



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
ENGENHARIA MECÂNICA

LUIS FELIPE FURTADO PONTES

**MODELO DE SIMULAÇÃO DE IMPACTO DO CHASSI BMB 03 DO VEÍCULO DA
EQUIPE BUMBA MEU BAJA**

São Luís

2021

LUIS FELIPE FURTADO PONTES

**MODELO DE SIMULAÇÃO DE IMPACTO DO CHASSI BMB III DO VEÍCULO DA
EQUIPE BUMBA MEU BAJA**

Trabalho apresentado a Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Profª. Me. Maria Amalia Trindade de Castro

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA
DEFENDIDA PELO(A) ALUNO(A) LUIS
FELIPE FURTADO PONTES, E
ORIENTADO PELO(A) PROF(A). ME.(A)
MARIA AMÁLIA TRINDADE DE
CASTRO.



ASSINATURA DO(A) ORIENTADOR(A)

São Luís

2021

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL – UEMA

Pontes, Luís Felipe Furtado.

Modelo de simulação de impacto do chassi BMB do veículo da equipe Bumba
Meu Baja / Luis Felipe Furtado Pontes. – São Luis, 2021.

... 51f

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual
do Maranhão, 2021.

Orientador: Profa. Ma. Maria Amália Trindade de Castro.

1.Impacto. 2.Teste. 3.Veículo. 4.Elementos finitos. I.Título.

CDU: 629.3.023.1

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

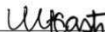
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MODELO DE SIMULAÇÃO DE IMPACTO DO CHASSI BMB III DO VEÍCULO DA
EQUIPE BUMBA MEU BAJA**


Autor: Luis Felipe Furtado Pontes

Orientador: Maria Amália Trindade de Castro

A Banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:



Prof. Me. Maria Amália Trindade de Castro
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA



Prof. Me. Antonio Pereira e Silva
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA



Prof. Me. João Henrique Ferreira Nogueira
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

A ata de defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís, 08 de Dezembro de 2021.

Agradeço a Deus por me ajudar na construção de um sonho de infância. Dedico a minha família, a minha namorada que me deu forças quando eu não as tinha, e principalmente a minha mãe que sempre me deu apoio.

“O sonho é que leva a gente para a frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.” – Ariano Suassuna

RESUMO

A locomoção veicular exige uma garantia de segurança ao condutor, bem como sua integridade física em possíveis impactos (frontal, lateral, capotamento). Um projeto de veículo *off-road* necessita desta essência durante as etapas de seu desenvolvimento. Para garantir a segurança do condutor são realizados testes, dentre os quais estão os testes de impacto; os testes simulam a realidade assumindo e simplificando características da mesma. Os testes possuem grande interesse da indústria automobilística devido a sua produção em massa, influenciando em altos investimentos. A execução dos testes pode ser representada por modelos, que podem ter natureza física, matemática entre outras formas. A executada por esse trabalho de conclusão é o MEF (Método dos Elementos Finitos), devido à possibilidade de grande repetibilidade de eventos a baixo custo.

Palavras-chave: Impacto, Teste, Veículo; Elementos finitos;

ABSTRACT

The vehicle locomotion requires a guarantee of safety to the driver, as well as his physical integrity in possible impacts (front, side, overturn), an off-road vehicle project needs this essence during the stages of its development. To guarantee the driver's safety, tests are carried out, among which are the impact tests; the tests simulate reality by assuming and simplifying its characteristics. The tests are of great interest to the automobile industry due to their mass production, influencing high investments. The execution of the tests can be represented by models, which can be physical, mathematical and other in nature. The one performed by this conclusion work is the FEM (Finite Element Method), due to the possibility of high repeatability of events at low cost.

Key-words: Impact, Test, Vehicle, Finite Element;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenho ilustrativo dos eventos de aceleração e frenagem	19
Figura 2: Desenho ilustrativo do evento de tração	19
Figura 3: desenho ilustrativo do evento super prime.....	19
Figura 4: veículo BMB 03	20
Figura 5: Chassi BMB 03 - Vista frontal/lateral	20
Figura 6: Alteração da estrutura de grãos de um metal policristalino como resultado de uma deformação plástica. (a) Antes da deformação os grãos são equiaxiais. (b) A deformação	22
Figura 7: Diagrama de Tensão x Deformação de um aço	22
Figura 8: Exemplos comuns do comportamento não linear	26
Figura 9: Distribuição da pressão de contato e região de deformação plástica para indentação dando deformações elásticas, plásticas contidas ou totalmente plásticas não contidas.....	27
Figura 11: Soluções de problemas de contato com o ABAQUS.....	28
Figura 12: Impacto frontal. Fonte:.....	34
Figura 13: Impacto lateral segundo a norma FMVSS214	34
Figura 14: posicionamento da barreira segundo norma ECE-R32/34).....	35
Figura 15: Teste de acordo coma FMVSS216	35
Figura 16: Impacto frontal.....	36
Figura 17: impacto lateral.....	37
Figura 18: Membros da gaiola de proteção	38
Figura 19: Estrutura reticulada de vigas e correspondente modelo estrutural	39
Figura 20: Vista isométrica chassi BMB03.....	40
Figura 21: Vista isométrica chassi BMB03.....	40
Figura 22: Malha aplicada no chassi BMB03	41
Figura 23: Modelo de impacto lateral - BMB03	42
Figura 24: Modelo de impacto frontal - BMB03.....	42
Figura 25: Modelo de impacto frontal, critério de Von Mises - BMB03.....	43
Figura 26: Modelo de impacto lateral, critério de Von Mises - BMB03	43
Figura 27: Modelo de impacto lateral, Deslocamento em X - BMB03.....	44
Figura 28: Modelo de impacto lateral, Deformação plástica - BMB03	44
Figura 29: Modelo de impacto frontal, Deslocamento em X - BMB03	45
Figura 30: Modelo de impacto lateral, Deformação plástica - BMB03	45
Figura 31: Comparação da resposta do modelo de pescoço humano e resposta voluntária	48
Figura 32: Modelo de Kamal.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades do aço 1020 (autor, 2021).....	38
Tabela 2: Propriedades da Malha	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAI	Compression After Impact
EuroNCAP	The European New Car Assessment Programme
FEM	Finite Element
LatinNCAP	Programa de Avaliação de Carros Novos para América Latina e o Caribe
LMS	Lumped Mass-Spring
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration

LISTA DE SÍMBOLOS

ε_t	Deformação total
ε_e	Deformação elástica
ε_p	Deformação plástica
\vec{F}	Força
K	Rigidez do material
\vec{u}	Deslocamento
σ	Tensão
ε	Deformação
E	Módulo de Elasticidade
$[k]$	Matriz de rigidez
d	Vetor de deslocamento nodal
f	Vetor de forças internas do elemento
M	Matriz de massa
C	Matriz de amortecimento
F	Vetor de carregamentos externos
u	Vetor de deslocamento
\dot{u}	Vetor de velocidade
\ddot{u}	Vetor de aceleração
λ_n	Campo dos multiplicadores
u^α	Campos de deslocamento
ξ	Coordenada convectiva local
λ_{nk}	Valor nodal do multiplicador de Lagrange
δ_{gn}	Valor nodal do multiplicador de Lagrange
n_c	Restrição de contato
σ_{VM}	Tensão de Von Mises

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivo específico	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	BAJA SAE	18
2.2	EQUIPE BUMBA MEU BAJA	19
2.3	IMPACTO MECÂNICO	21
2.4	DEFORMAÇÃO	21
2.4.1	Regime Elástico	23
2.4.2	Regime Plástico	23
2.5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	24
2.5.1	Método da Integração Direta	25
2.6	ANÁLISE NÃO LINEAR	25
2.7	CRITÉRIO DE VON MISES	26
2.8	INDENTAÇÃO NO ESCOAMENTO	27
2.9	DESCRETIZAÇÃO DO CONTATO	28
2.10	APLICAÇÕES DE RESTRIÇÕES	29
2.10.1	Multiplificador de Lagrange	29
2.10.2	Penalidade	32
2.11	IMPACTO VEICULAR	33

2.11.1	Tipos de Impacto	33
2.11.1.1	Impacto Frontal	33
2.11.1.2	Impacto Lateral	34
2.11.1.3	Impacto Traseiro	35
2.11.1.4	Teste de Capotamento	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	MATERIAIS	37
3.2	MODELOS.....	38
3.3	TRATAMENTO DO MODELO CAE	39
3.4	MODELAGEM COMPUTACIONAL	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5	CONCLUSÃO	47
6	SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	48
	REFERÊNCIA	50

1 INTRODUÇÃO

A industrialização e produção em grande escala de veículos automotores surgiu junto com a necessidade de aumento da segurança, devido a acidentes ocasionando lesões e mortes dos condutores. No ano de 2017, o Brasil atingiu os números de 574.050 acidentes e 1.989 mortes no trânsito. Mediante a quantidade de acidentes, tecnologias foram desenvolvidas ao longo dos anos com o intuito de aumentar a segurança para os usuários. Tais como inclusão AIR-BAG, peças mais resistentes, materiais com maior absorção de energia mediante a esforços etc.

A necessidade de testar a segurança dos veículos foi abraçada pelo Programa de Avaliação de Carros Novos para América Latina e o Caribe (Latin NCAP). O programa testa veículos do mercado classificando-os por estrelas de acordo com o comportamento nos testes. Com o intuito de atender uma melhor preservação dos consumidores de veículos, bem como a normas de países, as grandes empresas investem nesse setor. Nas últimas décadas, com o desenvolvimento dos computadores, foram utilizados artifícios de simulação para aumentar a quantidade de teste de veículos mediante aos impactos, assim como, baixo custo operacional, desta forma, maximizando os resultados, sem dispensar parcerias junto a Latin NCAP.

As simulações são realizadas pelo método dos LMS (Lumped Mass-Spring), MEF (Método dos Elementos Finitos). O LMS pode ser resolvido por software de programação, já o MEF é funcional através de ferramentas computacionais, como programas de desenho e simulação. Onde simulam baseados em ferramentas matemáticas, bem como simplificações de elementos da realidade, para atender de maneira aproximada o comportamento da realidade. Deste modo, cria um modelo da realidade, o qual possui a característica de cada componente, bem como massa, volume, densidade.

O presente trabalho visa a introdução do veículo baja, modelo BMB 03 da equipe Bumba Meu Baja, a simulações de impacto para um aumento no grau de segurança do condutor, ainda que mediante as intempéries que os circuitos *off-road* o incorporam. A segurança do condutor é avaliada por meio de testes, os quais apresentam o comportamento do veículo submetido a testes de impacto.

1.1 JUSTIFICATIVA.

A produção em massa de automóveis depende de grandes quantias de fundos, os quais são direcionados à segurança dos condutores de veículos; devido a grande quantidade de acidentes graves com fatalidades. Dentre os investimentos, ainda se encontra como principal meio de avaliação da segurança os testes físicos de impacto. A simulação surgiu como saída aos conglomerados, de modo a conseguirem maximizar a quantidade de testes a baixo custo, contando apenas com custos operacionais para os softwares.

A equipe Bumba Meu Baja é uma equipe universitária que busca projetar um veículo *off-road* para fins de competição BAJASAE. O projeto da mesma é composto por diversos desafios, dentre os quais, tem-se a garantia da segurança do condutor do veículo, privando-o dos danos à integridade física que o percurso lhe traz. A constituição de modelos de simulação de impacto é uma via para alcançar a segurança solicitada.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Simular os modelos de impactos do chassi, do veículo BMB 03 da equipe Bumba meu Baja no ano de 2020, pelo método de elementos finitos por meio de software ABAQUS. Buscar garantias de segurança no funcionamento do veículo.

1.2.2 Objetivo específico

- Definir os modelos de impactos para o chassi;
- Verificar os tipos de impactos, que melhor atendem ao ambiente *off-road*, para o qual o veículo é projetado;
- Avaliar a confiabilidade do veículo, através do critério de Von Mises;
- Verificar pontos de melhoria na gaiola;

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BAJA SAE

É composto por um desafio lançado a estudantes de engenharia que possui como objetivo incentivar a prática de conhecimentos apreendidos durante a graduação. O aluno ao participar do programa, Baja SAE, está submerso no programa de desenvolvimento de um veículo *off-road*, acompanhando todas as etapas de um projeto, da ideia inicial, projeto detalhado, construção e testes.

O projeto Baja SAE foi iniciado na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos, tendo sua primeira competição em meados de 1976. No ano de 1991 a SAE BRASIL iniciou suas atividades, que lançou no ano de 1994 o projeto Baja SAE BRASIL. No ano seguinte foi realizada a primeira competição nacional, na cidade de São Paulo.

Os alunos formam equipes, na competição, as quais representarão a Instituição de Ensino Superior que o cabem. As equipes são desafiadas anualmente a participar da competição. No Brasil a competição nacional é nomeada Competição Baja SAE BRASIL, já as competições regionais são nomeadas como Etapa Nordeste, Etapa Sudeste e Etapa Sul. O comitê responsável, Comitê Baja SAE BRASIL, é o órgão responsável pelos aspectos técnicos do Programa Baja SAE, incluído a Competição Nacional e as etapas Nordeste. Este comitê é formado exclusivamente por voluntários com ampla experiência em engenharia.

As competições nacional e estadual possuem provas Dinâmicas e Projeto. Onde os eventos dinâmicos possuem a finalidade de avaliar o funcionamento dos veículos sob uma variedade de condições; já o projeto possui a finalidade de avaliar as etapas de idealização até a finalização do projeto.

As provas dinâmicas estão subdivididas em:

- Aceleração e Frenagem;
- Tração;
- Super Prime;
- Enduro de Resistência;

As figuras 1 a 3 representam as provas Aceleração e Frenagem, Tração e Super Prime. A prova Enduro de Resistência é realizada na mesma pista do Super Prime, mas com duração de 4 horas.

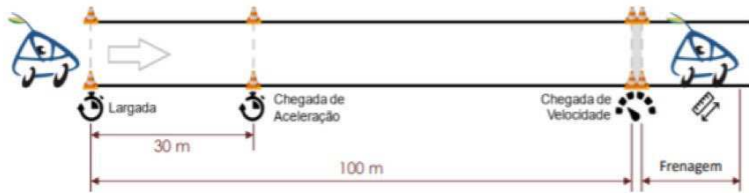


Figura 1: Desenho ilustrativo dos eventos de aceleração e frenagem (SAE, 2021)

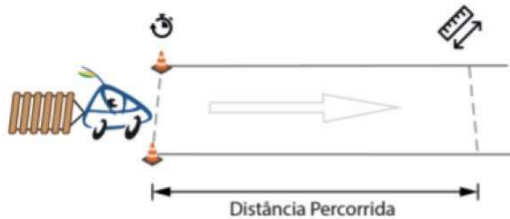


Figura 2: Desenho ilustrativo do evento de tração (SAE, 2021)

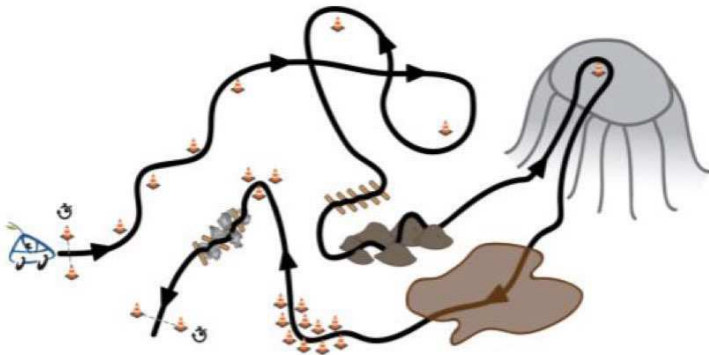


Figura 3: desenho ilustrativo do evento super prime (SAE, 2021)

2.2 EQUIPE BUMBA MEU BAJA

A equipe Bumba Meu Baja foi criada no ano de 2011, desde então a equipe representa a Universidade Estadual do Maranhão na competição de Etapa Nordeste e na Competição Baja SAE BRASIL. A equipe é estruturada pelos subsistemas de: chassi, eletrônica, suspensão direção, ergonomia, powertrain, freio e gestão. Onde cada subsistema possui um direcionamento de atuação, como por exemplo, o subsistema chassi é responsável pela

construção e montagem do chassi, bem como simulações. A figura 4 mostra o protótipo BMB 03 e figura 5 o Chassi.



Figura 4: veículo BMB 03 (Autor, 2021)



Figura 5: Chassi BMB 03 - Vista frontal/lateral (Autor,2021)

2.3 IMPACTO MECÂNICO

O termo CAI (Compression After Impact) mede de forma quantitativa a capacidade de qualquer estrutura absorver impacto dentro das normas estabelecidas (SÁNCHEZ, 2001). O conceito direciona-se a vertente da engenharia que estuda o controle de impacto entre dispositivos mecânicos. Isto se deve a maquinas nas quais seu funcionamento baseasse do impacto entre os componentes, como por exemplo, anéis de retenção. Já o crashworthines é a capacidade de absorção de energia ao sofre uma colisão, preservando a inteireza dos condutores e perdura um controle da deformação sofrida.

O impacto tem o conceito de ser relacionado fundamentalmente a um carregamento de elevada intensidade imposto em um curto período de tempo, ocorrendo a distribuição das tensões de modo não uniforme sobre o material (JOHNSON et al., 1972). Pode ser utilizado como exemplo a colisão da cabeça de um martelo e o prego, na qual há uma deformação visível num curto período de tempo. O impacto relacionado a uma força externa quando aplicada sobre uma estrutura ou peça mecânica com o tempo de aplicação inferior a um terço menor que a vibração natural desse mesmo componente estrutural (SHIGLEY; BUDYNAS; NISBETT, 2009).

2.4 DEFORMAÇÃO

A deformação pode ser definida pela razão entre a diferença das dimensões finais e iniciais de um material dividido pelo valor inicial desta dimensão (Morais, 2009). Cada material sujeito a uma força está receptível a uma deformação, a mesma é variável de material a material devido a suas propriedades. Um material quando submetidos a esforços pode se deformar elasticamente e plasticamente. A figura 7 Apresenta um gráfico, tensão-deformação, do comportamento de um aço ao ser submetido a esforços. Em nível microscópico podemos verificar a figura 6 que possui uma estrutura de grão antes de uma deformação plástica, figura 6a, e depois onde podemos ver a estrutura de grãos após a deformação, figura 6b.

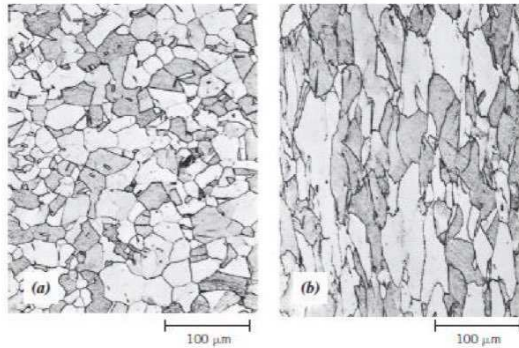


Figura 6: Alteração da estrutura de grãos de um metal policristalino como resultado de uma deformação plástica. (a) Antes da deformação os grãos são equiaxiais. (b) A deformação (CALLISTER, 2016)

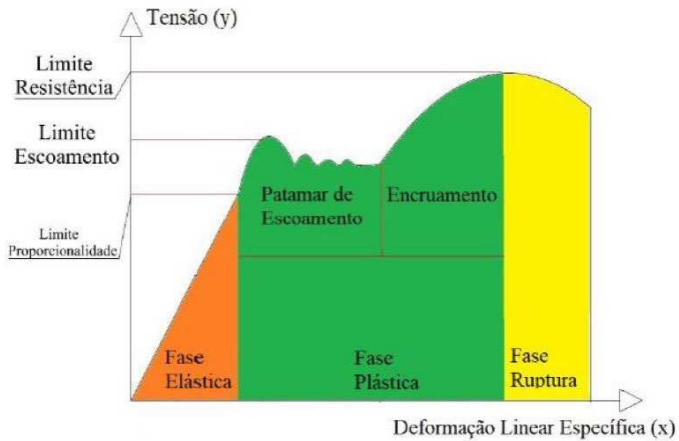


Figura 7: Diagrama de Tensão x Deformação de um aço (RASHID, 2010)

A deformação total (ε_t) dos dois regimes pode ser encontrada por

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (01)$$

Onde ε_e é a deformação elástica e ε_p deformação plástica

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (02)$$

2.4.1 Regime Elástico

O processo de deformação em que a tensão e a deformação são proporcionais é chamado de deformação elástica (CALLISTER, 2016). Na figura 7 pode ser observado a secção do gráfico que contém a proporção de tensão e deformação pela sua linearidade. O material nessa secção possui um comportamento de retornar ao estado inicial após ser submetido a uma força. A linearidade é estabelecida pela lei de Hooke que através do estudo de deformação elástica da mola, foi observado que conforme se aplica força, se aumenta o deslocamento e a proporcionalidade é mantida pela rigidez do material.

$$\vec{F} = [K]x \vec{u} \quad (03)$$

onde \vec{F} é a força, $[K]$ a rigidez do material e \vec{u} deslocamento.

O conceito da lei de Hooke também pode ser estendido ao comportamento de outros materiais. O conceito de tensão (σ) que é força por área, ou mesmo força distribuída sob uma secção. A aplicação de forças gera uma deformação (ε), o qual formula-se como a deformação total da estrutura pelo comprimento inicial numa direcção. A constante de proporcionalidade elástica (E) chamada de Módulo de Elasticidade ou “Young”.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (04)$$

2.4.2 Regime Plástico

Na maioria dos materiais metálicos, a deformação elástica ocorre até a deformação de 0,005. Conforme o material é deformado além desse ponto, a deformação não é mais proporcional à tensão aplicada, e ocorre a deformação plástica (CALLISTER, 2016). A deformação plástica também se caracteriza pela deformação permanente do material sujeito a uma força inicial. Em carga de elevada intensidade uma não linearidade física associada ao material é admitida, sendo assim, não existe proporcionalidade entre tensão e deformação descartando a lei de Hooke.

2.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um modelo numérico que foi desenvolvido para a análise de estruturas, determinando o estado de tensão e de deformação sujeito a ações externas, num meio contínuo. O método foi desenvolvido por Walter Ritz em 1909, na iniciativa de determinar resultados aproximados para problemas físicos; prevê uma fragmentação do domínio da integração para os meios contínuos em um número finitos de regiões nomeados de elementos finitos.

Segundo Tavares (1998), apesar do método dos elementos finitos considerar os elementos individuais como contínuos é, na sua essência, um procedimento de discretização pois exprime os deslocamentos. A real vantagem do método é que o movimento do sistema macro pode ser obtido pelos agrupamentos das equações determinadas individualmente. A figura 06a representa um diagrama de corpo livre do mais simples elemento finito estrutural, uma mola linear em uma dimensão. A mola possui uma rigidez característica, comparada a constante de mola, $K_h = f/\Delta u$, criando uma força no nó ao ser deslocado.

$$\begin{bmatrix} K_h & -K_h \\ -K_h & K_h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{ih} \\ f_{jh} \end{Bmatrix} \quad (05)$$

O que pode ser escrito na notação matricial como:

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad (06)$$

onde $[k]$ é a matriz de rigidez, d é o vetor de deslocamento nodal e f é o vetor de forças internas do elemento. A figura 06b também mostra dois desses simples elementos conectados entre si para formar uma malha de elementos finitos.

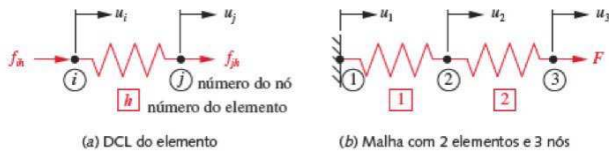


Figura 06: Modelo e elemento simples de mola Fonte: (NORTON,2013)

A composição do grupo de elementos forma uma malha. O método opera por meio de parâmetros nodais que extraem a interação dos elementos dentro da malha. Dessa forma, o comportamento da estrutura é obtido a partir da combinação do comportamento dos seus elementos (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2000).

O método de elementos finitos obtém a equação de movimento a ser calculada através do princípio de D'Alambert. Este princípio considera um elemento diferencial de massa que é submetido a uma aceleração, a equação 07 a formula. Portanto, para cada elemento (e) deve ser rotacionada para coordenadas globais a fim de representar o contínuo modelado (AZEVEDO, 2011).

$$M^e \ddot{u}^e(t) + C^e \dot{u}^e(t) + K^e u^e(t) = F^e(t) \quad (07)$$

Onde M = Matriz de massa; C = Matriz de amortecimento; K = Matriz de rigidez; F = Vetor de carregamentos externos; \ddot{u}, \dot{u}, u = Vetor de aceleração, velocidade e deslocamento respectivamente.

2.5.1 Método da Integração Direta

O problema dinâmico composto de um sistema de equações de 2º ordem, como a equação 07, possui solução por meio de uma integração direta no domínio do tempo. Os algoritmos utilizados buscam solucionar a equação de equilíbrio para cada incremento de tempo. Estes softwares podem trabalhar de forma implícita e explícita. Para o modo implícito a resolução das equações é feita e, a cada passo de tempo e estes não precisam ser pequenos. Já para o explícito, a solução num determinado instante é dependente da solução no instante anterior e assim requer que os intervalos de tempo sejam muitos pequenos para uma garantia de estabilidade numérica (SILVA, 2006). O método explícito é mais rápido possuindo menos custos computacionais, porém necessita de um passo pequeno para garantir a convergência.

2.6 ANALISE NÃO LINEAR

A não-linearidade se deve a diversos motivos, dentre eles, plasticidade, grandes deslocamentos, grandes rotações, deformações não-infinitesimais. Podendo ser agrupadas em:

- Não-linearidade geométrica;
- Não-linearidade de material;
- Mudança de status;

Um exemplo de fenômeno de não-linearidade é o grampeamento de papeis. O metal do grampo sempre se dobra de diferentes formas, figura 8a; o sobrecarregamento numa prateleira de madeira, com o passar do tempo ela irá ceder, figura 8b; ao adicionar peso num carro, o contato superficial entre os pneus e o pavimento muda de acordo com o carregamento adicionado, figura 8c. No gráfico de carregamento/deflexão para cada exemplo apresenta característica fundamentais de não linearidade estrutural, pela mudança de rigidez estrutural.

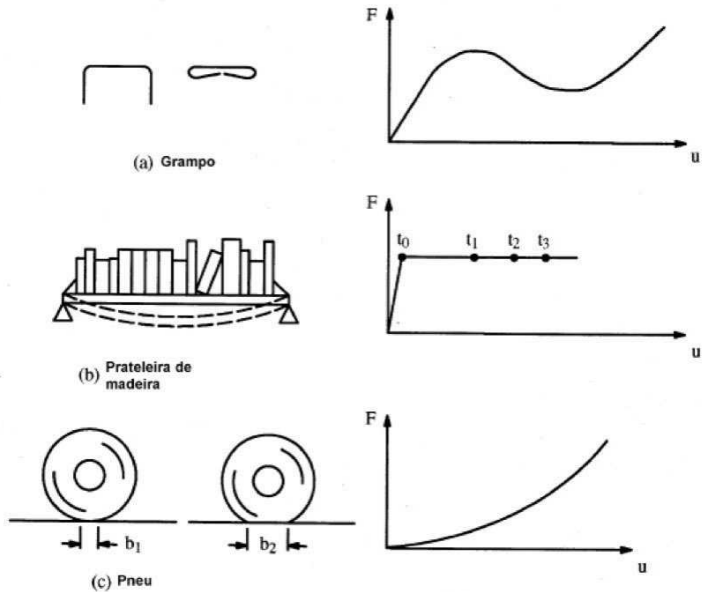


Figura 8: Exemplos comuns do comportamento não linear (SANCHEZ, 2001)

2.7 CRITÉRIO DE VON MISES

Propõe que uma relação direta do escoamento inicial com as tensões de cisalhamento, através de tensões desvio que estão em direção normal. Portanto, o critério transforma um estado multiaxial numa 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).

O valor crítico de energia de distorção pode ser obtido através de um ensaio uniaxial, no momento em que a tensão de Von Mises ultrapassa o escoamento (KIM e SANKAR, 2011). A teoria indica que um material dúctil começa a escoar num local onde a maior tensão em Von Mises se torna equivalente ao limite de tensão. A tensão de Von Mises (σ_{VM}) pode ser descrita pela equação 08.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{XX}^2 + \sigma_{YY}^2 + \sigma_{XX}\sigma_{YY} + 3\tau_{YY}^2} \quad (08)$$

2.8 INDENTAÇÃO NO ESCOAMENTO

A deformação local (indentação), na colisão entre dois corpos, continua até que a tensão chegue na tensão de escoamento, caso exista uma tensão de transição $P_y \approx 1.1\sigma_y$, o escoamento se inicia num ponto abaixo da superfície de contato (Critério de Von Mises ou Tresca). Embora a região de deformação plástica aumente com o aumento da pressão de contato, ela permanece confinada abaixo da superfície para pressões na maior parte da faixa $1:1 < p = Y < 3:0$; este estado é denominado deformação plástica contida. Nesta faixa elasto-plástica, a indentação permanece observável da superfície e é pequena devido a deformação plástica é incompressível e a região de deformação plástica é encerrada dentro do corpo de outra forma elástica. Acima da faixa $1:1 < p = Y < 3:0$; entra no estado totalmente plástico, onde a deformação elástica é negligenciável. A figura 09 capta os 3 estágios, elástico, elasto-plástico e plástico.

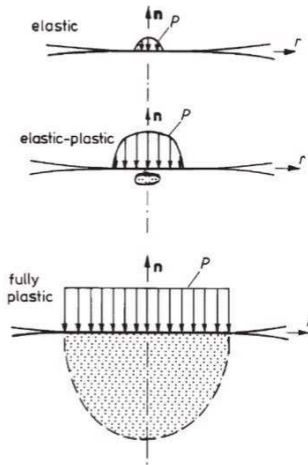


Figura 9: Distribuição da pressão de contato e região de deformação plástica para indentação dando deformações elásticas, plásticas contidas ou totalmente plásticas não contidas (STRONGE, 2018)

2.9 DESCRETIZAÇÃO DO CONTATO

A definição de uma discretização de contato impede a interferência entre as entidades geométricas dos corpos 01 e 02, mas permitem que elas se afastem uma das outras. O contato da superfície é discretizada assumindo uma como a mestre e a outra como superfície escrava. A figura 10 possui a demonstração de dois métodos discretizados, os quais são:

- NÓ-SUPERFÍCIE

Nós de uma superfície em contato com segmentos em uma outra superfície. Não necessitam que as superfícies estejam sob contato inicialmente, além disso, permite que vértices e faces sejam entidades do conjunto.

- SUPERFÍCIE-SUPERFÍCIE

O contato é aplicado em uma região envolvendo cada nó, com isso mais adequada para superfícies mais complexas e que necessitam de maior precisão. Não é recomendado para situações em que a área de contato entre a face escrava e mestre torna-se muito pequena ou se reduz a uma linha ou ponto durante a deformação.

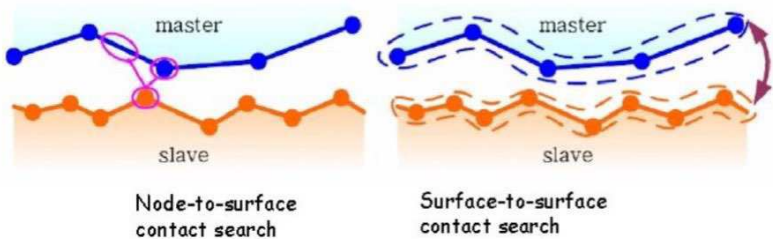


Figura 10: Soluções de problemas de contato com o ABAQUS (KIM, 2018)

2.10 APLICAÇÕES DE RESTRIÇÕES

Diferentes formulações podem ser aplicadas para incorporar as restrições de contato. Dentre as possibilidades estão soluções numéricas, entre as estratégias de conjunto ativo, que são aplicadas em conjunto com multiplicadores de LAGRANGE. Além disso, técnicas de penalização podem ser aplicadas para resolver problemas de contato. Estes métodos são utilizados pelos programas computacionais utilizadores do método de elementos finitos

2.10.1 Multiplicador de Lagrange

O método do multiplicador de Lagrange consiste na utilização de multiplicadores indeterminados para achar o mínimo de uma função (SILVA, 2016). Na mecânica do contato esse método é utilizado para atender as condições de contato na introdução de variantes auxiliares. Os multiplicadores de Lagrange refletem a força solicitada, de modo a impor as restrições, as equações são satisfeitas de forma precisa.

O método do multiplicador de Lagrange é um método misto, isso significa que o campo dos multiplicadores λn e os campos de deslocamento u^α de ambos os corpos de contato, que definem a função de lacuna g_n , bem como δg_n devem ser discretizadas. Isso resulta no resíduo

$$\int_{\Gamma_c} \lambda n \delta g_n d\Gamma \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^{ne} \int_{\Gamma_c} \lambda n \delta g_n d\Gamma \quad (09)$$

e para a restrição

$$\int_{\Gamma_c} \delta \lambda n g_n d\Gamma = 0 \quad \sum_{i=1}^{ne} \int_{\Gamma_c} \delta \lambda^h n g^h n d\Gamma = 0 \quad (10)$$

A interpolação para $\lambda^h n$ e $\delta g^h n$ são definidas por $\Gamma^h c$

$$\lambda^h n = \sum_k M_k(\xi) \lambda n k \quad e \quad \delta g^h n = \sum_l N_l(\xi) \delta g n l \quad (11) e (12)$$

ξ é uma coordenada convectiva local, em geral, que define as funções na forma NI e Mk no elemento de referência. $\lambda n k$ e $\delta g n l$ são os valores nodais do multiplicador de Lagrange e funções de lacuna. Já o n_c denota o número de restrições de contato ativas $J_a \in J_c$ que de devem ser determinadas pelo algoritmo de contato. Para avaliação das integrais na equação 10, nem sempre é claro em qual lado da interface essa integração deve ser realizada. Assim deve-se escolher uma das superfícies dos corpos de interface de contato como referência ou superfície mestre, e então realizar a integração de forma consistente com a discretização. Com base no método do multiplicador de Lagrange, a seguinte formulação pode ser derivada

$$\prod(u) = \frac{1}{2} u^T K u - u^T f \quad (13)$$

Onde o vetor de deslocamento u inclui os deslocamentos nodais de ambos os corpos. Da mesma forma, a matriz de rigidez K está associada a ambos os corpos e f contém forças corporais e trações superficiais de ambos os corpos. Podemos escrever

$$\prod(u) = \frac{1}{2} (u^1, u^2) \begin{bmatrix} K^1 & 0 \\ 0 & K^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^1 \\ u^2 \end{Bmatrix} - \{u^1, u^2\} \begin{Bmatrix} f^1 \\ f^2 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

Os corpos ainda não estão acoplados. Isso ocorre devido aos termos adicionais que são derivados das equações 09 e 10. Para obtermos uma matriz para esses termos, introduziremos a função de lacuna em cada elemento de contato $\Gamma^h i$

$$g_N^h = \hat{C}_i^T u \quad (15)$$

Onde \hat{C}_i depende da escolha da discretização. As contribuições podem ser montadas em uma matriz que contém todas as restrições n_c .

$$C = [C1|C2] \dots |Cnc] \quad (16)$$

Obtemos a forma discreta

$$\prod^{LM} (u, \Lambda) = \frac{1}{2} u^T K u - u^T \bar{f} + \Lambda^T C^T u \quad (17)$$

Λ é o vetor de todos os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de contato n_c . Variação de $\prod^{LM}(u, \Lambda)$ em relação aos deslocamentos e multiplicadores de Lagrange rendimentos com $\eta = \delta u$ duas equações

$$\eta^T [Ku - f + CA] = 0 \quad (18)$$

$$\delta \Lambda^T [C^T u] = 0 \quad (19)$$

Pelo teorema fundamental das variações, essas equações podem ser arranjadas em forma de matriz

$$\begin{bmatrix} K & C \\ C^T & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \Lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ 0 \end{Bmatrix} = 0 \quad (20)$$

Observe que é um sistema linear de equações para o número dado de n_c restrições de contato.

2.10.2 Penalidade

Consiste na adição de parâmetros de penalidade na forma franca, forma simplificada do problema, satisfazendo as condições de restrição. Possui por vantagem a manutenção do número total dos graus de liberdade do problema, assim como, do número de equações do sistema. Porém as restrições são satisfeitas de modo aproximado, caso a gama correta de parâmetros de penalidade for selecionada. O método de penalidade necessita apenas da discretização das variáveis de deslocamento.

$$\int_{\Gamma_c} \epsilon_N g_N \delta g_N d\Gamma \quad \int_{\Gamma_c^h} \epsilon_N g_N^h \delta g_N^h d\Gamma \quad (21) \text{ e } (22)$$

Com a interpolação para a função gap sua variação

$$g_N^h = \sum_I N_I(\xi) g_{NI} \quad \text{e} \quad \delta g_N^h = \sum_I N_I(\xi) \delta g_{NI} \quad (23) \text{ e } (24)$$

Deve-se ressaltar que é preciso ter atenção ao escolher a interpolação para o contato. Uma vez que o método de penalidade é equivalente a um método misto, condições desempenham o mesmo papel que para a abordagem do multiplicador de Lagrange. Integrando a equação 21 temos

$$\prod^P(u) = \frac{1}{2} u^T K u - u^T f + \frac{\epsilon N}{2} u^T C C^T u \quad (25)$$

a variação de $\prod^P(u)$ com $\eta = \delta u$ produz

$$\eta^T [K u - f + \epsilon_N C C^T u] = 0 \quad (26)$$

o que leva a matriz

$$[K + K^P]u = \bar{f} \quad \text{com} \quad K^P = \epsilon_N C C^T \quad (27) \text{ e } (28)$$

Este sistema de equações é dado para o número fixo de contato.

2.11 IMPACTO VEICULAR

A colisão de veículos é um resultado de circunstâncias que produzem condições anormais de funcionamento para o veículo, ocorrendo com outros veículos ou com um objeto com características estacionárias. Caso as forças que envolvam excedam a capacidade de absorção de energia na estrutura veicular, os condutores podem se ferir ou morrer.

De acordo com os cenários são utilizados diferentes critérios para determinar a resistência ao impacto da estrutura. A resistência ao choque pode ser avaliada prospectivamente, usando modelos ou experimentos de computador, ou retrospectivamente, analisando os resultados do acidente (PINTO, 2013, pág. 04, tradução nossa).

2.11.1 Tipos de Impacto

Os testes de impacto têm por função auxiliar no estudo de segurança veicular, podendo assim, reduzir os acidentes graves e fatais. Estes impactos visam um ambiente comum aos tipos de acidentes mais recorrentes no trânsito.

2.11.1.1 Impacto Frontal

O teste de impacto frontal simula um veículo tendo um impacto frontal com outro veículo de massa semelhante. O teste realizado pelo LatinNCAP usa a velocidade de 64 km/h com um carro batendo numa barreira deformável para simular um impacto entre carros a velocidade de 55 km/h, geralmente há impactos em uma parede de concreto sólida em uma velocidade especificada, a figura 13 nos mostra um dos testes realizados pela EuroNCAP. A colisão das partes intrusivas da cabine com o condutor é um dos maiores responsáveis por lesões graves e fatais protegidos com cinto de segurança.



Figura 11: Impacto frontal. Fonte: (EURONCAP, 2021)

2.11.1.2 Impacto Lateral

Este tipo de impacto simula um acidente com alta probabilidade de morte, ao comparar com o impacto frontal esse tem pouco espaço interno para absorção de energia. O teste é realizado por um carrinho impulsionado a uma velocidade de 50 km/h até que atinja o veículo de teste perpendicularmente. Este teste permite verificar os pontos de maior deformação e assim reforçar a estrutura local. A figura 12 ilustra a configuração do teste segundo a norma americana FMVSS214, da NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration).

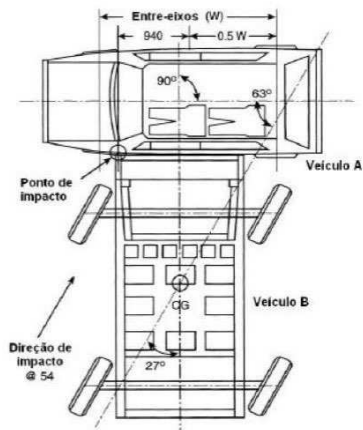


Figura 12: Impacto lateral segundo a norma FMVSS214 (MATSUMOTO, 2010)

2.11.1.3 Impacto Traseiro

O teste consiste uma barreira rígida de 1100 Kg na traseira do veículo que se encontra parado com os freios acionados, a figura 13 ilustra as condições do teste sujeita a norma ECE-R32/34, que é obrigatória no Brasil desde 2012. As normas para esse impacto focam em garantir a integridade do sistema de combustível do veículo.

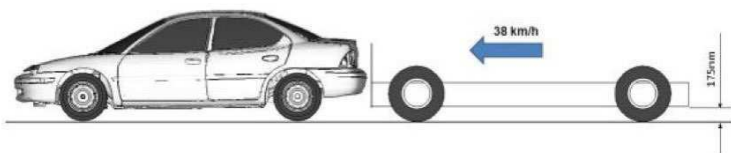


Figura 13: Posicionamento da barreira segundo norma ECE-R32/34 (MATSUMOTO, 2010)

2.11.1.4 Teste de Capotamento

Por meio da norma FMVSS216, da NHTSA, o teste é determinado por uma parede rígida inclinada que se movimenta a velocidade constante que não pode ultrapassar 13 mm/s através de um atuador hidráulico. Portanto, a parede irá causar deformação na estrutura superior do veículo podendo registrar as forças e o deslocamento da parede. A figura 14 ilustra o esquema do teste.

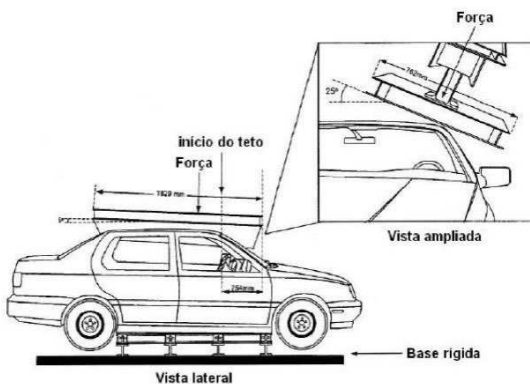


Figura 14: Teste de acordo com a FMVSS216 (MATSUMOTO, 2010)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O veículo irá ser modelado através do método dos elementos finitos, com parâmetros de propriedade seguidos pelos regulamentos das competições BajaSAE. Será realizada uma simulação num veículo baja, modelo BMB 03, onde serão submetidas as configurações de impacto frontal e lateral, devido ao grande número de casos de acidentes graves para os dois casos.

O primeiro teste será realizado por um impacto frontal entre dois veículos idênticos, viajando com a mesma velocidade de 42 km/h, velocidade máxima alcançada pelo BMB 03, abaixo da velocidade utilizada pela LatinNCAP nos testes de impacto. O segundo teste será o impacto lateral entre dois veículos, o primeiro a 38 km/h e o segundo em repouso, onde foi considerado uma velocidade de 90% da de impacto frontal, isso se deve ao considera uma proporcionalidade das velocidades. As figuras 15 e 16 podem ser vistas as configurações do teste. Os respectivos testes foram escolhidos pelas quantidades de acidentes graves para os dois casos, tendo o frontal com os maiores números estatísticos.

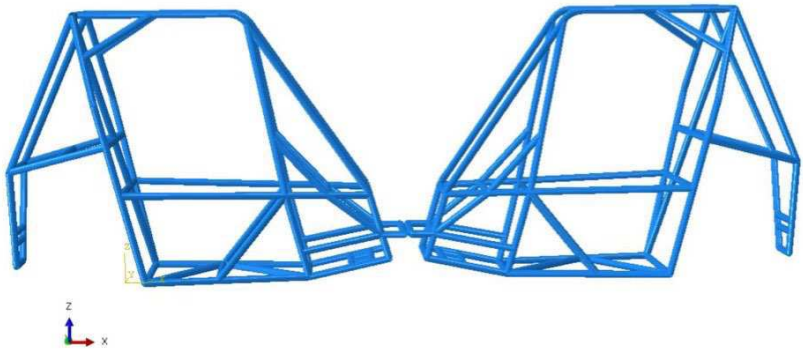


Figura 15: Impacto frontal (Autor,2021)

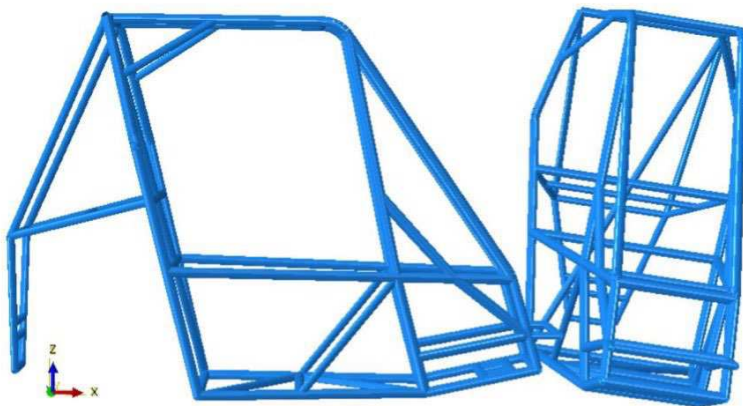


Figura 16: impacto lateral (autor,2021)

O método de restrição escolhido foi o de penalização, o qual consiste no uso de um fator de penalização que impõe as condições de contato se verificarem durante a interação dos corpos (SILVA,2018). O método não irá ampliar o número de incógnitas, mas possui como problema a escolha de um valor adequado para o fator de penalização. O software ABAQUS conduz a definição do valor da penalidade e atualizando-o caso seja necessário.

Após a primeira análise feita com os resultados obtidos, será avaliada a taxa de idetação, de modo a descobrir se pode ser dada continuidade ao campo elasto-plástico como previsto ou se já adentrou no campo totalmente plástico.

3.1 MATERIAIS

O material do chassi é de uma composição de ferro-carbono, onde o comitê organizador via regulamento apresenta uma configuração de diâmetro, espessura e composição de carbono. Para os membros primários a equipe pode integrar outras configurações, mas elas devem possuir espessura da parede maior ou igual a 1,57 mm e o percentual de carbono maior ou igual a 0,18% independente do material e da seção do tubo. Já os secundários devem ter espessura de parede mínimos de 0,89 mm, diâmetro externo ou menor dimensão externa em perfil não circular maior ou igual a 25,4 mm e percentual de carbono de pelo menos 0,18 %. A figura 17

possui componentes obrigatórios para componentes principais e secundários, mas as equipes não necessitam limitarem-se a estes. A tabela 01 possui propriedades que serão utilizadas durante o processo de simulação.

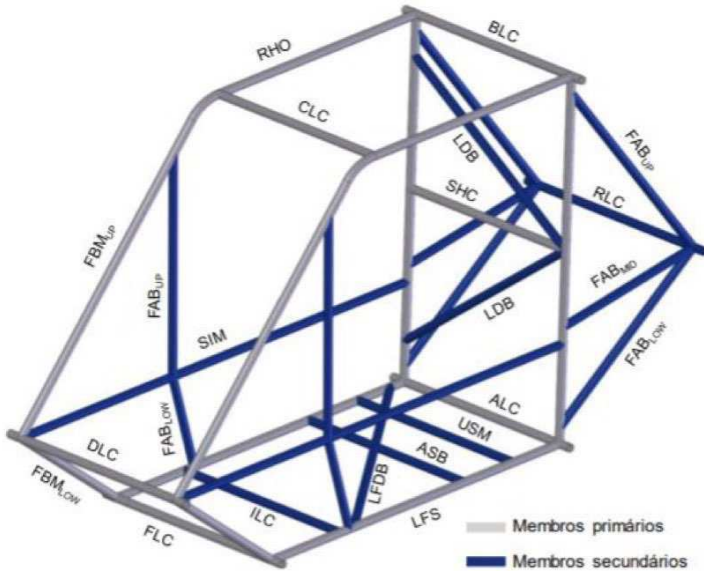


Figura 17: Membros da gaiola de proteção (SAE, 2021)

Tabela 1: Propriedades do aço SAE 1020 (autor, 2021)

Densidade	Modulo de Elasticidade	Coefficiente de Poisson
7,87 g/cm ³	205 Gpa	0,3

3.2 MODELOS

A representação da realidade é executada através de modelos, como por exemplo, os modelos físicos os quais são constituídos por características geométricas, composição do material bem como a sua interação com o meio; em sequência encontram-se o modelo matemático e numérico, onde no primeiro são representados os fenômenos físicos por meio de um problema de valores de contorno; já o segundo a geometria é acometida de simplificação, assim como o modelo matemático é representado numericamente. A figura 18 apresenta uma

estrutura real e um modelo estrutural, onde no segundo há simplificação da estrutura, com intuito de reduzir erros estruturais durante a simulação.

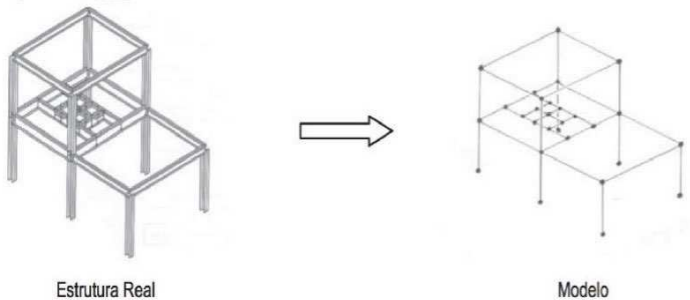


Figura 18: Estrutura reticulada de vigas e correspondente modelo estrutural (Avelino, 2013)

3.3 TRATAMENTO DO MODELO CAE

Foi utilizado o modelo do chassi do veículo BMB 03, onde foram desenhados respeitando os regulamentos da competição vigente. Diferente do modelo estrutural 3D utilizado para outros fins na equipe, foi necessária a conversão dos itens estruturais para um modelo estrutural de arame durante; as figuras 19 e 20 mostram a transição dos modelos. Pelo novo modelo foi necessária uma simplificação, assim retirando olhais e o suporte do motor, que é removível fisicamente. A transição de modelos se deve à transferência de softwares, do SOLIDWORKS para o ABAQUS.

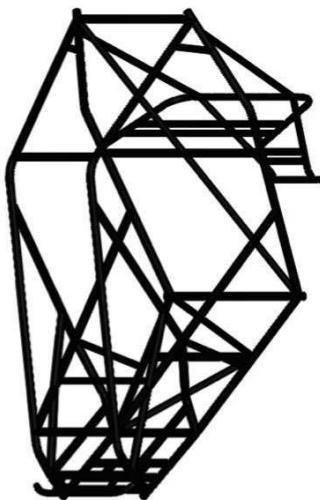


Figura 19: Vista isométrica chassi BMB03 (Autor, 2021)

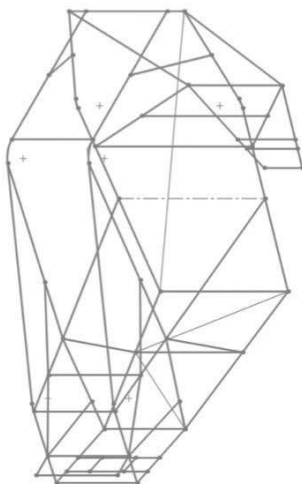


Figura 20: Vista isométrica chassi BMB03 (Autor, 2021)

3.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Todos os elementos estruturais foram modelados com o elemento de linha com requisito de dois nós por elemento, pois conseguiam alcançar um resultado satisfatório com baixa demanda computacional. Cada chassi está configurado com os elementos encontrados na tabela 02. A figura 11 apresenta a refinação da estrutura do modelo de chassi.

Tabela 2: Propriedades da Malha (Autor, 2021)

Tipo de elemento	Quantidade de elementos	Tamanho do elemento
linha	1066	20 mm

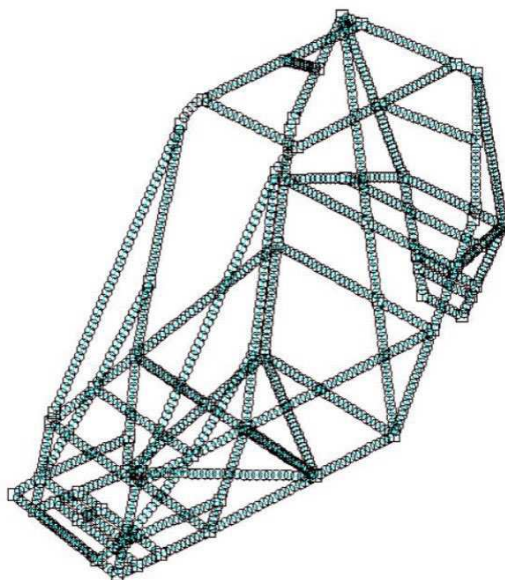


Figura 21: Malha aplicada no chassi BMB03 (Autor, 2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram obtidos modelos de elementos finitos para o chassi do BMB 03, tanto para impacto frontal e lateral, representando assim a realidade. As figuras 22 e 23 contêm os respectivos modelos.

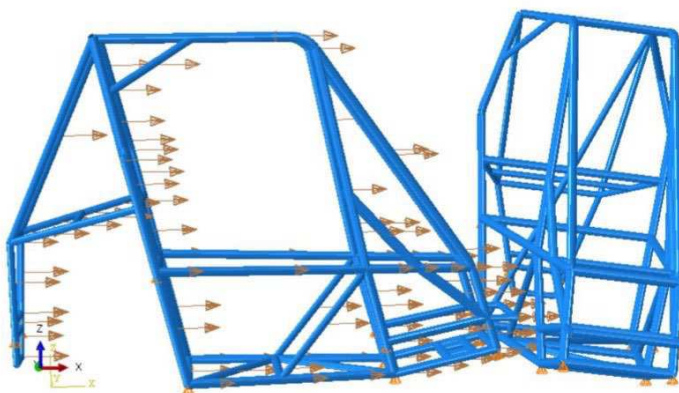


Figura 22: Modelo de impacto lateral - BMB03 (Autor, 2021)

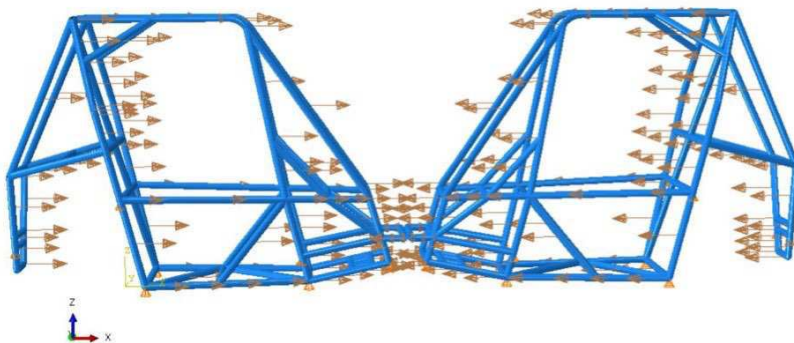


Figura 23: Modelo de impacto frontal - BMB03 (Autor, 2021)

Segundo o critério de Von Mises, foram-se analisadas as deformações obtidas durante o impacto frontal, que pode ser encontrado na figura 24. As tensões de escoamento conduzem aos pontos de pico de tensão para o impacto. A tensão máxima encontrada foi de 325 Mpa. Essa tensão está abaixo da tensão limite de escoamento que é de 350 Mpa, ficando dentro do estudo elasto-plástico.

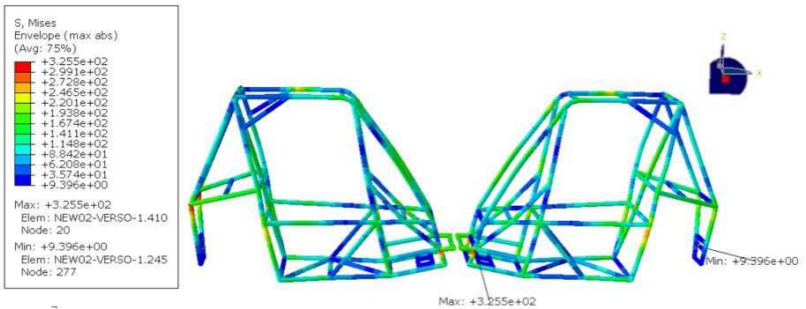


Figura 24: Modelo de impacto frontal, critério de Von Mises - BMB03 (Autor, 2021)

A figura 25 representa o teste de impacto lateral, onde a tensão máxima obtida foi de 360 Mpa. Para este caso a tensão de escoamento foi ultrapassada, mas ainda distante da tensão de ruptura.

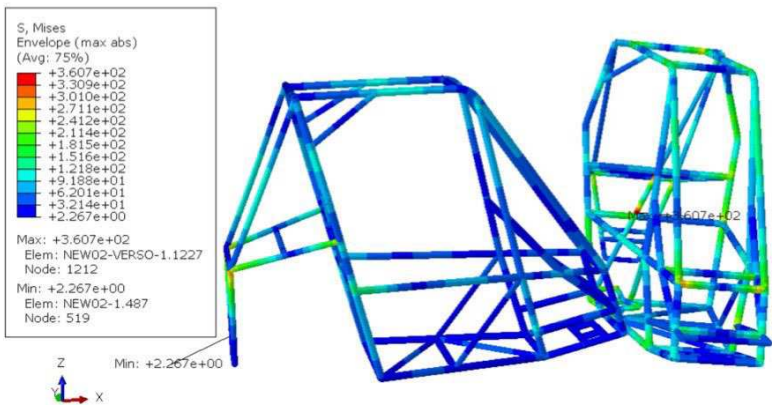


Figura 25: Modelo de impacto lateral, critério de Von Mises - BMB03 (Autor, 2021)

Os condutores mediante ao impacto estão sujeitos ao movimento reativo do veículo, com possíveis deformações plásticas do chassi podendo causar lesões. Portanto, buscou-se a representação dos tipos de deslocamento causados.

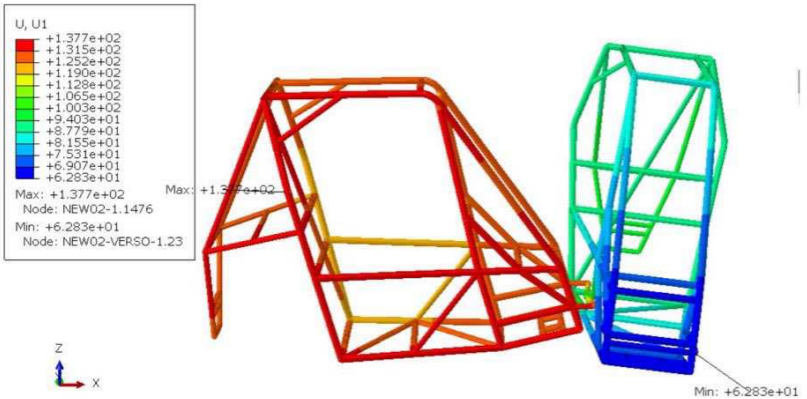


Figura 26: Modelo de impacto lateral, Deslocamento em X - BMB03 (Autor, 2021)

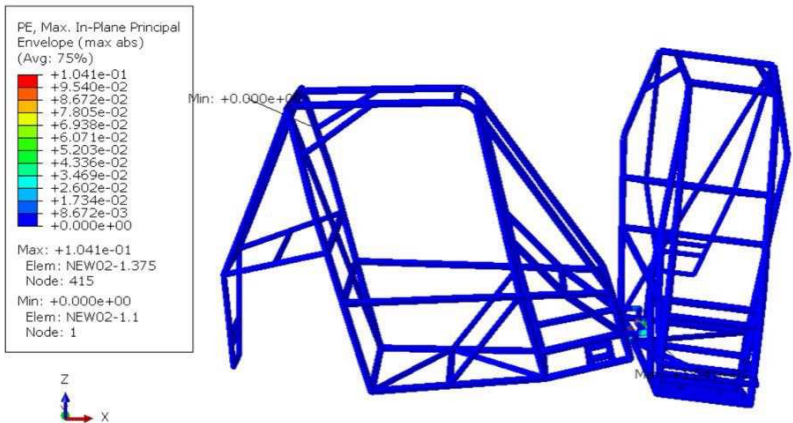


Figura 27: Modelo de impacto lateral, Deformação plástica - BMB03 (Autor, 2021)

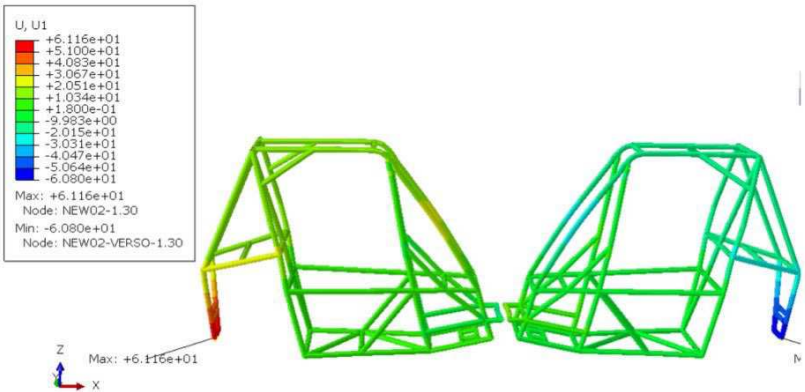


Figura 28: Modelo de impacto frontal, Deslocamento em X - BMB03 (Autor, 2021)

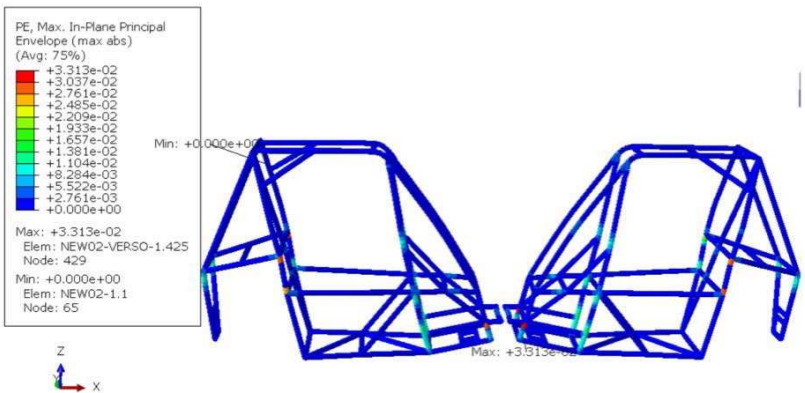


Figura 29: Modelo de impacto lateral, Deformação plástica - BMB03 (Autor, 2021)

As figuras 28 e 29 apresentam a quantidade dos deslocamentos na direção de X do chassi no impacto frontal e os pontos de deformação plástica. No impacto frontal com 6 mm de deslocamento na direção de X e 0.03 de deformação plástica. Pode ser verificado que os deslocamentos não apresentam risco adicionais ao condutor, mas foram identificadas regiões para a aplicação de reforço. Já as figuras 26 e 27 são representações de deslocamento na direção de X e a deformação plástica do teste de impacto lateral do chassi. O deslocamento na direção

de X da figura apresenta 13,0 mm de deslocamento, mas apenas 0,1 de deformação plástica. No impacto lateral, não aparenta pontos de reforço devido a baixa deformação plástica.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foi possível avaliar o comportamento do chassi do veículo BMB 03 da equipe Bumba Meu Baja ao ser submetido aos testes de impacto. O chassi se saiu bem quanto aos testes de impacto selecionados, tendo em vista o seu comportamento ao ser submetido aos impactos está em sua maioria no regime elástico, com alguns pontos no regime plástico. Vale ressaltar que todos os resultados segundo o critério de Von Mises não chegaram próximo a tensão de ruptura do aço 1020.

Os resultados de impacto se devem em grande parte ao range de velocidade que o veículo trabalha, tendo por velocidade máxima 42km/h. Porém ao considerar as provas para as quais o carro é projetado, possuir tal margem de tensão é mais uma barreira de segurança para garantir a integridade física do piloto ao final de cada prova e competição. Portanto o chassi BMB 03 está apto a ser construído e inserido nas competições.

6 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Para os próximos trabalhos tem-se a iniciativa de incluir estudos de comportamento do condutor quando submetido ao impacto, quando o corpo pode ser submetido a 15g ou mais. Esta direção de estudo buscará uma melhor compreensão do comportamento do condutor quando submetido ao impacto. A figura 30 apresenta uma comparação de resposta do modelo de pescoço humano e a resposta voluntária. Deste modo aumentando a confiabilidade e a segurança do condutor.

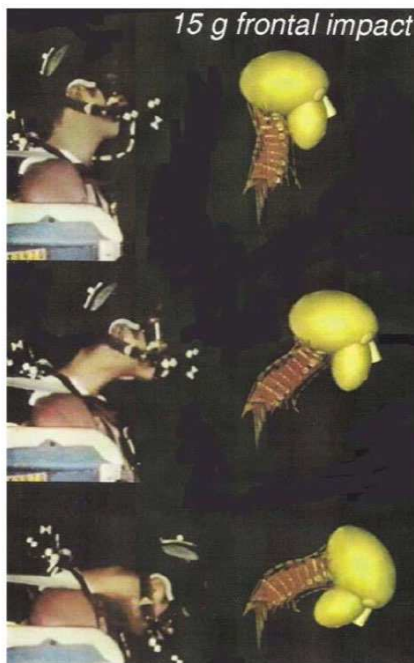


Figura 30: Comparação da resposta do modelo de pescoço humano e resposta voluntária
(BOIS, 2000)

A segunda vertente de pesquisa está na inserção de outros métodos de análise em conjunto ao MEF, método de elementos finitos, como por exemplo, o método de LMS (Lumped Mass Spring). O método LMS foi criado por Kamal em 1970, esse modelo é a construção de um sistema massa-mola-amortecedor não lineares, onde o veículo necessita de informações de

entrada do comportamento de cada peça do veículo submetido ao impacto, mostrado na figura 31. A princípio esta informação era obtida pelo impacto real de cada componente do sistema, mas com o avanço dos computadores podem ser obtidos pelo MEF.

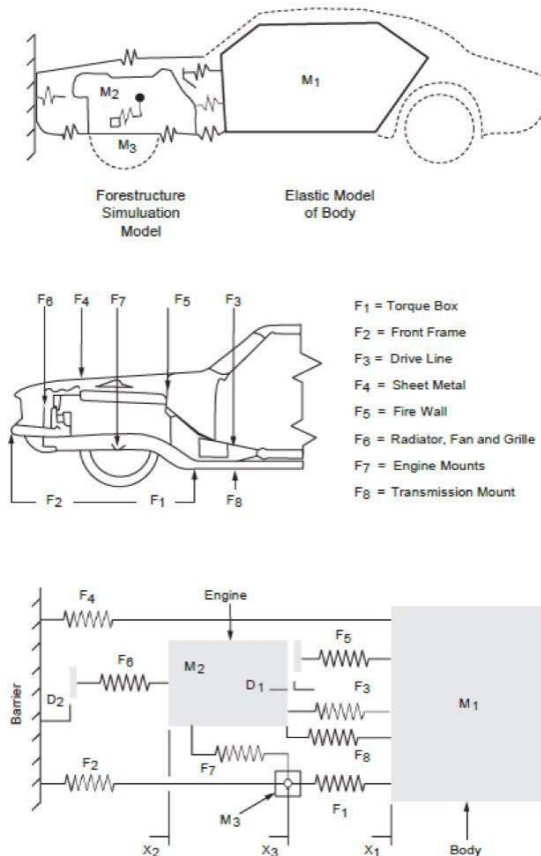


Figura 31: Modelo de Kamal (BOIS, 2000)

REFERÊNCIA

AMBROSIO, J. **Crash analysis and dynamical behaviour of light road and rail vehicles**. Vol. 43, No. 6–7, June–July 2005, 385–411. DOI: 10.1080/00423110500151788. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245309058_Crash_analysis_and_dynamical_behaviour_of_light_road_and_rail_vehicles. Acesso em: 21 set. 2021

AZEVEDO, A. F. *Método dos elementos finitos*. [S.l.]: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Portugal, 2011.

BOIS, P D et al. **VEHICLE CRASHWORTHINESS AND OCCUPANT PROTECTION**. American Iron and Steel Institute 2000 Town Center Southfield. 2001.

Congresso Interdisciplinar de pesquisa, Iniciação Científica e Extensão Universitária, 5, 2020, Belo Horizonte. Uso do método dos elementos finitos para o cálculo dos deslocamentos em treliças. Belo horizonte: 2020, 15.

FILHO, A. A.; *Elementos Finitos: A Base as Tecnologia CAE*. São Paulo: Érica, 2013. 298 p.

JOHNSON, W. et al. *Impact strength of materials*. Edward Arnold London, 1972. 361p.

N. H. Kim, B. V. Sankar e A. V. Kumar. *Introduction to Finite Element Analysis and Design*. John Wiley & Sons Ltd. 2nd Edition.2018.

LUZ, Gelson. *Aço SAE 1020 Propriedades (e Fornecedores do Aço 1020)*. Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 26 de novembro de 2021.

MADENCI, E.; GUVEN, I. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS Ro*. [S.l.]: London UK: Springer, 2015.

MATSUMOTO, A. T. **ESTUDO DO DESEMPENHO DE REFORÇOS POLIMÉRICOS EM ESTRUTURAS VEICULARES SUBMETIDAS A IMPACTO**. 2010. 149p. Dissertação (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo.

MIDJENA, D Y. MURASPAHIC, S. *Signal Analysis, Modeling and Simulation of Vehicle Crash Dynamics*. 2013, 132p. Dissertação (Mestrado) — University of Agder, Noruega.

MORETTI, I. Regras da ABNT para TCC 2021: guia completo com as normas. Viacarreira, 2021. Disponível em: <https://viacarreira.com/regras-da-abnt-para-tcc-conheca-principais-normas/>. Acesso em: 15 de nov. 2021.

MUNYAZIKWIYE, Bernard B et al. **Prediction of Vehicle Crashworthiness Parameters Using Piecewise Lumped Parameters and Finite Element Models**. Designs 2018, 2, 43. doi:10.20944/preprints201809.0009.v1. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/designs2040043>. Acesso em: 21 set. 2021.

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas (uma abordagem integrada), 4ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PINTO, A. F. B. P.; **Modeling of automotive structures using dynamic behaviour simulation software**. Tese mestrado em ciência em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, p. 132. 2013.

RASHID, M. H. Power electronics handbook: devices, circuits and applications. [S.l.]: London UK: Academic press, 2010.

RIBEIRO, F. L. B.; INTRODUÇÃO AO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS, 30 de mar. de 2003. 93 f. Notas de Aula.

SAE BRASIL. Regulamento Baja SAE Brasil. 2021. Disponível em: http://saebrasil1.hospedagemdesites.ws/RATBSB_emenda_04.pdf . Acesso em: 10 set. 2021.

SÁNCHEZ, C. A. A. Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear. 2001. 143p. Dissertação (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo.

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. Elementos de máquinas de Shigley. [S.l.]: AMGH Editora, 2016.

SILVA, N. L. M. ESTUDO DO DESGASTE DE COMPONENTES DE SISTEMAS DE AMARRAÇÃO DE PLATAFORMAS OFFSHORE. Brasília. 75p. 2016

SILVA, C. W. D. Vibration: fundamentals and practice. [S.l.]: London UK: CRC Press, 2006.

STRONGE, W. J.; IMPACT MECHANICS. New York: One Liberty Plaza, 2018. 362 p.

TAVARES, J. M. R. S.; Introdução Ao Método dos Elementos Finitos. Mai de 1998. 103 f. Notas de aula.

VAZ, L. E.; Método dos Elementos Finitos em Análise de Estrutura. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2011. 370 p.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. The finite element method: solid mechanics. [S.l.]: Butterworth-heinemann, 2000.

William, D. Callister. Ciência e engenharia de materiais : uma introdução / William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch ; tradução Sergio Murilo Stamile Soares. - 9. ed. - Rio de Janeiro : LTC, 2016.

WRIGGERS, P. Computacional Contact Mechanics. John Wiley & Sons Ltd. 2002.