

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PIETRO ALBUQUERQUE CHIQUETO

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE ATENUADOR DE IMPACTO
PARA UM VEÍCULO FÓRMULA SAE**

PONTA GROSSA

2021

PIETRO ALBUQUERQUE CHIQUETO

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE ATENUADOR DE IMPACTO
PARA UM VEÍCULO FÓRMULA SAE**

**Design, development and analysis of impact attenuator for a Formula SAE
vehicle**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Rodrigo Villaca Santos

Coorientador(a): Sandra Mara Kaminski Tramontin.

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

PIETRO ALBUQUERQUE CHIQUETO

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE ATENUADOR DE IMPACTO
PARA UM VEÍCULO FÓRMULA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15 de dezembro de 2021

Rodrigo Villaca Santos
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Heliety Rodrigues Borges Barreto
Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Davi Fusão
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2021

Dedico este trabalho à minha família, pelos esforços realizados para me proporcionar esta oportunidade e por todo o auxílio e confiança durante este período.

Dedico também este trabalho à minha namorada por toda a dedicação e paciência comigo ao longo desses anos e pelo apoio quando necessário.

Por fim, dedico também a todos os meus amigos pela companhia e suporte durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por sempre garantir a saúde e bem-estar, minha e de todos aqueles com quem eu me importo e desejo o melhor.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelas oportunidades geradas, pelos projetos desenvolvidos, pelo uso dos laboratórios durante todo o curso e nos projetos de extensão e pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Villaca Santos, pela paciência e sabedoria com que me guiou durante este e outros projetos.

A minha co-orientadora, Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin, por toda prestatividade e conhecimento com que me auxiliou nesta trajetória.

Aos membros da banca avaliadora, Prof. Dr. Davi Fusão e Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto, pelo aceite e disponibilidade.

Aos meus colegas da equipe UTFast F-SAE Racing por todos os momentos de dedicação e aprendizagem durante esses anos, e que foram fundamentais para a escolha do tema e do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais Júlio e Cristiane, e minhas irmãs Júlia e Lorena, por todos os esforços realizados e por sempre me apoiarem, e também aos meus avós, tios e primos, pelo suporte, sempre que necessário e por sempre acreditarem em mim.

A minha namorada Luciana, por estar presente em minha vida, e por todo amor e carinho ao longo desses anos, e também aos seus familiares, pelo suporte, quando mais foi preciso, e pela confiança que depositaram em mim.

Aos meus amigos, pelo companheirismo e auxílio ao longo desses anos, e por tornarem este período da minha vida mais agradável.

A todos os professores pela transmissão do conhecimento e esforços aplicados para a formação de novos profissionais, e aos demais colaboradores por sempre garantirem as melhores condições possíveis para os estudantes.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica.

RESUMO

A Fórmula SAE é uma competição que ocorre em diversos países, cujo objetivo é proporcionar aos estudantes de engenharia, a oportunidade de construir um carro do tipo fórmula, respeitando o regulamento proposto pela *Society of Automotive Engineers* (SAE). A competição consiste de provas que avaliam a equipe em relação ao projeto, desenvolvimento e desempenho do protótipo, além de inspeções técnicas que garantem o cumprimento das exigências da entidade. Um dos itens examinados é o atenuador de impacto, objeto que tem como função amenizar danos ao piloto e ao veículo, no caso de uma colisão frontal. O objetivo deste estudo foi projetar, desenvolver e analisar um atenuador de impacto de acordo com os requisitos estipulados pela associação. Porém, como várias equipes que participam da Fórmula SAE carecem de recursos financeiros e técnicos, e entendendo o caráter competitivo do evento, este trabalho foi desenvolvido com a premissa de apresentar uma alternativa de projeto para um atenuador de impacto para veículo fórmula SAE, priorizando baixo peso, baixo custo e facilidade de construção. Assim, foi escolhido, entre alguns modelos propostos, um dispositivo unindo ideias, utilizadas separadamente em outros trabalhos, de geometria, com formato de pirâmide mesoamericana, e material, utilizando a espuma de policloreto de vinila (PVC) *Divinycell*[®] H60. Este trabalho também buscou verificar o comportamento do novo modelo para o caso de uma colisão, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), por meio de uma análise dinâmica explícita utilizando o *software* Ansys[®] 2019R2. Para encontrar resultados mais próximos do real, foram realizados ensaios de compressão para caracterizar o material. A inserção do mesmo no programa foi feita utilizando os modelos matemáticos, presentes na biblioteca de materiais, *Isotropic Elasticity* e *Multilinear Isotropic Hardening*, para representar respectivamente, o comportamento elástico e plástico do material. Após a simulação, o modelo proposto foi construído e submetido ao ensaio de compressão quase-estático, e posteriormente, foram realizados cálculos para Os resultados da simulação mostraram um bom desempenho para absorção de energia, chegando a valores superiores a 99% em comparação aos 7350 J exigidos, e sem que ocorressem deformações desproporcionais, enquanto os valores para a desaceleração após a colisão, apresentaram um percentual de erro maiores, cerca de 10% para o pico, e 18% para a média, em relação ao necessário, de 40 g e 20 g respectivamente. Os resultados do ensaio de compressão do dispositivo também ficaram abaixo do permitido, com o conjunto montado para o ensaio sendo capaz de absorver 45 % do exigido. Possíveis justificativas para este valor são o fato de o tubo da representação estrutural possuir pouca espessura, e não ter suportado a carga exercida, além de possíveis falhas de procedimento durante o ensaio. Por fim, verificou-se a necessidade de aumentar a espessura do tubo, a fim de garantir maior resistência mecânica ao dispositivo, realizar uma nova construção e ensaio do dispositivo, a fim de avaliar novamente a eficácia do conjunto e o seu desempenho real, e assim, comprovar se o mesmo se encontra apto ou não para ser utilizado durante a competição.

Palavras-chave: Fórmula SAE; atenuador de impacto; espuma de policloreto de vinila (PVC); Método dos Elementos Finitos (MEF).

ABSTRACT

Formula SAE is a competition that takes place in several countries, whose objective is to provide engineering students with the opportunity to build a formula-type car, respecting the regulations proposed by the Society of Automotive Engineers (SAE). The competition consists of tests that assess the team in relation to the prototype's design, development and performance, as well as technical inspections that ensure compliance with the entity's requirements. One of the items examined is the impact attenuator, an object whose function is to alleviate damage to the driver and the vehicle, in the event of a frontal collision. The aim of this study was to design, develop and analyze an impact attenuator in accordance with the requirements stipulated by the association. However, as several teams participating in the Formula SAE lack financial and technical resources, and understanding the competitive nature of the event, this work was developed with the premise of presenting a project alternative for an impact attenuator for a formula SAE vehicle, prioritizing low weight, low cost and ease of construction. Thus, among some proposed models, a device was chosen that unites ideas, used separately in other works, of geometry, with a Mesoamerican pyramid shape, and material, using Divinycell® H60 polyvinyl chloride (PVC) foam. This work also sought to verify the behavior of the new model in the event of a collision, using the Finite Element Method (FEM), through an explicit dynamic analysis using the Ansys® 2019R2 software. To find results closer to reality, compression tests were carried out to characterize the material. Its insertion in the program was made using the mathematical models, present in the materials library, Isotropic Elasticity and Multilinear Isotropic Hardening, to represent, respectively, the elastic and plastic behavior of the material. After the simulation, the proposed model was built and submitted to the quasi-static compression test, and later, calculations were performed for The simulation results showed a good performance for energy absorption, reaching values above 99% compared to the 7350 J required, and without disproportionate deformations occurring, while the values for deceleration after the collision, presented a higher percentage of error, about 10% for the peak, and 18% for the average, in relation to the required, of 40 g and 20 g respectively. The results of the device compression test were also below what was allowed, with the set assembled for the test being able to absorb 45% of the required. Possible justifications for this value are the fact that the tube in the structural representation has little thickness, and has not supported the load exerted, in addition to possible procedural failures during the test. Finally, there was a need to increase the thickness of the tube, in order to ensure greater mechanical resistance to the device, carry out a new construction and test of the device, in order to reassess the effectiveness of the assembly and its actual performance, and thus, check if it is fit or not to be used during the competition.

Keywords: Formula SAE; impact attenuator; polyvinyl chloride (PVC) foam; Finite Element Method (FEM).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de veículo fórmula SAE.....	14
Figura 2 – Atenuador de impacto padrão SAE (<i>Type 14</i>)	15
Figura 3 – Exemplo de <i>crash box</i> metálico	23
Figura 4 – Curva força x deslocamento atenuador em <i>honeycomb</i> de alumínio	24
Figura 5 – Utilização de espumas metálicas em suportes de motor.....	25
Figura 6 – Curva tensão x deformação típica para espumas poliméricas	26
Figura 7 – Novo modelo proposto para atenuador de impacto	43
Figura 8 – Detalhamento do novo modelo proposto	45
Figura 9 – Representação do problema no SolidWorks®	46
Figura 10 – Condições iniciais e de contorno para a simulação	46
Figura 11 – Conjunto antes do ensaio de compressão	47
Figura 12 – Atenuador após a simulação dinâmica.....	52
Figura 13 – Conjunto após o ensaio de compressão	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Tensão x Deformação Real Plástica CDP 4 – Dados de Entrada da Simulação.....	44
Gráfico 2 – Curva Força x Deslocamento do ensaio dos corpos de prova	49
Gráfico 3 – Curva Tensão Real x Deformação Real CDP 4	50
Gráfico 4 – Curva Tensão Real Plástica x Deformação Real Plástica CDP 4.....	50
Gráfico 5 – Curva Energia Absorvida x Tempo da simulação do atenuador de impacto	51
Gráfico 6 – Curva Desaceleração x Tempo da simulação do atenuador de impacto	52
Gráfico 7 – Curva Deslocamento x Tempo da simulação do atenuador de impacto	53
Gráfico 8 – Curva Força x Deslocamento do ensaio do atenuador de impacto	54
Gráfico 9 – Curva Energia Absorvida x Deslocamento do ensaio do atenuador de impacto	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos trabalhos recentes sobre atenuadores de impacto ...	27
Quadro 2 – Resumo dos requisitos para o atenuador de impacto	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critério de avaliação para seleção de material e geometria do atenuador de impacto	43
Tabela 2 – Dimensões iniciais dos corpos de prova	48

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÔNIMOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CDP	Corpo de Prova
FMVSS	<i>Federal Motor Vehicle Safety Standards</i>
IAD	<i>Impact Attenuator Data Report</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MDF	Método das Diferenças Finitas
MVF	Método dos Volumes Finitos
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>
PE	Polietileno
PMI	Polimetacrilimida
PVC	Policloreto de Vinila
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SES	<i>Structural Equivalency Spreadsheets</i>
UNECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Objetivo geral	17
1.3	Objetivos específicos	17
1.4	Justificativa	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Regulamentação para ensaio de impacto em veículos de passeio .	19
2.2	Regulamentação para atenuador de impacto fórmula SAE	20
2.3	Principais tipos de absorvedores de impacto	22
2.3.1	Crash box.....	22
2.3.2	Honeycomb	23
2.3.3	Espumas metálicas	24
2.3.4	Espumas poliméricas	25
2.4	Estudos recentes sobre atenuadores de impacto	27
2.5	Seleção de material e geometria	28
2.6	Processo de solução de problemas para engenharia	29
2.7	Método dos elementos finitos (MEF)	31
2.7.1	Considerações Iniciais.....	31
2.7.2	Análise Linear e Não Linear	32
2.7.3	Análise Estática e Dinâmica	33
2.7.4	Método de Integração Explícito e Implícito	34
2.7.5	Considerações Finais	35
2.8	Modelagem numérica e caracterização do material	35
2.9	Ensaio de compressão	38
2.10	Energia absorvida, pico de desaceleração e desaceleração média	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	Seleção do modelo de atenuador de impacto	41
3.2	Caracterização e modelagem do material	43
3.3	Modelagem e simulação do atenuador de impacto	45
3.4	Construção e ensaio do atenuador de impacto	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Construção e ensaio dos corpos de prova	48

4.2	Simulação do atenuador de impacto	51
4.3	Ensaio do atenuador de impacto	53
5	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS.....	58
	ANEXO A - Detalhamento Suporte Atenuador 2022.....	62
	ANEXO B - Detalhamento Atenuador de Impacto 2022.....	63

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo busca apresentar uma breve contextualização ao tema do trabalho e indicar de forma sucinta, o objetivo geral e objetivos específicos, além de justificar a execução deste trabalho.

1.1 Contextualização

A Fórmula SAE é uma competição realizada anualmente pela *Society of Automotive Engineers (SAE)* em diversos países e que tem por objetivo proporcionar aos estudantes de engenharia a oportunidade de aplicar na prática o conhecimento obtido durante a graduação, por meio do projeto e construção de um carro do tipo fórmula. O carro consiste de um *cockpit* aberto e quatro rodas expostas, conforme mostrado na Figura 1, além de vários outros requisitos presentes no regulamento da competição. No Brasil o evento é organizado pela SAE Brasil desde 2004, e em 2018 contou com a participação de aproximadamente 65 equipes, divididas entre carros a combustão e elétrico, reunindo mais de mil estudantes de todo o país durante os três dias de evento (SAE BRASIL, 2021; SAE INTERNATIONAL, 2021).

Figura 1 – Exemplo de veículo fórmula SAE



Fonte: UTFast F-SAE Racing (2018)

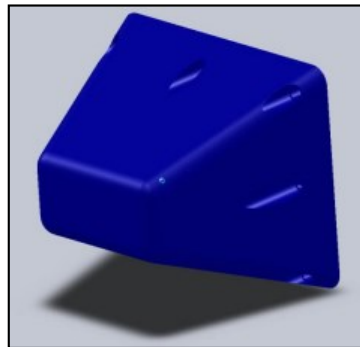
Ao decorrer da competição, os carros são submetidos a inspeções técnicas, e provas estáticas e dinâmicas. A inspeção técnica verifica se os carros estão de acordo com o regulamento vigente, se atendem aos requisitos de segurança e, também, analisam se os mesmos estão aptos para as provas dinâmicas. As provas estáticas consistem de apresentações técnicas sobre o projeto, desenvolvimento, manufatura e produção do protótipo. Por fim, caso os carros estejam aptos, seguem

para as provas dinâmicas, as quais tem como objetivo verificar a performance do veículo em pista (SAE INTERNATIONAL, 2021).

Alguns meses antes da competição as equipes devem enviar relatórios específicos para o comitê organizador, referentes ao projeto, custos, estrutura, atenuador de impacto, entre outros. Esses relatórios servem para que a entidade tenha maior controle em relação à segurança dos veículos e também como critério avaliativo para as provas estáticas (SAE INTERNATIONAL, 2021).

Como citado anteriormente, um dos relatórios exigidos é referente ao atenuador de impacto, dispositivo posicionado na região frontal do veículo, responsável por absorver a energia da colisão com outro corpo por meio de sua deformação. Ele é capaz de desacelerar gradualmente o veículo até que o mesmo pare, protegendo tanto o piloto quanto a estrutura do carro. Para ser aprovado, a SAE exige um modelo ensaiado que cumpra uma série de requisitos impostos pelo regulamento, com uma descrição do procedimento realizado e com os resultados dos cálculos e dados do ensaio presentes no *Impact Attenuator Data Report (IAD)*, ou também um modelo padrão, representado pela Figura 2, disponibilizado pela entidade, que pode ser comprado, e caso este dispositivo seja adquirido desta forma não há necessidade da realização de testes para comprovar a eficiência do mesmo (HART, et al., 2010; SAE INTERNATIONAL, 2021).

Figura 2 – Atenuador de impacto padrão SAE (Type 14)



Fonte: SAE International (2015)

A regulamentação para atenuadores de impacto de veículos de competição utiliza o mesmo princípio de veículos de passeio. Geralmente essa regulamentação impõe condições para que o veículo seja parado a partir de uma velocidade específica sem submeter o piloto a uma força excessiva. Assim, é necessário que o atenuador possua qualidades específicas como boa resistência a deformação e alta capacidade de absorção de energia (SEWARD, 2014).

Para a seleção do material e geometria do atenuador, alguns fatores devem ser levados em consideração, como os esforços aplicados, a forma e o processo de fabricação do modelo. Neste caso as informações mais relevantes para o material são suas propriedades físicas e mecânicas, em especial densidade, elasticidade, plasticidade e tenacidade. Ainda o custo e processo de fabricação são itens de muita importância pois possuem grande impacto sobre a decisão final sobre o material e a geometria escolhida (ASHBY, 2012).

Durante o desenvolvimento do projeto de um atenuador de impacto, um dos recursos mais comuns para analisar o comportamento do mesmo é a simulação computacional utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), um método bastante difundido no ramo da engenharia, e abordado por diversos autores como Cook et al. (2001) e Bathe (2014). Através dele consegue-se encontrar soluções numéricas aproximadas, com erros aceitáveis, podendo verificar os resultados e compará-los aos requisitos do regulamento da competição (SANTOS, 2016; SOUZA NETO, 2019).

Para verificar se os resultados obtidos via simulação computacional estão de acordo com o esperado, é necessário realizar ensaios que possam indicar uma aproximação ao comportamento real do material. Como neste caso o dispositivo a ser projetado deve absorver o impacto de uma colisão por meio de sua deformação, é recomendado que sejam realizados ensaios de compressão no material, seguindo as normas técnicas regulamentadas pelos órgãos responsáveis.

Com o propósito de produzirem seus próprios modelos de atenuador, vários estudantes elaboraram trabalhos apresentando diferentes alternativas para suprir essa necessidade de criação do dispositivo, e em alguns casos gerando soluções inovadoras de construção. Entre os materiais mais utilizados, Schormans (2009) e Pereira (2013) por exemplo, utilizaram espumas poliméricas em seus dispositivos, realizando a construção dos mesmos em formatos trapezoidal e tronco de pirâmide respectivamente. Hart et al. (2010) e Fernández (2016) analisaram modelos constituídos por estruturas *honeycomb*. O primeiro optou por realizar o ensaio de dois modelos, um com formato de pirâmide mesoamericana e o outro formando uma estrutura sanduíche, enquanto o segundo apresentou um dispositivo retangular.

Entretanto, percebe-se uma larga aplicação de modelos a partir de chapas metálicas finas. Oshinibosi (2012), Segade et al. (2016), Prazeres (2016), Santos (2016) e Souza Neto (2019) apresentam várias geometrias diferentes a partir de chapas finas de alumínio. Também é possível verificar novas alternativas para a

fabricação do dispositivo. Bacuilima, Tambo e Palomeque (2013), por exemplo, demonstraram um bom desempenho para modelo construído e ensaiado, a partir de madeira de balsa em formato de tronco de pirâmide, enquanto Correa (2015) apresenta um modelo em fibra de carbono com formato ondular. Vale ressaltar também a vasta utilização de *softwares* como Ansys® e Abaqus® para a realização da simulação pelo MEF e dos ensaios de compressão e de queda livre para verificar o comportamento do atenuador de impacto.

1.2 Objetivo geral

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho foi projetar, desenvolver e analisar um atenuador de impacto utilizando técnicas já difundidas no meio científico como, por exemplo, a utilização do policloreto de vinila (PVC) como material absorvedor de impacto, a caracterização de espumas plásticas por meio de ensaios de compressão, a utilização do método dos elementos finitos (MEF) para a simulação de atenuadores de impacto para veículos fórmula SAE e também outras alternativas de inovação.

Neste estudo buscou-se apresentar uma nova geometria, juntamente com um material já utilizado em alguns estudos, conforme requisitos exigidos pela SAE. Esta nova proposta de atenuador foi analisada por meio de simulação dinâmica explícita, utilizando o *software* Ansys® 2019R2, e posteriormente construída e ensaiada buscando atingir os resultados requeridos.

1.3 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram necessários:

- i. Realizar uma revisão bibliográfica visando compreender as principais exigências relacionadas à regulamentação de impacto, além de materiais e conceitos envolvidos neste tipo de caso, verificar os estudos mais recentes relacionados ao desenvolvimento de atenuadores de impacto para veículos fórmula SAE, e avaliar as melhores alternativas de projeto, análise e construção deste tipo de dispositivo;
- ii. Definir a geometria e material utilizados para a construção do dispositivo e ensaiar corpos de prova do material selecionado, com o objetivo de

- entender o comportamento do mesmo e obter dados de entrada para a modelagem do material para a simulação dinâmica do modelo proposto;
- iii. Realizar a implementação virtual do modelo proposto e simular o caso da colisão do dispositivo, conforme regulamento, por meio de uma análise dinâmica explícita utilizando o método dos elementos finitos, com auxílio do *software* Ansys® 2019R2, a fim de verificar o comportamento do mesmo durante uma colisão e comparar os resultados com o exigido;
 - iv. Efetuar a construção do modelo proposto e ensaiar, por meio de um método válido pela SAE para o ensaio do dispositivo, e com os resultados obtidos, realizar cálculos e comparar com o exigido pelo regulamento da competição, e assim, avaliar se o mesmo está apto par a competição;

1.4 Justificativa

Como várias equipes que participam da Fórmula SAE carecem de recursos financeiros e técnicos, durante o desenvolvimento do veículo como um todo, as equipes nem sempre conseguem reproduzir o projeto como desejam, pois, alguns investimentos acabam se tornando inviáveis por diferentes motivos. Portanto, ao julgar o evento com caráter competitivo, é necessário que as escolhas de projeto atendam às possibilidades da equipe e ao mesmo tempo se demonstrem eficientes, dado o caráter competitivo do evento, já que essas influenciam diretamente a análise dos avaliadores e no desempenho do veículo durante as provas.

Deste modo, conciliar viabilidade de produção e competitividade se torna uma tarefa árdua e requer uma grande administração dos recursos empregados. Para o caso específico dos atenuadores de impacto, a relação custo-benefício utilizada para definir o curso do projeto deve considerar principalmente o custo do material e a dificuldade do processo de fabricação, pressupondo que o dispositivo deve ser desenvolvido pelos próprios estudantes, além de apresentar as propriedades desejadas, sem que prejudique o desempenho do veículo em pista.

Assim espera-se que este trabalho apresente uma alternativa de construção para um atenuador de impacto para veículo fórmula SAE, priorizando baixo peso e baixo custo, e também, que apresente uma construção simples, utilizando um material com ampla utilização neste tipo de problema e de fácil aquisição.

Após esta contextualização, definição do objetivo geral e objetivos específicos, pôde-se dar continuidade a este trabalho com a revisão bibliográfica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos e definições fundamentais sobre o projeto de um atenuador de impacto. Para iniciar os estudos referentes ao assunto, foi necessário que realizar uma pesquisa sobre os principais conceitos envolvidos na colisão de um veículo. Deste modo se fez necessário entender o funcionamento da regulamentação para o ensaio de impacto para veículos de passeio e também, especificamente para o caso dos veículos fórmula SAE.

Além disso, foi de suma importância verificar quais são os principais tipos de absorvedores de impacto utilizados pela indústria e realizar um levantamento dos diferentes tipos de material e geometria usados em veículos fórmula SAE, e os principais métodos de análise para o problema em questão. Determinar uma metodologia que auxilia o processo de escolha do material e geometria para o dispositivo, também se demonstrou útil, uma vez que pode facilitar este tipo de decisão. Estudar os principais métodos de resolução de problemas na engenharia também foi válido, uma vez que indica algumas metodologias bastante úteis e que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Planejar como deve ocorrer a evolução do projeto em si, faz com que o mesmo se torne mais fluido, por isso, também é bastante importante entender tanto o funcionamento das ferramentas que serão utilizadas para auxiliar esse processo, quanto as metodologias empregadas em suas utilizações. Por isso, sabendo-se quais os resultados são necessários, pode-se determinar os meios mais interessantes para sua obtenção. Levando em consideração esta linha de raciocínio, esta revisão bibliográfica pretende estar organizada conforme a sequência indicada.

2.1 Regulamentação para ensaio de impacto em veículos de passeio

A ideia básica, em relação aos projetos estruturais de veículos, relacionada ao impacto, no que diz respeito à segurança veicular é de desenvolver regiões ou dispositivos que sejam capazes de garantir que a menor quantidade de energia e deformações atinjam os passageiros, para, assim, diminuir a possibilidade de lesões aos ocupantes. Estas regiões são chamadas de zonas de colapso, e atuam por meio de sua deformação, de maneira controlada, sendo capazes de absorver a energia do impacto e desacelerar a célula de sobrevivência, onde estão presentes os

passageiros. Dentro da célula, os passageiros são protegidos por outros sistemas de proteção como, por exemplo, o cinto de segurança e *airbag* (MATSUMOTO, 2010).

Os principais órgãos regulamentadores em âmbito mundial, relacionados à veículos, são o *National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)* nos Estados Unidos, que está ligado ao departamento de trânsito americano e é responsável pelos *Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS)* ou Padrões Federais de Segurança de Veículos Automotores, e na Europa a *United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)*, que é responsável pelas normas, padrões e convenções, e que busca promover as melhores condições e regulamentações para que o transporte possa ser mais seguro e sustentável (BARROS, 2018).

No Brasil, o órgão encarregado pelas normalizações é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A norma técnica ABNT NBR 15300, por exemplo, sob título geral denominado “Veículos rodoviários automotores – Proteção ao ocupante – Ensaio de impacto” foi elaborada no Comitê Brasileiro Automotivo (ABNT/CB-05), pela Comissão de Estudo de Carroceria para Veículo de Passageiro (CE-05:105.11), e tem como objetivo regulamentar os requisitos de desempenho e procedimentos de ensaio de impacto frontal para veículos de passeio. Os requisitos de desempenho exigem, por exemplo, que os manequins de ensaio não sofram com acelerações superiores ao limite estabelecido, com forças e deslocamentos excessivos, e que também atendam à critérios de lesão em determinadas regiões do corpo, entre outras especificações (ABNT, 2013).

Como os veículos de passeio, os veículos fórmula SAE possuem requisitos relacionados à segurança. Na próxima seção serão apresentadas essas exigências de acordo com o regulamento vigente para a competição do ano de 2022 versão 2.0.

2.2 Regulamentação para atenuador de impacto fórmula SAE

O regulamento da competição apresenta uma série de exigências e recomendações da SAE que devem ser consideradas durante o projeto e construção dos protótipos. Para o caso em especial do atenuador de impacto, as informações necessárias estão contidas na seção que trata especificamente da proteção frontal do chassi. Segundo o regulamento, a proteção frontal do veículo deve ser composta pelo atenuador de impacto e uma placa anti-intrusão (placa responsável por evitar a penetração de objetos ao *cockpit*) acoplada ao *front bulkhead* (quadro frontal do

veículo) de maneira adequada para resistir ao carregamento em caso de colisões centralizadas ou não (SAE INTERNATIONAL, 2021).

A placa anti-intrusão pode ser metálica ou de material compósito. Caso seja feita de aço, a espessura mínima é de 1,5 mm, se for de alumínio, no mínimo 4 mm de espessura e caso seja de materiais compósitos deve atender uma série de outras especificações de acordo com o regulamento. A união entre a placa anti-intrusão e o quadro frontal também possui suas especificidades, podendo ser realizada por meio de soldagem ou ser parafusada, e deve ser documentada no relatório da estrutura, o *Structural Equivalency Spreadsheets (SES)* (SAE INTERNATIONAL, 2021).

O atenuador de impacto utilizado no veículo pode ser tanto a versão padrão que é disponibilizada para compra pela SAE, e com testes já comprovados, quanto um novo modelo, construído e testado, gerando uma maior flexibilidade em relação à geometria, material e método de teste para as equipes desenvolverem o próprio dispositivo (SAE INTERNATIONAL, 2021).

Para o novo modelo a ser desenvolvido, as medidas do atenuador devem apresentar no mínimo um comprimento de 200 mm longitudinalmente (paralelo ao solo), 100 mm verticalmente (perpendicular ao solo) e 200 mm lateralmente (paralelo ao solo). Caso o atenuador seja feito de espuma, as partes devem ser coladas para evitar deslizamento. O atenuador deve ser unido de maneira segura à placa anti-intrusão ou diretamente ao *front bulkhead*. Novamente, a união das partes possui especificidades, podendo ser soldada, colada ou parafusada (caso seja de espuma não pode ser apenas parafusado) e deve ser documentada no *Impact Attenuator Data Report (IAD)* (SAE INTERNATIONAL, 2021).

Os requisitos funcionais do atenuador de impacto são estabelecidos partindo do pressuposto que em caso de uma colisão frontal, de uma massa equivalente a 300 kg, e com velocidade de impacto de 7 m/s, o dispositivo seja capaz de absorver uma energia mínima de 7350 J, com uma desaceleração média inferior a 20 g (20 vezes a gravidade) e com o pico de desaceleração inferior a 40 g (40 vezes a gravidade) e, além disso, a placa anti-intrusão não pode deformar mais do que 25 mm (SAE INTERNATIONAL, 2021).

Após verificar os requisitos exigidos para o dispositivo, têm-se uma ideia das principais características que os possíveis materiais devem ter, e ao realizar uma pesquisa sobre os principais materiais utilizados na indústria como absorvedores de impacto é possível verificar aqueles que se destacam entre os demais. Desta forma,

na próxima seção serão apresentados alguns dos principais sistemas e materiais utilizados pela indústria com a função de absorver impacto.

2.3 Principais tipos de absorvedores de impacto

Esta seção pretende apresentar alguns dos principais sistemas e materiais utilizados pela indústria com a função de absorver impacto.

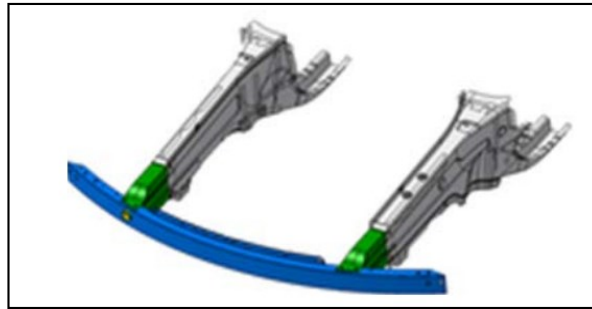
2.3.1 Crash box

Crash box é um sistema de segurança passiva instalado na região dianteira, e amplamente utilizado em veículos de passeio, sendo capaz de absorver energia cinética, desacelerar o veículo de forma segura e por minimizar as chances de lesão dos passageiros em caso de uma colisão. Esse equipamento geralmente é constituído por chapas metálicas ou de material compósito com parede fina e em diversas geometrias. O princípio da absorção de impacto é baseado na deformação plástica desses dispositivos. Convencionalmente, essas estruturas apresentam várias rugas que permitem a ocorrência da deformação inicial por meio da flambagem do mesmo. Estas rugas geralmente são dispostas desde o início do dispositivo permitindo que o início do processo de deformação do material possa ser melhor controlado (ABDULLAH et al., 2020; NAKAZAWA et al., 2005).

É possível verificar pela Figura 3, que o *crash box* está presente nos dois lados do veículo (verde) e instalado juntamente com a travessa (azul), para que desta forma possa absorver tanto o impacto frontal como fora do eixo central, e ao mesmo tempo garantir que toda a extensão dianteira seja protegida. As principais vantagens para esse sistema são a facilidade de fabricação e o baixo custo do material, podendo ser construído em aço ou alumínio, porém a dificuldade de dimensionamento e o fato de se tratar de geometrias longas são algumas desvantagens (PEREIRA, 2013; SANTOS, 2016).

Entretanto, é possível adaptar o conceito de *crash box* empregado em veículos de passeio, para sua utilização como atenuador de impacto para veículos fórmula SAE ao construir um atenuador a partir do conceito denominado *thin-walled shell type*, que apresenta um modelo em formato de casca, formado geralmente pela dobra ou soldagem de chapas metálicas finas, posicionado na região frontal do veículo.

Figura 3 – Exemplo de *crash box* metálico



Fonte: Li et al. (2013)

Desse modo, este tipo de proposta se mostra bastante vantajosa pelo ponto de vista financeiro e de manufatura, mas pode apresentar uma desvantagem relacionada ao peso, dependendo do material selecionado.

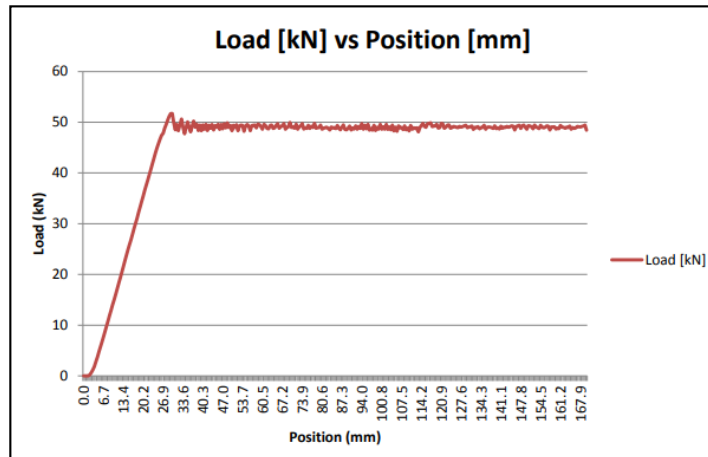
2.3.2 Honeycomb

As estruturas conhecidas por *honeycomb* consistem de um conjunto formado por várias células, geralmente em formato hexagonal, de chapas finas de um determinado material, conformadas e posteriormente unidas, cuja aparência final se assemelha aos favos de mel de abelhas e por isto recebem esta denominação. Geralmente são empregadas na composição de estruturas sanduíche, juntamente com outros materiais compósitos ou metálicos, que por sua vez são utilizadas em diversas aplicações, principalmente quando o objetivo é a redução de peso e resistência a esforços aplicados, e por isso, é bastante utilizado nas indústrias aeronáutica e aeroespacial (BITZER, 1997).

Além disso, o material se mostra bastante eficiente em relação a falha por fadiga e também na absorção de impacto. Desta forma, este material possui as principais características requisitadas para a utilização nos atenuadores de impacto para os veículos fórmula SAE (BITZER, 1997).

A Figura 4 apresenta a curva força x deslocamento para o atenuador de impacto construído pela equipe da Universidade de Dalhousie (Canadá) em 2012. É possível perceber que a deformação para dispositivos que utilizam este tipo de estrutura possui fases muito bem definidas, a primeira caracterizada pela deformação linear elástica do material, seguida por um longo trecho com tensão de esmagamento aproximadamente constante, consequência da flambagem dos núcleos da estrutura *honeycomb*. Por fim, a curva ainda pode apresentar um novo aumento para a força aplicada, causada pela compressão total do material em questão (PEREIRA, 2013).

Figura 4 – Curva força x deslocamento atenuador em *honeycomb* de alumínio



Fonte: Murray e Militzer (2012)

Por todas as características observadas, este tipo de material se torna uma excelente alternativa, principalmente em relação ao ganho de desempenho promovido pela redução de peso relacionada a este tipo dispositivo e pela grande capacidade de absorver energia do impacto. Entretanto, existem desvantagens associadas principalmente do ponto de vista financeiro e de logística para a obtenção do material, já que o mesmo possui um custo de obtenção elevado e dificuldade para aquisição e transporte.

2.3.3 Espumas metálicas

As espumas metálicas estão inseridas em uma classe conhecida como materiais celulares, que por sua vez consistem de uma matriz em que estão presentes vários vazios em seu interior, denominados poros, e que podem ser divididos em materiais de células abertas ou fechadas, dependendo de sua organização celular, e que determinam seu comportamento macroscópico (CARDOSO; DE OLIVEIRA, 2010; MATA et al., 2013).

Os metais celulares formam uma classificação relativamente nova e por isso ainda não foram perfeitamente caracterizados. Entretanto, possuem algumas características físicas, mecânicas e acústicas peculiares, que diferem dos metais sólidos, apresentando, por exemplo, combinações interessantes de propriedades físicas e mecânicas, como alta rigidez e baixa densidade, que gera grandes vantagens em termos de peso e resistência (CARDOSO; DE OLIVEIRA, 2010).

No entanto, devido à dificuldade de fabricação, estes materiais ainda são pouco conhecidos e utilizados na área da engenharia, porém, percebe-se um grande incentivo da indústria para que haja a evolução dos estudos e aplicações desta classe de material, dado o grande potencial que apresenta além da elevada relação rigidez/densidade já citada, a grande capacidade de absorção de energia e de vibrações, e o isolamento térmico, expondo sua vasta aplicabilidade nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, automotiva, entre outras (MATA et al., 2013).

A grande capacidade de absorção de energia que estes materiais apresentam possibilita o emprego dos mesmos em estruturas sujeitas a impactos, como por exemplo, em chassis de automóveis, com a proposta de torná-los mais leves, rígidos e com maior capacidade de absorver impactos em relação aos atuais (CARDOSO; DE OLIVEIRA, 2010; MATA et al., 2013).

A Figura 5 exemplifica a utilização de espumas metálicas em suportes de motores utilizados em carros.

Figura 5 – Utilização de espumas metálicas em suportes de motor



Fonte: Banhart (2007)

Assim como o *honeycomb* metálico, este tipo de material se torna uma excelente alternativa, também em relação ao ganho de desempenho promovido pela redução de peso e grande absorção de energia do impacto, mas da mesma forma, conta com as desvantagens associadas ao elevado custo de obtenção e dificuldade para aquisição e transporte.

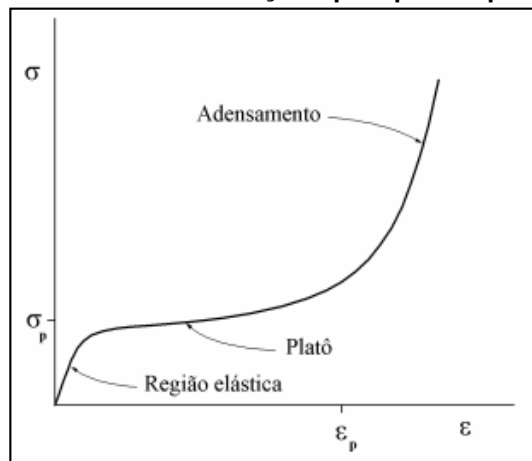
2.3.4 Espumas poliméricas

As espumas poliméricas também estão inseridas na classe de materiais conhecidos como materiais celulares, e desta forma, o comportamento mecânico desses materiais também depende da estrutura celular e do material-base.

Diferentemente das espumas metálicas, as espumas poliméricas possuem grande utilização na indústria, sendo aplicadas para fins estruturais, decorativos, ergonômicos, de isolamento térmico e acústico, e também em relação à absorção de impacto, por exemplo, em embalagens, capacetes e veículos (PEREIRA, 2013).

A Figura 6 apresenta uma curva tensão-deformação típica para espumas poliméricas, na qual três fases bem distintas podem ser observadas.

Figura 6 – Curva tensão x deformação típica para espumas poliméricas



Fonte: Mourão e Mattar Neto (2002)

Inicialmente há uma região de deformação elástica, na qual as arestas das células sofrem flexão ou flambagem elástica, da qual se recuperam totalmente quando da retirada da carga. Também nesta fase, a distensão experimentada pelas membranas das células se situa no limite de elasticidade do polímero base, não ocorrendo ruptura do material. Se a solitação aumenta, as arestas e membranas começam a sofrer colapso plástico, as células começam a desaparecer enquanto elementos individualizados e a espuma se adensa rapidamente. Esta fase é caracterizada por um longo platô na curva tensão-deformação, no qual a espuma se deforma de forma significativa sem praticamente nenhum aumento de tensão. Observou-se que, dependendo da densidade da espuma, pode ocorrer encruamento plástico nesta etapa, caracterizado pela inclinação da curva nesta região. A tensão média nesta região – σ_p – é denominada tensão de platô, sendo um parâmetro importante para caracterização da espuma. Na terceira fase, comumente denominada região de adensamento, a tensão aumenta rapidamente sem que haja grande incremento de deformação, uma vez que, como grande parte das células já colapsou, o próprio material do polímero base começa a ser comprimido, o que provoca o aumento rápido da resistência da espuma. A determinação da deformação ϵ_p , que marca a transição entre as duas últimas regiões da curva σ - ϵ é comumente feita de duas maneiras. Na primeira, toma-se como ϵ_p o valor de deformação correspondente a 1,5 vezes σ_p e na segunda, traça-se a tangente à curva σ - ϵ a partir da origem do gráfico e determina-se o valor de deformação correspondente ao ponto de tangência. É de se notar que, como em qualquer gráfico tensão-deformação, a área abaixo da curva representa a energia absorvida específica pela espuma durante a deformação. (MOURÃO; MATTAR NETO, 2002).

Assim, pelas características apresentadas, é notável a capacidade de absorção de impacto deste material, tendo em vista que já possui esta aplicação na indústria. O fato de também apresentar uma baixa densidade é mais um ponto positivo relacionado ao ganho de desempenho do veículo no caso de optar pelo material para o atenuador de impacto. De maneira geral, o custo de aquisição e transporte também se mostram vantajosos, principalmente se comparado com as estruturas *honeycomb* e com espumas metálicas.

Tendo visto os principais materiais utilizados como absorvedores de impacto pela indústria, é importante realizar a mesma abordagem para a aplicação específica deste trabalho. Assim, a próxima seção tem como finalidade apresentar, de maneira geral, as principais ideias para construção de atenuadores de impacto para veículos fórmula SAE. Assim, serão indicadas as geometrias e materiais utilizados por diferentes autores, bem como os principais objetivos pretendidos e os métodos de simulação e/ou ensaios utilizados pelos mesmos.

2.4 Estudos recentes sobre atenuadores de impacto

Esta sessão busca apresentar de maneira sucinta, um resumo de alguns dos estudos mais recentes relacionados ao desenvolvimento de atenuadores de impacto para veículos fórmula SAE, organizando no Quadro 1, as informações sobre material e geometria propostos, e os métodos de simulação e/ou ensaio utilizados para avaliar os dispositivos;

Quadro 1 – Resumo dos trabalhos recentes sobre atenuadores de impacto

REFERÊNCIA	GEOMETRIA	MATERIAL	SIMULAÇÃO	ENSAIO
Schormans (2009)	Prismas retangular e triangular; Sólido trapezoidal	Espumas de polimetacrilimida (PMI) - Rohacell® WF51 e Rohacell® 110IG	Abaqus	Não Realizado
Hart et al. (2010)	Prisma retangular e Pirâmide mesoamericana	Espuma de polietileno (PE) e <i>Honeycomb</i> de alumínio	SolidWorks	Teste de Queda
Oshinibosi (2012)	Cilíndrico, cônico, retangular e tronco de pirâmide	Chapa de alumínio	LS-DYNA	Não Realizado
Pereira (2013)	Tronco de Pirâmide	Espuma de policloreto de vinila (PVC) - Divinycell H60	Abaqus	Teste de Queda
Bacuilima, Tambo e Palomeque (2013)	Diversas	Chapa de alumínio, <i>Honeycomb</i> de alumínio, poliestireno expandido (EPS) e madeira de balsa	Abaqus	Teste de Queda

Correa (2015)	Formato de ondas, retangular e circular	Fibra de carbono	Abaqus	Ensaio de Compressão e Teste de Queda
Fernández (2016)	Retangular	<i>Honeycomb</i> de alumínio	LS-DYNA	Teste de Queda e Impacto
Segade et al. (2016)	Trapezoidal	Chapa de alumínio e Espuma IMPAXX 500	LS-DYNA	Ensaio de Compressão
Santos (2016)	Retangular	Chapa de alumínio	ANSYS	Não Realizado
Souza Neto (2019)	Tronco de pirâmide	Chapa de alumínio	SolidWorks e ANSYS	Não Realizado

Fonte: Autoria própria (2021)

Após verificar os principais materiais, geometrias, e métodos de simulação e ensaio utilizados pelas equipes de fórmula SAE, é possível selecionar entre as demais a melhor opção. Para isso, entretanto, alguns procedimentos que serão apresentados na próxima seção podem ajudar a fazer a melhor escolha dentre as opções disponíveis.

2.5 Seleção de material e geometria

Para a seleção do material, um procedimento básico que pode ser utilizado, é relacionar de maneira direta os atributos deste material, com sua forma, processo de fabricação e função de aplicação. Entre os atributos do material estão incluídas suas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas, químicas, e relacionados a processamento, custo, disponibilidade e consequências ambientais (ASHBY, 2012).

A primeira etapa consiste em definir os requisitos de projeto para identificar limitações sobre uma possível escolha. Posteriormente é realizada uma triagem, onde são removidos das opções, os materiais que não conseguem cumprir estas restrições. Na sequência, é importante classificar os candidatos conforme sua capacidade de maximizar o desempenho. Identificar os objetivos a serem atendidos auxilia na realização desta classificação, pois assim é possível ponderar os atributos a fim de selecionar o material que apresente o melhor desempenho para tais atributos, ou melhor combinação entre os requisitos indicados (ASHBY, 2012).

Por fim, é interessante verificar a documentação dos materiais com maior probabilidade de seleção, traçando um perfil completo sobre o mesmo, utilizando dados fornecidos pelos fabricantes ou informações presentes na literatura. Para a seleção final ainda devem ser consideradas condições locais, como por exemplo, o

processo de fabricação da peça final e a existência de fornecedores na região (ASHBY, 2012).

A seleção da geometria da peça pode ser realizada de maneira análoga à seleção do material. Como dito anteriormente, o processo de fabricação da peça final influencia a seleção de material, bem como a forma final do objeto. Portanto, a seleção da geometria do dispositivo possui grande dependência do material selecionado e do processo de produção do produto final. Sendo assim, o material escolhido foi a espuma de policloreto de vinila (PVC) *Divinycell*® H60, e a geometria escolhida foi do tipo pirâmide mesoamericana, e estas escolhas serão justificadas posteriormente.

Após a seleção do material e da geometria para o dispositivo, é possível iniciar o processo de solução para o problema em questão. Sendo este considerado um problema de engenharia que deve ser solucionado pelos estudantes, é possível realizar diferentes abordagens para sua resolução. Assim, na seção seguinte serão apresentadas alguns dos principais métodos para solução de problemas de engenharia.

2.6 Processo de solução de problemas para engenharia

Desde o começo do projeto e desenvolvimento de determinado produto, durante a busca por soluções para prevenir ou corrigir eventuais falhas de produção e finalmente garantir a entrega de tal produto com a melhor qualidade possível, buscando sempre reduzir custos e maximizar lucros, em todas estas situações existe sempre uma metodologia bem definida para atingir o objetivo final.

Essencialmente qualquer problema de engenharia pode ser solucionado por três métodos distintos e bem definidos, e não necessariamente os três precisam estar presentes em uma mesma solução. São eles: método analítico, método experimental e método numérico (GOKHALE et al., 2008).

O método analítico é a metodologia clássica para a resolução de problemas simples, que envolvem um número limitado de variáveis, em que a busca por uma solução é baseada em fórmulas matemáticas desenvolvidas geralmente de forma manual por meio de observações e pesquisa, em que são definidas variáveis de entrada que geram soluções para uma ou mais variável de saída. Um grande exemplo é no caso de equações elementares de engenharia disponíveis na literatura. Esta costuma ser uma metodologia de baixo custo e com resposta rápida e direta. Entretanto, em muitos dos casos são feitas considerações idealizadas ou

simplificadas e que acabam não condizendo com a realidade, limitando a aplicabilidade do mesmo (ESSS, 2021; GOKHALE et al., 2008).

O método numérico por sua vez busca desenvolver um protótipo virtual e representar estas condições de operação por meio de sistemas de equações matemáticas, com diferentes abordagens, como por exemplo o Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Volumes Finitos (MVF). Estas abordagens, conseguem resolver problemas mais complexos e próximos a realidade, porém, não devem ser considerados exatos. De maneira geral, esta metodologia consegue equilibrar os pontos positivos dos outros dois métodos, tendo em vista que permite analisar virtualmente determinado objeto, geralmente, sem apresentar os mesmos custos para a fabricação e ensaio de um modelo real, e além disso, consegue ponderar as hipóteses simplificadoras presentes na análise teórica e assim, representar um comportamento muito próximo ao de um protótipo real (ESSS, 2021; GOKHALE et al., 2008).

O método experimental busca aplicar em protótipos físicos, com escala real ou reduzida, ensaios representando as reais condições de operação para determinado produto. Essa metodologia de maneira geral, é significativamente a mais cara entre as três apresentadas, pois envolve os custos de produção de um protótipo, infraestrutura para o ensaio e consome tempo para realização, além de que este processo pode ser repetido algumas vezes até que se chegue aos resultados esperados. Entretanto os resultados obtidos tendem a apresentar uma maior qualidade, tendo em vista que é a representação do funcionamento real de tal produto, mas também não devem ser considerados absolutos. Um bom exemplo, é no caso do teste de impacto para veículos de passeio, em que o modelo real é submetido a uma colisão para verificar seu comportamento, destruindo este produto que possui um valor elevado, além de todo o custo para a realização do teste (ESSS, 2021; GOKHALE et al., 2008).

Portanto, percebe-se que para uma análise completa de determinado projeto é recomendado a realização dos três métodos apresentados anteriormente, realizando os cálculos para determinar as variáveis teoricamente, simulando numericamente para visualizar o comportamento aproximado à realidade, e por fim, aplicando testes experimentais para confirmar os resultados das análises anteriores.

Tendo em vista que a análise teórica para o caso da colisão frontal de um veículo seria muito complexa, devido ao grande número de variáveis, optou-se pela

não utilização do método analítico, já que uma análise muito simplificada poderia não representar a solução real. Assim, a abordagem principal deste trabalho é a simulação do caso em questão pelo MEF e posteriormente um ensaio mecânico a fim de comparar os resultados com a simulação. Deste modo, as próximas seções buscam apresentar os principais conceitos do método dos elementos finitos (MEF) que serão abordados neste trabalho e o modelo de modelagem de material que foi utilizado durante a simulação.

2.7 Método dos elementos finitos (MEF)

O surgimento do método dos elementos finitos (MEF) não é atribuído a um autor específico, mas a partir das contribuições dos estudos de vários cientistas, físicos e engenheiros ao longo dos anos. Durante muito tempo, várias teorias e técnicas analíticas foram desenvolvidas para solucionar esses problemas matemáticos, porém a dificuldade para o processamento de equações algébricas dificultou o avanço dessas técnicas. Com a evolução da tecnologia, e por consequência da computação, se tornou possível elaborar e solucionar estes tipos de sistemas de equações complexas e desde então este desenvolvimento ocorreu de maneira exponencial (SANTOS, 2016; LOTTI et al., 2006).

Estas técnicas se davam pela resolução direta de sistemas de equações de derivadas parciais e para facilitar esta técnica, era comum recorrer a séries de Fourier. Porém, devido a sua complexidade, a aplicação destas técnicas era restrita, assim, frequentemente ocorriam substituições dessas derivadas por derivadas aproximadas. A aplicação desta técnica resultou no surgimento do método das diferenças finitas (MDF), que exigia a resolução de grandes sistemas de equações lineares, o que era um empecilho antes do surgimento dos computadores. Para solucionar esta adversidade, foram estabelecidos diversos métodos que pudessem substituir problemas reais por outros semelhantes em que fosse possível recorrer à literatura para sua solução, propondo assim, soluções teóricas de problemas simplificados como forma de validar métodos aproximados (AZEVEDO, 2003).

2.7.1 Considerações Iniciais

A ideia central do método dos elementos finitos é considerar que a região de solução do problema (contínuo) é formada por pequenos elementos interligados.

Desta forma a união de vários destes elementos permite a modelagem de determinada forma geométrica. Em um problema que envolva valores de contorno por exemplo, a solução é procurada na própria região de domínio do corpo, tendo em vista que os valores das suas derivadas são conhecidos (SÁNCHEZ, 2001).

De acordo com Huebner (1994), a resolução dos problemas pelo método dos elementos finitos (MEF) sempre seguem uma sequência específica. O primeiro passo é a discretização do material, que consiste em dividir o meio contínuo em vários elementos de geometrias iguais ou diferentes. Quanto maior for o número de elementos, e conseqüentemente menor o tamanho da malha, mais precisa tende a ser a resolução, porém há um aumento do tempo de processamento. A continuação do processo consiste em atribuir nós a cada um dos elementos e escolher as funções de interpolação que melhor represente o campo de variáveis, desta forma é possível determinar a matriz de equações que representam as propriedades individuais de cada elemento. A partir da combinação das matrizes que regem o comportamento de cada um dos elementos, é possível determinar a matriz de equações que representa todo o sistema. Dessa forma, ao introduzir-se as condições iniciais e de contorno para o problema, é possível obter-se as soluções para a matriz do sistema a partir da solução de cada elemento.

Antes de se realizar uma análise por elementos finitos, entretanto, é necessário sempre levar em consideração qual é o caso a ser estudado, para desta forma, definir alguns parâmetros relacionados à matriz de resolução do sistema, condições iniciais e de contorno, características do material e dos métodos de integração do sistema.

2.7.2 Análise Linear e Não Linear

Ao se realizar uma análise pelo MEF, é preciso entender qual será a tendência de resposta de determinada solução a partir de determinadas condições de contorno. Deste modo, o problema como um todo pode apresentar dois tipos de comportamento, linear ou não linear. A não linearidade de uma solução pode ocorrer devido a uma grande variedade de fenômenos, podendo ser divididas em três categorias: não linearidade geométrica, material e de contato (BATHE, 2014).

A não linearidade geométrica ou cinemática está presente quando as deformações são grandes o suficiente, que fazem com que as equações de equilíbrio sejam relacionadas a estrutura deformada, e está presente devido à grandes

deslocamentos, rotações e deformações. A não linearidade material ou constitutiva, por sua vez, estão presentes quando as propriedades dos materiais são funções dependentes da tensão e deformação do mesmo, e geralmente ocorrem devido ao caráter inelástico que caracteriza as deformações do material. Por fim, as não linearidades de contato ou de condições de contorno ocorrem devido às interações de contato ou atrito presentes ao longo das superfícies dos sólidos que atuam no processo (COOK et al., 2001; BATHE, 2014).

Portanto, é difícil acreditar que uma análise linear consiga promover aproximações satisfatórias para vários problemas práticos, quando comparados à realidade, tendo em vista a quantidade de variáveis que podem apresentar não linearidade, principalmente relacionada à deformação plástica de um material que é um dos maiores problemas mais (COOK et al., 2001).

2.7.3 Análise Estática e Dinâmica

De maneira geral a análise de aplicação de cargas pode ser dividida em duas. A análise estática considera que o carregamento é aplicado em um corpo de maneira tão lenta que, gerando movimentos de resposta significativamente lentos que em qualquer instante a resposta pode ser encontrada para uma análise estática. Deste modo, quando um **“carregamento é invariável ao longo do tempo, ou varia tão lentamente, que em cada instante é correto considerá-lo estático”**, a análise é estática (ALVES FILHO, 2005, grifo do autor).

Em contrapartida, quando os **“carregamentos variam rapidamente com o tempo, chamados de carregamentos dinâmicos”**, esta análise pode ser considerada dinâmica. Estes carregamentos tiram as estruturas de suas condições de equilíbrio estático, movimentando seus componentes e apresentando variações de velocidade consideráveis, submetendo o corpo a acelerações e por isso são considerados dinâmicos (ALVES FILHO, 2005, grifo do autor).

Para este tipo de análise, a formulação se deve pela equação do movimento em sua versão matricial, apresentada pela Equação 1.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{\dot{u}\} + [C]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

sendo $[M]$, $[K]$ e $[C]$ matrizes massa, amortecimento e rigidez respectivamente, e $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ e $\{F\}$ vetores aceleração, velocidade, deslocamento e forças aplicadas respectivamente (COOK et al., 2001; BATHE, 2014).

2.7.4 Método de Integração Explícito e Implícito

Existem diversos métodos de integração para a resolução da equação do movimento em sua versão matricial. Os métodos modais, por exemplo, tanto para acelerações como para deslocamentos modais, são interessantes quando existem apenas alguns modos de vibração em relação ao número total de modos do modelo. “Nos problemas de dinâmica estrutural, as excitações e a resposta são predominantemente constituídas de componentes de baixa frequência, e neste caso, os métodos de superposição tornam-se atrativos.” (ALVES FILHO, 2005).

Os métodos de integração direta, por sua vez, possuem grande aplicação em problemas que envolvem não linearidades, pois “nesses casos, os autovalores e autovetores se modificam com a história do carregamento e não é factível recalcular os modos e frequências naturais.” (ALVES FILHO, 2005).

O método de integração direta implícita, o sistema de equações representado pela equação do movimento matricial é integrado no próprio instante, a partir de um passo de tempo conhecido, ou seja, o deslocamento no instante é baseado na condição de equilíbrio do próprio instante. Deste modo, condição inicial do passo seguinte será a condição final do passo anterior, e assim, sucessivamente (ALVES FILHO, 2005).

O algoritmo implícito por sua vez, é incondicionalmente convergente, sendo estável independentemente do intervalo de tempo utilizado. É considerado também a solução natural e completa para o problema. Todavia, utiliza muitos recursos computacionais, e por isso, se torna muito lento, além de ser bastante sensível em relação à estabilidade elástica (SÁNCHEZ, 2001).

Já no caso do método de integração direta explícita, o sistema de equações representado pela equação do movimento matricial é integrado por um “procedimento numérico direto executado passo a passo”, ou seja, o deslocamento no instante é determinado a partir dos deslocamentos nos instantes anteriores, o que significa que o deslocamento para este instante é baseado na condição de equilíbrio dos instantes anteriores, e que não ocorrem transformações das equações antes que seja efetuada, de fato, a integração (ALVES FILHO, 2005).

De maneira geral, o algoritmo explícito é mais robusto e simples de programar, além de mais rápido, exigir menos memória, e ter melhor desempenho contra instabilidades quando comparado com o método implícito. Entretanto, é

condicionalmente convergente e para melhorar sua convergência são necessários passos de tempo extremamente pequenos (SÁNCHEZ, 2001).

2.7.5 Considerações Finais

Para o caso de estudo deste trabalho se referir a uma colisão entre dois corpos, é necessário que seja considerado o comportamento não linear do fenômeno em questão, pois estão envolvidos grandes deslocamentos, deformações não-infinitesimais e efeitos de contato, gerando não-linearidades geométricas, do material e de contato, e que pode tornar o problema em questão ainda mais complexo, exigindo o auxílio de algoritmos mais sofisticados e maior capacidade computacional (SÁNCHEZ, 2001).

Além disso, devido a física do problema e por se tratar de uma análise dinâmica, o método de integração explícito deve ser utilizado. Este método utiliza o desacoplamento das equações de equilíbrio e usa o incremento de tempo razoavelmente constante, tornando o tempo de solução menor se comparado ao método de integração implícito (ALVES FILHO, 2005).

Todavia, para uma resolução mais próxima do real, é indicado que a representação do material no *software* escolhido também seja realista, desta forma é recomendado realizar a caracterização do material a ser utilizado conforme o método de modelagem do material exige. Sendo assim, a próxima seção trata da caracterização do material e sua modelagem no *software* Ansys® 2019R2.

2.8 Modelagem numérica e caracterização do material

Como dito anteriormente, é de suma importância caracterizar o material que será analisado na simulação numérica, na tentativa de aproximá-la o máximo possível do real. Desta forma pretende-se realizar o levantamento das principais características e informações sobre propriedades físicas e mecânicas do mesmo, que serão utilizadas para selecionar o melhor método de modelagem no *software*.

Ao escolher o material, optou-se pela utilização da espuma de policloreto de vinila (PVC) *Divinycell*® H60, uma espuma polimérica de células fechadas comercializada pelo grupo Diab. O material possui densidade de 60 kg/m³ conforme apresentado pela tabela de dados técnicos fornecida pelo fabricante. Este material é considerado anisotrópico, e pode ser classificado como transversalmente isotrópico,

apresentando anisotropia apenas fora do plano transversal, comportamento este diretamente proporcional à microestrutura em cada plano. Chama atenção também o fato de o material não ser isotrópico linear, apresentando comportamentos distintos sob tensão e compressão (TITA; CALIRI JÚNIOR, 2012).

A representação do material do atenuador no *software* pode ser definido a partir da criação de um novo modelo de material, neste caso, utilizando dois modelos matemáticos do programa, em que o primeiro permite descrever o comportamento elástico do mesmo, enquanto o segundo busca representar a parte plástica do material. Além disso, é obrigatório indicar a densidade inicial do material para qualquer novo modelo proposto (ANSYS, 2019).

Um modelo matemático amplamente utilizado para representar o comportamento elástico de determinado material é o *Isotropic Elasticity*, que considera a parte elástica como linear, e é definido a partir da inserção dos valores de duas propriedades entre as seguintes: coeficiente de Poisson, módulo de Young, módulo volumétrico e/ou módulo de cisalhamento (ANSYS, 2019).

Já o comportamento plástico do material pode ser representado ao escolher um entre diversos métodos matemáticos disponíveis pelo *software* para uma análise dinâmica explícita. Um dos modelos disponíveis é o *Multilinear Isotropic Hardening*, que é utilizado para análises em que ocorrem grandes deformações, e não pode ser utilizado para cargas cíclicas ou altamente desproporcionais em pequenas deformações. Os parâmetros de entrada são indicados pela curva tensão real x deformação plástica real (ou logarítmica). Deste modo, o gráfico deve iniciar a partir do ponto de escoamento, ou seja, para uma deformação plástica nula, a tensão é equivalente ao valor da tensão de escoamento do material (ANSYS, 2019).

Assim, a partir de uma curva tensão de engenharia x deformação de engenharia é possível, por meio de transformações matemáticas, obter os valores que devem ser inseridos no *software*. Deve-se primeiramente transformar as tensões e deformações de engenharia em tensões e deformações reais, utilizando as Equações (3) e (4) e na sequência determinar o ponto de escoamento, para separar o gráfico entre a parte elástica e plástica. Deste modo, é possível obter as tensões e deformações reais plásticas, utilizando as Equações (5) e (6).

$$\sigma_{real} = \sigma_{eng}(\varepsilon_{eng} + 1) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln(\varepsilon_{eng} + 1) \quad (4)$$

$$\sigma_{plast} = \sigma_{real} (p/\sigma_{real} > \sigma_{esc}) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{plast} = \varepsilon_{real} - \varepsilon_{esc} (p/\varepsilon_{real} > \varepsilon_{esc}) \quad (6)$$

sendo σ_{real} , σ_{eng} , σ_{plast} e σ_{esc} , respectivamente, as tensões real, de engenharia, real plástica e de escoamento, e ε_{real} , ε_{eng} , ε_{plast} e ε_{esc} , respectivamente, as deformações real, de engenharia, real plástica e de escoamento (CALLISTER JR, 2008; ANSYS, 2019).

Entretanto, durante a plotagem tabela, é possível inserir apenas 10 pares, contendo os valores da curva tensão real x deformação plástica real (ou logarítmica), além de não ser possível conter um par de dados com valores de tensão ou deformação inferiores ao par anterior, portanto, a curva deve apresentar um comportamento sempre crescente. Dessa forma, o modelo apresenta fatores limitantes, que podem influenciar o valor final da simulação (ANSYS, 2019).

Para realizar a caracterização real dos materiais, é recomendado seguir normas que foram desenvolvidas, com a intenção de padronizar este tipo de experimento. Para o caso da espuma de PVC *Divinycell*® H60, a própria fabricante utiliza a norma ASTM D1621. Esta norma descreve um procedimento para determinar as propriedades compressivas de materiais celulares rígidos, particularmente plásticos expandidos. Este método de teste fornece informações sobre o comportamento de materiais celulares sob cargas compressivas. Os dados de deformação podem ser obtidos a partir de uma curva de força x deslocamento, sendo possível calcular a tensão de compressão para qualquer carga e também calcular o módulo de elasticidade seguindo a Equação (7).

$$E = \frac{W \times H}{A \times D} \quad (7)$$

sendo, E o módulo de elasticidade sob compressão, W a carga instantânea aplicada, H a altura inicial do corpo de prova, A, a área da seção transversal e D a deformação (ASTM, 2016).

Portanto, dado a falta de valores para os dados de entrada, comprova-se a necessidade da caracterização experimental desses parâmetros por meio da realização de ensaios mecânicos, que será comentado na seção seguinte.

2.9 Ensaio de compressão

Os ensaios mecânicos são métodos utilizados com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas de certo material, para desta forma, permitir uma previsão do comportamento do mesmo sobre alguma condição específica. Para o caso de aplicação dos atenuadores de impacto, os ensaios mais recomendados são os ensaios de compressão e de queda livre. Neste trabalho foi apenas abordado o ensaio de compressão, portanto, não foi comentado a respeito do ensaio de queda livre.

O ensaio de compressão consiste na aplicação de um esforço axial, distribuído uniformemente sobre a superfície de um corpo de prova, e que tende a provocar um encurtamento do corpo submetido a este esforço. Este ensaio pode ser realizado utilizando a máquina universal de ensaios, seguindo normas específicas para o problema em questão. Durante o ensaio, o equipamento gera simultaneamente uma curva força x deslocamento, que pode posteriormente ser convertido para um gráfico tensão x deformação, em que a tensão e deformação e módulo de elasticidade são calculados a partir das Equações (8), (9) e (10) respectivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_f}{L_i} \quad (9)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (10)$$

sendo σ a tensão de compressão, F a carga aplicada, A a área transversal inicial do corpo de prova, ε a deformação sob compressão, e L_i e L_f os comprimentos inicial e final (ou instantâneo) e E é o módulo de elasticidade sob compressão. Uma maneira alternativa de se obter o valor para o módulo de elasticidade pode ser pela equação geral da reta, tendo em vista que o mesmo é numericamente equivalente ao coeficiente angular da função linear que representa o comportamento elástico do material (CALLISTER JR, 2008).

No caso do ensaio para espumas, a norma exige uma máquina que seja capaz de realizar compressão a uma taxa constante, indicadores de carga e deformação, um instrumento que seja capaz de medir dimensões, e que seja realizado em ambiente com temperatura e umidade controladas. Os corpos de prova podem ser quadrados ou circulares, com área mínima de 25,8 cm² (4 pol.²) e máxima de 232 cm² (36 pol.²), e a altura mínima deve ser maior que 25,4 mm (1 pol.) e a máxima não pode

ser maior do que a largura ou o diâmetro do corpo de prova. Além disso, um mínimo de 5 corpos de prova deve ser ensaiado (ASTM, 2016).

O ensaio de compressão pode, além de ser utilizado para a caracterização do material para a análise numérica, ser uma alternativa válida, de acordo com a SAE para o ensaio do atenuador de impacto como um todo. Assim, a partir dos dados gerados pela máquina universal de ensaios, é possível determinar por meio de cálculos a energia absorvida, o pico de desaceleração e desaceleração média. A formulação básica para estas variáveis é apresentada na próxima seção.

2.10 Energia absorvida, pico de desaceleração e desaceleração média

Tendo em vista que o ensaio de compressão é um método válido pela SAE para analisar o comportamento do atenuador de impacto, a partir dos resultados obtidos, de força e deslocamento, é possível determinar por meio de cálculos, algumas informações importantes para o estudo de atenuador de impacto.

De acordo com a literatura, a energia total absorvida corresponde a área abaixo da curva força x deslocamento e pode ser obtida ao se integrar a função que representa a força em função do deslocamento, conforme a Equação (11). Além disso, pode-se obter a força média aplicada ao se dividir a equação para o cálculo da energia total absorvida, pelo deslocamento, conforme mostrado na Equação (12).

$$E_a = \int_0^d F(x) dx \quad (11)$$

$$F_{méd}(x) = \frac{1}{d} \int_0^d F(x) dx \quad (12)$$

sendo E_a a energia absorvida, d o máximo deslocamento durante o ensaio de compressão, $F(x)$ a função que representa o comportamento da força exercida em relação ao deslocamento, e $F_{méd}(x)$ a força média em relação ao máximo deslocamento (HOU, 2013).

Entretanto, determinar com exatidão uma função que represente o comportamento da curva força x deslocamento pode ser uma tarefa complicada. Desta forma, uma alternativa para calcular a área abaixo da curva é a Regra dos Trapézios Composta. Assim, pode-se dividir a função em intervalos menores, aproximando cada subintervalo para uma função linear conforme a Equação (13). Analogamente, a força média pode ser determinada pela média simples entre cada um dos valores de força obtido, de acordo com a Equação (14).

$$E_a = \int_{x_0}^{x_n} F(x) dx = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} [F(x_i) + F(x_{i-1})] [x_i - x_{i-1}] \quad (13)$$

$$F_{méd}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n F(x_i) \quad (14)$$

sendo E_a a energia absorvida, d o máximo deslocamento durante o ensaio de compressão, $F(x)$ a função que representa o comportamento da força exercida em relação ao deslocamento, e $F_{méd}(x)$ é a força média obtida durante o ensaio (RUGGIERO; LOPES, 2000).

A partir das condições iniciais solicitadas pelo regulamento, mais especificamente a massa que deve ser desacelerada, e após a obtenção do pico de força apresentado pelo ensaio e pela força média aplicada que foi calculada, é possível calcular, a partir da Segunda Lei de Newton, e respectivamente pelas Equações (15) e (16), o pico de desaceleração e desaceleração média.

$$a_{máx} = \frac{F_{máx}(x)}{m \times g} \quad (15)$$

$$a_{méd} = \frac{F_{méd}(x)}{m \times g} \quad (16)$$

sendo $a_{máx}$ e $a_{méd}$ os valores da desaceleração máximo e médio, respectivamente, $F_{máx}(x)$ e $F_{méd}(x)$ os valores das forças máxima e média aplicadas, respectivamente, m a massa, e g a aceleração da gravidade.

Desta maneira, pode-se demonstrar, por meio dessas formulações, o desempenho do atenuador de impacto para o caso em questão.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será exposta a metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho. Inicialmente apresentou-se o método para seleção do modelo de atenuador de impacto. Na sequência mostrou-se como desenvolveu-se o ensaio para caracterização do material e sua implementação no *software* Ansys® 2019R2. Posteriormente, identificou-se a forma com que ocorreu a modelagem do dispositivo e a preparação para a simulação dinâmica. E, por fim, apresentou-se algumas informações sobre a construção e a forma de ensaio que foi escolhida para avaliar o dispositivo.

3.1 Seleção do modelo de atenuador de impacto

Realizada a revisão de literatura necessária para dar início ao projeto do atenuador de impacto, pode-se afirmar que este trabalho será conduzido seguindo as diretrizes do regulamento da competição do ano de 2022, versão 2.0, que apresenta uma série de exigências e recomendações da SAE. Assim, foi possível verificar quais são os requisitos exigidos para a construção do dispositivo e quais são as metas que devem ser alcançadas neste trabalho, para posteriormente serem consideradas no relatório do atenuador de impacto, o *Impact Attenuator Data Report (IAD)*. Um resumo dos requisitos do atenuador de impacto é mostrado no Quadro 1.

Quadro 2 – Resumo dos requisitos para o atenuador de impacto

Parâmetros	Especificações
Requisitos Funcionais do Conjunto	Massa de Impacto: 300 kg Velocidade de Impacto: 7 m/s Energia Mínima Absorvida: 7350 J Pico Máximo de Desaceleração: 40 g (400 m/s ²) Média Máxima de Desaceleração 20 g (200 m/s ²) Deformação Máxima da Placa Anti-Intrusão: 25 mm
Dimensões Mínimas do Atenuador	Altura: 100 mm (perpendicular ao solo) Largura: 200 mm (paralelo ao solo) Comprimento: 200 mm (paralelo ao solo)
Espessura Placa Anti-Intrusão	Chapa Aço: 1,5 mm Chapa Alumínio: 4 mm
Dimensões Mínimas do Quadro Frontal	Diâmetro Externo do Tubo: 25 mm Espessura da Parede do Tubo: 1,2 mm

Fonte: Autoria própria (2021)

Para dar continuidade a este projeto, tendo em vista que muitos trabalhos já haviam sido realizados sobre o tema atenuador de impacto, observou-se que as geometrias mais comuns eram as que possuíam formato retangular e tronco de pirâmide, e isso se deve principalmente pelo fato de proporcionar uma construção relativamente simples. Os materiais frequentemente utilizados foram espumas poliméricas, chapas metálicas e estruturas *honeycomb* de alumínio, por proporcionarem grande absorção de energia e baixa densidade. As simulações pelo método dos elementos finitos (MEF) foram realizadas com auxílio de *softwares* diferentes, e coube a cada autor escolher aquele que mais lhe seria conveniente. Por fim, as escolhas dos ensaios realizados foram justificadas pelo tipo de problema apresentado, e são influenciados principalmente pela viabilidade de realizar o teste.

Desta forma, buscou-se realizar uma análise preliminar referente a 4 possíveis soluções para construção, levando em consideração fatores como densidade, custo de aquisição, disponibilidade de obtenção do material e facilidade de fabricação do modelo final. A primeira opção consistia em construir o dispositivo a partir de chapas de alumínio dobradas formando uma geometria de tronco de pirâmide com dimensões que atendessem o mínimo exigido. Para o segundo modelo seria considerado a geometria da versão anterior, porém com a substituição do material para aço. A terceira opção foi a construção do modelo a partir de espuma polimérica em um formato de pirâmide mesoamericana, com placas de mesma espessura e diferentes dimensões sobrepostas e unidas por um adesivo de alta resistência mecânica, à base de epóxi. Por fim, a última hipótese a ser analisada foi a de construir o dispositivo a partir de *honeycomb* de alumínio, com geometria retangular simples, atendendo as medidas mínimas exigidas pela entidade.

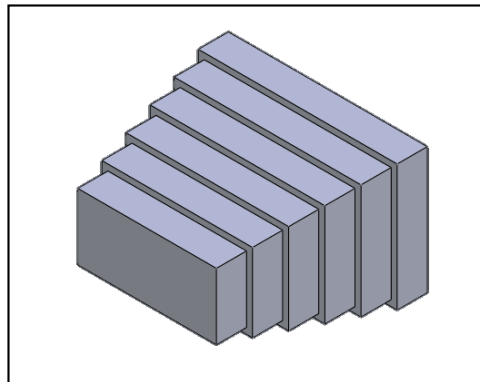
Para comparar as diferentes opções, a Tabela 1 foi desenvolvida. Cada fator foi pontuado considerando notas de 1 a 5, onde a avaliação 1 é considerada muito ruim e a avaliação 5 como muito bom. Foram adotados pesos diferentes para cada um dos fatores a serem analisados nos modelos propostos, especificados na própria Tabela 1.

Tabela 1 – Critério de avaliação para seleção de material e geometria do atenuador de impacto

Material Proposto	Fatores Analisados				Pontuação Final
	Massa (Peso 5)	Custo (Peso 6)	Disponibilidade (Peso 5)	Fabricação (Peso 4)	
Chapa de Alumínio	4	3	5	3	75
Chapa de Aço	1	4	5	5	74
Espuma de PVC	5	4	4	4	85
Honeycomb de Alumínio	5	1	1	3	48

Fonte: Autoria própria (2021)

Deste modo, pelos valores totais apresentados na Tabela 1, percebe-se que a opção com melhor pontuação final foi para o dispositivo utilizando placas de espuma polimérica (espuma de PVC), unidas com adesivo epóxi e com geometria em formato de pirâmide mesoamericana. O material utilizado foi a espuma de policloreto de vinila (PVC) *Divinycell*® H60. Este material foi escolhido, entre outras espumas, pela facilidade de obtenção, tendo em vista que existem comerciantes no mercado nacional, e pela existência de diversos estudos feitos com este material, e a Figura 7 representa o modelo final escolhido.

Figura 7 – Novo modelo proposto para atenuador de impacto

Fonte: Autoria própria (2020)

Feita a seleção da geometria e material que seriam utilizados, foi possível dar continuidade a este trabalho, e realizar a caracterização do material e modelagem no programa de simulação.

3.2 Caracterização e modelagem do material

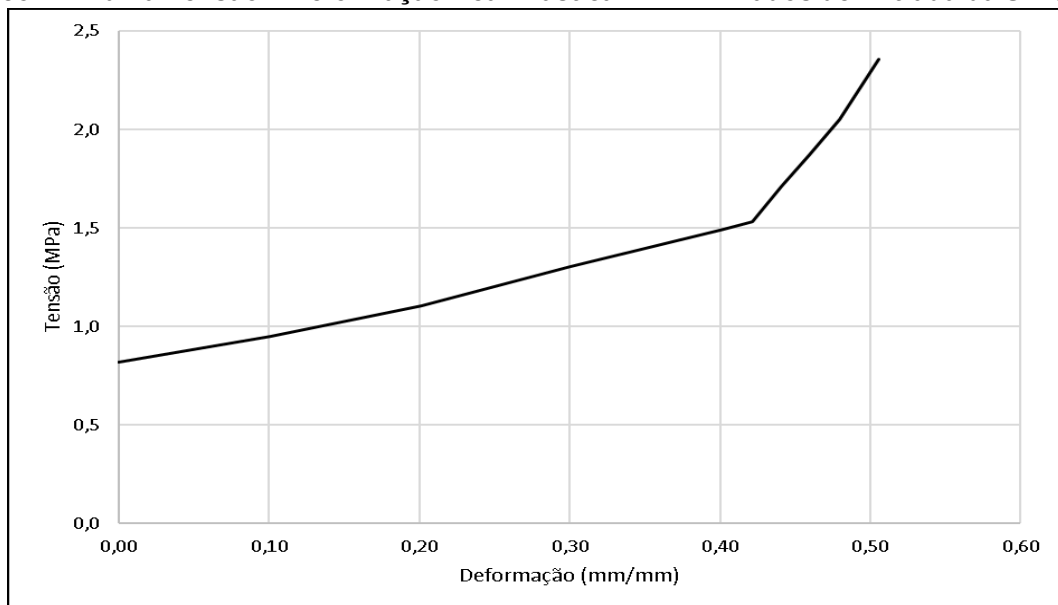
A caracterização do material foi realizada através de um ensaio de compressão. Para representar a região elástica do material, como citado anteriormente, foram selecionadas as propriedades de densidade, módulo de

elasticidade e coeficiente de Poisson. Já para a região plástica, os parâmetros de entrada são os valores da curva tensão real x deformação real.

Assim como utilizado pela fabricante, o ensaio de compressão seguiu a norma ASTM D1621. Foi utilizada a máquina universal de ensaios do laboratório de ensaios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa, sendo definido que os corpos de prova seriam quadrados, com largura de 55 mm, já que a altura da chapa seria de 40 mm. Todavia, os cortes foram realizados utilizando uma serra manual, gerando desvios de até 3 mm da medida pretendida. As dimensões de todos os corpos de prova foram medidas, tendo em vista que seriam utilizadas para cálculos futuros.

O ensaio de compressão dos corpos de prova foi realizado seguindo os parâmetros indicados pela norma, para um total de 7 amostras, contudo, o ensaio foi realizado até o momento em que os corpos de prova atingissem 75% de compressão em relação a altura inicial, tendo em vista que em caso de colisão, o material pode ser submetido a grandes deformações. Com a obtenção dos resultados, uma das amostras foi escolhida, Corpo de Prova 4 (CDP 4), conforme o Gráfico 1, para representar as propriedades do material na simulação do atenuador.

Gráfico 1 – Curva Tensão x Deformação Real Plástica CDP 4 – Dados de Entrada da Simulação



Fonte: Autoria própria (2020)

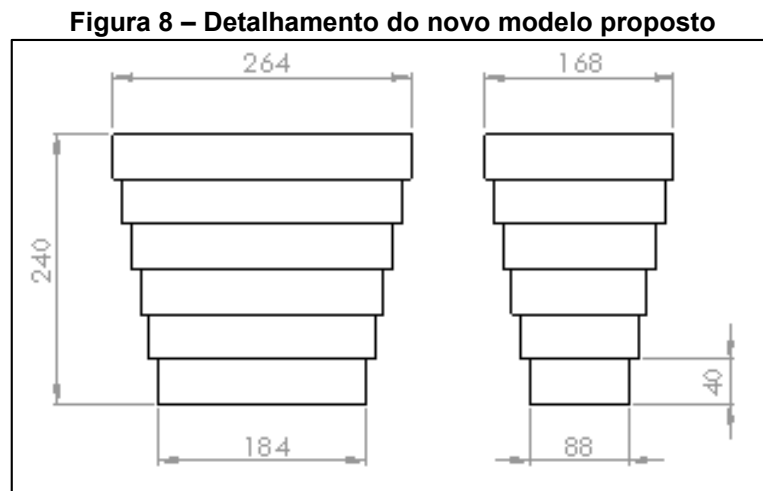
Para a simulação no *software*, a espuma foi desenvolvida conforme os modelos de material *Isotropic Elasticity* e *Multilinear Isotropic Hardening*, utilizando

como parâmetros fixos de entrada a densidade de 60 kg/m^3 , módulo de elasticidade de $35,7 \text{ MPa}$ e coeficiente de Poisson elástico de $0,4$.

3.3 Modelagem e simulação do atenuador de impacto

Após a definição do material e da geometria que foram utilizados no modelo, decidiu-se que este trabalho teria a proposta de avaliar o dispositivo numericamente, por meio de uma análise pelo método dos elementos finitos, com auxílio do *software* Ansys® 2019R2, e posteriormente submetido ao ensaio de compressão quase estático, para verificar o desempenho do mesmo.

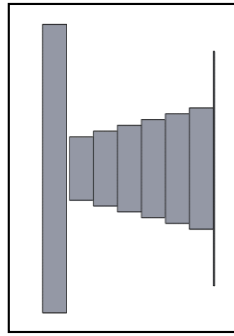
Antes de se realizar a análise numérica, foi necessário projetar o modelo utilizando-se ferramentas de desenho em computador. O *software* escolhido para esta tarefa foi o SolidWorks® 2017. Assim, de acordo com a ideia da proposta, o atenuador teve sua geometria formada por retângulos extrudados com espessura de 40 mm , cujas dimensões de largura e comprimento eram diminuídas em 16 mm a cada nova placa, utilizando um total de seis, conforme a Figura 8.



Fonte: Autoria própria (2020)

Na sequência, foi necessário implementar a montagem que represente a colisão do atenuador de impacto com uma parede rígida. Para isso, foram desenhados um bloco e uma chapa retangulares, representando respectivamente, a parede rígida de colisão e a chapa anti-intrusão, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Representação do problema no SolidWorks®

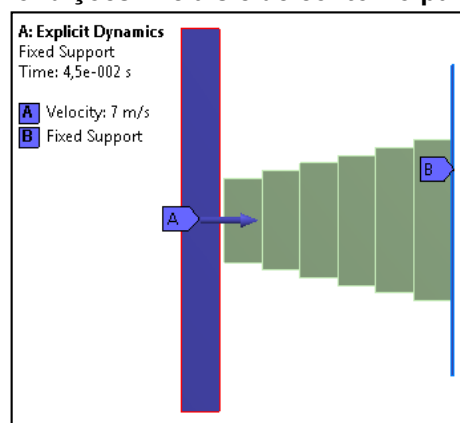


Fonte: Autoria própria (2020)

Após o desenvolvimento das geometrias em CAD (*Computer Aided Design*), desenvolveu-se a simulação computacional pelo Método dos Elementos Finitos utilizando o *software* Ansys® 2019R2. As condições iniciais e de contorno do problema foram inseridas conforme o regulamento. O caso em questão foi desenvolvido utilizando o módulo de dinâmica explícita, tendo em vista que esta colisão foi classificada como dinâmica não linear, pois envolvia grandes deformações em um curto período de tempo, e neste caso o método de integração explícito é recomendado.

Assim, a placa foi definida como fixa e a parede com massa de 300 kg e velocidade inicial de 7 m/s, de modo que ocorresse a colisão frontal com o atenuador. Como o objetivo deste estudo é analisar comportamento do atenuador de impacto pelo método dos elementos finitos (MEF), tanto a parede como a placa anti-intrusão foram definidas como rígidas. A malha utilizada foi do modelo *Hex Dominant*, com tamanho de 8 mm para cada um dos corpos presentes na simulação. As condições iniciais e de contorno são apresentadas pela Figura 10.

Figura 10 – Condições iniciais e de contorno para a simulação



Fonte: Autoria própria (2020)

Após a implementação em CAE (*Computer Aided Engineering*), foi dado continuidade ao projeto e à obtenção dos resultados da simulação, verificado o comportamento dos resultados em relação ao exigido.

3.4 Construção e ensaio do atenuador de impacto

Posteriormente, iniciou-se a construção do dispositivo para ensaios. Seguindo o regulamento da competição, para o ensaio, é necessário que o atenuador esteja acoplado à chapa anti-intrusão, e esta, a uma representação da estrutura. Portanto, foi desenvolvida uma representação do quadro frontal do veículo para o ano de 2022, e que se encontra detalhado no Anexo A. Na sequência foi construído a proposta do novo modelo de atenuador, utilizando a espuma *Divinycell*® H60, em detalhamento no Anexo B, com as chapas de espuma polimérica unidas entre si, e acopladas à placa anti-intrusão por meio do sistema de adesivo *Epoxy AH345/AR345*. O conjunto final pode ser observado pela Figura 11.

Figura 11 – Conjunto antes do ensaio de compressão



Fonte: Autoria própria (2020)

O ensaio do atenuador também foi realizado no laboratório de ensaios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa, e respeitando as exigências do regulamento. Neste caso, o conjunto foi submetido uma carga de compressão, a uma taxa de deformação de 0,25 mm/min, até que a placa anti-intrusão deformasse 25 mm, correspondente ao máximo permitido pelo regulamento.

Após a realização do ensaio e obtenção dos resultados, foi possível calcular a energia total absorvida, pela regra dos trapézios, o pico de desaceleração e a desaceleração média, utilizando as Equações (12) a (15).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento da metodologia que foi aplicada. Primeiramente foi exposto dados referentes à medição e ensaio dos corpos de prova. Em seguida, foram explicadas as justificativas para a consideração de um dos corpos de prova como a escolha para representar o material durante a simulação e os dados de entrada utilizados. Na sequência, foram exibidos e comentados os resultados obtidos pela simulação dinâmica do atenuador. Por fim, foram apresentados e discutidos os resultados do ensaio de compressão quase-estático e os cálculos derivados dos resultados obtidos.

4.1 Construção e ensaio dos corpos de prova

Como preparação para o ensaio de compressão para caracterização do material, os corpos de prova foram cortados, utilizando serra manual, posteriormente sendo identificados e medidos. Os valores da média de medições para as faces do quadrado e o cálculo da área da seção quadrada são apresentados na Tabela 3. Vale ressaltar que a altura foi a mesma para todos os corpos de prova (CDP), com o valor de 40 mm, equivalente à espessura da chapa de espuma de PVC adquirida.

Tabela 2 – Dimensões iniciais dos corpos de prova

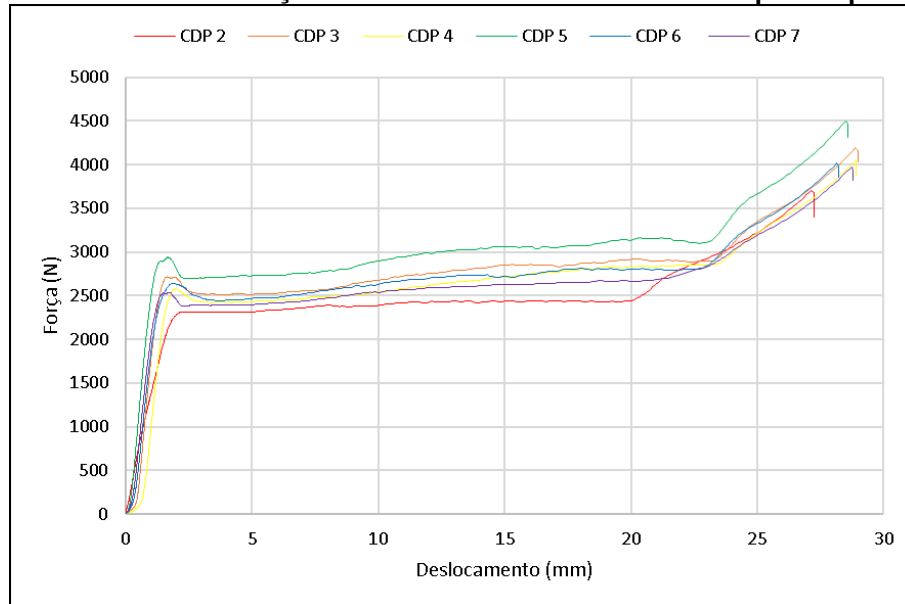
Corpo de Prova	Média de Medições		Área [mm ²]
	Largura [mm]	Comprimento [mm]	
CDP 1	53,5	53,8	2881,0
CDP 2	53,6	53,8	2882,3
CDP 3	55,4	54,2	3000,0
CDP 4	54,4	54,4	2959,4
CDP 5	55,1	55,8	3069,0
CDP 6	55,9	52,7	2945,9
CDP 7	53,5	54,2	2894,3

Fonte: Autoria própria (2021)

Na sequência os corpos de prova foram ensaiados e os resultados para a curva força x deslocamento são apresentados no Gráfico 2. Os resultados do Corpo de Prova 1 (CDP 1) foram descartados devido ao fato de a compressão acontecer fora do eixo central da peça, resultado da má centralização da placa com a face superior do CDP 1. A partir dos resultados obtidos pelo ensaio, o CDP 4 foi selecionado para representar o material durante a implementação no *software*, pois, de maneira geral, apresentou os valores mais próximos à média, quando comparado com os CDP 2 a 6, referente aos resultados de força média, deformação máxima e módulo de

elasticidade, além de a própria curva apresentar comportamento mediano em relação aos demais CDP.

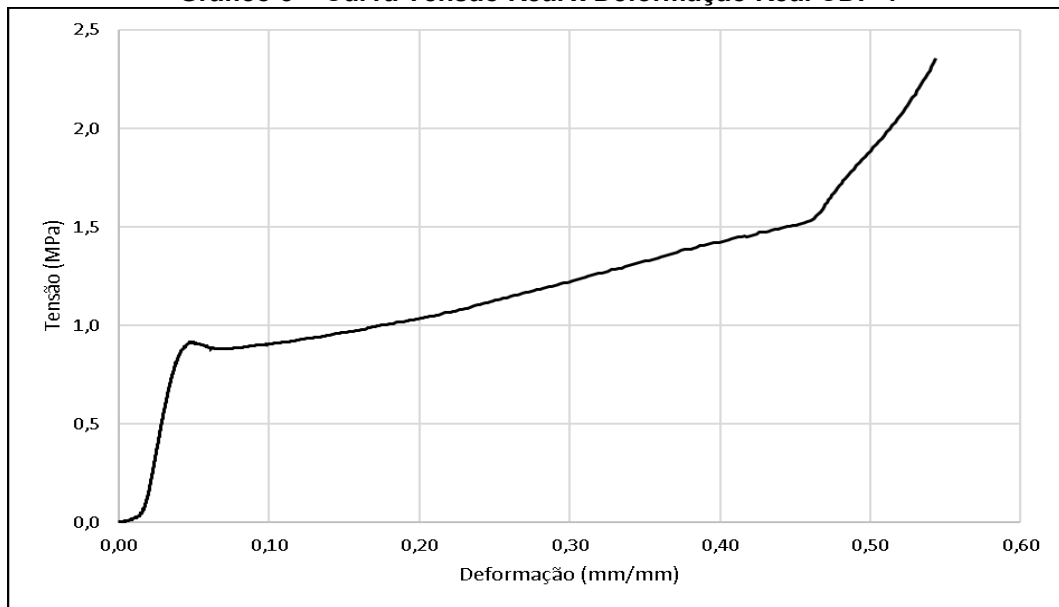
Gráfico 2 – Curva Força x Deslocamento do ensaio dos corpos de prova



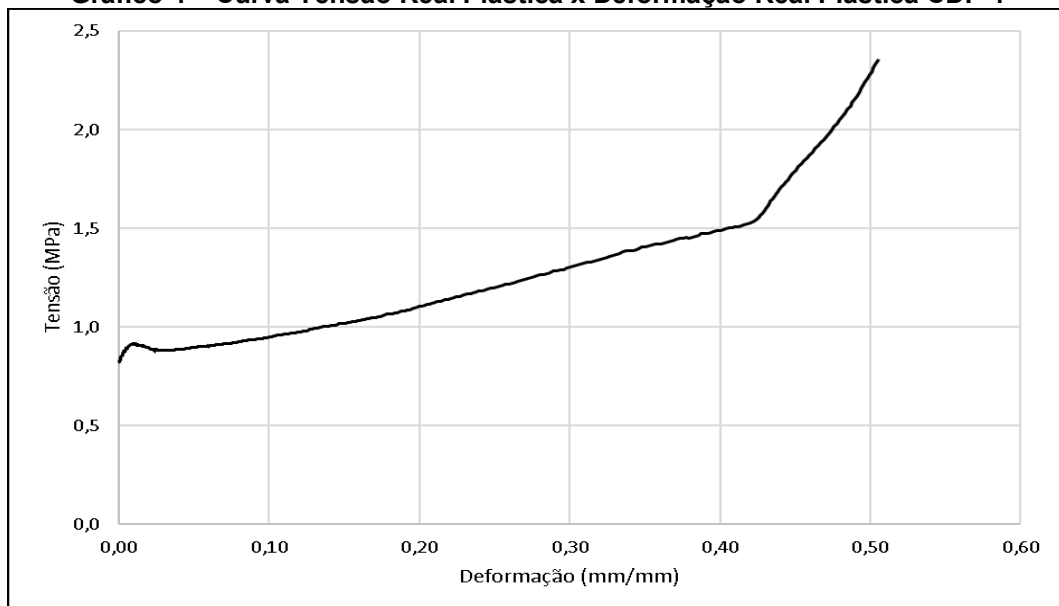
Fonte: Autoria própria (2021)

O módulo de elasticidade sob compressão foi obtido a partir do coeficiente angular da reta formada entre os pontos de deformação entre 0,025 mm e 0,035 mm, do CDP 4, resultando em um valor de 35,7 MPa. Juntamente com os valores da densidade e coeficiente de Poisson, obtidos do catálogo de informações técnicas do fornecedor, esses dados representam a região elástica do modelo de material.

Para representar a parte plástica do modelo de material no *software*, a curva força x deslocamento, do CDP 4 foi transformada em curva tensão real x deformação real, mostrada pelo Gráfico 3. Por fim, foi ajustada para tensão real plástica x deformação real plástica, desconsiderando a região elástica, conforme o Gráfico 4, e que foi utilizado como dado de entrada para simular o atenuador.

Gráfico 3 – Curva Tensão Real x Deformação Real CDP 4

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 4 – Curva Tensão Real Plástica x Deformação Real Plástica CDP 4

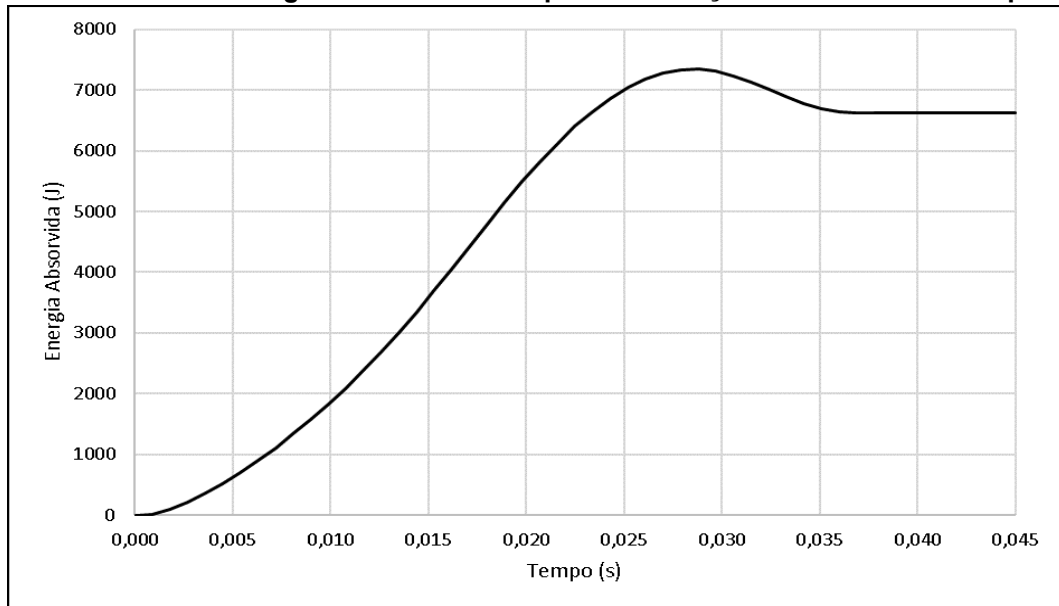
Fonte: Autoria própria (2021)

Após a obtenção destes resultados apresentados anteriormente, dez pares de dados deste conjunto foram seccionados e inseridos no programa, conforme mostra o Gráfico 1, sendo assim possível dar continuidade a este trabalho, a partir da implementação de todos os dados necessários para modelar o material proposto, e assim, realizar a simulação.

4.2 Simulação do atenuador de impacto

Realizados o ensaio dos corpos de prova e a modelagem do material no programa, foi possível iniciar a análise dinâmica explícita do atenuador de impacto, utilizando como dados de entrada os resultados obtidos pelo ensaio do CDP 4, foi possível obter valores numéricos para a colisão entre um corpo, com massa de 300 kg, e o atenuador de impacto, a uma velocidade de 7 m/s. Os resultados obtidos são apresentados pelos Gráficos (5), (6) e (7).

Gráfico 5 – Curva Energia Absorvida x Tempo da simulação do atenuador de impacto

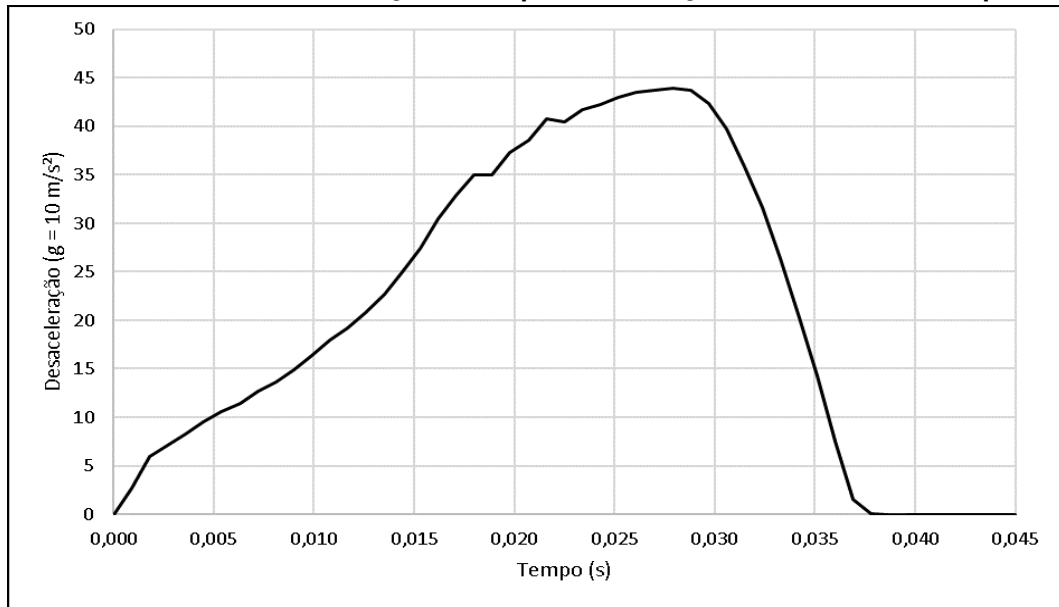


Fonte: Autoria própria (2021)

Pelo Gráfico 5, percebe-se que o atenuador absorve praticamente toda a energia cinética inicial do sistema, obtendo um total de 7343,6 J, equivalente a 99,92 % do exigido de 7350 J. Tendo em vista que esta simulação buscou analisar apenas o atenuador, espera-se que durante o ensaio prático, o conjunto seja capaz de absorver uma quantidade de energia superior, já que a deformação da chapa anti-intrusão e da representação estrutural auxiliam na absorção da energia.

O Gráfico 6 mostra como se comporta a desaceleração da massa de 300 kg pelo dispositivo. Com os valores sendo aplicados ao longo do tempo, foi possível perceber que o pico de desaceleração e desaceleração média foram respectivamente de 43,9 g e 24,6 g, em que “g” equivale a 10 m/s^2 . Tendo em vista que por regulamento o máximo permitido é de, respectivamente, 40 g e 20 g, o percentual de erro é de 9,75 % para o pico e 18 % de média.

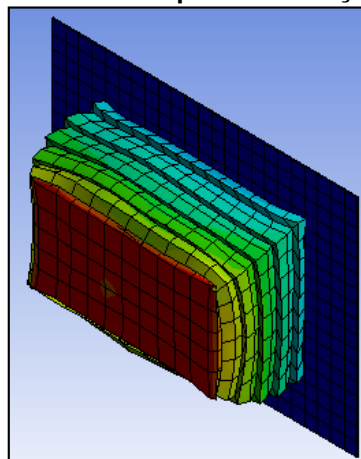
Gráfico 6 – Curva Desaceleração x Tempo da simulação do atenuador de impacto



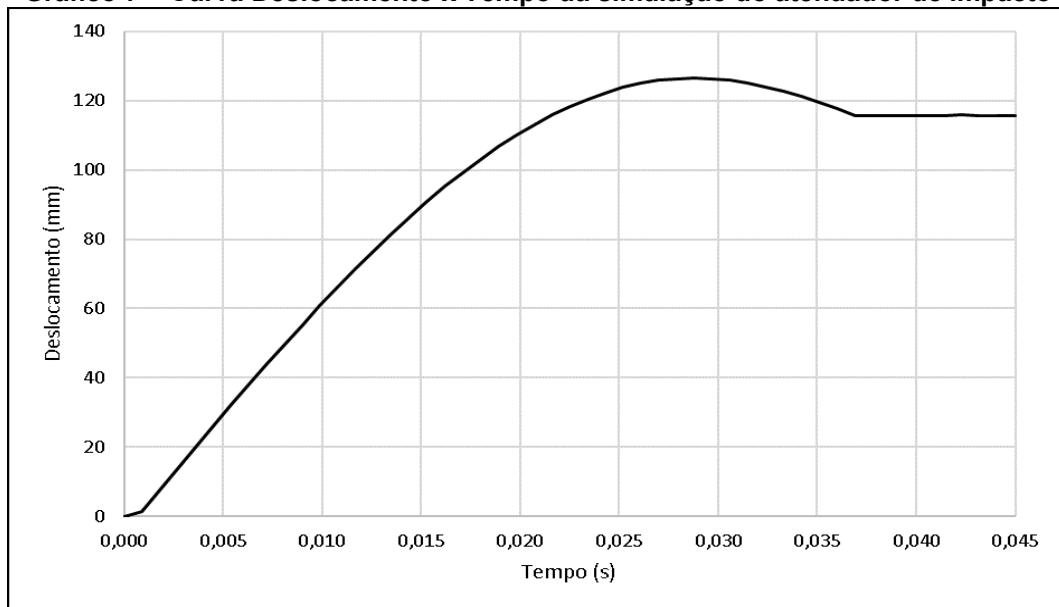
Fonte: Aatoria própria (2021)

O Gráfico 7 por sua vez mostra como ocorre a o deslocamento da face frontal do dispositivo durante a colisão. Não existe valores máximos ou mínimos para este parâmetro. Percebe-se que para o caso em questão, o deslocamento máximo do atenuador foi de 126,6 mm, o que representa 52,75 % do seu comprimento inicial de 240 mm. Entretanto, a mesma possui grande importância para o projeto, tendo em vista que o dispositivo tem a função de impedir que quaisquer corpos colidam diretamente contra a estrutura do veículo, e também que nada penetre o *cockpit*. A Figura 12 mostra o estado do atenuador ao final da simulação.

Figura 12 – Atenuador após a simulação dinâmica



Fonte: Aatoria própria (2020)

Gráfico 7 – Curva Deslocamento x Tempo da simulação do atenuador de impacto

Fonte: Autoria própria (2021)

Com os resultados obtidos, foi possível verificar que, de maneira geral o protótipo virtual apresentou valores próximos do exigido pelo regulamento. Entretanto, não é possível determinar esses valores como uma solução exata do problema, tendo em vista que o MEF possui erros associados durante a resolução matemática do problema e que explica algumas diferenças encontradas, como por exemplo a perda de energia devido à deformação de cada um dos elementos finitos.

Além disso, a simulação considerou apenas o atenuador como deformável. Desta forma, caso fossem considerados nesta análise a placa anti-intrusão e a representação estrutural, ambas definidas como flexíveis e utilizando materiais metálicos em sua composição, espera-se que os valores se tornem cada vez mais próximos do necessário. Porém, com o acréscimo desses novos itens, espera-se também que o tempo de resolução seja aumentado.

4.3 Ensaio do atenuador de impacto

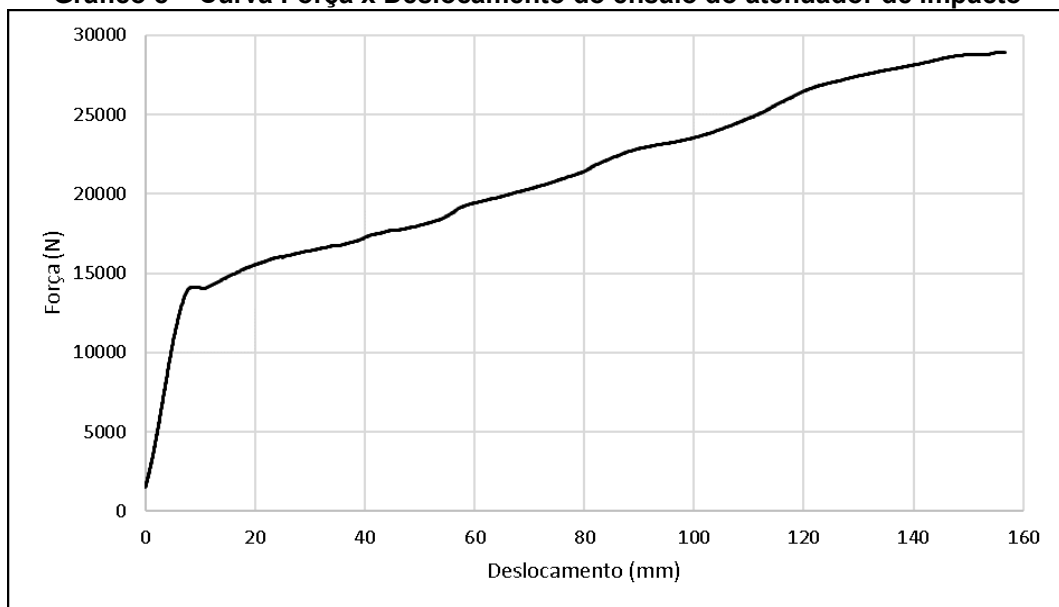
Após a realização do ensaio do atenuador de impacto, o conjunto pode ser observado pela Figura 13. Com os resultados do ensaio, foi obtida a curva força x deslocamento, apresentada pelo Gráfico 8.

Figura 13 – Conjunto após o ensaio de compressão



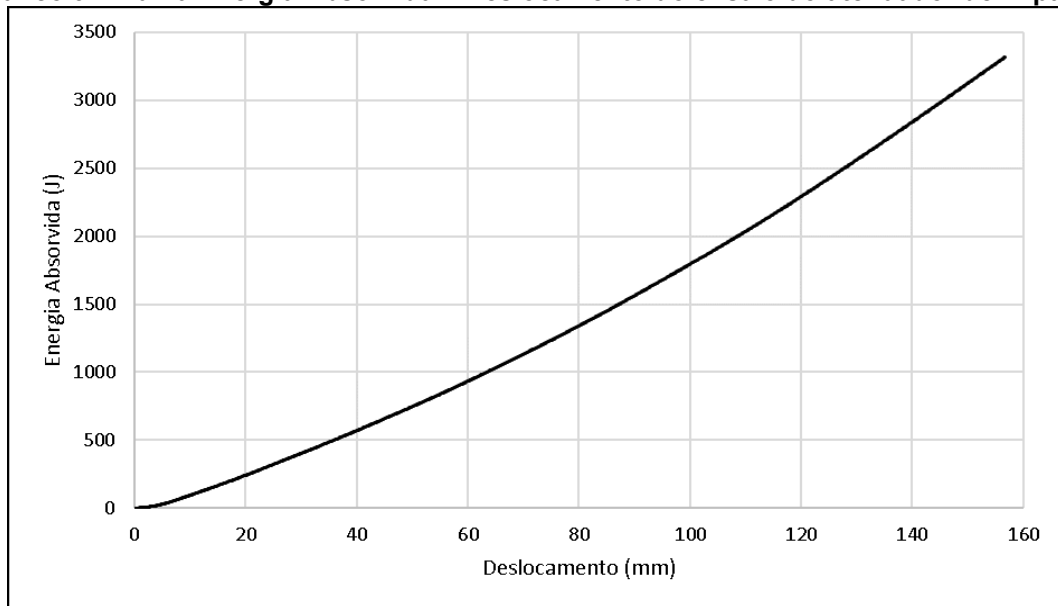
Fonte: Autoria própria (2020)

Gráfico 8 – Curva Força x Deslocamento do ensaio do atenuador de impacto



Fonte: Autoria própria (2021)

Em sequência, foi utilizada a regra dos trapézios para calcular, de maneira aproximada e por meio da Equação (13), o comportamento da energia total absorvida, entre o limite de 0 a 156,75 mm, que representa o máximo valor obtido pelo deslocamento da face frontal do atenuador, momento em que a placa anti-intrusão atingiu uma deflexão de 25 mm. Deste modo, foi possível plotar a curva energia absorvida x deslocamento, apresentada pelo Gráfico 9, e verificar que a energia total absorvida foi de 3319 J, abaixo dos 7350 J requeridos pelo regulamento.

Gráfico 9 – Curva Energia Absorvida x Deslocamento do ensaio do atenuador de impacto

Fonte: A autoria própria (2021)

De acordo com os valores obtidos pelo ensaio de compressão, que pode ser utilizado para verificar o comportamento do atenuador de impacto, observou-se que as forças máxima e média exercidas sobre o conjunto do atenuador de impacto, foram respectivamente de 28,9 kN e 17,3 kN. Com esses valores, e utilizando as Equações (14) e (15), conforme é necessário apresentar no *Impact Attenuator Data Report (IAD)*, obtém-se como desaceleração máxima 9,65 g e desaceleração média de 5,77 g.

Entretanto, como as forças aplicadas ao atenuador de impacto foram baixas em relação ao máximo teórico de 120 kN, esses resultados indicam os valores máximos que o novo modelo poderia ser submetido. Entre os fatores responsáveis pelos baixos valores obtidos pelo ensaio, e conseqüentemente, a não conformidade do atenuador segundo o exigido por regulamento, entende-se que uma justificativa plausível é a baixa capacidade da representação estrutural em resistir às cargas aplicada, devido principalmente à pouca espessura de parede do tubo e talvez, seu formato geométrico, podendo suportar cargas maiores, caso a mesma fosse maior, e neste caso, a energia absorvida poderia ser bem maior. Além disso, pode-se incluir a diferença dimensional do apoio do conjunto do atenuador de impacto, tendo em vista que um dos calços, em que a representação estrutural estava posicionada, estava menor que o outro, o que pode ter feito com que a representação da estrutura flexionasse, e compressão fora do plano central, pois o atenuador aparentava ter deformado mais em um dos lados, apesar de visualmente, o mesmo estar alinhado.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi projetar, desenvolver e analisar um novo modelo de atenuador de impacto para um veículo Fórmula SAE para que o mesmo pudesse ser utilizado durante a competição do ano de 2022. Para isto foi levado em consideração o regulamento vigente e trabalhos que possuíam o mesmo intuito, como ponto de partida, para obter resultados, de forma que comprovassem a eficácia do modelo proposto em relação aos requisitos do regulamento, e desta forma, submeter o dispositivo à avaliação da SAE no relatório de atenuador de impacto, o *Impact Attenuator Data Report (IAD)*.

Apesar dos valores obtidos com a simulação ficarem abaixo do exigido, entende-se que os resultados foram muito satisfatórios, apresentando, por exemplo, no caso da energia absorvida, margens de erro próximas a zero. Tendo em vista que para o ensaio é exigido a representação estrutural e uma deformação máxima de 25 mm da chapa anti-intrusão, entende-se que a utilização dos mesmos na simulação poderia garantir que os resultados se aproximassem do real.

Em seguida, o conjunto do atenuador de impacto foi construído e submetido ao ensaio de compressão para avaliar seu comportamento real. Os resultados obtidos mostraram que o atenuador não conseguiu absorver a energia exigida pela SAE (7350 J), chegando a um valor máximo de 3319 J, aproximadamente 45% do necessário. Tendo em vista que o ensaio do dispositivo não ocorreu conforme esperado, acabando bem antes de o conjunto chegar perto de absorver a energia necessária, os resultados acabam não tendo grande relevância, devido a prováveis falhas do projeto da base do dispositivo ou durante a execução do ensaio de compressão.

Com a finalização deste trabalho percebe-se que este modelo de atenuador possui grande potencial. O dispositivo se mostrou eficiente, pelos resultados da simulação, em caso de uma colisão frontal, absorvendo mais de 99% da energia exigida, apresentar alta taxa de desaceleração e não apresentar problemas em relação à sua deformação longitudinal. Entretanto, o comportamento real do conjunto acabou sendo prejudicado por erros de procedimento durante o ensaio de compressão. Assim, conclui-se que este trabalho cumpriu com a proposta de analisar o modelo escolhido.

Entende-se ainda que é necessário dar continuidade a este projeto, tendo em vista que existem no *software* modelos de material próprios para o material utilizado neste estudo. A ideia inicial foi de modelar o mesmo utilizando o método *Crushable Foam*, porém, por alguns motivos, não foi possível desenvolver uma análise com resultados aceitáveis, deste modo, mostrou-se interessante aprimorar a análise utilizando este modelo de material e comparar com o utilizado neste trabalho.

Também se mostra interessante realizar a simulação do ensaio de compressão do conjunto como um todo, incluindo a representação estrutural e a chapa anti-intrusão como corpos deformáveis. Outra ideia, é de não realizar apenas a simulação do impacto, mas incluir uma simulação quase-estática, para comparar a simulação com o ensaio real, e em ambos os métodos, buscar aprimorar os parâmetros de simulação e de malha do modelo.

Além disso, é de suma importância projetar novamente a representação estrutural necessária para o ensaio do dispositivo, com aumento da espessura do tubo, a fim de garantir maior resistência mecânica ao dispositivo, e posteriormente realizar uma nova construção do protótipo, e submeter o mesmo novamente ao ensaio de compressão e, se possível, ao ensaio de impacto ou queda-livre, de modo a avaliar novamente a eficácia do conjunto e o seu desempenho real, e assim, comprovar se o mesmo se mostra apto ou não para ser utilizado pela equipe durante a competição.

Por fim, espera-se que este trabalho possa contribuir, por meio da transmissão de conhecimento, e como possível referência para membros de equipes fórmula SAE, em especial, futuros projetistas deste tipo de dispositivo.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, N.A.Z.; et al. A review on crashworthiness studies of crash box structure. **Thin-Walled Structures**, v. 153, p. 106795, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026382312030673X>>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE/análise dinâmica**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2005. 302 p.
- American Society for Testing Materials (ASTM). **Designation D1621 Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics**. New York: ASTM, 2000.
- ANSYS, INC. **ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide**. 2019. Disponível em: <<https://www.ansyshelp.ansys.com>>. Acesso em: 30 nov. 2021.
- ASHBY, M. F. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 696 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15300-1 Veículos rodoviários automotores, Proteção ao ocupante e Ensaios de impacto frontal - Parte 1: Requisitos de desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. 1. ed. Porto: Universidade do Porto, 2003. 258p. Disponível em: <http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/livro_mef_aa_1ed/doc/livro_mef_aa.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- BACUILIMA, J. L. L.; TAMBO, M. V. P.; PALOMEQUE, F. J. V. **Diseño y construcción de un atenuador de impacto para un vehículo monoplaza Formula Student**. 2013, 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica Automotriz) - Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2013. Disponível em: <<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/5131>>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- BANHART, J. Metal foams - From fundamental research to applications. In: RAJ, B. et al. **Frontiers in the Design of Materials**. India: Universities Press Limited, 2007. p.279-89.
- BARROS, E.M. **Aspectos do desenvolvimento de para-choque de veículos de passeio para o mercado brasileiro relativos ao impacto à baixa velocidade**. 2018, 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. doi:10.11606/D.3.2018.tde-21092018-143029. Acesso em: 12 mai. 2021.
- BATHE, K. J. **Finite Element Procedure**. 2nd Ed. Watertown: K. J. Bathe, 2014. 1065 p.
- BITZER, T.N. **Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing**. Netherlands: Springer, 1997. 233p. Disponível em: <<https://www.springer.com/gp/book/9780412540509>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

- CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 589p.
- CARDOSO, E.; DE OLIVEIRA, B. F. Estudo do comportamento do chassi de veículo em espuma metálica submetido a teste de impacto. **Design e Tecnologia**, v. 1, n. 01, p. 91-101, 18 set. 2010. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/26368/000743850.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- COOK, R. D.; et al. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4th Ed. New York: John Wiley, 2001. 719 p.
- CORREA, C. P. **Estudio numérico y experimental de un atenuador de impacto para Fórmula SAE**. 2015, 88 f. Monografia (Grado em Ingeniería de las Tecnologías Industriales) - Universidad de Sevilla, Sevilla, 2015. Disponível em: <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90211/>>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- ESSS. **Método numérico, analítico e experimental: concorrentes ou complementares?** Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/simulacao-numerica-metodo-analitico-experimental-concorrentes-ou-complementares-na-engenharia/>>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- FERNÁNDEZ, V. C. **Diseño de un atenuador de impactos para un vehículo Fórmula SAE**. 2016, 125 f. Monografia (Grado em Ingeniería de las Tecnologías Industriales) - Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2016. Disponível em: <<http://oa.upm.es/43436/>>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- GOKHALE, N.S.; et al. **Practical Finite Element Analysis**. India: Finite to Infinite, 2008. 416p.
- HART, J.; et al. **FSAE Impact Attenuator 2009-2010**. Worcester: Polytechnic Institute, 2010. 59p.
- HOU, C. **Numerical and Experimental Crashworthiness Studies of Foam-filled Frusta**. 2013, 122 f. Tese (Degree of Master of Applied Science) - Department of Mechanical and Industrial Engineering of University of Toronto, Toronto, 2013. Disponível em: <<https://tspace.library.utoronto.ca/handle/1807/42866>>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- HUEBNER, K.H.; et al. **The Finite Element Method for Engineers**. 4th Ed. New York: Wiley-Interscience, 2001. 744p.
- LI, S.; et al. **Origami Pattern Tube for Vehicle Crash Box**. 2013, 55 f. Monografia (Bachelor of Science in Mechanical Engineering) - Blekinge Institute of Technology, Suécia, 2013. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:829188/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- LOTTI, R. S.; et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Rev. Dent. Press Ortodon. Ortop. Facial**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, Apr. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-54192006000200006&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 12 mai. 2021.

MATA, H. et al. Caracterização mecânica dos materiais que constituem estruturas sandwich com núcleo de espuma metálica. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v. 17, n.º 2, p. 125-137, 2013. Disponível em: <<https://www2.uned.es/ribim/volumenes/Vol17N2Octubre2013/V17N2A10%20Mata.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

MATSUMOTO, A. T. **Estudo do desempenho de reforços poliméricos em estruturas veiculares submetidas a impacto**. 2010, 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. doi:10.11606/D.3.2010.tde-05122011-145710. Disponível em: Acesso em: 12 mai. 2021.

MOURÃO, R.P; MATTAR NETO, M. Caracterização de espuma polimérica para uso em embalagens para transporte de rejeitos radioativos. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE; NATIONAL MEETING ON NUCLEAR APPLICATIONS, 6th, 2002, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. p.1-9. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2002/inac/08773.PDF>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

MURRAY, N; MILITZER, J. **2012 FSAE Impact Attenuator Data Report**. Disponível em: <https://blogs.dal.ca/formulaSAE/files/2012/04/047_Dalhousie-University__FSAEM_IAD.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2021.

NAKAZAWA, Y.; et al. Development of crash-box for passenger car with high capability for energy absorption. In: International Conference on Computational Plasticity, 8th, 2005, Barcelona, **Anais...** Barcelona: CIMNE, 2005. p. 1-4. Disponível em: <<http://congress2.cimne.com/complas05/admin/Files/FilePaper/p167.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

OSHINIBOSI, A. **Chassis and Impact Attenuator Design for Formula Student Race Car**, 2012. 81 f. Monografia (Mechanical Engineering) - University of Leeds, Reino Unido, 2012. Disponível em: <<https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2014/04/Ahmed-Oshinibosi.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

PEREIRA, L. O. C. M. **Projeto de um atenuador de impacto para o protótipo da equipe de Formula SAE da UFRJ**, 2013. 104 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em:< <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/9965>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2000. 395p.

SAE BRASIL. **Fórmula SAE Brasil**. Disponível em: <<https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil/>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

SAE INTERNATIONAL. **2015 - 2016 Formula SAE Standard Impact Attenuator, Type 14**. 2015. Disponível em: <<https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=193613e4-fff1-4ea9-97ec-eb1c07fbe3c0>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

SAE INTERNATIONAL. **Formula SAE Rules 2022 V2.0**. 2021, 138p. Disponível em: <<https://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=4d9d4c4c-f82a-4810-9122-d66ff9138d26>>. Acesso em: 16 dez. 2021.

SÁNCHEZ, C. A. A. **Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear**. 2001, 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-27072001-083441/pt-br.php>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

SANTOS, D. J. F. C. H. **Atenuador de impacto para fórmula SAE: análise dinâmica não linear pelo método dos elementos finitos**. 2016, 61 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1831/2/MONOGRRAFIA_ProjetoConstru%C3%A7%C3%A3oDispositivo.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2021.

SCHORMANS, J. M. **The design of a formula student front impact attenuator**. 2009, 32 f. Monografia (Mechanical Engineering) - Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2009. Disponível em: <<http://mate.tue.nl/mate/pdfs/11489.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

SEGADE, A.; et al. Finite element simulation for analysing the design and testing of an energy absorption system. **Materials**, v. 9, n. 8, p. 1–13, 2016. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5509271/>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

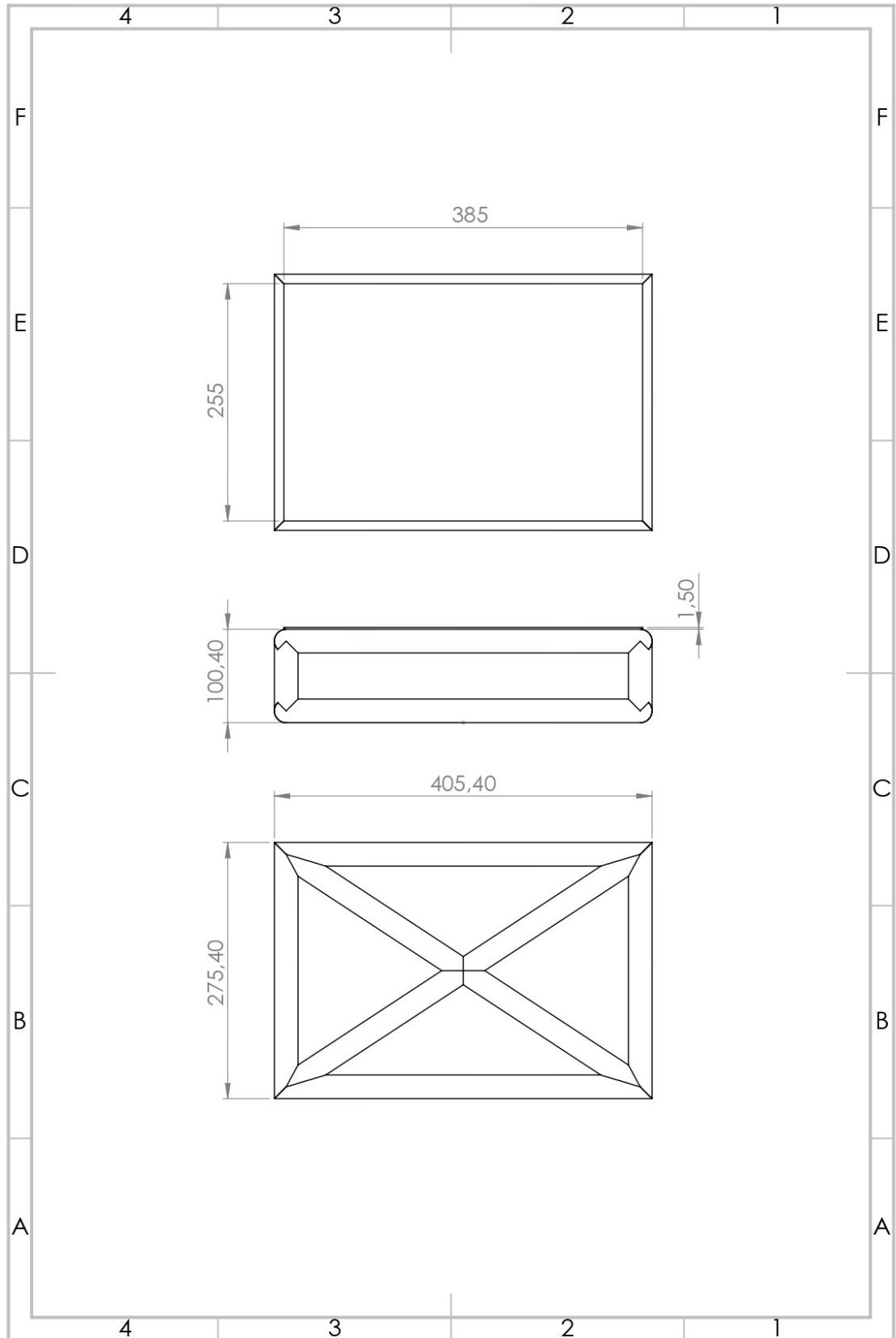
SEWARD, D. **Race Car Design**. London: Palgrave, 2014. 288p.

SOUZA NETO, A. L. D. **Projeto e construção de um dispositivo de absorção de impacto para veículo de competição fórmula SAE®**. 2019, 72 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Disponível em: <<https://monografias.ufop.br/handle/35400000/1831>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

TITA, V.; CALIRI JUNIOR, M.F. Numerical simulation of anisotropic polymeric foams. **Lat. Am. j. solids struct.**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 2, p. 1-21, Apr. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-78252012000200005&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 12 mai. 2021.

UTFAST. **UTFAST F-SAE RACING**. Disponível em: <<https://utfastpr.wixsite.com/utfast>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

ANEXO A - Detalhamento Suporte Atenuador 2022



ANEXO B - Detalhamento Atenuador de Impacto 2022

