

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DALTON MOTTA PEREIRA FILHO
EDUARDO REBOUÇAS DE FIGUEIREDO
LEONARDO BARBOSA CARDOSO**

**ESTUDO DE TESTES PARA ELABORAÇÃO DE UM NOVO
ATENUADOR DE IMPACTO DESTINADO À FÓRMULA SAE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2026**

**DALTON MOTTA PEREIRA FILHO
EDUARDO REBOUÇAS DE FIGUEIREDO
LEONARDO BARBOSA CARDOSO**

**ESTUDO DE TESTES PARA ELABORAÇÃO DE UM NOVO
ATENUADOR DE IMPACTO DESTINADO À FÓRMULA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, da Coordenação de
Engenharia Mecânica, do Centro Federal
de Educação Tecnológica Celso Suckow
da Fonseca

Orientador: Prof. Lais Amaral Alves
Co-orientador: Prof. Bernardo Jose Lima
Gomes.

RIO DE JANEIRO

2026

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

P436 Pereira Filho, Dalton Motta
 Estudo de testes para elaboração de um novo atenuador de
 impacto destinado à fórmula SAE / Dalton Motta Pereira Filho,
 Eduardo Rebouças de Figueiredo [e] Leonardo Barbosa Cardoso.
 — 2026.
 60f. : il.(algumas color). ; enc.

 Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
 Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2026.
 Bibliografia : f. 59-60
 Orientadora: Lais Amaral Alves
 Coorientador: Bernardo Jose Lima Gomes

 1. Engenharia mecânica. 2.Método dos elementos finitos. 3.
 Veículos a motor - Amortecedores . 4. Controle de qualidade. I.
 Figueiredo, Eduardo Rebouças de. II. Cardoso, Leonardo Barbosa.
 III. Alves, Lais Amaral(Orient.). IV. Gomes, Bernardo Jose Lima.
 (Coorient.). V. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

RESUMO

FILHO, Dalton Motta Pereira; FIGUEIREDO, Eduardo Rebouças de; CARDOSO, Leonardo Barbosa. **ESTUDO DE TESTES PARA ELABORAÇÃO DE UM NOVO ATENUADOR DE IMPACTO DESTINADO À FÓRMULA SAE.** 2026. 60 . Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2026

No decorrer da globalização, a importância da mobilidade ganhou proporções mundiais. Por isso, os meios de transporte apresentam inovações, ano a ano, com intuito de aumentar eficiência e reduzir tempo gasto de deslocamento entre um local e outro. Dessa forma, profissionais de diferentes países se integram por meio de organizações como a SAE, com a finalidade de disseminar conhecimento em prol da evolução do ramo. A partir disso, programas estudantis foram criados e o de interesse do presente trabalho é chamado de Fórmula. Dentro desse contexto, para o presente estudo, o foco principal foi utilizar simulação computacional pelo método de elementos finitos para analisar diferentes variações de atenuadores de impacto no formato de tronco de cone oco. Cada variação realizada foi baseada em artigos acadêmicos de forma a fundamentar o modelo que viria a ser simulado onde, dentre as diferenças, envolviam-se espessura do tronco de cone oco, adoção e angulação da aba no primeiro contato, material do atenuador e uma adição de mais um tronco de cone oco menor na parte interna. Após a definição de cada modelo, uma análise progressiva foi realizada de modo a obter os resultados dos parâmetros exigidos pelo regulamento. Com as simulações finalizadas, pode-se observar os diferentes comportamentos de cada modelo, com uns apresentando resultados melhores do que os outros em relação a desaceleração, porém, em questão de absorção de energia, nenhum obteve o parâmetro mínimo exigido, não se tornando viáveis suas utilizações.

Palavras-chaves: Fórmula; Atenuador; Elementos Finitos; Tronco de Cone

ABSTRACT

Throughout the course of globalization, the importance of mobility has gained worldwide proportions. As a result, transportation systems introduce innovations year after year, aiming to increase efficiency and reduce the time spent traveling from one place to another. In this context, professionals from different countries come together through organizations such as SAE, with the purpose of disseminating knowledge in favor of advancing the field. Based on this, student programs were created, and the one of interest in the present study is known as Formula. Within this context, the main objective of this research was to employ computational simulation using the finite element method to analyze different variations of hollow truncated cone-shaped impact attenuators. Each variation was developed based on academic literature in order to support the simulated model, with differences including the thickness of the hollow truncated cone, the adoption and angulation of a flange at the initial point of contact, the material of the attenuator, and the addition of a smaller hollow truncated cone inside the main structure. After defining each model, a progressive analysis was conducted to obtain the results of the parameters required by the regulations. Upon completion of the simulations, different behaviors were observed among the models, with some presenting better results than others in terms of deceleration; however, regarding energy absorption, none of the models achieved the minimum required parameter, making their application unfeasible..

Keywords: Formula; Attenuator; Finite Elements; Hollow Truncated Cone

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Atenuador de impacto Honeycomb	8
Figura 2 - Modelagem de deformação de um atenuador de impacto tronco de cone	9
Figura 3 - Exemplo de malha em elementos finitos	19
Figura 4 - Aplicação da malha de elementos finitos em um freio automotivo	20
Figura 5 - Exemplo de impacto central	21
Figura 6 - Exemplo de impacto oblíquo	22
Figura 7 - Restituição de movimento	25
Figura 8 - Exemplo de impacto plástico	25
Figura 9 - Etapas do pré-processamento.....	30
Figura 10 – Vista “em corte” de tronco de cone e suas dimensões básicas ...	31
Figura 11 - Esquemático do design com protusões e ranhuras escolhidos pelo autor	32
Figura 12 - Demonstração dos ângulos escolhidos para fabricação da aba...	33
Figura 13 – Vista lateral de um modelo para exemplificação da malha criada com elementos de 3 milímetros.....	35
Figura 14 - Relação entre tamanho dos elementos de malha e pico de força encontrado	35
Figura 15 - Condições de contorno para cenário de impacto	37
Figura 16 - Modelos utilizados durante a primeira análise.....	39
Figura 17 - Energia absorvida pelos modelos a0, a30 e a60 com 1,5 mm de espessura.....	40
Figura 18 - Aceleração dos modelos a0, a30 e a60 com 1,5 mm de espessura	41
Figura 19 - Força aplicada pelos modelos a0, a30 e a60 com 1,5 mm de espessura.....	42
Figura 20 - Modelo a60 com 1,5 mm nos tempos 0 s; 0,02 s; 0,04 s	43
Figura 21 - Energia absorvida pelos modelos a0, a30 e a60 com 2,0 mm de espessura.....	44
Figura 22 - Aceleração dos modelos a0, a30 e a60 com 2,0 mm de espessura	45

Figura 23 - Força aplicada pelos modelos a0, a30 e a60 com 2,0 mm de espessura.....	46
Figura 24 - Modelo a60 com 2,0 mm nos tempos 0 s; 0,02 s; 0,04 s	47
Figura 25 - Comparação da energia absorvida pelo modelo a60 de alumínio liga 6061 com os modelos a60 anteriormente testados	48
Figura 26 - Comparação da aceleração do modelo a60 de alumínio liga 6061 com os modelos a60 anteriormente testados	49
Figura 27 - Comparação da força aplicada pelo modelo a60 de alumínio liga 6061 com os modelos a60 anteriormente testados	50
Figura 28 - Representação do modelo a60_2.0 com tronco de cone interno .	52
Figura 29 - Energia absorvida pelos modelos com dois troncos de cone	53
Figura 30 - Aceleração dos modelos com dois troncos de cone.....	54
Figura 31 - Força aplicada pelos modelos com dois troncos de cone	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades da liga 5052 H32.....	13
Tabela 2 – Propriedades da liga 6061.....	14
Tabela 3 - Parâmetros de acordo com tamanho do elemento de malha.....	34
Tabela 4 - Resultados dos modelos a0, a30, a60 e padrão com 1,5 mm de espessura e alumínio Liga 5052.....	41
Tabela 5 - Resultados dos modelos a0, a30 e a60 com 2,0 mm de espessura....	45
Tabela 6 - Comparação dos resultados do modelo a60 de alumínio Liga 6061 com os modelos a60 anteriormente testados.....	49
Tabela 7 - Resultados dos modelos com dois troncos de cone.....	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 FÓRMULA SAE	4
2.1.1 SAE.....	4
2.2 ATENUADOR DE IMPACTO	5
2.2.1 Tipos De Atenuadores	7
2.2.2 Regulamento	10
2.3 ALUMÍNIO	12
2.3.1 Liga 5052	12
2.3.2 Liga 6061	13
2.3.2 Tratamentos Térmicos	15
2.3.4 Têmpera	16
2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	17
2.4.1 Software.....	20
2.5 IMPACTO E SEUS PRINCÍPIOS MECÂNICOS E FÍSICOS	20
2.5.1 Princípios Fundamentais	21
2.5.2 Absorção de Energia	26
2.5.3 Desaceleração	27
3 METODOLOGIA	30
3.1 MODELAGEM	30
3.2 GEOMETRIA	31
3.3 MALHA	34
3.4 MATERIAIS	36
3.5 INTERFACES DE CONTATO.....	36

3.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO	37
3.7 SIMULAÇÃO.....	38
4 RESULTADOS.....	39
4.1 PRIMEIRA VARIAÇÃO - ANGULAÇÃO DA “ABA”	39
4.1.1 Absorção de Energia	40
4.1.2 Aceleração.....	40
4.1.3 Força	41
4.1.4 Análise	42
4.2 SEGUNDA VARIAÇÃO - ESPESSURA DO TRONCO DE CONE OCO ..	43
4.2.1 Absorção de Energia	43
4.2.2 Aceleração.....	44
4.2.3 Força	45
4.2.4 Análise	46
4.3 TERCEIRA VARIAÇÃO - MATERIAL DO ATENUADOR	47
4.3.1 Absorção de Energia	48
4.3.2 Aceleração.....	48
4.3.3 Força.....	49
4.3.4 Análise	50
4.4 QUARTA VARIAÇÃO - DOIS TRONCOS DE CONE	51
4.4.1 Absorção de energia.....	52
4.4.2 Aceleração.....	53
4.4.3 Força	54
4.4.4 Análise	55
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
6 TRABALHOS FUTUROS.....	58
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

A cada ano que passa, o mundo vivencia mudanças no âmbito tecnológico que impactam toda a sociedade. Um dos ramos mais beneficiados é o automotivo, com evoluções nos equipamentos, materiais e serviços, visando sempre a melhora em sua performance. Sendo assim, os veículos têm ficado cada vez mais eficientes e seguros.

Da mesma forma que as grandes empresas buscam se atualizar a todo momento, as universidades também participam desse movimento. Isso ocorre em sua grande parte por meio das equipes de competição associadas à organização internacional chamada SAE. À medida que disputam entre si pela elaboração do melhor protótipo, elas desempenham um papel importante no desenvolvimento da área de mobilidade atualmente.

As equipes que participam dessa modalidade precisam elaborar um projeto complexo de engenharia, em que precisam extrair o máximo de desempenho do veículo. Este mesmo, participará de uma competição no qual serão realizados diferentes tipos de provas, onde cada uma testa uma característica específica, como aceleração, frenagem, entre outros. Portanto, torna-se imprescindível a busca por materiais de qualidade, para que se obtenha a melhor eficiência.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os universitários, em cada projeto realizado, traçam objetivos de como serão fabricados o veículo do projeto, de modo a atingir os melhores resultados de performance, visto que serão colocados à prova em competições com diferentes modalidades de avaliação. Neste momento, há a distinção daqueles componentes que serão fabricados pela própria equipe, ou daqueles que serão adquiridos no mercado. Nota-se que, dentro desse contexto, há componentes que podem ser, ou produzidos, ou comprados.

No entanto, quando se realiza um trabalho acerca de um carro para competição, a performance competitiva não é um único pilar a ser cumprido, também é compreendido todos os parâmetros de segurança. No ambiente da SAE, a entidade

possui um regulamento para cada tipo de componente, em que os índices de segurança precisam ser atingidos para que o carro se torne apto a participar das competições, sejam eles componentes estruturais, ou especificamente focados em segurança.

Neste sentido, é importante observar formas de análise para atestar se determinada peça será comprada, ou se será viável elaborar uma desde o início, atendendo todas as exigências da entidade.

1.2 OBJETIVO

Dessa forma, para o presente trabalho, foi escolhido o atenuador de impacto para que seja o objeto de estudo, visto que é um dos componentes que há essa possibilidade efetiva de se escolher entre adquirir um já certificado pela entidade no mercado, ou se será fabricado inteiramente pela equipe.

A partir disso, dentre os modelos de atenuadores de impactos existentes, foi escolhido o modelo de tronco de cone oco, baseado em estudos acadêmicos, para que fosse avaliado.

Como objetivo principal, visa-se modelar o atenuador através do tipo escolhido, e além disso, incluir outros modelos com variações em sua estrutura ou especificações, para analisar como será o comportamento de cada peça simulada, comparando os resultados com o níveis exigidos pelo regulamento da SAE.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

De modo a iniciar o estudo, serão apresentados os assuntos que possuem relevância acerca do tema abordado, no capítulo de revisão bibliográfica. Nesta dinâmica, poderão ser encontradas informações relevantes acerca da entidade SAE, do atenuador de impacto, onde serão apresentados o modelo já certificado pela organização, Honeycomb, que servirá como referência para o que será ensaiado, assim como o tronco de cone oco, que é o principal foco do desenvolvimento. Além disso, os materiais que serão utilizados como matéria prima para que sejam elaboradas as modelagens, assim como o tipo de simulação que será realizado via software e o princípios do impacto, o principal acontecimento acerca de um atenuador.

Posteriormente, serão feitas 14 modelagens de tronco de cone oco, apresentando variações entre elas como: espessura do tronco de cone oco, inclusão e angulação de uma aba no círculo superior do atenuador, alteração de liga de alumínio utilizada, assim como uma variação na sua estrutura, adicionando um tronco de cone, também oco, na parte interna.

Para finalizar, cada atenuador passará por uma simulação de elementos finitos, de modo a se realizar os testes virtuais com as condições de contorno exigidos pela organização, a fim de obter os parâmetros de segurança, e assim comparar com os valores de referência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão introduzidos conceitos relacionados ao tema central do trabalho para melhor entendimento da finalidade do estudo.

2.1 FÓRMULA SAE

Uma das categorias dentro da SAE mais difundidas pelo mundo. Muitos jovens aficionados por Fórmula 1, com sonhos de trabalhar no setor, acabam se envolvendo nesse programa estudantil. Participando de uma equipe de Fórmula, é possível experimentar na pele como lidar em situações muito próximas ao mercado de trabalho automobilístico.

No Brasil, a modalidade conta com uma competição nacional anual, em que as mais de 40 equipes existentes se encontram no autódromo da cidade de Piracicaba para disputar em provas estáticas e dinâmicas. Estas são divididas entre os 5 dias de competição, seguindo uma progressão de testes, apresentações e inspeções, sendo algumas etapas eliminatórias. Cada prova tem uma pontuação aplicada e ao final, o somatório de todas determina as equipes que obtiveram mais sucesso. As duas melhores se classificam para participar da etapa internacional nos EUA. Na figura, todas as equipes participantes da competição realizada em Michigan.

Todo ano a organização disponibiliza o regulamento atualizado para as equipes. Neste se encontram todos os detalhes para que o projeto seja realizado, obedecendo regras de segurança, eficiência e custos.

2.1.1 SAE

A *Society of Automotive Engineers* foi criada em 1905 nos Estados Unidos por Peter Heldt e Horace Swetland, com objetivo inicial de integrar engenheiros de mobilidade ao redor do globo para uma troca livre de ideias. Em prol do desenvolvimento do setor, engenheiros ao redor do mundo se associam para fazer parte desse conjunto técnico. Atualmente, são mais de 128.000 experts no assunto, tratando diariamente as próximas evoluções tecnológicas para o ramo automobilístico.

Além de fazer o papel de facilitadora técnica para os trabalhadores de diferentes empresas da área, a SAE também criou uma maneira de desenvolver profissionais mais qualificados para ingressar no mercado de trabalho: as chamadas *Collegiate Design Series*, programas estudantis com diferentes propostas. Atualmente, está presente em mais de 500 universidades pelo mundo, contando com mais de 10.000 estudantes. Esses divididos entre as 12 categorias existentes, sendo algumas delas: Fórmula, Baja, Aero.

A afiliação SAE brasileira, nasceu na década de 90 com 1.500 membros associados. Atualmente possui 4.000 associados, marcando presença em 7 estados brasileiros, se espalhando por todas as regiões do país. (SAE, 2026)

2.2 ATENUADOR DE IMPACTO

Quando se participa de competições de veículos automotores, um dos maiores riscos e preocupações acerca de situações perigosas que podem acontecer são as colisões. Em um ambiente onde se testa a eficácia do carro praticamente nos seus limites, muitas vezes, principalmente envolvendo altas velocidades, ou até mesmo levando o motor a sua máxima carga, qualquer tipo de impacto que se tenha pode ser altamente perigoso, tanto para a estrutura presente no projeto, quanto para o piloto da equipe.

Por necessidade, toda a estrutura do carro, como mencionado anteriormente, é, geralmente, produzida através de materiais metálicos resistentes para poder sustentar todas as peças e componentes que formam um veículo da SAE, e proteger acerca dos impactos que podem ocorrer. No entanto, ainda que se tenha essa função de proteção, ela se limita a certas situações, visto que, caso haja colisões, principalmente frontais, toda essa matriz rígida, que tinha como uma de suas finalidades proteger, pode acabar resultando em ocorrências graves, considerando que, a grande quantidade de energia envolvida em uma colisão, por não se deformar, pode se voltar contra a pessoa que está pilotando, ou até mesmo uma peça quebrar e atingir o mesmo.

Neste sentido, um dos principais componentes de um carro SAE, e por consequência, obrigatório, devido a sua importância à segurança, é o atenuador de impacto. Este que se situa na parte frontal do carro e tem como sua principal função

amortecer essa energia provocada e acumulada pela alta quantidade de movimento que se situa durante as provas. O amortecimento é provido através de materiais que possuem alta deformabilidade, e que, através desse comportamento, conseguem absorver boa parte da colisão ocorrida, sem ter maiores consequências para o seu entorno.

Corroborando a necessidade da segurança veicular de um automóvel SAE, Mussulini (2017), em seu trabalho de conclusão de curso, elaborou um desenvolvimento de um atenuador de impacto. Em seu estudo, também é feita a avaliação da segurança veicular quando se tem um impacto frontal no carro em uma barreira rígida. Em seus resultados, foi encontrado uma probabilidade de lesão média de aproximadamente 42% no pescoço, ou em torno de 24% para lesão grave. Tal resultado não chega a correlacionar diretamente à qualidade do atenuador, no entanto, evidencia a necessidade de foco em itens que desempenham uma função de amortecimento, visto seus riscos elevados.

Portanto, para preservar o veículo e a segurança dos passageiros, dispositivos de segurança, como os atenuadores de impacto, são essenciais para reduzir a velocidade de forma gradual (Belingardi et al, 2008). Agrawal et al (2015) reforçam esse conceito quando afirmam que uma forma de aumentar a segurança do motorista e demais passageiros, em caso de colisões, é a utilização de estruturas especiais absorvedoras de impacto já que essas são projetadas para absorver a maior quantidade de energia cinética limitando os picos de desacelerações sentidas pelo corpo humano minimizando os danos sobre o mesmo.

Em termos gerais os atenuadores de impacto dissipam energia através da deformação plástica de sua estrutura. Entre os tipos de deformação possíveis está a flambagem global, conhecida também como flambagem de Euler, que reduz a capacidade de absorção de energia do atenuador. Está, também, a falha catastrófica, caracterizada pela perda súbita da capacidade do material de suportar carga. E a flambagem local, que ocorre quando o material se deforma com dobras distribuídas de forma quase homogênea (Karagiozova et al, 2008; Rikards R et al, 2001). Portanto, para otimizar a absorção de energia do atenuador, a flambagem local é a forma desejável de deformação.

2.2.1 Tipos De Atenuadores

Os atenuadores possuem diversos modelos atualmente no mercado. Dentre eles, podem ser utilizados desde espumas feitas de materiais compósitos, como PVC, até estruturas metálicas especialmente desenhadas para que consigam absorver impactos.

Nesta sessão, serão observados os tipos de atenuadores que serão utilizados como referência ou como objetos de simulação. Dentre eles, pode-se destacar o modelo honeycomb, assim como o atenuador fabricado com uma estrutura cônica.

2.2.1.1 Honeycomb

Das primeiras alternativas de atenuadores de impacto que serão referenciados neste presente trabalho, pode-se citar o Honeycomb. Este modelo é um dos mais conhecidos e utilizados dentre as equipes de fórmula SAE. Tal componente é referenciado pela própria entidade em seu regulamento, já tendo um modelo previamente certificado, dadas certas características que são informadas e podem ser acessadas no site da entidade.

Como dito, por o mesmo já ser certificado e referenciado na norma, ele foi escolhido como uma das opções, pois será utilizado como benchmark para efeito de comparação com outros atenuadores, que possuirão geometrias diferentes, buscando-se uma alternativa além da convencional.

De modo geral, a geometria deste tipo de estrutura é constituída por uma rede de várias células ocas e colunares, normalmente em formato hexagonal, de paredes finas de um dado material. E, por causa de sua aparência similar ao favo de mel de abelhas, recebe este nome. De acordo com Thomas Hales, um dos matemáticos que estudou a geometria dos favos de mel de uma abelha, "Um favo de mel hexagonal é a maneira de encaixar a maior área com o menor perímetro". Ou seja, este formato permite maximizar o tamanho da área oca das células para um determinado perímetro e, como resultado, tem-se uma estrutura abrangente com o mínimo de material necessário. Isso implica em um componente extenso e com baixa densidade.

O material mais usado para fabricar estruturas em favo de mel é o alumínio, porém o aço e compósitos também são utilizados. Em projetos de engenharia, esse

dispositivo se destaca pela sua elevada relação resistência/peso e alta capacidade de absorção de energia em eventos de impacto. De acordo com Pereira (2013) o grande diferencial do honeycomb é o seu comportamento durante uma deformação. Após a fase de deformação elástica, este material inicia uma fase de platô de colapso, onde as paredes das células começam a flambar, dobrar ou amassar progressivamente, enquanto a tensão se mantém praticamente constante.

No entanto a utilização dessa estrutura não é, em muitos casos, viável, pois o acesso a esse material é limitado devido à indisponibilidade de mercado e ao seu elevado valor comercial (TIVELLI, 2012; PEREIRA, 2013).

Seu formato é possível ver na figura 1:

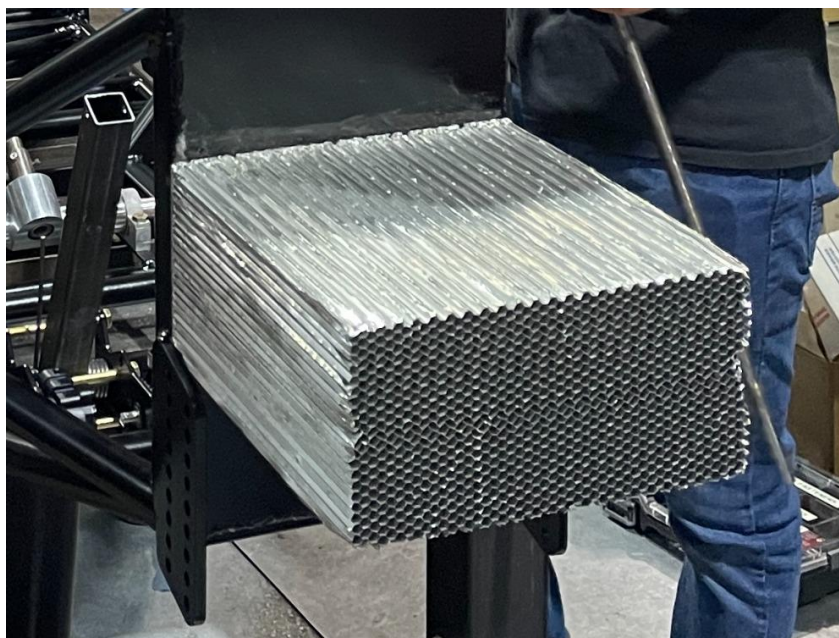


Figura 1 - Atenuador de impacto Honeycomb

Fonte: Walker (2022)

2.2.1.2 Tronco de cone

Outro método de geometria a ser utilizado é o Cônico, onde o atenuador terá como seu formato em tronco de cone oco. Esta geometria aparece como possibilidade dado que já foi previamente utilizada em alguns estudos.

Mussulini (2017), em seu estudo, já citado anteriormente, em um de seus protótipos testados a partir de ensaios numéricos, utiliza este formato para verificar suas propriedades. Nestes ensaios, o modelo apresentou um comportamento

satisfatório frente a ensaios que simulavam ensaio de impacto, tendo os parâmetros que atingiram as regras impostas pela SAE. Dentre as observações citadas no estudo, se pode destacar a baixa deflexão e o seu valor médio de desaceleração abaixo de 20 g.

É possível também citar o trabalho de conclusão de curso feito por Oshinibosi (2012), no qual foi realizado ensaio de elementos finitos, simulando um impacto frontal em uma barreira rígida, a fim de testar a energia absorvida para diferentes formas geométricas de atenuadores de impacto. Dentre eles, também foi testado o formato de tronco de cone, onde, em seus resultados, apresentou a maior energia absorvida específica, considerando os 4 tipos de geometrias testadas (tronco de pirâmide, cilíndrica, tronco de cone e quadrado). Neste resultado, destaca-se que o tronco de cone, apesar de não ter tido a maior energia absoluta absorvida, devido a sua menor massa, possibilitou a alta energia específica absorvida.

Na figura 2 pode ser visto uma representação de padrões de deformação de um atenuador de tronco de cone dado à diferentes cenários.

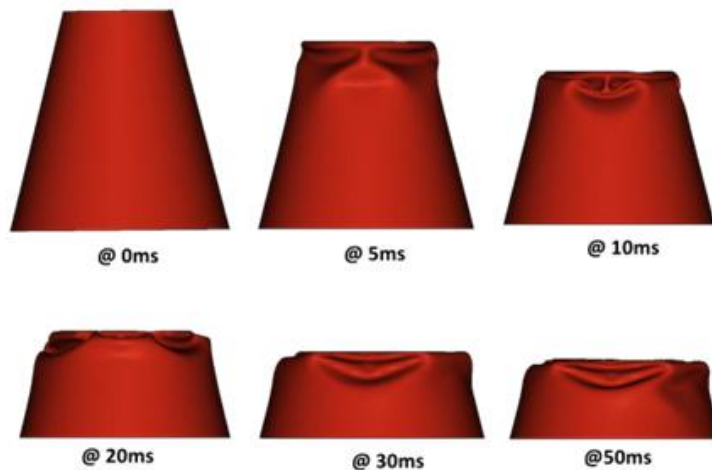


Figura 2 - Modelagem de deformação de um atenuador de impacto tronco de cone

Fonte: Oshinibosi (2012)

Outro fator relevante que leva à utilização deste tipo de modelo é a facilidade com que pode ser fabricado, devido à sua geometria simples, fator que ajuda as equipes de fórmula SAE.

2.2.2 Regulamento

Para que o atenuador de impacto seja aprovado, ele precisa atender uma série de demandas feitas pela entidade. O livro de regras de Fórmula SAE possui uma sessão completa para especificar todas as obrigações que uma equipe deve seguir.

Importante ressaltar, que, os critérios que serão citados de maneira mais detalhada nesta sessão, serão aqueles que possuem influência ou tenham direto impacto nos modelos a serem submetidos aos ensaios de impacto virtuais. Não serão abordados regras que envolvem questões de acoplamentos aos carros e/ou placas de proteção. Esta premissa visa focar apenas no quesito da geometria, que é o que será avaliado, frente às situações de colisões.

Em seguida, como informado no capítulo de introdução deste trabalho, destaca-se a possibilidade de utilizar um modelo padronizado pela Fórmula SAE ou um modelo que seja customizado e testado pelas próprias equipes, que precisarão atender a regras específicas. Nota-se que os modelos certificados podem ser dois tipos, ou um atenuador honeycomb ou uma espuma de PVC, sendo o primeiro o objeto de estudo escolhido para efeito de comparação com os modelos alternativos de atenuadores que serão simulados posteriormente.

Para um modelo custom, dado que não segue os padrões do honeycomb certificado pela norma, precisa seguir uma série de regras de modo a ser validado pela organização. São elas:

- Precisa ter pelo menos 200 mm de comprimento, orientado ao eixo longitudinal do chassi.
- Necessita de altura mínima de 100 mm, perpendicular ao chão, e largura mínima de 200 mm, paralela ao chão.
- Modelos de custom de honeycomb que possuem diversos segmentos precisam possuir painel contínuo entre eles.

Estas regras evidenciam como um atenuador customizado precisa ter de medida para atender aos critérios da entidade. Além delas, podem-se citar também os parâmetros para verificação de impacto frontal do carro.

Para os atenuadores certificados, já existem dados que verificam o carregamento total suportado por cada modelo, já para os customs, precisam ser conforme medidos nos testes, sejam eles, ensaios mecânicos reais ou virtuais. Para os modelos certificados, são esses os números:

- Espuma Padrão SAE – 95 kN
- Honeycomb Padrão SAE – 60 kN

Já para os modelos personalizados, o teste precisa considerar as condições de contorno informadas:

- Considerar a massa do veículo de 300 kg
- Velocidade de 7 m/s no impacto

Estes critérios precisarão obter os seguintes resultados:

- Desaceleração média do veículo precisa estar abaixo de 20 g e não ter um pico maior do que 40 g
- A energia absorvida precisa ser maior do que 7350 J

Importante salientar, que, segundo o regulamento da entidade, para atenuadores de impacto customizados, os testes possuem validade de apenas 1 ano. Dentro desse procedimento, os testes considerados válidos pela SAE são os de impacto dinâmico, necessitando serem realizados através de trenó de impacto, ou pendulo, ou queda livre. Além disso, a norma também exige a utilização dos aparatos da universidade, sendo necessária a supervisão por um profissional. Já para os atenuadores padrão da SAE, não é necessário realizar os ensaios.

Este estudo não apresenta ensaios reais, e sim, simulações através de software, que serão detalhados mais à frente.

2.3 ALUMÍNIO

Para este estudo, serão empregadas as ligas de alumínio 5052 e 6061 na fabricação do atenuador de impacto. A escolha da primeira liga baseia-se no fato de ser o material utilizado no atenuador honeycomb certificado. Desta forma, padronizando a matéria prima a ser utilizada na produção, é possível corroborar a tese de que a geometria, em si, infere no desempenho do componente. Já a liga 6061, mostra-se como uma alternativa ao material padrão já utilizado, e assim observar as consequências de uma mudança a partir da composição do alumínio.

2.3.1 Liga 5052

A liga de alumínio 5052, se caracteriza por ter o magnésio como principal elemento de liga que compõe o material. Barony et al (2024), destaca em seu artigo publicado, onde verifica o comportamento mecânico de chapas finas de liga de alumínio 5052, a característica desta item como não sendo possível tratá-lo termicamente, tendo as suas melhoras de propriedade a partir de deformações a frio. Outra característica importante citada, é o fato de apresentar um bom comportamento para soldagem, o que facilitaria a produção de uma peça para atenuar, por exemplo.

Em questão à composição do material, segundo o mesmo estudo, a liga 5052 fica na faixa central em relação à quantidade de magnésio na composição. A liga com menor quantidade é a 5005, e possui um intervalo de 0,5 e 1,1 de Mg, enquanto a maior, 5086 (dentre as originais), possui 4,0. A 5052 em si possui entre 2,2-2,8. Neste sentido, pode-se dizer que a liga escolhida entre numa faixa intermediária. Com isso, Barony et al. (2024), evidencia que o Mg possui um baixo limite de solubilidade à temperatura ambiente na matriz, e que caso tenham um alto teor, podem afetar as propriedades mecânicas do material.

No quadro 1, pode ser visto a composição de elementos de liga para a liga 5052:

LIGAS	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Al
AA 5052	0,06	0,26	0,06	0,06	2,41	0,20	0,01	Restante

Quadro 1 - Composição de elementos de liga da Liga 5052

Fonte: Barony (2025)

Outro fator importante abordado é o fato do material ser acessível, e portanto, possuir um baixo custo, o que leva a uma vantagem competitiva. Este fato se mostra essencial quando observado a conjuntura de uma equipe de Fórmula SAE, tendo em vista o caixa restrito.

Além disso, Azevedo et. Al. (2017), realizou um estudo para analisar o comportamento microestrutural de uma liga de alumínio 5052 em sistemas de blindagem. Foi destacado a alta taxa de deformação do material, assim como sua capacidade de alta resistência mecânica, alta plasticidade e alta tenacidade. Elementos essenciais para um atenuar de impacto. Como resultado, Azevedo et. Al. (2017), evidencia que a liga de fato consegue obter uma alta taxa de plasticidade para grandes taxas de deformação.

Este estudo corrobora a utilização deste tipo de material para situações de alta impacto, devido a sua boa performance mecânica frente a ação de impacto, ainda que sejam de naturezas diferentes.

Na tabela 1, é possível, observar as propriedades da liga 5052:

Tabela 1: Propriedades liga 5052 H32

Densidade (g/cm³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração máxima (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Coefficiente de Poisson
2,7	70,3	228	193	0,33

Fonte: Aerospace Specification Metals (2025)

2.3.2 Liga 6061

A liga 6061, diferente da 5052, possui os principais elementos de liga, além do magnésio, o silício. Ambos se misturam formando um composto intermetálico, no qual a sua precipitação promove o endurecimento da liga. Além disso, também diferente da liga anterior, esta classe pode ser tratada termicamente, fato comum às ligas da classe 6xxx. Sua aplicação em geral é utilizado em estruturas e transportes. (MARTINS , 2008).

Ferreira et al. (2023), realizaram um estudo de modo a analisar micro estruturalmente esta liga em aplicações de quadro de bicicletas em situações de falha. No presente trabalho, é destacado a grande capacidade versatilidade da liga, tendo como vantagens sua boa conformabilidade, para formas simples e complexas, boa

resistência à corrosão, assim uma resistência mecânica de média a alta, e boa tenacidade. Além disso, sua capacidade de tratamento térmico, citado anteriormente, também contribui para a potencialização destes aspectos, tornando esta liga um material muito atrativo. Outro fator evidenciado, que também é muito importante para a realidade de uma equipe de fórmula SAE, mas não é o tema principal em questão, é o seu custo-benefício, se tornando viável para o caixa apertado dos times.

Quando o material é submetido a um tratamento térmico de solução seguido de um tratamento de têmpera e revenido, suas propriedades mecânicas atingem seu nível mais alto e tornam-se muito boas em comparação com outras ligas de alumínio (FERREIRA et al, 2023)

Como resultado, Ferreira et al (2023), concluíram que a utilização da liga 6061 se mostrou positiva, visto que a falha que ocorreu não foi devido ao material base, onde o mesmo apresentou boa homogeneidade e propriedades mecânicas, tendo a quebra sendo ocorrida pela soldagem.

Complementando, Ribeiro et. Al (2005), ao analisarem o comportamento elastoplástico cíclico da liga 6061, destacaram a boa relação entre resistência mecânica/peso, ressaltando sua utilização em veículos de transporte. Esta característica também se mostra essencial para um veículo de competição, onde consegue reduzir o peso da carroceria, aumentando assim sua eficiência, e por consequência, a performance, além de aliar boas propriedades mecânicas importante para a segurança. Como resultado do artigo publicado, os pesquisadores também puderam concluir que o material possui uma alta resistência a fadiga para ciclos de curta duração quando se comparado a outras ligas de alumínio.

Na tabela 2, é possível observar as propriedades da liga 6061:

Tabela 2: Propriedades liga 6061

Têmpera	Densidade (g/cm³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração máxima (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Coefficiente de Poisson
T4	2,7	68,9	241	145	0,33
T6	2,7	68,9	310	276	0,33

Fonte: Aerospace Specification Metals (2025)

2.3.2 Tratamentos térmicos

Dado que um dos materiais a serem utilizados é tratado termicamente, como é a liga 6061, é importante abordar o que são estes procedimentos e quais as suas implicações no processo de escolha do material.

Pode-se determinar tratamento térmico como sendo os procedimentos, podendo ser a partir do aquecimento ou a partir do esfriamento de uma liga, necessários para alterar as suas propriedades mecânicas, a estrutura metalúrgica ou sua tensão residual. (REINKE, 2017)

Para as ligas de alumínio que são passíveis de tratamento térmico, os elementos de liga em sua composição têm como característica uma alta solubilidade com o aumento da temperatura, enquanto isso se inverte à temperatura ambiente. Por isso, os elementos como cobre, magnésio e silício ajudam melhorando as propriedades mecânicas por meio de envelhecimento e solubilização. (SCHUITEK, 1997)

Em poucas palavras, Souza (2006) descreve a solubilização como o tratamento preliminar no qual o material irá ser aquecido de modo a fazer com que os elementos possam se dissolver na matriz da liga, tornando-a monofásica. Complementando, Schuitek (1997) destaca que o procedimento ocorre por volta dos 500°C, podendo ser realizado dentro de um forno, denominada solubilização formal, ou até mesmo em prensa. Após isso, é realizada o resfriamento brusco, afundando em água, para que os elementos de liga fiquem retidos na microestrutura do material.

Para o envelhecimento, pode-se utilizar métodos denominados como natural ou artificial, onde o primeiro é através da temperatura ambiente, e o último podendo ser feito a temperaturas elevadas. Após o procedimento de resfriamento abrupto, o aumento da resistência da liga se dá a partir da formação de uma distribuição de partículas de segundas fases na matriz de alumínio, construindo barreiras às movimentações de discordâncias durante a deformação, aumentando a resistência. (SILVA, 2020)

2.3.4 Têmpera

Schuitek (1997) também faz uma importante ressalva onde denomina a têmpera como uma condição ou estado produzido por um tratamento térmico, produzindo propriedades específicas. Esta observação torna-se importante ao momento em que se diferencia a “têmpera dos aços” da têmpera citada, informando que são diferentes procedimentos.

Com isso, para o alumínio, há algumas designações básicas de têmpera que podem diferenciar cada produto e podem ser vistas no quadro 2:

Sigla	Designação
F	Fabricadas – pouco controle sobre as condições de processo e pequena garantia das propriedades obtidas
O	Recozidas – de modo a obter o máximo de amolecimento e máxima conformabilidade do material
W	Solubilizadas
H	Encruadas – aplicadas a ligas não tratáveis termicamente
T	Tratadas Termicamente

Quadro 2 – Designações básicas

Fonte: Schuitek (1997)

Para os tratados termicamente, há ainda as subdivisões que diferenciam os tipos de tratamentos utilizados, nos quais podem ser vistos no quadro 3:

Sigla	Tratamento
T1	conformado a quente, resfriado e envelhecido naturalmente
T2	conformado a quente, resfriado, encruado e envelhecido naturalmente
T3	solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente
T4	solubilizado e envelhecido naturalmente
T5	conformado a quente, resfriado e envelhecido artificialmente
T6	solubilizado e envelhecido artificialmente
T7	solubilizado e estabilizado (superenvelhecido)
T8	solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente
T9	solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado
T10	conformado a quente, resfriado, envelhecido artificialmente e encruado

Quadro 3 – Tipos de ligas tratadas

Fonte: Schuitek (1997)

2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para realizar a simulação dos testes que são necessários para se aprovar um atenuador de impacto, foi escolhido o método de elementos finitos para que seja possível obter os parâmetros dos modelos a serem ensaiados.

O Método dos Elementos Finitos consiste em utilizar dados matemáticos para discretizar um meio contínuo em pequenos elementos, tendo como objetivo manter as mesmas propriedades do original. Sua origem remete ao século XVIII quando Gauss propôs o uso de funções de aproximação para resolução de problemas matemáticos. No entanto, seu uso só foi consolidado no século XX com o avanço da tecnologia, onde permitiu que se desenvolvesse mais esta metodologia através da computação. Sua utilização atualmente remete a diversos segmentos, principalmente em Engenharia, Medicina, Odontologia e entre outros. (LOTTI ET AL., 2006)

Segundo Azevedo (2003), para Engenharia de Estruturas, o Método de Elementos Finitos tem como finalidade a determinar o estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária que está sujeito a ações exteriores. Trazendo para o âmbito experimental de uma peça de atenuador de impacto, torna-se um importante procedimento que consegue simular uma possível situação real de prova, onde se é possível observar os potenciais resultados de um forte impacto na peça estudada.

Azevedo (2003) também destaca a importância de se realizar variações nas características das peças a serem simuladas, visto que se obterão diferentes análises e resultados, onde será possível traçar uma melhor composição com os dados obtidos, solucionando o problema imposto. Este procedimento também se torna essencial para analisar não só mecanicamente, mas como também economicamente, um problema já citado anteriormente na realidade de equipes de fórmula SAE.

Para que seja possível ter a resolução do problema, o sólido estudado é dividido em sub-regiões de geometrias mais simples como triângulos, quadrados, tetraedros e cubos. Através desta maneira, é possível contornar o que seria uma forma complexa para se ensaiar, tornando- em vários problemas simples de serem resolvidos. Estas regiões são limitadas por vértices, que podem ser chamados de nós, onde possuem um tamanho definido, dando razão ao nome de elementos finitos. Estes, por si, são interligados formando um conjunto chamado de malha. (CANUT, 2014)

Canut (2014), também destaca em sua análise a influência do refino da malha para a resolução do problema enfrentado. Quanto maior a quantidade de elementos finitos presente, maior será a precisão do ensaio simulado. Isso acontece pois, quando o tamanho do elemento finito é perto de 0, a quantidade presente na malha tende a infinito, resultando em uma resolução numérica que se aproxime da solução analítica.

Na figura 3 é possível observar uma exemplificação de uma malha utilizada para uma modelagem de elementos finitos:

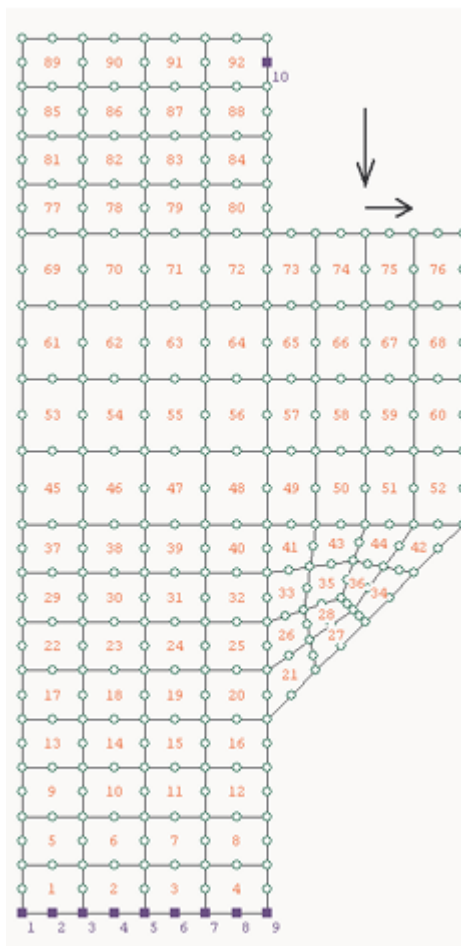


Figura 3 - Exemplo de malha em elementos finitos

Fonte: Azevedo (2003)

Nota-se que, ainda que seja um método bastante desenvolvido, há de se ter ressalvas sobre a sua validação. Rade (2011), em seu estudo sobre elementos finitos, deixa claro que a resolução através do método citado parte de simplificações onde se utilizarão dados matemáticos para representar comportamento de sistemas físicos. Erros como a não consideração de efeitos mecânicos, erros de discretização devido a uma geometria complexa, conhecimento impreciso de alguns comportamentos etc., podem causar distorções nos dados obtidos.

Na figura 4 é possível observar como é utilizada na prática uma malha para uma simulação de elementos finitos em um freio automotivo:

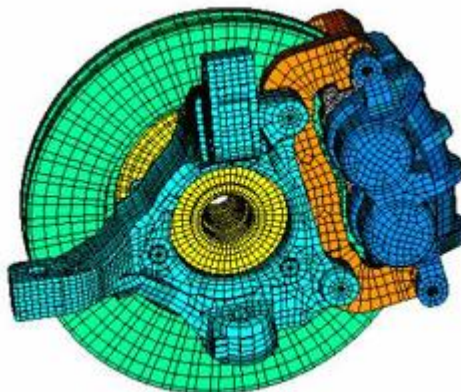


Figura 4 - Aplicação da malha de elementos finitos em um freio automotivo

Fonte: Rade (2011)

Ainda assim, Babuska et al (2001), em seu livro sobre a confiança de métodos de elementos finitos, endossam que esta metodologia já é bastante madura, onde a engenharia, matemática e ciência computacional estão completamente entrelaçadas. Além disso, destacam também a grande quantidade e a riqueza da dados que este método pode gerar, tornando-o mais robusto.

2.4.1 Software

Para o devido ensaio virtual que será realizado, o software utilizado será o *Altair Hypermesh*, produto este que já é utilizado amplamente por pesquisadores e estudantes para realizarem simulações utilizando o método de elemento finitos. Eleation, uma academia CAD líder na Índia, já destacou em artigos a capacidade de gerar malhas de alta qualidade através de ferramentas e recursos poderosos, permitindo resultados bastante precisos.

2.5 IMPACTO E SEUS PRINCÍPIOS MECÂNICOS E FÍSICOS

Para o presente estudo, também se faz essencial entender o que acontece e como se é quantificado o principal acontece que precede a atuação de um atenuado de impacto. Segundo Hibbeler (2011), o impacto pode ser descrito quando dois corpos

colidem entre si em um intervalo de tempo muito curto, resultando em grandes forças exercidas por eles.

2.5.1 Princípios Fundamentais

Em geral, há dois tipos de impacto: o central e o oblíquo. O primeiro ocorre quando o movimento do centro de massa de dois corpos que irão se colidir está ao longo de uma linha que também passa pelo centro de massa desses mesmos corpos. Esta linha é comumente chamada de linha de impacto, e que possui um ângulo de 90° com o plano de contato. Para o último, acontece quando há um ângulo entre essa linha de impacto e os corpos.

Na figura 5 pode-se observar uma representação de um impacto central:

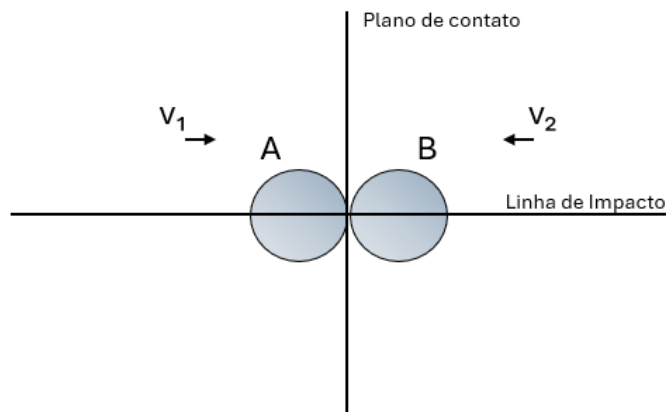


Figura 5 - Exemplo de impacto central

Fonte: Hibbeler (2011)

Na figura 6 é possível observar um esquematização de um impacto oblíquo:

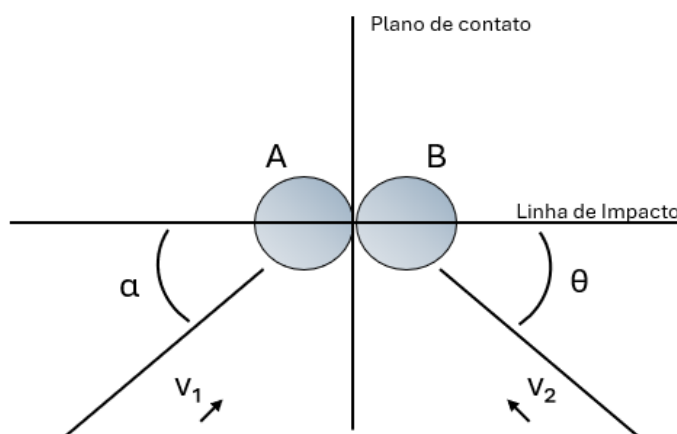


Figura 6 - Exemplo de impacto oblíquo

Fonte: Hibbeler (2011)

Hibbeler (2011) assume alguns padrões para que se analise um impacto. No princípio, os corpos a entrarem em colisão precisam ser deformáveis ou não rígidos. Dessa forma, eles passarão por um período de deformação no qual irão impor um ao outro um impulso de deformação de magnitudes iguais, porém, de sinais opostos, podendo ser denotado como $\int P \, dt$.

Assim que os corpos atingirem o momento máximo de deformação, ambos irão se movimentar com a mesma velocidade, tendo em vista que o movimento relativo é zero.

Então, ocorrerá o período de restituição, onde os corpos voltarão a sua situação original, ou deformadas permanentemente. Neste momento, ocorre o impulso de restituição, denotado $\int R \, dt$, também de magnitude igual, mas de sinais opostos, distanciando os corpos entre si. Porém, é importante afirmar que, o $\int P \, dt$ sempre será maior do que o $\int R \, dt$.

Nas maiores das situações, se sabe os detalhes do pré impacto, ou seja, o quanto de velocidade estão cada corpo, e a grande questão torna-se calcular o quanto será a final de cada. A partir disso, poderá ser traçado outros parâmetros. Ainda assim, de modo a iniciar este cálculo, é importante ressaltar que a quantidade de movimento dos corpos é conservador, pois os impulso internos e de deformação e restituição cancelam-se. Desta forma, pode-se determinar:

$$m_A (v_A)_1 + m_B (v_B)_1 = m_A (v_A)_2 + m_B (v_B)_2 \quad (1)$$

Em seguida, para que seja possível encontrar as velocidades finais de cada corpo, é necessário obter uma segunda equação, que pode ser encontrada através da aplicação do princípio do impulso e quantidade de movimento de cada corpo. Nesse momento, separa-se a fase de deformação da de restituição. Com isso. Pode-se destacar:

$$m_A (v_A)_1 - \int P dt = m_A v \quad (2)$$

E para a fase de restituição:

$$m_A v - \int R dt = m_A (v_A)_2 \quad (3)$$

Com isso, através da razão destas duas expressões, acha-se o coeficiente de restituição. Considerando o corpo A:

$$\frac{\int R dt}{\int P dt} = \frac{v - (v_A)_2}{(v_A)_1 - v} = e \quad (4)$$

Analogamente, pode-se realizar de maneira similar a movimentação da equação para o corpo B, resultando em:

$$\frac{\int R dt}{\int P dt} = \frac{(v_B)_2 - v}{v - (v_B)_1} = e \quad (5)$$

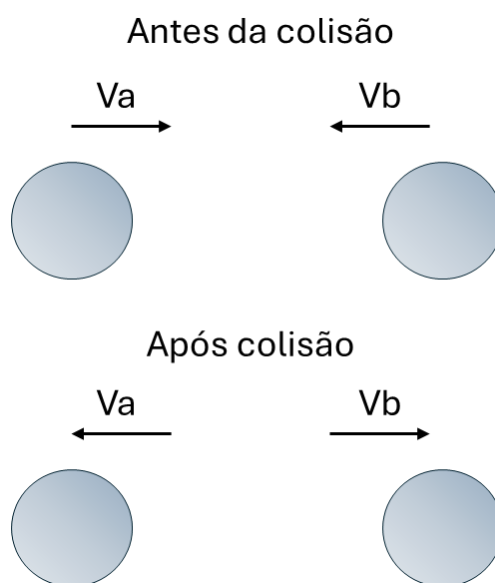
Finalizando, ao retirar a incógnita v da equação, tem-se:

$$e = \frac{(v_B)_2 - (v_A)_2}{(v_A)_1 - (v_B)_1} \quad (6)$$

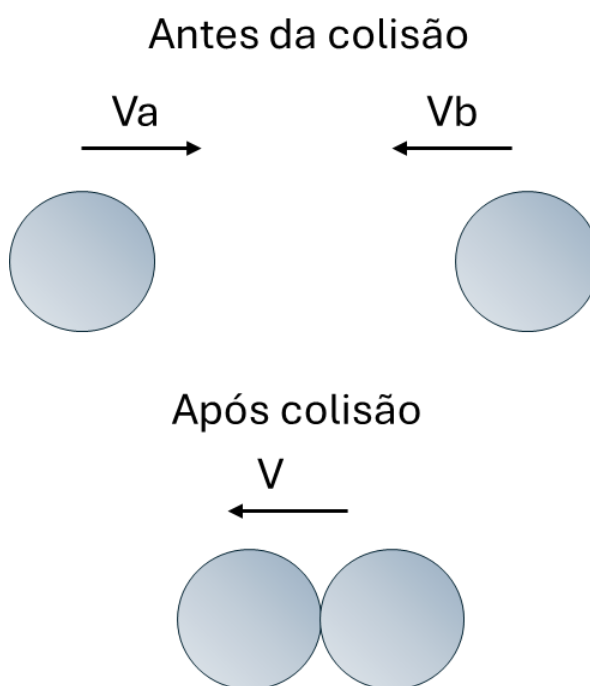
Hibbeler (2011), destaca que o coeficiente de restituição, como se pôde ver através da fórmula 6, é diretamente ligada à velocidade dos corpos. A razão pode ser determinada como a velocidade relativa de separação entre as partículas logo após o impacto sobre a velocidade relativa de aproximação imediatamente antes do impacto. Por isso, é importante ressaltar que o coeficiente só é plenamente confiável quando se conhece as velocidades envolvidas na situação. Com isso, o e assume valor entre zero e um, trazendo algumas características:

- Impacto elástico ($e = 1$)
- Impacto plástico ($e = 0$)
- Impacto parcialmente elástico ($0 < e < 1$)

No caso do impacto elástico, acontece quando o impulso de deformação ($\int P dt$) for igual ao impulso de restituição ($\int R dt$), ou seja, toda energia que é armazenada durante a colisão, é devolvida. Em termos práticos, após a colisão, os corpos mantêm a mesma velocidade do momento do impacto, porém, em sentidos opostos. Como pode ser visto na figura 7:

**Figura 7 - Restituição de movimento****Fonte: Autor**

Já para o impacto plástico, quando ocorre, o impulso de restituição é zero, fazendo com que os corpos permaneçam juntos após a colisão, com uma velocidade em comum. Como pode ser visto na figura 8:

**Figura 8 - Exemplo de impacto plástico****Fonte: Autor**

Já para o caso do impacto parcialmente elástico, pode-se dizer que, após a colisão, parte da energia é dissipada através da deformação, ou outras formas, como energia térmica e sonora. (FAVRETTO, 2020)

Dado um breve resumo sobre como ocorre o impacto, e seus princípios, inserindo-se o contexto da fórmula SAE, mostra-se importante também abordar as principais variáveis que são medidas pelo regulamento para garantia de segurança, e apresentar o método de cálculo de cada uma.

Dentre os parâmetros que são envolvidos em uma colisão, os que são medidos para validação, como apresentado anteriormente, são a quantidade de energia absorvida pelo atenuador e a desaceleração máxima do carro. Para o primeiro, precisa absorver pelo menos 7350 J e o último não ultrapassar o pico de 40 g e ultrapassar a média de 20 g, como visto na seção 2.2.2.

2.5.2 Absorção de energia

Tivelli (2012), em sua dissertação no qual tem como objetivo analisar a absorção de impacto por latas de alumínio, destaca que, em uma dinâmica de colisão veicular, a energia cinética do corpo é dissipada por meio da deformação da estrutura. Tal informação denota a importância do atenuador de impacto ter o comportamento correto durante o seu uso. Outro dado importante citado, é o de que essa deformação será ocasionado pela energia cinética do carro, corroborando a decisão do regulamento assegurar um nível padrão para a categoria.

Ao se aprofundar em energia, Tivelli (2012) descreve tal grandeza como a capacidade de realizar trabalho e vencer resistências. Adicionalmente, destaca que trabalho é definido como a transferência de energia de um corpo a outro. Além disso, para colisões veiculares, a energia potencial não se mostra tão importante, devido a sua associação a altura, enquanto a energia cinética, por estar ligada ao movimento, é diretamente ligada a colisões.

Para determinar a energia cinética de um corpo, usa-se a fórmula 7:

$$E_c = \frac{m.v^2}{2} \quad (7)$$

Outro fato que é importante destacar observando a fórmula 7, é a influência que a velocidade possui na definição desse parâmetro, visto que sua variável tem um impacto que é determinado ao quadrado quando se comparado a massa do corpo. Tivelli (2012) cita que uma colisão veicular acontecendo a 60 km/h pode ser quase 50% mais forte do que um veículo de mesma massa a 50 km/h.

Através da fórmula 7, justifica-se o fato de que o regulamento padroniza o cenário determinando que o veículo possua 7 m/s em ensaios, e que se deve considerar uma massa de 300 kg, pois, ao realizar a equação, a conta resulta em 7350 J, que é o parâmetro considerado mínimo para ser aceite pela entidade ao aprovar um atenuador custom, considerando um crashtest, onde o carro colidirá com um objeto estático.

2.5.3 Desaceleração

Ao considerar o projeto do atenuador acoplado ao veículo como uma massa pontual (m), através da segunda lei de Newton, temos:

$$F = m.a \quad (8)$$

Com o intuito de satisfazer as condições impostas pelo regulamento da fórmula SAE, a desaceleração máxima e média, sofrido pelo veículo, precisam estar abaixo dos valores de 40 g e 20 g, respectivamente. Logo,

$$F_{max} = m.a_{max} = 300 \text{ Kg} \cdot 40 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 117,2 \text{ kN}$$

$$F_{med} = m.a_{med} = 300 \text{ Kg} \cdot 20 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 58,9 \text{ kN}$$

Ou seja, para que o atenuador seja aprovado, os valores para as forças máxima e média, experimentadas pelo mesmo durante o evento de impacto, não devem exceder 117,2 kN e 58,9 kN, respectivamente.

Como o impacto do objeto de estudo será simulado com o auxílio de *software*, a aceleração máxima e energia absorvida, envolvidas no evento da colisão, serão fornecidas pelo próprio *software*.

2.5.3.1 Aceleração média

A média de uma função qualquer $f(x)$ dentro de um intervalo $[i,j]$ é encontrada através da seguinte equação:

$$f_{med} = \frac{1}{j-i} \int_i^j f(x) dx \quad (9)$$

Logo, ao considerar a aceleração durante o impacto como uma função do tempo, $a(t)$, e sabendo a duração do impacto, é possível encontrar a desaceleração média por meio da seguinte equação:

$$a_{med} = \frac{1}{t_f - t_o} \int_{t_o}^{t_f} a(t) dt \quad (10)$$

A integral da aceleração em um dado intervalo de tempo $[t_o, t_f]$ é igual à variação da velocidade naquele mesmo intervalo:

$$\int_{t_o}^{t_f} dv = v(tf) - v(to) = \int_{t_o}^{t_f} a_{med} dt \quad (11)$$

Como $t_o = 0$, $v(to) = v_o$ e $v(tf) = 0$, a equação acima pode ser simplificada da seguinte maneira:

$$a_{med} = \frac{0-v_o}{t_f-0} = \frac{-v_o}{t_f} \quad (12)$$

A velocidade inicial (v_o) é igual a 7 m/s , valor fornecido pelo regulamento da fórmula SAE.

Assim, através dos dados fornecidos após a simulação computacional e das equações discutidas acima, é possível avaliar o desempenho do atenuador.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 MODELAGEM

Dentre os inúmeros softwares capazes de realizar simulações, o escolhido para este trabalho foi o Altair 2025. Ele possui diversas interfaces voltadas a elementos finitos, como LS-DYNA, Radioss, Optistruct, Abaqus, entre outros. O selecionado para realizar todas as fases do trabalho foi o Radioss, visto que já havia sido utilizado por um dos integrantes em ocasião profissional.

A fase de pré-processamento, correspondente à criação dos modelos de elementos finitos, foi realizada na plataforma Altair Hypermesh e seguiu algumas etapas, conforme figura 9.

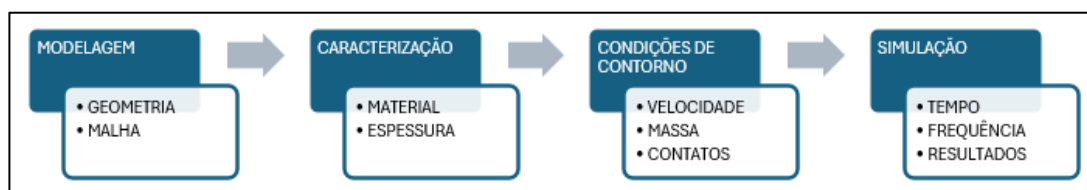


Figura 9 - Etapas do pré-processamento

Fonte: Autor

Inicialmente, cada componente teve sua geometria desenhada. Para representação do impacto, superfícies foram utilizadas na construção do atenuador, da placa anti-intrusão e da barreira. Em seguida, é criada a malha de elementos bidimensionais, também conhecidos como elementos de casca, e definidas as características como material e espessura. Além disso, o tipo de contato entre os componentes é estabelecido de acordo com as interações a que são submetidos, e são incluídas as condições de contorno como massa inicial, velocidade, restrições de movimento. Por fim, são especificados os parâmetros em que o processamento irá ocorrer, como o tempo total da análise, a frequência dos cálculos e quais resultados serão entregues. Todas essas etapas são obrigatórias para configuração completa da simulação no software.

A fase de processamento é feita em sua totalidade pelo computador com base em todas as informações definidas anteriormente.

O pós-processamento ocorreu na Altair Hypergraph e Hyperview. Ele consistiu em consolidar os arquivos gerados e extrair gráficos para análise dos resultados.

3.2 GEOMETRIA

As superfícies dos três componentes da colisão foram traçadas no próprio Hypermesh. A barreira de colisão não possui requisitos de teste, então foi assumida como um corpo retangular rígido que não sofre deformação e serve apenas para parar o movimento.

A placa anti-intrusão tem dimensões que variam de acordo com cada projeto, sendo apenas a espessura determinada via regulamento. Para o trabalho, foi utilizada uma chapa de alumínio com 4 milímetros de espessura, largura de 300 e altura equivalente.

Já o atenuador, sendo o componente com mais restrições, teve sua geometria baseada no design de tronco de cone feito por Oshinibosi.

Em seu estudo, o autor utiliza a técnica do Design de Experimentos (DoE) para maximizar o número de variações e otimizar o resultado em função de variáveis e restrições impostas. Sua primeira análise variou a espessura e o diâmetro menor (respectivamente “e” e “d” na figura). A altura “h” e o diâmetro maior “D” foram fixados em 200 mm.

Na figura 10 é possível observar a geometria básica de um tronco de cone, através da sua vista em corte:

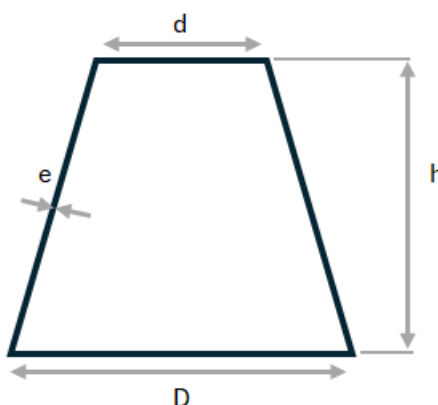


Figura 10 – Vista “em corte” de tronco de cone e suas dimensões básicas

Fonte: Autor

Como objetivo da otimização, Oshinibosi (2012) definiu a maximização de Energia Específica Absorvida, que consiste em energia absorvida por unidade de massa (J/kg). Ele faz isso, pois entende que para um atenuador ser eficiente em um protótipo automobilístico, não basta suportar o impacto, mas também deve ser o mais leve possível.

Além disso, implementou duas restrições para o estudo: a energia total absorvida deve ser maior ou igual a 7.350 J (regulamento da SAE); e a força máxima de seção menor que 90 kN.

Após as iterações no programa Hyperstudy, não conseguiu chegar a uma solução que satisfizesse a limitação mínima de absorção de energia, atingindo o valor máximo de 7.192,34 J. O atenuador otimizado resultou então nas dimensões de 1,515 mm de espessura e 93 mm de diâmetro menor.

Tendo em vista que o experimento inicial de Oshinibosi (2012) não satisfaz o requisito mínimo de energia absorvida, o presente trabalho utilizou as dimensões resultantes apenas como base para uma geometria primária. Para facilitar o processo de fabricação e busca de material no mercado, a espessura inicial foi arredondada para 1,5 milímetros e o diâmetro para 95.

Em busca de uma modificação original na estrutura do componente, buscou-se inspiração em modelos propostos por artigos acadêmicos. Tanto Oshinibosi (2012) quanto Özyurt utilizaram ranhuras ou protusões em troncos de cone, com objetivo principal de induzir flambagem local durante o impacto.

Na figura 11 é possível ver um esquemático do design:

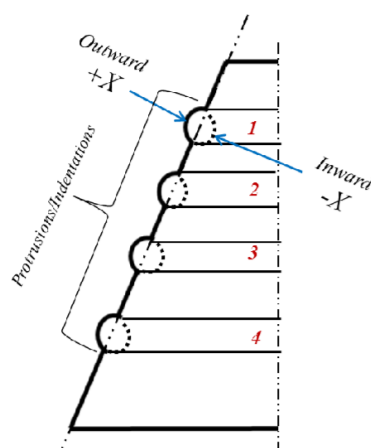


Figura 11 - Esquemático do design com protusões e ranhuras escolhidos pelo autor

Fonte: Oshinibosi, 2012

Ambos os autores consideraram seus designs finais satisfatórios, no entanto, não focaram no processo de fabricação do protótipo. O método mais comum para obtenção de troncos de cone com chapa metálica se chama calandragem, no entanto, esse processo que consiste na conformação entre rolos impede a obtenção dos sulcos requeridos.

Sendo assim, na tentativa de conciliar tanto a eficiência na absorção de impacto quanto na fabricação do componente, a adição de uma pequena aba no topo do tronco de cone foi a alternativa pensada. A explicação para o acréscimo de material com diferentes níveis de angulação está na suposição de que ele provocaria deformação localizada e aumentaria a capacidade de absorver energia. As inclinações de 0°, 30° e 60° com relação ao eixo de altura do cone foram arbitrariamente escolhidas como ponto de partida para testar o novo design. A figura 12 mostra os três diferentes ângulos testados.

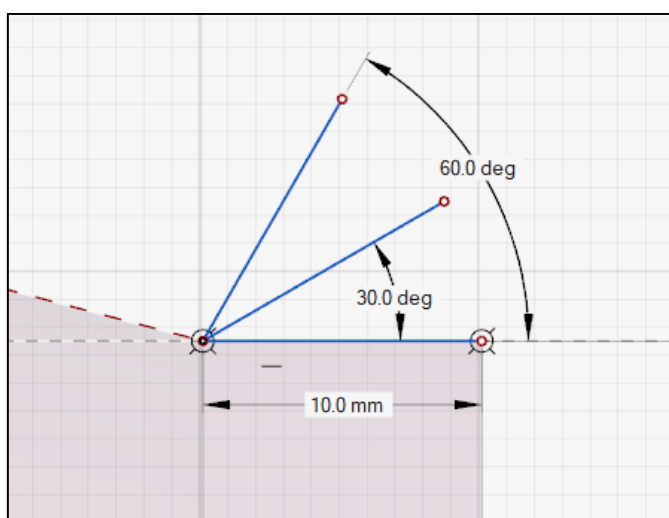


Figura 12 - Demonstração dos ângulos escolhidos para fabricação da aba

Fonte: Autoria própria

Quanto ao processo de fabricação antes mencionado, entende-se que esse protótipo é passível de desenvolver inicialmente pela calandragem e, posteriormente, com ajuste da “aba” utilizando conformação manual (martelo) ou uma simples prensa. Apesar de ser um método impreciso, entende-se que não é necessário ter uma exatidão no protótipo final. Existem outros processos para essa finalidade que obteriam maior precisão como o repuxamento, porém é mais complexo e tem custo elevado.

3.3 MALHA

Para determinar a dimensão ótima dos elementos de malha, um estudo de convergência foi realizado. Utilizando um dos modelos como base, testes foram simulados variando apenas o tamanho da malha. A tabela 3 apresenta as características de cada uma.

Tabela 3 - Parâmetros de acordo com tamanho do elemento de malha

Elementos (mm)	Proporção (máx)	Jacobiano (mín)	Nós	Trias
2	1,373	0,850	25118	0,7%
3	1,532	0,852	11285	1,1%
4	1,349	0,848	6504	1,4%
6	1,399	0,824	2846	2,2%
8	1,457	0,834	1632	2,9%
10	1,395	0,819	1060	3,7%

Fonte: Autoria própria

Aplicando as mesmas condições de contorno determinadas pela SAE, compararam-se os resultados de pico de força encontrados em cada ocasião, apresentados na figura abaixo. Pode-se notar que, a partir da dimensão de 4 milímetros, os valores de força passam a convergir, indicando aumento da exatidão. Dessa forma, optou-se pela medida de 3 milímetros para os elementos (vide figura 13), visto que concilia precisão com tempo de simulação aceitável (cerca de 20 minutos). Caso a escolha fosse pelos elementos ainda menores, o tempo necessário para realizar cada processo ultrapassaria uma hora.



Figura 13 – Vista lateral de um modelo para exemplificação da malha criada com elementos de 3 milímetros

Fonte: Autoria própria

Na figura 14 há a relação de tamanho dos elementos de malha e o pico de força encontrado:

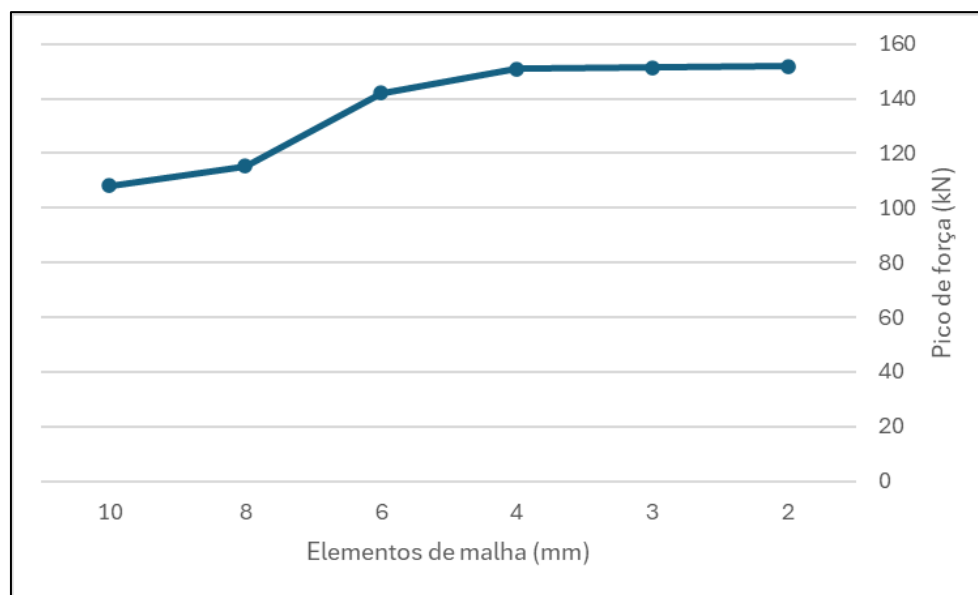


Figura 14 - Relação entre tamanho dos elementos de malha e pico de força encontrado

Fonte: Autoria própria

A tabela 3 também fornece os valores de jacobiano e proporção dos elementos de malha, que são alguns dos parâmetros de qualidade existentes. Pode-se verificar que a dimensão escolhida (3 mm) atende às boas práticas de qualidade da malha, que segundo o site da plataforma Altair [ref], seriam: valores de jacobiano maiores que 0,7 e valores de proporção menores que 5.

3.4 MATERIAIS

Para continuar a configuração dos ensaios, é necessário escolher o tipo de material no software. Oshinibosi (2012) utiliza o chamado “*Material type 24 elasto-plastic*” na interface em que fez seus estudos, a LS-DYNA, para representar o alumínio. Dessa forma, foi selecionado um tipo de material correspondente no RADIOSS, o “*Material Law2 Plas_Johns*”. Foram criados então os materiais correspondentes aos alumínios 5052 e 6061 e suas propriedades mecânicas atribuídas.

A justificativa para escolha do alumínio 5052 como objeto de estudo inicial foi devido à utilização dele na fabricação do *honeycomb* padrão da SAE. Entende-se que por ser um atenuador certificado internacionalmente, o seu material é consequentemente comprovado como ideal no quesito impacto. Mesmo que o arranjo em favos de mel seja o principal fator, a matéria-prima nesse caso também representa sua parcela de importância na característica de absorção. Além disso, é uma das ligas consideradas de melhor conformabilidade, devido à sua elevada ductilidade.

Já a segunda opção de alumínio foi baseada na sugestão de trabalhos futuros por Oshinibosi (2012), que menciona a liga 6061 dentre outras alternativas. Ao pesquisar sobre as propriedades mecânicas das ligas, ficou evidente que a têmpera na liga 6061, mais precisamente do tipo T4, confere melhor ductilidade e alta taxa de alongamento antes da fratura, como informa o fornecedor Chalco.

3.5 INTERFACES DE CONTATO

A união entre o atenuador de impacto e a placa anti-intrusão foi definida como soldada, sendo assim, o tipo de contato TYPE2 foi selecionado no software, também chamado de “*tied interface*”. Esse tipo de conexão representa uniões rígidas como os

pontos de solda, segundo o manual do Altair. Para a interface atenuador-barreira, o contato TYPE7 foi o escolhido, sendo esse o ideal para representar a colisão de um grupo de elementos de malha contra uma superfície principal.

3.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Considerando as definições de teste impostas pelo regulamento da SAE, as condições de contorno e cargas iniciais foram imputadas no programa. A massa de 300 kg representando a massa teórica do veículo foi adicionada ao componente da placa anti-intrusão, assim como a aplicação da velocidade inicial do sistema de 7 m/s. A barreira de colisão foi fixada nos 6 graus de liberdade, impedindo-a de transladar e rotacionar. Na figura 15 pode-se verificar o esquemático simplificado de todas as simulações.

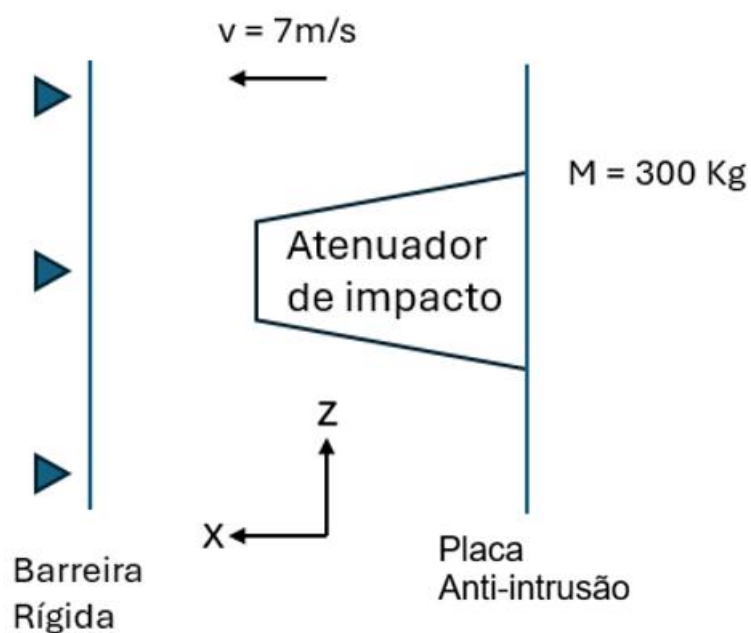


Figura 15 - Condições de contorno para cenário de impacto

Fonte: Autor

3.7 SIMULAÇÃO

A última etapa da configuração consiste em determinar os parâmetros operacionais em que o software irá se basear, além de definir quais resultados se quer obter. Sendo assim, o tempo de impacto foi estipulado em 0,05 segundos conforme adotado em outros artigos; a frequência para captura de dados foi de 0,0002 segundos; e os valores requeridos foram de velocidade, deslocamento, força e energia. Com essas definições, o número médio de ciclos ficou em torno de 150.000 a 250.000, com tempo de análise entre 25 e 40 minutos.

4 RESULTADOS

Após processamento de cada simulação, o programa fornece a animação da colisão para análise visual juntamente com os dados captados de acordo com as definições prévias. Dessa forma, gráficos são gerados para facilitar a comparação das informações relevantes.

Em todas as variações de design abordadas a seguir, manteve-se um padrão de plotagem de três gráficos para energia absorvida, aceleração e força. Para os primeiros dois casos, o eixo x é referenciado ao tempo, enquanto para o último, ao deslocamento.

4.1 PRIMEIRA VARIAÇÃO - ANGULAÇÃO DA “ABA”

Os primeiros testes realizados para validação do atenuador foram referentes à influência da variação do ângulo da “aba” nos resultados. Dessa forma, o material inicialmente utilizado foi o alumínio Liga 5052 e chapa com espessura de 1,5 milímetros.

Para melhorar a comparação, um atenuador de tronco cônico sem modificações foi utilizado como padrão. Sendo assim, qualquer evolução notada com relação ao protótipo base pode ser atribuída ao design proposto. Na figura 16 pode-se verificar as pequenas diferenças nas geometrias.

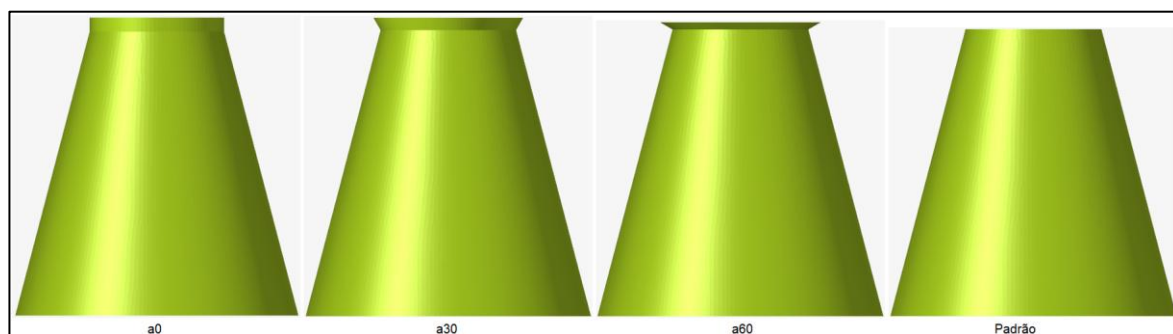


Figura 16 - Modelos utilizados durante a primeira análise

Fonte: Autoria própria

Com intuito de facilitar a leitura, padronizou-se a nomenclatura referente aos modelos: 'a0' sendo o protótipo com aba angulada em 0 graus, 'a30' em 30 graus e 'a60' em 60 graus.

4.1.1 Absorção de Energia

A figura 17 abaixo demonstra a energia absorvida pelos 4 atenuadores no decorrer do impacto. Nota-se que nenhum modelo atingiu o mínimo exigido pelo regulamento da SAE e todos apresentam curvas de evolução semelhantes. Sendo assim, não é possível estabelecer qualquer otimização apenas com esses dados.

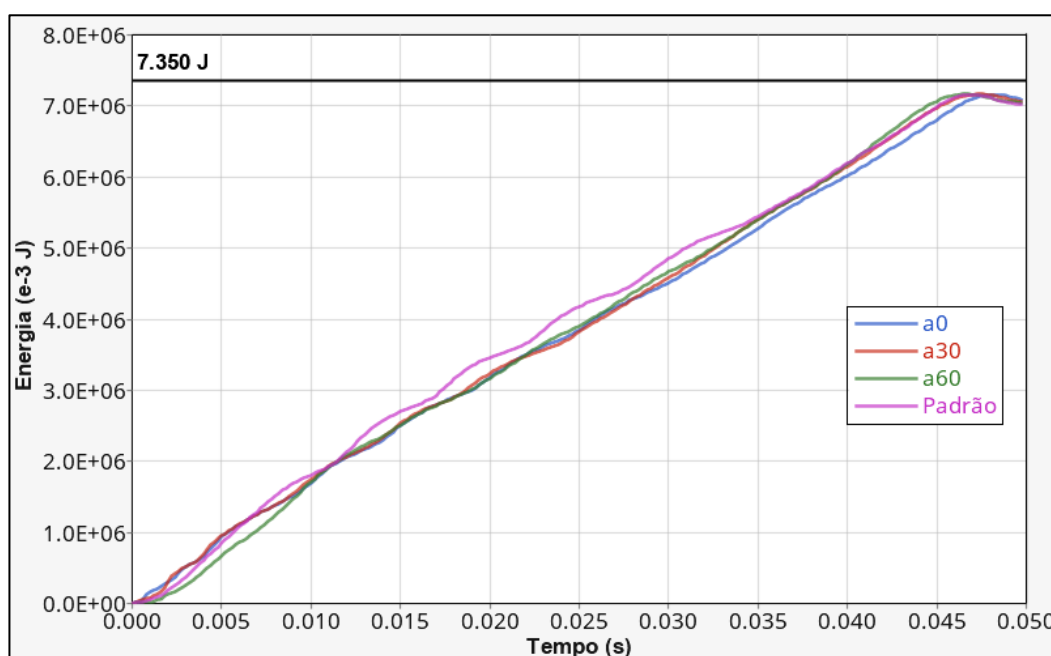


Figura 17 - Energia absorvida pelos modelos a0, a30 e a60 com 1,5 mm de espessura

Fonte: Autoria própria

4.1.2 Aceleração

Aprofundando a análise, verificam-se os valores de desaceleração do componente. Novamente, as curvas apresentam comportamento parecido, com divergências próximas ao final do tempo medido. Todos seriam reprovados devido aos elevados picos, maiores que 40 g, com o atenuador sem aba quase atingindo 60 g. Na figura 18 é possível observar as acelerações obtidas.

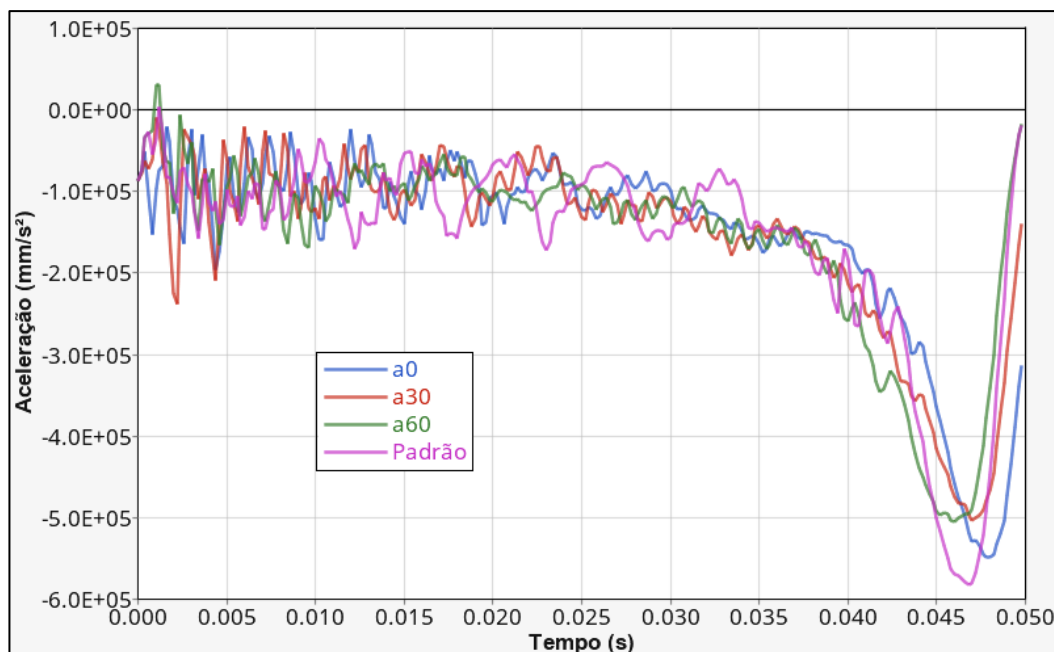


Figura 18 - Aceleração dos modelos a0, a30 e a60 com 1,5 mm de espessura

Fonte: Autoria própria

4.1.3 Força

O último gráfico gerado para a primeira variação é o de força x deslocamento. Como existe uma relação direta entre força e aceleração, fica evidente a similaridade com o tópico anterior. No entanto, referenciando o deslocamento no eixo principal, pode-se avaliar o nível de amassamento da estrutura. Como mostra a figura 19, todos ultrapassaram a medida de 200 milímetros, que é a altura base dos troncos de cone.

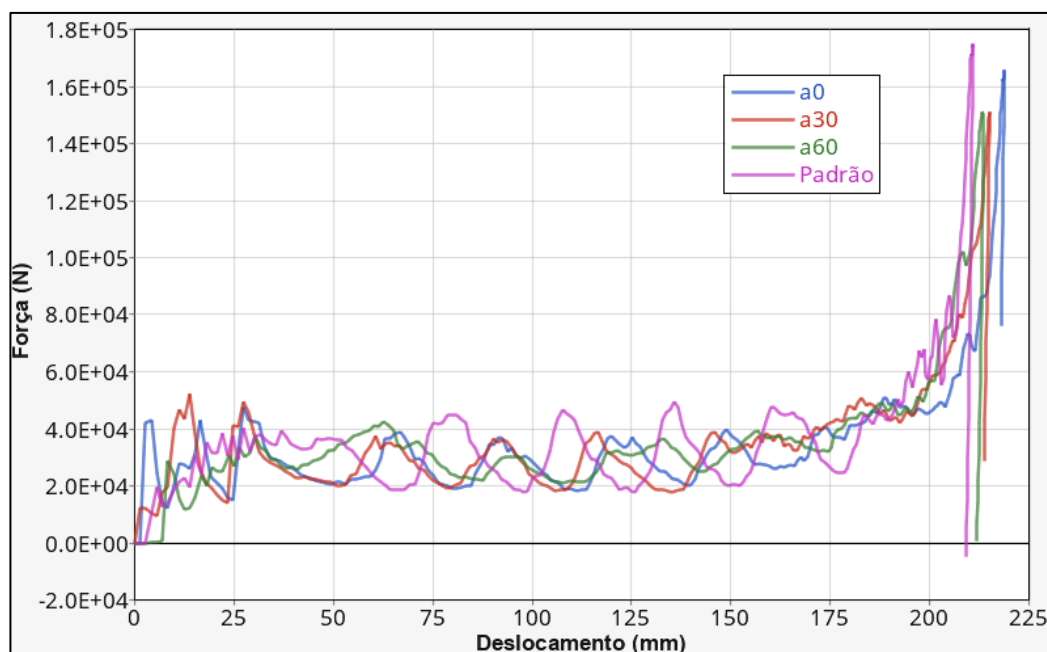


Figura 19 - Força aplicada pelos modelos a0, a30 e a60 com 1,5 mm de espessura

Fonte: Autoria própria

4.1.4 Análise

A tabela 4 mostra os valores exatos de cada parâmetro para cada modelo. Diante dos resultados demonstrados, pode-se afirmar que nenhum protótipo do primeiro design foi satisfatório, sendo que apenas a média da desaceleração ficou em patamares aceitáveis para o regulamento.

Tabela 4 - Resultados dos modelos a0, a30, a60 e padrão com 1,5 mm de espessura e alumínio Liga 5052

Modelo	Máxima (g)	Média (g)	Energia absorvida (J)	Pico de força (kN)
Padrão	-58,2	-15,9	7.161	171
a0	-54,9	-15,5	7.161	161
a30	50,4	-15,7	7.166	148
a60	-50,4	-15,8	7.166	148

Fonte: Autoria própria

Com o objetivo de justificar os picos de aceleração encontrados, buscou-se entender os valores de deslocamento superiores a 200 mm no gráfico de força anterior. Visualizando o progresso da simulação realizada, é possível atestar a

influência da placa anti-intrusão no resultado, visto que há afundamento do atenuador na mesma. Abaixo, o exemplo da progressão do impacto sobre o modelo a60.

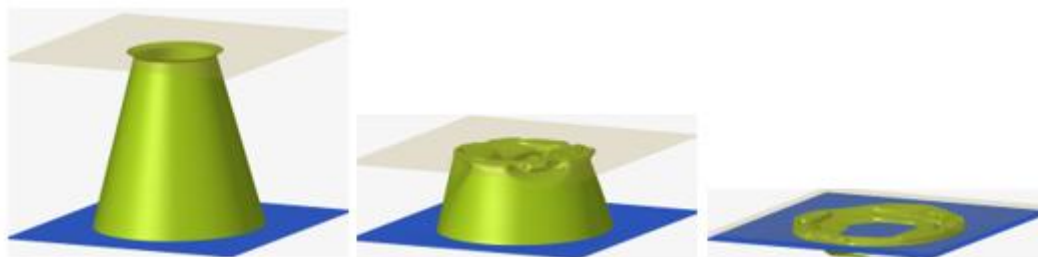


Figura 20 - Modelo a60 com 1,5 mm nos tempos 0 s; 0,02 s; 0,04 s

Fonte: Autoria própria

4.2 SEGUNDA VARIAÇÃO - ESPESSURA DO TRONCO DE CONE OCO

A segunda leva de simulações consistiu na variação da espessura do tronco de cone oco, na tentativa de melhorar os parâmetros encontrados anteriormente. Sendo assim, manteve-se a utilização do alumínio Liga 5052, porém, com o tronco de cone sendo mais espesso com 2,0 milímetros. A nomenclatura manteve-se a mesma do tópico anterior.

4.2.1 Absorção de Energia

Os quatro novos modelos apresentaram curvas de absorção de energia com comportamento menos abrupto, com crescimento suave no decorrer do tempo. Ainda assim, nenhum modelo atingiu o mínimo de 7.350 joules. Pelo gráfico da figura 21, percebe-se um desempenho diferenciado dos atenuadores entre os tempos de 0,01 e 0,035 segundos, indicando uma possível alteração provocada pelo design proposto. Se afetou positiva ou negativamente, apenas com uma avaliação mais meticulosa.

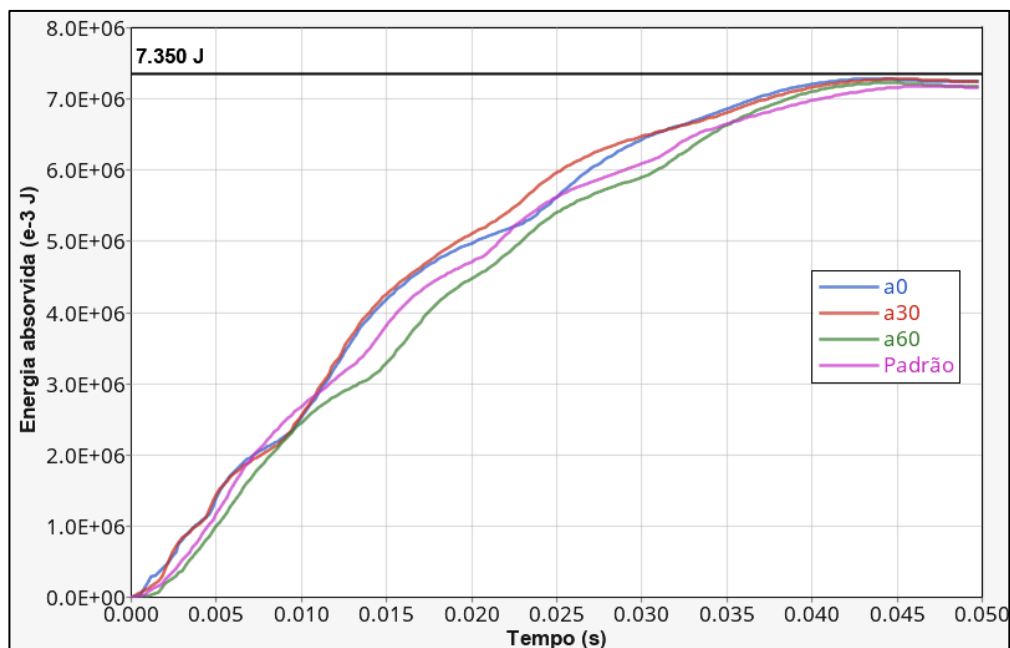


Figura 21 - Energia absorvida pelos modelos a0, a30 e a60 com 2,0 mm de espessura

Fonte: Autoria própria

4.2.2 Aceleração

Para a segunda variação, o gráfico de aceleração mostrado na figura 22 ficou com um desenho totalmente diferente da primeira. Com uma alteração mais distribuída ao longo do tempo e com os picos surgindo no início, assume-se um impacto desejavelmente mais homogêneo. Além disso, os valores foram inferiores ao máximo permitido, com o modelo a30 tendo a maior desaceleração de aproximadamente 35 g.

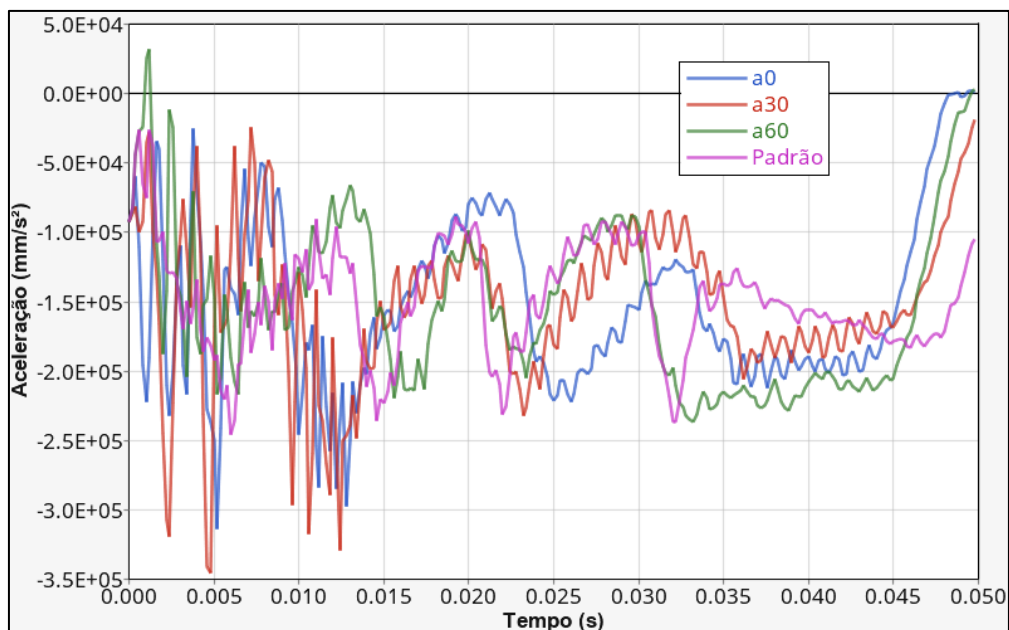


Figura 22 - Aceleração dos modelos a0, a30 e a60 com 2,0 mm de espessura

Fonte: Autoria própria

4.2.3 Força

Ao plotar o último gráfico (figura 23) dessa variação, é possível verificar uma similaridade entre os modelos a0 e a30, com picos quase iguais e terminação próxima aos 160 milímetros. Já o modelo a60 amassou quase 180 mm, um pouco mais que o atenuador padrão que chegou a 170.

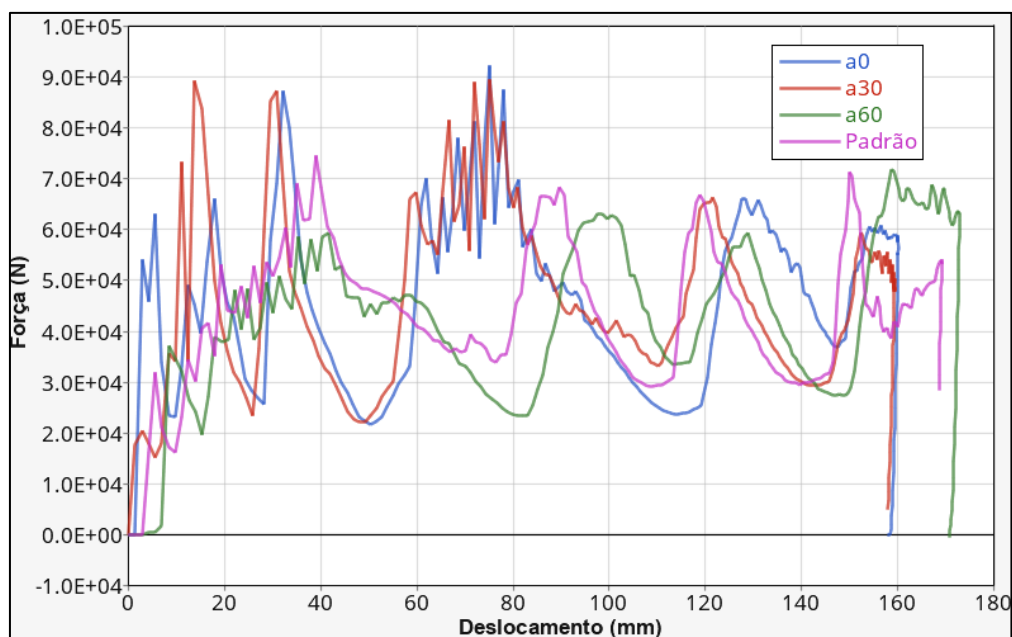


Figura 23 - Força aplicada pelos modelos a0, a30 e a60 com 2,0 mm de espessura

Fonte: Autoria própria

4.2.4 Análise

À primeira vista, os gráficos analisados para a segunda variação foram mais satisfatórios. Com curvas de aceleração e força menos acentuadas, o modelo a60 desponta como provável alteração bem-sucedida, visto que suaviza a transmissão do impacto para o restante do sistema. Sabendo que os modelos possuem o mesmo material, a única explicação para tal discrepância seria devido ao arranjo estrutural após o primeiro contato. Pode-se inferir que a angulação maior da aba permitiu compressão mais eficiente.

No entanto, ao verificar os valores da tabela 5, torna-se evidente que, apesar da redução da aceleração, a absorção de energia não foi suficiente.

Tabela 5 - Resultados dos modelos a0, a30 e a60 com 2,0 mm de espessura

Modelo	Máxima (g)	Média (g)	Energia absorvida (J)	Pico de força (kN)
Padrão	-26,1	-14,8	7.183	74
a0	-31,3	-15	7.282	92
a30	-34,5	-15	7.278	89
a60	-23,7	-15	7.226	71

Fonte: Autoria própria

É possível afirmar também que a interferência da placa anti-intrusão nos resultados não é mais relevante. Segundo o exemplo do modelo a60 abaixo, percebe-se que o amassamento do atenuador não ultrapassa a chapa metálica de suporte.

Na figura 24 é possível observar a deformação do modelo a60 em 3 momentos durante a colisão.

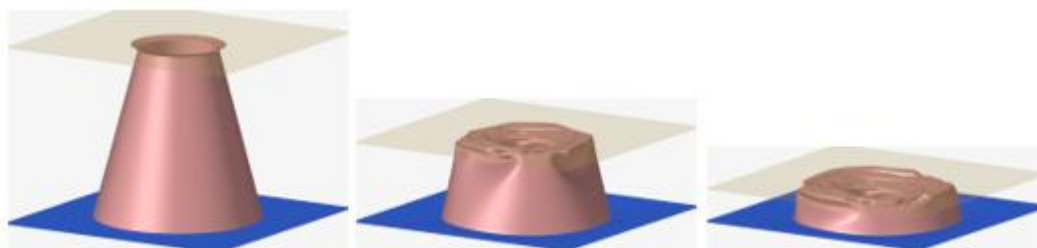


Figura 24 - Modelo a60 com 2,0 mm nos tempos 0 s; 0,02 s; 0,04 s

Fonte: Autoria própria

4.3 TERCEIRA VARIAÇÃO - MATERIAL DO ATENUADOR

Para a terceira rodada de simulações, variou-se o material do componente, sendo o alumínio Liga 5052 trocado pela Liga 6061 com têmpera T4. Visto que os resultados dos modelos com 1,5 milímetros de espessura foram insatisfatórios, optou-se por manter os 2 milímetros do tópico anterior. A fim de enriquecer o estudo, também foi testado e comparado o material sob têmpera T6.

Além disso, apenas o modelo a60 foi escolhido para prosseguimento dos testes. Apesar de não ter o melhor resultado para absorção de energia, ele foi o que obteve melhor desempenho na avaliação do comportamento durante impacto, com oscilações menores.

Para melhor compreensão, a nomenclatura dos modelos foi incrementada com a espessura e o material, acompanhando o termo já utilizado anteriormente “a60”.

4.3.1 Absorção de Energia

Pela primeira vez no estudo, é expressiva a distinção entre os modelos simulados, como mostrado na figura 25. As curvas da terceira variante apresentam comportamentos distintos, com a chapa de têmpera tipo 6 absorvendo energia a uma velocidade mais alta que as demais. Ainda assim, não houve superação do valor mínimo de referência.

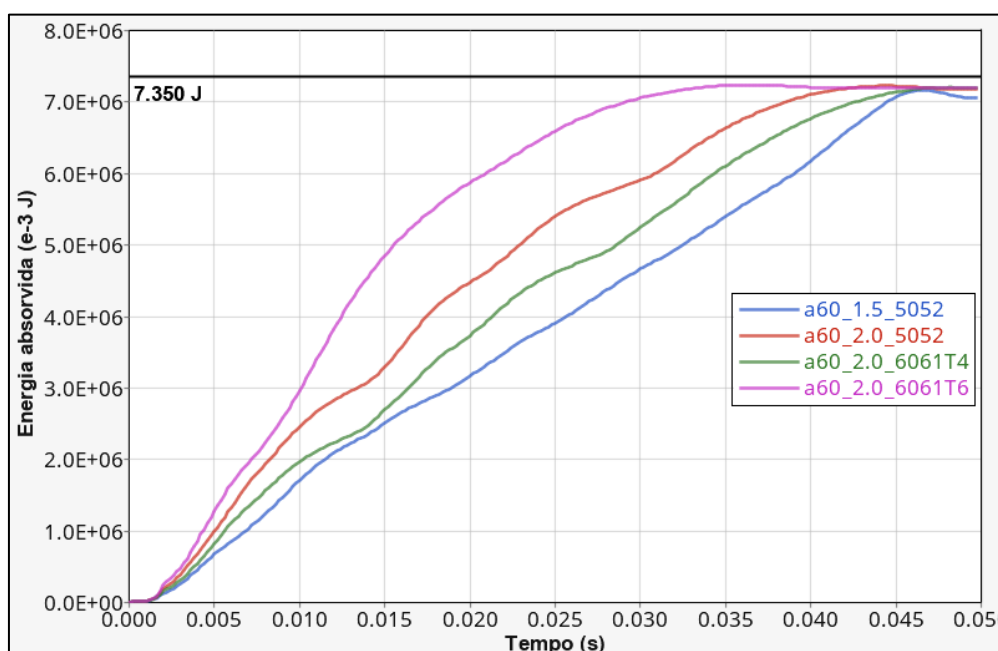


Figura 25 - Comparação da energia absorvida pelo modelo a60 de alumínio liga 6061 com os modelos a60 anteriormente testados

Fonte: Autoria própria

4.3.2 Aceleração

Realizando a comparação dos modelos de acordo com a desaceleração da colisão, pode-se notar a ocorrência de picos na fase inicial do 6061T6 e caimento prematuro com relação às outras curvas, indicativo da sua maior rigidez. Já o 6061T4 demonstra comportamento mais uniforme, no entanto, não foi capaz de zerar a velocidade do sistema ao final do período estipulado.

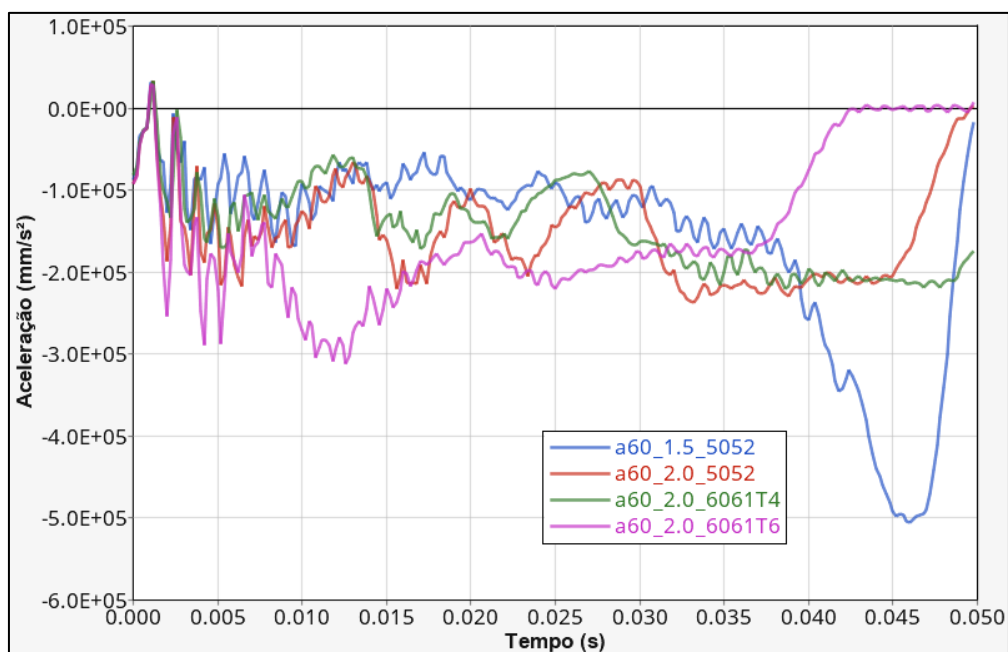


Figura 26 - Comparação da aceleração do modelo a60 de alumínio liga 6061 com os modelos a60 anteriormente testados

Fonte: Autoria própria

4.3.3 Força

Corroborando a afirmação do tópico anterior, verifica-se no gráfico de força a diferença no nível de deformação dos atenuadores (figura 27). A liga T6 finaliza o seu processo de esmagamento com apenas 125 milímetros de deformação e alcançando forças muito altas, enquanto a T4 chega próximo ao máximo de 200 com mais estabilidade.

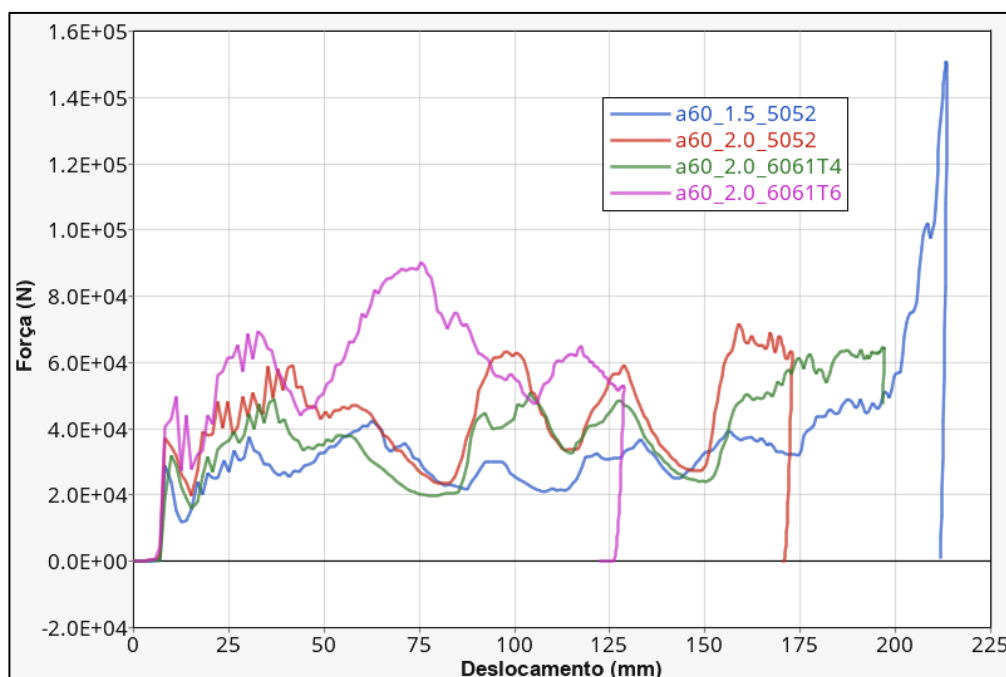


Figura 27 - Comparação da força aplicada pelo modelo a60 de alumínio liga 6061 com os modelos a60 anteriormente testados

Fonte: Autoria própria

4.3.4 Análise

Após verificação dos três gráficos apresentados juntamente com os dados da tabela 6, pode-se dizer que a opção pela liga 6061 com têmpera T6 implica em comportamento mais rígido do componente, com forças atingindo patamares elevados e consequentemente, desaceleração súbita do impacto. Apesar de melhorar o quesito de absorção de energia, não foi o suficiente para aprovação.

Já o alumínio com têmpera T4, correspondendo à sua ductilidade característica, apresenta comportamento mais estável e sem picos relevantes. No entanto, dentre os modelos com 2,0 milímetros foi o que absorveu menos energia durante o impacto.

Tabela 6 - Comparação dos resultados do modelo a60 de alumínio Liga 6061 com os modelos a60 anteriormente testados

Modelo	Máxima (g)	Média (g)	Energia absorvida (J)	Pico de força (kN)
a60_1.5_5052	-50,4	-15,8	7.166	148
a60_2.0_5052	-23,7	-15	7.226	71
a60_2.0_6061T4	-21,9	-15	7.207	64
a60_2.0_6061T6	-31	-15	7.241	90

Fonte: Autoria própria

Considerando o modelo a60_2.0_6061T6, o não atingimento do objetivo referente à energia absorvida de 7.350 joules se deve principalmente à desaceleração prematura do impacto. A utilização de uma chapa de liga 6061T6 provocou a total parada do movimento de maneira mais repentina do que o ideal, devido à menor conformabilidade desse tipo de material se comparado com a Liga 5052. A têmpera T4 aplicada em liga 6061 proporcionou um comportamento mais estável, com aparente capacidade de deformar por mais tempo e concentrar a energia do impacto devido a sua maior ductilidade.

4.4 QUARTA VARIAÇÃO - DOIS TRONCOS DE CONE

Ainda não satisfazendo os requisitos de regulamento com os modelos anteriores, sugeriu-se uma última adaptação do protótipo: a utilização de dois troncos de cone com eixos colineares, um menor do que o outro. Este design é sugerido por Oshinibosi (2012) em seu artigo e o autor Hou, juntamente com colaboradores, demonstra esse método. Diante da impossibilidade de acessar o estudo, não se obtiveram os resultados nem a metodologia utilizada, dificultando o embasamento para execução.

Após ponderação, optou-se por simular o modelo a60_2.0, com o acréscimo de um tronco de cone menor no seu interior. O material e espessura se mantiveram nesse componente pequeno, com objetivo de ser um auxílio na absorção de energia próximo ao final do movimento. A figura 28 demonstra os dois troncos posicionados.

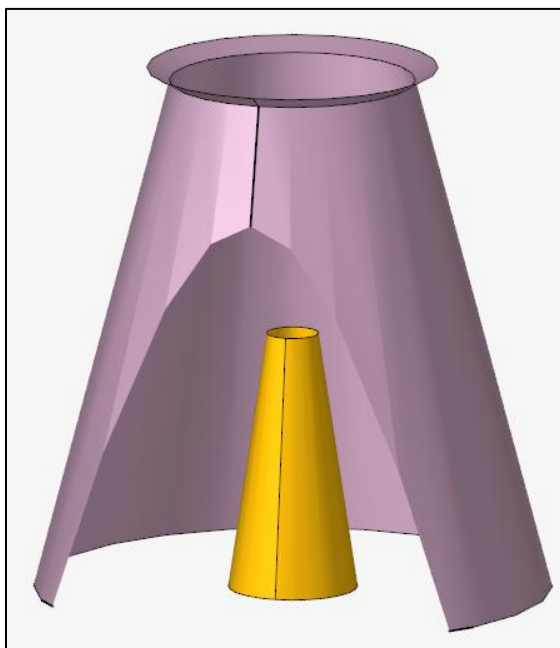


Figura 28 - Representação do modelo a60_2.0 com tronco de cone interno

Fonte: Autoria própria

A fim de encorpar a análise, foram simuladas duas alturas distintas para o tronco interno (100 e 150 milímetros) utilizando tanto a liga 5052 como 6061 com têmpera T4. Todos com diâmetro menor de 20 milímetros e maior de 50, com intuito de atuar independentemente do tronco externo, ou seja, sem interferirem entre si durante o amassamento.

Mantendo o padrão anterior, os nomes seguiram o formato de “a60_altura do tronco interno_material”.

4.4.1 Absorção de energia

Novamente, as curvas geradas no gráfico de energia absorvida se comportaram com disparidade evidente. Ambos os atenuadores com material 5052 demonstraram melhor captação de energia do sistema, se comparados com os dois modelos 6061T4.

Além disso, pode-se notar que os modelos com tronco interno de 150 milímetros tiveram desempenho superior ao modelo de mesmo material com tronco de 100.

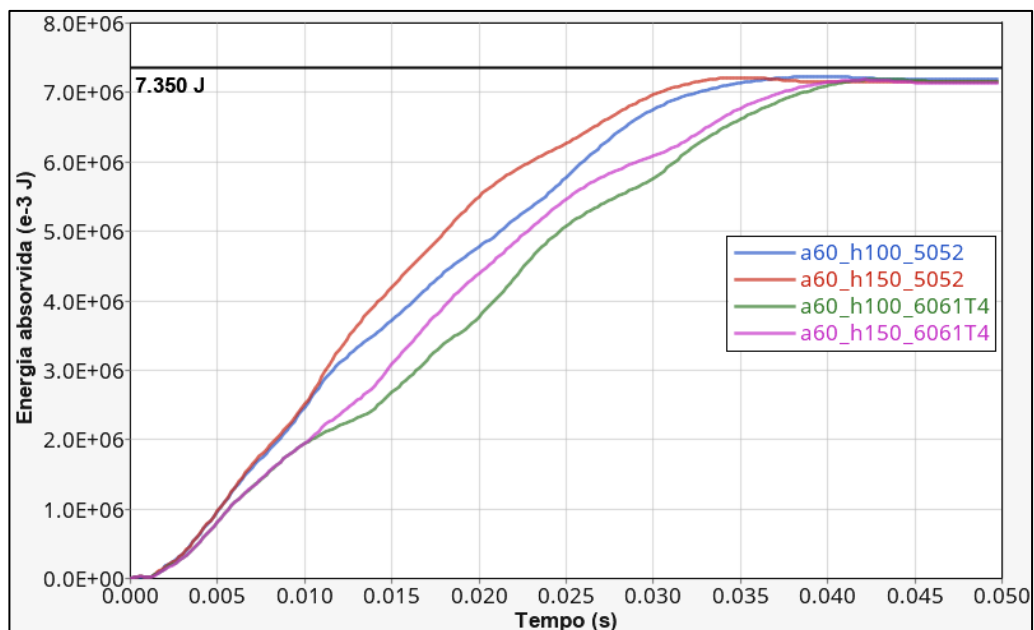


Figura 29 - Energia absorvida pelos modelos com dois troncos de cone

Fonte: Autoria própria

4.4.2 Aceleração

Avaliando as curvas de aceleração do sistema, nota-se que todas atingem a parada total do movimento antes do tempo limite, sendo o modelo h150_5052 o mais adiantado, com 0,041 segundos apenas. O comportamento dos dois atenuadores compostos pela liga 6061T4 é quase idêntico ao longo do período considerado.

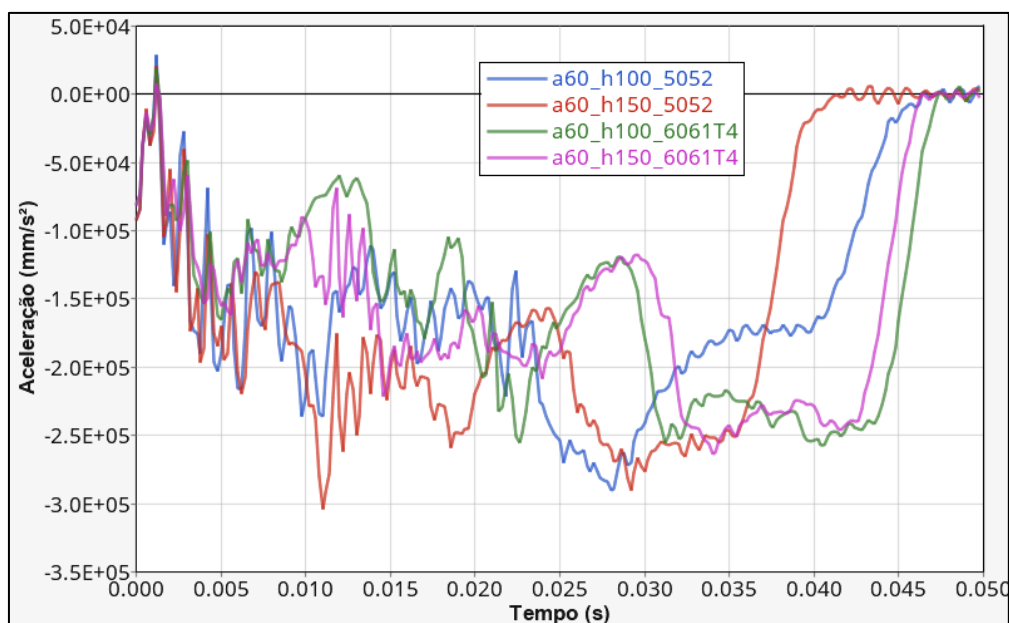


Figura 30 - Aceleração dos modelos com dois troncos de cone

Fonte: Autoria própria

4.4.3 Força

Para o último gráfico desse tópico, verifica-se a relação força x deslocamento dos quatro modelos. Fazendo uma comparação entre os modelos de cada material, fica evidente que os troncos internos com maior altura antecipam a parada do movimento e conseqüentemente, diminuem a deformação total do componente.

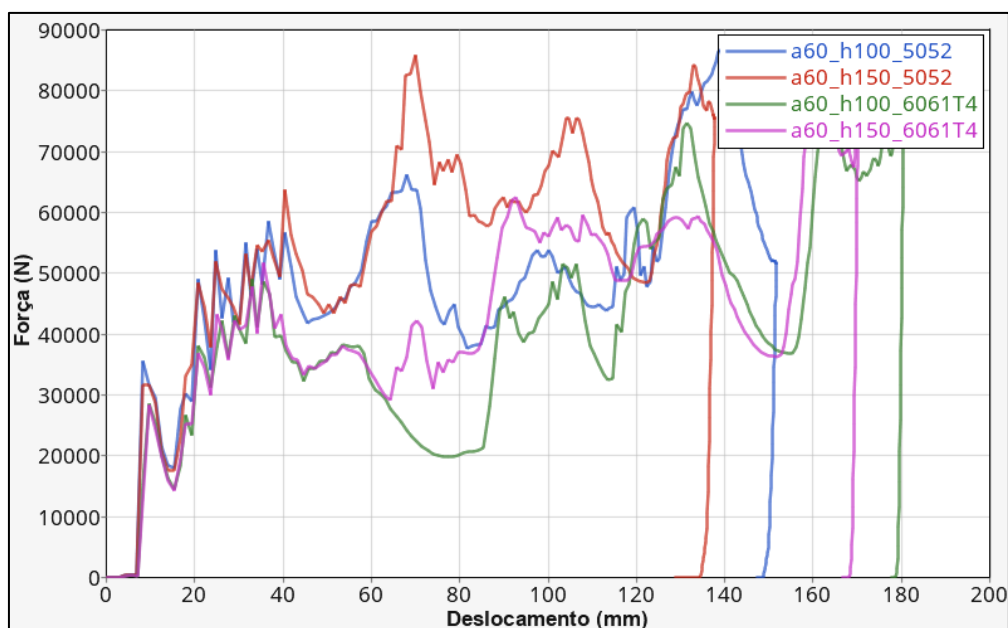


Figura 31 - Força aplicada pelos modelos com dois troncos de cone

Fonte: Autoria própria

4.4.4 Análise

De acordo com os valores apresentados na tabela 7, fica evidente que o cone interno com altura de 100 milímetros propicia melhor resultado de absorção de energia. Essa condição é verificada tanto nos modelos com alumínio 5052, quanto nos 6061 com têmpera. Isso se deve ao fato que a diferença de alturas entre os troncos externo e interno, permite que o maior absorva o impacto por mais tempo.

Tabela 7 - Resultados dos modelos com dois troncos de cone

Modelo	Máxima (g)	Média (g)	Energia absorvida (J)	Pico de força (kN)
a60_h100_5052	-29	-15	7.229	87
a60_h150_5052	-30,3	-15,3	7.216	86
a60_h100_6061T4	-25,6	-15	7.194	77
a60_h150_6061T4	-26,4	-15,1	7.182	79

Fonte: Autoria própria

Todos apresentam valores de pico de aceleração aceitáveis, com folga para o máximo permitido de 40 g, e médias quase iguais nos quatro casos.

A propriedade mecânica de ambos os materiais que podem justificar seus diferentes resultados, é o limite de escoamento. Como o alumínio liga 5052 apresenta

um limite maior, combinado com sua maior ductilidade, provoca as menores deformações demonstradas na figura 30. Além disso, essa característica proporciona maiores níveis de absorção de impacto devido a permanência dentro da zona elástica por mais tempo.

Para um comportamento ideal de impacto, entende-se que o material deve equilibrar entre resistência e ductilidade, para que permita a dissipação de energia antes de chegar na fase de fratura. Tanto a liga 5052 quanto a 6061 T4 são consideradas de boa tenacidade, no entanto, não o suficiente para o impacto estudado com os parâmetros impostos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho buscou inspiração em artigos acadêmicos para desenvolver um novo design de atenuador de impacto de fórmula SAE. Utilizando uma metodologia progressiva, consistindo em iniciar com um modelo de exemplo e o modificando de acordo com os resultados encontrados, foram simulados um total de 14 protótipos distintos.

Em primeiro lugar, os quatro exemplares apresentavam o mesmo material e espessura de chapa, apenas variando a angulação da aba criada para promover flambagem local. A composição de alumínio 5052 com espessura de 1,5 milímetros foi então considerada insuficiente para o devido impacto, visto que todos os modelos tiveram desempenho insatisfatórios.

Para segunda análise, incrementou-se a espessura do componente, visando uma melhor resposta à colisão. O objetivo foi parcialmente atingido, visto que os parâmetros avaliados apontaram melhoria em sua totalidade. No entanto, ainda não seriam aprovados por conta da energia absorvida abaixo do mínimo requerido.

Na terceira tentativa, implementando a liga de alumínio 6061 com dois tipos de têmperas, verificou-se maior discrepância no comportamento apresentado. O modelo com a têmpera T6 obteve um maior valor de energia absorvida, em contrapartida, desacelerou o movimento de forma prematura.

Apesar das diversas tentativas de encontrar um modelo otimizado, não foi possível obter resultados satisfatórios para todos os requisitos do regulamento SAE, sendo a absorção de energia o parâmetro mais complexo. Ficou evidente que o atenuador de impacto necessita acima de tudo, de equilíbrio em suas propriedades, visto que para absorver impacto de forma otimizada é importante que seja um componente dúctil, mas não tanto. Ou seja, não basta focar apenas na escolha do melhor material, e sim conciliar com os outros fatores já mencionados como a espessura utilizada, as diferentes geometrias existentes, entre outros.

A aplicação da simulação computacional auxiliou de maneira significativa no estudo, possibilitando a extração dos dados sem necessidade de manufatura dos protótipos. Porém, tendo em vista a complexidade do tema e do próprio método de elementos finitos, não se chegou em uma conclusão favorável para a construção de um modelo real.

6 TRABALHOS FUTUROS

Para um aprofundamento dos resultados, recomenda-se a análise de plotagens que demonstram visualmente os locais de interesse no componente, ou seja, pontos que recebem mais esforços e podem ser críticos para mapear flambagem local e global.

Além disso, a utilização do Hyperstudy ou software semelhante para otimização de tempo, podendo realizar dezenas de variações em uma única simulação, ainda com possibilidade de selecionar parâmetros de controle. Seria possível, por exemplo, variar as dimensões do tronco interno até encontrar as ideais.

Outra sugestão seria inverter a ordem de colisão na solução com dois troncos de cone, fazendo o interno ser maior e impactado primeiro. Dessa forma, assemelha-se a um padrão telescópico, podendo até utilizar mais de duas camadas. Para não elevar exponencialmente a massa final, pode-se avaliar a redução da espessura.

Mais um ponto interessante para avaliação seria um estudo financeiro comparando a produção dos diferentes modelos. A espessura da chapa, a liga de alumínio utilizada, o método de fabricação, todos esses pontos influenciam no custo final do protótipo.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SAITO, Felipe Kendy. **DESENHO INDUSTRIAL INTEGRADO ÀS PRÁTICAS E PROCESSOS DA EQUIPE TPR FORMULA SAE**. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Tecnólogo em Artes Gráficas) - Universidade tecnológica federal do Paraná [S. l.], 2011.

WALKER, Charlie. **Safety Systems**. [S. l.], 18 jun. 2022. Disponível em: <https://www.charlesjwalker.com/2022/06/18/fsae-ev-safety-systems/>. Acesso em: 24 set. 2025. [99]

OSHINIBOSI, Ahmed. **CHASSIS AND IMPACT ATTENUATOR DESIGN FOR FORMULA STUDENT RACE CAR**. [S. l.], 30 ago. 2012. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://vcdn.altair.com/rl/forum/uploads/2014/04/Ahmed-Oshinibosi.pdf>. Acesso em: 24 set. 2025.[100]

BARONY, Natalia Barros *et al.* **Comportamento mecânico e textura de chapas finas das ligas de alumínio 5052 e 5050C**. [S. l.], 2024. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.scielo.br/j/rmat/a/rN4cKV CtS653TXnSNvTtMQB/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 29 set. 2025.

FERREIRA, Moniel de Oliveira *et al.* **Análise microestrutural e avaliação das superfícies de fratura em quadro de bicicleta com junta soldada em liga de alumínio 6061-T6**. Latin American Journal of Development,, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 775-792, 10 nov. 2023.

RIBEIRO, Alfredo da Silva *et al.* **Comportamento elastoplástico cíclico e à fadiga da liga de alumínio 6061 - T651**. Revista iberoamericana de ingeniería mecânica , Portugal, v. 11, n. 2, p. 53-65, 2 ago. 2005.

SCHUITEK, Aloísio José. **Usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente**. 1997. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 1997.

SOUZA, HENRIQUE PEDRINI DE. **EFEITO DA TEMPERATURA DE SOLUBILIZAÇÃO NO ENVELHECIMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO 6061**. 2006. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO, [S. l.], 2006.

SILVA, Josiane Aparecida da. **Avaliação do tempo de espera para envelhecimento natural sobre a dureza atingida em liga de alumínio**. 2020. Artigo (Bacharel em Engenharia de Materiais) - UPM, [S. l.], 2020.

LOTTI, Raquel S. *et al.* **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos**. R Dental Press Ortodon Ortop Facial, [s. l.], ano 2006, v. 11, n. 2, p. 35-43, 2006.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**. 1. ed. [S. l.: s. n.], 2003. 248 p.

CANUT, Felipe Azevedo. **ANÁLISE ESTRUTURAL DO CHASSI DE UM VEÍCULO FÓRMULA SAE PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**. 2014. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (Bacharel em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, [S. l.], 2014.

RADE, Domingos Alves. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADOS À ENGENHARIA MECÂNICA**. 2011. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, [S. l.], 2011.

BABUSKA, Ivo *et al.* **The finite element method and its reability**. [S. l.: s. n.], 2001.

HIBBELER, R.C. **Dinâmica: Mecânica para Engenharia**. [S. l.: s. n.], 2011.

FAVRETTO, Tairine. **Colisões elásticas, inelásticas e parcialmente elásticas**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://cursoenemgratuito.com.br/colisoas/>. Acesso em: 27 out. 2025.

TIVELLI, Erick. **Absorção de impacto por latas de alumínio**. 2012. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, [S. l.], 2012.

CONHEÇA a SAE BRASIL. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/quem-somos/>. Acesso em: 15 jan. 2026.