

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**THALYTA AMANDA OLIVEIRA DA COSTA**

**PROJETO DE MELHORIA DE ATENUADOR DE IMPACTO DE VEÍCULO  
FÓRMULA SAE UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2024**

**THALYTA AMANDA OLIVEIRA DA COSTA**

**PROJETO DE MELHORIA DE ATENUADOR DE IMPACTO DE VEÍCULO  
FÓRMULA SAE UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**IMPROVEMENT PROJECT OF IMPACT ATTENUATOR OF A FORMULA SAE  
VEHICLE USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

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).  
Orientador(a): Adriano Silva Borges

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2024**



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.

**THALYTA AMANDA OLIVEIRA DA COSTA**

**PROJETO DE MELHORIA DE ATENUADOR DE IMPACTO DE VEÍCULO  
FÓRMULA SAE UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

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: 20 de maio de 2024

---

Adriano Silva Borges  
Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Cornélio Procópio

---

Julio Cesar de Souza Francisco  
Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Cornélio Procópio

---

Ricardo Lopes Ferreira  
Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Cornélio Procópio

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2024**

Dedico este trabalho à minha mãe Rosalba que sempre me incentiva, me fortalece e me inspira.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus que é a razão da minha vida e que me fortaleceu em cada momento.

À minha mãe que me envolve com muito amor e me encoraja na jornada.

Ao meu orientador Prof. Adriano S. Borges por me guiar nesta trajetória.

Aos meus amigos e colegas de sala pela parceria.

À minha família por todo apoio.

Às professoras e aos professores por compartilhar conosco o conhecimento e experiências profissionais.

À Coordenadoria da Mecânica pelo suporte.

Gostaria de deixar registrado minha gratidão a todos que torcem por mim e que mantiveram as portas abertas para a minha evolução.

“Quem não muda a direção termina exatamente onde partiu.”  
(HUNTER, 1989)

## RESUMO

Com a constante evolução das tecnologias e inovações no mundo automobilístico, nota-se que a melhoria deve ser contínua e a ciência sempre dinâmica. De igual modo, os atenuadores de impacto de veículos Fórmula SAE também podem apresentar propostas inovadoras desde que sejam comprovadamente validadas e aceitas conforme regulamento técnico. Assim, diante da vasta aplicação de termoplásticos na indústria automotiva, um dos objetivos desta presente dissertação é otimizar um modelo de atenuador de impacto de alumínio através de uma nova geometria empregando o polipropileno como material de fabricação, tendo como exemplo a aplicação do polímero nos para-choques dos veículos convencionais. Esta utilização de um material plástico visa a redução de peso da estrutura e aumento da eficiência. O próximo objetivo é aplicar a metodologia de elementos finitos através de análises estáticas nos dois modelos de atenuador de impacto para verificar o comportamento das estruturas nos diferentes materiais quando submetidos a um carregamento externo. À vista disso, o atenuador de impacto de polipropileno foi projetado e durante a fase de análise concluiu-se que, quando se substituiu o alumínio pelo polipropileno, a redução de peso foi atingida, resultando em uma redução de 95,53%, e em uma estrutura com maior resiliência, se tornando assim um projeto com um *design* leve e desempenho comparável. Contribuindo, desta forma, com a possibilidade de aplicar materiais termoplásticos e processos de fabricação alternativos no contexto da indústria automobilística de alta performance.

Palavras-chave: atenuador de impacto; polipropileno; Fórmula SAE; inovação.

## **ABSTRACT**

Due to the constant evolution of technologies and innovations in the automotive world, it is noted that improvement must be continuous, and science must always be dynamic. Equally, Formula SAE vehicle's impact attenuators can also present innovative proposals as long as they are proven to be validated and accepted in accordance with technical regulation. Thus, given the vast application of thermoplastics in the automotive industry, one of the objectives of this dissertation is to optimize an aluminum impact attenuator model through a new geometry using polypropylene as a manufacturing material, taking as an example the application of the polymer at the bumpers of conventional vehicles. This use of a plastic material aims to reduce the weight of the structure and increase efficiency. The next objective is to apply the finite element methodology through static analyzes on the two impact attenuator models to verify the behavior of the structures in different materials when subjected to external loading. In view of this, the polypropylene impact attenuator was designed and during the analysis phase it was concluded that, when aluminum was replaced by polypropylene, weight reduction was achieved resulting in a reduction of 95.53% and in a structure with greater resilience, thus becoming a project with a lightweight design and comparable performance. In this way, contributing to the possibility of applying thermoplastic materials and alternative manufacturing processes in the context of the high-performance automobile industry.

Keywords: impact attenuator; polypropylene; Formula SAE; innovations.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Protótipo TX-02 da Equipe Fórmula CP .....                        | 14 |
| Figura 2 – Localização do atenuador de impacto .....                         | 14 |
| Figura 3 – Diagrama tensão x deformação para material dúctil .....           | 18 |
| Figura 4 – Vista do projeto do atenuador de impacto padrão Tipo 11 .....     | 20 |
| Figura 5 – Vista ilustrativa do atenuador de impacto Tipo 11 em espuma ..... | 20 |
| Figura 6 – Exemplo de atenuador de impacto do tipo <i>honeycomb</i> .....    | 21 |
| Figura 7 – Estruturas dianteiras do protótipo Equipe Fórmula CP .....        | 23 |
| Figura 8 – Atenuador de impacto de alumínio.....                             | 23 |
| Figura 9 – Ideia de atenuador do início do processo .....                    | 27 |
| Figura 10 – Ideia alternativa de atenuador do início do processo .....       | 27 |
| Figura 11 – Atenuador de impacto de polipropileno proposto .....             | 28 |
| Figura 12 – Atenuador de impacto de polipropileno no chassi .....            | 28 |
| Figura 13 – Entrada do tamanho do elemento finito no Ansys .....             | 30 |
| Figura 14 – Malha do atenuador de alumínio .....                             | 30 |
| Figura 15 – Malha do atenuador de polipropileno.....                         | 31 |
| Figura 16 – Face fixada no atenuador de alumínio .....                       | 31 |
| Figura 17 – Face fixada no atenuador de polipropileno.....                   | 32 |
| Figura 18 – Força aplicada na face do atenuador de alumínio .....            | 33 |
| Figura 19 – Força aplicada na face do atenuador de polipropileno.....        | 34 |
| Figura 20 – Resultados obtidos no atenuador de alumínio.....                 | 35 |
| Figura 21 – Deformação total máxima do atenuador de alumínio .....           | 35 |
| Figura 22 – Deformação elástica máxima do atenuador de alumínio .....        | 35 |
| Figura 23 – Tensão equivalente máxima do atenuador de alumínio .....         | 36 |
| Figura 24 – Resultados obtidos no atenuador de polipropileno.....            | 36 |
| Figura 25 – Deformação total máxima do atenuador de polipropileno .....      | 37 |
| Figura 26 – Deformação elástica máxima do atenuador de polipropileno.....    | 37 |
| Figura 27 – Tensão equivalente máxima do atenuador de polipropileno.....     | 38 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |  |
|---------|--|
| ABS     | Acrilonitrila butadieno estireno         |
| CAD     | Computer-aided design                    |
| CONTRAN | Conselho Nacional de Trânsito            |
| FIA     | Federação Internacional do Automobilismo |
| FSAE    | Fórmula SAE                              |
| MEF     | Métodos de Elementos Finitos             |
| PMBOK   | Project Management Body of Knowledge     |
| PP      | Polipropileno                            |
| PVC     | Cloreto de Polivinila                    |
| SAE     | Society of Automotive Engineers          |
| SES     | Structural Equivalency Spreadsheet       |
| TIG     | Tungsten Inert Gas                       |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                   |   |
|-------------------|---|
| P                 | Momento linear                                |
| M                 | Massa   |
| v                 | Velocidade                                    |
| F                 | Força   |
| a                 | Aceleração                                    |
| t                 | Tempo   |
| J                 | Joules  |
| $\sigma$          | Tensão  |
| $\varepsilon$     | Deformação                                    |
| mm                | Milímetros                                    |
| g                 | Valor da Gravidade                            |
| m/s <sup>2</sup>  | Metros por segundos multiplicado por segundos |
| kg                | Quilogramas                                   |
| m/s               | Metros por segundos                           |
| kg/m <sup>3</sup> | Quilogramas por metro cúbico                  |
| GPa               | Giga Pascal                                   |
| g                 | Gramas  |
| m <sup>3</sup>    | Metros cúbicos                                |
| m                 | Metros  |
| km/h              | Quilometros por hora                          |
| s                 | Segundos                                      |
| N                 | Newtons                                       |
| kN                | Quilo Newtons                                 |
| m/m               | Metros por metros                             |
| Pa                | Pascal  |

## SUMÁRIO

|                |  |           |
|----------------|--|-----------|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>13</b> |
| <b>2</b>       | <b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....   | <b>16</b> |
| <b>2.1</b>     | <b>TEORIA DA COLISÃO E DO IMPACTO</b> .....  | <b>16</b> |
| <b>2.2</b>     | <b>ABSORVEDORES DE IMPACTO EXISTENTES</b> .....                                    | <b>19</b> |
| 2.2.1          | Para-choques e crash-boxes.....  | 19        |
| 2.2.2          | Atenuadores de impacto da FSAE .....   | 20        |
| <b>3</b>       | <b>MATERIAL E METODOLOGIA</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>3.1</b>     | <b>REGULAMENTO FÓRMULA SAE</b> .....   | <b>22</b> |
| <b>3.2</b>     | <b>ATENUADOR DE IMPACTO INICIAL</b> .....  | <b>23</b> |
| <b>3.3</b>     | <b>MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS</b> .....   | <b>24</b> |
| <b>4</b>       | <b>RESULTADOS</b> .....  | <b>25</b> |
| <b>4.1</b>     | <b>PROJETO DE MELHORIA</b> .....   | <b>25</b> |
| 4.1.1          | Definição do material, processo de fabricação e custo: .....                       | 25        |
| 4.1.2          | Projeção do <i>design</i> :.....   | 26        |
| 4.1.3          | Análise estática dos atenuadores.....  | 29        |
| <u>4.1.3.1</u> | <u>Entrada dos dados dos materiais: .....</u>                                      | <u>29</u> |
| <u>4.1.3.2</u> | <u>Aplicação da malha: .....</u>   | <u>30</u> |
| <u>4.1.3.3</u> | <u>Analysis Settings .....</u>   | <u>31</u> |
| <u>4.1.3.4</u> | <u>Plotagem da Solução .....</u>   | <u>34</u> |
| 4.1.3.4.1      | <i>Soluções obtidas no atenuador de impacto de alumínio</i> .....                  | 34        |
| 4.1.3.4.2      | <i>Soluções obtidas no atenuador de impacto de polipropileno: .....</i>            | 36        |
| <b>5</b>       | <b>CONCLUSÃO</b> .....   | <b>39</b> |
|                | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | <b>40</b> |
|                | <b>APÊNDICE A - DESENHO TÉCNICO DO ATENUADOR DE IMPACTO DE ALUMÍNIO</b> .....      | <b>43</b> |
|                | <b>APÊNDICE B - DESENHO TÉCNICO DO ATENUADOR DE IMPACTO DE POLIPROPILENO</b> ..... | <b>45</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da invenção do veículo automotivo no século XIX e do início da produção em massa de automóveis no século XX (BINDER; RAE, 2022), a engenharia foca na melhoria contínua de suas estruturas, produções e tecnologias. Por consequência, de modo semelhante, o conhecimento técnico para o desenvolvimento dos veículos aprimora-se constantemente nos diversos componentes de um carro.

Segundo Pearlman e Viano (1996, p. 977), a proteção de passageiros nos veículos apresentou grande evolução nos últimos 30 anos “com a introdução de inúmeras inovações, incluindo cintos subabdominais, cintos de ombro, colunas de direção dobráveis e, mais recentemente, airbags”. Posteriormente, acrescentam que muitas dessas melhorias surgiram após a realização de testes laboratoriais de dispositivos de segurança com bonecos, de testes de colisão ou dispositivos de teste antropomórficos (PEARLMAN; VIANO, 1996, p.977). No Brasil, por sua vez, também se observa que o uso dos “*crashes tests*” (“testes de colisão”), por exemplo, podem ser aplicados para impacto lateral contra barreira deformável (BRASIL, 2022). Desse modo, os testes de impacto são utilizados na produção dos veículos, pois permitem avaliar a performance e eficiência das estruturas projetadas.

Requisitos de proteção contra o impacto também são observados para veículos de alta performance, como por exemplo, vale citar o Campeonato Mundial de Fórmula 1, realizado pela Federação Internacional do Automobilismo (FIA). A Fórmula 1 consiste em uma competição que reúne veículos de alta performance em uma corrida internacional (FIA, 2022a), e em seu Regulamento Técnico, a FIA reforça a importância das estruturas de segurança: no Artigo 13 “*Safety Structures and Homologation*” (“Estruturas de segurança e Homologação”) cita os requisitos para que o carro seja elegível para participar, e dentre eles vale citar o tópico 13.6 “*Front Impact Structure*” (“Estrutura de impacto frontal”) no qual estabelece que uma estrutura absorvedora de impacto deve ser instalada em frente à célula de sobrevivência. (FIA, 2022b, p.114)

Além da FIA, a *Society of Automotive Engineers* (SAE) também organiza a Competição Fórmula SAE, onde desafia “equipes de estudantes universitários de graduação e pós-graduação a conceber, projetar, fabricar, desenvolver e, competir com veículos pequenos, estilo veículos Fórmula.” (SAE INTERNACIONAL, 2022a).

Por sua vez, para que os protótipos projetados sejam aptos à corrida as equipes devem submeter o relatório “*Structural Equivalency Spreadsheet (SES)*” (“Planilha de Equivalência Estrutural”). Dentre os tópicos avaliados no SES, para garantir a eficácia da estrutura de segurança contra colisões frontais, o atenuador de impacto do veículo deve ser submetido à testes dinâmicos (pêndulos, torre de queda entre outros) ou testes quase-estático conforme consta no FSAE *Rules* tópico F.8.7.7 (SAE INTERNACIONAL, 2022b, p. 47).

Na figura 1 é possível observar um exemplo de protótipo Fórmula SAE, o veículo à combustão da equipe Fórmula CP da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Cornélio Procópio (UTFPR - CP).

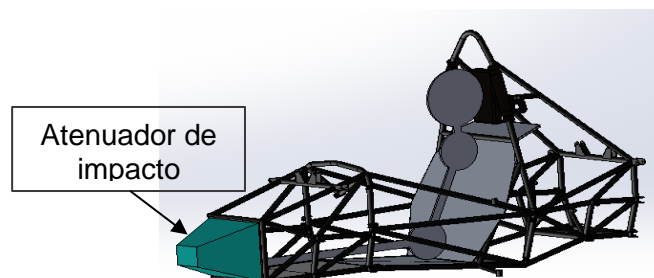
**Figura 1 - Protótipo TX-02 da Equipe Fórmula CP**



**Fonte: Equipe Fórmula CP (2022)**

O atenuador de impacto de um veículo Fórmula SAE é um item estrutural obrigatório, tem como requisito funcional a absorção de energia e desaceleração do veículo, conforme consta no FSAE *Rules*, tópico F.8.7.2 (SAE INTERNACIONAL, 2022b, p.46). Sua funcionalidade é semelhante ao “*crash box*” (“caixa de colisão”) de um veículo de passeio, ou seja, deve ser projetado para absorver colisões. Na figura 2 é possível observar a localização do atenuador de impacto desta modalidade de veículo.

**Figura 2 - Localização do atenuador de impacto**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

Portanto, diante da constante busca pela engenharia no desenvolvimento de veículos com resistência à colisão e *designs* leves (RAMBHAD et.al.,2020), os objetivos desta presente dissertação é: otimizar a geometria do atenuador de impacto do protótipo da equipe Fórmula CP, visando reduzir peso e aumentar a eficiência da estrutura e analisar o comportamento dos atenuadores através de análises estrutural estática aplicando o método de elementos finitos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 TEORIA DA COLISÃO E DO IMPACTO

Impacto é definido como sendo um carregamento dinâmico, ou seja, variável no tempo. Em uma colisão, a força exercida sobre o corpo é de curta duração, de módulo elevado e que provoca uma mudança brusca do momento do corpo [HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016].

Centro de massa, momento linear (também conhecido como “quantidade de movimento”) e o teorema do impulso são a base para o fenômeno.

Segundo Halliday et. al. (2016), o momento linear de uma partícula é uma grandeza vetorial que pode ser definida como:

$$\vec{P} = M * \vec{v} \quad (1)$$

Onde  $\vec{P}$  = *momento linear* ;  $M$  = *massa* e  $\vec{v}$  = *velocidade do corpo*

A relação entre a força e o momento linear de um corpo, foi expresso por Newton da seguinte forma:

“A taxa de variação com o tempo do momento de uma partícula é igual à força resultante que age sobre a partícula e tem a mesma orientação que a força resultante” [HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016].

Este enunciado é comumente conhecido como sendo a Segunda Lei de Newton, expresso como:

$$\vec{F}_{res} = M * \vec{a} \quad (2)$$

Onde  $\vec{F}_{res}$  = *força resultante* e  $\vec{a}$  = *aceleração*.

Entretanto, a equação original é expressa da seguinte maneira:

$$\vec{F}_{res} = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad (3)$$

Onde,  $t$  = *tempo* .

Logo, o fato de um corpo entrar em movimento, é resultante da aplicação de uma força externa.

Assim, quando dois corpos colidem, em curto instante de tempo seu movimento é alterado, de forma que é possível conhecer a variação total do momento instantes depois e imediatamente antes da colisão, através da integração da segunda lei newtoniana:

$$\int_{t_f}^{t_i} \vec{F}(t) dt = \int_{t_f}^{t_i} d\vec{P} \quad (4)$$

Neste contexto, é introduzido o conceito de impulso. Onde, o impulso ( $\vec{J}$ ) é definido como:

$$\vec{J} = \int_{t_i}^{t_f} \vec{F}(t) dt \quad (5)$$

Portanto,

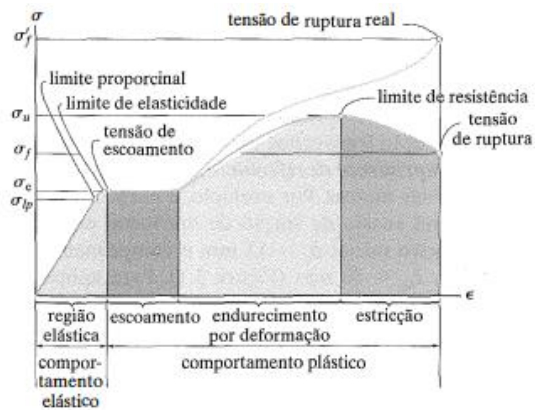
$$\vec{J} = \Delta\vec{P} \quad (6)$$

Esta relação é conhecida como teorema do momento linear e impulso.

Diante disso, “o impulso é uma propriedade capaz de alterar o momento de um objeto” (WRASSE et.al., 2014) tornando estas duas grandezas diretamente ligadas ao conceito de colisão.

Assim, quando dois corpos rígidos colidem, cada qual é submetido à carregamentos externos causados pelo contato direto entre eles. Como resposta ao contato, os corpos desenvolvem, de acordo com a especificação do material e velocidade do impacto, uma tensão ( $\sigma$ ) e uma deformação ( $\varepsilon$ ) que poderá ser do tipo elástica ou plástica. A figura 3 apresenta o gráfico tensão versus deformação que esclarece a relação das duas grandezas.

**Figura 3 - Diagrama tensão x deformação convencional e real para um material dúctil**



Fonte: Hibbeler (2010)

A deformação elástica possui como característica não ser permanente, dessa forma, após a aplicação da força o material retorna à sua posição inicial. Nesta ocasião, a resiliência é a propriedade do material que torna conhecida a capacidade de absorção de energia do material, e que explica o seu restabelecimento energético para a posição inicial. Por outro lado, a deformação plástica é uma resposta permanente do material, o qual uma vez deformado não retorna à sua posição inicial. Nesta região plástica, a tenacidade é a capacidade de absorção de energia do material (HIBBELER, 2010).

À vista destas características das deformações, “uma das finalidades do *crash test* é saber o nível de energia armazenada no veículo, sem que ocorra penetração excessiva da estrutura ao espaço reservado aos passageiros – célula de sobrevivência” (ALVES, 2009), ou seja a realização de um teste de colisão permite trazer à luz o modo como o veículo irá se deformar.

Portanto, na fase do projeto, a escolha do material e a geometria são fundamentais para a eficácia da estrutura projetada, pois o conhecimento do comportamento do material da estrutura permite prever os possíveis modos de falhas que esta estrutura poderá estar sujeita.

Neste sentido, falha é definido como sendo “a situação em que o sistema deixa de cumprir seu requisito funcional, ou seja, deixa de atender e desempenhar a função para a qual foi projetado” (ROSA,2002). Segundo o autor, um componente estrutural pode falhar de alguns modos, entre eles: flambagem (deformação elástica excessiva), distorção (deformação plástica excessiva), fadiga, corrosão e fluência.

Isto posto, analisar estruturalmente o componente, realizando o levantamento das solicitações presentes e definindo o material para manufatura, elucida os pontos críticos que podem ocasionar falhas e direciona para uma abordagem preventiva contra a falha e também a potenciais de melhorias de projeto.

## **2.2 ABSORVEDORES DE IMPACTO EXISTENTES**

### **2.2.1 Para-choques e crash-boxes**

Nos veículos convencionais, um exemplo de absorvedor de impacto são os para-choques dianteiros e traseiros, cuja função é “absorver o impacto durante a baixa velocidade” (RAMBHAD et.al.,2020). Segundo Rambhad et.al. (2020), o para-choque automotivo é o primeiro componente que absorve o impacto energético e o primeiro a se deformar em uma colisão.

Segundo Kudav e Mallick (2021), “o material da viga do para-choque hoje é composto principalmente por aço e ligas de alumínio, mas os compósitos de fibra de carbono têm o potencial de reduzir significativamente o peso do para-choque”.

Tendo isto em vista, no mercado automotivo há a utilização de dois principais tipos de para-choques: os metálicos e os plásticos.

No caso dos para-choques metálicos, segundo Rambhad et. al. (2020), “para obter propriedades de alta resistência e tenacidade das vigas de impacto de automóveis de passageiros, as vigas de impacto convencionais são feitas de liga de aço de alta resistência com diversos tratamentos térmicos”.

Em contrapartida, o uso de termoplásticos na fabricação de para-choques tem se destacado devido à alta capacidade de absorção de impacto e resistência dos plásticos, além da motivação econômica diante do fato de que o uso do plástico reduz o consumo de combustível (HEMAIS, 2002).

Dentre os plásticos aplicados no ramo, destaca-se o Polipropileno (PP), Cloreto de Polivinila (PVC ou Vinil) e o Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) (SHENZEN, 2022).

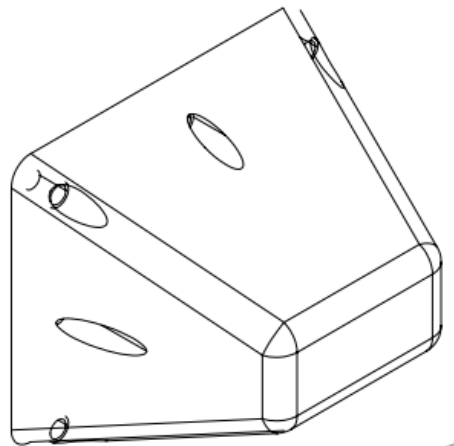
Isto mostra que os materiais plásticos apresentam uma performance notória no mercado automotivo, incentivando que novos materiais sejam explorados ao invés de se adotar um material metálico.

### 2.2.2 Atenuadores de impacto da FSAE

No contexto da Competição de Fórmula SAE (FSAE), espumas também são empregadas em absorvedores de impacto. Um exemplo disso, é o atenuador de impacto de espuma Tipo 11 da Fórmula SAE, cuja vista do projeto pode ser observada na figura 4 e uma vista ilustrativa, na figura 5.

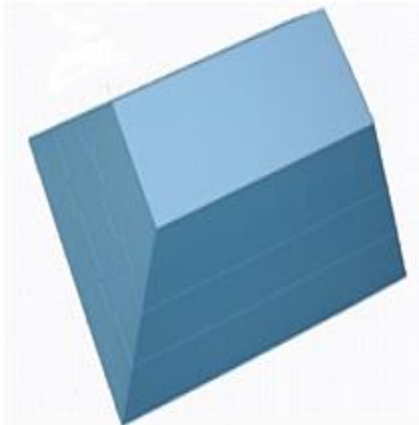
Para fins da competição, o Comitê de Regras da Fórmula SAE desenvolveu e testou um “espécime de absorvedor de impacto” construído “com uma espuma absorvedora de energia Dow Impaxx® 700”. Com o corpo de prova aprovado através de ensaios, o Comitê estabeleceu que os atenuadores de impacto devidamente fabricados e montados a partir desta espuma e que cumpram as dimensões estabelecidas previamente serão aceitas como conformes (FÓRMULA SAE, 2011).

**Figura 4 - Vista do projeto do atenuador de impacto padrão Tipo 11**



**Fonte: Fórmula SAE (2011)**

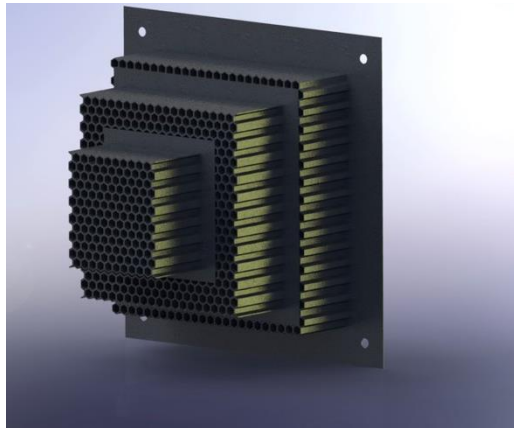
**Figura 5 - Vista ilustrativa do atenuador Tipo 11 fabricado com a espuma**



**Fonte: BSCI**

Outro modelo também utilizado no âmbito da Fórmula SAE é o atenuador de impacto do tipo *Honeycomb*, exemplificado na figura 6. Estruturas denominadas “*honeycomb*” (“colmeia”) recebem este nome por serem semelhantes a colmeias, podendo ser hexagonais ou até mesmo circulares. Geralmente, estas colmeias são fabricadas em metal.

**Figura 6 - Exemplo de atenuador de impacto do tipo honeycomb**



**Fonte: Ismail Metin (2013)**

Além destes modelos, as equipes participantes têm a possibilidade de desenvolver novos projetos, desde que atendam ao regulamento técnico vigente.

### 3 MATERIAL E METODOLOGIA

#### 3.1 REGULAMENTO FÓRMULA SAE

Considerando o regulamento da Competição Fórmula SAE Brasil 2023 Versão 1, para que um atenuador de impacto seja apto e válido para o veículo competir, a equipe pode optar por comprar o Atenuador de Impacto *Standard*, que já é previamente aprovado pela organização, ou manufaturar e validar um projeto próprio de atenuador de impacto (SAE INTERNACIONAL, 2022b).

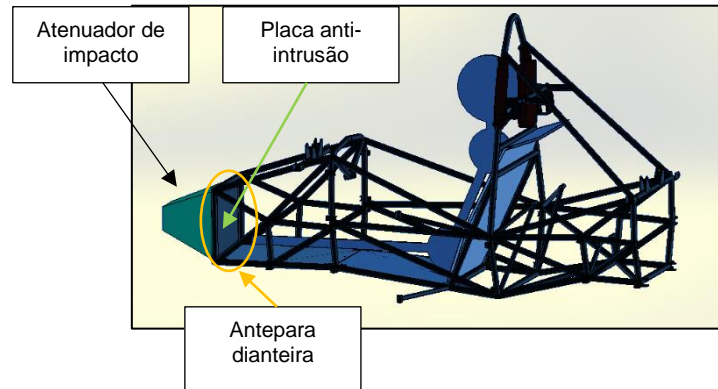
Quando a equipe opta por utilizar um *design* próprio de atenuador de impacto, este deve obedecer aos seguintes requisitos de projeto:

- a. Comprimento maior ou igual a 200 mm, com seu comprimento orientado ao longo do eixo dianteiro/de popa do chassi.
- b. Altura mínima de 100 mm (na direção perpendicular ao solo) e largura mínima de 200 mm (medida paralela ao solo) para uma distância mínima de 200 mm para frente do “*front bulkhead*” (“antepara dianteira”). A antepara dianteira consiste na estrutura tubular responsável pela proteção dianteira do chassi.
- c. Em caso do projeto atenuador for segmentado de espuma, ele deve ter todos os segmentos ligados para evitar problemas de deslizamento.
- d. Para modelos de atenuador *Honeycomb* (estrutura feita de múltiplos segmentos), devem ter um painel contínuo entre cada segmento.

Os modos de fixação na antepara dianteira possíveis são: por colagem, por soldagem ou por aparafusamento. Na fase de elaboração de *design* e planejamento de manufatura, estas fixações devem ser consideradas e avaliadas para assim ser escolhido o modo apropriado.

O atenuador de impacto não deve ultrapassar a antepara dianteira e deve ser fixado na placa anti-intrusão, que consiste em uma estrutura de preenchimento localizada na antepara dianteira. Na figura 7, é possível observar o posicionamento das estruturas dianteiras do protótipo da Equipe Fórmula CP.

**Figura 7 - Estruturas dianteiras do protótipo da Equipe Fórmula CP**



Fonte: Autoria própria (2024)

Para a validação do atenuador de impacto, todas as equipes devem submeter o relatório SES contendo os dados técnicos. Segundo a SAE INTERNACIONAL (2022b), os requisitos funcionais para o atenuador são:

- I. Desaceleração do veículo a uma taxa não superior à 20 g média e 40 g de pico. (Considerando a gravidade como  $9,81 \text{ m/s}^2$ , a desaceleração do veículo deve ser a uma taxa não superior à  $196,2 \text{ m/s}^2$  média e  $392,4 \text{ m/s}^2$  de pico).
- II. A energia absorvida pelo atenuador deve ser superior a 7350 J, quando: massa total do veículo é de 300 kg e considerando uma velocidade de impacto de 7,0 m/s.

### 3.2 ATENUADOR DE IMPACTO INICIAL

Para esta presente dissertação, será considerada para a proposta de projeto de melhoria, o atenuador de impacto do protótipo da 18ª Competição FSAE Brasil da Equipe Fórmula CP da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, apresentado na figura 8.

**Figura 8 - Atenuador de Impacto de Alumínio**



Fonte: Equipe Fórmula CP (2022)

O atenuador de impacto da equipe foi projetado e manufaturado com 01(uma) chapa de alumínio liga 1200-H14 com espessura de 3 mm, largura de 1000 mm e comprimento 2000 mm. Em sua confecção as chapas foram cortadas conforme planificação obtida pelo software Solidworks e foram soldadas em TIG. A fixação do atenuador na placa anti-intrusão também se deu com solda TIG. No apêndice A consta o desenho técnico do atenuador.

Diante do atenuador de alumínio da equipe, o projeto de melhoria visa idealizar e projetar uma nova geometria, buscando atingir os objetivos estabelecidos. Este novo modelo de atenuador proposto e o atenuador de impacto da equipe serão submetidos à análise estática utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) visando comparar as duas estruturas.

### **3.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

O Método de Elementos Finitos (MEF) consiste em uma técnica numérica para análise de problemas e sistemas de engenharia. Desse modo, por não ser um método analítico é uma abordagem que permite que sistemas complexos (por exemplo, que envolve muitos componentes e materiais com comportamentos distintos) sejam simulados computacionalmente (TEIXEIRA-DIAS et. al., 2010).

Dessa forma, a análise por elementos finitos permite uma modelagem matemática aproximada do sistema físico original (SORIANO, 2003) onde, por meio de um software, simula o comportamento da estrutura em diversas situações hipotéticas e reais.

O MEF apresenta duas perspectivas de análise: lagrangiana e a euleriana. A presente dissertação exemplifica o método lagrangiano de elementos finitos, pois na análise lagrangiana, a malha de elementos finitos coincide com o modelo a estudar, enquanto na euleriana, a malha de elementos finitos não coincide com o modelo, mas sim, com o meio contínuo que interage com o objeto (TEIXEIRA-DIAS et. al., 2010).

Devido à realização de diversos cálculos simultaneamente, o MEF durante muito tempo apresentou limitação computacional. Porém com o desenvolvimento da tecnologia, a ferramenta vem sendo constantemente aprimorada.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 PROJETO DE MELHORIA

O projeto de melhoria do atenuador de impacto desta presente dissertação foi desenvolvido estabelecendo premissas do conceito de projeto de produto. Então, definiu-se o escopo de produto e escopo de projeto para nortear as ações.

Segundo o Guia PMBOK 7ª Edição, o escopo do produto “é o conjunto de características e funções que identificam um produto, serviço ou resultado”, ou seja, são os requisitos. Por outro lado, escopo do projeto “é o trabalho realizado para entregar um produto, serviço ou resultado com as características e funções especificadas” (PMI, 2021).

Dessa forma com relação ao escopo do produto, o atenuador de impacto deverá ter um *design* inovador, apresentando uma geometria que, ao ser deformada, resulte em um efeito semelhante ao sanfonado, e deverá apresentar uma proposta de material que substitua o alumínio utilizado no atenuador da equipe Fórmula CP, visando alcançar a redução de peso e aumento da eficiência da estrutura absorvedora.

Diante do escopo do produto, o escopo do projeto foi definido nos seguintes pilares de trabalho: definição do material, processo de fabricação e custo, seguida pela projeção do *design* e finalizando com as análises estáticas dos atenuadores.

#### 4.1.1 Definição do material, processo de fabricação e custo:

O atenuador proposto inspirou-se na adoção de termoplásticos dos para-choques automotivos. Assim, o material escolhido é o Polipropileno (PP).

O PP é um dos principais termoplásticos consumidos no Brasil, devido sua versatilidade, aplicabilidade e baixo custo (WILHELM, 2000), consiste em um polímero derivado do propileno, que permite moldagem a partir do seu aquecimento (IMAKE, 2021). Dependendo das modificações em sua composição, o PP pode apresentar diferentes tipos, um dos tipos é o Polipropileno Copolímero, cuja estrutura sofreu uma copolimerização, na qual dois ou mais monômeros estruturalmente distintos foram introduzidos na cadeia polimérica do polipropileno permitindo uma mudança sistemática em suas propriedades (WILHELM, 2000). Desta forma, o PP Copolímero

destaca-se por seu desempenho na resistência ao impacto até a temperaturas baixas (RESINEX, 2024).

Portanto, devido suas propriedades resistentes ao impacto, o termoplástico empregado no projeto do atenuador de impacto proposto é o Polipropileno Copolímero.

Esta substituição da liga de alumínio 1200 - H14 por um material plástico, promove redução no peso do veículo e, por consequência, proporciona uma maior eficiência.

No que tange à aplicação de plásticos, segundo o Regulamento da FSAE, os materiais aplicados no protótipo devem ser metálicos ou não metálicos, desde que atendam a certificação UL94-V0, a FAR25 ou aprovação equivalente (SAE INTERNACIONAL, 2022b), que são certificações que trata sobre a inflamabilidade dos plásticos. Logo, é permissível a aplicação de um termoplástico desde que o polímero seja devidamente certificado.

Assim, diante do material, o método de fabricação previsto para o atenuador proposto é o processo de moldagem por injeção plástica.

De acordo com Galdamez e Carpinetti (2004), “no processo de moldagem plástica por injeção, os grânulos do polímero são fundidos no cilindro da máquina e, em estado líquido, é injetado no molde por um pistão.” Portanto, deverá ser fabricado um molde para o atenuador e através do molde, realiza-se a injeção da peça.

O molde para a injeção eleva o custo do processo pois geralmente consiste em um molde metálico usinado ou fundido, entretanto uma vez adquirido pode ser utilizado em diversas demandas, ou seja, uma vez com o molde, é vasta a quantidade de atenuadores que poderão ser injetados com as diversas possibilidades de aplicação de termoplásticos.

#### 4.1.2 Projeção do *design*:

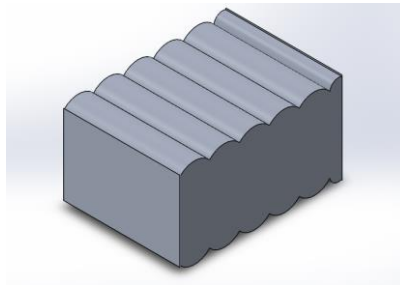
Para a projeção da geometria adotou-se o seguinte fator limitante: o *design* não poderá apresentar cantos vivos, pois na injeção plástica (processo de fabricação) o material pode não preencher estes cantos e por consequência gerar um defeito, segundo Roda (2024), “cantos vivos não são permitidos em peças moldadas”.

Nesta fase de desenvolvimento, torna-se imprescindível manter os limites do escopo do produto, porque citando Baxter (2000) “o projeto conceitual é um processo altamente criativo e deve ir até a proposta dos princípios funcionais e de estilo para o produto como um todo”.

Diante disso, para esta fase foi utilizado o software Solidworks para o desenho CAD das possíveis geometrias idealizadas. Neste processo, o dimensionamento do atenuador deve atender as exigências do Regulamento da FSAE, expostas no tópico 3.1.

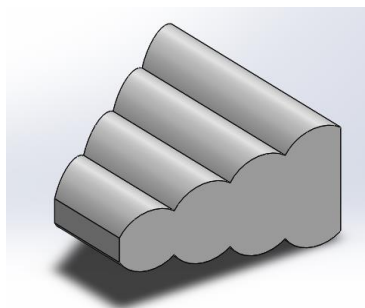
As figuras 9 e 10 ilustram duas ideias iniciais de geometria projetadas no começo do processo criativo.

**Figura 9 - Ideia de atenuador do início do processo**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

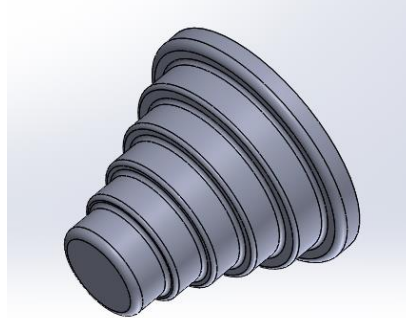
**Figura 10 – Ideia alternativa de atenuador do início do processo**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

Assim, a geometria do atenuador de impacto que apresentou superior perspectiva para inovação e alcance dos objetivos, foi o modelo representado na figura 11, se tornando o *design* final.

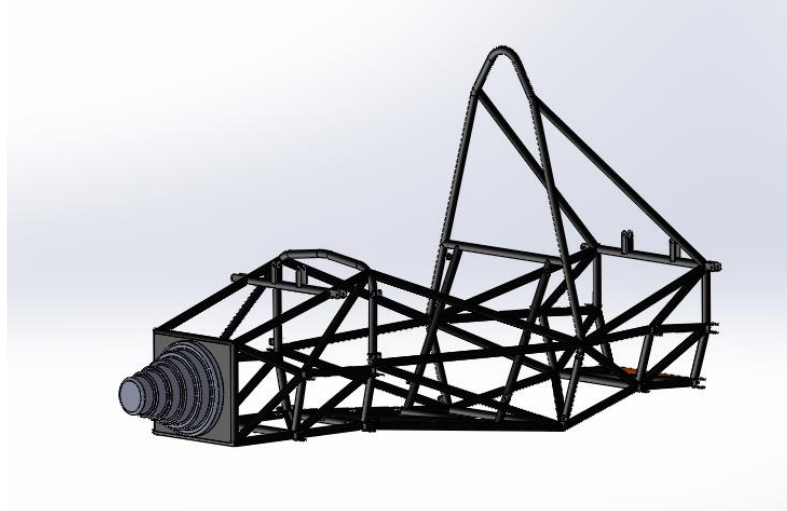
**Figura 11 - Atenuador de impacto de polipropileno proposto**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

Na figura 12 observa-se como o atenuador de impacto de polipropileno proposto fica posicionado no chassi do protótipo da equipe Fórmula CP.

**Figura 12 - Atenuador de impacto de polipropileno no chassi**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

A fixação do atenuador será pelo método de colagem e deverá atender ao estabelecido no artigo F.8.5.3 do Regulamento Fórmula SAE 2023, fixado com adesivos estruturais comprovadamente aprovados e anexados no SES.

Portanto, o *design* para o atenuador de impacto deste projeto de melhoria é uma geometria inovadora e com método de fabricação alternativo. No apêndice B é possível verificar o desenho técnico do modelo.

#### 4.1.3 Análise estática dos atenuadores

Visando comparar a eficiência dos modelos e validar os objetivos do projeto de melhoria, o atenuador de impacto de alumínio da Equipe Fórmula CP e o atenuador de impacto de polipropileno proposto foram analisados pelo método de análise estrutural estática utilizando o software Ansys, aplicando o conceito de elementos finitos.

A análise estrutural estática foi dividida nas etapas de: entrada dos dados dos materiais, aplicação da malha, configurações de análise (do inglês, *analysis settings*) e soluções.

##### 4.1.3.1 Entrada dos dados dos materiais:

Nesta etapa foi adicionado as propriedades dos materiais no software conforme é possível verificar no Quadro 01.

**Quadro 01 - Comparação entre as propriedades dos atenuadores**

| <b>Quadro comparativo</b>                | <b>Atenuador da Equipe Fórmula CP</b> | <b>Atenuador do Projeto de Melhoria</b> |
|--|---------------------------------------|---|
| Material                                 | Alumínio 1200 H14                     | Polipropileno Copolímero                |
| Densidade                                | 2700 kg/m <sup>3</sup>                | 90 kg/m <sup>3</sup>                    |
| Módulo de elasticidade (Módulo de Young) | 69,00 GPa                             | 1,10 GPa                                |
| Coeficiente de Poisson                   | 0,33                                  | 0,42                                    |
| Bulk Modulus (Módulo em Massa)           | 67,64 GPa                             | 2,29 GPa                                |
| Shear Modulus (Módulo de Cisalhamento)   | 25,94 GPa                             | 0,38 GPa                                |
| Massa estimada                           | 2,17 kg                               | 97,14 g                                 |
| Volume                                   | 8,0537 e-004 m <sup>3</sup>           | 1,0794 e-003 m <sup>3</sup>             |

Fonte: INEOS (2014) e Autoria própria (2024)

Nesta etapa, observa-se que o projeto de melhoria apresentou redução de peso em 95,53%, isto impacta diretamente na eficiência do veículo haja vista que quanto maior o peso do veículo maior o consumo de combustível.

#### 4.1.3.2 Aplicação da malha:

Após uma análise de convergência, foi determinado o tamanho do elemento de malha como sendo 0,025 m, aplicado em todo corpo geométrico, conforme indicado na figura 13. Devido às limitações computacionais, optou-se por manter este tamanho de elemento.

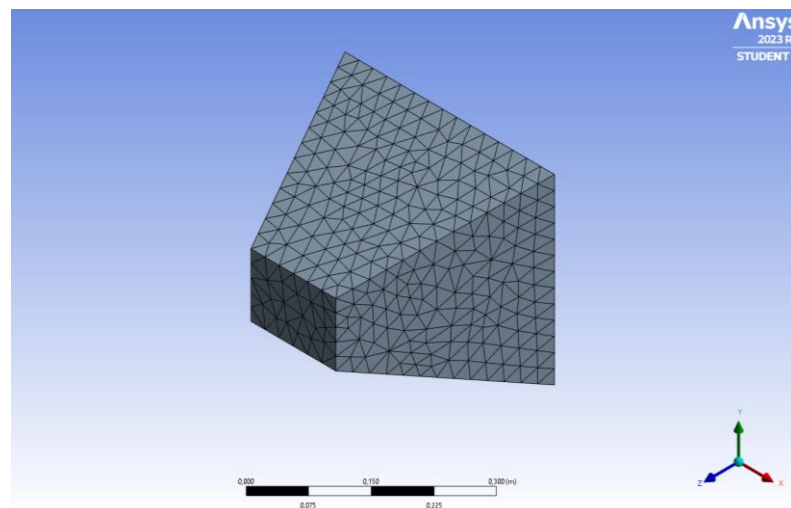
**Figura 13 - Entrada do tamanho do elemento finito no Ansys**

| Details of "Body Sizing" - Sizing       |                    |
|---|--------------------|
| <b>Scope</b>                            |                    |
| Scoping Method                          | Geometry Selection |
| Geometry                                | 1 Body             |
| <b>Definition</b>                       |                    |
| Suppressed                              | No                 |
| Type                                    | Element Size       |
| <input type="checkbox"/> Element Size   | 2,5e-002 m         |
| <b>Advanced</b>                         |                    |
| <input type="checkbox"/> Defeature Size | Default            |
| Behavior                                | Soft               |

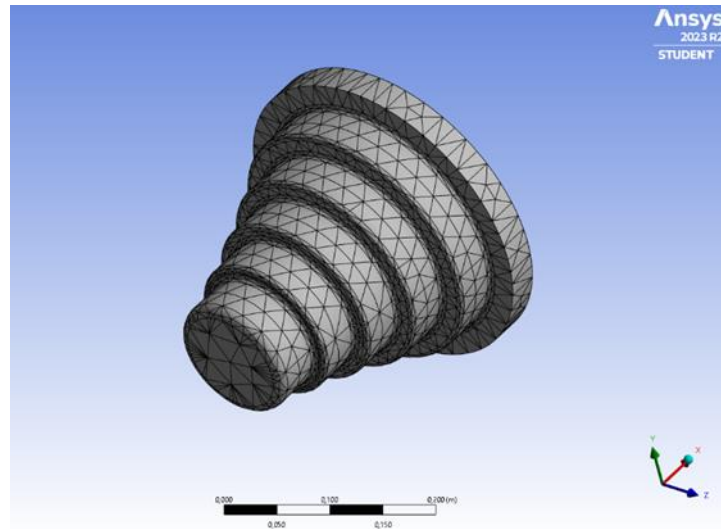
**Fonte: Autoria própria (2024)**

Dessa forma, a malha resultante no atenuador de alumínio pode ser observado na figura 14 e a malha resultante no atenuador de polipropileno na figura 15.

**Figura 14 - Malha do atenuador de alumínio**



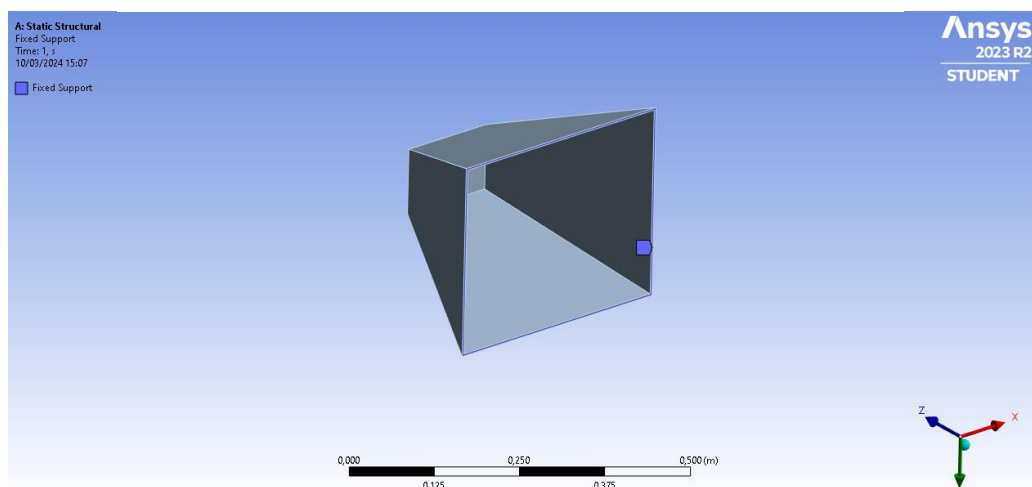
**Fonte: Autoria própria (2024)**

**Figura 15 - Malha do atenuador de polipropileno**

Fonte: Autoria própria (2024)

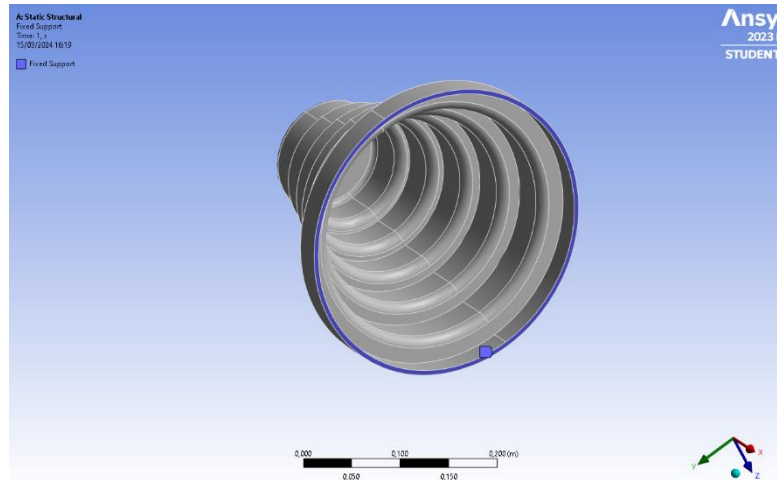
#### 4.1.3.3 Analysis Settings

No “*Analysis Settings*” (“configurações de análise”), a geometria foi fixada na região em que o atenuador de impacto é colado na placa anti-intrusão. As figuras 16 e 17 ilustram as faces fixadas no atenuador de alumínio e no atenuador de polipropileno, respectivamente.

**Figura 16 – Face fixada no atenuador de alumínio**

Fonte: Autoria própria (2024)

**Figura 17 – Face fixada no atenuador de polipropileno**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

Posteriormente, adicionou-se o carregamento o qual a estrutura foi submetida. Aplicou-se uma força externa aplicada no sentido compressivo. Os dados para o cálculo do módulo da força aplicada podem ser verificados através do Quadro 02.

**Quadro 02 – Dados iniciais para o cálculo do módulo da força**

| <b>Grandeza</b>                   | <b>Módulo</b>       |
|-----------------------------------|---------------------|
| Massa (M)                         | 300 kg              |
| Velocidade inicial ( $v_i$ )      | 100 km/h (27,8 m/s) |
| Intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) | 0,2 s               |
| Velocidade final ( $v_f$ )        | 0 m/s               |

**Fonte: Autoria própria (2024)**

O intervalo de tempo considerou uma grandeza próxima à zero, devido à própria definição de que um impacto é um evento que ocorre em um curto instante de tempo.

Calculou-se a aceleração ( $a$ ):

$$a = \frac{|v_f - v_i|}{\Delta t} \quad (7)$$

$$a = \frac{0 - 27,8}{0,2} \quad (8)$$

$$a = -139 \text{ m/s}^2 \quad (9)$$

Aplicou-se a Segunda Lei de Newton:

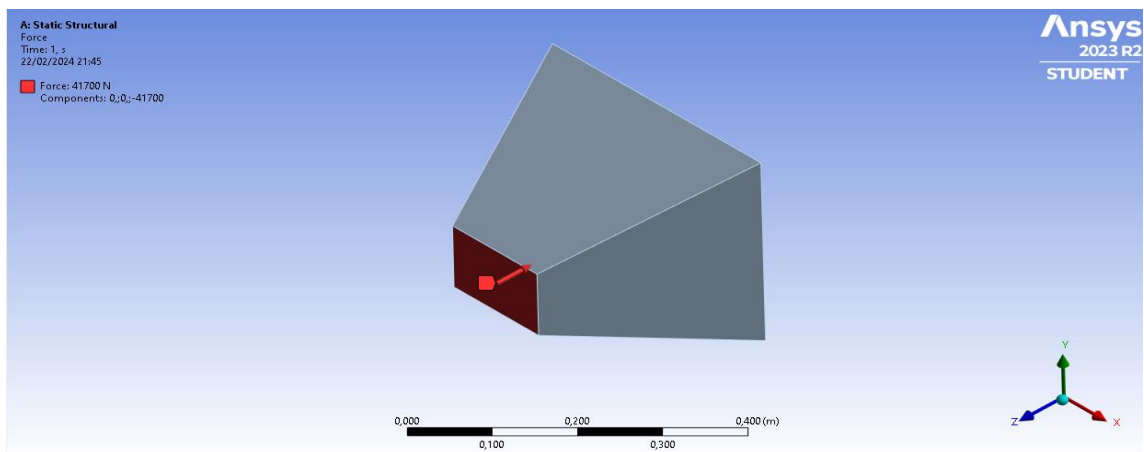
$$\vec{F} = 300 * (-139) \quad (10)$$

$$\vec{F} = -41700 \text{ N} \quad (11)$$

$$\vec{F} = -41,7 \text{ kN} \quad (12)$$

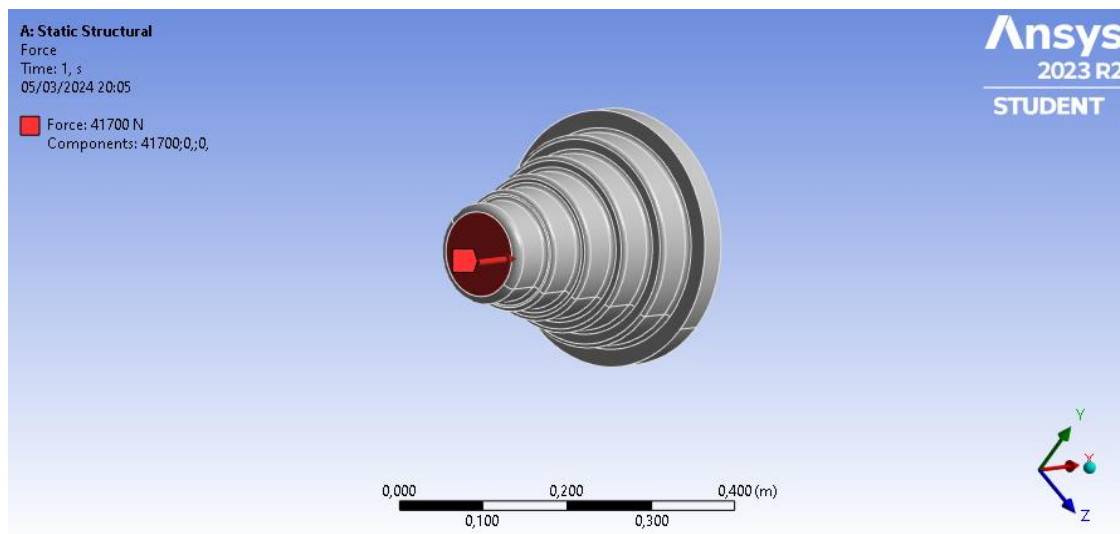
No atenuador de alumínio, a força foi aplicada na direção Z no sentido compressivo conforme figura 18 e no atenuador de polipropileno na direção X no sentido compressivo conforme figura 19. Esta divergência de direções se deve pois na fase de projeto, os atenuadores foram projetados em eixos direcionais diferentes, entretanto não afeta o resultado.

**Figura 18 – Força aplicada na face no atenuador de alumínio**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

**Figura 19 – Força aplicada na face no atenuador de polipropileno**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

Por ser uma análise estática, o Ansys estabelece um step time de 1s para a simulação.

#### 4.1.3.4 Plotagem da Solução

Para fornecer as informações acerca do comportamento do material quando submetido ao carregamento, os parâmetros utilizados para a plotagem da solução foram: deformação total do corpo (do inglês, “*total deformation*”), a tensão equivalente de Von Mises (do inglês, “*equivalent stress*”) e deformação equivalente elástica (do inglês, “*equivalent elastic strain*”). Neste sentido, conforme Ensus (2022), a teoria de Von Mises é a aplicada pois apresenta melhores resultados com dados experimentais, sendo geralmente utilizada nas validações estruturais.

##### 4.1.3.4.1 *Soluções obtidas no atenuador de impacto de alumínio*

Na figura 20 é possível observar os resultados obtidos no atenuador de impacto de alumínio, onde a deformação total máxima foi de 0,003667 m, a deformação elástica equivalente máxima foi de 0,00752 m/m e a tensão equivalente máxima de 0,42 GPa.

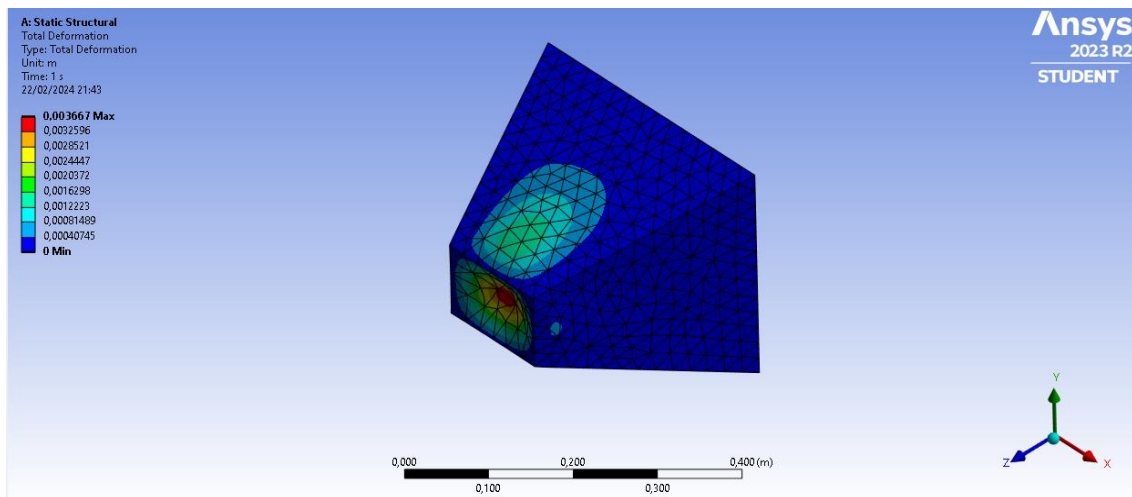
**Figura 20 – Resultados obtidos no atenuador de alumínio**

| Results                   | Minimum     | Maximum     | Units | Time (s) |
|---------------------------|-------------|-------------|-------|----------|
| Total Deformation         | 0,          | 3,667e-003  | m     | 1,       |
| Equivalent Elastic Strain | 8,8566e-005 | 7,5252e-003 | m/m   | 1,       |
| Equivalent Stress         | 5,0068e+006 | 4,2117e+008 | Pa    | 1,       |

Fonte: Autoria própria (2024)

A deformação total máxima resultante pode ser observada na figura 21, que segue abaixo.

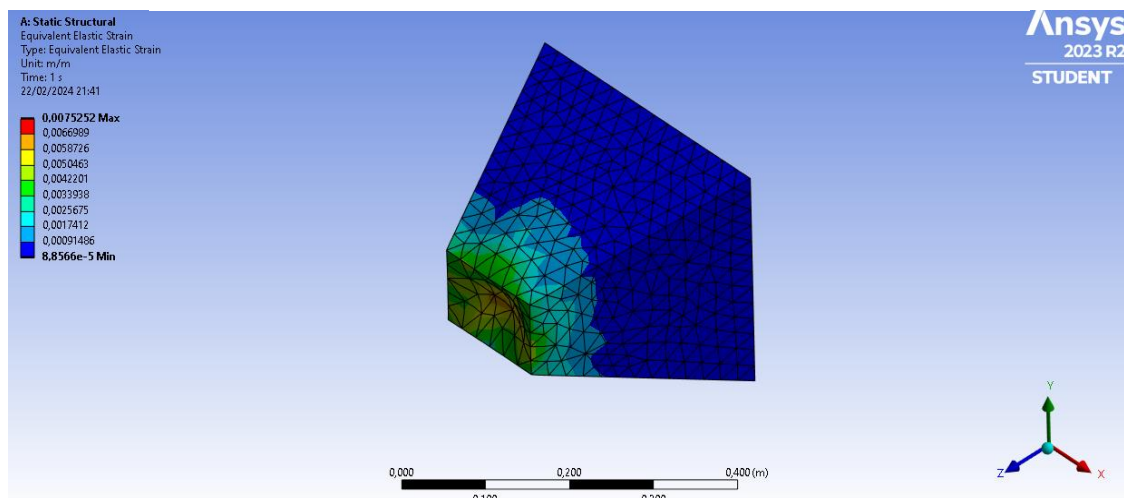
**Figura 21 – Deformação total máxima do atenuador de alumínio**



Fonte: Autoria própria (2024)

Por sua vez, a deformação elástica equivalente máxima resultante pode ser observada na figura 22.

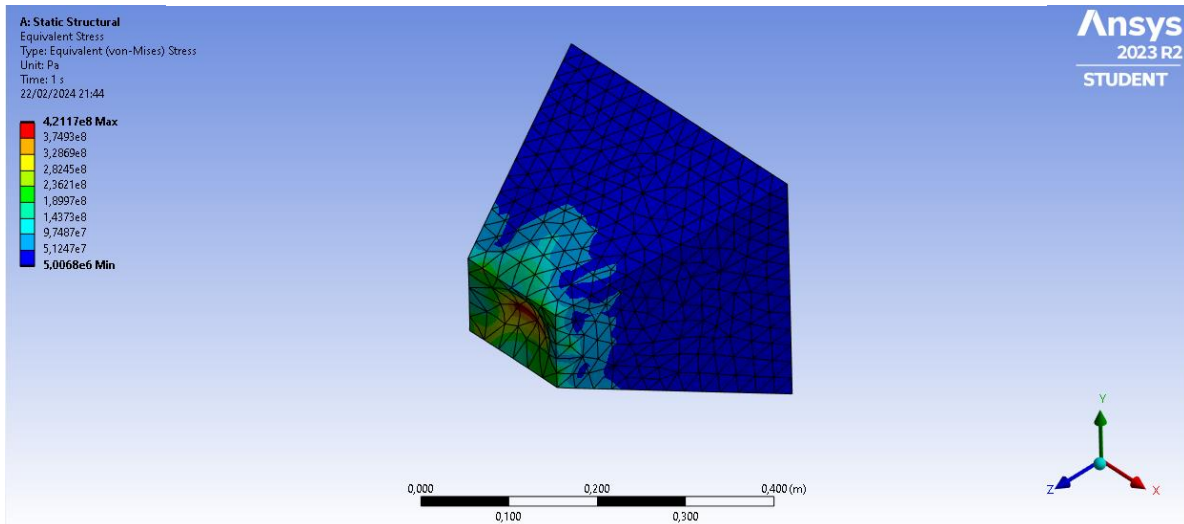
**Figura 22 – Deformação elástica máxima do atenuador de alumínio**



Fonte: Autoria própria (2024)

A tensão equivalente máxima resultante pode ser observada na figura 23.

**Figura 23 – Tensão equivalente máxima do atenuador de alumínio**



Fonte: Autoria própria (2024)

#### 4.1.3.4.2 Soluções obtidas no atenuador de impacto de polipropileno:

A figura 24 apresenta os resultados obtidos no atenuador de impacto de polipropileno, onde a deformação total máxima foi de 0,092 m, a deformação elástica equivalente máxima foi de 0,337 m/m e a tensão equivalente máxima de 0,33 GPa.

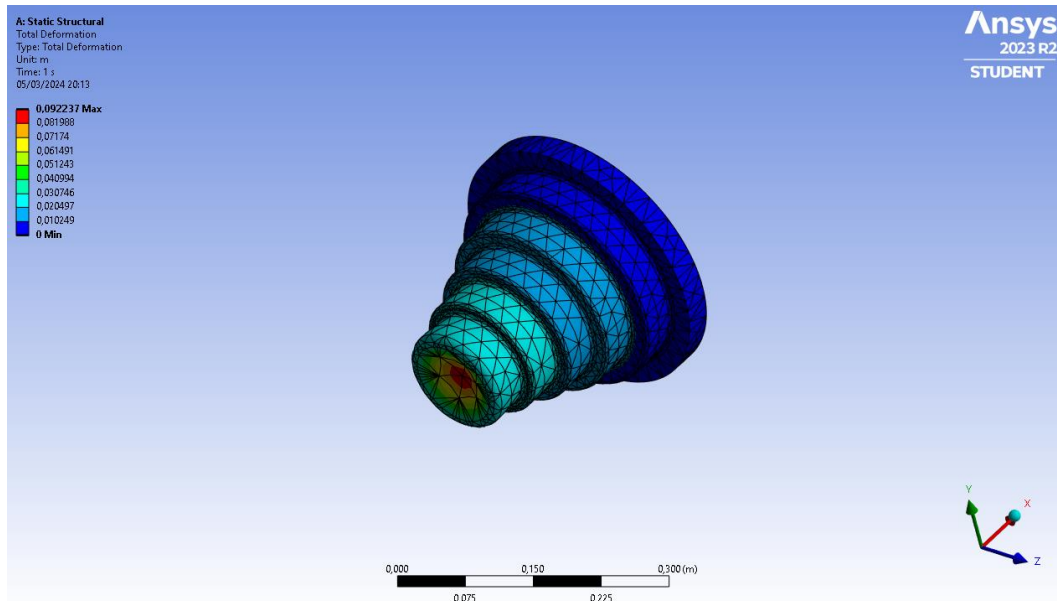
**Figura 24 – Resultados obtidos no atenuador de polipropileno**

| Results                   | Minimum     | Maximum     | Units | Time (s) |
|---------------------------|-------------|-------------|-------|----------|
| Total Deformation         | 0,          | 9,2237e-002 | m     | 1,       |
| Equivalent Elastic Strain | 1,026e-002  | 0,33752     | m/m   | 1,       |
| Equivalent Stress         | 1,6792e+006 | 3,367e+008  | Pa    | 1,       |

Fonte: Autoria própria (2024)

A figura 25 ilustra a deformação total máxima resultante que foi obtida na solução.

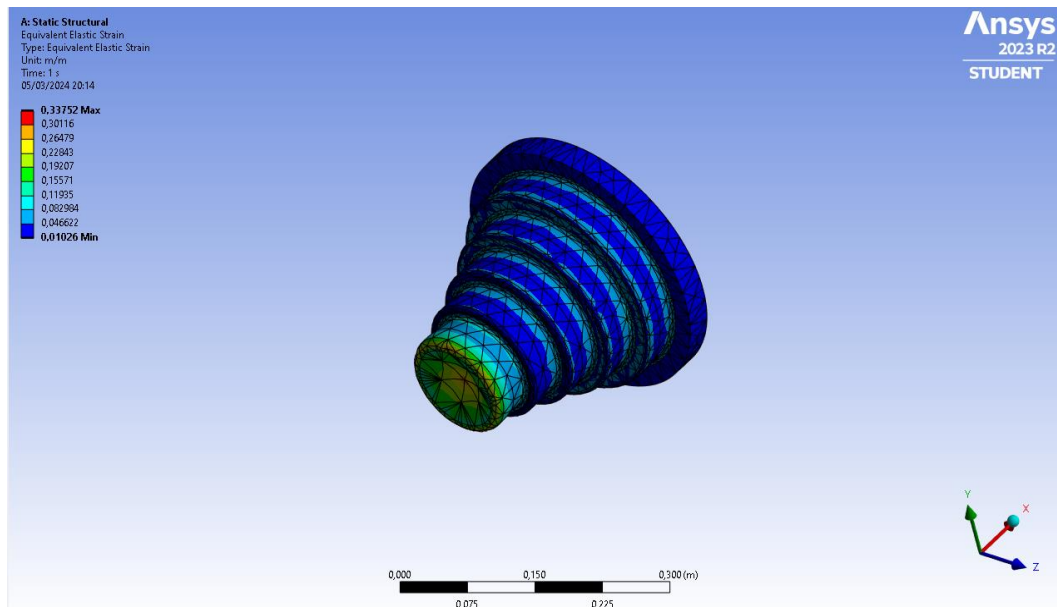
**Figura 25 – Deformação total máxima no atenuador de polipropileno**



Fonte: Autoria própria (2024)

A figura 26 ilustra a deformação elástica equivalente máxima obtida na solução.

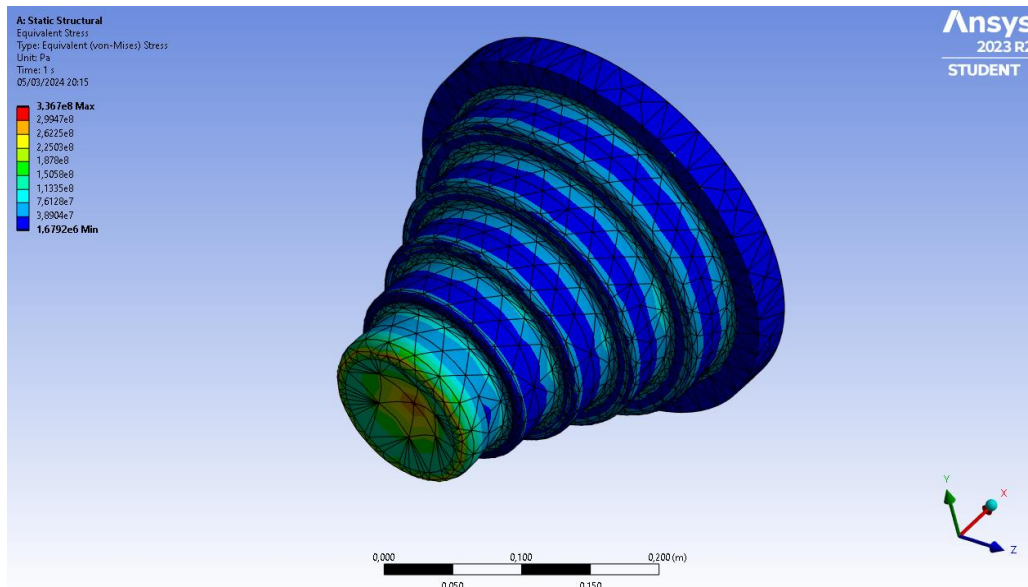
**Figura 26 – Deformação elástica máxima no atenuador de polipropileno**



Fonte: Autoria própria (2024)

Por sua vez, a tensão equivalente máxima obtida na solução pode ser observada na figura 27.

**Figura 27 – Tensão equivalente máxima no atenuador de polipropileno**



Fonte: Autoria própria (2024)

Portanto, em termos da análise estática, a partir dos resultados obtidos é possível aferir que o desempenho do atenuador de impacto de polipropileno apresentou uma maior taxa de deformação e uma menor tensão equivalente quando comparado com o atenuador de alumínio.

## 5 CONCLUSÃO

A aplicação de materiais e métodos alternativos como forma de trazer novas perspectivas, permite que a ciência que engloba os projetos de engenharia se desenvolva rumo à evolução.

Neste sentido, este projeto de melhoria do atenuador de impacto teve como premissa trazer inovação nos modelos atuais das estruturas absorvedoras de impacto previstos para a competição de Fórmula SAE, buscando apresentar um novo modelo de atenuador de impacto com uma geometria leve e com desempenho comparável.

À vista disso, o projeto de melhoria proposto aplicou o plástico polipropileno como material para fabricação, que resultou em uma massa estimada de 97,14 g e, em termos de desempenho, a análise estática resultou em uma deformação total máxima de aproximadamente 0,092 m (25,14 vezes maior em comparação com o atenuador de alumínio), uma deformação elástica equivalente máxima de aproximadamente 0,337 m/m (44,85 vezes maior em comparação com o atenuador de alumínio) e uma tensão equivalente máxima de aproximadamente 336,7MPa (1,25 vezes menor em comparação com o atenuador de alumínio). Portanto, em termos de resiliência, o atenuador de impacto de polipropileno apresentou maior capacidade de absorção de energia no regime elástico.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que seja realizada uma análise dinâmica (também conhecida do inglês como "*explicit dynamics*") juntamente com um estudo de convergência, que não foi possível contemplar neste trabalho devido limitações computacionais, tendo como objetivo avaliar dinamicamente a eficácia do modelo de polipropileno, e desta forma continuar progredindo com a melhoria contínua das estruturas de seguranças veiculares.

## REFERÊNCIAS

ALVES, GILVANIA TERTO. **Avaliação de Absorção de Energia de Impacto Uma Abordagem Baseada em Testes com Estruturas Similares**. PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621120/CA. Rio de Janeiro: 2009.

BAXTE, MIKE R. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. 2. ed., p. 176. São Paulo: Bluncher, 2000.

BINDER, ALAN K.; RAE, JOHN BELL. **Automotive industry**. Encyclopedia Britannica, 2022. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/automotive-industry>. Acesso em: 09 nov. 2022

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. **Segurança veicular: Brasil adotará o crash test para impacto lateral nos automóveis**. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/seguranca-veicular-brasil-adotara-o-crash-test-para-impacto-lateral-nos-automoveis>. Acesso em: 13 de mar. 2024

BSCI (BSCI Energy Impact Systems). **Impact Attenuator**. Disponível em: <https://www.rollbarpadding.com/product/id-48> . Acesso em 14 mar. 2024

ENSUS. (Ensus Advanced Engineering). **Análise de Tensões**. 2022. Disponível em: <https://ensus.com.br/analise-de-tensoes/#:~:text=Crit%C3%A9rio%20de%20Von%20Mises,mais%20utilizado%20nas%20valida%C3%A7%C3%B5es%20estruturais>. Acesso em: 15 mar. 2024

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE L'AUTOMOBILE. **2023 Formula 1 Technical Regulations**. Issue 3, p. 105-118, 19 out. 2022b.

FERNANDES, BEATRIZ L.; DOMINGUES, ANTONIO J. **Caracterização mecânica de polipropileno reciclado para a indústria automotiva**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Paraná, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/ysHfg6JdNRBMLtmSN5Qk9vM/> . Acesso em 15 mar. 2024

FIA. **Formula One World Championship**. 2022a. Disponível em: <https://www.fia.com/events/fia-formula-one-world-championship/season-2022/2022-fia-formula-one-world-championship>. Acesso em: 13 mar. 2024.

FÓRMULA SAE. **Standard Impact Attenuator Design. 2011**. Disponível em: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=193613e4-fff1-4ea9-97ec-eb1c07fbe3c0>. Acesso em 14 mar. 2024

GALDAMEZ, EDWIN V. CARDOZA.; CARPINETTI, LUIZ C. RIBEIRO. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004. Disponível em: <https://scielo.br/j/gp/a/PPRKZZf4NP3sWzLdwQ8gcn/> . Acesso em 14 mar. 2024

HALLIDAY, DAVID. RESNICK, ROBERT. WALKER, JEARL. **Fundamentos de física – Vol. 1: mecânica**. 10.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HEMAIS, CARLOS A. **Polímeros e a Indústria Automobilística**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Macromoléculas e COPPEAD. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/M7SMYkKWh9kmqPGd4D8mhLg/#> . Acesso em: 14 mar. 2024

HIBBELER, RUSSELL CHARLES. **Resistência dos materiais**. 7.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

IMAKE. (IMAKE Equipamentos Termoplásticos). **O que é Polipropileno?**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://imake.com.br/o-que-e-polipropileno/>. Acesso em 14 mar 2024

INEOS. (Ineos Olefins & Polymers USA). **Typical Engineering Properties of Polypropylene**. Abr. 2014. Disponível em: <https://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-olefins-and-polymers-usa/products/technical-information--patents/ineos-engineering-properties-of-pp.pdf> . Acesso em 15 mar. 2024

KUDAV, D.; MALLICK, P. **Crash Performance of Steel, Aluminum and Carbon Fiber Composite Bumper Beams with Steel Crush Cans**. SAE Technical Paper 2021-01-0286, 2021. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2021-01-0286>. Acesso em 14 mar. 2024.

METIN, ISMAIL. **Impact Attenuator (Honeycomb Crashbox)**. 2013. Disponível em: <https://grabcad.com/library/impact-attenuator-honeycomb-crashbox> . Acesso em: 14 mar. 2024

PEARLMAN, MARK D.; VIANO, DAVID. **Automobile crash simulation with the first pregnant crash test dummy**. Michigan: American Journal of Obstetrics and Gynecology, 1996.

PMI. (Project Management Institute). **Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos: Guia PMBOK e o Padrão de Gerenciamento de Projetos**. 7 ed. p.118. 2021

RAMBHAD, KISHOR.; SUTAR, VENKATESHWARA.; SONWANE, PRADIP.; SURYAWANSHI, SHUBHAM.; THIGALE, MAHESH. **A Review on Automotive Bumper Beam Design and Analysis**. Journal of Automotive Engineering & Technology. Volume 5, Issue 1, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/347885768\\_A\\_Review\\_on\\_Automotive\\_Bumper\\_Beam\\_Design\\_and\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/347885768_A_Review_on_Automotive_Bumper_Beam_Design_and_Analysis). Acesso em: 13 mar. 2024

RESINEX. (Resinex Group). **PP – Polipropileno**. Portugal. Disponível em: <https://www.resinex.pt/tipos-de-polimeros/pp.html> . Acesso em: 14 mar. 2024

RODA, DANIEL TIETZ. **Defeitos em Peças Injetadas: Manchas**. Brasil. Disponível em: <https://www.tudosobreplasticos.com/processo/defmanchas.asp> . Acesso em 15 mar 2024.

ROSA, EDISON. **Análise de Resistência Mecânica (Mecânica da Fratura e fadiga)**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

SAE INTERNACIONAL. **Fórmula SAE Rules 2023**. Version 1.0, 01 set. 2022b.

SAE INTERNACIONAL. **Student Events: Fórmula SAE**. Disponível em: <https://www.sae.org/attend/student-events>. Acesso em: 19 out. 2022a.

SHENZHEN (Shenzhen Rapid Direct). **Tipos de plásticos usados na indústria automotiva**. China, 2022. Disponível em: <https://www.rapidirect.com/pt/blog/types-of-automotive-plastics/> . Acesso em 14 mar. 2024

SORIANO, HUMBERTO LIMA. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

TEIXEIRA - DIAS, F.; PINHO-DA-CRUZ, J.; VALENTE, R.A FONTES; SOUSA, R.J. ALVES DE. **Método dos Elementos Finitos: Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia**. Editora ETEP, fev. 2010.

WILHELM, HELENA MARIA. **Modificação do Polipropileno com o Poli (Estireno-b-Butadieno-b-Estireno)**. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Química. Campinas, 2000. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=506480>. Acesso em 14 mar. 2024

WRASSE, ANA CLÁUDIA. ETCHEVERRY, LOUISE PATRON. MARRANGHELLO, GUILHERME FREDERICO. ROCHA, FÁBIO SARAIVA DA. **Investigando o impulso em crash tests utilizando vídeo-análise**. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/vFBkX4Cg9MxwRD66tPxxF6G/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 27 out. 2022.

**APÊNDICE A - Desenho técnico do atenuador de impacto de alumínio**

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

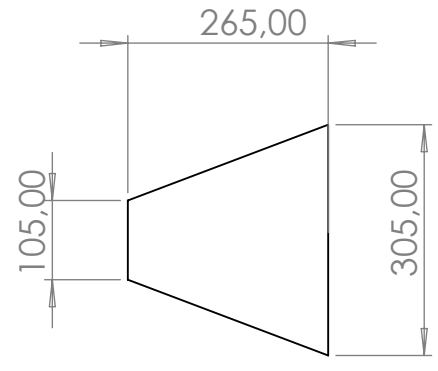
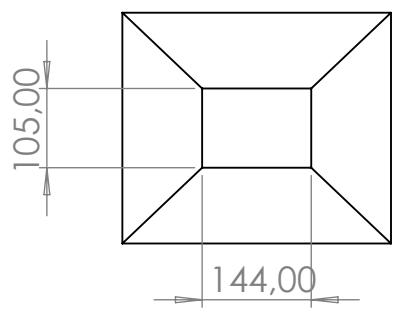
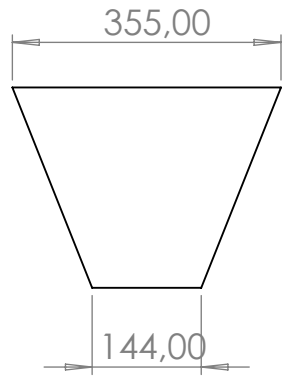
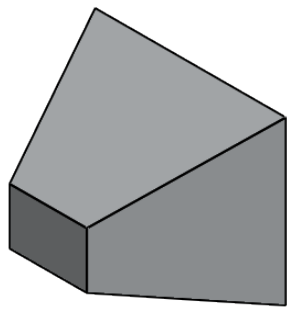
C

B

B

A

A



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
TOLERÂNCIAS: ± 0,05

ACABAMENTO:

REBARBAR E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

|         | NOME       | ASSINATURA | DATA     |
|---------|------------|------------|----------|
| DESEN.  | Thalyta C. |            | 19/03/24 |
| VERIF.  |            |            |          |
| APROV.  |            |            |          |
| MANUF.  |            |            |          |
| QUALID. |            |            |          |

|  |                            |
|--|----------------------------|
| TÍTULO:<br><b>Atenuador de impacto<br/>de alumínio</b> |                            |
| MATERIAL:<br>Alumínio 1200 H14                         | DES. Nº<br>Atenuador TX-02 |
| PESO:  | ESCALA:1:10                |
|  | FOLHA 1 DE 1               |

A4

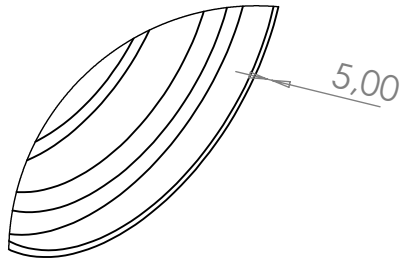
4 3 2 1

## **APÊNDICE B - Desenho técnico do atenuador de impacto de polipropileno**

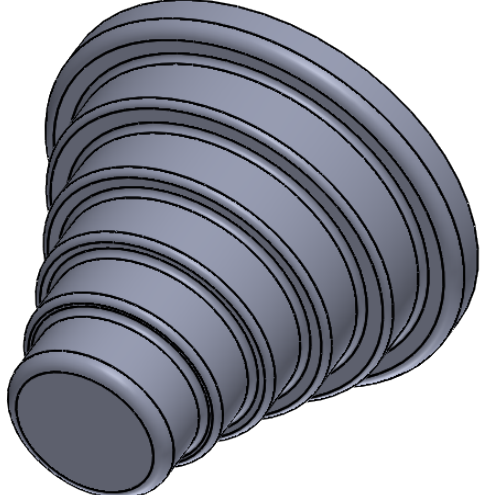
4 3 2 1

F

F

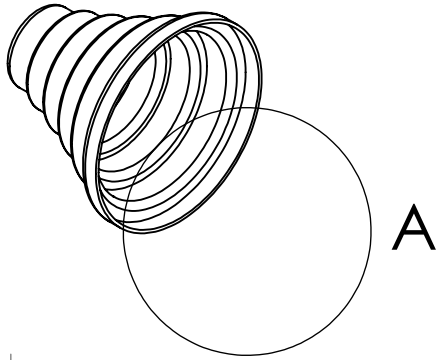
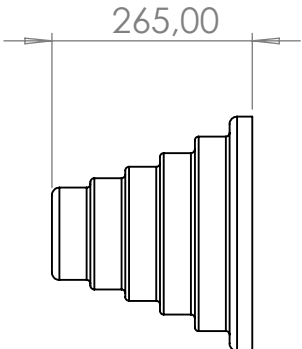


DETALHE A



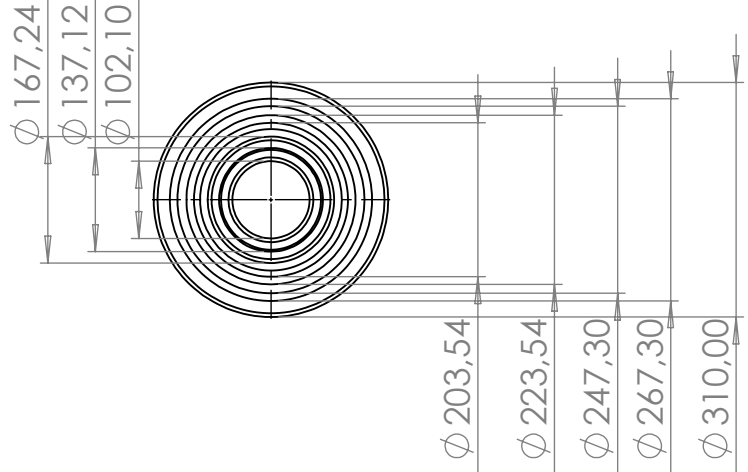
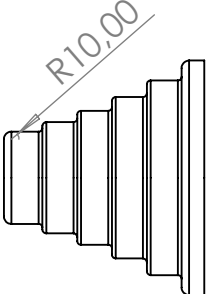
E

E



D

D



C

C

B

B

SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
TOLERÂNCIAS:±0,05

ACABAMENTO:

REBARBAR E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

A

A

|         | NOME       | ASSINATURA | DATA     |
|---------|------------|------------|----------|
| DESEN.  | Thalyta C. |            | 19/03/24 |
| VERIF.  |            |            |          |
| APROV.  |            |            |          |
| MANUF.  |            |            |          |
| QUALID. |            |            |          |

MATERIAL:  
Polipropileno Copolímero

PESO:

|   |              |
|---|--------------|
| TÍTULO:<br><b>Atenuador de impacto de polipropileno</b> |              |
| DES. Nº<br><b>Atenuador PP</b>                          | <b>A4</b>    |
| ESCALA:1:5  | FOLHA 1 DE 1 |

4 3 2 1