvimento do projeto e posterior construção do protótipo, devem ser consideradas as diversas situações às quais a estrutura e o piloto serão expostos, como é o caso das deformações plásticas resultantes de colisões contra obstáculos ou outros veículos e eventuais capotamentos. Este trabalho teve como objetivo a análise do comportamento de deformação não linear causado em uma estrutura baja devido a situações controladas de impacto. Para tanto, foi obtida a curva de tensão x deformação de dois materiais, cujas propriedades foram utilizadas no *software* CAE Abaqus a fim de avaliar o comportamento da estrutura tubular da gaiola, bem como as tensões e deslocamentos resultantes. Com a análise dos resultados de tensão e deslocamento, observou-se que o material SAE 4130 não sofreu ruptura, bem como não sofrendo deslocamentos invasivos a área do piloto, sendo aconselhável para a composição do veículo.

Palavras-chave: Baja SAE. Deformação Plástica. Colisão. Análise Não Linear. Abaqus.

ABSTRACT

The baja SAE vehicles, tubular cage structures used on off-road competitions with obstacles, are yearly developed by teams composed of university students oriented by Professors to compete against another university teams in competitions organized by SAE. For the development of the project and the building of the prototype, it is necessary to considerate various situations, which both structure and pilot are exposed to, like the plastic deformations that result from crashes against obstacles or other vehicles and eventually rollovers. This work had the objective of analyze the behavior of the non-linear deformation caused in a baja structure after a controlled impact situation. Therefore, it was obtained the stress x strain curve of two material, which properties were used in the software CAE Abaqus to evaluate the behavior of the roll cage tubular structure, as well as the resultants stresses and displacements. With the results analysis, it was observed that the material SAE 4130 did not suffer any break, as well as not suffering invasive displacements in the pilot area, being, therefore, advisable for the vehicle composition.

Key words: BAJA SAE. Plastic Deformation. Collision. Non-Linear Analysis. Abaqus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de situação de impacto na competição Baja SAE Brasil.....	10
Figura 2 – Modalidades de competições SAE <i>International</i> e SAE Brasil.....	11
Figura 3 – Membros primários e secundários da estrutura da gaiola de proteção.....	12
Figura 4 – Exemplo de malha em uma estrutura tubular veicular.....	15
Figura 5 – Componentes de tensão no sistema cartesiano de coordenadas	16
Figura 6 – Etapas para aplicação do método dos elementos finitos.....	18
Figura 7 – Domínio de um sólido discretizado em elementos finitos	20
Figura 8 – Diferentes tipos de elementos finitos.....	20
Figura 9 – Alteração na rigidez de uma estrutura conforme incrementos de carga	23
Figura 10 – Método de incrementos parciais de carga e iterativo para análise não linear	24
Figura 11 – Geometria de um corpo de prova para ensaios de tração.....	25
Figura 12 – Ensaio de tração com corpo de prova de tubos	26
Figura 13 – Representação da curva tensão-deformação verdadeira e nominal.....	28
Figura 14 – Dinâmica de capotamento frontal de um veículo baja	29
Figura 15 – Carregamentos aplicados conforme norma FMVSS 216.....	30
Figura 16 – Fluxograma de trabalho	32
Figura 17 – Curva Tensão x Deformação Real SAE 1018	34
Figura 18 – Curva Tensão x Deformação Real SAE 4130	35
Figura 19 – Representação dos vetores de velocidade e parede rígida.....	36
Figura 20 – Malha de elementos finitos	37
Figura 21 – Pontos de massa e esforços atuantes na estrutura.....	37
Figura 22 – Condutor representado dentro da estrutura do Baja	38
Figura 23 – Tensão – Cenário A	40
Figura 24 – Deslocamento no sentido do eixo x – Cenário A.....	41
Figura 25 – Deslocamento da estrutura no eixo y – Cenário A	42
Figura 26 – Elementos 110253 e 111138	42
Figura 27 - Gráfico Tensão x Tempo Elementos 110253 e 111138 – Cenário A.....	43
Figura 28 – Tensão sofrida pela estrutura – Cenário B.....	43
Figura 29 – Gráfico Tensão x Tempo Elementos 110253 e 111138 – Cenário B.....	44
Figura 30 – Tensões – Cenário C	45
Figura 31 – Deslocamento no eixo x – Cenário C	45
Figura 32 – Localização do elemento 110253.....	46
Figura 33 – Localização do elemento 111138.....	46
Figura 34 – Gráfico Tensão x Tempo Elementos 110253 e 111138 – Cenário C.....	47
Figura 35 – Tensões – Cenário D	47

Figura 36 – Deslocamentos – Cenário D	48
Figura 37 – Gráfico Tensão x Tempo Elementos 110253 e 111138 – Cenário D.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas e composição química do material SAE 1018	33
Tabela 2 – Propriedades mecânicas e composição química do material SAE 4130	34
Tabela 3 – Deslocamento máximo permitido	39
Tabela 4 – Cenários de simulação	40
Tabela 5 – Resultados	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	10
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
1.3	OBJETIVOS.....	14
1.3.1	Objetivo geral	14
1.3.2	Objetivos específicos	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	15
2.2.1	Pré-processamento	17
2.2.1.1	Condições de contorno e carregamento.....	18
2.2.1.2	Refinamento de malha e tipos de elementos finitos	19
2.2.2	Análise não linear	21
2.2.2.1	Não Linearidades.....	21
2.2.2.2	Equações de equilíbrio.....	22
2.2.3	Plasticidade	23
2.2.4	Curva de relação tensão-deformação verdadeira	24
2.2.5	Contato	28
2.3	CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO	30
2.3.1	Crítério de Von Mises	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS	33
3.2	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO	33
3.3	PARÂMETROS DE IMPACTO	35
3.4	PRÉ-PROCESSAMENTO.....	35
3.5	PROCESSAMENTO E PÓS-PROCESSAMENTO	38
3.6	ANÁLISE.....	38
4	RESULTADOS	40
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

O setor automotivo possui uma ampla diversidade de produtos, adaptados para as diferentes necessidades dos clientes. Este mercado possui grande competitividade, de forma que as empresas procuram vantagens sobre a concorrência em todos os aspectos dos veículos. Busca-se, de forma geral, desenvolver um produto eficiente e com baixo custo, mas que atenda todos os requisitos de segurança exigidos para que o risco seja mínimo para o motorista e passageiros.

O baja é um veículo monoposto fora-de-estrada, composto de um chassi tipo gaiola estruturado com aço tubular, motor, sistema elétrico, sistema de freios, sistema de combustível, suspensão e direção. É utilizado em competições de nível acadêmico que propõem às equipes o seu desenvolvimento atendendo especificações rigorosas de segurança e performance, para que o mesmo participe de provas de aceleração, velocidade máxima, tração, lama, suspensão, manobrabilidade e enduro de resistência. A Figura 1 representa um baja durante a competição organizada pela SAE Brasil, em uma situação de capotamento em que ocorrerá impacto da estrutura contra o solo.

Figura 1 – Exemplo de situação de impacto na competição Baja SAE Brasil



Fonte: Lottermann (2014).

De grande importância nos setores automotivo e aeroespacial, a *SAE International* tem entre suas principais contribuições o desenvolvimento de padrões por meio de normas e a propagação de informações técnicas e históricas através de plataformas virtuais, publicações, eventos e cursos. Constituída nos Estados Unidos, na década de 90 formou-se, no Brasil, a primeira afiliada à *SAE International*, a SAE Brasil. De igual modo, esta tem como

missão a disseminação da tecnologia servindo como fonte de conhecimento na área de mobilidade através de meios similares à sua matriz (SAE BRASIL, 2019).

A SAE promove no meio acadêmico, com participação de mais de 4.500 alunos em todo o mundo, competições em diversas áreas de mobilidade. Destacam-se as modalidades de *Aero Design*, *Baja*, *Fórmula* e *Fórmula Elétric* (SAE BRASIL, 2019), apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Modalidades de competições SAE *International* e SAE Brasil.



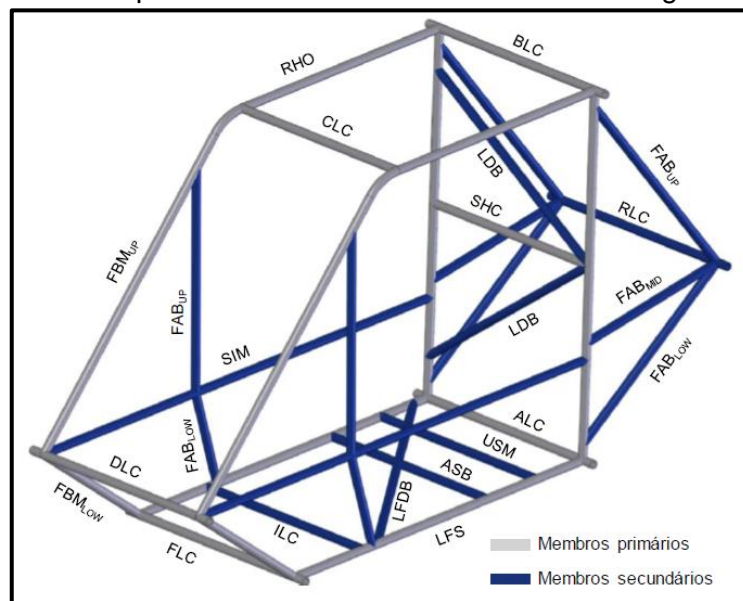
Fonte: adaptado de SAE INTERNATIONAL (2019).

O regulamento da competição anual de baja no Brasil informa as regras para os projetos finais considerando todas as partes do veículo. As regras especificam questões como a identificação das equipes nos carros, dimensões aceitas da estrutura completa e de seus componentes, especificações de equipamentos e sistemas permitidos e exigidos. Para ser considerado apto às provas dinâmicas, o veículo deve ser capaz de passar por obstáculos típicos de competições fora-de-estrada, como troncos de árvores, travessias de lama e água à altura de aproximadamente 30 cm, rampas com grandes inclinações e curvas de pequeno raio (SAE BRASIL, 2018).

Principalmente, são apresentadas normas voltadas para a segurança dos pilotos. Neste sentido, a gaiola representa grande importância possuindo diversos requisitos, entre eles o material utilizado, que deve ser de aço tubular e possuir um mínimo de 0,18% de carbono, e os componentes necessários para a construção da mesma, conforme apresentado na Figura 3. Os membros em cinza são os primários, essenciais para a resistência e rigidez da estrutura e os membros em azul são os secundários, com funções de proteção e reforço da estrutura e dos sistemas do veículo. Cada tubo é nomeado, possuindo regras específicas quanto às dimensões e posicionamento. São especificados também outros cuidados necessários quanto à segurança, como a ausência de arestas cortantes e espaços mínimos livres para o corpo do piloto dentro de seu habitáculo (SAE BRASIL, 2018).

Além da competitividade nas diversas provas dinâmicas, espera-se das equipes a apresentação de um veículo com boas condições ergonômicas, fácil manutenção, confiabilidade e *design* atraente. As chamadas provas estáticas consistem na elaboração de relatórios e apresentações dos projetos, aonde devem ser justificadas as escolhas da equipe e apresentados os cálculos realizados. Para a avaliação do projeto, entre os conteúdos sugeridos para o desenvolvimento de relatórios, encoraja-se a utilização de simulações para análise controlada do desempenho da estrutura, procurando representar esforços sofridos provenientes dos obstáculos da competição e de possíveis colisões (SAE BRASIL, 2018).

Figura 3 – Membros primários e secundários da estrutura da gaiola de proteção



Fonte: SAE BRASIL (2018).

As provas da competição promovidas pela SAE, devido às suas características, apresentam diferentes riscos de impacto. Nas disputas de suspensão, manobrabilidade e enduro de resistência, o veículo pode ser exposto a situações de tombamento e/ou capotagem devido às curvas sinuosas, terrenos irregulares e aos obstáculos que precisam ser transpostos. No enduro, devido ao fato de que as equipes competem simultaneamente, há também o risco de colisões frontais, traseiras e laterais entre baixas.

Na busca por maior eficiência, procura-se usar a menor quantidade de material possível, minimizando assim a massa do chassi. Porém, para obter uma estrutura de peso reduzido, é necessário atentar aos riscos que os veículos são expostos quando em uso. Quando ocorre uma colisão a certa velocidade, o esforço aplicado à estrutura do veículo pode ultrapassar o limite de escoamento do material gerando deformações plásticas e grandes deslocamentos devido a diminuição da rigidez estrutural.

Segundo Alves Filho (2013), a utilização de ferramentas de análise numérica computacional no projeto de novos produtos possui importância substancial, garantindo alto desempenho e qualidade e substituindo métodos de tentativa e erro que resultariam em maiores prazos e altos custos no desenvolvimento. Nesse contexto, o presente trabalho visa utilizar o método de elementos finitos (MEF) para simular o comportamento do chassi perante condição de colisão controlada, a fim de analisar os danos sofridos. A partir dos resultados, realizar-se-ão alterações geométricas e dimensionais com o objetivo de melhor distribuir os esforços e garantir que não ocorra deformação invasiva ao habitáculo do piloto, sempre visando manter o veículo competitivo.

1.2 JUSTIFICATIVA

As competições Baja SAE Brasil ocorrem anualmente a nível nacional e também regional, concedendo às instituições de ensino e aos alunos a oportunidade de aplicar os conhecimentos adquiridos durante a graduação no desenvolvimento de um projeto. Assim como em qualquer disputa, se destacam as equipes com veículos mais eficientes e, conseqüentemente, mais aptos às diferentes exigências que os mesmos são expostos nas diversas provas do evento.

Por se tratar de uma competição, os participantes exigem o máximo de seus recursos para obterem melhores resultados. Conseqüentemente, podem ocorrer impactos contra a estrutura dos veículos, podendo ser por colisões contra outros competidores, capotamento, tombamento ou até mesmo colisões contra obstáculos e objetos fixos. Neste contexto, estão entre as principais dificuldades enfrentadas pelas equipes as limitações de tempo e de recursos para desenvolvimento de protótipos e realização de experimentos, enquanto existe a alta exigência de segurança dos veículos nas avaliações teóricas realizadas pela SAE Brasil, aonde as equipes devem apresentar com clareza a performance do chassi perante a incidência de cargas sobre o mesmo (SAE BRASIL, 2018).

Desta forma, se justifica a utilização de técnicas computacionais como o método de elementos finitos (MEF) para avaliação de efeitos de impactos contra a gaiola, pois possibilita o desenvolvimento de um projeto adequado, obtendo os dados necessários para realização de alterações na estrutura até chegar a um modelo final seguro e competitivo. A execução do projeto é favorecida, despendendo de menor tempo e investimento comparativamente ao que seria necessário para a construção de um protótipo e realização de experimento controlado a fim de gerar e analisar os dados provenientes de evento de colisão.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Simular situação de impacto, utilizando o método de elementos finitos, de uma estrutura tubular veicular.

1.3.2 Objetivos específicos

A fim de garantir que o objetivo geral proposto seja atendido, são indicados os seguintes objetivos específicos para o trabalho:

- a) obter curva de tensão x deformação real de dois materiais tubulares;
- b) analisar tensões e deformações de uma gaiola sob situação de impacto frontal, considerando plasticidade, contato e grandes deslocamentos;
- c) avaliar o comportamento de dois materiais analisados sob impacto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

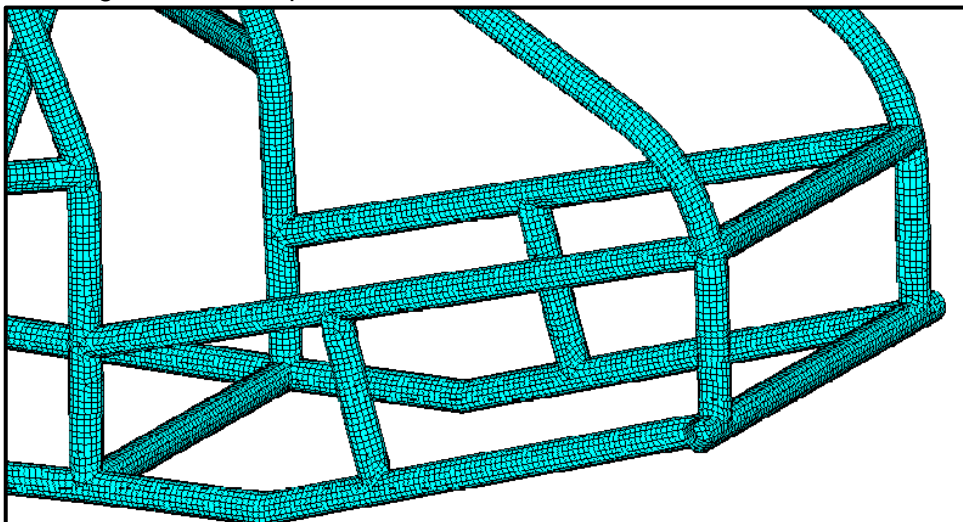
2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A simulação numérica por meio do método de elementos finitos possui grande importância no desenvolvimento de novos produtos, sendo utilizada de forma crescente desde a década de 60 para a resolução de problemas mecânicos envolvendo deformações elásticas e plásticas. O método descreve macroscopicamente, através de elementos de tamanho finito, o comportamento de materiais. A abrangência deste método evoluiu de aplicações inicialmente simples, onde eram suportadas basicamente situações de compressão e tração no regime elástico, até a possibilidade de simular numericamente materiais expostos às mais diversas condições de não-linearidades (RODRIGUES E MARTINS, 2010).

Conforme afirma Alves Filho (2005), diferentemente de outros métodos que buscam soluções exatas, os elementos finitos permitem a simulação de qualquer processo de deformação plástica, não se limitando a materiais, formas geométricas, condições de carregamento ou outras condições existentes como o atrito.

O método consiste em discretizar um sistema contínuo em uma quantidade de elementos de tamanho finito e descrever o comportamento de cada elemento a fim de obter o comportamento do sistema como um todo. A Figura 4 apresenta um exemplo de discretização de uma estrutura tubular veicular originando a malha de elementos finitos. Por ser discreto, o método gera uma solução aproximada com uma diferença em relação à solução exata, porém, quanto maior o número de elementos utilizados para discretizar o sistema, ou seja, quanto menor o tamanho dos elementos, mais o resultado obtido se aproxima do real (KIM E SANKAR, 2011).

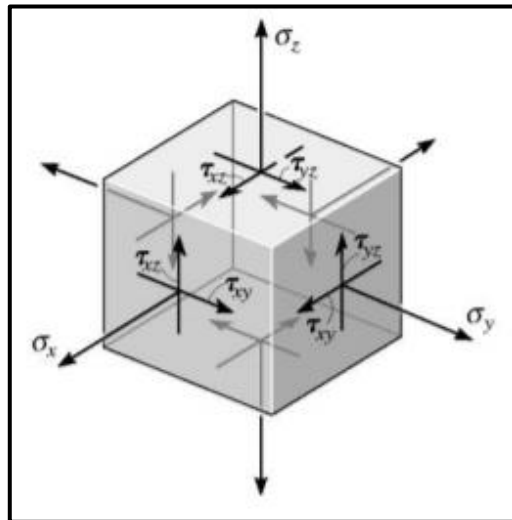
Figura 4 – Exemplo de malha em uma estrutura tubular veicular



Fonte: Noorbhasha (2010).

Conforme Kim e Sankar (2011), o estado de tensões em cada ponto de um sólido é definido pelos componentes de tensão normal σ , que atuam em direção normal às superfícies e de tensão cisalhante τ . Estes componentes descrevem as tensões em cada superfície e direção de um sólido tridimensional, conforme representado na Figura 5.

Figura 5 – Componentes de tensão no sistema cartesiano de coordenadas



Fonte: Hibbeler (2009).

Kim e Sankar (2011) afirmam, que ao ser submetido à ação de forças externas, ocorre a modificação do formato original de um corpo. Esta modificação é representada pelas deformações, definidas como a variação de comprimento de um sólido em uma direção em relação ao seu comprimento original.

A definição completa da deformação de um corpo pode ser descrita por meio de seis componentes de deformação, onde os componentes ϵ_{xx} , ϵ_{yy} e ϵ_{zz} representam deformações normais e os componentes γ_{yz} , γ_{zx} e γ_{xy} representam as deformações por cisalhamento, ou distorções, sendo a variação angular entre dois segmentos de reta originalmente paralelos aos eixos representados nos índices subscritos de cada componente (KIM E SANKAR, 2011).

Kim e Sankar (2011) afirmam que o campo de tensões em um sólido pode ser definido por funções, as quais precisam satisfazer condições de equilíbrio de tensões. As Equações 1, 2 e 3 representam o estado de tensões de um sólido tridimensional quasi-estático, onde são considerados os equilíbrios das tensões normais σ e cisalhantes τ nas direções x, y e z.

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Rodrigues e Martins (2010) afirmam que as equações de derivadas parciais de equilíbrio são utilizadas na formulação de elementos finitos a fim de representar numericamente situações de deformações elásticas e plásticas. Para problemas dinâmicos são realizadas integrações onde são considerados os comportamentos de deformação dos materiais e efeitos de inércia.

Para a aplicação do método dos elementos finitos, inicialmente divide-se um corpo contínuo, como uma estrutura de um chassi veicular, um eixo ou componentes de máquinas em um número finito de elementos, os quais são conectados por meio de nós. A solução do problema consiste na definição dos deslocamentos destes nós, causados por deformações, que permitem a determinação dos esforços internos da estrutura deformada (ALVES FILHO, 2005).

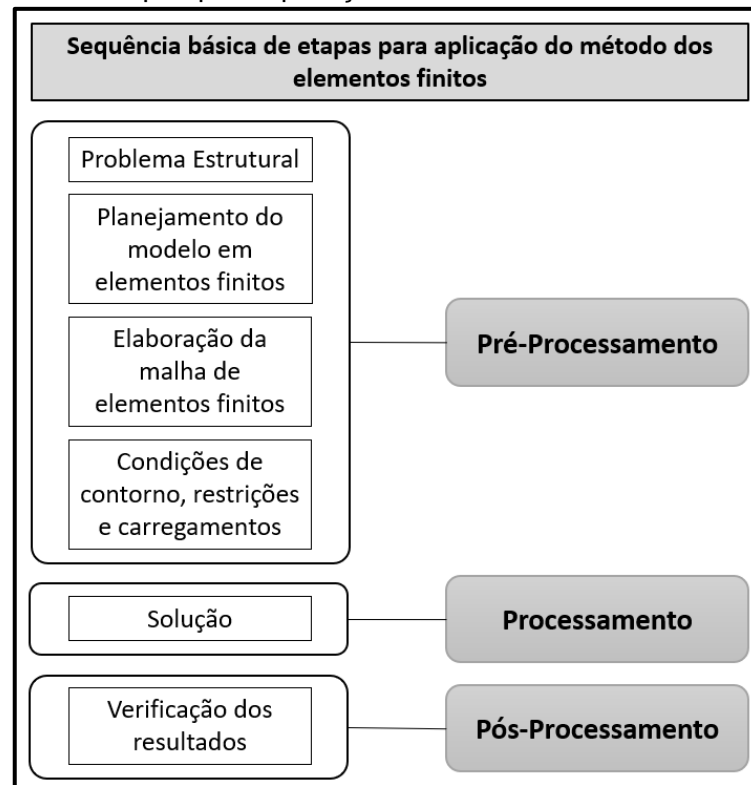
Segundo Alves Filho (2005), para determinar a relação entre as cargas F atuantes em cada nó de uma estrutura e os deslocamentos nodais consequentes, deve-se conhecer ou determinar a rigidez K da estrutura. Como problemas reais possuem um grande número de elementos e de componentes de deslocamentos U , é necessário expressar esta relação de forma matricial, conforme a Equação 4.

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \quad (4)$$

2.2.1 Pré-processamento

Segundo Fish e Belytschko (2009), a análise dos elementos finitos inicia-se pelo pré-processamento, onde a estrutura é dividida em elementos finitos gerando a malha, segue-se com a formulação das equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento de cada elemento, as quais são combinadas gerando as equações do sistema e resolvidas durante o processamento, desta forma obtendo a solução. Por fim, transforma-se a solução obtida em informações úteis para análises e conclusões na etapa de pós-processamento. A Figura 6 apresenta as etapas realizadas na aplicação do método dos elementos finitos.

Figura 6 – Etapas para aplicação do método dos elementos finitos



Fonte: adaptado de Alves Filho (2005).

A etapa de pré-processamento no MEF consiste em dividir uma região a fim de representar o deslocamento em pontos discretos. Para tal deve-se considerar a rigidez do sólido, os carregamentos atuantes sobre cada elemento, as condições de contorno necessárias além de demais efeitos consequentes das condições que o sólido em estudo estiver exposto (CHANDRUPATLA E BELEGUNDU, 2014).

2.2.1.1 Condições de contorno e carregamento

As relações entre tensões e deformações, bem como as relações entre deformações e deslocamentos, as quais são representadas por equações diferenciais, devem considerar também as condições de contorno necessárias para representar o comportamento de uma estrutura. Os contornos são de duas formas, o primeiro descrito por valores conhecidos de deslocamentos e o segundo relacionado as forças de superfície conhecidas (KIM E SANKAR, 2011).

Segundo Chandrupatla e Belegundu (2014), os carregamentos atuantes sobre um corpo podem ocorrer como uma força de corpo, uma força de superfície ou uma carga pontual. O primeiro tipo atua de forma distribuída no volume de um corpo, como por exemplo o peso do próprio corpo devido à gravidade. A carga de superfície atua também de forma distribuída, porém, em parte da área de um corpo, como ocorre quando é originada uma força devido ao

atrito do corpo com alguma superfície. A última forma é representada por forças externas atuando de forma concentrada sobre o sólido.

Segundo Alves Filho (2005), os deslocamentos de cada um dos nós de cada elemento de uma estrutura depende dos graus de liberdade do nó, desta forma o deslocamento pode ocorrer desde em apenas uma ou nenhuma direção, até a possibilidade de deslocamento em todos os componentes, ou seja, nas três direções de translação e nas três direções de rotação. Assim, a forma como uma estrutura está fixada, representada por suas condições de apoio, define como o movimento da mesma é restringido. Especificando estas condições tem-se como resultado os graus de liberdade em cada seção e em cada nó.

2.2.1.2 Refinamento de malha e tipos de elementos finitos

Segundo Silva et al. (2001), deve-se realizar a discretização do domínio de um problema, dividindo-o em pequenas regiões para que a descrição do comportamento de todas variáveis envolvidas obedecendo as condições de contorno do problema seja facilitada, bem como a representação da geometria e do comportamento de deformação do material. Assim, a partir dos valores nodais das variáveis, o comportamento de cada elemento é definido e conseqüentemente o domínio como um todo é descrito. Segundo Souza (2003), as subdivisões do domínio, ou elementos finitos, são conectadas por meio de pontos, formando uma malha, conforme apresentado na Figura 7.

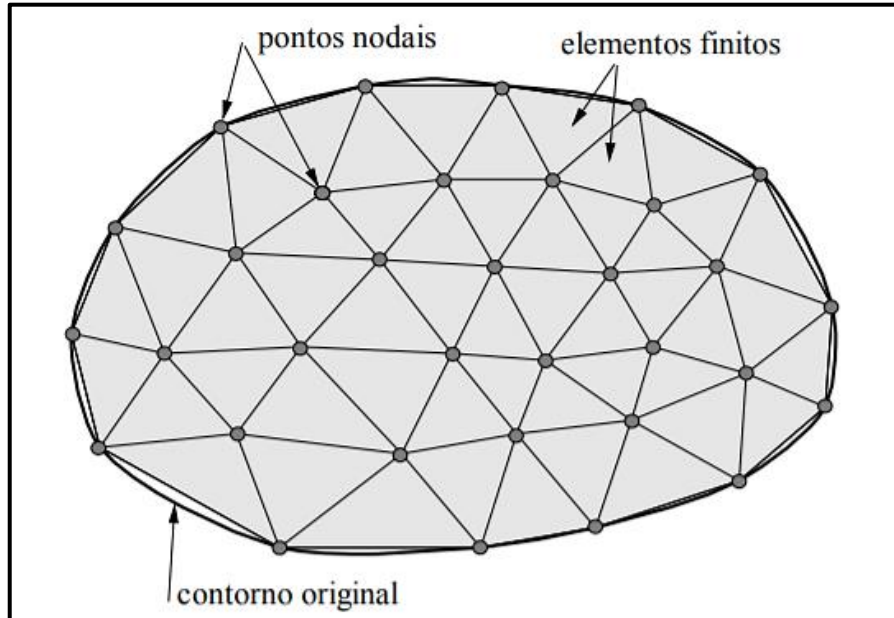
Alves Filho (2005), afirma que a definição do refinamento da malha de elementos finitos em uma estrutura tem grande influência no resultado da aplicação do método e depende das propriedades do elemento definido. Cada elemento, como de casca, membrana, sólido ou placa, representa um diferente comportamento, procurando representar em cada seção o efeito na estrutura real.

Souza (2003), afirma que os elementos finitos apresentam diferentes formas, como de barra, triângulo ou tetraedro e a precisão da solução obtida com a utilização do método, é dependente de configurações como o tipo de elemento utilizado, a quantidade de nós e o tamanho dos elementos, ou seja, o nível de refinamento da malha. Este refinamento pode ser definido a partir de um método de convergência, onde conforme o número de elementos aumenta e o tamanho dos mesmos diminui a solução obtida se aproxima do resultado exato do problema.

Souza (2003), afirma que para descrever o comportamento da estrutura em um problema, além do tamanho e do número de nós de um elemento, os graus de liberdade descrevem os movimentos possíveis, um elemento sólido pode ter seis graus de liberdade, com movimentos em todos sentidos de translação e rotação, porém o mesmo elemento com

o mesmo número de nós pode ser utilizado com um número menor de graus de liberdade se esta situação melhor se adequar à dimensão e condição do problema.

Figura 7 – Domínio de um sólido discretizado em elementos finitos

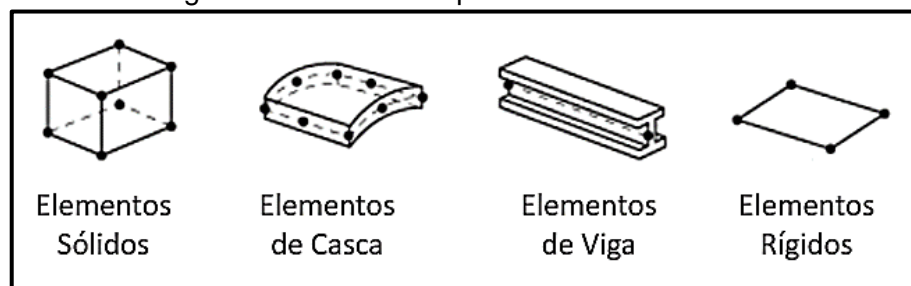


Fonte: Souza (2003).

Kim e Sankar (2011), afirmam que, apesar de todas as estruturas reais serem tridimensionais é possível utilizar-se de aproximações, considerando sólidos como unidimensionais ou bidimensionais. Os elementos bidimensionais são utilizados quando as tensões e deformações não são dependentes de uma das três coordenadas, normalmente o eixo z. Todos elementos possuem nós, podendo ser apenas nos vértices como também em outras posições. A Figura 8 apresenta diferentes tipos de elementos, sendo eles os elementos de viga, casca, sólidos e rígidos.

A seleção do elemento apropriado para o problema pode ser feita considerando a facilidade de geração de malha. Em problemas tridimensionais os elementos mais usados são os tetraedros de quatro nós e os hexaedros de oito nós (BELYTSCHKO, LIU E MORAN, 2000).

Figura 8 – Diferentes tipos de elementos finitos



Fonte: adaptado de ABAQUS (2010).

Conforme Alves Filho (2005), elementos sólidos possuem alta versatilidade, podendo ser tetraédricos de quatro nós e doze graus de liberdade. Desta forma são admitidos deslocamentos em todos os planos.

Os elementos de casca têm como característica o fato de que, havendo pequenas deflexões atuando no sólido, não surgem forças no plano médio, assim, o elemento possui rigidez a forças que atuam de forma normal ao seu plano médio (ALVES FILHO, 2005). Em geral os mesmos possuem quatro nós e seis graus de liberdade cada, permitindo rotações e translações nas direções x, y e z.

Os elementos de casca têm múltiplas utilizações nos mais variados tipos de componentes e estruturas. Sua aplicação é, em muitos casos, preferível a outros elementos pois reduz o nível de discretização necessário além de exigir muito menos computacionalmente (BELYTSCHKO, LIU E MORAN, 2000).

Segundo Belytschko, Liu e Moran (2000), o desempenho dos elementos finitos em uma análise não linear onde ocorrem grandes deformações dependem da suavidade da solução e a precisão da solução do problema pode ser prejudicada devido a distorções, sendo menos benéfico o uso de elementos de alta ordem, onde o deterioração da qualidade da solução é mais severa.

2.2.2 Análise não linear

Conforme afirma Alves Filho (2013), os esforços realizados na solução de problemas lineares estão na definição dos deslocamentos que uma estrutura sofre, sempre com base na rigidez dos materiais. Em análises lineares, a rigidez não sofre variação e como consequência disso, os deslocamentos resultantes de esforços são proporcionais à intensidade dos mesmos. Desta forma, dentro das limitações do comportamento linear, a proporcionalidade permite obter o deslocamento consequente de qualquer esforço aplicado sobre uma estrutura, e vice-versa.

A partir do momento em que a rigidez de uma estrutura passa a depender dos deslocamentos que esta sofre, ou seja, sofre alteração durante um carregamento atuante sobre ela, o problema torna-se não linear. Surge então uma grande diferença na resolução de problemas deste comportamento em relação aos lineares. A história ou sequência de aplicação de cargas influencia nas propriedades geométricas e mecânicas finais (ALVES FILHO, 2013).

2.2.2.1 Não Linearidades

Alves Filho (2013), afirma que a rigidez de uma estrutura ou de seus elementos

depende de três fatores: características do material, propriedades físicas e características geométricas. O módulo de elasticidade E é uma característica pertencente ao material que se mantém constante durante o comportamento linear, permitindo, através da Equação 5, obter a relação entre a tensão σ aplicada na estrutura e sua deformação ε . A alteração do valor deste módulo quando submetido a tensões torna o comportamento de um material não linear.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (5)$$

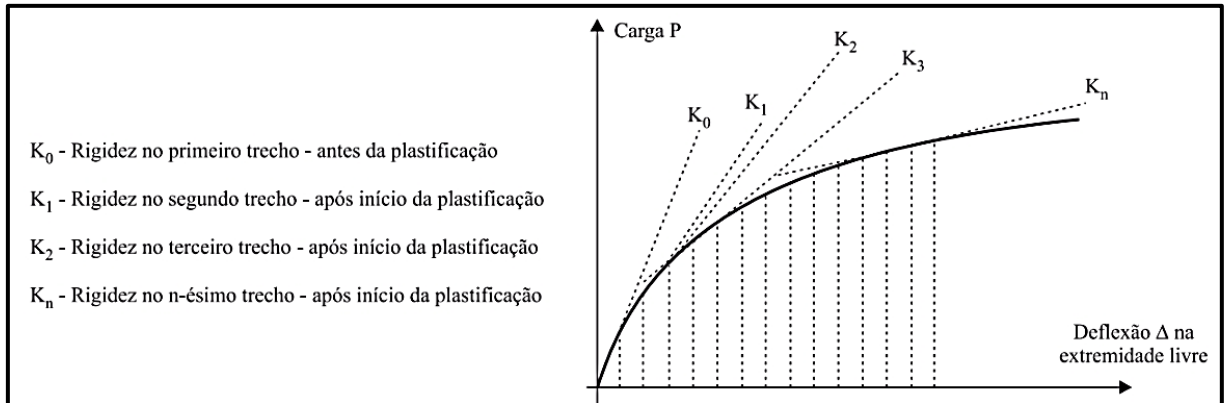
Algumas situações, como a de impacto veicular, causam grandes variações dimensionais alterando propriedades físicas e geométricas como a área de seção transversal ou até mesmo o comprimento de uma peça. Estas deformações podem fazer com que o material entre no regime plástico, onde as deformações são permanentes e não dependem das propriedades iniciais do material e da estrutura (ALVES FILHO, 2013).

Ao sofrer grandes deflexões devido a um carregamento atuante sobre si, uma estrutura pode passar a estar exposta a novos esforços, onde suas equações de equilíbrio entre forças internas e externas são alteradas por estes novos termos. Desta forma, ocorre uma alteração na relação entre o deslocamento sofrido pela estrutura e os esforços sendo aplicados na mesma, configurando-se numa não linearidade devido a alteração da geometria (ALVES FILHO, 2013).

2.2.2.2 Equações de equilíbrio

A matriz de rigidez é quem relaciona as forças atuantes em uma estrutura com os deslocamentos. No comportamento não linear esta matriz pode sofrer diversas alterações durante a aplicação de um esforço, desta forma, para se conhecer os deslocamentos se faz necessário o conhecimento da rigidez de cada um dos componentes da estrutura. Desta forma, para calcular a condição final de uma estrutura, devem-se realizar incrementos de carga passo a passo, monitorando em cada incremento a rigidez do material. Sabe-se que um material sofreu alteração de rigidez quando a força aplicada sobre ele supera sua tensão de escoamento. Portanto, no momento em que um dos elementos de uma estrutura é exposto a uma tensão superior ao seu escoamento, deve-se atualizar a rigidez deste e conseqüentemente da estrutura como um todo, alterando a relação dos deslocamentos sofridos pela estrutura com o incremento de força realizado, como é representado na Figura 9 (ALVES FILHO, 2013).

Figura 9 – Alteração na rigidez de uma estrutura conforme incrementos de carga



Fonte: Alves Filho (2013).

A atualização da rigidez, conforme apresentado na Equação 6, ocorre a partir de soma da rigidez inicial $[K]_0$ com a matriz de rigidez geométrica $[K]_G$ referente a geometria deformada que contabiliza as forças internas resultantes do último incremento de força. O incremento da carga atuante na estrutura, conforme Equação 7, se dá com base na rigidez atualizada e no incremento de deslocamento (ALVES FILHO, 2013).

$$[K]_{Incremento} = [K]_0 + [K]_G \quad (6)$$

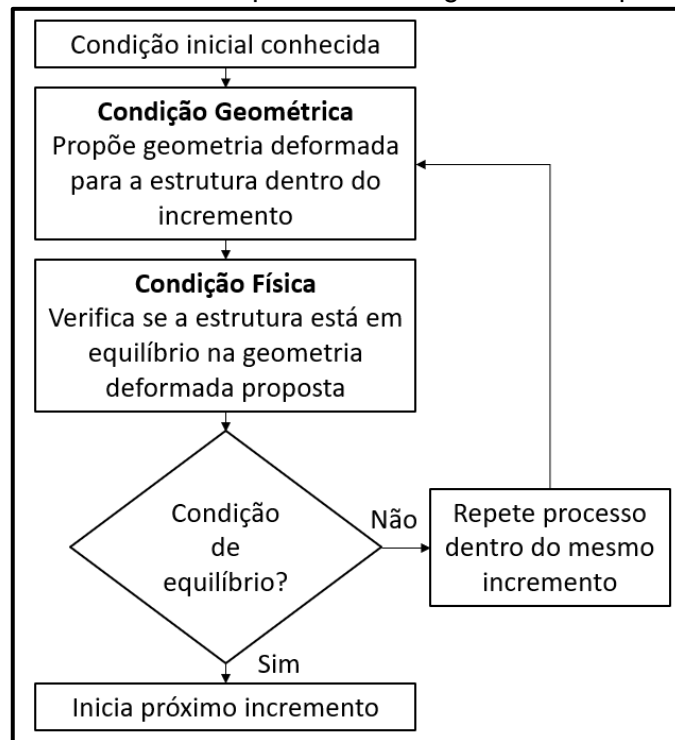
$$\{F\} = ([K]_0 + [K]_G) \cdot \{\Delta\} \quad (7)$$

Conforme Alves Filho (2013), em cada incremento de carga é proposta uma condição deformada da estrutura assumindo deslocamentos. Ao sofrer deflexões são geradas novas forças internas que devem em cada trecho da estrutura estar em equilíbrio com as forças externas. Por se tratar de uma tentativa, esse processo é realizado de forma iterativa por meio de técnicas matemáticas que permitam convergir para a condição de equilíbrio necessária. Todo este procedimento está representado na Figura 10.

2.2.3 Plasticidade

Diferentemente da condição elástica, onde a deformação depende apenas dos estados inicial e final de tensão e deformação, na deformação plástica esta relação se torna mais complexa, dependendo do histórico de solitação. Além disso, toda a deformação elástica exercida sobre um objeto é revertida no momento em que o esforço aplicado se encerra, ao contrário do fenômeno da plasticidade que tem como característica a irreversibilidade de forma que a estrutura deformada plasticamente não pode recuperar sua condição inicial (ALVES FILHO, 2013).

Figura 10 – Método de incrementos parciais de carga e iterativo para análise não linear



Fonte: adaptado de Alves Filho (2013).

Segundo Rodrigues e Martins (2010), quando são realizadas extensões de forma tal que as validades das leis de Hooke sejam ultrapassadas, o comportamento dos materiais se altera. Assim, características tanto mecânicas quanto de geometria dependem diretamente da forma como o corpo foi exposto ao carregamento.

Alves Filho (2013) afirma que a plastificação de uma estrutura não ocorre de forma igual nem simultânea em diferentes pontos da mesma, sendo necessário o conhecimento do tensor de tensões atuantes em cada ponto da estrutura. Desta forma, realizando análise por meio de incrementos de carga deve-se avaliar todas tensões atuantes em cada trecho da estrutura, a fim de identificar suas evoluções e consequências diretas sobre a estrutura, ou seja, as alterações de propriedades que resultam da mudança da rigidez.

Além da forma matemática ou tecnológica, é possível descrever a deformação plástica de corpos sólidos a nível microscópico, uma avaliação física onde é observada a estrutura atômica dos metais (RODRIGUES E MARTINS, 2010).

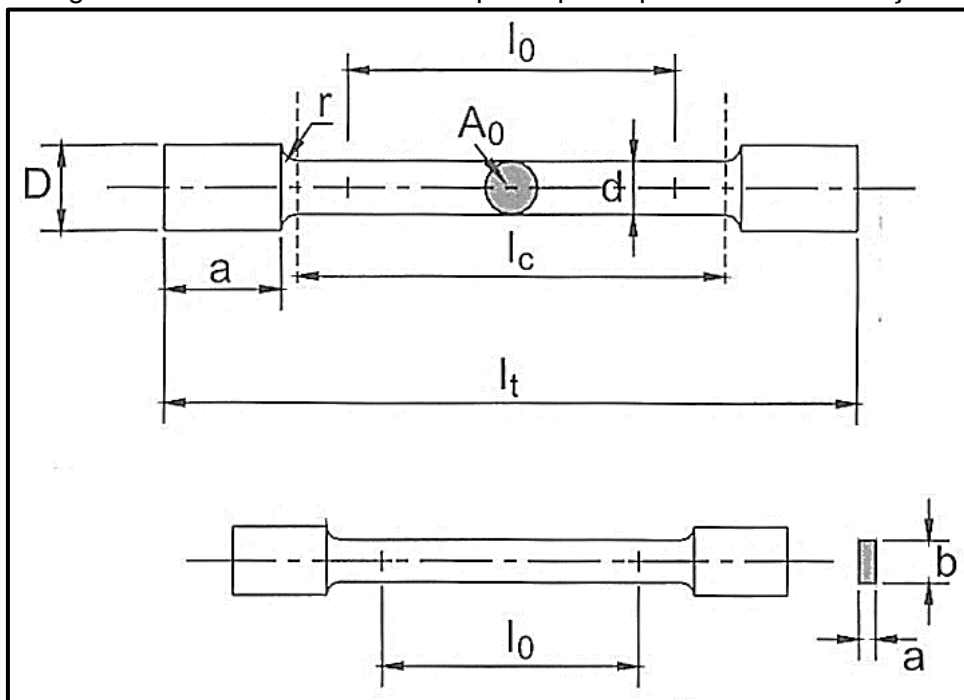
2.2.4 Curva de relação tensão-deformação verdadeira

Conforme Rodrigues e Martins (2010), a determinação das propriedades mecânicas de um material pode ocorrer por meio da realização de um ensaio de tração, o qual utiliza um corpo de prova que é submetido a uma força de tração. Esta força é aplicada em um incremento contínuo até que ocorra a fratura do corpo de prova. Durante todo o ensaio a

mudança do comprimento do corpo decorrente do aumento de força sendo aplicada é registrado com o uso de extensômetros.

Geralmente os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração possuem seção transversal circular, como o apresentado na Figura 11, porém podem ser usados também corpos de seção retangular ou até mesmo outras formas geométricas. Os modelos mais usuais são compostos por cabeças de amarração, por onde são fixados à máquina que realizará a tração, e pela zona de referência, onde será realizado o registro da variação das dimensões durante o ensaio. Dentro desta zona é observado o comprimento de referência l_0 e a área inicial da seção transversal, A_0 . Estas dimensões são registradas durante o ensaio a fim de determinar a relação de tensão e deformação. (RODRIGUES E MARTINS, 2010).

Figura 11 – Geometria de um corpo de prova para ensaios de tração



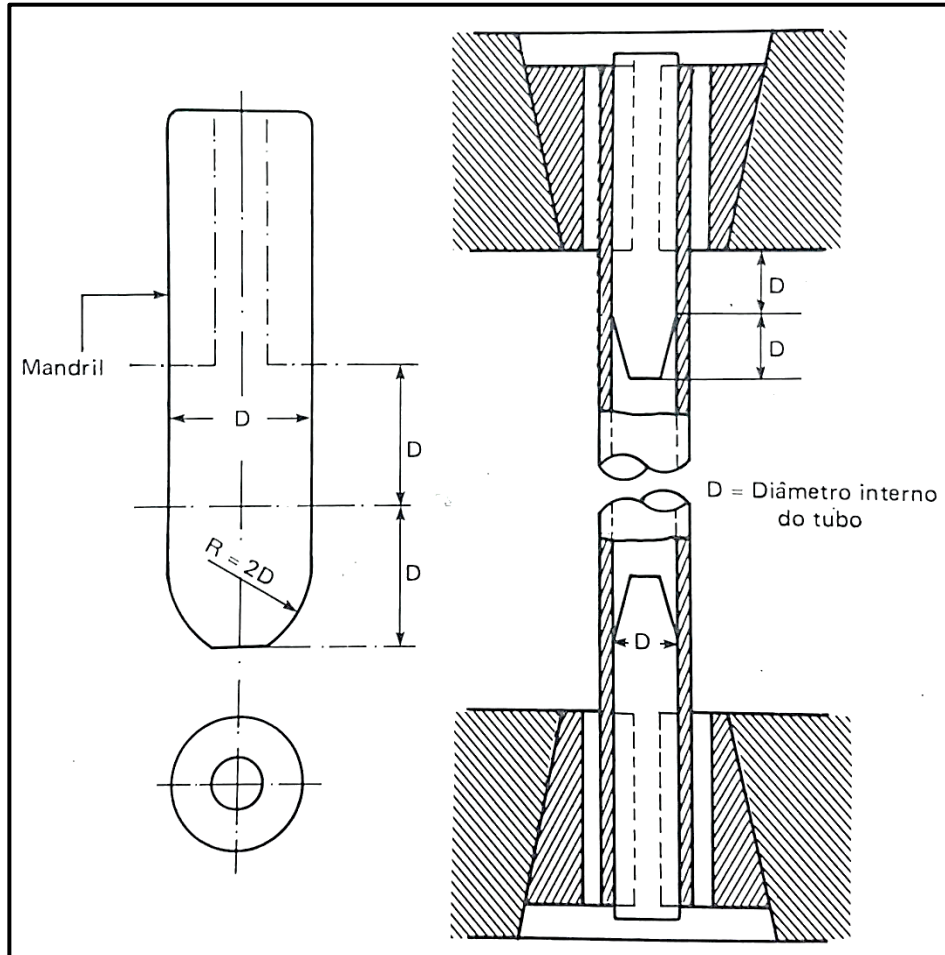
Fonte: Rodrigues e Martins (2010).

Segundo Souza (1982), as propriedades mecânicas de um material para uma dada aplicação podem ser obtidas a partir de ensaios de tração em corpos de prova de produtos acabados, como é o caso de barras, cabos, tubos e parafusos.

Para realizar o ensaio de tração em tubos, pode-se proceder com a fixação de ambas extremidades à máquina onde, para evitar que ocorra o amassamento nas zonas em que os mesmos são presos à máquina, utilizam-se mandris internamente ao tubo. A partir do ensaio é possível obter as propriedades de limite de escoamento e resistência (SOUZA, 1982). A Figura 12 apresenta um esquema de um tubo utilizado no ensaio de tração e os mandris, cujo

diâmetro é equivalente ao diâmetro interno do tubo, desta forma impedindo que ocorra o amassamento.

Figura 12 – Ensaio de tração com corpo de prova de tubos



Fonte: Souza (1982).

A relação entre a tensão e a deformação durante o comportamento elástico do material, ou seja, para valores de tensão menores do que a referente ao limite de elasticidade, é validada pela lei de Hooke, apresentada na Equação 5. Após o início da região plástica, as dimensões da zona de referência do corpo de prova sofrem variação durante o ensaio de tração, assim, é necessário determinar a curva de relação verdadeira entre tensão e deformação (RODRIGUES E MARTINS, 2010).

Conforme Garcia (2000), como a curva de tensão-deformação convencional se baseia nas dimensões originais do corpo de prova, não é possível obter os valores verdadeiros de deformação para cada tensão aplicada durante o ensaio. A relação entre tensão e deformação é baseada nos valores instantâneos. A Figura 13 apresenta uma comparação da curva obtida com o ensaio convencional ou nominal, que se baseia inteiramente nas dimensões originais do corpo de prova, e a curva de relação tensão e deformação verdadeira.

Na região de deformação plástica uniforme, que ocorre após a tensão de escoamento, aonde se inicia o encruamento, até o ponto de força máxima, a deformação verdadeira ε_v pode ser obtida por meio de uma relação com a deformação convencional ε_c , conforme apresentado na Equação 8. Da mesma forma, a tensão verdadeira pode ser obtida por meio da Equação 9, que relaciona a tensão verdadeira σ_v com a tensão convencional σ_c e a deformação convencional ε_c (GARCIA, 2000).

$$\varepsilon_v = \ln (1 + \varepsilon_c) \quad (8)$$

$$\sigma_v = \sigma_c (1 + \varepsilon_c) \quad (9)$$

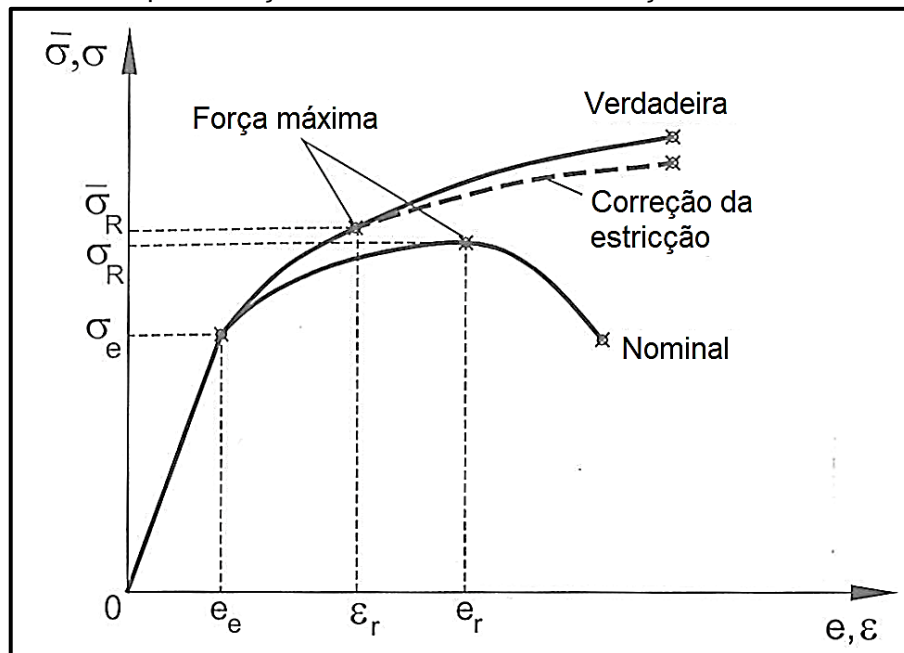
Conforme Rodrigues e Martins (2010), após o ponto de força máxima, a plasticidade deixa de ser uniforme para ser localizada, dando início à estricção do material, onde a tensão necessária para deformação se torna menor gradativamente até que ocorra a fratura. Nesta etapa as tensões e deformações são obtidas com base nos valores instantâneos. A partir da Equação 10 é obtido o valor da tensão a partir da relação da força instantânea F_I com a área de seção transversal do corpo de prova instantânea A_I . Da mesma forma, a deformação para a respectiva tensão é obtida a partir da relação da área instantânea com a área inicial, conforme Equação 11.

$$\sigma = \frac{F_I}{A_I} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A_I} \quad (11)$$

Conforme a área de seção transversal do corpo de prova é alterada durante a estricção do material, o estado de tensão passa a se tornar triaxial, tornando complexa sua obtenção, e desta forma necessita de correção (RODRIGUES E MARTINS, 2010). A diferença na relação obtida após a correção pode ser observada na Figura 13, iniciando no ponto de força máxima, de tensão $\bar{\sigma}_R$ e aumentando conforme o avanço da estricção. No gráfico pode ser observado também o ponto referente a tensão de escoamento σ_e que dá início a deformação plástica, causando divergência entre a curva nominal e a verdadeira.

Figura 13 – Representação da curva tensão-deformação verdadeira e nominal



Fonte: adaptado de Rodrigues e Martins (2010).

2.2.5 Contato

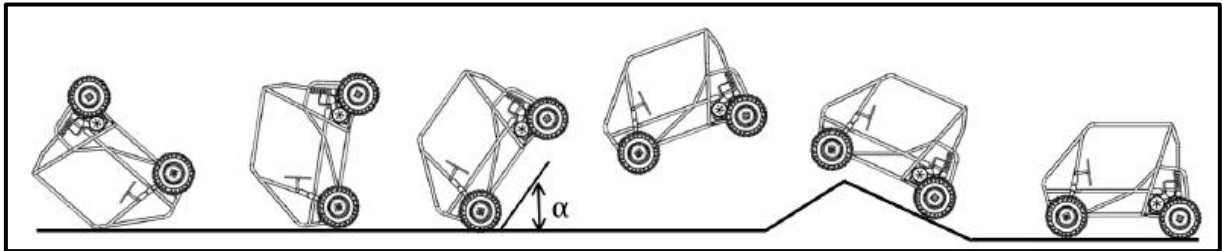
Conforme Alves Filho (2013), para resolver problemas de elementos finitos de forma computacional é necessário atribuir condições de contorno à estrutura, que representam os apoios e engastes de forma que não ocorra movimento de corpo rígido. Ocorrem casos em que, devido ao carregamento exercido sobre uma estrutura, a deformação sofrida faz com que sua superfície entre em contato com outra superfície ou parede rígida. Neste momento as condições de apoio, ou de contorno, são alteradas em relação à condição inicial e consequentemente ocorre alteração da matriz de rigidez.

Além do contato causado por pequenos deslocamentos, que alterando as condições de contorno tornam a deformação não linear, podem acontecer situações aonde ocorrem grandes deformações somadas ao movimento entre as superfícies ou estruturas, como é o caso de colisões veiculares, onde o movimento relativo entre as mesmas faz com que seja exercida uma força proveniente do atrito dinâmico (ALVES FILHO, 2013).

Mosquen (2012) desenvolveu uma metodologia para a simulação de condição de capotamento frontal, aplicando-o em uma estrutura tubular do tipo baja. A Figura 14 apresenta a dinâmica de capotamento utilizada pelo mesmo, onde o veículo, após passar por uma rampa e perder o contato com o solo, sofre uma inclinação em torno de seu eixo, tocando o chão primeiramente apenas com a parte dianteira, com um ângulo de inclinação α tal que o momento resistente não é suficiente para que o movimento de giro pare, resultando no capotamento do veículo. Para a simulação, Mosquen utilizou-se de elementos estruturais de

viga a fim de reduzir o esforço computacional e foi definido o parâmetro de velocidade de 34,2 km/h e aceleração nula. Para a condição de contato, foi considerada aceitável a intrusão de nós escravos na superfície mestre, porém aplicando uma penalidade. A deformação resultante do capotamento não foi invasiva ao habitáculo do piloto, mostrando que apesar de ocorrerem deformações plásticas nos tubos, o veículo é seguro para a condição simulada.

Figura 14 – Dinâmica de capotamento frontal de um veículo baja



Fonte: adaptado de Mosquen (2012).

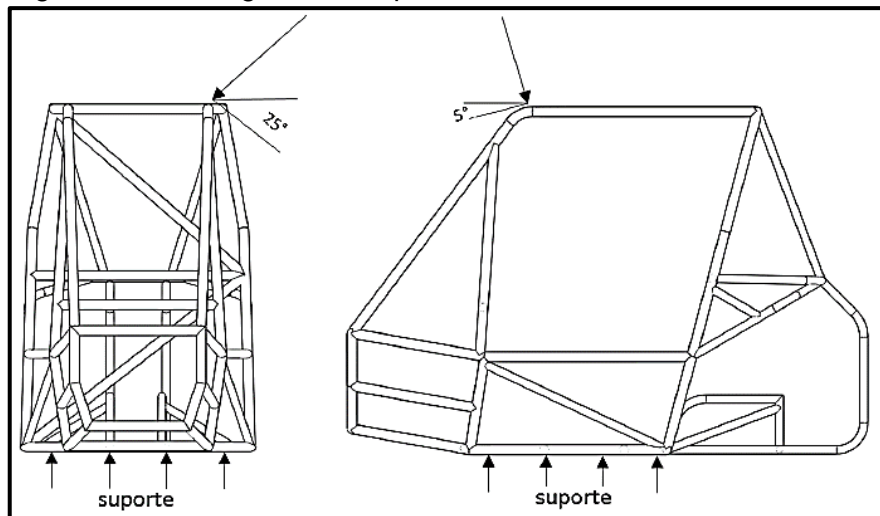
Pereira (2016) utilizou-se de uma metodologia para realizar a simulação de capotamento e de impacto frontal às velocidades de 80 km/h e 60 km/h. Para definir de forma precisa os carregamentos e restrições de deslocamento no modelo de estudo, uma estrutura veicular tubular do tipo *space-frame* desenvolvida a partir de um modelo físico existente, considerou as tensões existentes devido a carregamentos internos e as forças externas devido às velocidades de impacto definidas. Para a simulação, Pereira utilizou um elemento tetraédrico quadrático de dez nós com três graus de liberdade. Os resultados obtidos a partir das análises de colisão frontal demonstraram deslocamentos de até 112 mm na proteção frontal do chassi, dissipando a energia do impacto e desta forma não causando risco ao piloto para o tipo de veículo estudado.

Lottermann (2014), a fim de validar a segurança de um modelo de veículo baja, simulou condições de pontos e intensidades de aplicações de cargas nas condições críticas, de impacto com base em normas de impacto para veículos de competição. A condição descrita pela norma define as intensidades das cargas nas direções x, y e z para uma situação de capotamento. Além disso, o mesmo realizou um ensaio estático de aplicação de forças pontuais nos sentidos vertical, frontal e lateral, em um protótipo. Neste ensaio foram observadas as deflexões em dez pontos da estrutura. Segundo Lotterman, a deflexão máxima permitida nas três direções era de 152,4 mm de acordo com o regulamento do baja, a fim de não atingir o piloto. Os resultados obtidos por simulação computacional encontraram-se dentro do limite, com deslocamento máximo inferior a 25 mm para as intensidades de impacto consideradas.

Gugel (2018), desenvolveu um modelo estático não linear em elementos finitos a fim de simular uma condição de esmagamento de teto em um modelo de veículo baja, utilizando

como base a norma FMVSS 216 do programa *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) para definir os parâmetros de impacto. O estudo realizado comparando duas versões do projeto aplicando a carga referente a quatro vezes a massa da estrutura, conforme a norma. A Figura 15 apresenta a posição da carga aplicada para simulação a condição de esmagamento de teto. Os resultados apresentaram deformações plásticas nos tubos da estrutura, porém deformações próximas a 10 mm, não apresentando riscos ao piloto.

Figura 15 – Carregamentos aplicados conforme norma FMVSS 216



Fonte: Gugel (2018).

2.3 CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO

Em condições de carregamento uniaxial, como ocorre na realização de ensaios de tração, sabe-se que uma vez atingida a tensão de escoamento, o material passa a sofrer deformação plástica. Em outras situações de carregamentos, entretanto, a definição do início de escoamento depende de análise mais criteriosa, de forma que foram criados diversos critérios de escoamento ao longo do tempo, buscando, de forma mais ou menos conservadora, indicar o início desta condição nos materiais (ALVES FILHO, 2013).

2.3.1 Critério de Von Mises

O critério de von Mises propõe o início do escoamento diretamente relacionado às tensões cisalhantes, por meio de tensões desvio, ou seja, que não se encontram em direção normal. De forma geral, este critério transforma um estado multiaxial em um de tensão única, desta forma permitindo a comparação com a tensão de escoamento uniaxial, que pode ser obtida por meio de ensaio de tração (ALVES FILHO, 2013).

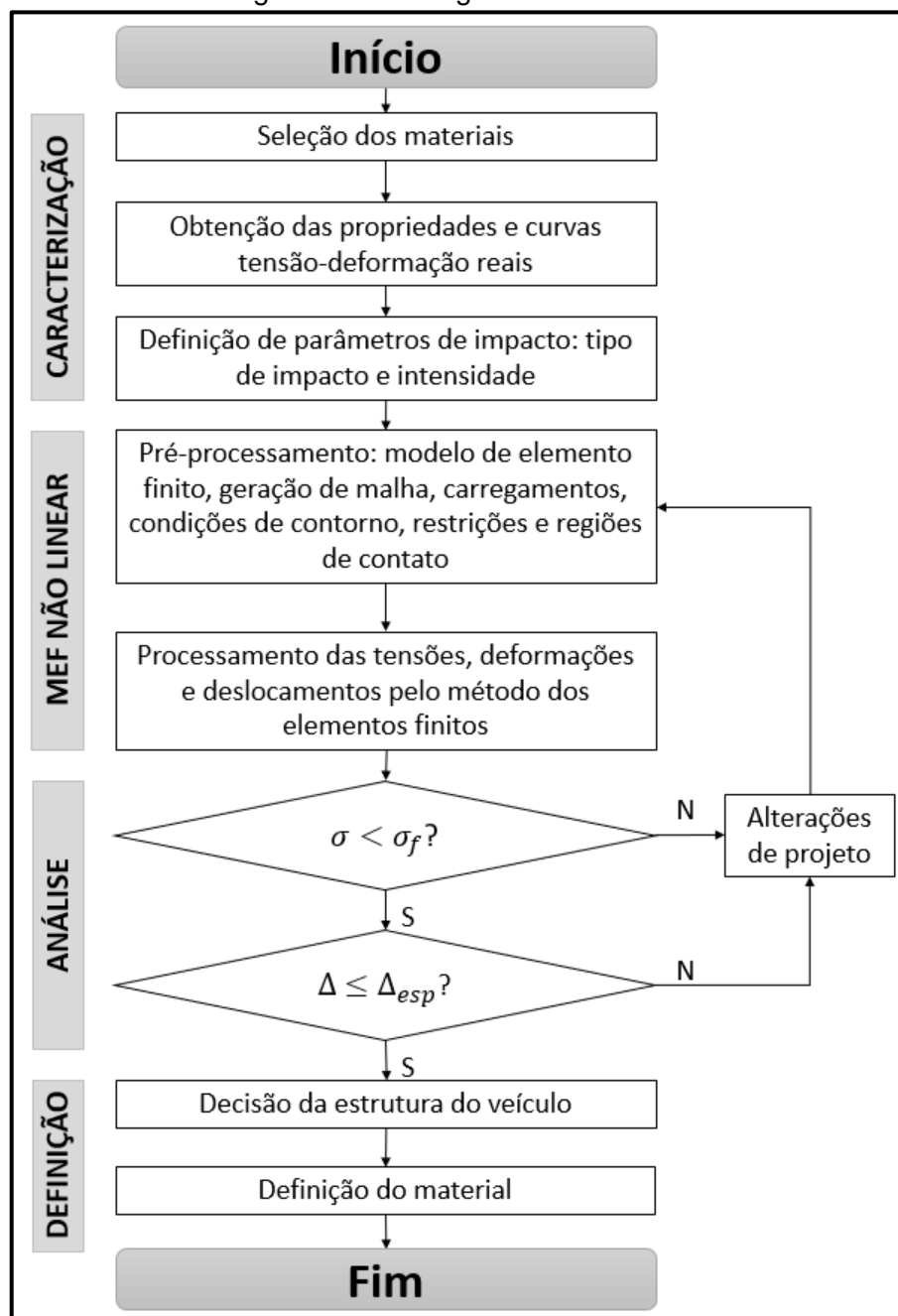
Kim e Sankar (2011), afirmam que o valor crítico da energia de distorção, o qual causa o início do escoamento do material, pode ser obtido por meio de ensaio uniaxial, no momento em que a tensão de von Mises ultrapassa o escoamento. A tensão de von Mises σ_{VM} pode ser descrita conforme a Equação 12 para componentes gerais de tensão.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{xx}\sigma_{yy} + 3\tau_{xy}^2} \quad (12)$$

3 METODOLOGIA

Este trabalho teve por objetivo analisar o comportamento da estrutura de um veículo em situações controladas de colisão utilizando ferramentas de simulação computacional. A Figura 16 ilustra o fluxograma desenvolvido para a aplicação da metodologia proposta. Para a avaliação, foi utilizado o veículo *off-road* Baja, uma estrutura do tipo gaiola com composição e disposição de materiais de acordo com o regulamento definido pela SAE Brasil para os participantes das competições anuais promovidas pela mesma.

Figura 16 – Fluxograma de trabalho



Fonte: o autor (2019).

3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Com o objetivo de atender aos critérios definidos no regulamento da competição e gerar um resultado aplicável ao desenvolvimento dos veículos baja na Universidade de Caxias do Sul, foi definido o material SAE 4130, o qual foi utilizado na construção dos últimos veículos desenvolvidos pela universidade. Para realizar a comparação, definiu-se o material SAE 1018, o qual atende ao regulamento da competição, porém possui propriedades distintas do primeiro material, apresentando teor de carbono menor, bem como propriedades mecânicas inferiores.

3.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Os materiais selecionados compõem toda a estrutura tubular do veículo. Em ambos os casos, a estrutura foi dividida em membros primários e secundários, onde os tubos classificados como primários possuem diâmetro de 31,75 mm e espessura de 1,6 mm e os tubos classificados como secundários possuem diâmetro de 25,4 mm e espessura de 0,9 mm. Estas dimensões foram definidas com base no último veículo baja desenvolvido pela equipe da Universidade de Caxias do Sul, o qual atende aos regulamentos da competição.

Em ambos os casos foram considerados tubos sem costura, trefilados a frio. A Tabela 1 apresenta a composição química, bem como as propriedades mecânicas do material SAE 1018.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas e composição química do material SAE 1018

Propriedades Mecânicas		Composição Química (%)	
Propriedade	Especificação	Elemento	Especificação
Limite de Resistência a Tração [MPa]	450	C	0,14 - 0,20
Limite de Escoamento [MPa]	380	Mn	0,60 - 0,90
Alongamento [%]	16	P	0,040 (Máx.)
Módulo de Elasticidade [GPa]	200	S	0,050 (Máx.)
Redução de Área [%]	40		

Fonte: Matweb (2019).

A Tabela 2 apresenta as propriedades relacionadas ao material SAE 4130, o qual possui valores superiores de resistência a tração, limite de escoamento, bem como alongamento máximo.

O comportamento elástico dos materiais foi obtido a partir dos módulos de elasticidade dos mesmos. Para a região plástica, a partir da curva de engenharia (obtida por meio dos valores de limite de escoamento, resistência a tração e alongamento, e ajustada por

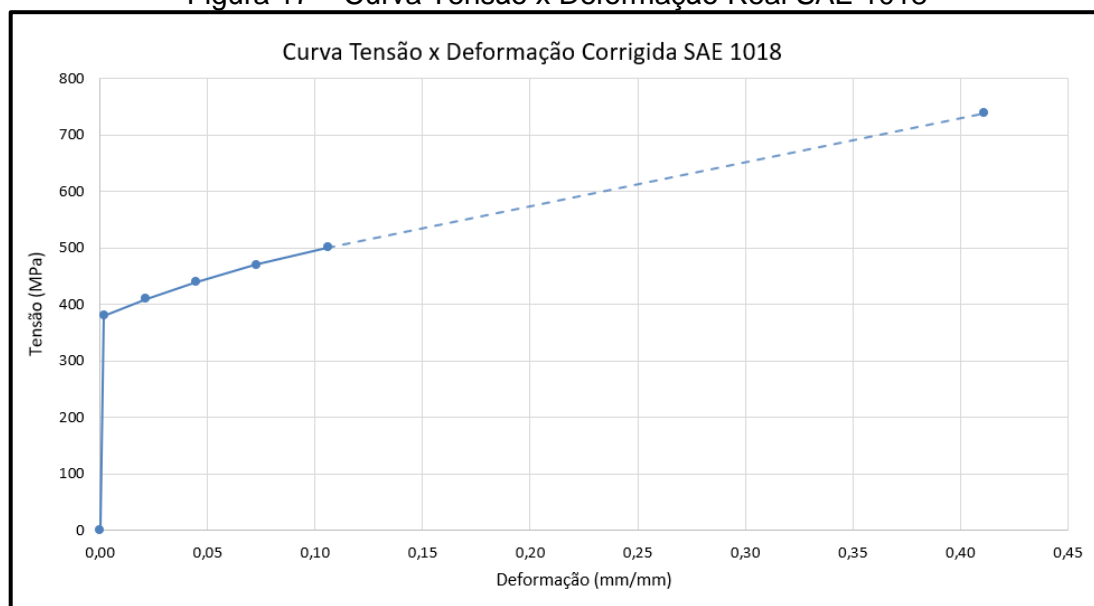
meio de uma equação polinomial) foi realizada uma correção das tensões e deformações, conforme Equações 8 e 9, até o início da estricção do material. Para a estricção foi corrigido o valor final de deformação do material a partir da informação da redução da área do mesmo na ruptura e a tensão final foi ajustada a partir da tangente da curva no ponto de início de estricção. Desta forma, os valores de tensão e deformação na região plástica dos materiais foram obtidos através de ajustes contendo um grau de diferença em relação aos valores verdadeiros, que poderiam ser obtidos por meio de ensaio de tração através da medição da área instantânea de corpos de prova em diversos pontos durante o ensaio até a ocorrência da ruptura. Foram geradas as curvas apresentadas nas Figuras 17 e 18, respectivamente, que demonstram os pontos utilizados para gerar os resultados no *software Abaqus*.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas e composição química do material SAE 4130

Propriedades Mecânicas		Composição Química (%)	
Propriedade	Especificação	Elemento	Especificação
Limite de Resistência a Tração [MPa]	703	C	0,28 - 0,33
Limite de escoamento [MPa]	540	Cr	0,80 – 1,1
Alongamento [%]	24,5	Mn	0,40 - 0,60
Módulo de Elasticidade [GPa]	205	Mo	0,15 - 0,25
Redução de Área [%]	69,2	P	0,035 (Máx.)
		Si	0,15 – 0,30
		S	0,040 (Máx.)

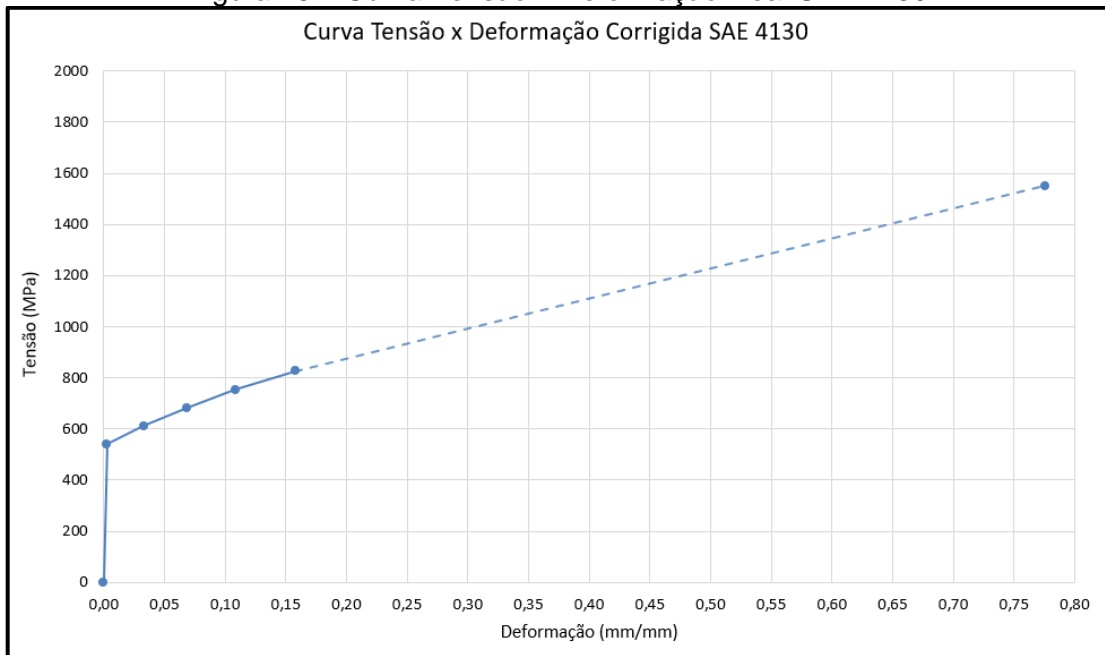
Fonte: Matweb (2019).

Figura 17 – Curva Tensão x Deformação Real SAE 1018



Fonte: o autor (2020).

Figura 18 – Curva Tensão x Deformação Real SAE 4130



Fonte: o autor (2020).

3.3 PARÂMETROS DE IMPACTO

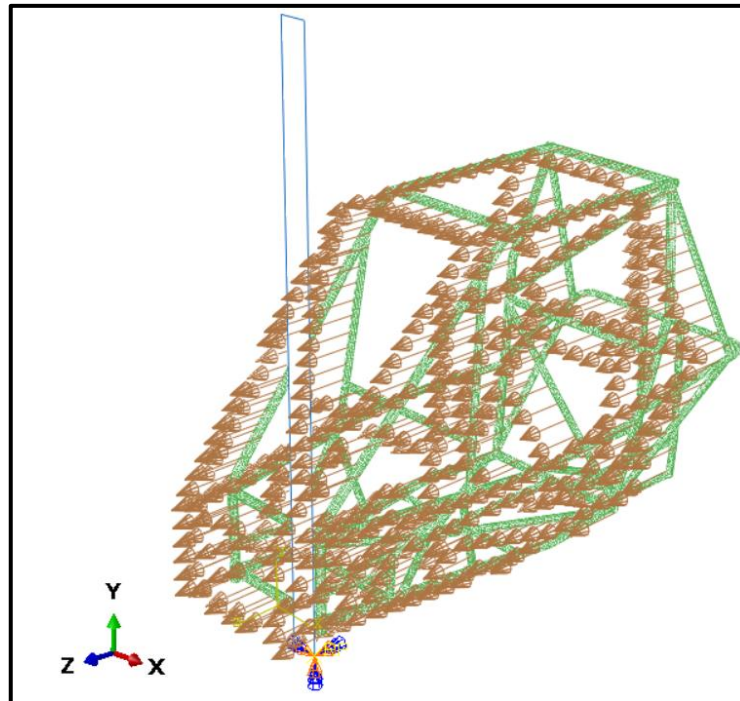
A situação de impacto definida constituiu-se de um cenário de colisão frontal contra uma parede rígida fixa. Para a execução da simulação dinâmica considerou-se o veículo movendo-se, em duas velocidades diferentes. Com base nas situações reais de uso do veículo, consideraram-se as velocidades de 30 km/h e 40 km/h, as quais entende-se como velocidades que o veículo pode alcançar durante as provas mais rápidas da competição SAE Baja. A Figura 19 representa os vetores de velocidade e a parede rígida com a qual a estrutura colidiu durante os experimentos. A parede rígida consiste de um plano infinito nas coordenadas x-y, de forma que a mesma é atingida por todos componentes do plano frontal da estrutura.

3.4 PRÉ-PROCESSAMENTO

Para realizar o pré-processamento da estrutura, utilizou-se o *software Altair Hypermesh* importando o modelo CAD 3D da estrutura desenvolvido no *software SolidWorks*.

Foi definido para a simulação o modelo de casca, indicado para situações onde as dimensões do modelo em duas direções são muito maiores do que na terceira direção. Além disso, o modelo permite obter boa qualidade e precisão de resultados, superiores aos elementos unidimensionais como de viga e com tempo de processamento menor do que no caso de elementos sólidos ou tridimensionais.

Figura 19 – Representação dos vetores de velocidade e parede rígida



Fonte: o autor (2020).

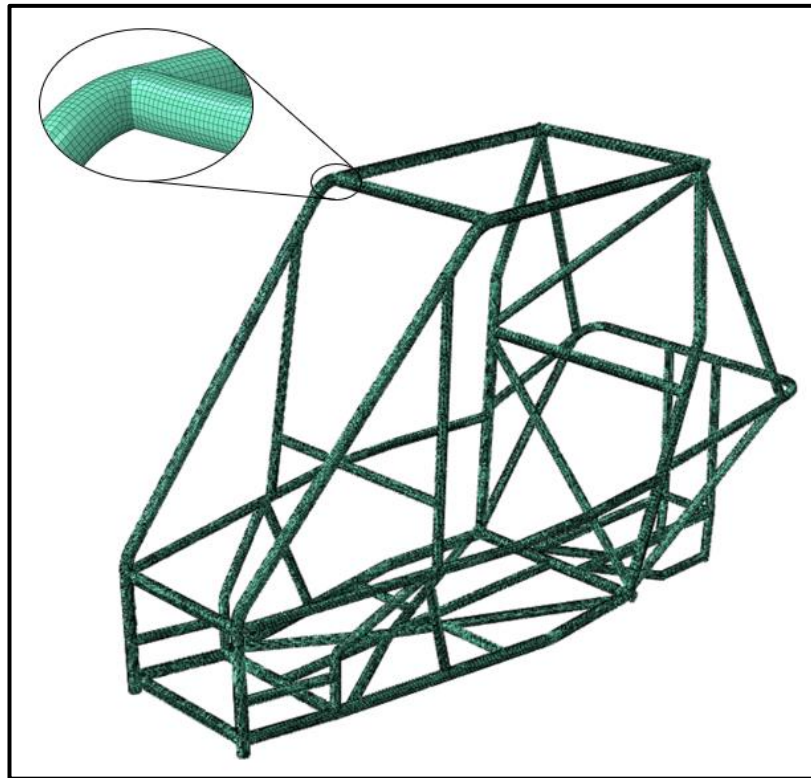
Dessa forma, inicialmente foi gerada uma superfície intermediária, denominada *Middle Surface* ou *Midsurface*. A estrutura foi dividida em dois componentes devido à diferença das dimensões dos tubos primários e secundários.

Foram utilizados dois tipos de elementos finitos para geração da malha, um elemento triangular de três nós, denominado S3 e um elemento quadrilateral de quatro nós, denominado S4R. A malha foi gerada com elementos de 3 a 3,5 mm de comprimento com um total de 226926 elementos e 224938 nós. A Figura 20 representa a malha gerada na estrutura.

Foram consideradas as cargas relacionadas aos componentes do veículo e o piloto, os quais são suportados pela estrutura. Foi representado um piloto de 80 kg, o qual foi considerado a partir de um ponto de massa localizado em seu centro geométrico. Na parte de trás da estrutura foi considerado também um ponto de massa, representando as massas da caixa e do motor, somando 25 kg e posicionado no centro geométrico dos componentes. Por fim, foram considerados os esforços de sustentação da estrutura, relacionados aos braços da suspensão, representando, conforme indicado pelo catálogo do fornecedor, uma força de 259,2 N na posição inicial da mola (TOBAJA, 2019). A Figura 21 apresenta os pontos de massa e os vetores relacionados aos esforços aplicados na estrutura.

Por fim, foi definido o contato das superfícies que sofrem interação durante o processamento, sendo situações de contato da estrutura com a parede rígida e o contato entre componentes da própria estrutura, situação necessária devido aos grandes deslocamentos relacionados a deformação plástica dos tubos.

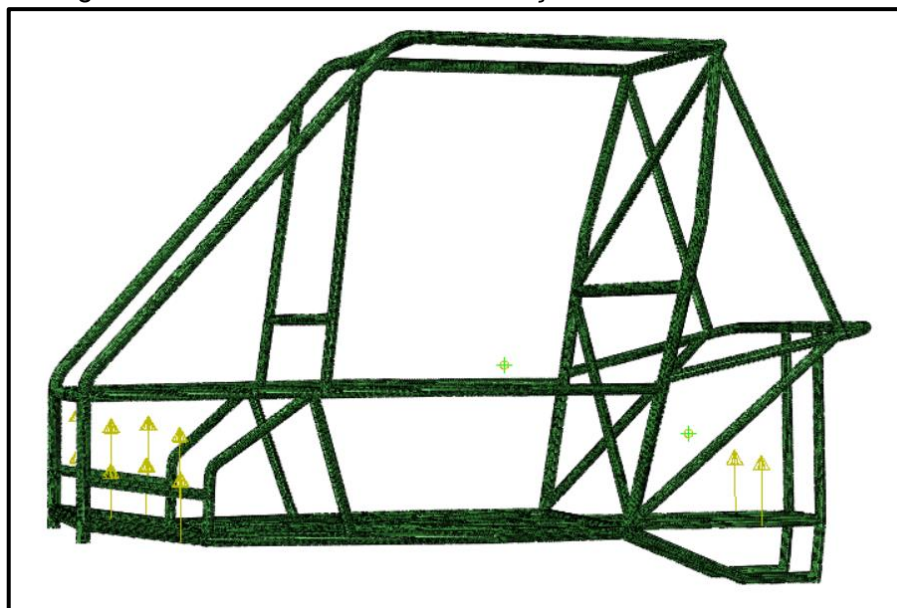
Figura 20 – Malha de elementos finitos



Fonte: o autor (2020).

A superfície rígida foi definida como mestre e a estrutura como escrava, dessa forma durante o impacto, os nós da parede rígida interagem com os nós mais próximos da estrutura de forma que os nós da estrutura nunca penetram na parede, porém o inverso ocorre.

Figura 21 – Pontos de massa e esforços atuantes na estrutura



Fonte: o autor (2020).

3.5 PROCESSAMENTO E PÓS-PROCESSAMENTO

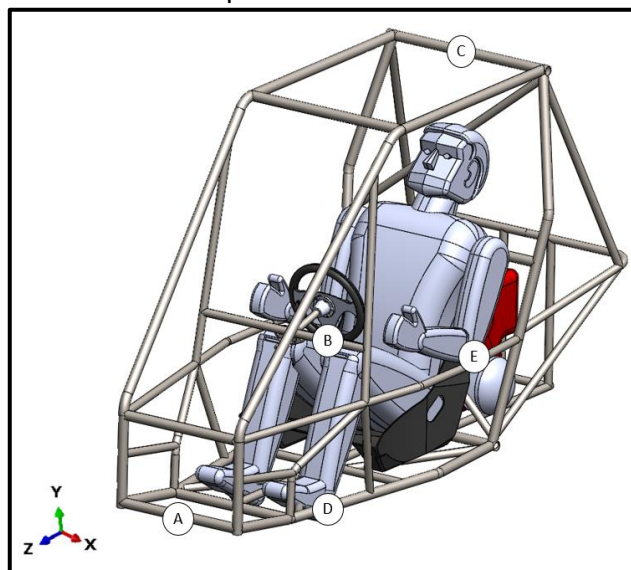
O processamento é realizado por meio do *software Abaqus*, onde o modelo preparado no *software Hypermesh* é importado, a fim de realizar as simulações dinâmicas explícitas. No *software Abaqus* é também realizado o pós-processamento, gerando gráficos e analisando as tensões, deformações e deslocamentos resultantes das diversas simulações de impacto.

3.6 ANÁLISE

As tensões máximas resultantes devem ser inferiores à tensão de ruptura do material, dessa forma, a partir dos resultados obtidos, as tensões foram comparadas com as tensões de ruptura para que se necessário, o projeto seja alterado a fim de reduzir estas tensões.

Os deslocamentos sofridos pelos componentes da estrutura, em todas as direções não devem ultrapassar os limites definidos. Estes limites estão relacionados ao regulamento da competição, o qual estabelece que o veículo baja deve atender com segurança condutores de 1,45 m até 1,90 m de altura (SAE BRASIL, 2019), especificando folgas mínimas entre os membros da estrutura e o piloto nas regiões da cabeça, ombros, troncos, quadril, joelhos, braços, cotovelos, mãos e pernas do mesmo. Na Figura 22 está representado dentro da estrutura um condutor com a altura máxima que deve ser atendida. Os pontos demarcados na figura representam as regiões de controle, onde os resultados obtidos devem ser comparados com os limites de deslocamento invasivo dos tubos na situação de colisão, apresentados na Tabela 3, para que se necessário o projeto seja alterado.

Figura 22 – Conductor representado dentro da estrutura do Baja



Fonte: o autor (2020).

Tabela 3 – Deslocamento máximo permitido

Ponto	Deslocamento Máx. (mm)	Eixo
A	300	Z
B	110	Z
C	200	Y
D	40	X
E	80	X

Fonte: o autor (2020).

Satisfazendo os dois critérios de avaliação do projeto, o mesmo é validado e o processamento dos resultados para cada condição é realizado a fim de avaliá-los comparativamente e definir o material mais adequado para construção do veículo. O material é definido como aquele em que as tensões menos se aproximam das tensões de ruptura ou da zona de estrição do material e que resulta em menores deflexões.

4 RESULTADOS

As simulações de colisão frontal da estrutura do veículo baja contra uma superfície rígida foram realizadas em quatro situações diferentes, considerando variações de material e de velocidade de impacto, conforme a Tabela 4.

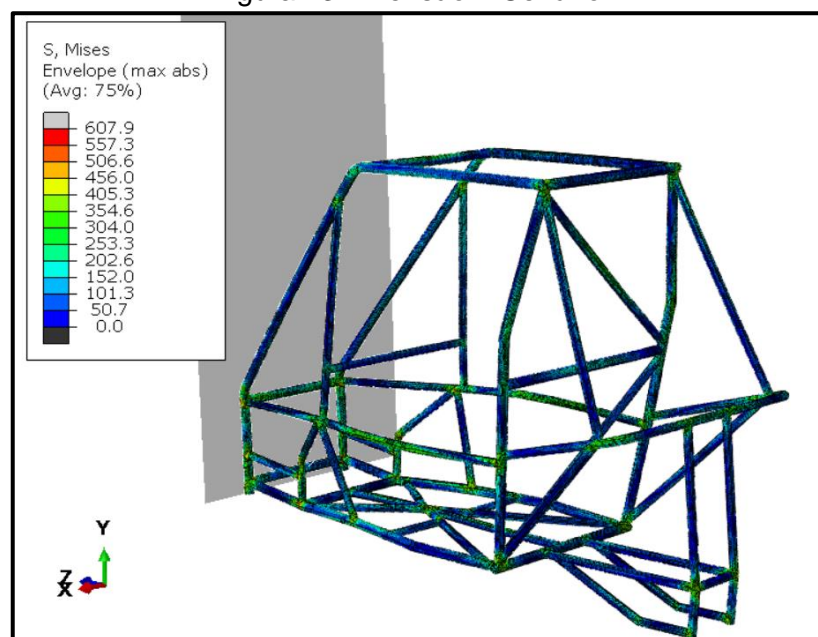
Tabela 4 – Cenários de simulação

Cenário	Velocidade (km/h)	Velocidade (mm/s)	Material
A	30	8333,33	SAE1018
B	40	11111,11	SAE1018
C	30	8333,33	SAE4130
D	40	11111,11	SAE4130

Fonte: o autor (2020).

Primeiramente simulou-se a situação A, com o material SAE 1018 à velocidade de 30 km/h, onde a maior tensão encontrada pelo critério de Von Mises foi de 608 MPa, na parte dianteira inferior da estrutura, Figura 23. Esta tensão é inferior ao limite suportado pelo material, que devido ao ajuste realizado na curva, é de 738 MPa, porém superior à tensão de início da estrição do material, 501 MPa. Desta forma a estrutura sofreu deformações plásticas, pois a tensão encontrada superou a tensão de escoamento do material, e em pontos onde ocorrem concentrações de tensão, o material sofreu estrição.

Figura 23 – Tensão – Cenário A

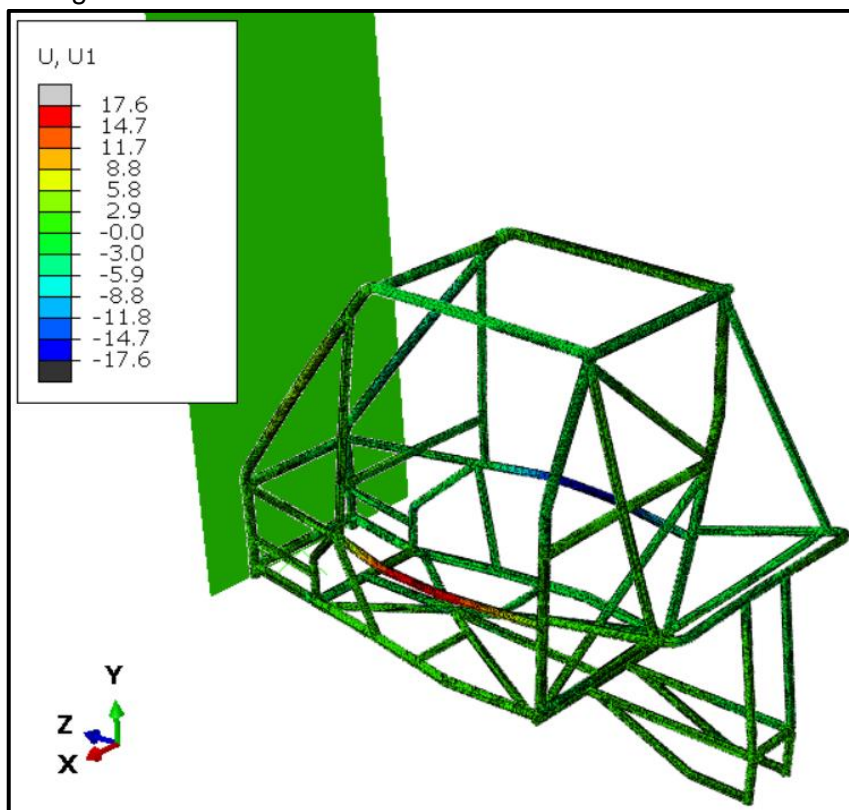


Fonte: o autor (2020).

A análise explícita em função do tempo permite observar a distribuição da energia gerada pelo impacto frontal por toda a estrutura, onde os valores máximos se localizam no plano frontal da gaiola e se distribuem primeiramente pela região inferior e em sequência também pela região superior do conjunto. As regiões de tensões máximas se encontram nas juntas dos tubos, as quais são pontos de concentração de tensão. Não foram considerados elementos de solda nas juntas.

Na direção do eixo x os tubos laterais foram os que sofreram maior deslocamento, com máximo de 18 mm, conforme ilustra a Figura 24. Como consequência da posição do impacto e dos raios de dobra dos tubos laterais, que geram uma tendência de deformação para o sentido externo da gaiola, a deformação gerou um espaço interno maior que o original. Dessa forma, na situação de colisão frontal, não há risco para o piloto em relação aos tubos laterais indicados na metodologia pela posição de controle E.

Figura 24 – Deslocamento no sentido do eixo x – Cenário A



Fonte: o autor (2020).

Na direção do eixo y, o deslocamento máximo foi de 54 mm no ponto de controle C. O deslocamento ocorreu no sentido positivo do eixo e desta forma não apresentou risco ao piloto. A Figura 25 demonstra a posição dos tubos que sofreram maior deslocamento na sua posição original e posição durante o impacto no eixo y. Na direção do eixo z a estrutura sofreu deslocamento máximo de 37 mm na região superior, não se aproximando dos limites de deslocamento dos pontos de controle A e B.

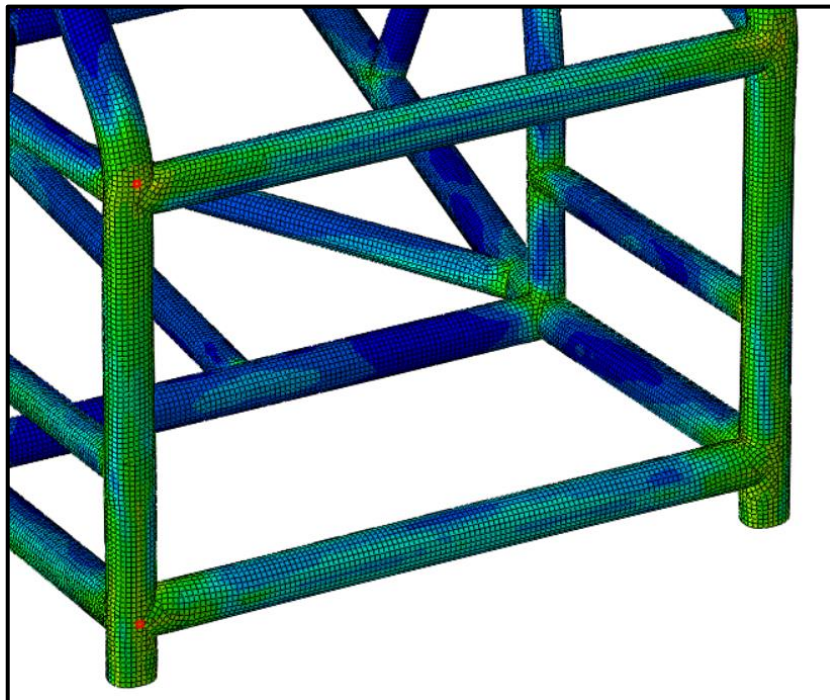
Figura 25 – Deslocamento da estrutura no eixo y – Cenário A



Fonte: o autor (2020).

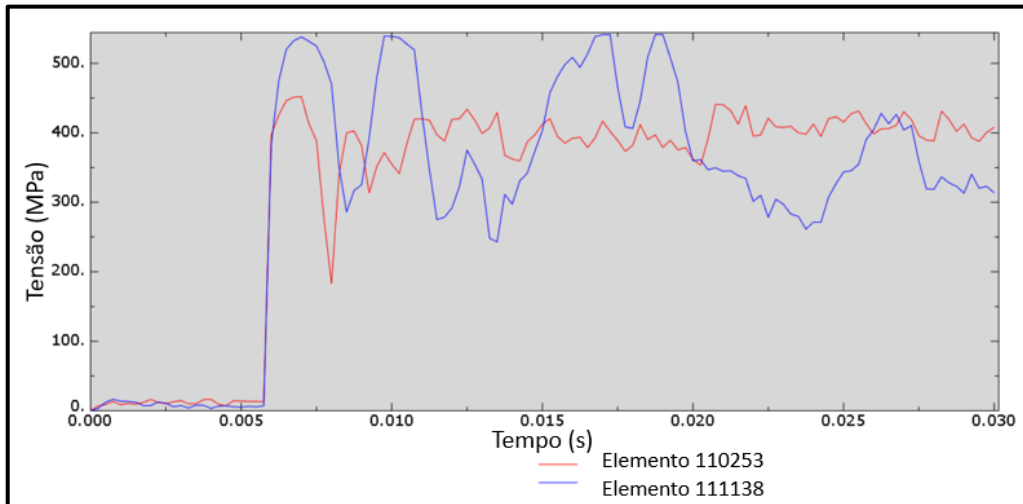
Os elementos 110253 e 111138, posicionados no plano frontal da estrutura e demonstrados na Figura 26, destacados em vermelho, sofreram tensões máximas de 452 MPa e 541 MPa respectivamente, e as tensões sofridas durante o período analisado antes e durante o impacto são demonstradas na Figura 27, tendo o elemento 111138, o qual é localizado na região mais superior, sofrido maiores tensões.

Figura 26 – Elementos 110253 e 111138



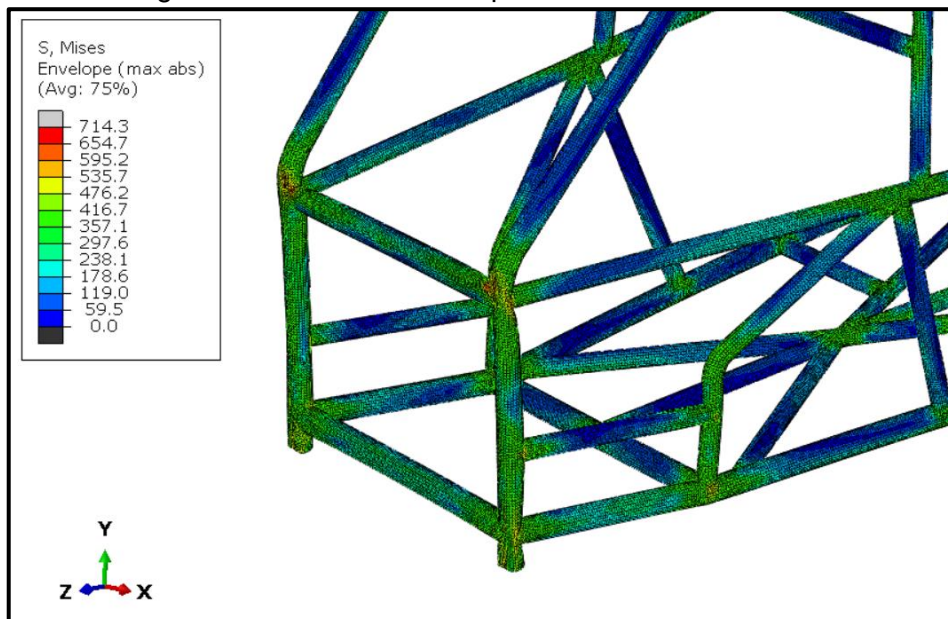
Fonte: o autor (2020).

Figura 27 - Gráfico Tensão x Tempo Elementos 110253 e 111138 – Cenário A



No segundo caso, cenário B, foi considerada a estrutura novamente com o material SAE 1018, porém à velocidade de 40 km/h. Neste caso a estrutura sofreu tensão máxima equivalente a 714 MPa, entrando em algumas regiões na zona de estrição do material, porém não ultrapassando a tensão de ruptura do mesmo, desta forma a estrutura sofreu deformação plástica, bem como estrição, porém o material não se rompeu. A Figura 28 representa a estrutura com a distribuição de tensão. Através do gradiente de cores é possível observar os pontos de pico de tensão localizados no plano frontal nas regiões de impacto direto com a parede rígida, onde estão representados também os amassamentos nos tubos, resultante das deformações plásticas sofridas.

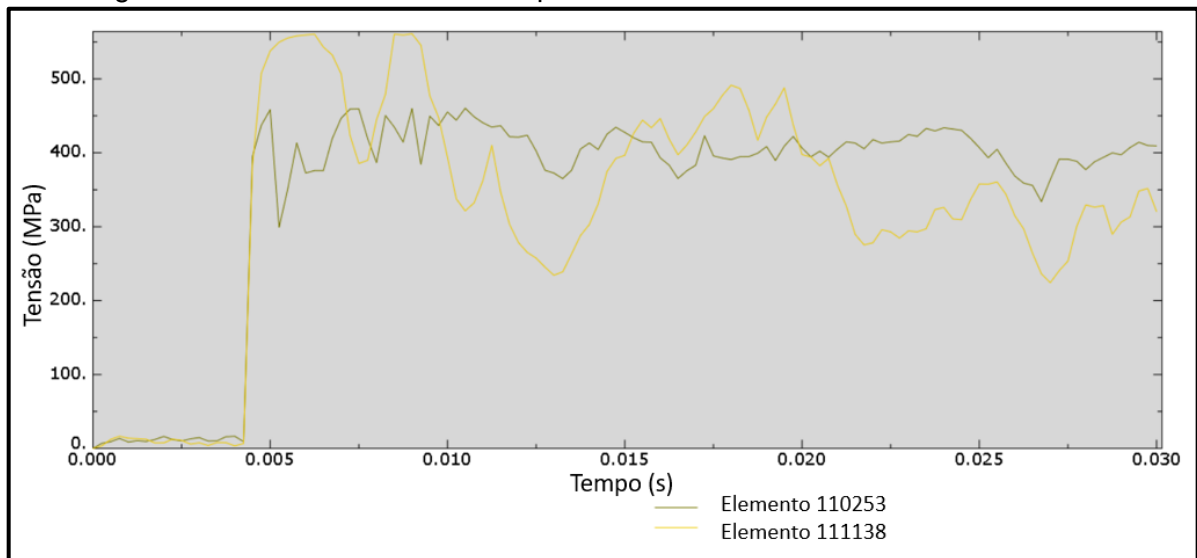
Figura 28 – Tensão sofrida pela estrutura – Cenário B



O deslocamento máximo no eixo x foi de 25 mm, novamente para o lado externo da gaiola nos tubos laterais. No eixo y a maior ocorrência foi de 69 mm no sentido positivo do eixo e no eixo z houve um deslocamento máximo de 62 mm na região superior da estrutura.

O gráfico da Figura 29 ilustra as tensões sofridas pelos elementos 110253 e 111138. Novamente os picos de tensões apresentados pelo elemento 111138, o qual está localizado em uma parte mais superior da estrutura, são superiores às tensões no elemento 110253, que por sua vez possui uma variação de tensão menor.

Figura 29 – Gráfico Tensão x Tempo Elementos 110253 e 111138 – Cenário B

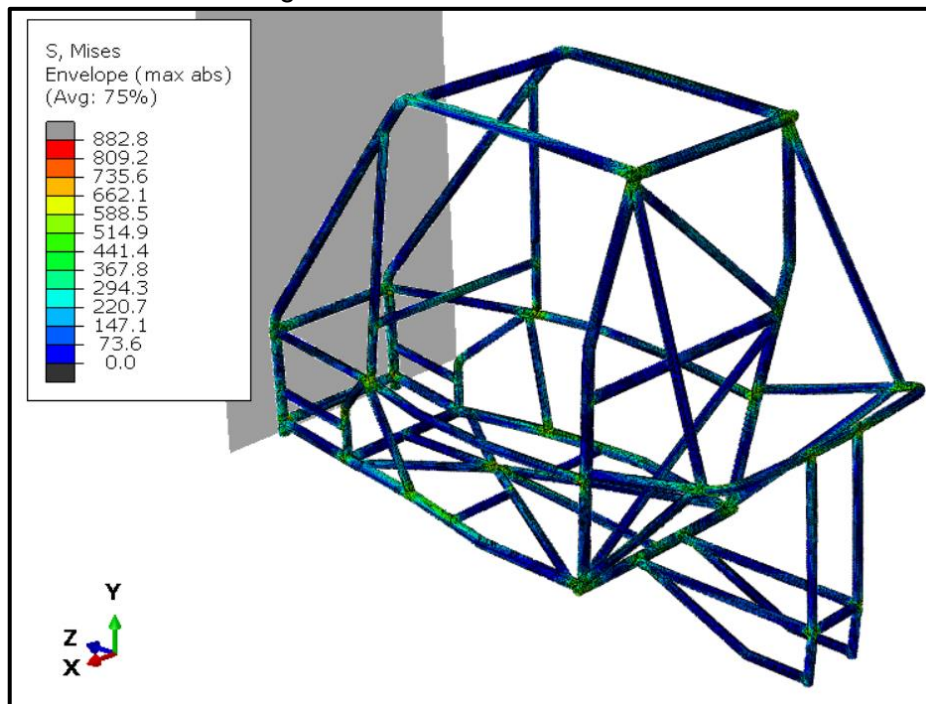


Fonte: o autor (2020).

Para o cenário C, utilizando o material SAE 4130 a uma velocidade inicial de 30 km/h. A tensão máxima encontrada foi de 883 MPa, Figura 30. A tensão máxima obtida no processamento é superior ao escoamento do material, dessa forma o mesmo sofreu deformação plástica em diversos pontos da estrutura. Ocorreram regiões com maior concentração de tensão em que as mesmas ultrapassaram a tensão de 825 MPa, referente ao início do comportamento de estricção do material.

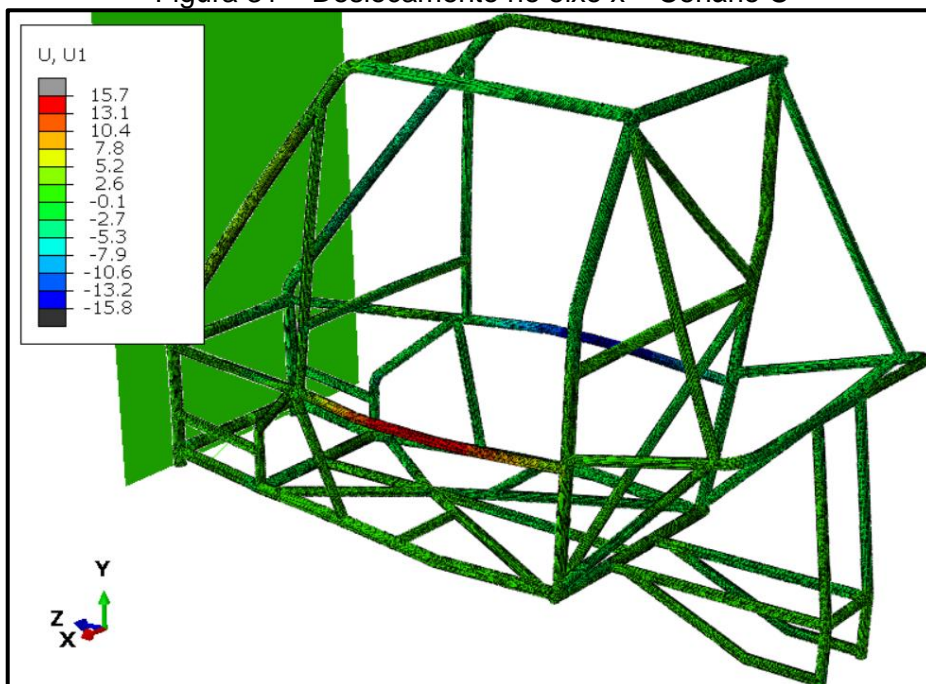
O maior deslocamento ocorreu na região superior da estrutura. A Figura 31 apresenta a maior deformação no sentido do eixo x, onde os tubos laterais deformaram para fora do centro da gaiola, com um deslocamento máximo de 16 mm. No eixo y o deslocamento máximo foi de 41 mm e no eixo z o máximo foi de 33 mm, ambos na região superior. Dessa forma em nenhuma região os deslocamentos da estrutura ultrapassaram o limite definido e assim não representando risco ao piloto.

Figura 30 – Tensões – Cenário C



Fonte: o autor (2020).

Figura 31 – Deslocamento no eixo x – Cenário C

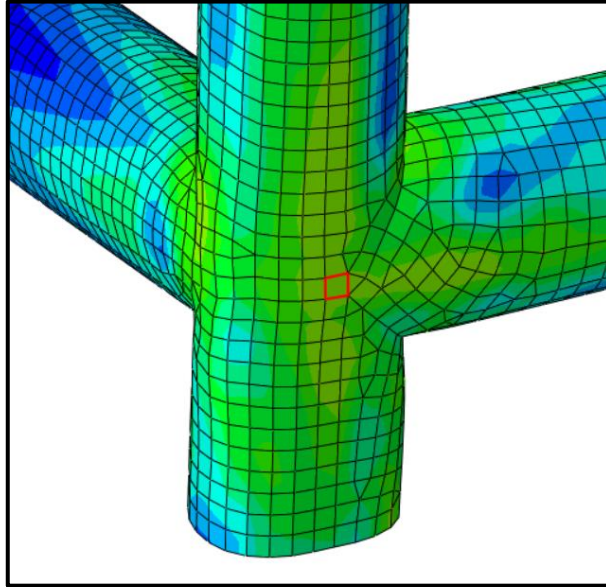


Fonte: o autor (2020).

Analisando o elemento 110253 localizado no tubo vertical direito, na parte inferior do plano frontal da gaiola, Figura 32. A tensão máxima observada no elemento foi de 637 MPa.

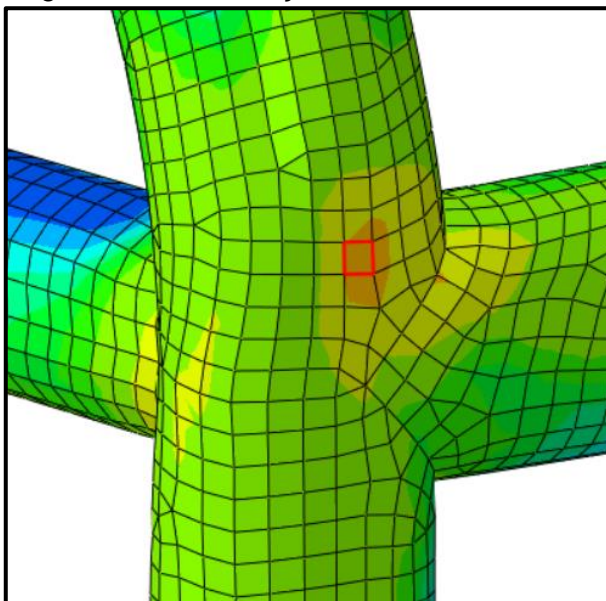
O elemento 111138 localiza-se também no tubo vertical direito do plano frontal da gaiola, porém na parte superior do plano, Figura 33. A tensão máxima observada no elemento foi de 796 MPa.

Figura 32 – Localização do elemento 110253



Fonte: o autor (2020).

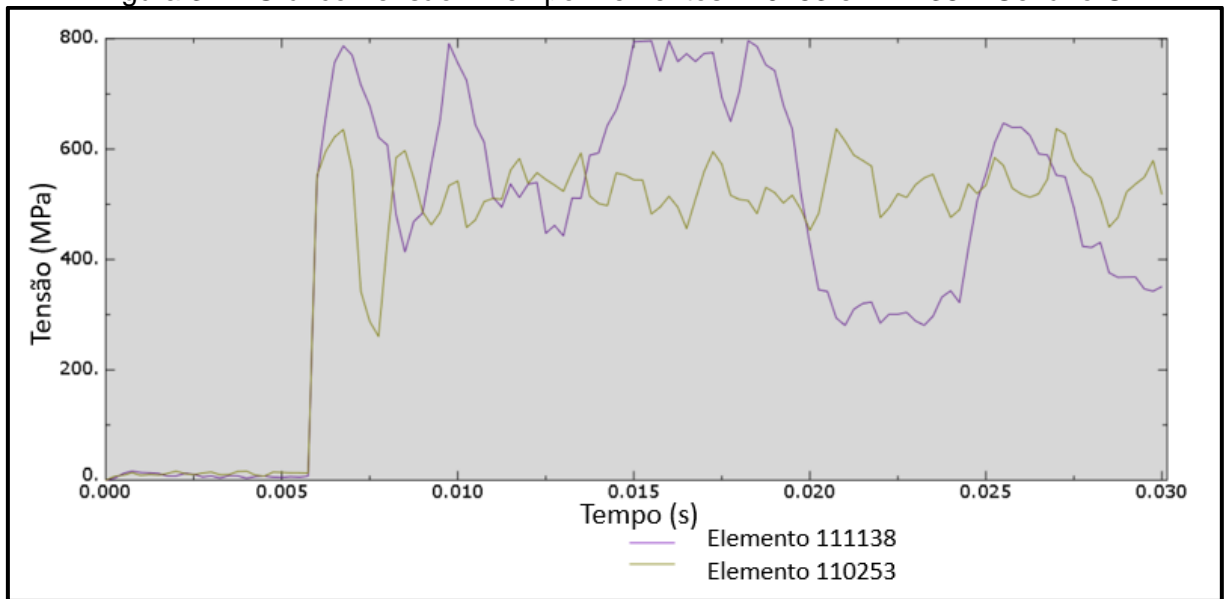
Figura 33 – Localização do elemento 111138



Fonte: o autor (2020).

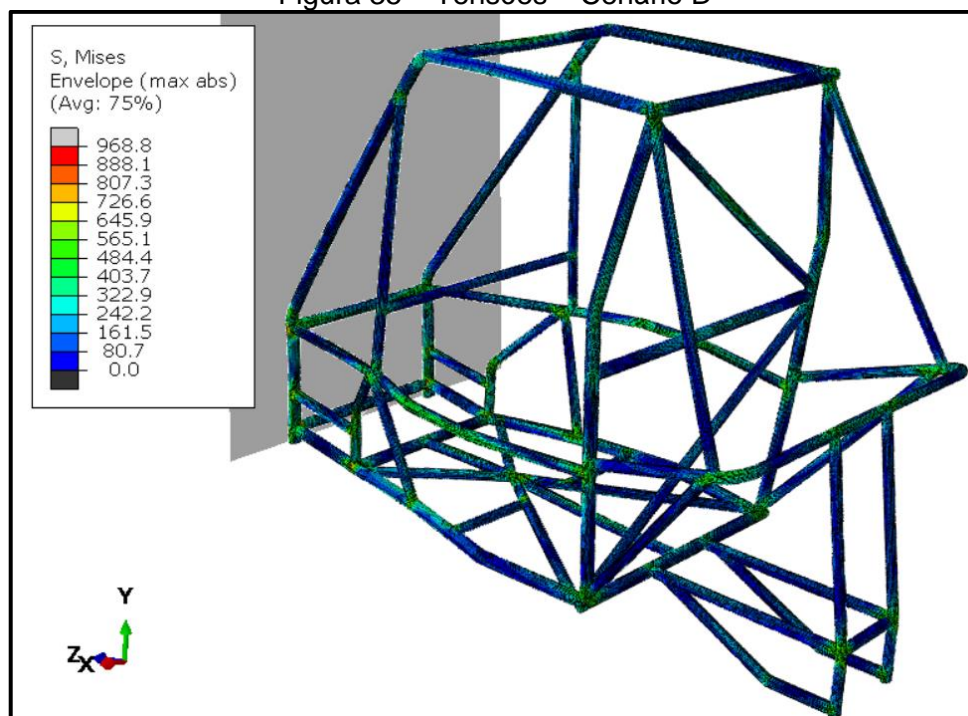
O gráfico apresentado na Figura 34 demonstra o comportamento da tensão exercida sobre os elementos 110253 e 111138, que são muito solicitados durante o impacto. O período inicial representa o momento de aproximação da estrutura em relação a parede rígida e em um período inferior a 0,001 segundos após o impacto já é possível observar um pico de tensão. O elemento 111138, localizado mais acima na estrutura apresenta maior variação de tensão.

Figura 34 – Gráfico Tensão x Tempo Elementos 110253 e 111138 – Cenário C



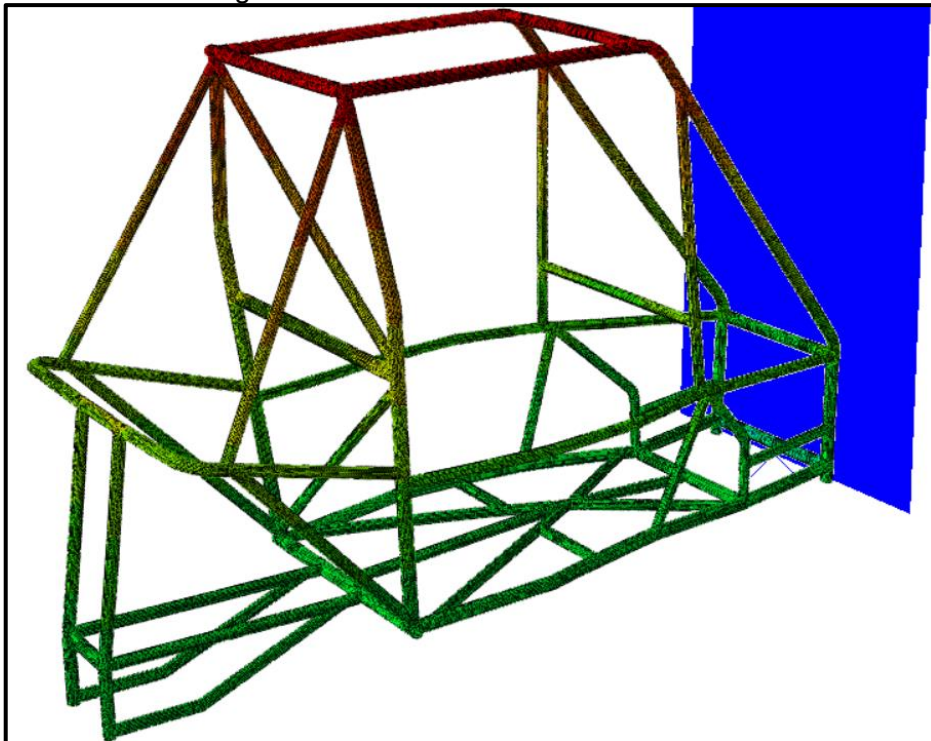
Por fim, foi considerado o cenário D, onde foi utilizado novamente o material SAE 4130, porém à uma velocidade de 40 km/h. A tensão foi superior ao cenário anterior, chegando a um valor máximo de 969 MPa, conforme Figura 35. Apesar da tensão máxima obtida ser superior à situação simulada em 30 km/h, o material novamente não chegou à tensão de ruptura, apesar de sofrer estrição. A estrição sofrida foi também consideravelmente inferior a relativa ao material SAE 1018 no cenário B.

Figura 35 – Tensões – Cenário D



Como demonstra a Figura 36, o maior deslocamento ocorreu na região superior da estrutura. Na direção do eixo x o deslocamento máximo com a estrutura deformada foi de 23 mm nos tubos laterais, onde a deformação dos tubos ocorreu para fora do veículo, não se aproximando dos limites de deslocamentos definidos D e E, e desta forma não apresentando risco ao piloto. Na direção do eixo y, o deslocamento foi de 53 mm na região superior frontal no sentido positivo do eixo. O deslocamento ocorrido no eixo z, eixo pelo qual a estrutura se deslocou até sofrer o impacto, indicou um máximo de 50 mm. Em nenhum caso o deslocamento causado pela colisão superou o limite definido para segurança do piloto.

Figura 36 – Deslocamentos – Cenário D



Fonte: o autor (2020).

Os elementos 110253 e 111138, cujas posições foram indicadas nas Figuras 32 e 33, no plano frontal da gaiola, sofreram tensões máximas de 645 MPa e 829 MPa, respectivamente. O gráfico apresentado na Figura 37 demonstra o comportamento da tensão sofrida por ambos elementos em função do tempo. É possível observar que o elemento 111138, localizado na região mais superior do plano frontal, sofreu tensões maiores.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos quatro cenários simulados, onde a última coluna refere-se ao deslocamento admissível, indicado na Tabela 3, no eixo em que ocorreu o maior deslocamento em cada cenário.

Figura 37 – Gráfico Tensão x Tempo Elementos 110253 e 111138 – Cenário D

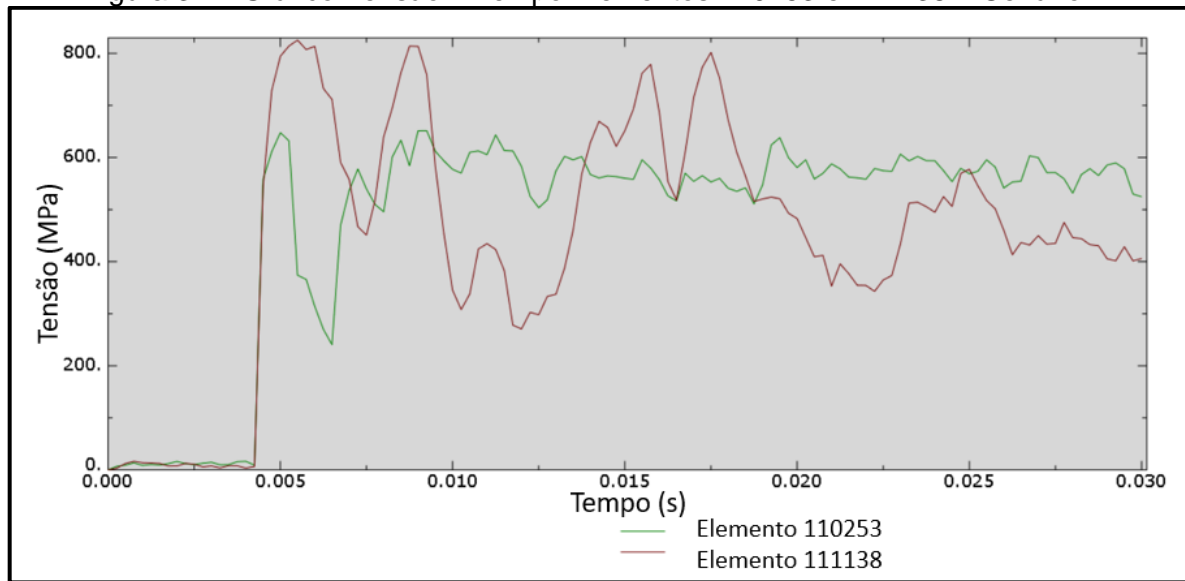


Tabela 5 – Resultados

Resultados Simulações

Cenário	Material	Velocidade [km/h]	Tensão Máx. [MPa]	Deslocamento Máx. [mm]	Deslocamento Adm. [mm]
A	SAE 1018	30	608	54	200
B	SAE 1018	40	714	69	200
C	SAE 4130	30	883	41	200
D	SAE 4130	40	969	53	200

Fonte: o autor (2020).

5 CONCLUSÃO

As conclusões deste trabalho são apresentadas de forma a atender os objetivos geral e específicos determinados, possibilitando a definição do material mais adequado para a construção da estrutura, a fim de suportar sem sofrer ruptura, situações de colisão frontal a 30 km/h e a 40 km/h nas condições do estudo realizado.

A curva de tensão x deformação real foi obtida por meio das informações dos materiais estudados, de forma a possibilitar a avaliação do comportamento dos dois materiais tubulares quando aplicados na composição da estrutura do veículo *off-road* baja SAE. A fundamentação teórica que relaciona os aspectos da situação de impacto como contato, grandes deslocamentos e plasticidade foi abordada no trabalho e aplicada no pré-processamento da simulação do modelo não linear de elementos finitos.

A simulação da situação de impacto da gaiola foi processada e as tensões e deformações obtidas foram analisadas, onde nas condições consideradas de colisão, ambos materiais avaliados suportaram sem sofrer ruptura. O material SAE 4130, apesar do teor de carbono comparativamente maior, possui alta tenacidade e ductilidade, além de resiliência, e desta forma suportou as tensões geradas sofrendo menores deformações e deslocamentos, bem como menor estrição, caracterizando-se como seguro para compor a estrutura, apesar de ter sofrido deformação plástica. O material SAE 1018, além de maiores deslocamentos, sofreu grandes deformações na região de estrição, onde devido aos ajustes realizados na definição da curva tensão x deformação, os resultados possuem certo grau de incerteza e desta forma o mesmo não pode ser considerado seguro para a composição do baja.

Os raios de dobra dos tubos laterais da estrutura resultaram, na situação de colisão frontal, em uma deformação para o sentido externo da gaiola, de forma que os deslocamentos na direção do eixo x, onde a tolerância é menor, geraram um espaço interno maior do que o original. Da mesma forma, na direção dos eixos y e z os valores máximos de deslocamento permitido não foram ultrapassados, de forma que não houve risco de segurança para o piloto devido aos deslocamentos dos tubos.

Os ajustes feitos para obtenção da curva plástica real podem não representar a realidade do comportamento do material, dessa forma, para um futuro trabalho, deve-se fazer um ensaio instrumentado, medindo a área da seção do corpo de prova durante todo o processo, inclusive na região de estrição, a fim de obter uma curva plástica verdadeira corrigida até o ponto de ruptura. Para maior precisão dos resultados, sugere-se para futuros trabalhos a consideração das juntas soldadas e também dos efeitos relacionados à suspensão na estrutura.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABAQUS. **Abaqus analysis user's manual**: Version 6.10. 2010. Disponível em: <<https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus610/Documentation/docs/v6.10/books/usb/default.htm?startat=pt01ch01s01abo01.html>>. Acesso em: 23 mai. 2019.
- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos**: A Base da Tecnologia CAE. 1. ed. São Paulo: Érica, 2005.
- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos**: A Base da Tecnologia CAE – Análise Não Linear. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- BELYTSCHKO, Ted; LIU, Wing Kam; MORAN, Brian. **Nonlinear finite elements for continua and structures**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2000.
- CHANDRUPATLA, Tirupathi R.; BELEGUNDU, Ashok D. **Elementos finitos**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.
- FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **Um primeiro curso em elementos finitos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos A. Dos. **Ensaio dos materiais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- GUGEL, Jeferson L. **Análise estrutural do chassi de veículos mini baja SAE em uma situação de esmagamento de teto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade de Caxias do Sul. Bacharelado em Engenharia Mecânica, 2018.
- HIBBELER, Russell C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2009.
- KIM, Nam-Ho; SANKAR, Bhavani V. **Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- LOTTERMANN, J. T. P. **Projeto estrutural de chassi tipo gaiola para veículos minibaja: Análise Numérica e Experimental**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade de Brasília. Bacharelado em Engenharia Automotiva, 2014.
- MATWEB. **Material Property Data**. Disponível em: <matweb.com>. Acesso em 15 ago. 2019.
- MOSQUEN, A. **Simulação numérica de um veículo de chassi tubular frente a uma situação de capotamento frontal**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Bacharelado em Engenharia Mecânica, 2012.
- NOORBASHA, Nagurbabu. **Computational analysis for improved design of an SAE Baja frame structure**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado) – University of Nevada, Las Vegas, 2010.
- PEREIRA, C. N. **Análise estrutural estática por elementos finitos de um chassi veicular tipo spaceframe**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.
- RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. **Tecnologia mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica Fundamentos Teóricos**. 2. ed. Lisboa: Escolar, 2010.

SAE BRASIL. **Regulamento Baja SAE Brasil**. 2018. Disponível em: <<http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas-estudantis/baja-sae-brasil/regras>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

_____. **SAE no Brasil**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/a-instituicao>>. Acesso em 25 abr. 2019.

SAE INTERNATIONAL. **Student Events**. Disponível em: <<https://www.sae.org/attend/student-events>>. Acesso em: 03 mai. 2019.

SILVA, José Guilherme Santos, et al. **Análise estrutural de chassis de veículos pesados com base no emprego do programa Ansys**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

SOUZA, Remo Magalhães. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

TOBAJA, Equipe Baja SAE UCS. **Relatório interno de cálculo de suspensão**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2019.