



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEMEC
ENGENHARIA MECÂNICA**



ANDRÉ LUIZ DE SOUZA NETO

**Projeto e construção de um dispositivo de absorção de impacto para
veículo de competição Fórmula SAE®**

**OURO PRETO - MG
2019**

ANDRÉ LUIZ DE SOUZA NETO
andreh_luyz@yahoo.com.br

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE
ABSORÇÃO DE IMPACTO PARA VEÍCULO DE COMPETIÇÃO
FÓRMULA SAE[®]**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Ouro Preto como
requisito para a obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: MSc. Sávio Sade Tayer

OURO PRETO – MG
2019

So89p

Souza Neto, André Luiz de .

Projeto e construção de um dispositivo de absorção de impacto para veículo de competição Fórmula SAE® [manuscrito] / André Luiz de Souza Neto. - 2019.

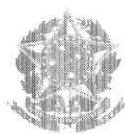
72f.:

Orientador: Prof. MSc. Sávio Sade Tayer.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Atenuador de impacto. 2. Absorção de energia. 3. Desaceleração. 4. Deformação. 5. Elementos finitos. I. Tayer, Sávio Sade. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos 04 dias do mês de julho de 2019, às 18 horas e 30 minutos, no auditório, localizada na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia do aluno **André Luiz de Souza Neto**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. Msc. Sávio Sade Tayer, Prof^a. DSc. Elisângela Martins Leal e DSc. Diogo Antônio de Sousa. O candidato apresentou o trabalho intitulado: **“Projeto e construção de um dispositivo de absorção de impacto para veículo de competição Fórmula SAE®”**, sob orientação do Prof. MSc Sávio Sade Tayer. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o(a) aluno(a) aprovado com a nota/conceito _____.

Ouro Preto, 04 de Julho de 2019.

Prof. MSc. Sávio Sade Tayer
Professor Orientador

Prof^a. DSc Elisângela Martins Leal
Professor Avaliador

Prof. DSc Diogo Antônio de Sousa
Professor Avaliador

André Luiz de Souza Neto
Aluno

*Dedico esse trabalho à minha mãe
Cármem Lúcia, meu padrasto José Evaristo,
aos meus afilhados Heitor e João Paulo e à
minha madrinha Aparecida (sempre
presente).*

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pelo dom da vida e por todas as maravilhas nela realizada.

À minha **Mãe Carmen**, pelo amor incondicional e por ser minha base. Obrigado por me amparar e por sempre estar ao meu lado me apoiando em todas as minhas decisões, sem sua atenção e dedicação eu não teria forças para chegar até aqui.

Ao meu padrasto **José Evaristo**, sinônimo de caráter e integridade, grande exemplo na minha vida, agradeço pelo apoio e pelo incentivo.

À minha **Madrinha Aparecida e Padrinho Sérgio**, que mesmo não estando mais presentes foram fundamentais na minha vida e na minha formação.

Aos meus **primos**, agradeço a amizade, o apoio e por sempre estarem presentes.

Aos **tios e tias**, pelo apoio e por estarem ao meu lado em todos os momentos.

Ao **Prof. Me. Sávio Sade Sayer**, querido Savinho, agradeço pela orientação, pela paciência, pelos ensinamentos compartilhados, pela atenção e principalmente pela amizade e pelas palavras de apoio.

À **Professora Dr^a. Elisangela Martins Leal** por gentilmente ceder sua sala e computador para a realização dos ensaios.

Ao **Prof. Dr. Diogo Antônio de Sousa** pela contribuição e enriquecimento do trabalho.

Aos amigos da banda **Zero Volt (João Paulo, Júnior Martins e Ricardo Trindade)** pela parceria e pelo apoio.

Aos amigos **Filipe Barcaro, Affonso Henrique, Camilo Carnog, Vinicius Veríssimo, Maria Caroline, Marco Aurélio, Aline de Paula, Matheus Oliveira e Rodrigo Barbosa** pelo apoio nessa caminhada, também agradeço pelo companheirismo e por todos os momentos de descontração.

Aos **colegas da Engenharia Mecânica** pela amizade, pelo apoio, por compartilhar o conhecimento, risadas e por dividirem as dores durante a caminhada.

À **UFOP** pelas oportunidades.

E a todos que de alguma forma contribuíram com a realização desse trabalho.

“Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma coisa e esperar resultados diferentes.”

Albert Einstein

RESUMO

O projeto e a fabricação de peças automotivas são áreas de destaque dentro da engenharia mecânica e englobam uma variedade de produtos e processos que são empregados de acordo com normas específicas para atender as demandas de mercado. Esse trabalho possui uma linha de atuação dentro das áreas mencionadas e consiste do desenvolvimento de um projeto e a efetiva produção de um dispositivo atenuador de impactos, que se trata de um componente fundamental para garantir a segurança dos ocupantes de veículos de passeio e de competição. De acordo com a metodologia aplicada, o trabalho pode ser classificado como uma pesquisa exploratória, experimental e quantitativa que teve como objetivo principal a construção de um dispositivo de absorção de impacto para veículo tipo fórmula, de acordo com as normas da competição SAE[®]. Esse trabalho tem como justificativa principal a necessidade de se desenvolver um atenuador de impacto para todos os veículos participantes da competição. Para tanto foram realizadas modelagens e simulações computacionais que avaliaram o comportamento do dispositivo por meio do método de elementos finitos, além disso, também foi construído um protótipo baseado no projeto desenvolvido. Pela realização das simulações computacionais pode-se verificar que o dispositivo projetado atende aos requisitos da competição apresentando uma absorção de energia de aproximadamente 12500J, além de proporcionar uma desaceleração média de aproximadamente 17,4g, características que garantem o cumprimento das normas regulamentadas pela SAE[®]. O protótipo construído apresenta as características do projeto, mas precisa ser ensaiado para garantir que as suas propriedades mecânicas estejam de acordo com o regulamento da competição.

Palavras-chave: atenuador de impacto, absorção de energia, desaceleração, deformação, simulação, elementos finitos.

ABSTRACT

The design and manufacturing of automotive parts are prominent areas within mechanical engineering and encompass a variety of products and processes that are employed according to specific standards to meet market demands. This work has a line of action within the mentioned areas and consists of the development of a project and the effective production of an impact mitigation device, a fundamental component for the safety of occupants of walking and competition vehicles. According to the applied methodology, the work can be classified as an exploratory, experimental and quantitative research whose main objective was the construction of an impact-absorbing device for vehicle formula, according to SAE® competition rules. This work is justified by the need to develop an impact attenuator for all vehicle participants in the competition. For that, computational modeling and simulation were performed to evaluate the behavior of the device using the finite element method(FEM). In addition, a prototype was also built based on the developed design. By performing the computational simulations it can be verified that the designed device meets the requirements of the competition presenting an energy absorption of approximately 12500J, in addition to providing an average deceleration of approximately 17.4g, characteristics that ensure compliance with the standards regulated by SAE®. The built prototype features the design features but needs to be tested to ensure that its mechanical properties comply with the competition rules.

Keywords: impact attenuator, energy absorption, slowdown, deformation, simulation, finite element method

LISTA DE SIMBOLOS

A – Amperes

AL1100 – Liga de alumínio com 99% de pureza

D₀ – Diâmetro inicial (ensaio de compressão) [mm]

D_f – Diâmetro final (ensaio de compressão)[mm]

F – Carga [N]

FEM – *Finite element method*

FSAE – Fórmula SAE

g – Unidade indicativa de aceleração da gravidade

G350 – Liga de alumínio e zircônio

H₀ – Comprimento inicial (ensaio de compressão)

H_f – Comprimento final (ensaio de compressão)

IAD – *Impact attenuator data*

J – Joules

kg - Quilograma

kg/m³ - Quilograma por metro cúbico

km – Quilometro

km/h – Quilometro por hora

kN – Quilonewton

m - Metro

m/s – Metro por segundo

MEF – Método de elementos finitos

mm – Milímetro

MPa – Mega Pascal

N – Newtons

P&D – Pesquisa e desenvolvimento

PCB – Placa de circuito impresso

PIB – Produto interno bruto

PTV – Princípio dos trabalhos virtuais

R² - Coeficiente de determinação

SAE – Sociedade dos Engenheiros de Mobilidade

V_f – Velocidade final

V_{in} – Velocidade inicial

ΔP – Momento linear

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 Comportamento dos corpos antes e após a colisão elástica, sendo v_{inA} e v_{inB} as velocidades iniciais e v_{fA} e v_{fB} as velocidades finais de A e B, respectivamente.	15
Figura 2. 2 Comportamento dos corpos antes e após a colisão completamente inelástica, sendo v_{inA} e v_{inB} as velocidades iniciais e v_f a velocidades final de A e B, respectivamente.	17
Figura 2. 3 Representação de um ensaio de compressão.	23
Figura 3. 1 Fluxograma das etapas realizadas nesse trabalho	30
Figura 3. 2 Representação da montagem realizada para a simulação estática.	31
Figura 3. 3 Modelos para corte a laser das chapas de alumínio. a) Placa superior e inferior, b) placas direita e esquerda e c) placa frontal.	33
Figura 4. 1 Projeto de um atenuador de impacto para veículo tipo fórmula SAE®. a) Vista frontal; b) vista superior; e c) vista lateral. Obs.: Valores em milímetros (mm). 37	37
Figura 4. 2. Vista ortogonal do desenho de um atenuador de impacto para veículo tipo fórmula SAE®.	38
Figura 4. 3 Desenhos dos modelos de atenuadores de impacto projetados para veículo tipo fórmula SAE®.	39
Figura 4. 4 Resultado da análise estática (Tensão por Von Mises) realizada nos modelos propostos para construção dos atenuadores de impacto. a) Modelo 1; b) modelo 2; e c) modelo 3.	40
Figura 4. 5 Resultado da análise estática (deslocamento estático) realizada nos modelos propostos para construção dos atenuadores de impacto. a) Modelo 1; b) modelo 2; e c) modelo 3.	40
Figura 4. 6 Deformação resultante da análise dinâmica, vista lateral. a) 0 segundos; b) $3,58 \times 10^{-3}$ segundos; c) $7,19 \times 10^{-3}$ segundos; d) $1,07 \times 10^{-2}$ segundos; e e) $2,15 \times 10^{-2}$ segundos.	42
Figura 4. 7 Deformação resultante da análise dinâmica, vista superior. a) 0 segundos; b) $1,25 \times 10^{-2}$ segundos; c) $2,01 \times 10^{-2}$ segundos; d) $2,87 \times 10^{-2}$ segundos; e e) $3,01 \times 10^{-2}$ segundos.	43

Figura 4. 8 Representação gráfica da deformação em função do tempo, resultante da análise dinâmica.....	44
Figura 4. 9 Representação gráfica da energia absorvida em função do tempo obtida através da análise dinâmica.	45
Figura 4. 10 Representação gráfica da desaceleração do atenuador após a colisão em função do tempo obtida através da análise dinâmica.....	46
Figura 4. 11 Placas de alumínio, detalhes do corte a laser para construção do atenuador de impacto.	47
Figura 4. 12 Atenuador de impacto após soldagem. a) Vista isométrica, b) vista da parte superior e c) vista lateral.	48
Figura 4. 13 Interior do atenuador de impacto	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 Variáveis e indicadores estudados.....	35
---	----

SUMÁRIO

R E S U M O.....	I
ABSTRACT	II
LISTA DE SIMBOLOS.....	III
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS.....	VII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Formulação do Problema	1
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Geral.....	4
1.3.2 Específicos	4
1.4 Estrutura do Trabalho	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 SAE® <i>International</i>	6
2.1.1 SAE® BRASIL	8
2.1.2 Fórmula SAE®	9
2.2 Colisões de veículos e absorção de energia	13
2.3 Dispositivo de absorção de energia	17
2.3.1 Geometrias e materiais usados em dispositivos de absorção de energia ..	19
2.4 Ensaio dos dispositivos de absorção de energia	22
2.5 Método os Elementos Finitos.....	25
2.6 Considerações finais	27
3 METODOLOGIA	28
3.1 Tipo de pesquisa.....	28
3.2 Materiais e Métodos	29
3.2.1 Especificação e desenho.....	30
3.2.2 Simulação computacional	31
3.2.3 Construção do modelo	32

3.3	Variáveis e Indicadores.....	33
3.4	Instrumento de coleta de dados	34
3.5	Tabulação dos dados.....	34
3.6	Considerações Finais do capítulo	34
4	RESULTADOS.....	36
4.1	Projeto do atenuador de impacto	36
4.2	Simulação dos modelos de atenuadores de impacto.....	39
4.2.1	Análise estática	40
4.2.2	Análise dinâmica	42
4.3	Construção dos protótipos de atenuadores de impacto.....	47
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	50
5.1	Conclusões	50
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	50
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Em decorrência, principalmente, do processo de globalização, o mundo passou por diversas transformações políticas, sociais, econômicas e culturais nos últimos anos (FERREIRA, 2017).

Impulsionado por essas transformações, pela evolução da ciência e pelo desenvolvimento de novas tecnologias, o setor industrial apresentou significativa modernização com resultados cada vez expressivos.

O desenvolvimento do setor industrial está relacionado com a busca por excelência, e isso faz com que as empresas absorvam o que há de melhor no mercado, seja durante a montagem de sua infraestrutura, na tecnologia empregada na sua linha de produção, quanto na mão de obra empregada. Dessa forma, o mercado de trabalho se torna cada vez mais competitivo e exige do profissional, qualificações que o ajude a suprir deficiências em determinadas competências e/ou habilidades necessárias para o desempenho das atividades dentro das empresas (BORGES, 2018).

De acordo com o Ministério da Economia, indústria, comércio exterior, e serviços (2018), um setor que se destaca devido à tecnologia empregada em seus postos de trabalho e a sua importância em relação à estrutura industrial, em todo o mundo, é a indústria automotiva, sendo que no Brasil, esse setor é responsável por aproximadamente 22% do PIB industrial.

A indústria automotiva, que compreende além dos veículos de passageiros e de cargas, os setores de autopeças, máquinas agrícolas e veículos de duas rodas possui uma cadeia produtiva ligada a diferentes setores como aços e derivados, máquinas e equipamentos, materiais eletrônicos, produtos de metal, borracha e plástico que são responsáveis pelo fornecimento, principalmente, dos insumos para a produção (FIEPR, 2018; MDIC, 2018).

A indústria automotiva possui uma extensa e complexa cadeia produtiva e emprega nos mais variados processos e etapas da sua produção, profissionais de diferentes áreas de conhecimento contribuindo, assim, com o desenvolvimento econômico e tecnológico nacional (CARDOSO *et al*, 2015).

As empresas desse setor, em grande parte, são transnacionais e de grande porte devido principalmente ao padrão tecnológico empregado e ao alcance do mercado. Essas empresas destinam grandes investimentos para a pesquisa e desenvolvimento

(P&D) de novos produtos, propagandas, *setups* (moldes, ajustamento de maquinário e outros), investimentos em máquinas, equipamentos e montagem da infraestrutura produtiva com o objetivo de oferecer um produto que garanta a satisfação dos seus clientes, para tanto essas empresas utilizam profissionais de diversas áreas de conhecimento (MDIC, 2018).

A mecânica automotiva é uma área específica da engenharia mecânica, sendo essa, uma das principais áreas de atuação. De acordo com Bazzo e Pereira (2006), essa área é responsável pela criação, planejamento e gerenciamento em diversas etapas da produção industrial do setor automobilístico, sendo amplamente empregada desde a fase de projeto, passando pela fabricação do veículo até as análises que garantem a segurança do produto após a fabricação. Para tanto, dentre as funções desempenhadas pela mecânica automotiva pode-se utilizar como exemplos os dimensionamentos dos elementos que compõem um veículo, como chassi, carroceria, conjunto motopropulsor, elementos de segurança e a produção de peças em geral.

O projeto e a efetiva fabricação de autopeças ou peças automotivas é uma área de destaque dentro da mecânica e, em geral, engloba grande variedade de produtos, processos e materiais que são empregados para atender às demandas do mercado (VIANA, 2016). Ainda de acordo com o autor, a produção industrial de autopeças é direcionada pela demanda das montadoras e pela necessidade de reposição de peças no mercado. De uma forma geral, a produção de autopeças esta ligada diretamente à produção de veículos novos já que esse setor absorve grande parte dos produtos. Além disso, em situações específicas, como a mudança de um projeto, ou a criação de um novo conceito é necessário o desenvolvimento de novas peças.

Os atenuadores de impacto, a exemplo das longarinas e para-choques, são peças automotivas fundamentais em quaisquer veículos, pois funcionam como dispositivos projetados para desacelerar gradualmente um veículo quando ocorre uma colisão, de forma que seja garantida a integridade da célula de sobrevivência (habitáculo) do veículo, consequentemente a integridade dos ocupantes (BELINGARD e OBRADOVIC, 2010). Como o estudo e o dimensionamento desse tipo de dispositivo estão relacionados, principalmente com a segurança dos passageiros em caso de acidentes os fatores relacionados ao seu projeto e concepção são tratados com elevado grau de atenção pelas equipes de projetistas (BELINGARD e OBRADOVIC, 2010; GALHARDI, 2017).

A preocupação com os elementos de segurança do veículo pode ser observada até mesmo em projetos universitários, como a competição Fórmula SAE® BRASIL. Nessa competição as equipes formadas por alunos de cursos de engenharia projetam e constroem um veículo tipo fórmula monoposto seguindo normas previstas em regulamento. Nessa competição, tem-se a etapa de construção de um atenuador de impacto que deve ser projetado, simulado e ensaiado e os resultados obtidos a partir destes testes devem ser validados pela organização da competição que vai garantir sua funcionalidade em relação à segurança do piloto em caso de acidente.

Diante do exposto tem-se a seguinte questão:

Como construir um dispositivo de absorção de impacto que atenda às exigências da competição fórmula SAE®?

1.2 Justificativa

O projeto e a construção do atenuador de impacto para um veículo fórmula SAE® são importantes, pois na competição, a escolha do método bem como os materiais utilizados é livre para as equipes. Entretanto, a efetividade deve ser comprovada por meio de testes que são avaliados pelos juízes da competição. Essa avaliação é feita por meio de um relatório que contem as características do modelo construído e os resultados dos ensaios realizados, destacando, principalmente, os valores de energia absorvida pelo dispositivo construído.

Além disso, o projeto de um novo dispositivo de absorção de energia, específico para veículos fórmula SAE Brasil, pode ser útil para equipes que participam dessa competição já que podem ser usados, por exemplo, como referencial teórico para construção de novos modelos.

A realização desse trabalho também é importante, pois permite a aplicação, de forma prática, de diversos conceitos teóricos adquiridos durante a graduação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Esse trabalho tem como objetivo principal construir um dispositivo de absorção de impacto para veículo tipo fórmula monoposto que atenda às normas da competição organizada pela SAE[®] Brasil.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão de literatura sobre a SAE[®] *International*, SAE[®] Brasil e a competição Fórmula SAE[®], absorção de energia, importância dos dispositivos de absorção de impacto, especificações, cálculos, geometria e os materiais utilizados na construção de dispositivos atenuadores de impacto.
- Propor modelos de atenuadores de impacto utilizando *software SolidWorks*.
- Realizar simulação computacional utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) utilizando o *softwares SolidWorks e ANSYS*.
- Construir o protótipo a partir dos dados da simulação.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esse trabalho está dividido em cinco capítulos: O primeiro capítulo apresenta as ideias fundamentais do projeto de construção de um dispositivo de absorção de impacto utilizado em veículos para competição fórmula SAE Brasil, destacando a formulação do problema a ser tratado, a justificação para a realização desse trabalho, os objetivos geral e específicos bem como a estruturação básica do projeto. O segundo capítulo consiste de uma revisão bibliográfica contendo, principalmente, os fundamentos teóricos e contribuições científicas apresentadas por diferentes autores que serão necessários durante a realização desse trabalho. O terceiro capítulo apresenta a metodologia a ser utilizada. Essa, por sua vez, é composta pelos métodos, técnicas, processos, aparelhos e instrumentos utilizados durante a pesquisa e desenvolvimento desse projeto. O quarto capítulo é composto pelos resultados e discussão, ou seja, nesse capítulo são apresentadas as descobertas obtidas a partir do trabalho realizado e as explicações sobre os motivos que levaram aos resultados observados, assim como suas implicações, consequências e a maneira como eles podem contribuir para a literatura científica. No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações. Nessa etapa é

possível ressaltar a importância do trabalho realizado mostrando, de fato, quais dos objetivos traçados foram alcançados através de um breve resumo dos principais resultados. A partir dessas informações podem-se apresentar, também, recomendações e outras questões a serem abordadas em trabalho futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considerando as questões propostas para esse trabalho realizou-se essa revisão bibliográfica, que apresenta os principais conceitos relacionados à associação SAE[®] *International*, SAE[®] BRASIL, a competição Fórmula SAE[®], colisões entre veículos, absorção e dissipação de energia bem como projetos e outros aspectos construtivos de dispositivos atenuadores de impacto encontrados na literatura. Esse conjunto de informações possibilitou maior compreensão e condução das etapas realizadas no decorrer desse trabalho.

2.1 SAE[®] *International*

A *Society of Automobile Engineers* - SAE[®] *International* é uma associação mundial responsável pelos estudos relacionados à engenharia automobilística e as indústrias montadoras de automóveis. Essa associação é uma das principais fontes de normas e padrões relativas aos setores automotivo e aeroespacial no mundo. Estima-se que estejam associados a ela aproximadamente 138 mil engenheiros e técnicos especialistas dos setores aeroespacial, comercial, industrial e automobilísticos (SAE, 2018a).

O surgimento da SAE[®] *International* remonta ao início do século 19, época em que, tanto nos Estados Unidos quanto em outras partes do mundo, os engenheiros do setor automobilístico, as montadoras de veículos e os fabricantes de autopeças, considerando a necessidade de proteção de patentes, resolução de problemas de design técnico, bem como o desenvolvimento de padrões para a engenharia disseminaram o desejo de ter uma "*troca livre de ideias*" para que pudessem expandir as bases de conhecimento técnico individual (SAE, 2018a). Ainda de acordo com os autores, dois homens ligados a revistas da época tiveram reconhecida importância durante a criação da SAE[®] *International*, sendo considerados disseminadores iniciais dos conceitos que levaram à criação da associação. Peter Heldt da *Horseless Age* e Horace Swetland da *Automobile* usaram os espaços de seus editoriais para dar voz aos engenheiros automotivos da época, com publicações que iniciaram de 1902.

No entanto, a efetiva fundação da SAE[®] *International* só ocorreu em 1905 tendo Andrew Riker como presidente e Henry Ford como o primeiro vice-presidente. A associação tinha como sede um escritório em Nova York e contava com quatro diretores e cinco administradores que disponibilizavam seu tempo e serviço de forma voluntária.

Inicialmente cerca de 30 engenheiros participavam dessa associação, mas durante seus primeiros dez anos, verificou-se um crescimento contínuo da SAE[®] resultando na definição de uma equipe que trabalhava em tempo integral. Graças ao seu crescimento e reconhecimento a associação iniciou a publicação de boletins técnicos e uma compilação de documentos técnicos, antes conhecidos como SAE[®] *Transactions*. Esses documentos ainda existem, mas hoje podem ser encontrados na forma dos boletins da SAE *International* (SAE, 2018a).

Estima-se que em 1916 a SAE[®] possuía cerca 1.800 associados e na reunião geral desse ano os representantes da *American Society of Aeronautic Engineers*, da *Society of Tractor Engineers* e os representantes de setores relacionados a barcos a motor oficializaram o pedido à associação para supervisionar os padrões técnicos de suas respectivas áreas. A partir daí a SAE[®] passou a apresentar uma nova organização com novos horizontes transformando-se em uma sociedade que representava os engenheiros envolvidos em todos os tipos de trabalho relacionado à mobilidade (SAE, 2018a).

Uma das vantagens para os afiliados da SAE[®] *International* é poder usufruir dos recursos por ela disponibilizados. Como exemplo tem-se as revistas *Automotive Engineering International*, *Aerospace Engineering* e *Off Highway Engineering*, que são usadas pela sociedade para manter a comunidade de mobilidade informada sobre os desenvolvimentos do setor. A associação distribui para clientes em mais de 65 países publicações técnicas, históricas e estatísticas relacionadas à mobilidade todos os anos. Além disso, ela ampliou nos últimos 20 anos os recursos relacionados ao treinamento e desenvolvimento profissional sendo observados na produção de mais de 450 eventos para o desenvolvimento profissional, realizados anualmente (SAE, 2018a). Os autores também afirmam que as principais qualificações da SAE[®] *International* são o aprendizado duradouro e o desenvolvimento de padrões consensuais voluntários.

O crescimento da SAE[®] *International* resultou na sua expansão mundial, que levou a instalação de quatro seções geográficas no subcontinente indiano, além de ter estabelecido novas seções na China, na Rússia, na Romênia e no Egito. Nos anos 90, foi fundado a SAE[®] BRASIL, que se trata de uma sociedade afiliada com mais de 1.500 membros e que conta com um evento anual próprio, o Congresso SAE BRASIL.

2.1.1 SAE® BRASIL

A SAE® BRASIL foi fundada no início de 1991 a partir da associação de executivos dos segmentos automotivo e aeroespacial que buscavam novas formas de conhecimento para os profissionais brasileiros da mobilidade, em virtude principalmente do processo de globalização (SAE, 2018b).

De acordo com os autores, as atividades desenvolvidas pela SAE® BRASIL são fontes de conhecimento e atualização tecnológica para a indústria brasileira, essas atividades têm como foco a inovação e as tendências da mobilidade nacional e internacional, e através da realização anual de simpósios, colóquios, cursos e outros eventos técnicos, a associação desempenha importante papel dentro desse mercado, gerando e disseminando conhecimento para todos os profissionais brasileiros ligados à engenharia da mobilidade.

A sede da SAE® BRASIL localiza-se na cidade de São Paulo, mas a associação também está presente em outros sete estados brasileiros por meio de 10 seções regionais. Atualmente possui cerca de seis mil associados e mais de mil voluntários que ajudam a promover aproximadamente 100 eventos anuais, esses se dividem em simpósios, fóruns, colóquios, palestras e congressos (SAE, 2018c).

Entre as atividades desenvolvidas pela SAE®, no Brasil, os programas estudantis promovidos pela associação podem ser destacados, uma vez que mobilizam, anualmente, cerca de 3.000 estudantes das principais escolas de engenharia do Brasil e outros países da América do Sul (SAE, 2018c).

De acordo com a associação esses programas são, de fato, verdadeiros campos de prova para os futuros engenheiros, já que as atividades promovidas integram-se à experiência acadêmica e prática dos alunos. Essas atividades, em grande parte, são estimuladas por professores, orientadores e profissionais da área (SAE, 2018c).

Através de competições relacionadas à mobilidade, exemplos de programas desenvolvidos pela SAE® no Brasil, os alunos têm oportunidades únicas para colocar em prática o conhecimento adquirido em sala de aula, uma vez que o aluno participante vivencia todas as etapas de um projeto assim como a busca por soluções criativas e o trabalho em equipe, características que se assemelham aos ambientes de trabalho que serão encontrados pelo aluno após a formatura (SAE, 2018c).

2.1.2 Fórmula SAE®

De acordo com Fernández (2016) e Lopes (2018) Fórmula SAE® surgiu nos anos 1980 e se trata de uma competição direcionada a alunos, principalmente de cursos de engenharia. No Brasil essa competição teve início no ano de 2004 e as equipes que melhor se classificam, recebem como premiação, a oportunidade de participar de duas competições internacionais promovidas pela SAE.

Kerber (2017) afirma que se trata de uma competição focada no desenvolvimento de produto sendo a *Society of Automotive Engineers* a responsável pela organização e por determinar todas as regras/normas e as formas de julgamento da competição.

Os principais desafios das equipes participantes estão associados às etapas de projeto e construção de um veículo tipo Fórmula, monoposto que esteja apto a competir. Durante a competição essas equipes passam por testes que avaliam as etapas desse projeto em relação à concepção técnica e a viabilidade comercial além de provas dinâmicas realizadas pelos veículos construídos (SAE, 2018b; SAE, 2018d).

De acordo com Cruz (2018) a competição ocorre durante três dias em que as equipes e seus respectivos veículos são efetivamente avaliados tanto por provas estáticas como provas dinâmicas. Essas provas têm como finalidades avaliar o desempenho de cada projeto na pista, bem como as apresentações técnicas relacionadas ao projeto, custos e *marketing*. Algumas das etapas de avaliação se iniciam previamente, uma vez que, meses antes da competição, as equipes devem enviar para o comitê organizador relatórios específicos que contenham dados relacionados aos custos, à estrutura, ao atenuador de impacto e ao projeto.

Ainda de acordo com Cruz (2018) esses relatórios são avaliados por engenheiros especialistas, e já valem como a primeira parte da avaliação dos protótipos. Nos dias em que ocorre a competição, as provas estáticas são etapas nas quais as equipes devem demonstrar de forma mais detalhada que o veículo projetado se equivale ao protótipo apresentado no evento. As provas dinâmicas, por sua vez, são realizadas no segundo e terceiro dias do evento e tem como objetivo principal avaliar o carro construído em relação à aceleração, manobrabilidade, desempenho, resistência e consumo. De acordo com a autora, os organizadores do evento utilizam diferentes métodos de pontuação para as provas, sendo essa, uma forma de garantir que o melhor conjunto projeto/carro seja o vencedor da competição.

As provas dinâmicas, de acordo com Lopes (2018) são etapas nas quais se avalia o desempenho dos veículos na pista através de testes de aceleração, *skidpad*, *autocross* e *endurance*. O autor também afirma que um dos requisitos obrigatórios para que a equipe esteja apta a participar das provas dinâmicas é a aprovação do veículo na inspeção de segurança, em que são avaliados os níveis de ruído, capacidade de frenagem e estabilidade ao capotamento, além da verificação do atendimento de todas as determinações previstas no regulamento.

O termo *skidpad* pode ser definido de diferentes formas, mas no contexto da competição Fórmula SAE[®], tanto Fernández (2016) como Galhardi (2017) o classificam como uma prova em que se avalia a capacidade do veículo de realizar curvas em uma superfície plana enquanto gira por duas pistas circulares de raios constantes e distâncias de 18,25 m entre os centros, além disso, essas duas pistas se interceptam formando um oito.

O teste dinâmico denominado *autocross* tem como principais objetivos a avaliação da manobrabilidade e o controle do carro em uma pista com curvas e zonas denominadas *slaloms*. A partir dessa prova é possível avaliar o potencial do veículo construído quanto à sua capacidade de aceleração e resposta em curvas e frenagens, já que durante sua realização os pilotos realizam uma sequência de curvas e manobras por cones posicionados a uma distância média de 10m (*slaloms*) em um circuito de 0,805 km. Nessa prova a velocidade média dos veículos varia de 40 a 48 km/h e tanto o piloto quanto a equipe competidora são penalizados quando o carro se choca com o cone deslocando-o, quando o veículo sai do percurso previamente delimitado ou quando deixa de fazer a manobra por algum cone no *slalom* (FERNÁNDEZ, 2016; GALHARDI, 2017).

Galhardi (2017) afirma que as provas de enduro e eficiência acontecem simultaneamente. O enduro tem como objetivo central a avaliação do desempenho do carro já que nessa prova é possível testar a confiabilidade e a durabilidade do veículo quando ele percorre um circuito de 22 km composto por curvas, retas e *slaloms*. Ainda de acordo com o autor, a velocidade dos veículos pode chegar até mesmo a 105 km/h durante o percurso.

Para Fernández (2016) a prova de eficiência é realizada para avaliar a preparação do veículo para a competição, principalmente no que diz respeito à relação entre o consumo e o desempenho do mesmo.

Todas as etapas, as provas, as avaliações e as formas de pontuação e penalidades bem como quaisquer outras informações referentes à competição Fórmula SAE® são normatizadas pela associação organizadora do evento e apresentadas ao público por meio do regulamento específico da competição (CRUZ, 2018).

2.1.2.1 Regulamento Fórmula SAE®

A normativa da competição Fórmula SAE® pode ser descrita como um documento detalhado no qual são apresentadas todos os aspectos técnicos e administrativos que descrevem como a competição deve ser realizada (PRAZERES, 2016; SAE, 2018f). É importante destacar que desde 2006 são encontrados nesse regulamento todos os requisitos necessários para dimensionar, construir, testar e classificar os componentes do veículo.

Levando-se em consideração os objetivos propostos para esse trabalho e buscando objetividade serão apresentadas, a seguir, as especificações apresentadas pela organização da competição Fórmula SAE® que precisam ser consideradas quando se realiza o projeto e construção de um novo atenuador de impacto.

O regulamento Fórmula SAE® 2019, versão 2.1 de 17 de outubro de 2018 que apresenta as regras para as competições realizadas no ano de 2019 trata a questão do atenuador de impacto, principalmente, nos itens T.2.23 e T.2.25 (SAE, 2018e).

Em T.2.23.1 estão apresentadas as opções disponíveis para as equipes em relação à escolha do atenuador de impacto, sendo essas: (i) usar o atenuador de impacto padrão que é aprovado e disponível no site da FSAE® ou (ii) construir e testar seu próprio atenuador de impacto (SAE, 2018e).

Em T.2.23.2 são descritas as principais características construtivas que devem ser consideradas quando se projeta um novo dispositivo.

- a) O atenuador deve ter no mínimo 200 mm de comprimento, devendo esse comprimento estar orientado ao longo do eixo longitudinal da estrutura;
- b) Deve apresentar no mínimo 100 mm de altura e 200 mm de largura por uma distância mínima de 200 mm para frente do *front bulkhead* (parte frontal do veículo);
- c) A fixação junto à placa anti-intrusão (placa rígida responsável por evitar a penetração de objetos dentro do *cockpit*) deve ser segura e não pode fazer parte da estrutura e;

d) Os atenuadores construídos em espuma ou segmentados devem possuir união entre as partes, tal que não ocorram deslizamento ou formação de paralelogramo.

O item T.2.23.3 trata as exigências de fixação do atenuador de impacto na placa anti-intrusão, sendo que as formas de fixação aceitas pela organização do evento são:

a) Soldagem contínua ou interrompida. O processo deve, quando utilizado solda interrompida, apresentar relação solda/espço de no mínimo 1:1 e um comprimento de solda, superior a 25 mm;

b) Juntas aparafusadas. Nesse caso devem ser usados no mínimo quatro fixadores críticos com diâmetros mínimos de 8 mm. Além disso, a distância entre dois centros de parafusos, quaisquer, deve ser no mínimo 50 mm ou;

c) Adesivos estruturais, sendo que esses adesivos devem ser apropriados para uso nos materiais tanto do atenuador de impacto quanto da placa anti-intrusão.

É importante ressaltar que a escolha do adesivo apropriado, bem como a preparação do substrato e a equivalência dessa união ligada à junta aparafusada descrita em T.2.23.3b devem ser documentadas no relatório preparado pela equipe e enviada para os juízes da competição em datas definidas pela organização.

O item T.2.25.1 apresenta instruções para as equipes no que diz respeito ao envio do relatório de dados do atenuador de impacto (IAD) mostrando, entre outros aspectos, os requisitos funcionais exigidos para esse dispositivo, descritos em T.2.25.2.

O regulamento, em T.2.25.2 apresenta as condições de teste aprovadas pela organização da competição, que são a massa do conjunto veículo/piloto igual a 300 kg e velocidade de impacto igual a 7,0 m/s bem como as exigências para o dispositivo projetado:

a) Desaceleração do veículo a uma taxa não superior a 20 g de média e 40 g de pico máximo e;

b) Absorção de energia do atenuador de impacto no mínimo igual a 7350 J.

O não atendimento dos requisitos descritos no item anterior pode levar a não aprovação do projeto desenvolvido pela equipe e sua desclassificação para as provas seguintes.

O item T.2.25.4 relaciona os dados que devem ser apresentados no relatório de dados do atenuador de impacto quando a equipe faz a opção por construir seu próprio equipamento:

a) Resultados dos testes que permitam comprovar o atendimento dos requisitos funcionais pelo conjunto do atenuador de impacto construído;

- b) Memorial de cálculo comprovando como a energia absorvida e as desacelerações encontradas foram derivadas;
- c) Representação esquemática do método de teste e;
- d) Relatório fotográfico do atenuador, apresentando suas alturas antes e depois dos testes.

O protocolo a ser seguido para realização dos testes nos atenuadores de impacto é descrito em T.2.25.5.

- a) Qualquer teste deve ser realizado utilizando o atenuador de impacto fixado à placa anti-intrusão através do método de fixação pretendido;
- b) É importante que o conjunto do atenuador de impacto esteja conectado a uma seção estruturalmente representativa do chassi pretendido. O dispositivo utilizado para a realização do teste deve apresentar resistência e rigidez equivalentes ao anteparo frontal de linha de base, uma vez que um bloco sólido de material na forma do anteparo frontal não pode ser considerado estruturalmente representativo para os objetivos do teste;
- c) Deve-se manter um mínimo de 50 mm de folga entre a parte de trás da placa anti-intrusão em relação ao dispositivo de teste e;
- d) Nenhuma parte da placa anti-intrusão pode defletir de forma permanente mais de 25 mm em relação a sua posição antes do teste.

Para as equipes que usam atenuadores de impacto (geralmente narizes estruturais) ligados diretamente ao anteparo frontal do veículo, segundo item T.2.25.8 devem realizar um teste adicional que tem como objetivo provar que a placa anti-intrusão é capaz de suportar uma carga de 120000 N (300 kg multiplicados por 40 g). Nesse caso o aplicador de carga deve corresponder às dimensões mínimas do atenuador de impacto (SAE, 2018e).

A organização da competição utiliza como justificativas para a definição dessas características para a construção dos dispositivos atenuadores de impacto principalmente a preocupação com a integridade física do piloto em caso de acidentes (SAE, 2018d).

2.2 Colisões de veículos e absorção de energia

O regulamento da competição fórmula SAE[®] trata a questão da segurança tanto do piloto quando dos demais participantes com muita rigidez, sendo esse, um quesito

importante no que diz respeito à pontuação da competição. Isso se deve ao fato de que, durante a competição, os veículos, pelo menos em alguma das etapas, estarão em movimento, o que implica na possibilidade de ocorrer acidentes como colisões frontais, traseiras, laterais e/ou capotamentos.

Agrawal *et al* (2015) afirmaram que a segurança para os ocupantes dos veículos pode ser considerada uma das principais áreas de pesquisa dentro da engenharia automotiva. Para os autores, a indústria automobilística vem estudando e desenvolvendo novos sistemas e técnicas de segurança tanto passiva quanto ativa com o intuito de melhorar a segurança dos passageiros. Os autores ainda afirmam que devido ao crescente interesse pela segurança estrutural e dos ocupantes dos veículos houve um aumento da pesquisa sobre as respostas das colisões do veículo sobre vários pontos de vista, sejam através de simulações ou por meio de testes experimentais em que as condições reais de colisão são representadas.

A colisão de acordo com Corradi *et al* (2010) ocorre quando dois corpos entram em contato exercendo um sobre o outro forças muito intensas durante um intervalo de tempo muito curto. Essas forças variam com o tempo e podem ser definidas como forças impulsivas.

As colisões podem ser classificadas como colisões elásticas e colisões inelásticas. Quando uma colisão é elástica, figura 2.1, a energia mecânica total do sistema vai ser a mesma antes e depois da colisão. Ou seja, a principal característica desse tipo de colisão está relacionada com a velocidade das partículas após o choque já que se observa a mudança de direção, mas a velocidade relativa entre os dois corpos permanece a mesma (CORRADI *et al*, 2010; UFJF, 2018).

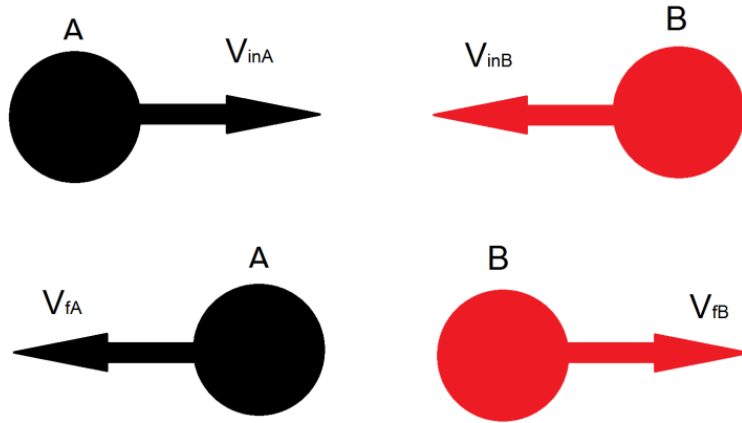


Figura 2. 1 Comportamento dos corpos antes e após a colisão elástica, sendo v_{inA} e v_{inB} as velocidades iniciais e v_{fA} e v_{fB} as velocidades finais de A e B, respectivamente.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Para uma colisão elástica e unidimensional entre dois corpos de massas m_A e m_B , que apresentam velocidades iniciais e finais iguais a v_{inA} , v_{inB} e v_{fA} , v_{fB} , respectivamente, a conservação da energia cinética pode ser dada pelas equações 1-5 (CORRADI *et al*, 2010; SILVA, 2018).

$$\frac{m_A v_{inA}^2}{2} + \frac{m_B v_{inB}^2}{2} = \frac{m_A v_{fA}^2}{2} + \frac{m_B v_{fB}^2}{2} \quad (1)$$

Considerando esses dois corpos como um sistema isolado, o momento linear total desse sistema pode ser representado pela equação 2.

$$\Delta \vec{P} = \Delta \vec{p}_A + \Delta \vec{p}_B = 0 \quad (2)$$

Sabendo que os corpos possuem massas m_A e m_B , e as velocidades iniciais e finais são iguais a v_{inA} , v_{inB} e v_{fA} , v_{fB} , a equação 2 pode ser expressa da seguinte forma, equação 3.

$$m_A v_{inA} + m_B v_{inB} = m_A v_{fA} + m_B v_{fB} \quad (3)$$

A equação 3 por sua vez, pode ser rearranjada sendo reescrita da seguinte forma, equação 4.

$$m_A(v_{inA} - v_{fA}) = m_B(v_{inB} - v_{fB}) \quad (4)$$

Dividindo a equação 1 pela equação 4 e fazendo os arranjos necessários tem-se a seguinte equação 5.

$$(v_{inA} - v_{inB}) = (v_{fB} - v_{fA}) \quad (5)$$

Corradi *et al* (2010) afirmaram que a equação 5 pode ser utilizada para encontrar os valores da velocidade para colisões elásticas unidimensionais, já que a velocidade relativa de aproximação dos corpos antes da colisão é igual à velocidade relativa de separação depois da colisão.

Diferente do fenômeno observado em colisões elásticas, quando uma colisão é classificada como inelástica não se observa a conservação da energia cinética, ou seja, quando essa colisão ocorre, observa-se que a energia cinética final é menor do que seu valor inicial, e essa diferença normalmente é perdida na forma de calor ou como energia potencial de deformação. Existem casos em que a energia cinética final pode ser maior que a inicial, se, por exemplo, uma determinada energia potencial for liberada durante a colisão. No entanto, para qualquer caso a conservação do momento linear e da energia total ainda será mantida (CORRADI *et al*, 2010; UFJF, 2018).

Para Corradi *et al* (2010), durante as colisões completamente inelásticas, figura 2.2, a velocidade final (v_f) das partículas será a mesma já que os dois corpos permanecerão unidos em um movimento unidimensional, dessa forma observa-se somente a conservação do momento dada pela equação 6.

$$m_A v_{inA} + m_B v_{inB} = (m_A + m_B) v_f \quad (6)$$

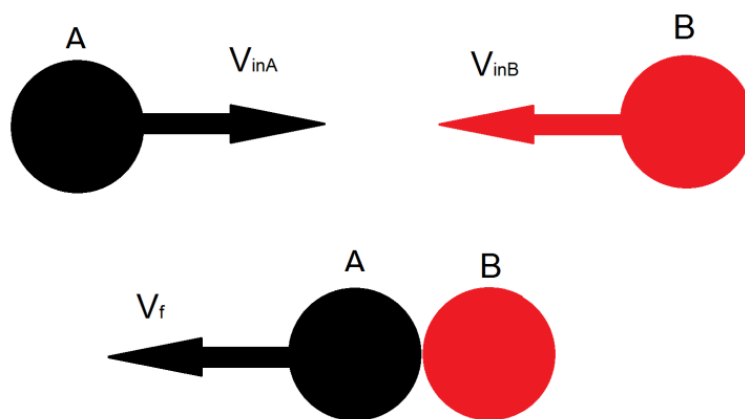


Figura 2. 2 Comportamento dos corpos antes e após a colisão completamente inelástica, sendo v_{inA} e v_{inB} as velocidades iniciais e v_f a velocidades final de A e B, respectivamente.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

O estudo de colisões é uma das aplicações mais importantes das leis de conservação de momento e conservação de energia e considerando a colisão entre veículos como um sistema isolado, sabe-se que a sua energia total se conserva como uma colisão elástica, logo, a inclusão de dispositivos de absorção de impacto auxilia na transformação de parte dessa energia cinética em deformação plástica, reduzindo os efeitos para os ocupantes dos veículos.

Para Tivelli (2012) isso é importante, pois a absorção de energia reduz os efeitos sobre os ocupantes uma vez que a redução abrupta de velocidade é considerada uma das maiores responsáveis por lesões em diversas partes do corpo como cabeça, pescoço, tórax, abdômen e extremidades quando ocorrem colisões.

Agrawal *et al* (2015) reforçam esse conceito quando afirmam que uma forma de aumentar a segurança do motorista e demais passageiros, em caso de colisões, é a utilização de estruturas especiais absorvedoras de impacto já que essas são projetadas para absorver a maior quantidade de energia cinética limitando os picos de desacelerações sentidas pelo corpo humano minimizando os danos sobre o mesmo.

2.3 Dispositivo de absorção de energia

Os dispositivos de absorção de energia também denominados atenuadores de impacto podem ser classificados como componentes deformáveis normalmente instalados na região frontal dos veículos que os desaceleram gradualmente quando sujeitos a uma energia de impacto (HART *et al*, 2010; IMANULLAH *et al*, 2018). No

entanto essa denominação se estende a outros tipos de dispositivos, uma vez que eles não necessariamente podem implicar na real deformação do dispositivo como o colete a prova de balas e o capacete, por exemplo (PEREIRA, 2013).

De uma forma geral atenuar impacto está relacionado com a diminuição dos danos relacionados à absorção da energia produzida pelo impacto. Dessa forma, espera-se que, em veículos, esses dispositivos atuem, principalmente, protegendo a estrutura do veículo e garantindo a integridade física do motorista e dos passageiros (PRAZERES, 2016). Fernández (2016) reforça esse conceito dizendo que nesses casos a energia do impacto é transferida principalmente para a estrutura do atenuador que é projetado para se deforma e reduzir os efeitos sobre veículos e seus ocupantes.

Para Correa (2015) a dissipação de energia nos materiais absorvedores de impacto ocorre por quatro mecanismos que levam à sua deformação permanente: (i) ruptura das fibras por compressão; (ii) ruptura da matriz; (iii) laminação e; (iv) separação da fibras e da matriz. Para o autor, o projeto desses dispositivos deve considerar que ao ocorrer o impacto, ele deve-se deformar de forma controlada e progressiva, para que o resultado seja a máxima absorção de energia. O autor ainda afirma que para se verificar a ruptura controlada do material, devem ocorrer todos esses quatro mecanismos, associados à prevenção de curvatura total da peça (flambagem), já que a observação desse fenômeno pode resultar na falha completa deste dispositivo bem com a mínima absorção de energia. Dessa forma durante o projeto dos dispositivos absorvedores de energia dois fatores são destacados como fundamentais: a geometria da seção transversal e a sequência de empilhamento/montagem do dispositivo.

Alguns dispositivos dissipadores de energia podem ser encontrados em veículos de passeio, na forma de equipamentos denominados *crashbox*. Esses dispositivos normalmente são peças metálicas fixadas na frente dos carros e fornecem proteção para o chassi em caso de impacto frontal. Quando ocorre uma colisão a baixas velocidades verifica-se o funcionamento desses equipamentos que são capazes de absorver até 90% da energia de impacto, devido principalmente à sua deformação plástica que resulta na dissipação dessa energia (FUGANT *et al*, 2000; RUSINEK *et al*, 2008; PEREIRA, 2013 e GALHARDI, 2017).

O funcionamento dos atenuadores de impacto em veículos de competição Fórmula SAE[®] se aproxima aos absorvedores de energia conhecidos como *crashbox*, principalmente no que diz respeito à localização e funcionamento. Sua utilização possui algumas vantagens como a facilidade de produção e baixo custo de materiais de

fabricação como o aço e alumínio, no entanto o emprego desses dispositivos em veículos tipo Fórmula possui algumas desvantagens devidas, principalmente, às exigências construtivas, uma vez que o dimensionamento de dispositivos *crashbox* pode resultar na necessidade de peças com geometrias longas (PEREIRA, 2013; GALHARDI, 2017).

Outro tipo de absorvedor de impacto é conhecido como *honeycomb*, esses podem ser definidos como barreiras de impacto construídas a partir de estruturas em alumínio em formatos que se assemelham a colmeias de abelhas. Essas estruturas podem ser obtidas a partir da combinação de placas de alumínio que possuem ranhuras em diversos formatos obtidos a partir de processos de conformação. Esses dispositivos apresentam como característica uma considerável capacidade de absorção de energia de impacto tanto é que sua utilização está presente em indústrias que empregam materiais com alto nível de exigência (TIVELLI, 2012; PEREIRA, 2013).

Munusamy & Barton (2010) obtiveram resultados significativos quando utilizaram estruturas *honeycomb* como atenuadores de impacto para veículos Formula SAE®. No entanto a utilização dessa estrutura não é, em muitos casos, viável, pois o acesso a esse material é limitado devido à indisponibilidade de mercado e ao seu elevado valor comercial (TIVELLI, 2012; PEREIRA, 2013).

Além desses exemplos, a literatura apresenta diversos outros tipos de dispositivos que podem ser usados como absorvedores de energia para diferentes aplicações, assim como atenuadores de impacto para veículos. Como exemplo destacam-se os amortecedores a base de borracha, espuma de alto impacto, treliça de metal, *airbag* (HART *et al*, 2010), fibra de carbono e matriz epóxi (BORIA *et al*, 2015), espuma de metal (PEREIRA, 2013) e outros. Sua utilização está associada a fatores que variam desde a disponibilidade, custo, conformabilidade e atendimento de exigências dos projetos em relação às características físico química dos materiais e geometria final do produto.

2.3.1 Geometrias e materiais usados em dispositivos de absorção de energia

Para Fuchs *et al* (2008) a utilização de materiais leves e inovadores pode significar uma solução eficiente para a aplicação em dispositivos de absorção de energia em veículos, uma vez que a partir desses materiais é possível absorver a energia necessária de um impacto com níveis aceitáveis de desaceleração. Os autores afirmam

que testes com materiais compósitos mostraram que eles geralmente são bons absorvedores de energia quando aplicada uma carga de esmagamento quase constante, isso se deve ao fato desses materiais possuírem vários mecanismos de falha como quebra, deformação da matriz e rachaduras, descolagem de fibras, delaminação e *pullout* que podem ocorrer de forma simultânea favorecendo a dissipação da energia de impacto minimizando o efeito da mesma sobre a estrutura do veículo e seus ocupantes. Os autores também afirmam que tais compósitos são bons candidatos para aplicações em atenuadores de impacto veiculares, devido à sua leveza, elevada resistência mecânica, resistência à corrosão e fácil fabricação.

Segundo Boria *et al* (2015) compósitos são materiais obtidos a partir da combinação de dois ou mais materiais, esses compósitos oferecem propriedades que não são encontradas nos materiais individuais. Os compósitos podem ser classificados pelos tipos de preenchimento, uma vez que a matriz pode ser reforçada utilizando diferentes tipos de estruturas, sejam elas monocristalinas, plaquetas, fibras longas, fibras curtas, pequenas partículas, precipitados ou uma combinação entre eles. O autor afirma que um compósito de fibra de polímero reforçado (FRP) pode ser utilizado para a construção de um dispositivo de absorção de energia.

Nos estudos conduzidos por Wang *et al* (2016) que tinham como objetivo a busca por melhoria da absorção de energia de colisão de veículos de corrida, os autores realizaram testes em estruturas de fibra de carbono reforçada com resina utilizando uma geometria que representa um tronco de pirâmide corrugado. De acordo com os autores a associação desses materiais com a geometria proposta significa aumento da rigidez mecânica e redução da flambagem da estrutura. Os autores utilizaram modelagem por elementos finitos para simular o projeto e testes quase estáticos (compressão axial) e testes dinâmicos (impacto de queda de peso) para verificar o projeto e concluíram que as condições propostas representaram estabilidade e resistência ao choque.

Existem estudos envolvendo a aplicação de diferentes tipos de materiais na construção de dispositivos de absorção de energia, Sinaga *et al* (2018) utilizaram uma combinação de alumínio e zircônio G350 para construir um protótipo. Os autores utilizaram simulação da colisão do atenuador de impacto com uma parede rígida para encontrar a deformação e a energia absorvida. Segundo os autores o projeto deve ser aperfeiçoado para garantir a segurança exigida pelo regulamento da fórmula SAE.

Imanullah *et al* (2018) avaliaram o comportamento de protótipos de atenuadores de impacto fabricados principalmente a partir de uma liga de alumínio em forma

prismática. Nesse experimento os autores utilizaram configurações distintas de preenchimento dos dispositivos para verificar qual condição melhor atenderia ao objetivo do equipamento de acordo com o regulamento da Fórmula SAE®. Nos protótipos foram testados preenchimentos das paredes internas e do teto utilizando tiras de plástico, espuma de poliuretano e outras matérias que segundo os autores apresentaram taxas de absorção de energia que variaram de 6380 J até 8800 J.

As espumas poliméricas são materiais amplamente utilizados em situações que são exigidas uma condição de absorção de impacto, sendo comumente utilizadas em embalagens que agem como estrutura de sacrifício e que fornecem proteção a diversos tipos de materiais, sejam eles, equipamentos eletrônicos, materiais radioativos e outros (MOURÃO & NETO, 2002). Existem classes de espuma polimérica desenvolvidas especialmente para a absorção de impacto, produzidas por empresas específicas que se destinam à sua fabricação para emprego no setor automobilístico (PEREIRA, 2013). As características dessas espumas associadas ao seu baixo valor comercial fazem com que sua utilização esteja presente em projetos de construção de atenuadores de impacto para veículos Formula SAE®.

Meredith *et al* (2012) utilizaram fibras naturais para substituir as fibras sintéticas normalmente utilizadas na construção de estruturas de absorção de energia, em um conceito novo que alinha os objetivos do dispositivo à preservação do meio ambiente. Para os autores os compósitos obtidos a partir das fibras naturais representam uma alternativa ambientalmente favorável diante da utilização de compósitos convencionais de fibra de vidro e fibra de carbono, uma vez que as fibras obtidas a partir de plantas são de certa forma, renováveis e possuem baixos índices de energia incorporada à sua obtenção/produção se comparadas com fibras sintéticas. Associado a tudo isso os autores também citam outras vantagens da sua utilização como baixo custo, baixa densidade, propriedades mecânicas apropriadas e semelhantes às fibras convencionais, não são materiais abrasivos e não são nocivos para quem os manuseiam.

Agrawal *et al* (2015) afirmaram que de uma forma geral, os atenuadores de impacto normalmente são construídos utilizando-se materiais de baixa densidade como alumínio e suas ligas, composto de carbono, *kevlar*, além de outros materiais como espumas metálicas e sintéticas e até mesmo diferentes combinações entre eles, sendo que a utilização desses materiais garante significativa proteção aos motoristas. Os autores afirmam também que em relação à geometria e estrutura do atenuador de impacto podem ser encontrados diferentes tipos como utilização de tubos, placas, tipo

favo de mel estruturado, forma trapezoidal truncada, cones, sanduíche estruturado e muitos outros.

De fato a literatura mostra que materiais com diferentes propriedades físicas e químicas em variadas formas geométricas são utilizados para construir atenuadores de impacto que atendam às exigências da competição fórmula SAE®, o que é esperado, uma vez que se trata de um procedimento de escolha livre para as equipes. Dessa forma, para se determinar qual material e qual estrutura vai apresentar as características desejadas, o emprego de simulações computacionais e ensaios mecânicos são de grande importância para quem realiza esse tipo de estudo.

2.4 Ensaios dos dispositivos de absorção de energia

SAE (2018e) no item T.2.25.6 define como os testes para validação do atenuador de impacto devem ser conduzidos. As equipes participantes podem optar por realizar os testes que se enquadram dentro de dois grupos, testes dinâmicos (*trenó, pêndulo, torre de queda, etc.*) e testes quase estáticos (*ensaio de compressão*).

O ensaio de compressão um teste quase estático é o mais comumente utilizado para avaliar o comportamento do atenuador de impacto e possui como principal característica a aplicação de cargas compressivas uniaxiais em corpos de prova, figura 2.3. A resposta verificada por esse ensaio é dada pela deformação linear obtida a partir da distância entre as placas que comprimem os corpos de prova, em função da carga de compressão aplicada em cada instante (SOUZA, 1982; GARCIA *et al*, 2000; TEÓFILO, 2018).

A partir desse ensaio é possível determinar as características dos materiais utilizados na construção do atenuador de impacto como o limite de escoamento e o limite de resistência à compressão, ambos obtidos através da análise do gráfico da força em função da deformação (MASCIA, 2006; TEÓFILO, 2018).

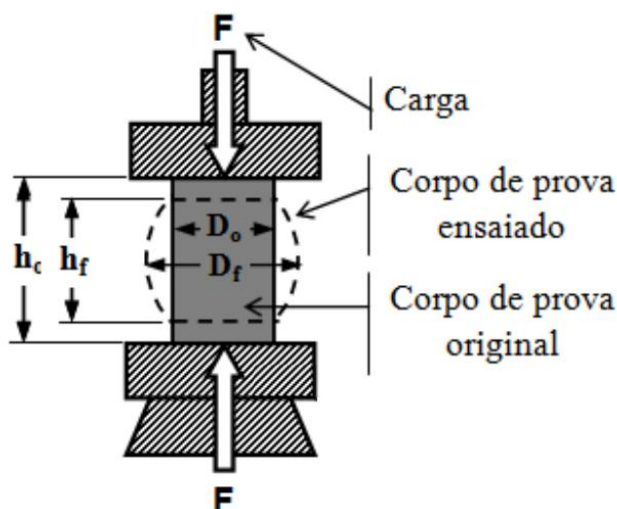


Figura 2. 3 Representação de um ensaio de compressão.

Fonte: Adaptado de Teófilo (2018)

Pereira (2013) afirma que os resultados obtidos a partir do ensaio de compressão como a curva tensão/deformação, o coeficiente de *Poisson*, e o comportamento da rigidez do material em função do aumento da taxa de deformação, são características importantes na condução do projeto do atenuador de impacto. Esses resultados podem auxiliar na validação do projeto diante das exigências da competição.

Ainda segundo Pereira (2013) a utilização de diferentes configurações para os ensaios, com variações na velocidade de deformação e na altura do corpo de prova, por exemplo, permitem identificar quais dessas condições pode influenciar nas taxas de deformação do atenuador de impacto.

Dentre os testes dinâmicos, o mais utilizado é o *drop test* que se trata de um teste de queda livre na qual um objeto de massa definida é liberado a partir de uma altura conhecida e segue em queda até entrar em contato com o corpo de prova que se encontra no solo ou sobre uma base fixa.

Correa (2015) afirma que a melhor aquisição de dados nesse teste está associada à utilização de um acelerômetro conectado a uma placa PCB, arduíno e uma câmera filmadora de alta velocidade. O uso desses dispositivos permite correlacionar os resultados encontrados durante a realização do teste para que seja possível avaliar a desaceleração da massa em queda quando ocorrer o impacto com o atenuador. O autor afirma que os dados coletados a partir do acelerômetro e das imagens da câmera podem ser utilizados para construir curvas de desaceleração específicas para o atenuador de impacto testado, dessa forma a validação do protótipo pode ser verificada

desde que haja uma concordância entre os resultados obtidos e as exigências previstas no regulamento.

Alguns autores ressaltam ainda que o uso de modelos matemáticos e simulações computacionais também podem ser considerados ferramentas úteis para validar o projeto, já que permitem verificar o seu comportamento em ambientes virtuais (CORREA, 2015; PRAZERES, 2016).

Quando se realiza o dimensionamento de estruturas e seus componentes a utilização de simulações computacionais é útil principalmente quando se trata de situações em que o cálculo analítico é muito complexo. Para Boff *et al* (2012), o método de elementos finitos é uma ferramenta essencial quando se faz análises mecânicas, pois fornecem uma forma de estudo detalhado de problemas complexos, para que possam ser conduzidos de forma a fornecer uma melhor compreensão do processo, e em alguns casos permitem até mesmo o seu aperfeiçoamento. Os autores também afirmam que os métodos numéricos podem ser aplicados de diferentes maneiras e possibilitam a comparação de resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos a partir da simulação computacional permitindo um maior conhecimento entre os materiais e processos.

Santos (2016) mostrou que a partir da simulação computacional é possível obter dados importantes referentes ao atenuador de impacto exigidos pelo regulamento da competição, como energia absorvida e o tamanho do protótipo.

Pang e Tristian (2013) afirmaram que a taxa de absorção de energia e o peso do dispositivo são fundamentais quando se realiza o projeto de um atenuador de impacto. Os autores afirmaram que a redução dos custos envolvidos no projeto e desenvolvimento de um novo atenuador, está diretamente associada com a redução do tempo relacionado com as etapas de desenvolvimento e testes dos protótipos, sendo assim, os autores propuseram a utilização de elementos finitos dinâmicos não lineares para simular o impacto entre um atenuador de impacto desenvolvido para veículo Fórmula SAE® contra uma barreira rígida. Nesse estudo os autores também utilizaram testes experimentais para verificar o modelo numérico e concluíram que existe uma concordância entre as simulações e os resultados experimentais, com isso puderam afirmar que a análise por elementos finitos pode ser usada de forma efetiva em situações que se deseja prever a absorção de energia e o desempenho de um atenuador de impacto de forma rápida e segura.

2.5 Método os Elementos Finitos

O surgimento do método dos elementos finitos (MEF) data de meados do século XX, mesma época em que foram apresentados os primeiros computadores, no entanto é importante ressaltar que os fundamentos matemáticos nos quais se baseiam o MEF já eram conhecidos há muito tempo, o problema é que até o surgimento do computador não havia máquinas capazes de viabilizar a implementação desse método (UFPR, 2019).

Para Nirschl e Proença (2008) o método dos elementos finitos pode ser considerado como uma ferramenta com significativa importância para a solução numérica de problemas relacionados à análise de estruturas. Azevedo (2003) afirma ainda que na engenharia de estruturas a aplicação do método de elementos finitos possibilita a análise dos estados de tensão e deformação dos sólidos de geometrias genéricas sujeitas a diferentes ações externas.

O MEF, no início, foi aplicado para solucionar problemas relacionados à mecânica dos sólidos, no entanto, sua utilização expandiu e passou a ser amplamente empregado no estudo de diferentes fenômenos físicos (UFPR, 2019), quando se aplica o MEF para a solução de um problema é preciso fazer alguns levantamentos como a classificação quanto à geometria, o material constituinte e forças aplicadas (AZEVEDO, 2003).

Durante a modelagem por elementos finitos é preciso levar em conta algumas condições como as ações sobre as estruturas que normalmente são dinâmicas, ou seja, é preciso considerar as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos componentes está sujeito. No entanto, em algumas situações é possível admitir que as ações estejam sendo aplicadas de forma lenta o suficiente para que sejam desprezadas as forças de inércia (AZEVEDO, 2003). Para o autor outra condição que deve ser levada em consideração durante a análise de um determinado sólido está relacionada como os deslocamentos provocados pelas solicitações exteriores, essas podem ser consideradas muito pequenas se comparados às dimensões dos componentes da estrutura, dessa forma é possível afirmar que não vai ser percebida a influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, ou seja, pode-se afirmar que todo o estudo é feito com base na geometria inicial antes de qualquer tipo de deformação. Caso exista a necessidade de realizar o estudo no qual essa hipótese é desconsiderada tem-se uma análise dita não linear geométrica.

Azevedo (2003) também afirma que o nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações ocorrem de forma linear e que as situações nas quais não é possível realizar essa simplificação é preciso utilizar algoritmos específicos para análises não lineares. Para Azevedo (2003) outra condição que deve ser considerada esta relacionada com o tipo de estrutura, que pode ser classificada em relação à sua geometria.

Para a solução de problemas por meio do MEF, tem-se a discretização dos domínios, ou seja, a descontinuação do sólidos e a representação desses domínios físicos por meio de malhas com n pontos nodais (RIBEIRO, 2004).

A criação das malhas tem como função principal fornecer uma aproximação da geometria estudada ao modelo proposto, essas malhas são agrupadas de acordo com seus espaços dimensionais em três grupos distintos, as malhas unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. A definição das malhas durante análises pelo método dos elementos finitos é uma das etapas mais importantes uma vez que sua qualidade influencia de forma considerável no resultado final (GOKHALE, 2008).

De uma forma geral pode-se afirmar que a utilização do método dos elementos finitos possibilita a redução dos graus de liberdade que normalmente são infinitos para um número finitos graças à indução das malhas (GOKHALE, 2008).

Ainda segundo o autor, os elementos de uma forma geral podem ser agrupados por características em comum como família do elemento, graus de liberdade, número de nós, formulação e outros como elementos de membrana, elementos casca, elementos sólidos e outros, sendo a utilização de cada um determinada pela necessidade do projeto.

É importante destacar que para uma efetiva utilização do MEF é preciso ter consolidada uma série de considerações matemáticas prévias que atuam como fundamentos do método aplicado (UFPR, 2019).

Para Azevedo (2003) a formulação do MEF está pautada na existência de uma equação integral, que substitua a integral sobre um domínio complexo (volume V) por um somatório de integrais dos subdomínios que apresentem geometrias simples (volume V_i), equação 7.

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (7)$$

Em 7, sabe-se que:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (8)$$

Se as integrais referentes ao subdomínio V_i forem calculadas, o somatório referente ao segundo membro da equação 6 se refere à integral estendida do domínio. Assim, cada subdomínio V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples (reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro, paralelepípedo ou outros). O resultado obtido a partir da equação 6, somatório de V_i vai dar origem à operação que apresenta muitas semelhanças com a que é efetuada nas estruturas reticuladas V . É importante ressaltar que no caso da utilização do MEF em análise de estruturas, para uma formulação mais intuitiva é comum a utilização do princípio dos trabalhos virtuais (PTV) (AZEVEDO, 2003).

2.6 Considerações finais

Baseado na proposta desse trabalho sabe-se que o desenvolvimento e construção de um novo protótipo de atenuador de impacto é de livre escolha para a equipe participante, no entanto deve ser realizado segundo normas regulamentadas pela organização da competição no que diz respeito à sua dimensão e desempenho.

Em relação à avaliação do desempenho pode-se dizer que o MEF é uma ferramenta versátil e muito útil para a condução dos experimentos propostos, de uma forma geral, associado aos testes dinâmicos e quase estáticos permitem abordagens que vão além das exigências do regulamento da competição sendo uma das principais ferramentas para o desenvolvimento de novos projetos de engenharia como o atenuador de impacto.

Por fim, a literatura mostra que a partir da realização de simulações e ensaios é possível compreender como um novo dispositivo projetado vai se comportar em uma situação real e se o mesmo vai desempenhar sua função de modo que garanta a eficiência e a segurança esperada. Assim, levando-se em conta o que foi apresentado nessa revisão de literatura e tendo como direcionamento principal os objetivos propostos para esse trabalho, desenvolveu-se a metodologia descrita no capítulo 3.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

As pesquisas científicas possuem diferentes classificações e essas variam de acordo com os objetivos do projeto, a forma de abordagem utilizada na condução do trabalho bem como os procedimentos técnicos adotados.

Para Vergara (1997), em relação aos seus objetivos, as pesquisas podem ser classificadas como descritivas, explicativas, metodológicas, aplicadas, intervencionistas ou exploratórias.

Considerando as definições de Gil (2008), a pesquisa realizada nesse trabalho pode ser classificada como exploratória, uma vez que seus objetivos buscam proporcionar uma visão mais detalhada sobre um determinado fenômeno: o comportamento de um dispositivo de absorção do impacto de um veículo de competição Fórmula SAE[®]. Essa classificação também pode ser relacionada como o fato de se tratar de um tema pouco explorado, de difícil formulação de hipóteses e com representação literária pouco expressiva.

Ainda segundo Gil (2008) uma pesquisa é exploratória quando seus objetivos buscam desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, além da formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis que possam ser utilizadas como fundamento teórico em estudos posteriores. Pesquisas como essa também são classificadas como exploratórias porque devido ao desconhecimento sobre o tema, somente com a aplicação desse tipo de estudo é possível o entendimento dos fenômenos abordados no trabalho.

Para Oliveira (2011), as pesquisas científicas, em relação à forma de abordagem são classificadas como qualitativas, quantitativas ou qualitativa-quantitativa.

Baseado no conceito de Richardson (1999), esse trabalho pode ser classificado como uma pesquisa tanto quantitativa quanto qualitativa, uma vez que apresenta como característica fundamental o uso da quantificação tanto na etapa de coleta quanto no tratamento dos dados relacionados à energia absorvida pelo dispositivo projetado. Nesse caso os resultados são avaliados segundo sua representatividade numérica, ou seja, são utilizadas considerações matemáticas, raciocínio lógico, técnicas estatísticas e suas derivações para descrever as causas que levam ao acontecimento do fenômeno e a relação entre variáveis estudadas.

Outra tipologia utilizada por Vergara (1997) para classificar as pesquisas científicas baseia-se nos procedimentos técnicos empregados, podendo ser: pesquisa de campo, pesquisa laboratorial, estudo de caso, pesquisa ação, documental, bibliográfica, *ex-post-facto*, experimental e outras.

Esse trabalho, segundo conceitos apresentados por Gil (2008), pode ser classificado como uma pesquisa experimental uma vez que apresenta as principais características desse tipo de pesquisa, como a determinação de um objeto de estudo seguido de um planejamento criterioso realizado em etapas que englobam a formulação do problema, definição de variáveis que o influenciam, definição das formas de controle, análise dos efeitos das variáveis sobre o objeto de estudo e as conclusões. Ainda de acordo com o autor, essas pesquisas podem ser definidas como melhores exemplos de pesquisa científica sendo que durante a investigação é possível realizar a manipulação intencional de algum aspecto da realidade, realizada para obter evidências de relações entre a causa e o efeito do fenômeno estudado.

Esse trabalho, quando analisado de forma global, também se enquadra como pesquisa bibliográfica, já que possui como uma de suas etapas, uma revisão de literatura sobre os assuntos abordados. Essa, por sua vez, é uma característica de pesquisas bibliográficas como definido por Gil (2008), que afirma que essas pesquisas são realizadas a partir de material já elaborado encontrados em livros ou artigos científicos. O autor ainda afirma que a utilização desse tipo de pesquisa como parte de pesquisas exploratórias é comum, pois permite reunir informações e conhecimentos já apresentados sobre o tema abordado.

3.2 Materiais e Métodos

Para a realização da pesquisa proposta nesse trabalho foram desenvolvidos procedimentos tanto em ambientes virtuais (*etapa 1*) quanto procedimentos experimentais reais (*etapa 2*). Essas etapas, bem como as atividades de cada uma delas foram realizadas de acordo com o esquema representado pelo fluxograma da figura 3.1.

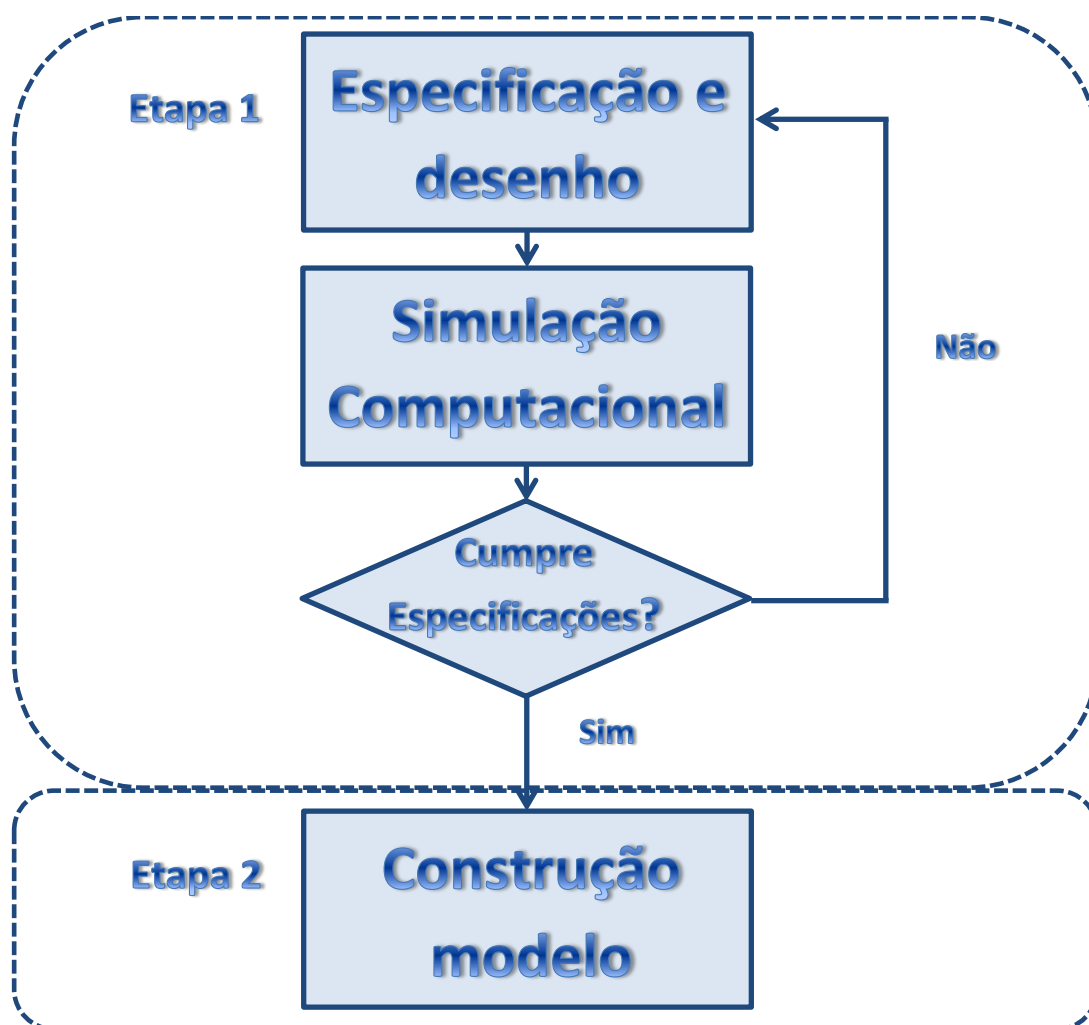


Figura 3. 1 Fluxograma das etapas realizadas nesse trabalho
Fonte: Pesquisa direta (2019)

3.2.1 Especificação e desenho

A etapa 1 compreende a fase de especificação e desenho. Nessa fase foi elaborado um modelo para o atenuador de impacto segundo especificações descritas no regulamento da competição, como dimensões (mínimo de 200 mm de comprimento, 100 mm de altura e 200 mm de largura) e forma como vai ser realizada a fixação do atenuador no veículo, para a realização dessa etapa utilizou-se o *software SolidWorks® Student Edition 2018/2019*.

O material escolhido para os modelos foi a liga de alumínio 1100, com espessura de 2 mm e visando obter melhor desempenho foram definidos 3 modelos com alívios de massa distintos, modelo 1 paredes com furos de 35 mm, modelo 2 parede superior, parede inferior, e paredes laterais com rasgos longitudinais, modelo 3 paredes laterais com rasgos longitudinais e parede superior e inferior com rasgos horizontais.

3.2.2 Simulação computacional

3.2.2.1 Análise estática

A análise estática foi realizada por meio de simulação por elementos finitos utilizando o *software SolidWorks®* com os três modelos propostos.

Em cada um dos modelos foram utilizadas as mesmas condições iniciais: base fixa e aplicação de uma força de 120 kN, além disso, foi determinada uma malha com refinamento de acordo com o padrão do *Software* e o material utilizado foi uma liga de alumínio com 99% de pureza, limite de escoamento de 125 MPa, 130 MPa de limite de resistência a tração e massa específica de 2,7 g/cm³. A figura 3.2 ilustra como ocorreu a preparação do experimento realizado, destacando a malha utilizada, as setas roxas na face frontal do atenuador que representam a aplicação da carga e as setas verdes na base que representam os pontos de fixação.

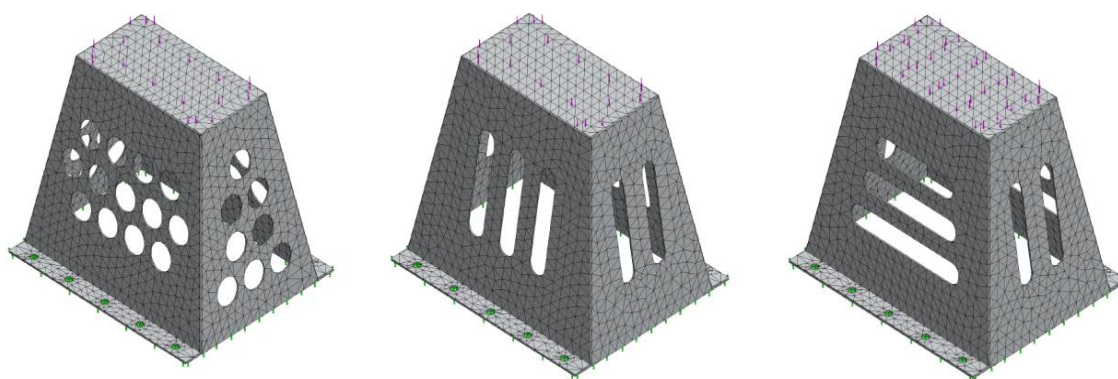


Figura 3. 2 Representação da montagem realizada para a simulação estática.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Os resultados foram comparados para definição do modelo a ser usado no restante do trabalho.

3.2.2.2 Análise dinâmica

Após os resultados da análise estática, definiu-se o modelo a ser testado e o método dos elementos finitos por meio do *software ANSYS – Workbench 2019-R2* (versão estudante) foi aplicado para realizar a análise dinâmica da colisão entre o atenuador de impacto e uma parede rígida não deformável de concreto. Para essas análises foi utilizado.

Inicialmente foram definidos os materiais a serem analisados, sendo uma liga de alumínio AL1100 para o atenuador e concreto para a parede rígida. A geometria referente ao atenuador de impacto foi importada do *SolidWorks*[®] para o ANSYS. Definiu-se uma placa rígida não deformável para simular a parede, fixada a frete do atenuador e uma placa rígida atrás do atenuador simulando a placa anti-intrusão (além da massa do conjunto veículo/piloto), sendo essa a pior condição de impacto.

Como condições iniciais do projeto foram utilizadas malhas *tri* e *quad*, ou seja, triângulos e quadrados de primeira ordem. Além disso, foi definida uma velocidade de impacto de 7 m/s para o conjunto veículo/atenuador. A placa anexada atrás do atenuador foi modelada para uma massa total de 300 kg, condição regulamentada pela SAE[®]. O estudo foi simplificado definido somente uma forma de contato sem atrito entre o atenuador e a parede rígida. O tempo de contato foi estabelecido como 0,035 segundos resultando num tempo total de simulação de 36 horas.

A partir dos resultados obtidos foram avaliadas a deformação total, absorção de energia e desacelerações média e total.

Após a validação dos resultados construiu-se um modelo do atenuador.

3.2.3 Construção do modelo

A etapa 2 compreende a construção do atenuador. O modelo fabricado foi definido após análise dos resultados da simulação computacional associado com a disponibilidade comercial do material.

Para a construção do modelo foram utilizadas placas de uma liga de alumínio não ligada (1100) de 2 mm de espessura obtidas junto à empresa Super Inox Uberaba LTDA. Os desenhos com as dimensões e os detalhes, figura 3.2c, de cada placa foram enviados para a empresa em formato (*.DWG) que realizou os cortes a *laser* conforme modelo observado na figura 3.3.

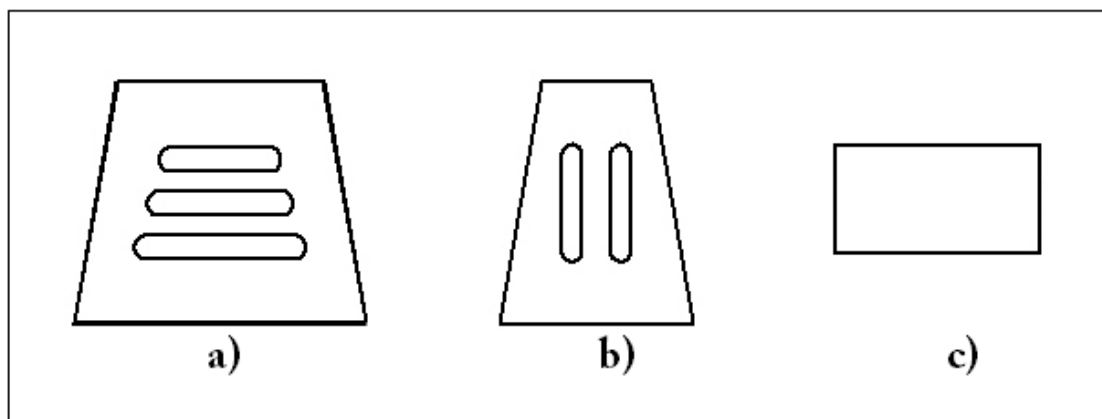


Figura 3. 3 Modelos para corte a laser das chapas de alumínio. a) Placa superior e inferior, b) placas direita e esquerda e c) placa frontal.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

As placas apresentadas pela figura 3.3 foram unidas por soldagem por eletrodo revestido. Esse serviço foi realizado por uma oficina especializada, mas os parâmetros utilizados não foram informados pelo operador.

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Marconi e Lakatos (2003), variável é um termo utilizado para definir uma quantidade que varia um conceito operacional que possui valores, aspecto, propriedade ou fator, identificável e passível de mensuração. Para Alyrio (2009), as variáveis, além sustentar a hipótese, se relacionam com tudo que pode assumir valores distintos ou aspectos diferentes, segundo as circunstâncias específicas.

As variáveis podem ser dependentes ou independentes. As variáveis independentes determinam ou afeta outra variável, podem ser manipuladas pelo pesquisador para que se possa assegurar a relação do fato observado verificando-se a influência da mesma sobre um possível resultado (MARCONI e LAKATOS, 2003). Variáveis dependentes, segundo a autora, consistem dos valores a serem explicados ou descobertos devido à manipulação causada pela variável independente, sendo o fator que aparece, desaparece, ou varia à medida que se manipula a variável independente.

Os indicadores, segundo Gil (2008), são elementos concretos que indicam valores de forma prática, sendo que somente a partir da medição desses indicadores é possível conhecer o valor da variável. Para o autor, a escolha dos indicadores é simples, mas exige cuidado uma vez que existem vários indicadores que podem ser usados para

uma mesma variável. As principais variáveis desse trabalho e seus respectivos indicadores podem ser observados na tabela 3.1.

Tabela 3. 2 Variáveis e indicadores estudados

Variáveis	Indicadores
Engenharia dos materiais	Deformação de materiais Testes de queda livre Ensaio mecânicos
Atenuador de impacto	Desenho Simulação Colisão de veículos Conservação e dissipação de energia Desaceleração

Fonte: Pesquisa direta (2019)

3.4 Instrumento de coleta de dados

A aquisição de dados durante a realização das diferentes etapas desse trabalho foi realizada por meio de microcomputadores, máquina universal de ensaios e câmera digital.

3.5 Tabulação dos dados

Para o tratamento e tabulação dos dados coletados durante a realização desse trabalho foram utilizados: *softwares (SolidWorks e ANSYS Workbench 19 R2)*, planilhas (*Microsoft Excel*), gráficos, tabelas, equações e manipulações matemáticas.

3.6 Considerações Finais do capítulo

Esse capítulo apresentou a classificação da pesquisa realizada em relação aos objetivos, forma de abordagem e procedimentos técnicos utilizados. Foram relacionados, também, os métodos, as ferramentas e os equipamentos necessários para a realização das etapas propostas. Em relação ao que foi proposto como objetivos para esse trabalho foram apresentadas as variáveis e seus indicadores, a forma de coleta, tratamento, tabulação e apresentação dos dados obtidos.

No capítulo seguinte, os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta serão apresentados e discutidos para melhor compreensão do trabalho

realizado. Em caso oportuno serão apresentadas evidências encontradas na literatura que corroboram os resultados encontrados.

4 RESULTADOS

O regulamento da competição fórmula SAE[®] apresenta as normas que devem ser seguidas durante o projeto de um novo veículo participante dessa competição, esse regulamento estabelece, por exemplo, as exigências referentes à construção de um novo dispositivo atenuador de impacto, como suas dimensões e desempenho. Mas é importante destacar que tanto a geometria quanto o material utilizado na fabricação não são regulamentados, sendo de livre escolha para as equipes, no entanto, a eficiência dos materiais e formas escolhidas deve ser comprovada por meio de testes regulamentados.

Dessa forma, baseando-se no estudo teórico que fundamentou a realização desse trabalho e aplicando a metodologia proposta foi possível obter os resultados mostrados nesse capítulo.

4.1 Projeto do atenuador de impacto

Utilizando as condições estabelecidas pela SAE[®] e baseado nas informações encontradas na literatura (PEREIRA, 2013; BORJA *et al*, 2015; GALHARDI, 2017) projetou-se um dispositivo em forma de tronco de pirâmide com 300 mm de comprimento, 250 mm de altura, 200 mm de largura e 2 mm de espessura com um ângulo de estreitamento de 10° entre as faces, figura 4.1.

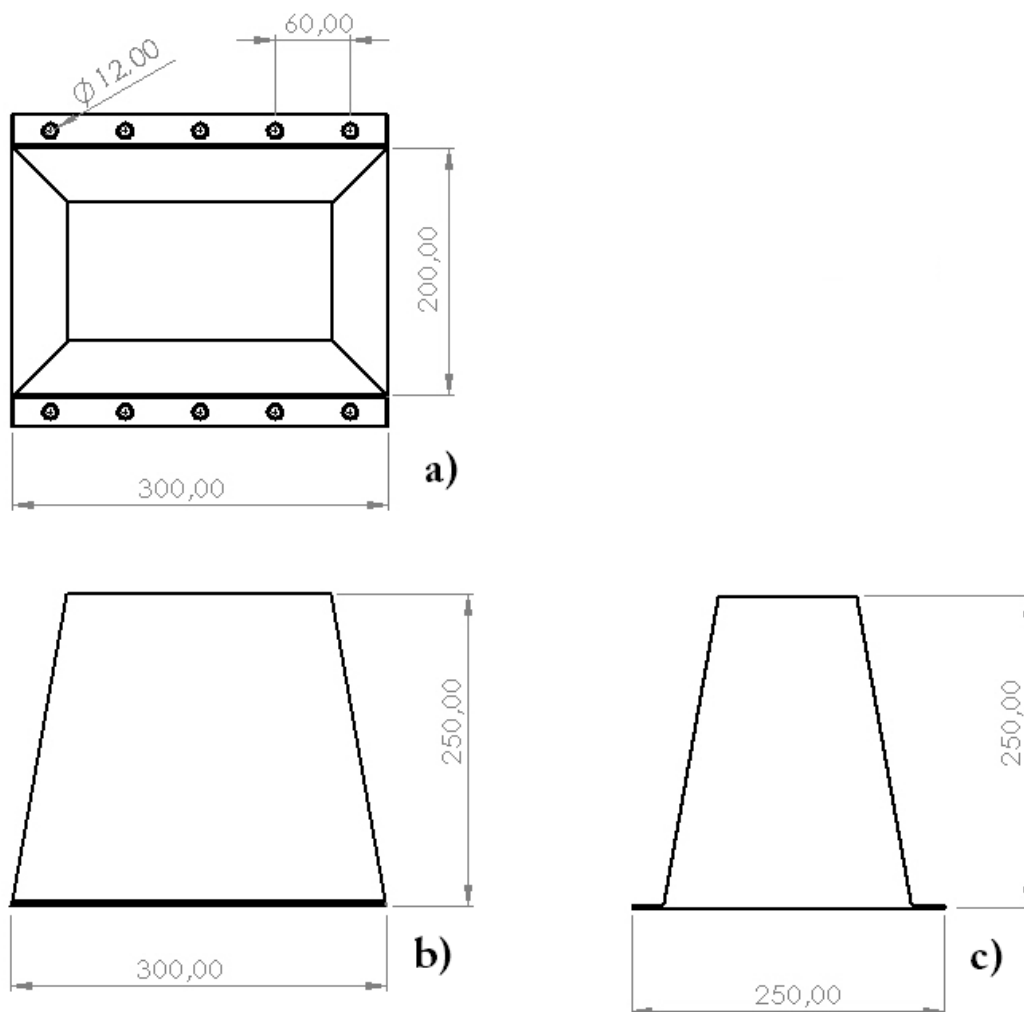


Figura 4. 1 Projeto de um atenuador de impacto para veículo tipo fórmula SAE®. **a)** Vista frontal; **b)** vista superior; e **c)** vista lateral. Obs.: Valores em milímetros (mm).

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A escolha dessa geometria é comum quando se projeta atenuadores de impacto, isso foi mostrado por Galhardi (2017), que apresentou um estudo comparativo com diversos trabalhos sobre esse tema mostrando que mesmo não sendo uma escolha absoluta é a mais utilizada pela maioria dos autores. Entre os motivos para a escolha dessa geometria, destaca-se, principalmente, seu comportamento quando ocorre o contato, Wang *et al* (2016), por exemplo, que utilizando essa geometria é possível assegurar a rigidez mecânica suficiente para que não ocorra a curvatura da estrutura quando solicitada, garantindo assim a estabilidade e a resistência no momento do choque.

A figura 4.2 apresenta uma visão tridimensional do modelo projetado a partir de 3 vistas ortogonais, sendo possível avaliar o conceito do projeto desenvolvido nesse trabalho.

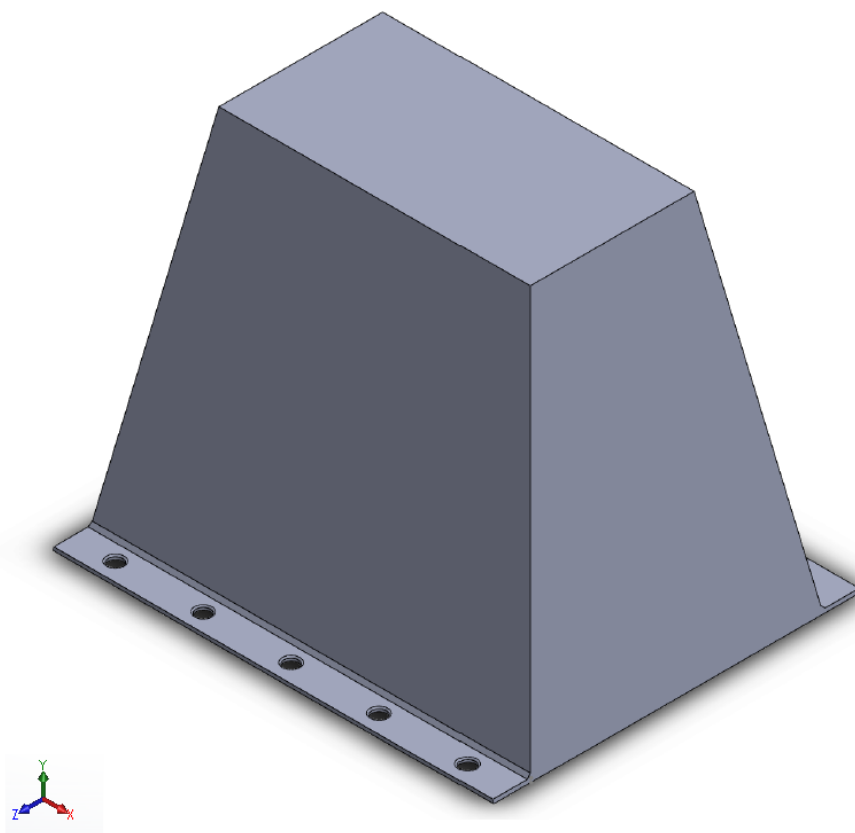


Figura 4. 2. Vista ortogonal do desenho de um atenuador de impacto para veículo tipo fórmula SAE®.
Fonte: Pesquisa direta (2019)

O alívio de massa da estrutura foi realizado buscando reduzir a resistência mecânica total do dispositivo, dessa forma foi realizada a redução da área da seção transversal através de descontinuidades das paredes do atenuador observadas na figura 4.3.

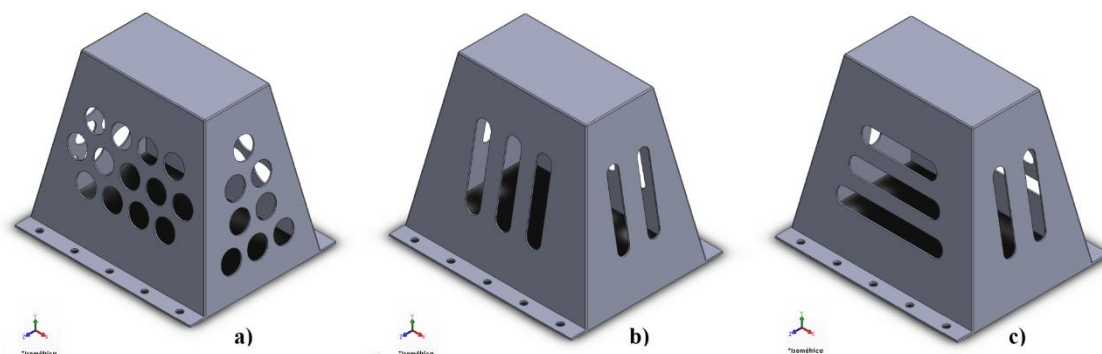


Figura 4. 3 Desenhos dos modelos de atenuadores de impacto projetados para veículo tipo fórmula SAE®.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

As alterações da estrutura do dispositivo observadas na figura 4.3.a caracterizam-se pela realização de furos de 35 mm de diâmetro em todas as faces do atenuador, na figura 4.3.b foram realizados cortes longitudinais nas faces do dispositivo e na figura 4.3.c os cortes foram transversais nas paredes superior e inferior e longitudinais nas paredes laterais.

Em trabalho semelhante, Galhardi (2017) mostrou que com a realização dessas pequenas alterações mecânicas na estrutura do atenuador é possível melhorar o desempenho do dispositivo garantindo que ele se apresente em conformidade com as exigências da competição fórmula SAE®.

Com o desenvolvimento desses projetos conceituais pode-se iniciar a fase de simulação computacional.

4.2 Simulação dos modelos de atenuadores de impacto

A simulação computacional foi realizada em duas etapas distintas, sendo uma análise estática e uma análise dinâmica. A análise estática teve como objetivo auxiliar na escolha do melhor modelo para sequencia dos trabalhos, uma vez que em virtude das limitações técnica e financeira não foi possível trabalhar com todos os modelos propostos. As análises dinâmicas, por sua vez, foram realizadas para prever e avaliar o comportamento do dispositivo projetado em condições semelhantes às reais.

4.2.1 Análise estática

A realização da análise estática com os modelos propostos no item anterior possibilitou uma comparação entre o comportamento, a fim de auxiliar na definição do melhor modelo a ser trabalhado.

Nas figuras 4.4 e 4.5 podem ser observados os resultados encontrados por meio da utilização do *software* SolidWorks.

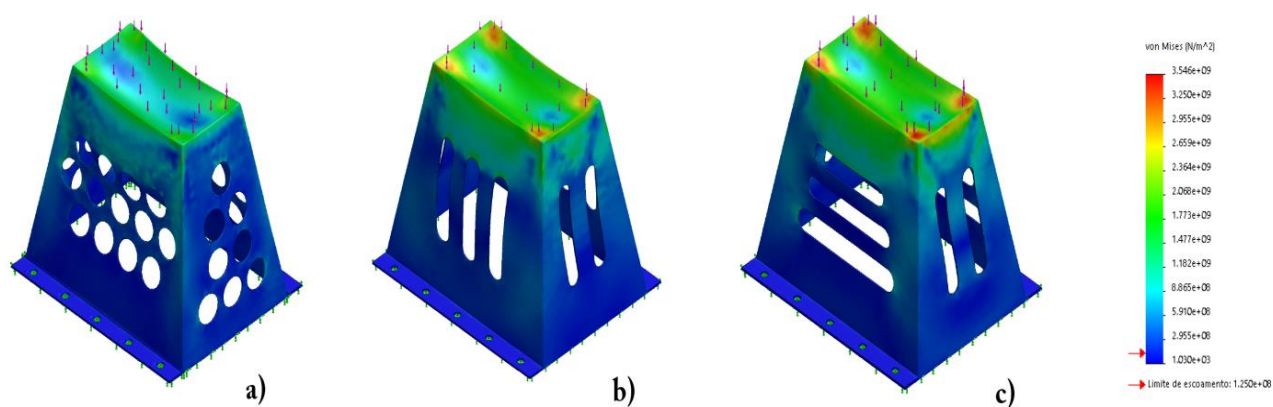


Figura 4. 4 Resultado da análise estática (Tensão por Von Mises) realizada nos modelos propostos para construção dos atenuadores de impacto. a) Modelo 1; b) modelo 2; e c) modelo 3.
Fonte: Pesquisa direta (2019)

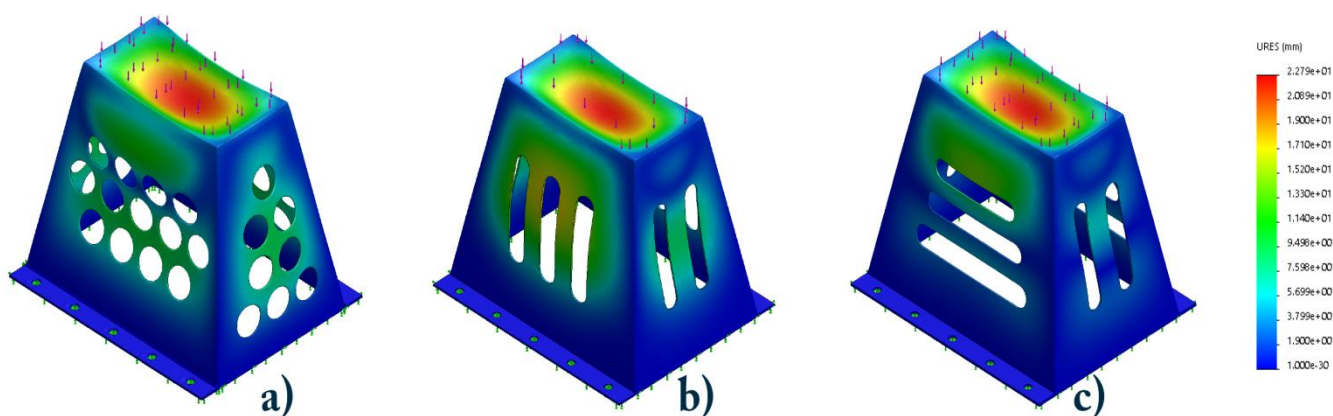


Figura 4. 5 Resultado da análise estática (deslocamento estático) realizada nos modelos propostos para construção dos atenuadores de impacto. a) Modelo 1; b) modelo 2; e c) modelo 3.
Fonte: Pesquisa direta (2019)

Os resultados observados na figura 4.4 representam a resposta dos modelos em relação aos pontos de máxima tensão, ou seja, as regiões que apresentam coloração variando do azul escuro para o vermelho, mostram os pontos em que a distribuição dos esforços resistentes às cargas de compressão impostas por unidade de área dentro do material tem maior tendência a impedir a movimentação. Toledo *et al* (2017) afirmaram que a partir da teoria da máxima energia de distorção (*Von Mises*) pode-se realizar uma previsão da falha de materiais dúcteis como o alumínio utilizado nesses atenuadores, dessa forma, é possível afirmar que as regiões em vermelho são, portanto, mais suscetíveis à falha.

Pode-se observar na figura 4.5, a deformação dos modelos quando da aplicação da carga. As regiões de cor vermelha representam os maiores percentuais de deformação. Essa deformação trata do movimento relativo entre os pontos que formam esse corpo e está diretamente ligada com a tensão aplicada uma vez que ela atua no sentido de limitar a deformação, ou seja, a deformação pode ser entendida, de certa forma, como o fenômeno pelo qual a tensão se propaga no material.

Analisando os resultados apresentados pelas figuras 4.4 e 4.5, pode-se dizer que o comportamento dos modelos é similar, principalmente quando se analisa somente a deformação do dispositivo.

No entanto, o modelo 2, apresentou resultados mais significativos tanto em relação aos pontos de tensão quanto ao deslocamento. Observando a figura 4.5b, por exemplo, percebe-se uma deformação relevante nas paredes superior e inferior podendo indicar, por exemplo, regiões com predisposição à curvatura ou torção no momento da colisão. O modelo 1, apresentou melhor resultado em relação aos pontos de tensão (figura 4.4a). No entanto percebe-se ao analisar a figura 4.5a, que para a carga aplicada podem ser percebidas regiões de deformação maiores e essas, com maior intensidade. Dessa forma, optou-se por dar continuidade aos estudos utilizando o modelo 3, mesmo ele apresentando os pontos de tensão com maior intensidade figura 4.4c, pode-se observar que esse modelo foi o que apresentou o melhor comportamento em relação à deformação, figura 4.5c.

Definido o modelo foi realizada uma análise dinâmica, e os resultados podem ser analisados a seguir.

4.2.2 Análise dinâmica

A análise dinâmica realizada por meio do *software* ANSYS simulou o impacto entre um veículo de massa de 300 kg contra uma parede rígida a uma velocidade de 7 m/s, apresentando os seguintes resultados.

4.2.2.1 Deformação dinâmica

As figuras 4.6 e 4.7 ilustram os estágios de deformação do dispositivo atenuador de impacto em função do tempo, através de duas vistas distintas. É importante destacar que a simulação teve como objetivo avaliar somente o dispositivo responsável pela atenuação do impacto, dessa forma, tanto a parede quanto a placa de intrusão utilizada para representar o veículo foram consideradas como elementos rígidos indeformáveis.

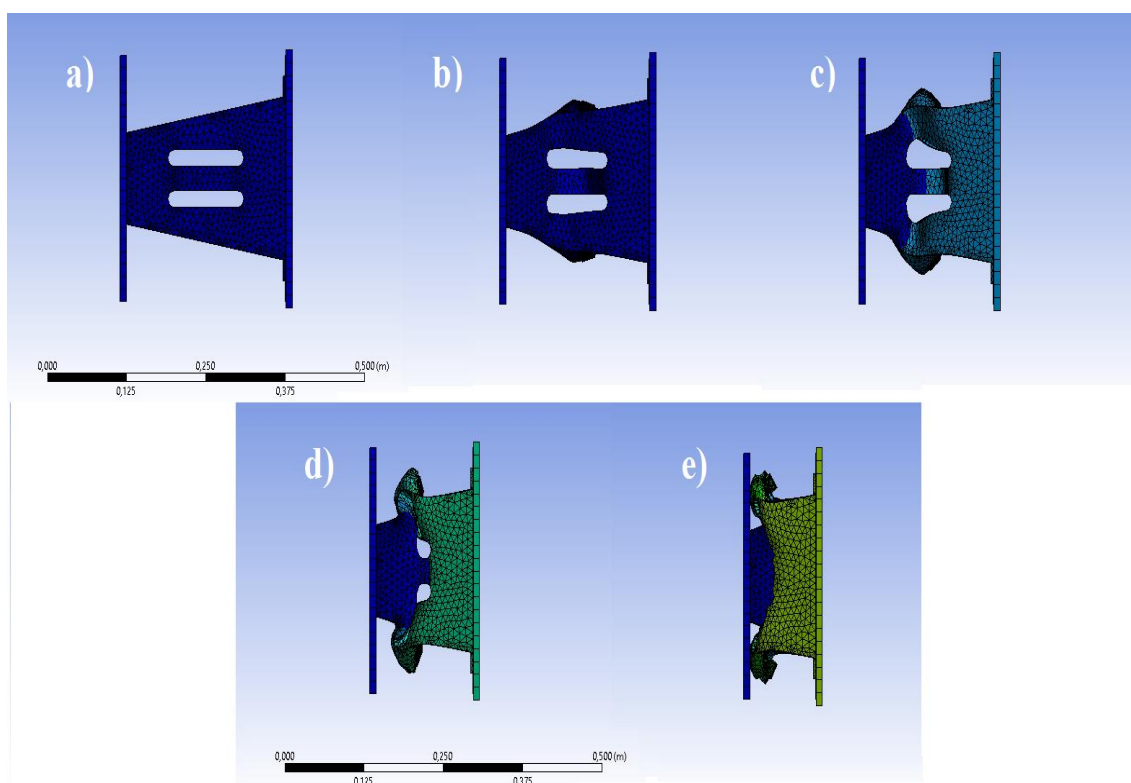


Figura 4. 6 Deformação resultante da análise dinâmica, vista lateral. a) 0 segundos; b) $3,58 \times 10^{-3}$ segundos; c) $7,19 \times 10^{-3}$ segundos; d) $1,07 \times 10^{-2}$ segundos; e e) $2,15 \times 10^{-2}$ segundos.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Uma análise das figuras 4.6 e 4.7 permite avaliar o comportamento do equipamento quando exigido pelas condições descritas anteriormente. Pode-se observar uma deformação na ordem de 78% em relação ao tamanho original do atenuador em até 0,03 segundos, ou seja, uma redução de aproximadamente 195 mm para o dispositivo que apresenta um tamanho original de 250 mm. Em trabalho semelhante, Santos (2016)

apresentou um protótipo para um dispositivo atenuador de impacto que quando simulado em condições semelhantes, apresentava uma deformação máxima de 52,4%. A diferença entre as deformações observadas nos dois trabalhos pode estar associada principalmente às geometrias propostas para cada atenuador já que em ambos os casos foi utilizado o mesmo material para a estrutura.

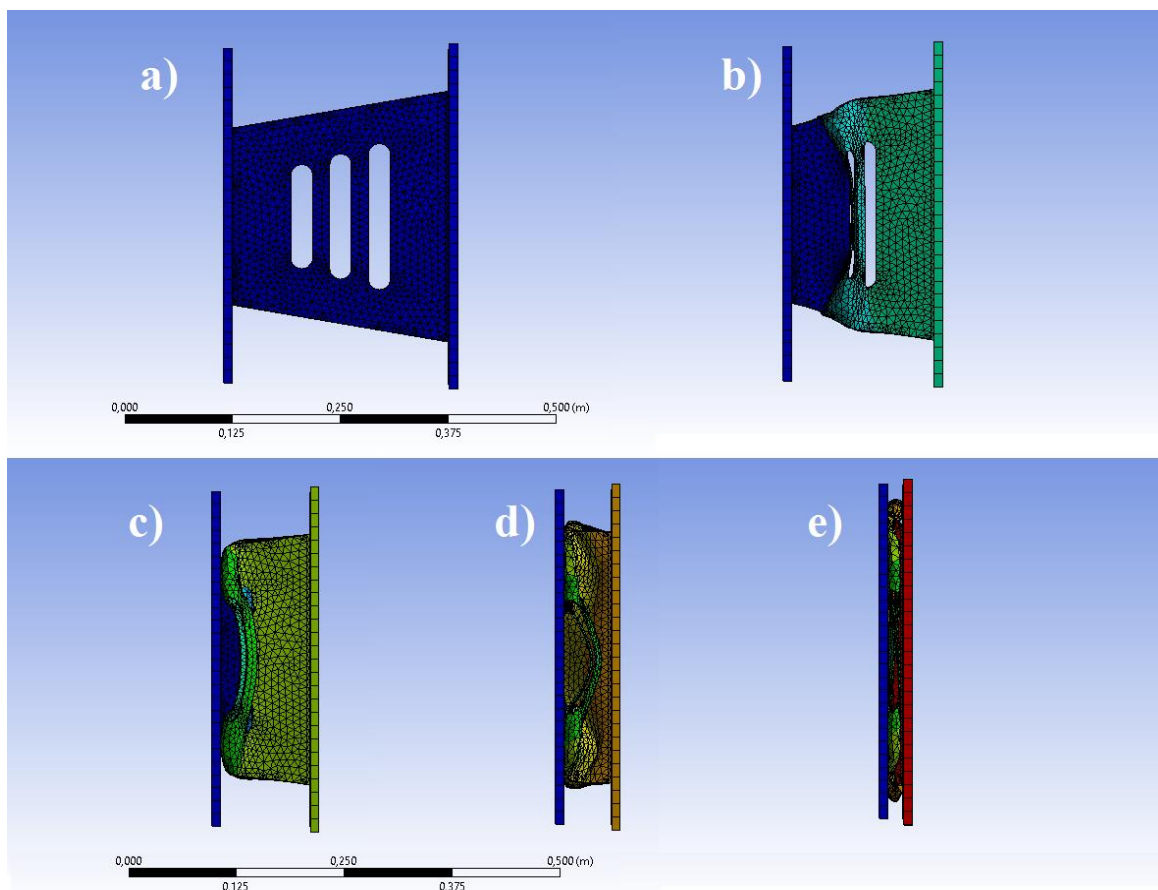


Figura 4. 7 Deformação resultante da análise dinâmica, vista superior. a) 0 segundos; b) $1,25 \times 10^{-2}$ segundos; c) $2,01 \times 10^{-2}$ segundos; d) $2,87 \times 10^{-2}$ segundos; e e) $3,01 \times 10^{-2}$ segundos.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Ainda analisando as figuras 4.6 e 4.7 é possível observar que o perfil de deformação ocorreu de forma linear sem indícios de curvatura ou flambagem, isso de certa forma, é significativo para o objetivo do trabalho uma vez que a observância desses fenômenos implica em redução da eficiência do dispositivo podendo resultar até mesmo na sua inutilização. Ainda em relação ao perfil de deformação, é importante destacar que a condição de contato entre o dispositivo e a parede no momento do choque não previa a influência do atrito, dessa forma é possível que em uma situação real o comportamento do dispositivo apresente divergências em relação à simulação computacional com dados que possam vir de encontro aos resultados aqui apresentados.

A figura 4.8 também possibilita uma análise da deformação do atenuador de impacto por meio de um gráfico do deslocamento (deformação) em função do tempo.

Pelo perfil da curva apresentada nessa figura pode-se afirmar que a deformação do atenuador de impacto, para as condições propostas, ocorreu de forma linear. Analisando a figura de forma mais detalhada pode-se perceber que, realizando uma regressão linear da curva apresentada, pode-se afirmar que ela possui um coeficiente de determinação (R^2) de 99,81% ou seja, se trata de um modelo com bom ajustamento estatístico linear.

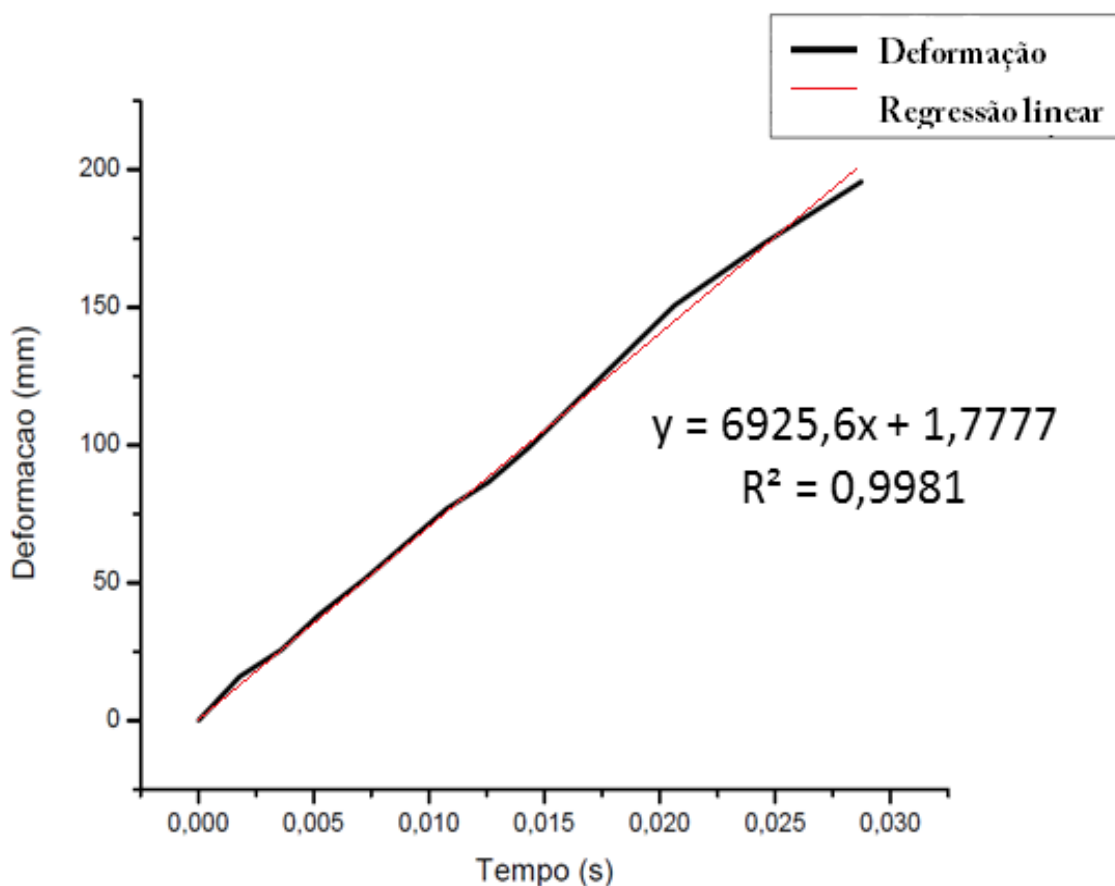


Figura 4. 8 Representação gráfica da deformação em função do tempo, resultante da análise dinâmica.
Fonte: Pesquisa direta (2019)

4.2.2.2 Absorção de energia

Pode-se observar na figura 4.9 o gráfico referente à absorção de energia no tempo de simulação.

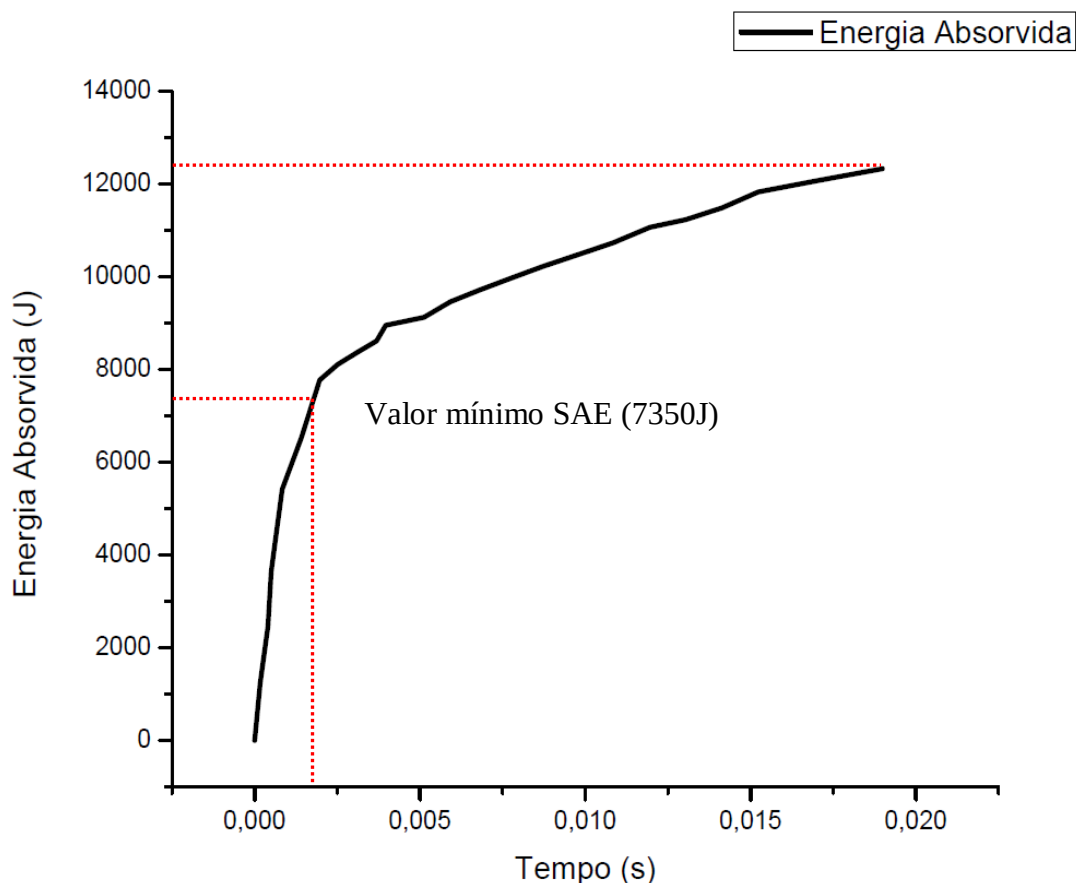


Figura 4. 9 Representação gráfica da energia absorvida em função do tempo obtida através da análise dinâmica.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

De acordo com SAE (2018e) o valor mínimo para a absorção de energia é 7350 J, sendo esse, um dos parâmetros fundamentais utilizados pela organização da competição para validar ou não o modelo de atenuador proposto uma vez que é preciso que ocorra a absorção mínima para garantir que essa parcela de energia que incide sobre o dispositivo não seja transmitida ao piloto do veículo.

É possível observar na figura 4.9 que, em até 0,020 segundos a absorção de energia foi muito superior ao mínimo exigido, sendo observada uma absorção máxima de aproximadamente 12.500 J, o que permite afirmar que a energia mecânica decorrente da força de colisão é absorvida pelo dispositivo, mas não é transmitida para o restante da estrutura uma vez que se converte em deformação plástica.

Pela análise do gráfico da figura 4.9 ainda é possível afirmar que a absorção mínima exigida ocorre em até 0,0025 segundos, o que sugere a realização de novo ensaio com menor tempo de realização, para garantir que mesmo nessa condição ainda ocorre a absorção mínima.

4.2.2.3 Desaceleração média e desaceleração máxima

A análise da desaceleração para o sistema proposto pode ser observada na figura 4,10.

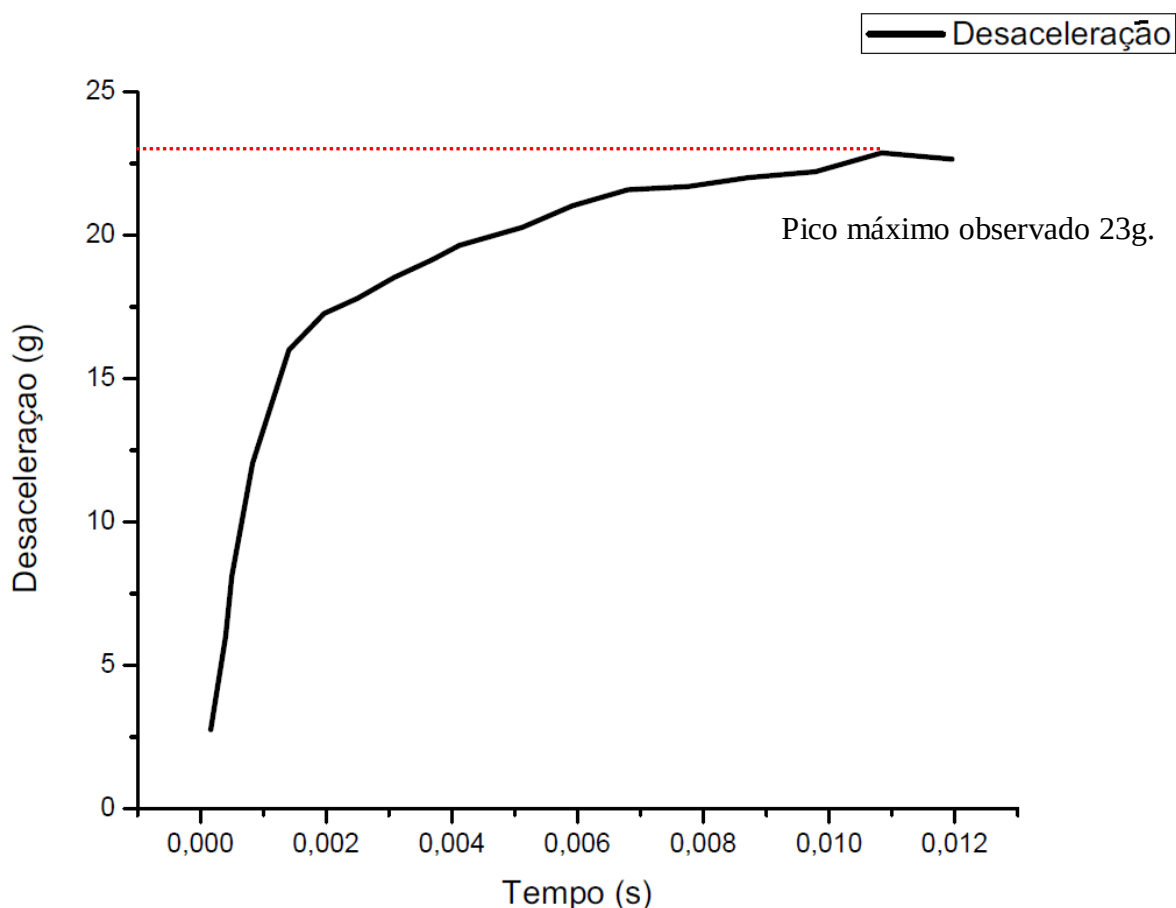


Figura 4. 10 Representação gráfica da desaceleração do atenuador após a colisão em função do tempo obtida através da análise dinâmica.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Na figura 4.10 é possível observar que o pico máximo de desaceleração foi de 23g, estando esse valor bem abaixo do pico máximo determinado no regulamento, já que SAE (2018e) define como pico máximo 40g. Ainda de acordo com os autores, além de não apresentar picos máximos de desaceleração acima do regulamentado, a desaceleração média não deve ser superior a 20g. Pelos dados obtidos nesse estudo a desaceleração média foi igual a 17,4g, ou seja, os valores encontrados para a desaceleração não ultrapassam os limites estabelecidos pelo regulamento da competição.

Ainda, observando a figura 4.10 pode-se afirmar que os valores apresentados pelo gráfico de desaceleração apresentam o comportamento típico esperado, já que se trata de uma desaceleração crescente associada a uma seção transversal também crescente no sentido de deformação do atenuador.

A rigidez do material é um importante fator quando se determina a desaceleração de um dado sistema. Pereira (2013) realizou um estudo semelhante em que compara a desaceleração de dois modelos com propriedades distintas e confirma a hipótese da composição química do material como responsável direta pela desaceleração.

Pelos resultados das análises computacionais realizadas com o modelo proposto pode-se afirmar que se trata de um protótipo que apresenta as características necessárias para ser utilizado como dispositivo atenuador de impacto para um veículo Fórmula SAE®, no entanto os ensaios desenvolvidos por meio de simulação computacional precisam ser validados utilizando-se um dos testes mecânicos regulamentados.

Para que seja possível a realização futura desses testes foi construído um protótipo baseado no modelo analisado.

4.3 Construção dos protótipos de atenuadores de impacto

A construção do modelo iniciou-se com a aquisição das chapas de alumínio com as dimensões e detalhamento conforme especificações determinadas nas etapas anteriores.

As placas de alumínio de $2 \pm 0,5$ mm para a construção do dispositivo atenuador de impacto foram obtidas por corte a laser como observado na figura 4.11.

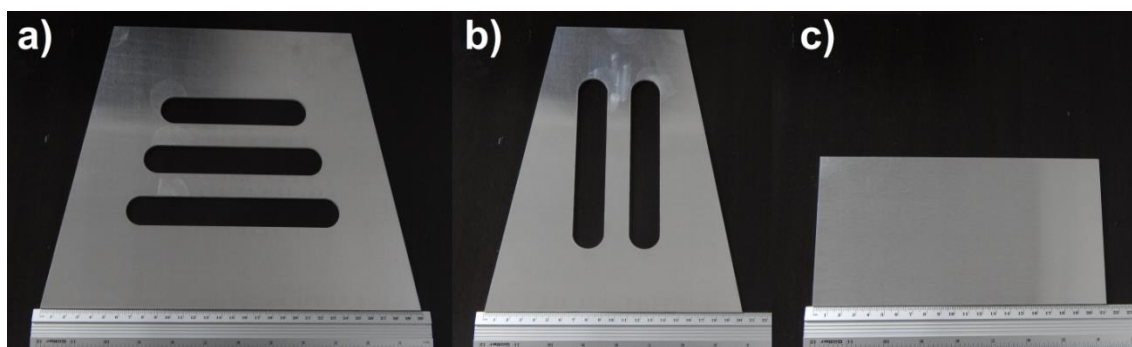


Figura 4. 11 Placas de alumínio, detalhes do corte a laser para construção do atenuador de impacto.
Fonte: Pesquisa direta (2019)

Uma análise das placas apresentadas pela figura 4.11 confirma as vantagens da utilização do corte a laser que é um procedimento avançado para cortes térmicos e que

possui vantagem em relação à precisão, além de possibilitar a representação fiel do modelo projetado garantindo assim, uma redução dos erros associados à construção em detrimento ao projeto original.

As placas foram unidas por soldagem por eletrodo revestido, obtendo a forma final observada na figura 4.12.

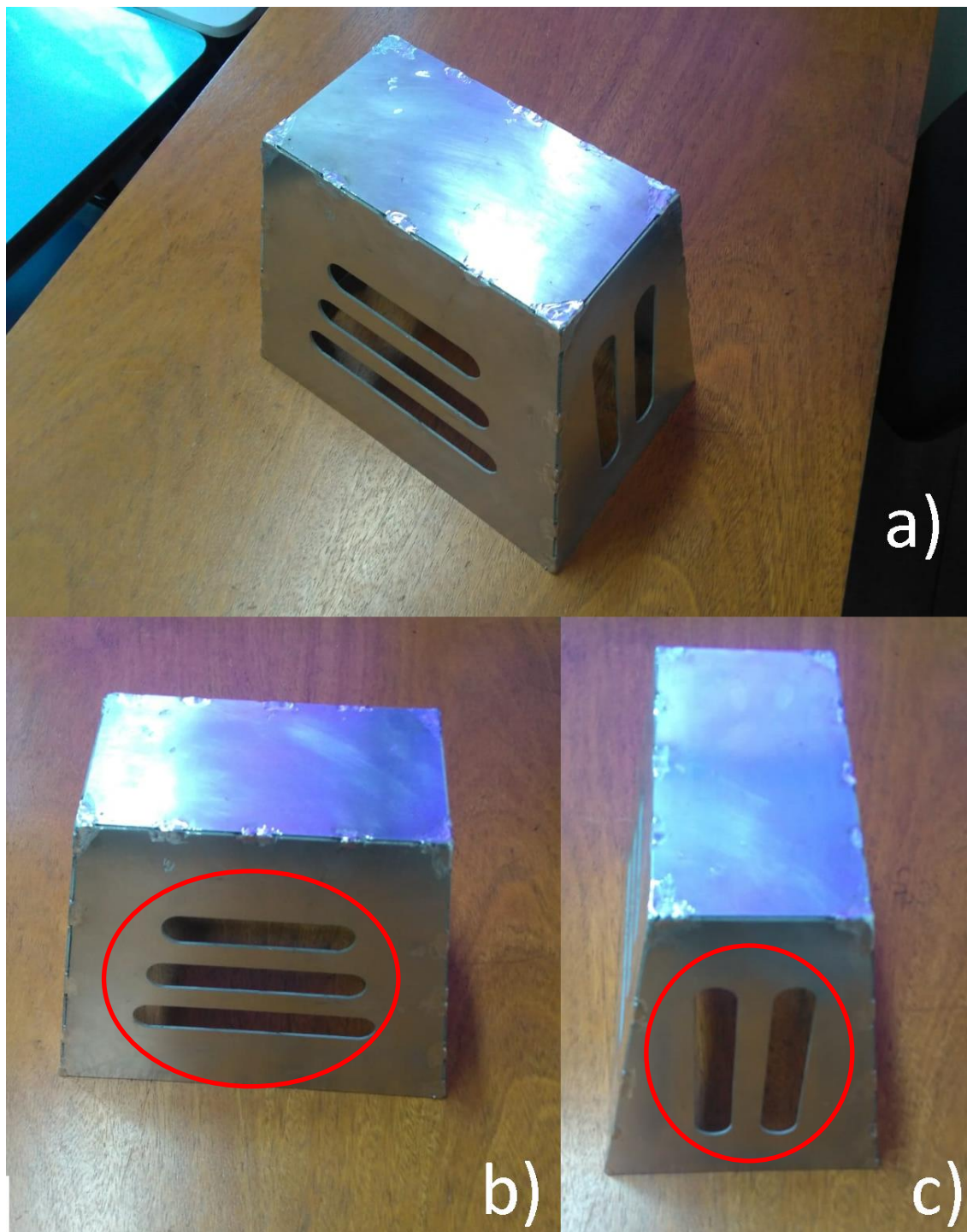


Figura 4. 12 Atenuador de impacto após soldagem. a) Vista isométrica, b) vista da parte superior e c) vista lateral.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A estrutura final do atenuador apresentado pela figura 4.12 encontra-se em conformidade com o modelo conceitual sendo observada, principalmente, a manutenção das dimensões e o detalhamento da estrutura, como os alívios de massa nas paredes superior, inferior e laterais, figura 4.12(b e c).

Na figura 4.13 é possível observar o interior do atenuador de impacto. Em destaque podem ser observados os pontos de solda utilizados para unir as chapas. O projeto conceitual desenvolvido no *SolidWorks* apresenta uma estrutura soldada através de um cordão contínuo, no entanto, não foi possível realizar o procedimento dessa forma em virtude da pequena espessura das chapas de alumínio que começaram a empenar devido à elevada temperatura. Mas, ainda que tenha sido observado esse problema foi possível construir o protótipo mantendo as características originais do projeto.

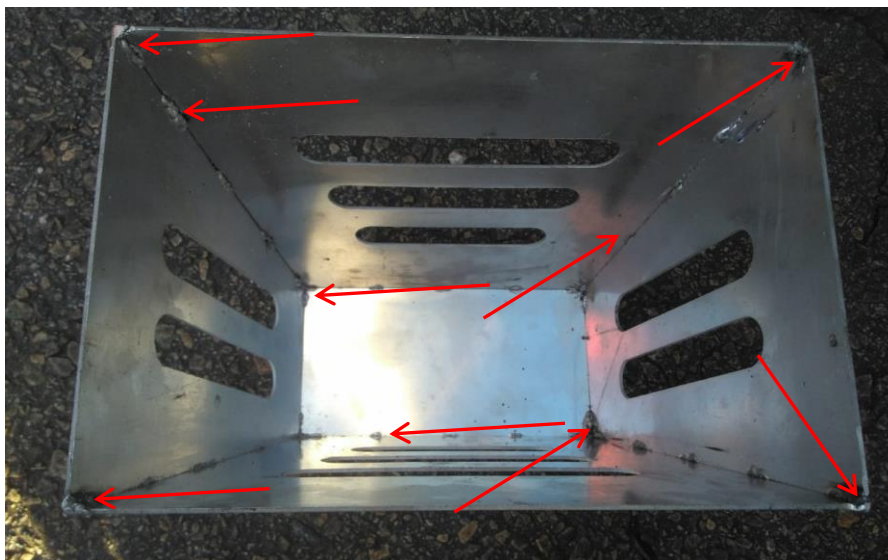


Figura 4. 13 Interior do atenuador de impacto
Fonte: Pesquisa direta (2019)

Para avaliar o comportamento real do dispositivo construído e confrontar com os resultados obtidos através da simulação computacional se faz necessário a realização de um dos ensaios mecânicos regulamentados pela SAE®, ou seja, é preciso submeter o protótipo construído a um teste quase estático (compressão axial) ou teste dinâmico (impacto de queda de peso), mas em razão da indisponibilidade de recursos e devido ao tempo relativamente curto, não foi possível a realização desses ensaios nesse trabalho, ficando essa etapa como sugestão para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Com o término desse trabalho pode-se concluir que os objetivos traçados foram finalizados com sucesso, ou seja, foi possível finalizar todas as etapas planejadas com sucesso.

Através da revisão de literatura foi possível reunir e absorver informações importantes sobre o desenvolvimento de projetos que envolvem a absorção de energia e a construção de dispositivos atenuadores de impacto.

Utilizando o *software SolidWorks* foi possível propor 3 modelos de atenuadores de impacto com diferentes características construtivas. Além disso, a simulação computacional pelo Método de Elementos Finitos (MEF) usando o *software SolidWorks* foi aplicada em análises de deformações estáticas que auxiliaram na definição do melhor modelo de atenuador de impacto para sequencia do trabalho.

O *software ANSYS* foi usado em uma análise dinâmica que simulou o impacto entre um veículo de 300 kg e uma parede rígida indeformável, sendo possível observar que o modelo de atenuador proposto apresentou os resultados que se encontram de acordo com os requisitos da competição fórmula SAE[®] como absorção mínima de 7350 J de energia e picos de desaceleração que não ultrapassaram 40g.

Por fim, a construção do o protótipo foi realizada de acordo com o projeto proposto, exceto em relação à união das chapas que não pode ser realizada de acordo com o modelo computacional escolhido devido a limitações encontradas durante o processo de soldagem.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Com a finalização das etapas propostas nesse projeto, deixa-se como sugestão para os próximos trabalhos:

1 – Realização de estudos complementares que contribuam para a validação dos resultados encontrados;

2 – Realização da caracterização físico-química do material utilizado para a construção do dispositivo;

3 – Avaliação do comportamento mecânico do protótipo através de ensaio regulamentado pela competição;

4 – Avaliação do conjunto atenuador/placa de intrusão conforme exigências da competição.

A realização das etapas propostas se trata de uma ferramenta produtiva e que possui um grande potencial para agregar valor à pesquisa realizada, pois pode ser usada como complementação e validação desse trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrawal, N.; Raj, J.; Saxena, G. **Design and analysis of impact attenuator: a review.** SSRG - International Journal of Mechanical Engineering. v.2(12). 2015.

Alyrio, R.D. **Métodos e técnicas de pesquisa em Administração.** Fundação CECIERJ - Consórcio CEDERJ. Apoio FAPERJ. Volume único. 2009.

Azevedo, A.F.M. **Método dos elementos finitos.** Faculdade de Engenharia do Porto. 1ª edição. Portugal. 2003. Disponível em: http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/Livro_MEF_AA_1ed/doc/Livro_MEF_AA.pdf Acessos em 01 de maio de 2019.

Bazzo, W.A.; Pereira, L.T.V. **Introdução à Engenharia – Conceitos, Ferramentas e comportamentos.** Editora da UFSC. Florianópolis. 2006.

Belingard, G.; Obraadovic, J. **Design of the Impact Attenuator for a Formula Student Racing Car: Numerical Simulation of the Impact Crash Test.** Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. v. 4. n. 1. 2010.

Boff, U.; Folle, L.F.; Moraes, A.S.; Schaeffer, L. **Ensaio de compressão é adequado para obter curvas de escoamento em chapas finas.** Cortes & Conformação de Metais. 2012.

Borges, J.C. **A qualificação profissional do trabalhador para o mercado de trabalho e ambiente organizacional.** Disponível em: <https://www2.faccat.br/portal/sites/default/files/borges.pdf>. Acessos em 22 de setembro de 2018.

Boria, S.; Obraadovic, J.; Belingard, G. **Experimental and numerical investigations of the impact behaviour of composite frontal crash structures.** Composites Part B: Engineering. v. 79. 2015.

Cardoso, A.; Augusto-Júnior, F.; Santos, R.B.; Viana, R.; Camargo, Z. **O setor automotivo no Brasil: Emprego, relações de trabalho e estratégias sindicais.** Análise 14/2015. Fundação Friedrich Ebert Stiftung Brasil. 2015.

Corradi, W.; Társia, R.D.; Oliveira, W.S.; Vieira, S.L.A.; Memes, M.C.; Balzuweit, K. **Fundamentos de Física 1.** Editora UFMG. Belo Horizonte. 2010.

Correa, C.P. **Estudio numérico y experimental de un atenuador de impacto para Fórmula SAE.** Trabajo de fin de grado. Grado en Ingeniería de Las Tecnologías Industriales. Universidad de Sevilla. Sevilla, 2015.88f.

Cruz, Mariana. **Fórmula SAE Brasil.** SAE Brasil. Disponível em: <http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil>. Acessos em 07 de setembro de 2018.

Fernandez, V.C. **Diseño de un atenuador de impactos para un vehículo Fórmula SAE**. Trabajo de fin de grado. Grado en Ingeniería en Tecnología Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. 2016. 127f.

Ferreira, V.S. **Setor Automobilístico Brasileiro: Um estudo sobre os principais impactos da crise financeira internacional no período de 2010 a 2015**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade do Sul de Santa Catarina – Unisul. 2017.65f.

FIEPR - Federação das Indústrias do Estado do Paraná. **Complexo Automotivo**. Disponível em: <http://www.fiepr.org.br/fomentoeddesenvolvimento/cadeiasprodutivas/upload/Complexoautomotivo%5B19591%5D.pdf>. Acessos em: 24 de setembro de 2018.

Fuchs E.R.H.; Field F.R.; Roth R.; Kirchain R.E. **Strategic materials selection in the automobile body: economic opportunities for polymer composite design**. Composites Science Technology. v. 68(9). 2008.

Fugant, A.; Lorenzi, L.; Gronsund, A.; Langseth, M. **Aluminum Foam for Automotive Applications**. Advanced Engineering Materials. 2000.

Galhardi, C.H. **Projeto, construção, e avaliação do comportamento mecânico de um atenuador de impacto de um veículo Fórmula SAE**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017. 74f.

Garcia, A.; Spim. J.A.; Santos, C.A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro, LTC, 2000.

Gil, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6.ed. São Paulo, Editora Atlas. 2008.

Gokhale, M., **Practical Aspects of Finite Element Simulation**. A Study Guide. Altair University. First Edition. 2008.

Hart, J.; Kennedy, C.; LeClerc, T.; Pollard, J. **FSAE impact attenuator**. Worcester Polytechnic Institute. Plascore®. 2010.

Imanullah, F.; Ubaidillah, Prasojo, A.S.; Wirawan, A.A. **Experiment evaluation of impact attenuator for a racing car under static load**. AIP Conference Proceedings. v.1931. 2108.

Kerber, L.C. **Mapeamento de processos no projeto de extensão Fórmula UFSM**. Trabalho de conclusão de Curso. Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Maria. 2017.

Lopes, T. A. **Simulador de tempo de volta para aplicação em fórmula SAE**. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2018. 65f.

Marconi, M.A.; Lakatos, E.M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo, Editora Atlas. 2003.

Mascia, N.T. **Tração, compressão e Lei de Hooke**. Departamento de estruturas – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. 2006. Disponível em: <https://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/tracaocompressaoeidehooke.pdf>. Acessos em 07 de novembro de 2018.

MDIC – Ministério da Economia, indústria, comércio exterior, e serviços. **Setor automotivo**. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo>. Acessos em 24 de setembro de 2018.

Meredith, J.; Ebsworth, R.; Coles, S.R.; Wood, B.M.; Kirwan, K. **Natural fibre composite energy absorption structures**. Composites Science and Technology. v.72. 2012.

Mourão, R. P.; Neto, M. M. **Caracterização de espuma polimérica para uso em embalagens para transporte de rejeitos radioativos**. Belo Horizonte: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/2002/inac/08773.PDF>. Acessos em 11 de setembro de 2018.

Munusamy, R.; Barton, D.C. **Lightweight impact crash attenuators for a small Formula SAE race car**. International Journal of Crashworthiness. 2010.

Nirschl, G.C.; Proença, S.P.B. **Método dos elementos finitos e técnicas de enriquecimento da aproximação aplicados à análise de tubos cilíndricos e cascas esféricas**. Cadernos de Engenharia de Estruturas. v.10. n.47. 2008.

Oliveira, M.F. **Metodologia Científica: um manual para a realização de pesquisas em administração**. Manual (pós graduação). Universidade Federal de Goiás. 2011. Disponível em: https://adm.catalao.ufg.br/up/567/o/Manual_de_metodologia_cientifica_-_Prof_Maxwell.pdf. Acessos em: 23 de novembro de 2018.

Pang, T.Y.; Tristian, H. **Experimental and Finite Element Nonlinear Dynamics Analysis of Formula SAE Impact Attenuator**. Non linear Approaches in Engineering Applications 2. 2013.

Prazeres, H.M. **Desenvolvimento de um atenuador de impacto para um veículo de Fórmula Student**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2016. 146f.

Pereira, L.O.C.M. **Projeto de um atenuador de impacto para o protótipo da equipe Formula SAE da UFRJ**. Projeto Final. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

Ribeiro, F.L.B. **Introdução ao método dos elementos finitos**. Notas de aula. Programa de Engenharia Civil. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

Richardson, R.J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3. ed. São Paulo. Editora Atlas, 1999.

Rusinek, A.; Zaera, R.; Forquim, P.; Klepaczko, J.R. **Effect of plastic deformation and boundary conditions combined with elastic wave propagation on the collapse site of a crash box**. Thin-Walled Structures. v. 46. n.10. 2008.

SAE International. **Sobre a SAE**. Disponível em: <http://br.sae.org/about/>. Acessos em 07 de setembro de 2018. 2018a.

SAE International. **Apresentação institucional**. Disponível em: http://portal.saebrasil.org.br/Portals/0/Eventos/180111_APRESENTACAO_INSTITUCIONAL_2018_PT.pdf. Acessos em 07 de setembro de 2018. 2018b.

SAE International. **SAE no Brasil**. Disponível em: <http://portal.saebrasil.org.br/a-instituicao>. Acessos em 07 de setembro de 2018. 2018c.

SAE International. **Students events**. Disponível em: <https://www.sae.org/attend/student-events/>. Acessos em 07 de setembro de 2018. 2018d.

SAE International. **Formula SAE Rules 2019**. Version 2.1. Outubro de 2018. 2018e

SAE International. **Formula SAE - Series Resources**. Disponível em: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>. Acessos em 07 de setembro de 2018. 2018f.

Santos, D.J.F.C.H. **Atenuador de impacto para Fórmula SAE: Análise dinâmica não linear pelo método de elementos finitos**. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia de Materiais. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016.61f.

Silva, M.L. **O setor industrial brasileiro frente à integração econômica**. Tese. Doutorado em Administração. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2018. 105f.

Sinaga, F.R.; Ubaidillah; Kurniawan, K.E.; Fadhil, M.I.; Cahyono, S.I.; Idris, M.H. **Numerical simulation of several impact attenuator design for a formula student car**. AIP Conference Proceedings. v. 1931. 2018.

Souza, S.A. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5.ed. São Paulo. Editora Edgard Blücher. 1982.

Teofilo, J. **Ensaaios Mecânicos dos Materiais**. Disponível em: <https://jorgeteofilo.files.wordpress.com/2010/08/epm-apostila-capitulo09-ensaaios-mod1.pdf>. Acessos em: 07 de novembro de 2018.

Tivelli, E. **Absorção de impacto por latas de alumínio**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2012.119f.

Toledo, E.M.; Bastos, F.S.; Cury, A.A. **Apostila de Resistência dos Materiais II**. Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional Faculdade de Engenharia. Universidade Federal de Juiz de Fora. Disponível em: http://www.ufjf.br/mac003/files/2015/01/apostila_rm2.pdf. Acessos em 20 de junho de 2019.

UFJF. **Colisão e as leis da conservação da energia e do momento linear.** Disponível em: http://www.ufjf.br/fisica/files/2010/03/07_Pratica7.pdf. Acessos em 11 de setembro de 2018.

UFPR. **O método dos elementos finitos.** Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM266/Apostila/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20ao%20MEF.pdf>. Acessos em: 01 de maio de 2019.

Vergara, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração.** São Paulo: Atlas, 1997.

Viana, F. **Indústria de autopeças.** Caderno Setorial ETENE (Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste). Banco do Nordeste. a. 1. n.1. 2016.

Wang, J.; Yang, N.; Zhao, J.; Wang, D.; Wang, Y.; Li, K.; He, Z.; Wang, B. **Design and experimental verification of composite impact attenuator for racing vehicles.** Composites structure. v. 141. 2016.