



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



CAROLINA FONSECA SILAME

**ANÁLISE DA ABSORÇÃO DE ENERGIA DE ESTRUTURAS
SIMILARES AS LONGARINAS AUTOMOTIVAS COM A ADESÃO DE
REFORÇO POLIMÉRICO QUANDO SUBMETIDAS A TESTE DE
COLISÃO**

OURO PRETO - MG
2023

CAROLINA FONSECA SILAME

**ANÁLISE DA ABSORÇÃO DE ENERGIA DE ESTRUTURAS
SIMILARES AS LONGARINAS AUTOMOTIVAS COM A ADESÃO DE
REFORÇO POLIMÉRICO QUANDO SUBMETIDAS A TESTE DE
COLISÃO**

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

Professor orientador: DSc. Diogo Antônio de Sousa

**OURO PRETO – MG
2023**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S581a Silame, Carolina Fonseca.

Análise da absorção de energia de estruturas similares as longarinas automotivas com a adesão de reforço polimérico quando submetidas a teste de colisão. [manuscrito] / Carolina Fonseca Silame. - 2023.
63 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Antônio de Sousa.

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

1. Automóveis - Mecânica - Longarinas. 2. Choque (Mecânica). 3. Deformações (Mecânica). 4. Automóveis - Mecânica - Revestimentos. 5. Energia (Mecânica) - Absorção. 6. Automóveis - Desaceleração. I. Sousa, Diogo Antônio de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carolina Fonseca Silame

Análise da absorção de energia de estruturas similares as longarinas automotivas com a adesão de reforço polimérico quando submetidas a teste de colisão

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em 21 de junho de 2023

Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Vinícius Carvalho Teles (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Washington Luis Vieira da Siva (Universidade Federal de Ouro Preto)

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/06/2023



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/07/2023, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0563759** e o código CRC **09CE4B22**.

A Deus dedico mais esta etapa vencida,
meus pais, pelo apoio.

A minha família, pelo amor e apoio, aos
meus amigos por todo carinho.

A República Afrodite por toda paciência,
suporte e momentos incríveis nesses
cinco anos juntas.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador Diogo, por embarcar comigo nessa jornada sempre me incentivando e apoiando.

À Universidade Federal de Ouro Preto, ao curso de Engenharia mecânica e aos seus professores por todo conhecimento transmitido durante a graduação e suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

Ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da Universidade Federal de Minas Gerais pela oportunidade e ajuda no desenvolvimento dos experimentos.

À Del Rey Minerals pelo suporte ofertado e conhecimento adquirido nos meses de parceria.

À minha família por me proporcionar educação de qualidade sempre, apoio aos meus sonhos e amor e carinho nos momentos mais difíceis. A minha mãe, muito obrigada por sempre embarcar nas minhas aventuras e por ser colo sempre que preciso. Ao meu pai, obrigada por me dar os melhores direcionamentos. Clara, você me inspira a ser alguém melhor do qual você vai sempre se orgulhar. Vó e Vô, eu não estaria aqui sem vocês hoje, obrigada por nunca medirem esforços para me fazer feliz. Amo todos vocês.

À vida republicana de Ouro Preto que me ensinou muito nesses cinco anos e a República Afrodite por ser sempre lar e família, risadas nos dias bons e colo naqueles mais difíceis, vocês me ensinaram que a gente pode sim escolher quem chamamos de família.

Aos amigos que a Engenharia Mecânica me trouxe, por todas as madrugadas de estudo, conversas na cantina e risadas nos rocks!

A todos aqueles de alguma forma estiveram comigo durante essa jornada, muito obrigada!

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

Com o aumento do número de veículos transitando nas vias, o índice de acidentes vem aumentando cada dia mais e, conseqüentemente, o número de óbitos no trânsito também. Longarinas são elementos estruturais responsáveis por absorver energia em caso de colisões frontais. O presente trabalho teve o intuito de analisar a influência da aplicação de revestimento interno de borracha natural em longarinas automotivas na absorção de energia em situações de colisão. A adição de um revestimento polimérico no interior das longarinas visa aumentar a absorção de energia durante a compressão nessas ocorrências. O trabalho tem caráter qualitativo e quantitativo e para a sua elaboração foi realizada uma pesquisa exploratória, bibliográfica e experimental, foram determinados os materiais e métodos necessários para a realização dos ensaios e com auxílio de equipamentos e *softwares* adequados, foi possível coletar e analisar os dados obtidos. Para a produção dos corpos de prova foram utilizadas chapas de aço SAE 1006 unidas por meio de soldagem a ponto por resistência elétrica com condições de soldagem previamente definidas. A fim de avaliar a influência da resposta da longarina com revestimento polimérico foram realizados ensaios de colisão, para os quais seis amostras foram produzidas, sendo três sem revestimento e três com revestimento. O ensaio de colisão foi realizado por meio de um martelo em queda livre com energia potencial de 3898,6J. Os testes foram registrados com o auxílio de uma câmera de alta velocidade, modelo Phantom Miro 110, as imagens foram capturadas com resolução de 256 x 552 e a 10.000 frames por segundo. Para as análises de deslocamento, velocidade e aceleração de deformação da longarina foi utilizado o software da PCC (Phantom Camera Control), então, os resultados obtidos foram tratados estatisticamente. Apesar de todas as longarinas terem sido produzidas considerando as mesmas condições, a resposta em deformação foi distinta para algumas, visto que, as longarinas denominadas 1B e 2C deformaram se, predominantemente, na região inferior (sentido de colisão de cima para baixo) e as demais longarinas (1A, 1C, 2A e 2B) deformaram se, predominantemente, na região superior. Apesar dessa divergência no modo de deformação, os resultados sugerem que a borracha natural não contribuiu, significativamente, na absorção de energia das longarinas em situação de colisão. Embora os resultados obtidos não tenham sido os esperados, a literatura sugere que os materiais poliméricos podem contribuir na absorção de energia, portanto, estudos a cerca de interações desses materiais e aços devem ser estudados a fim de aumentar a absorção de energia de estruturas veiculares, conseqüentemente, contribuir para segurança.

Palavras-chave: Longarinas veiculares. Ensaio de colisão. Deformação. Revestimento. Absorção de energia. Desaceleração.

ABSTRACT

The purpose of this study was to analyze the influence of applying internal rubber coating on automotive longitudinal beams in the energy absorption during collision situations. With the increase in the number of vehicles on the roads, the accident rate has been steadily rising, leading to an increase in traffic fatalities as well. Longitudinal beams are structural elements responsible for absorbing energy in the event of frontal collisions. The addition of a polymer coating inside the longitudinal beams aims to enhance energy absorption during compression in such occurrences. This study has both qualitative and quantitative aspects, and for its development, an exploratory, bibliographic, and experimental research was conducted. To produce the test specimens, SAE 1006 steel sheets were used, joined by resistance spot welding with pre-defined welding conditions. To evaluate the influence of the response of the longitudinal beams with polymer coating, collision tests were conducted, for which six samples were produced, three without coating and three with coating. The collision test was performed using a freely falling hammer with a potential energy of 3898.6J. The tests were recorded using a high-speed camera, specifically a Phantom Miro 110 model, capturing images at a resolution of 256 x 552 and 10,000 frames per second. The PCC (Phantom Camera Control) software was used for displacement, velocity, and deformation acceleration analyses of the longitudinal beam, then, the results obtained were statistically treated. Although all longitudinal beams were produced considering the same conditions, the deformation response was different for some, since the longitudinal beams denominated 1B and 2C deformed predominantly in the lower region (collision from top to bottom) and the other longitudinal beams (1A, 1C, 2A and 2B) deformed predominantly in the upper region. Despite this divergence in the deformation mode, the results suggest that natural rubber did not contribute significantly to the energy absorption of the longitudinal beam in collision situations. Although the results obtained were not as expected, the literature suggests that polymeric materials can contribute to energy absorption, therefore, studies regarding the interactions between these materials and steel should be studied in order to enhance the energy absorption of vehicular structures, consequently, contributing to safety.

Keywords: Automotive longitudinal beams. Collision tests. Deformation. Coating. Energy absorption. Deceleration.

LISTA DE SIMBOLOS

E = Energia mecânica

E_c = Energia Cinética

E_{pg} = Energia potencial

m = Massa

v = Velocidade

g = Aceleração da gravidade

h = Altura

E_{pel} = Energia potencial elástica

k = constante elástica do material

x = Deformação do corpo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura veicular	2
Figura 2: Estrutura veicular tipo chassi	7
Figura 3: Materiais dos componentes da carroceria veicular	8
Figura 4: Normas para teste de colisão	10
Figura 5: Estrutura frontal de um automóvel	11
Figura 6: Longarina com marcações para deformação programada	12
Figura 7: Colisão entre carros e obstáculo	14
Figura 8: Representação esquemática da propagação de uma onda elástica.....	17
Figura 9: Etapas da metodologia	20
Figura 10: Seção transversal da longarina (medida em mm)	21
Figura 11: Máquina de soldagem	22
Figura 12: Pinça de soldagem	22
Figura 13: Chapas soldadas por soldagem a ponto	23
Figura 14: Amostra produzidas para realização do teste de colisão	24
Figura 15: Dimensões e massa dos corpos de prova	25
Figura 16: Comparativo entre os corpos de prova	26
Figura 17: Torre de colisão	27
Figura 18: Martelo de colisão	28
Figura 19: Posicionamento final para o experimento	29
Figura 20: Câmera de alta velocidade	30
Figura 21: Comparativo entre as deformações das longarinas	32
Figura 22: Deformação final das longarinas	33
Figura 23: Limitador de curso	33
Figura 24: Longarinas 1B (a) e 2C (b)	34
Figura 25: Indicação do alvo utilizado para o ensaio	35
Figura 26: Curvas Velocidade x Tempo	35
Figura 27: Curvas Velocidade x Tempo até instante 0,020s	36
Figura 28: Curvas Aceleração x Tempo	37
Figura 29: Longarina 2A após ensaio	37

Figura 30: Comparativo da deformação inferior da longarina 2A	38
Figura 31: Curva Deslocamento x Energia absorvida	39
Figura 32: Análise estatística	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química e propriedades mecânicas do aço SAE 1006	21
Tabela 2: Programação da máquina de soldagem	23
Tabela 3: Variáveis e indicadores	3-

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Segurança veicular.....	5
2.1.1	Segurança passiva.....	5
2.1.2	Segurança ativa.....	6
2.2	Estrutura veicular.....	6
2.2.1	Materiais	8
2.3	Elementos de sacrifício.....	10
2.4	Colisões	13
2.5	Energia mecânica.....	14
2.5.1	Energia cinética	14
2.5.2	Energia potencial	15
2.6	Amortecimento	16
2.7	Ondas elásticas	17
2.8	Considerações finais do capítulo	18
3	METODOLOGIA.....	19
3.1	Tipo de pesquisa	19
3.2	Materiais e métodos.....	20
3.2.1	Corpo de prova	21
3.2.2	Solda a ponto por resistência elétrica	22
3.2.3	Revestimento	24
3.2.4	Experimento de colisão	26
3.3	Variáveis e indicadores.....	29
3.4	Instrumento de coleta de dados	30
3.5	Tabulação de dados	31
3.6	Considerações finais do capítulo	31

4	RESULTADOS	32
4.1	Deformação das longarinas	32
5	CONCLUSÃO.....	41
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	42
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	43
	ANEXO.....	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

De acordo com o Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito (2022), fornecido pela Secretaria Nacional de trânsito e pelo Ministério da Infraestrutura, foram registrados 987.336 acidentes dos meses de janeiro a dezembro de 2021, com 22.663 óbitos. Segundo o Anuário de 2021 da Polícia Rodoviária Federal, quase 30% dos feridos fatais são decorrentes de colisões frontais, mostrando como é importante que a estrutura dianteira do veículo seja capaz de absorver o máximo de impacto possível para proteger os passageiros.

Por Maia (2021), é possível entender a segurança veicular como as tecnologias, equipamentos e atitudes do condutor, que vão garantir um ambiente seguro para todos que dependem das vias públicas. O autor menciona duas categorias de segurança: Segurança ativa que diz respeito aos itens responsáveis pela prevenção de acidentes, o Freio ABS, por exemplo; Segurança Passiva que é responsável por proteger o condutor e os passageiros, como exemplo é possível citar os cintos de segurança, Airbags, apoios de cabeça, entre outros.

A segurança veicular é indispensável para se ter um trânsito mais seguro para todos. Recursos como airbag, freios ABS e cintos de segurança, são conhecidos por todos os consumidores e, por serem obrigatórios por lei, já são instalados nos veículos antes destes saírem das montadoras (CESVI, 2014). Algumas tecnologias já foram desenvolvidas visando aumentar ainda mais a absorção de energia pela estrutura dos automóveis, como por exemplo o *crash box*, já citado no texto, a fabricação da lataria em materiais mais maleáveis, carrocerias com deformação programada, entre outros. Aprimorar estruturas já existentes e desenvolver outras novas pode ser uma forma de, cada vez mais, reduzir o número de mortes nas vias.

Sousa (2018) afirma que a longarina presente na carroceria veicular, é um perfil de aço responsável por absorver a energia cinética em situação de colisão frontal dos veículos, atuando como estrutura de sacrifício. A energia aplicada sobre a longarina pode variar dependendo da massa do veículo e de sua velocidade antes do choque, idealmente toda a energia cinética deveria ser absorvida, mas como isso não é possível, quanto maior for a capacidade de absorção da estrutura, menor serão as consequências da colisão. Em alguns modelos a longarina atua junto com o *crash box*, viga de impacto composto por uma barra transversal e elementos flexíveis, responsável por absorver progressivamente energia de impacto que será transmitida para as longarinas e, em caso de acidentes de baixa velocidade, absorve toda a energia do

impacto, preservando-as (YUSOF, 2017). O mesmo autor explica que a longarina proporciona um “efeito sanfona” em caso de acidentes com alta velocidade e aumenta a absorção de energia vinda da colisão, diminuindo a energia recebida pela cabine. A Figura 1 representa a carroceria de um veículo utilitário comum, onde podemos observar o posicionamento das longarinas.

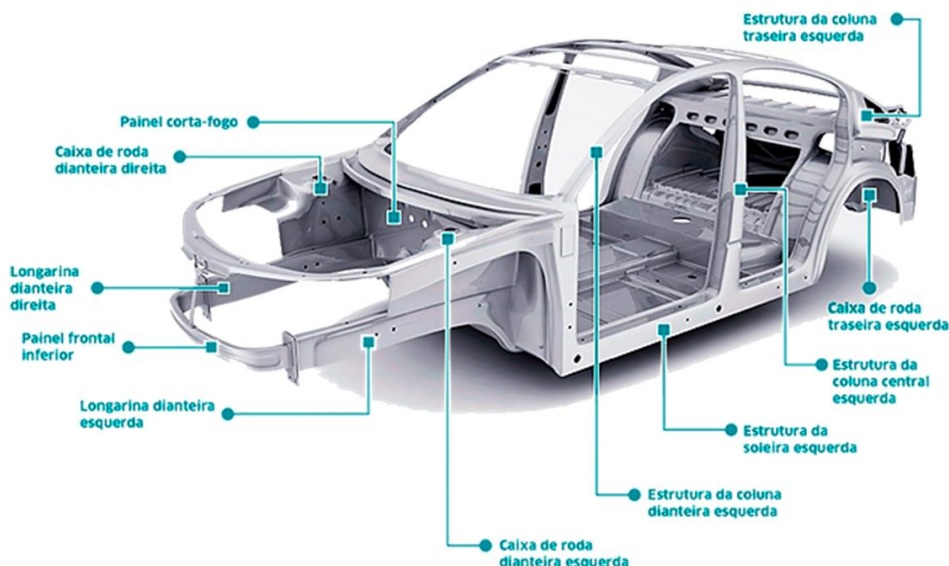


Figura 1: Estrutura Veicular.
Fonte: Google/imagens, 2023.

A Figura 1 mostra detalhadamente os componentes do monobloco, estrutura mais utilizada pelos veículos utilitários atualmente. Diferentemente do chassi, o monobloco, como o próprio nome diz, é uma estrutura única formada pelo assoalho, teto e pelas laterais, que são unidos por solda ou cola industrial e formam um componente só. Posteriormente essa estrutura será estudada mais detalhadamente e suas vantagens e desvantagens sobre o chassi.

O projeto será desenvolvido e testado em laboratório, simulando situações reais de colisões frontais. Este estudo acontecerá no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação - LRSS da Universidade Federal de Minas Gerais onde os testes de colisão possibilitarão uma análise aprofundada do desempenho da estrutura aquilo que ela for submetida. Realizar tais simulações permitirá a obtenção dos resultados a serem analisados.

Diversos autores já desenvolveram estudos objetivando a influência da adição de materiais poliméricos no interior da longarina. Yalçın *et al.* (2022), por exemplo, propôs a adição de espuma e molas de poliuretano no interior de tubos de seção quadrada. Já Li *et al.* (2023) adicionou espuma de alumínio no interior dos tubos. Ambos os autores obtiveram

resultados positivos em suas pesquisas mostrando que é uma área promissora e com diversas possibilidades de aprimoramento.

Considerando o estudo já feito, foi proposta uma pergunta problema:

Como o revestimento polimérico adicionado a longarina pode interferir na absorção de energia quando submetida a colisão?

1.2 Justificativa

A segurança veicular é um tema importante uma vez que, como já abordado no trabalho, acidentes de trânsito são uma das principais causas de morte e lesões graves em todo o mundo. O Anuário de 2021 da Polícia Rodoviária Federal aponta que as colisões frontais, em particular, representam uma parcela significativa desses acidentes e podem resultar em graves consequências para os ocupantes dos veículos envolvidos. Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias e estratégias para aumentar a segurança dos veículos em colisões frontais torna-se crucial.

Sousa (2018) aborda a longarina veicular como componente estrutural fundamental, desempenha um papel importante na absorção de energia durante um impacto frontal. No entanto, em muitos casos, as longarinas existentes não são capazes de dissipar adequadamente toda a energia cinética envolvida nesse tipo de colisão.

Com base nessa problemática, o presente trabalho busca uma nova forma de reduzir a gravidade dos acidentes frontais e, conseqüentemente, o número de mortes nas vias, que possua implantação viável para as montadoras e um preço acessível para o consumidor. Com isso, propõe-se o revestimento da longarina veicular como uma solução promissora para aumentar a absorção de energia em colisões frontais. A aplicação de uma manta de borracha natural, com propriedades mecânicas adequadas, pode melhorar significativamente o desempenho estrutural da longarina, reduzindo as forças transmitidas para o habitáculo do veículo e contribuindo para a redução dos danos a estrutura do veículo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar a influência da adição de um revestimento polimérico sobre a longarina veicular na absorção de energia em caso de colisão frontal.

1.3.2 Específicos

- Elaborar um estudo teórico acerca da longarina, estrutura e componentes veiculares com foco na análise de absorção de energia durante colisões frontais, considerando os possíveis materiais e geometrias;
- Determinar a pesquisa a ser realizada, os materiais e métodos utilizados, os indicadores do projeto e suas variáveis e, por fim, como será realizada a coleta e análise dos resultados obtidos;
- Realizar ensaios de colisão sobre estruturas com geometrias similares às longarinas automotivas, as quais foram adicionadas um revestimento polimérico (objeto de estudo desse trabalho);
- Análise os resultados obtidos nos ensaios de colisão.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito da estrutura veicular e elementos de sacrifício. Também são relatados os diferentes materiais utilizados nos automóveis atualmente e as características em destaque de cada um deles e, por fim, são abordados os conceitos de colisão e das energias presentes.

O terceiro capítulo trata a metodologia de pesquisa utilizada no trabalho, os materiais utilizados, a construção do corpo de prova e demonstra como será realizado teste de colisão.

O quarto capítulo traz os resultados obtidos nos testes e uma avaliação da eficácia do projeto.

O quinto capítulo traz uma análise dos resultados obtidos e as considerações finais da autora.

Por fim, tem-se as referências bibliográficas, que apresentam todas as fontes utilizadas durante o trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Segurança veicular

Larson *apud* Bertocchi (2005) afirma que um veículo é projetado primeiramente para transportar e para ser dirigido por pessoas. Segurança é – e deverá sempre ser – o princípio de orientação do nosso trabalho de projetar veículos ... e prudência deve continuar sendo o nosso “lema” para o futuro.

Como evidenciado por Bertocchi (2005), a preocupação com a segurança veicular surgiu no pós-guerra no século XX, primeiramente no ramo aeronáutico e, posteriormente, no automobilístico. Atualmente a segurança dos automóveis, juntamente com o design, consumo, conforto e potência, é um diferencial para os consumidores que, cada vez mais, entendem a importância dos sistemas para garantir a sua proteção e dos seus passageiros.

Adriazona-Steil et al. (2018) mencionam que já existem diversos projetos e medidas para aumentar a segurança no transporte, alguns se referem a ações relacionadas à via em si, como o conceito Visão Zero que, de acordo com a Associação Brasileira de Educação de Trânsito -ABETRAN (2017), foi criado na Suécia e afirma que nenhuma vida perdida no trânsito é aceitável e que sabendo que falhas humanas acontecem, as vias devem ser projetadas a fim de prevenir ou reduzir a gravidade dos acidentes.

O Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN, por meio da Resolução nº 14 (1998) e revogações posteriores, regulamenta todos os elementos de segurança obrigatórios nos automóveis, como exemplo pode-se citar o cinto de segurança para todos os passageiros, faróis e lanternas, retrovisores, interno e externos, apoios de cabeça, para-choques e muitos outros. Em 2009 o CONTRAN institui a Resolução N°311 que prevê que, até janeiro de 2014 todos os veículos produzidos saíam da montadora com Airbag instalado e, em 2011 dispôs a Resolução N° 380, que prevê que até este mesmo período todos os automóveis também deveriam possuir o freio ABS, não podendo ser considerados como itens adicionais. Esses equipamentos garantem a segurança passiva dentro dos veículos (CESVI, 2014).

2.1.1 Segurança passiva

Pereira (2013) explica que a segurança passiva está diretamente relacionada aos equipamentos que minimizam as consequências de uma colisão, tanto para os passageiros do

veículo (segurança interna), quanto para os pedestres que possam estar envolvidos no acidente (segurança externa).

A segurança externa depende de dois fatores principais: a capacidade da carroceria de deformar-se e o design da sua forma externa, que busca reduzir a gravidade das colisões para as pessoas fora do veículo, por meio de um projeto adequado das áreas de possível contato (BOSCH, 2005). Segundo o mesmo autor, a segurança interna pretende minimizar a aceleração e as forças aplicadas sobre os ocupantes em caso de colisão. O autor finaliza afirmando que, para garantir essa segurança, é fundamental um comportamento deformável da carroceria, resistência do habitáculo que deve se manter com um espaço suficiente para segurança dos passageiros depois do impacto, além de, proteção contra incêndio, fácil liberação dos ocupantes e sistema de direção.

Em resumo, sua principal função é garantir que o habitáculo seja o mais seguro possível e elementos como o cinto de segurança, airbags, encostos de cabeça, carroceria com deformação programada, entre muitos outros, são responsáveis por aumentar essa proteção (BOSCH, 2005).

2.1.2 Segurança ativa

Por Bertocchi (2005), a segurança ativa é um conjunto de sistemas, dispositivos e componentes, responsável por evitar acidentes, reduzindo as chances de impacto. O autor cita que, recursos como freio ABS, controle eletrônico de estabilidade, distribuição eletrônica de frenagem, sistemas de tração e suspensão, lembrete de cintos, buzinas, faróis, retrovisores e pisca-alertas, proporcionam uma direção mais segura.

Bosch (2005) aborda a segurança ativa que pode ser dividida em quatro categorias: Segurança de circulação, que se reflete no comportamento dinâmico do veículo; Segurança condicional, que é consequência da menor sobrecarga psicológica dos ocupantes; Segurança perceptiva, que está relacionada aos equipamentos de iluminação e avisos sonoros; Segurança operacional, que prevê que o motorista deve ter fácil acesso a todos os elementos de comando, evitando assim perda de atenção no trajeto.

2.2 Estrutura veicular

Castro (2009) define automóvel como uma viga suportada em cada extremidade por rodas, que deve ser resistente à flexão e aos esforços de torção, além de proporcionar espaço e proteção para os ocupantes. Segundo o mesmo autor, a carroceria deve possuir as propriedades

mecânicas adequadas já que, caso seja demasiadamente rígida, absorverá pouco da energia resultante em uma colisão, enquanto uma muito fraca pode falhar e abater-se sobre os ocupantes.

A estrutura veicular pode variar dependendo da classe do automóvel, mas, em geral, sua função é sustentar e estabilizar toda a lataria e componentes do veículo (HAPPIAN-SMITH, 2002). Componentes como: longarinas, para-choque, capô, travessas, entre outros são responsáveis por absorver parte da energia em uma colisão (PIMENTEL, 2022).

Para Zanotti (2018), o chassi é uma estrutura de aço que deve suportar a carroceria e o motor e fixar todos os componentes que constituem o veículo. Pode possuir diversos modelos como longarinas horizontais em forma de U com reforços transversais em forma de X, do tipo plataforma, seções retangulares para as longarinas laterais e para os reforços transversais em forma de X, entre outros (CASTRO, 2009). A Figura 2 ilustra um chassi automotivo.



Figura 2: Estrutura veicular tipo chassi.
Fonte: Zanotti, 2018.

O Monobloco é a estrutura mais utilizada atualmente e sua construção se dá pela união do assoalho com a lataria e outros diversos componentes, a partir de chapas de aço que são submetidas a processos de prensa ou soldagem (FURTADO, 2013). De acordo com Castro (2009), essa construção possui três tipos: totalmente monobloco, semi monobloco e monobloco com subestruturas e aplicação de cada um deles depende de acordo com desempenho esperado para o veículo ou atividade a qual ele será submetido.

De acordo com Zanotti (2018), esse tipo de estrutura possibilita uma redução no peso dos veículos, aumento da resistência a torção e de sua rigidez. Em contrapartida, possui um custo de fabricação mais elevado devido ao uso de equipamentos de estampagem e não suportam cargas elevadas, por isso são mais utilizados em veículo utilitários.

Bois *apud* Sousa (2018) cita que, por ser responsável pela absorção de energia durante a colisão, a estrutura veicular deve ser projetada com parâmetros de resistência mecânica adequados, além de materiais e geometrias que auxiliarão na sua performance e na redução da desaceleração.

2.2.1 Materiais

Ivoditov (2008) menciona que todo veículo deve satisfazer o critério *SAFE*, que descreve quatro requisitos básicos que deverão ser levados em conta na escolha do material mais adequado para o projeto: segurança (*Safety*), acessibilidade (*affordability*), eficiência do combustível (*fuel efficiency*) e proteção ambiental (*environmental friendliness*). O autor ressalta que seguir os quatro critérios, por muitas vezes, gera conflitos, principalmente devido ao aumento dos custos de produção. A busca por carros mais leves, confortáveis, seguros e com melhor performance, por parte dos consumidores, fez com que as montadoras precisassem buscar novos materiais para a fabricação dos veículos.

Por décadas, os aços foram os principais constituintes dos componentes e estruturas dos automóveis, porém, a partir da década de 1960, devido a diversos acontecimentos globais, fizeram com que essa dominância diminuísse e o uso de materiais alternativos começou a receber destaque. A Figura 3 apresenta um modelo indicando a estrutura de um veículo e os principais materiais da qual é produzida.

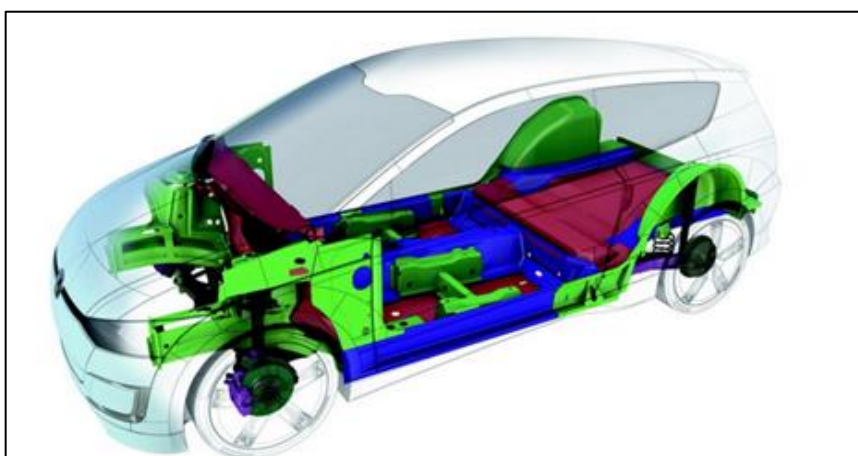


Figura 3: Materiais dos componentes da carroceria veicular.
Adaptado de: Kelley Blue Book (2023).

Como pode-se observar, atualmente, além do aço (representado em verde), é possível encontrar alumínio (elementos em vinho), magnésio (destaque em roxo) e aço endurecido (estrutura em azul). A aplicação desses materiais proporciona melhor performance principalmente devido a diminuição do peso da estrutura, em 100 anos de evolução dos veículos houve uma redução cerca de 50% de sua massa, devido as inovações e evoluções dos materiais (RANA e BRAT, 2017).

Santos (2017), explicita que, devido ao aumento do preço do petróleo nos últimos anos, empresas de todos os setores estão buscando alternativas para a redução de custos de operação. Na indústria automobilística esse impacto ocorreu, principalmente, devido ao custo do combustível e a necessidade de fabricar carros mais econômicos para o consumidor (SANTOS, 2017). Ainda segundo o autor, essa necessidade fez com que as montadoras buscassem materiais alternativos como alumínio e suas ligas que reduzem o peso do veículo sem prejudicar seu desempenho e custo de produção, além de serem resistentes, versáteis e recicláveis.

Vinodh (2012) afirma que, a utilização de materiais alternativos está se tornando cada vez mais comum tanto em componentes externos quanto internos. O autor destaca que além de garantir liberdade no *design*, contribui para menor impacto ambiental, esses materiais auxiliam na produção de veículos automotivos.

Após a seleção dos materiais a serem utilizados em cada componente do veículo, testes são realizados para avaliar o desempenho destes em caso de colisões, principalmente aqueles utilizados em regiões que sofrem maior deformação. Todas as montadoras precisam cumprir requisitos para o protocolo de homologação de cada mercado e, para isso foram criados padrões de testes como o “*New Car Assessment Program*” (NCAP), “*Federal Motor Vehicle Safety Standards*” (FMVSS), o “*Insurance Institute for Highway Safety*” (IIHS) e as normas da “*United Nations Economic Commission for Europe*” (ECE) utilizados em todo o mundo (MAIA, 2021)

A Figura 4 apresenta alguns desses padrões e as condições de testes estabelecidos por cada um deles.

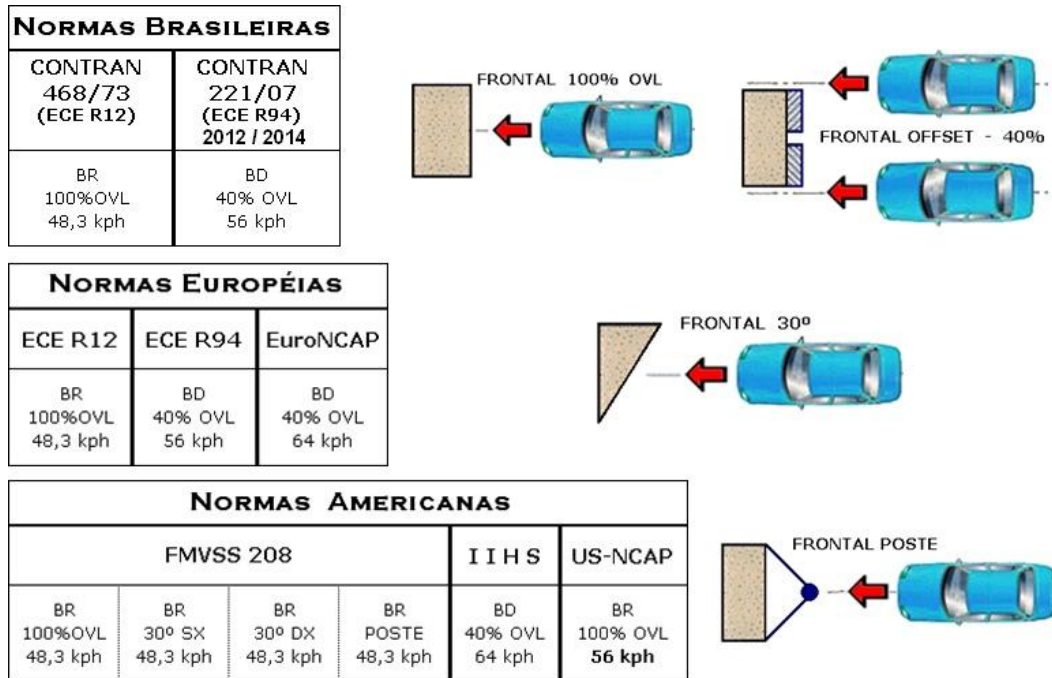


Figura 4: Normas para teste de colisão.

Fonte: Google/ imagens, 2023.

2.3 Elementos de sacrifício

Yusof (2017) aborda alguns componentes que são desenvolvidos e adicionados à estrutura veicular para servir como elemento de sacrifício, ou seja, serão danificados visando uma absorção de energia progressiva até a cabine, reduzindo os danos aos ocupantes. Como já foi citado, o crash box tem como objetivo proteger a estrutura em colisões em baixa velocidade, mas, em casos mais severos, existem outros mecanismos que auxiliam na absorção da energia resultante. Componentes estruturais, tais como: longarinas, travessas, para-choque, capô, para-lamas, motor, suspensão, entre outros, são bons exemplos e irão absorver a maior parcela da energia envolvida numa colisão frontal (HAPPIAN-SMITH *apud* SOUSA, 2018).

A Figura 5 mostra a configuração da estrutura frontal automotiva.

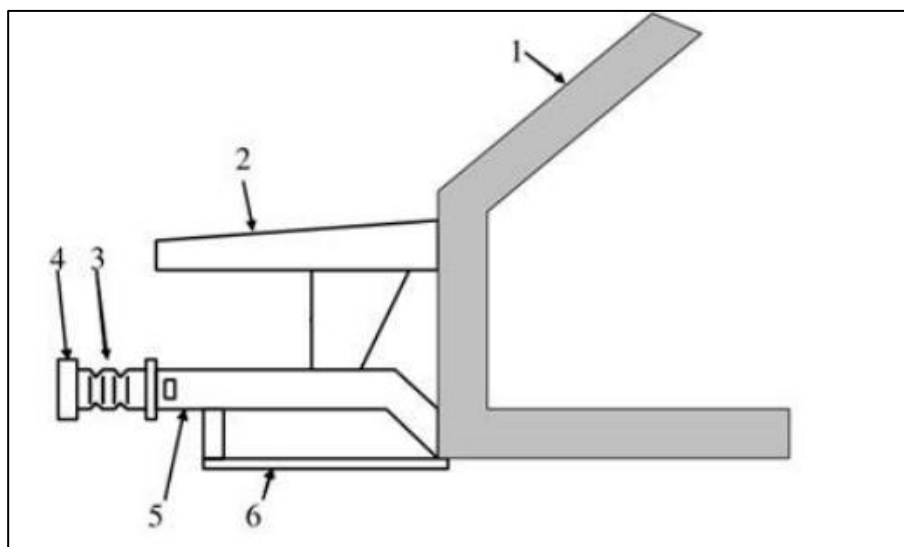


Figura 5: Estrutura frontal de um automóvel.
Fonte: Yusof *et al* (2017).

Em 1 tem-se o *cockpit* não deformável. 3 representa o crash box, 4 a travessa do para-choque, 2 e 5 são as longarinas e 6 a estrutura mecânica.

A travessa do para-choque é o primeiro elemento de sacrifício na parte frontal do automóvel, fica localizada na parte interna do para-choque, tem como função absorver o impacto proveniente de uma colisão em baixa velocidade, protegendo toda a estrutura posterior a ele (CESVI, 2019).

Em seguida tem-se o *crash box* que, de acordo Abdullah *et al.* (2019), é um sistema de segurança passiva que deve atuar como absorvedor de energia cinética durante uma colisão frontal, mantendo a desaceleração do veículo dentro do limite de segurança e minimizando a possibilidade de lesão para os passageiros e danos mais severos à estrutura. Geralmente se apresenta em formato cônico e em metal, aço carbono ou alumínio e está fixado na travessa.

Bois *et al.* (2004) destacam que a longarina é o componente mais importante para a absorção de energia em caso de colisão frontal, já que respondem de maneira eficiente as solicitações impostas, garantindo resistência estrutural dos automóveis, protegendo a carroceria e, principalmente, os ocupantes do veículo durante uma ocorrência.

Fechová (2016) esclarece que, além da absorção de energia pelos componentes localizados nas extremidades dos veículos, outro fator importante a ser considerado no desenvolvimento de um automóvel é que, após a colisão, o habitáculo deve permanecer com um espaço suficiente para a sobrevivência dos passageiros, ou seja, não pode se comprimir ao ponto de esmagá-los.

Silva (1998) aponta que outra forma de aumentar a absorção de energia cinética pela estrutura e proteger os ocupantes dentro da cabine, é o uso de deformações programadas na longarina. Pereira (2020) explica que, para esse mecanismo, os fabricantes fazem marcações na lataria para que o metal seja deformado de forma prevista, possibilitando o cálculo da quantidade de energia absorvida pelo componente e a transferência da força do impacto para estruturas mais reforçadas e evitando que chegue até a cabine. Desta forma o motor é deslocado para baixo, o capô, comprime e “sobe” e os componentes da suspensão vão para as laterais. Na Figura 6 está indicado a região de deformação programada da carroceria automotiva.

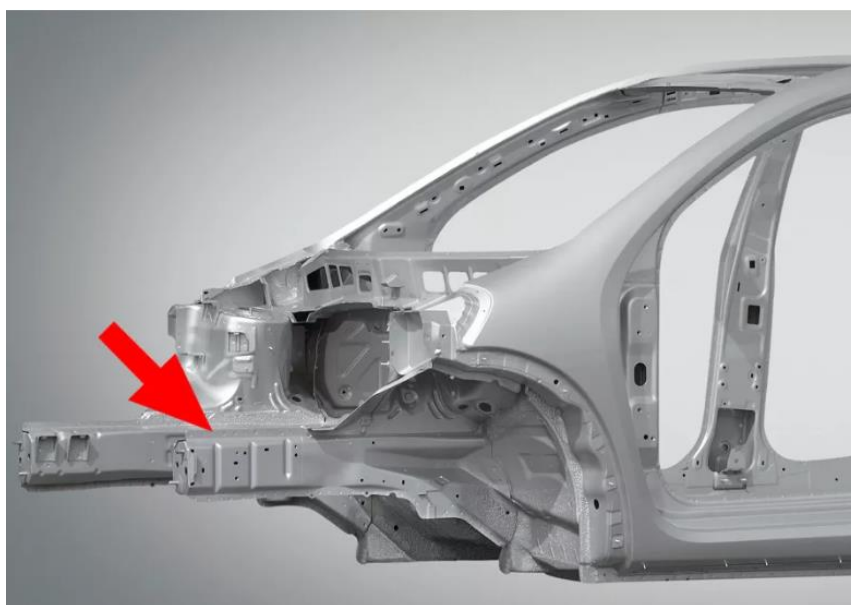


Figura 6: Longarina com marcações para deformação programada.
Fonte: Posto de vistoria (2019).

A seta vermelha mostra onde as marcações foram feitas e onde se espera que ocorra a deformação em caso de colisão. Esse sistema vai evitar a diminuição da área do habitáculo do veículo.

2.3.1 Solda a ponto por resistência elétrica

Para a produção das amostras foi utilizado o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, processo utilizado na indústria automobilística, principalmente devido a sua alta produtividade, baixo custo operacional e por não exigir demasiada experiência do operador (ASLANLAR et al., 2007). Maia (2021) define como grupo de processos de soldagem por pressão onde as peças são unidas utilizando o calor gerado pela passagem de corrente elétrica entre as chapas por meio de eletrodos não consumíveis e aplicação de força axial para formar o ponto de solda.

Sousa (2018), ressalta que existem três fatores que devem ser verificados para iniciar o processo, são eles: Efeito Joule (aquecimento); Tempo; Pressão. O autor cita que, segundo a lei de Joule, a corrente aplicada ocasiona uma quantidade de calor proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade, e que deve permitir que as regiões a serem soldadas atinjam o ponto de fusão, garantindo a fixação dos elementos.

2.4 Colisões

Cardoso (2010) expõe que quando ocorre o choque entre dois veículos, a integridade física dos ocupantes é de grande preocupação e, por isso, a estrutura frontal deve ser capaz de absorver o máximo de energia cinética possível, para que essa não atinja os ocupantes.

Hibbeler (2007) explica que se entende como colisão como uma interação com duração limitada entre dois corpos livres e quando, ao final, tem-se uma força de reação gerada pelo contato entre os corpos. A energia cinética de um corpo envolvido pode ser totalmente ou parcialmente conservada ou completamente dissipada, enquanto a quantidade de movimento só sofrerá alteração caso haja influência de força externa ao sistema. Um parâmetro importante no estudo de colisões é o coeficiente de restituição, que permite o dimensionamento da quantidade de energia conservada durante o processo (CHAUUA, WONGA, WU, 2002).

A análise do comportamento da energia cinética antes e depois do choque é importante já que ela que definirá qual o tipo de colisão sofrida (HALLIDAY E RESNICK, 2016). O autor define o primeiro tipo de colisão como perfeitamente elástica, onde a energia mecânica se conserva e a energia cinética é a mesma, antes e depois do contato. Explica que se trata de uma situação idealizada, onde a velocidade de aproximação e afastamento dos corpos é a mesma e o coeficiente de restituição é igual a 1, conseqüentemente toda a deformação sofrida é recuperada.

A segunda, de acordo com Halliday e Resnick (2016), é a colisão inelástica, onde há dissipação parcial de energia mecânica e cinética do sistema, logo, a velocidade do afastamento é relativamente menor que a de aproximação e o coeficiente de restituição tenha valores entre 0 e 1.

Por fim, Halliday e Resnick (2016) cita a colisão perfeitamente inelástica, onde o coeficiente de restituição é igual a zero, ou seja, toda energia cinética do sistema é perdida após a colisão, toda a deformação sofrida pelo corpo é mantida e os objetos permanecem unidos e se deslocam como um único corpo, conseqüentemente, a velocidade de afastamento é nula.

A Figura 7 ilustra um ensaio de colisão realizado nos automóveis.

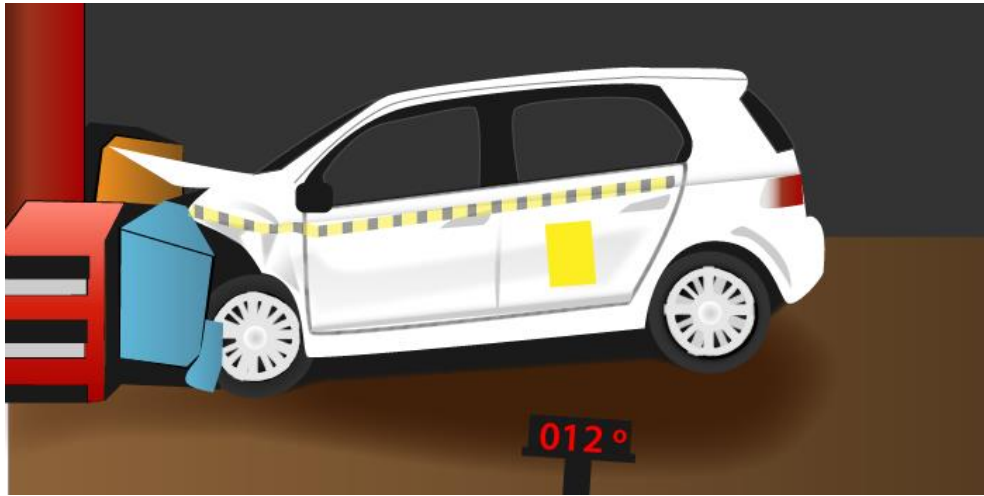


Figura 7: Colisão entre carros e obstáculos.
Fonte: Instituto Metr pole Digital, 2023.

  possível notar uma col s o perfeitamente inelástica, onde o veículo sofreu deformação permanente devido a perda total da energia cinética.

2.5 Energia mecânica

Como já citado anteriormente,   possível encontrar, antes, durante e após as col s es energias atuantes no sistema. Energia   uma grandeza escalar associada ao estado de um ou mais objetos, pode ser transformada de um tipo para outro e transferida de um objeto para outra, sendo que, a quantidade total de energia não varia. Essa transferência de energia entre dois ou mais objetos   chamada de trabalho (W) (HALLIDAY e RESNICK, 2016).

A energia mecânica é composta de duas formas: Energia cinética (quando está associada ao movimento) e energia potencial gravitacional (quando está relacionada com a posição do corpo). Para encontr -la basta realizar a soma dessas duas últimas energias (HALLIDAY e RESNICK, 2016):

$$E = E_c + E_{pg} \quad (1)$$

2.5.1 Energia cinética

Marques (2023) aponta que, todo objeto em movimento possui uma energia associada que, nesse caso é denominada como energia cinética.

Hibbeler (2011) define cinética como o ramo da dinâmica que estuda a relação entre a variação do movimento de um corpo e as forças que causam essa variação, tem como base a segunda lei de Newton, ou seja, considera que se uma força desequilibrada é aplicada sobre uma partícula, ela se acelerará na direção dessa força.

A unidade de energia cinética (E_c) é o joule (J) e, para um objeto de massa m que se move com uma velocidade v (HALLIDAY e RESNICK, 2022):

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (2)$$

Também segundo Halliday e Resnick (2022), quanto maior a velocidade com a qual um objeto se move, maior a energia cinética.

2.5.2 Energia potencial

Enquanto a energia cinética está associada ao movimento, a energia potencial está associada a configuração do sistema sujeito a uma força conservativa (TIPLER, 2009).

Halliday e Resnick (2016) abordam energia potencial como a capacidade de um corpo de realizar trabalho quando uma força conservativa é aplicada sobre ele e, a depender da configuração do sistema, é possível representá-la de duas formas, energia potencial gravitacional (há um aumento da energia cinética do corpo) e energia potencial elástica (há uma redução da energia cinética do corpo) (HALLIDAY e RESNICK, 2016).

Marques (2023) caracteriza energia potencial gravitacional como aquela que resulta da interação gravitacional entre duas ou mais partículas e depende da distância entre elas. Está associada ao estado de separação entre dois objetos atraídos pela força gravitacional, considera um sistema formado pela Terra e uma partícula e que está associada ao peso do corpo e a sua altura em relação a Terra, que permite sua aceleração, se transformando em energia cinética (HALLIDAY e RESNICK, 2016).

$$E_{pg} = m * g * h \quad (3)$$

Onde, E_{pg} é a energia potencial gravitacional, m é a massa do objeto, g a aceleração da gravidade e h a altura.

Neste trabalho a longarina atua como uma mola e, por isso, também há uma energia potencial elástica sobre o sistema que, segundo Hibbeler (2005), está associada ao alongamento ou compressão relativa da mola não deformada.

$$E_{Pel} = \frac{k * x^2}{2} \quad (3)$$

Onde, E_{Pel} é a energia potencial elástica, k é a constante elástica do material e x é a deformação do corpo.

2.6 Amortecimento

Rao (2008) define vibração como qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo, um sistema vibratório inclui um meio que armazena energia potencial (mola ou elasticidade) e cinética (massa ou inércia) e outro que dissipa energia (amortecedor). Em um ciclo do sistema haverá transferência alternada de sua energia potencial em energia cinética e vice e versa, quando um sistema é amortecido haverá dissipação de energia em cada ciclo e, conseqüentemente, uma quantidade da energia é dissipada (RAO, 2008).

Rao (2008) explica que amortecedores são mecanismos que convertem a energia do sistema em calor ou som e o amortecimento devido a deformação de um material que absorve e dissipa energia devido ao atrito entre os planos internos é denominado amortecimento material ou sólido ou por histerese. O autor ainda explicita que é importante ter conhecimento sobre o conceito de ressonância já que esse é um fenômeno que deve ser evitado para não se ter falhas nos sistemas e ocorre quando a frequência de excitação coincide com a frequência natural do sistema.

A tentativa por limitar a amplitude de vibração de um sistema e, conseqüente a ressonância sobre ele, justifica a adição de amortecedores nos componentes (RAO, 2008). Segundo o autor, isso pode ocorrer com a adição de juntas parafusadas e rebitadas, mas também com a utilização de materiais viscoelásticos, que podem ser ligadas a um material elástico, ser colocado entre duas camadas de material elástico (arranjo sanduiche) ou por meio de fitas de amortecimento (lâminas de metal cobertas com um adesivo viscoelástico), em todos os casos o material está sujeito a deformações diretas ou por cisalhamento promovendo o amortecimento.

2.7 Ondas elásticas

Rusinek *et al.* (2008) afirma que ondas elásticas longitudinais são geradas pelo impacto em uma das pontas da haste, sendo que a outra pode ou não estar fixa em outra estrutura. O autor ainda afirma que a velocidade de propagação dessa onda está diretamente relacionada com o Módulo de Young e a densidade do material e o tempo para que ela chegue até o lado oposto é relativamente curto.

O processo de colapso de uma estrutura está diretamente relacionado pela plasticidade do material e pela propagação das ondas elásticas por ele, já que elas causam um aumento de tensão alta o suficiente para deformar plasticamente o material até a ruptura. Rusinek *et.al* (2008) realizou um estudo sobre o efeito das ondas elásticas sobre o “*crash box*” em caso de colisão e pode observar que o colapso da estrutura ocorre devido a energia acumulada durante o trajeto de propagação de ida e volta a partir da superfície que recebeu o impacto. O autor também observou que materiais com pouca capacidade de deformação foram mais suscetíveis ao colapso.

A Figura 8 mostra a propagação de uma onda elástica em uma haste fixa em uma das extremidades.

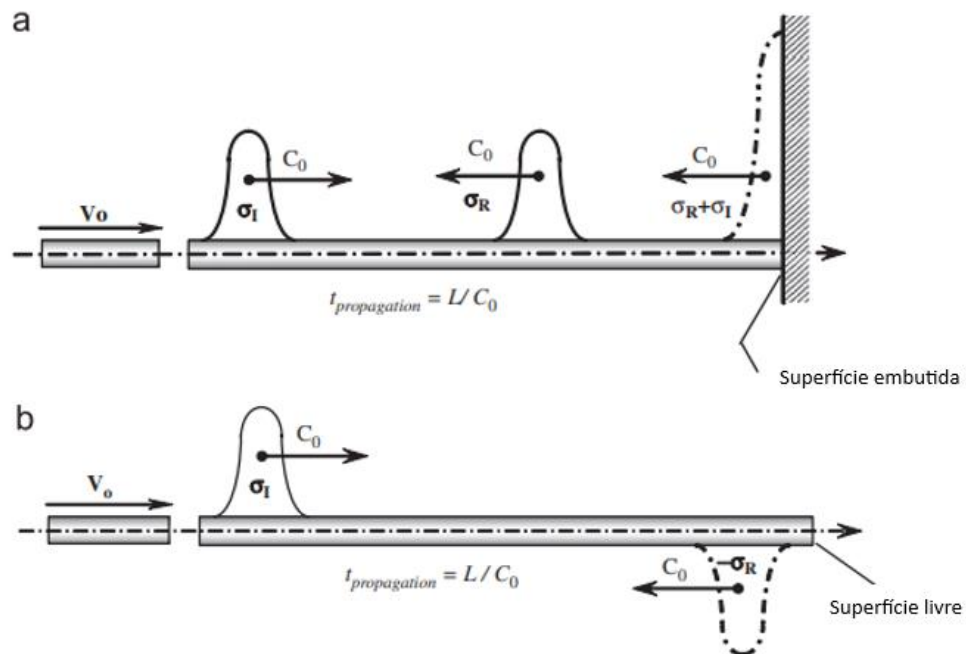


Figura 8: Representação esquemática da propagação de uma onda elástica (a): superfície embutida e (b) superfície livre.

Adaptado de: Rusinek *et al.* (2008).

Tendo todos os estudos realizados, foi possível obter os parâmetros básicos do processo e uma base teórica consistente que auxiliará na compreensão do trabalho e qual sua importância para a sociedade.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada no trabalho, detalhando o tipo de pesquisa utilizado, os materiais e métodos envolvidos na solução do problema, as variáveis do estudo e seus indicadores e os instrumentos utilizados para a coleta de dados e a forma de tabulação deles.

3.1 Tipo de pesquisa

Havia em latim o verbo *perquiro*, que significava “procurar; buscar com cuidado; procurar por toda parte; informar-se; inquirir; perguntar; indagar bem, aprofundar na busca”. [...] Perceba que os significados desse verbo em latim insistem na ideia de uma busca feita com cuidado e profundidade. (BAGNO *apud* LAKATOS, 2022, p. 182).

Para Gil (2022), pesquisa é um procedimento racional e sistemático com objetivo de fornecer respostas para um problema proposto, é desenvolvida mediante os conhecimentos disponíveis e com o uso de investigação científica.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho tem caráter qualitativo e quantitativo já que, será realizada uma análise do desempenho do componente adicionado na estrutura veicular e, posteriormente, haverá uma avaliação dos resultados obtidos.

Gil (2022) destaca que toda pesquisa possui um objetivo e cada pesquisa possui um objetivo diferente. Vergara (2016) propõe dois critérios básicos para classificar esse objetivo: quanto aos fins; quanto aos meios.

No primeiro caso, a pesquisa pode ser exploratória, descritiva, explicativa, metodológica, aplicada e intervencionista. Já em relação aos meios, pode ser: de campo; de laboratório, documental; bibliográfica; experimental; *ex post facto*; participante; pesquisa-ação; estudo de caso (VERGARA, 2016)

Neste trabalho será realizada uma pesquisa exploratória, que visa tornar o problema mais explícito, considera os mais variados aspectos relativos ao fenômeno estudado e, ao final do estudo, pretende proporcionar maior familiaridade com o tema, por meio da abordagem e levantamento de dados sobre as ocorrências de trânsito, as medidas já existentes para aumentar a segurança dos passageiros e pedestres e as possíveis melhorias e novas tecnologias que podem ser implantadas.

Os meios utilizados no desenvolvimento do presente trabalho foram as pesquisas bibliográfica e experimental. A primeira decorre da busca de materiais publicados em livros,

artigos e revistas e proporciona uma base teórica para todo o estudo, permitindo ao pesquisador o acesso mais amplo a diversos ramos do estudo. Por ser uma pesquisa baseada, majoritariamente, em outros estudos, requer atenção quanto a procedência da fonte para evitar a propagação de informações incorretas e inconsistentes (VERGARA, 2016).

De acordo com Vergara (2016), pesquisa experimental é uma investigação empírica na qual o pesquisador manipula e controla variáveis independentes e observa os efeitos causados nas variáveis dependentes. É um meio que permite observar e analisar um fenômeno sob condições determinadas pelo estudo. Gil (2022) aponta que deve haver a definição do objeto de estudo, a seleção das variáveis que podem gerar alguma influência e, por fim, a definição as formas de controle e observação dos efeitos causados no objeto.

Neste trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os conceitos e variáveis principais do projeto para que, em seguida, torne-se possível o início do desenvolvimento de projeto e, através da pesquisa experimental, foi possível definir os comportamentos e resultados esperados para o componente desenvolvido.

3.2 Materiais e métodos

Os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho são apresentados no fluxograma (Figura 9) abaixo.

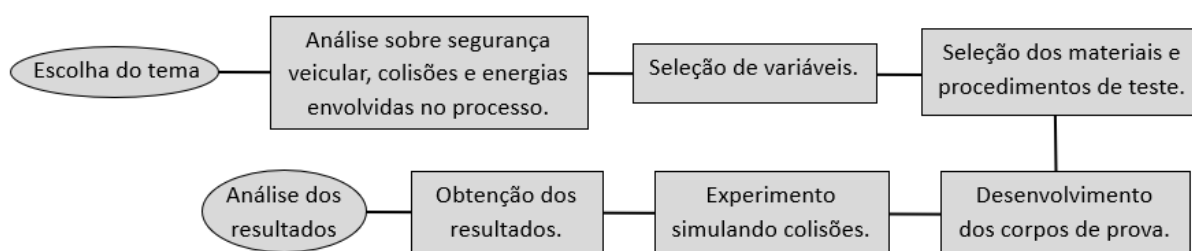


Figura 9: Etapas da metodologia.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A Figura 9 demonstra as etapas que foram seguidas no decorrer da pesquisa, que se iniciou com a escolha do projeto e qual seria a área de aplicação. Posteriormente foi feita uma pesquisa detalhada sobre todos os parâmetros que possuem alguma influência sobre o projeto e sobre o setor em que ele está inserido. Em seguida, determinou-se as variáveis do estudo e seus indicadores, assim como a escolha do material a ser utilizado. Com o conhecimento de todos esses fatores, foi possível iniciar o desenvolvimento do protótipo, a realização dos testes e, conseqüentemente, a obtenção dos resultados. Por fim, os resultados foram analisados e discutidos.

3.2.2 Solda a ponto por resistência elétrica

Para o trabalho foi utilizada uma máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica do fabricante FASE, modelo HCM 4300 HHT, que possui uma pinça de soldagem onde estão os eletrodos e representada nas Figura 11 e Figura 12.



Figura 11: Máquina de soldagem.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 12: Pinça de soldagem.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Na Figura 12, é possível observar a pinça contendo os eletrodos nas pontas, é ela que aplicará a pressão e correntes necessárias para a soldagem.

Os pontos de solda foram produzidos a 10mm das extremidades e com distanciamento de 33mm entre eles. Foi utilizada uma corrente de soldagem de 9,2kA, força aplicada as pinças (eletrodos) de 1,8kN e tempo de corrente de soldagem de 15 ciclos (0,250s).

Na Figura 13, é possível observar os pontos de solda realizados e suas posições.



Figura 13: Chapas soldadas por soldagem a ponto.

Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros utilizados no processo de soldagem.

Tabela 2: Programação da máquina de soldagem.

Indicador	Valor	Unidade
Enc	30	Ciclos
Pre	50	Ciclos
Sold	15	Ciclos
Ret	10	Ciclos

Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Em destaque tem-se: Enc: tempo que a pinça leva até encostar na superfície; Pre: tempo em que a pinça fica em contato com a chapa, mas sem a presença de corrente, garantindo com a peça estará estável e que toda a superfície estará em contato no momento da solda, evitando bolsas de ar; Sold: tempo de solda; Ret: tempo em que a pinça fica em contato com a superfície após a soldagem. É importante ressaltar que todos os valores estão indicados em ciclos.

A Figura 14 representam as 6 amostras produzidas, visto que, as longarinas ilustradas na Figura 14(a) representam o grupo 1, de controle, sem revestimento e as ilustradas na Figura 14(b) o grupo 2, de análise, com revestimento polimérico. As longarinas foram construídas utilizando as mesmas condições de contorno, sendo mesmo: material, resistência mecânica dos pontos de solda e dimensões, logo, a única diferença entre os grupos foi a adição de revestimento polimérico (grupo 2).

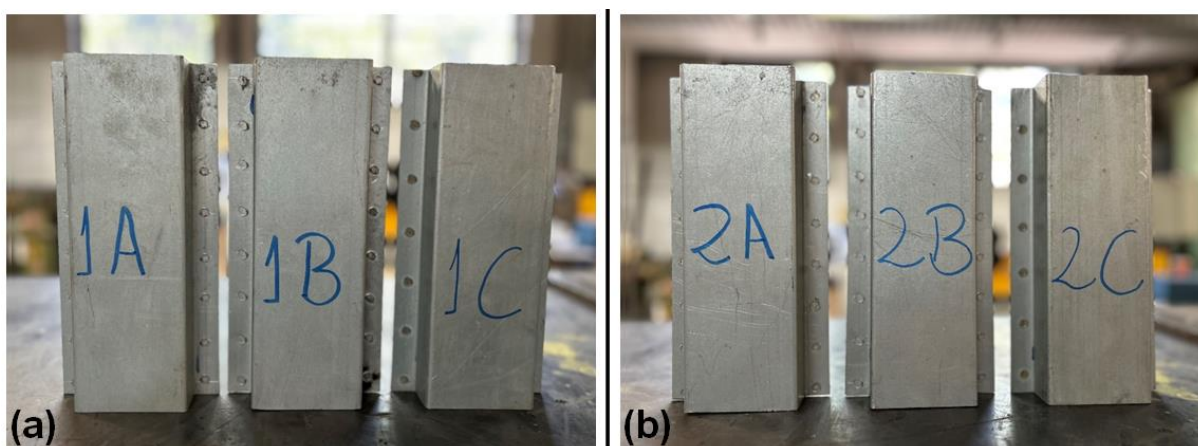


Figura 14 – Amostra produzidas para realização do teste de colisão: (a) sem revestimento e (b) com revestimento.

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

3.2.3 Revestimento

Para a seleção do material de revestimento considerou-se a facilidade de obtenção no mercado (grande oferta), de baixo custo e com características que contribua para melhor performance em absorção de energia, assim, optou-se pelos materiais poliméricos. Dentre eles, a borracha natural foi selecionada devido a sua característica de amortecimento, ou seja, espera-se que sua aplicação na parede interna da longarina atenuar as ondas elásticas proporcionando maior estabilidade na deformação, logo, contribua para maior absorção de energia nos testes de colisão.

Os corpos de prova foram revestidos com manta de borracha natural com 3mm de espessura e dureza de 35 Shore A, módulo de elasticidade de 10.000 N/m², Coeficiente de

Poisson de 0.45 N/A, massa específica de 960 kg/m^3 e Resistência a tração igual a $20.000.000 \text{ N/m}^2$. O adesivo de contato utilizado possui alta força de colagem e performance, é resistente a água e é o indicado para os materiais a serem fixados, com densidade relativa de 0,83 a 0,86 g/cm^3 e viscosidade de $1.800 - 2.500 \text{ mPa s}$.

Para a aplicação do revestimento as superfícies deverão ser limpas e, posteriormente, será aplicada uma camada de adesivo de contato para fixar a manta sob o corpo de prova. Para garantir a completa aderência, os componentes foram mantidos em repouso por cerca de 24 horas para se iniciar as simulações.

A Figura 15 apresenta as dimensões dos corpos de prova com e sem revestimento, e, o peso das amostras.

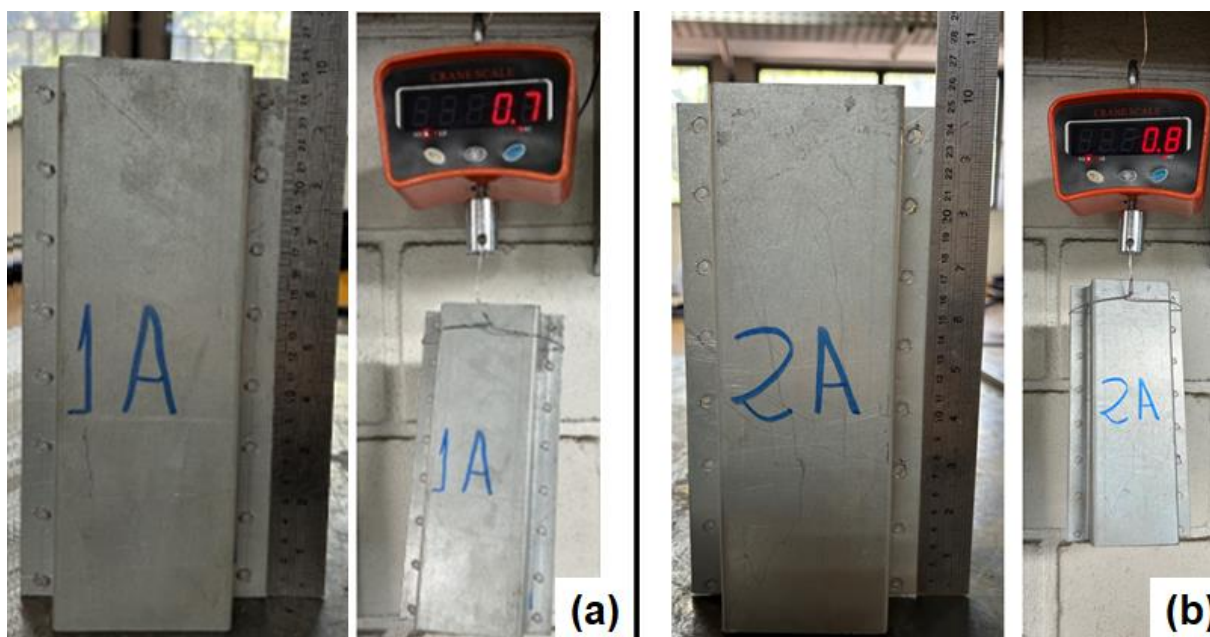


Figura 15: Dimensões e massa dos corpos de prova: (a) sem revestimento e (b) com revestimento.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Na Figura 15, observa-se que houve um acréscimo de 100g a massa da longarina sem revestimento. Essa massa adicional é considerável, porém, acredita-se que sua contribuição justifique maior peso da estrutura.

Na Figura 16 pode-se comparar os corpos de prova com e sem o revestimento, é possível observar na amostra 2A que a borracha foi fixada por toda área interna, porém, como a longarina é uma estrutura bipartida a borracha também ficou bipartida.



Figura 16: Comparativo entre os corpos de prova: amostra 1A (sem revestimento) e amostra 2A (com revestimento).
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

3.2.4 Experimento de colisão

Para o ensaio, foi utilizada uma torre, Figura 17, com capacidade de içamento de 300kg e altura máxima de 11,5m. Essa torre, localizada em Belo Horizonte, no Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação da Escola de Engenharia da UFMG.



Figura 17: Torre de colisão.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Depois de içada a carga, o martelo de colisão, Figura 18, é liberado e cai em queda livre até atingir o corpo de prova, que é fixado na base da torre.



Figura 18: Martelo de colisão.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Para o trabalho foi utilizada uma carga de 182,6kg, içada a uma altura de 2,18 metros do corpo de prova, logo, a energia potencial utilizada nos testes foi de 3892,2J. Para garantir a integridade do equipamento foi utilizado um limitador de curso que permitiu uma redução máxima de 100mm. A Figura 19 mostra o posicionamento final do corpo de prova.



Figura 19: Posicionamento final para o experimento.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

3.3 Variáveis e indicadores

Gil (2022) esclarece que, para fins de pesquisa, entende-se como variável, um assunto que pode ser classificado em duas ou mais categorias. Já, segundo o mesmo autor, indicador é um parâmetro que informa acerca de algum aspecto da variável em estudo.

Na tabela 3 são apresentadas as variáveis do trabalho e seus indicadores.

Tabela 3: Variáveis e indicadores.

VARIÁVEL	INDICADORES
Gravidade do acidente	• Tipo de colisão • Materiais • Geometria • Velocidade do impacto • Energia mecânica • Absorção de energia
Material do componente	• Viabilidade • Propriedades mecânicas

Fonte: Pesquisa direta, 2023.

3.4 Instrumento de coleta de dados

As análises de deformação dos corpos de prova foram realizadas utilizando uma câmera de alta velocidade modelo Phantom Miro 110, resolução 1280 x 800, 1,6 Gpx/s e 2 μ s captura mínima. Análises de deslocamento, velocidade e aceleração de deformação da longarina, foram realizadas utilizando o software da PCC (Phantom Camera Control). As imagens foram capturadas com resolução de 256 x 552 e a 10.000 frames por segundo. Equipamento representado na Figura 20.



Figura 20 – Câmera de alta velocidade.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

3.5 Tabulação de dados

Para a análise dos dados obtidos pelos ensaios, serão utilizados os *softwares* Excel, Word e o PCC - *Phantom Camera Control*, software integrada a câmera de alta velocidade.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os tipos de pesquisas e metodologias utilizadas durante a elaboração do trabalho além dos materiais e métodos para o desenvolvimento do componente, as variáveis em estudo e seus indicadores e, por fim, os instrumentos de coleta de dados e a tabulação deles, que possibilitou a análise dos resultados.

4 RESULTADOS

4.1 Deformação das longarinas

Tendo os 6 corpos de prova de acordo com a solicitação do projeto e os parâmetros dos ensaios definidos foram realizados os testes com cada uma das longarinas em condições iguais.

Na Figura 21 está representado um comparativo com os resultados obtidos.

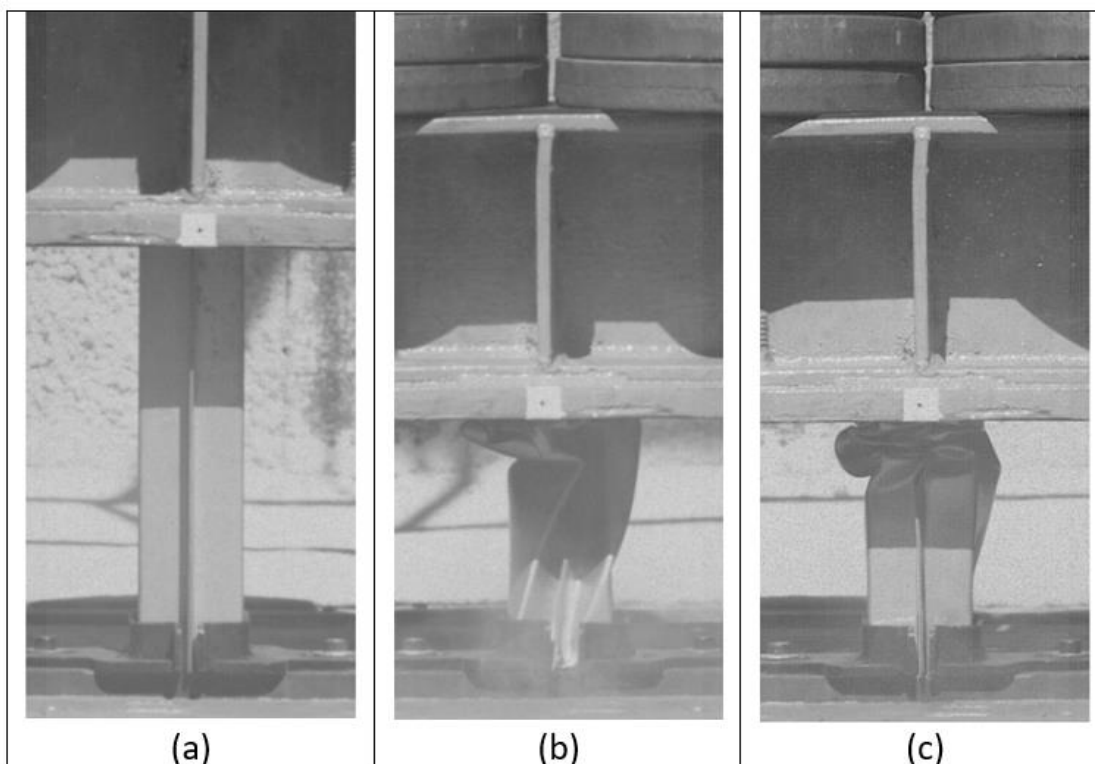


Figura 21: Comparativo entre as deformações das longarinas: (a) antes da colisão, (b) sem revestimento e (c) com revestimento.

Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A Figura 21 (a), mostra a longarina antes da deformação, a Figura 21 (b), a longarina sem revestimento após o ensaio e a Figura 21 (c), a longarina com revestimento após o ensaio.

Na Figura 22, são apresentadas as seis amostras após o ensaio.



Figura 22: Deformação final das longarinas: grupo 1 (sem revestimento) e grupo 2 (com revestimento).
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

É possível observar pela Figura 22 que a altura das longarinas após o ensaio foi semelhante. Isso ocorreu, devido ao limitador de curso utilizado, como explicitado na seção 3.4.2, que permitiu uma redução de 40% da altura dos corpos de prova. Na Figura 23 é possível observar o posicionamento final do martelo de compressão sobre o corpo de prova e a atuação do limitador de curso.



Figura 23: Limitador de curso.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Observou-se um comportamento atípico nas longarinas identificadas como 1B e 2C (Figura 24 (a) e Figura 24 (b) respectivamente), nas quais a deformação ocorreu na região inferior do corpo de prova. Esse evento pode ter sido ocasionado por diversos fatores como, algum defeito não identificado previamente nas chapas e/ou falha na fixação dos corpos de prova, que proporcionou uma deformação nessa região. Abramowicz *et al.* (1984), trata essa deformação como assimétrica e afirma que a transição do esmagamento pode ocorrer em uma

coluna se lóbulos assimétricos se desenvolvessem na região inferior, produzindo ali, certa instabilidade.

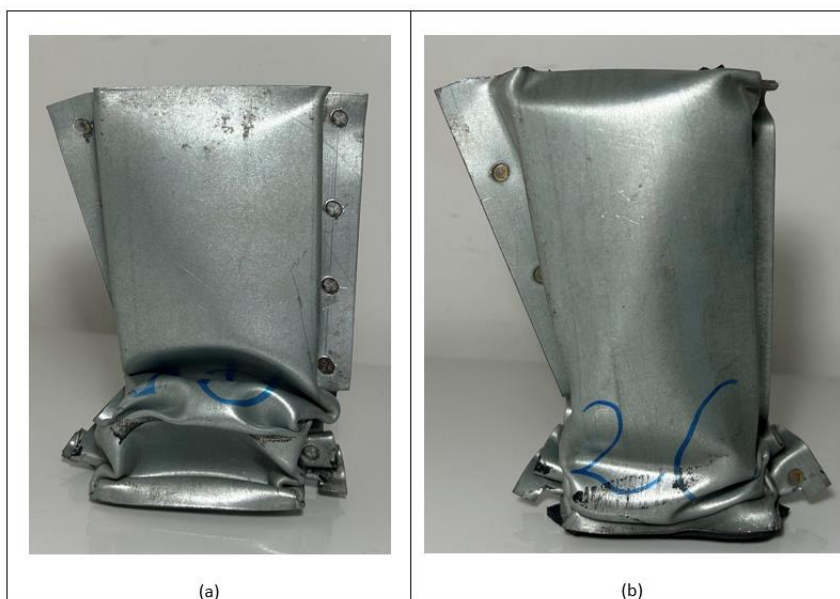


Figura 24: Longarinas 1B (a) e 2C (b).
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Para a obtenção dos dados, utilizou-se uma câmera de alta velocidade para estudar a resposta de deformação e desaceleração da longarina. Para isso, foi necessário a definição de um ponto de origem no ensaio e, nesse trabalho, optou-se por realizar uma marcação na região central da barra inferior do martelo que atuará como “alvo” (Figura 25). Utilizando o software *Phantom Camera Control* – PCC, esse alvo, foi monitorado e convertido em dados numéricos de deslocamento em função do tempo. Posteriormente, foram utilizados métodos estatísticos para obter as curvas de velocidade e aceleração em função do tempo, que possibilitaram a análise do comportamento de cada corpo de prova. Para eliminar os ruídos, sem excluir picos relevantes, foi utilizado um filtro *Butterworth* passa-baixa e frequência de corte de 60 Hz sobre as curvas de velocidade e aceleração.

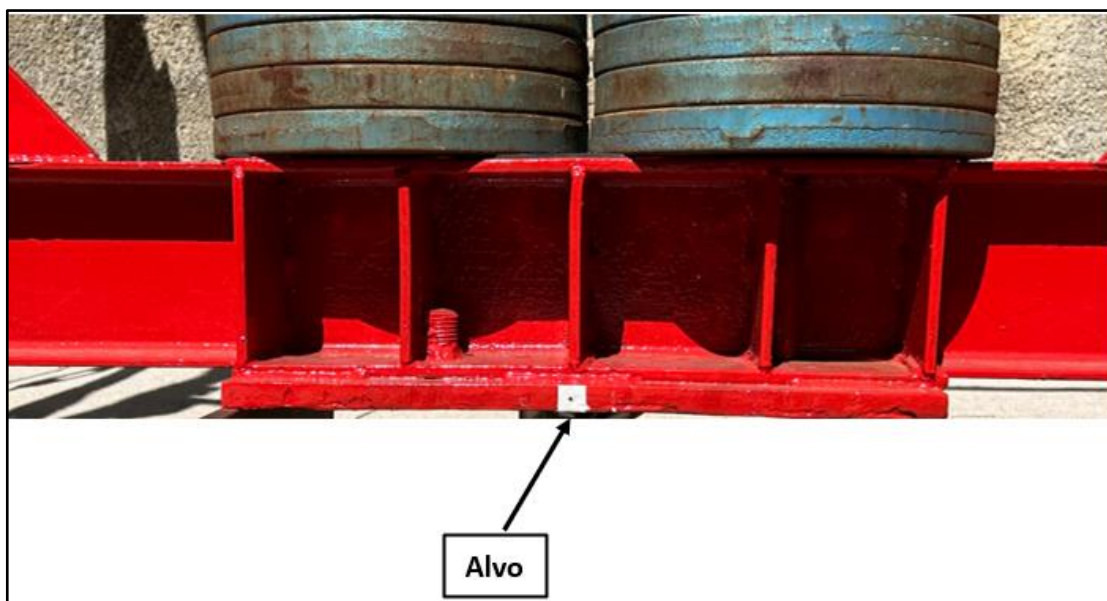


Figura 25: Indicação do alvo utilizado para o ensaio.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Na Figura 26, estão representadas as curvas de Velocidade x Tempo da deformação de cada longarina, onde as linhas em vermelho representam os corpos de prova sem revestimento e as linhas pretas aqueles com revestimento.

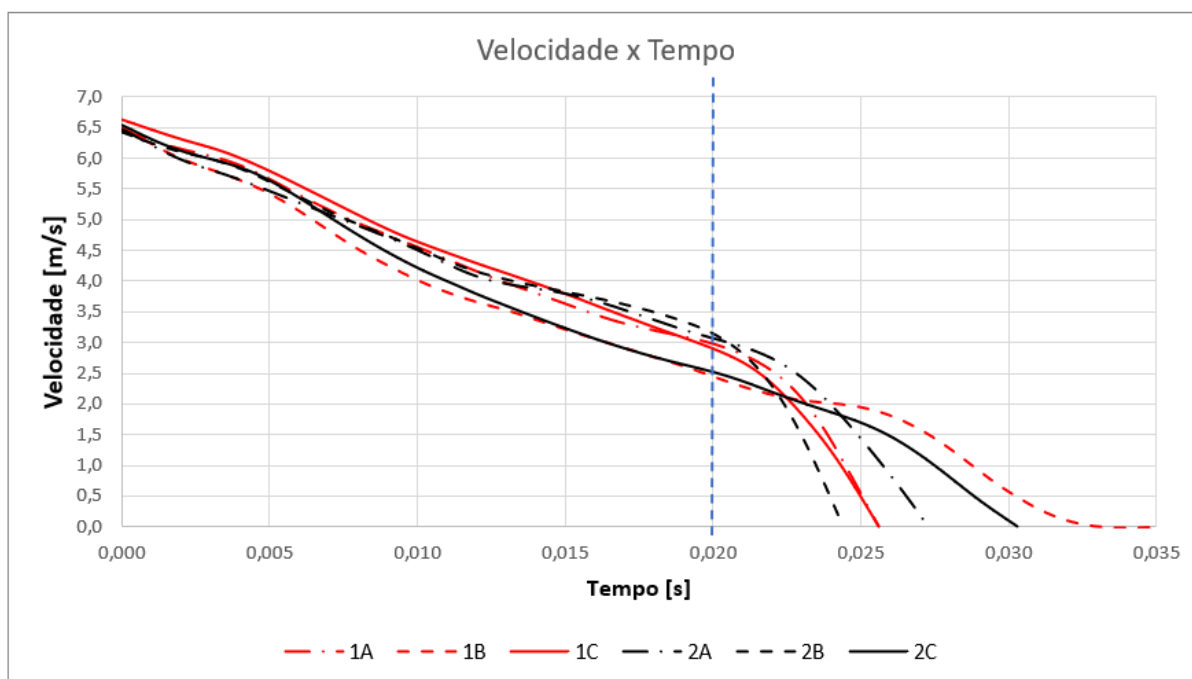


Figura 26: Curvas Velocidade x Tempo.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Visto que as longarinas não absorveram toda a energia potencial do martelo de colisão e a fim de excluir a desaceleração abrupta ocasionada pelos limitadores de curso (Figura 23),

optou-se por realizar a análise das curvas no instante 0,020 segundos (linha tracejada, Figura 26), momento anterior ao contato e de máxima deformação dos corpos de prova.

A Figura 27 ilustra as curvas de velocidade e, observou-se que as amostras 1A, 1C, 2A e 2B são semelhantes (longarinas com deformação na região superior), sugerindo que a velocidade de deformação, aparentemente, não apresentou diferenças significativas entre os grupos estudados (com e sem revestimento). Porém, as curvas 1B e 2C, as quais representam as longarinas que se deformaram na região inferior, apresentaram uma velocidade nos instantes iniciais semelhantes as demais, no entanto, a partir do instante 0,007s a inclinação das curvas divergiram, apresentando velocidades menores.

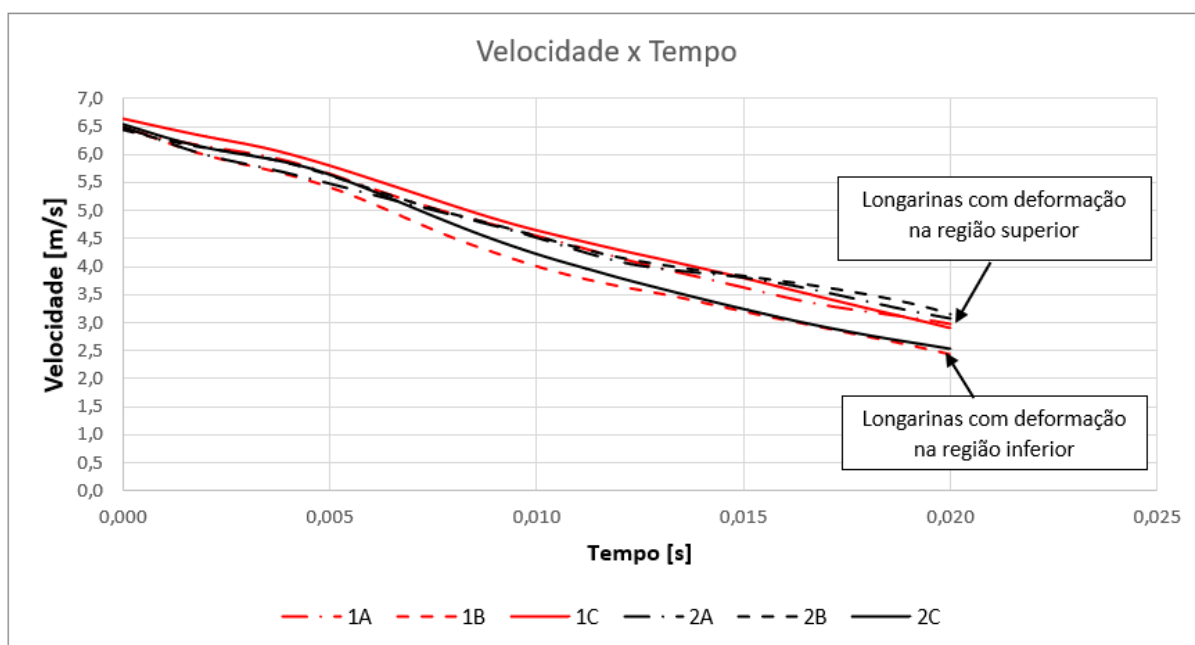


Figura 27: Curvas Velocidade x Tempo até instante 0,020s.

Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A Figura 28 ilustra as curvas Aceleração x Tempo as quais foram cortadas no instante de 0,02s, conforme discutido na Figura 26. Na Figura 28, observou-se que não houve mudanças significativas da desaceleração entre as longarinas com e sem revestimento, exceto pelas amostras 1B e 2C, que apresentaram picos de desaceleração maiores no instante de 0,007s em comparação as outras amostras.

Ainda na Figura 28 (seta em azul), observou-se um comportamento divergente na curva da amostra 2A dentre as longarinas que deformaram, predominantemente, na região superior, já que nos instantes iniciais apresentou desaceleração similar as amostras 1B e 2C, porém, após o instante de 0,003s assume um comportamento divergente de todas as amostras estudadas. Analisando a deformação global, observou-se que a amostra 2A se deformou na região inferior,

comportamento semelhante as amostras 1B e 2C, porém, também se deformou na região superior, conforme observado na Figura 29. Acredita-se que esse resultado distinto das demais amostras se deve a esse modo de deformação.

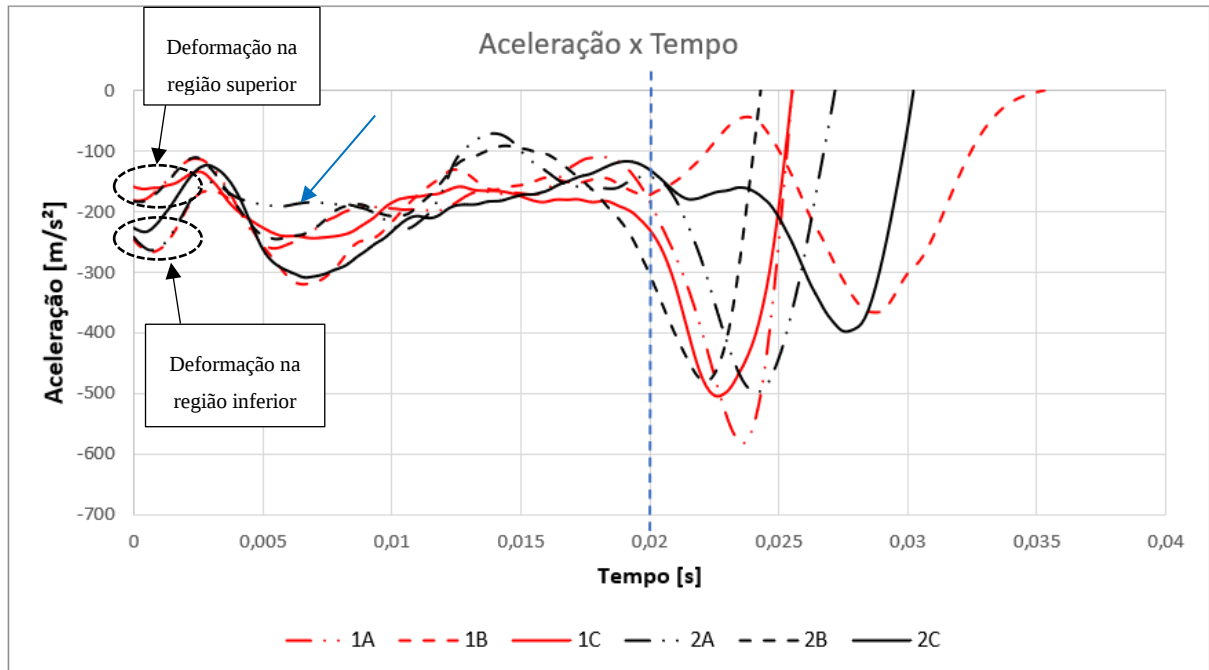


Figura 28: Curvas Aceleração x Tempo.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 29: Longarina 2A após ensaio.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A Figura 30 aponta a diferença do posicionamento da fixação das longarinas em um instante antes do início da compressão (Figura 30 (a)) e em outro onde ela já havia iniciado (Figura 30 (b)).

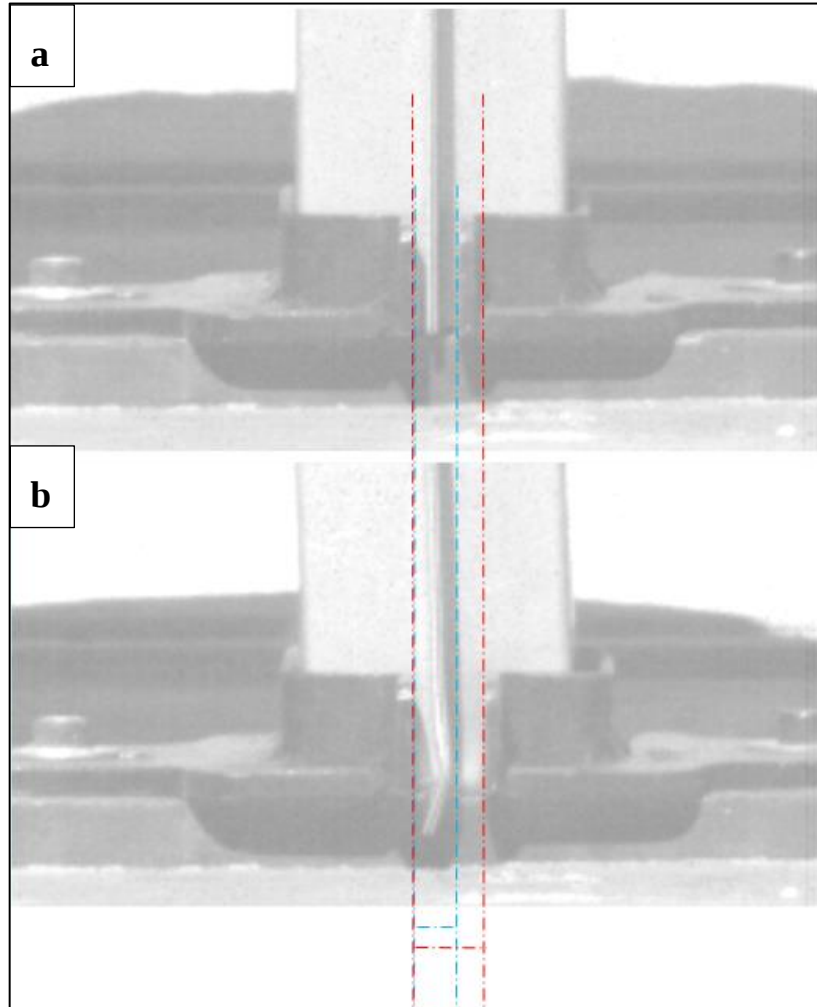


Figura 30: Comparativo da deformação inferior da longarina 2A: (a) instante antes do contato (b) deformação inicial da longarina.

Fonte: Pesquisa direta, 2023.

As linhas azuis (Figura 30) indicam o posicionamento inicial do sistema de fixação, já as linhas vermelhas, sua posição final. É possível perceber um deslocamento considerável da base, que exerceu uma força de resistência contrária a deformação das longarinas.

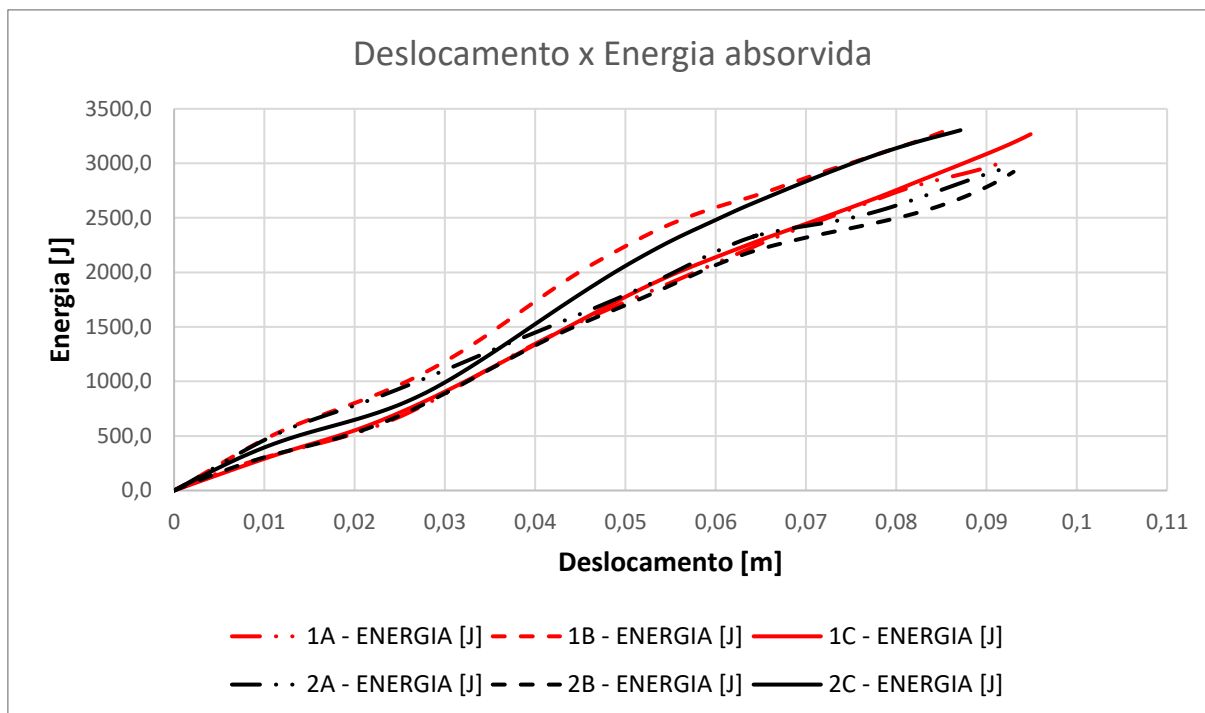


Figura 31: Curvas Deslocamento x Energia absorvida.
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Os resultados representados na Figura 31 sugerem que a energia absorvida pelas amostras até o instante de 0,02s não apresentaram diferenças significativas durante o deslocamento. Através da análise da Figura 31, observa-se que as curvas que representam as amostras 1B e 2C apresentaram uma maior absorção de energia, principalmente, ao final do deslocamento. Pode-se perceber que, até aproximadamente o instante 0,035m, o corpo 2A apresenta um comportamento divergente, como já foi abordado nas análises anteriores, e é possível observar uma maior inclinação na curva, indicando que no início do deslocamento foi capaz de absorver uma maior quantidade de energia. O resultado encontrado pode, mais uma vez, ser justificado pelo modo de deformação das amostras citadas.

A Figura 32, representa a análise estatística do Teste-t referente a energia absorvida pelas longarinas no instante de 0,020s. Os resultados estatísticos confirmam que não há diferenças significativas entre os grupos estudados com e sem revestimento.

ENERGIA ABSORVIDA [J]		
	1	2
A	3039,0	2959,8
B	3307,7	2922,2
C	3267,2	3303,8
MÉDIA	3204,6	3062,0
DESVIO PADRÃO	144,9	210,3

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	1	2
Média	3204,641	3061,957
Variância	20993,14	44226,57
Observações	3	3
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t	0,967708	
P(T<=t) uni-caudal	0,193995	
t crítico uni-caudal	2,131847	
P(T<=t) bi-caudal	0,38799	
t crítico bi-caudal	2,776445	

Figura 32: Análise estatística.

Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A adição de estruturas polímeras nas longarinas é um tópico que vem sendo abordado por diversos autores. Yalçin *et al.* (2022), Li *et al.* (2023) e Alshahrani *et al.* (2022) propuseram estudos relacionados e obtiveram resultados positivos. Yalçin *et al.* (2022), propôs a adição de espuma e molas de poliuretano no interior de tubos de seção quadrada de alumínio, estrutura similar a utilizada no presente trabalho e obteve um aumento considerável na absorção de energia durante o ensaio de colisão. Já Li *et al.* (2023) adicionou espuma de alumínio no interior dos tubos de alumínio, ao final do trabalho, concluiu que os tubos preenchidos obtiveram menores danos e maior absorção de energia na situação de impacto. Alshahrani *et al.* (2022) utilizou uma abordagem diferente, onde o objeto de estudo foi tubos compósitos reforçados com fibra de carbono e internamente por espuma que, após a aplicação de força axial, também obtiveram um aumento na absorção de energia. Isto posto é possível concluir que, apesar do método adotado no presente trabalho não ter apresentado diferenças significativas na absorção de energia, os reforços poliméricos das longarinas veiculares podem ser eficazes em aumentar a segurança dos ocupantes e a integridade de todo o restante da estrutura.

Isso demonstra que esta é uma linha de pesquisa promissora que deve ser mais explorada, podendo apresentar resultados importantes para a sociedade.

5 CONCLUSÃO

O estudo teórico acerca da longarina, estrutura e componentes veiculares e os materiais utilizados para fabricação, enfocando a análise de absorção de energia durante colisões frontais foi fundamental para a execução desse trabalho, contribuiu para seu desenvolvimento e análise dos resultados.

Por meio da metodologia desenvolvida foi possível produzir réplicas dos corpos de prova com mesmas dimensões, material e pontos de solda de mesma resistência mecânica tendo como única variável a adição do revestimento polimérico, uma vez que os testes de colisão (massa em queda livre) foram realizados considerando a mesma energia potencial ($E_p = 3892,2J$).

Foram produzidos seis corpos de prova divididos em dois grupos: sem revestimento (1A, 1B, 1C) e com revestimento (2A, 2B, 2C). Apesar do rigor metodológico em todos os ensaios, algumas longarinas apresentaram comportamento divergente e, após análise das imagens obtidas pela câmera de alta velocidade, foi possível perceber que esse fato pode ter sido ocasionado pela fixação dos corpos de prova na base da torre de colisão. Os resultados sugerem que a adição do revestimento não gerou aumento significativo na energia absorvida pelas longarinas, porém aquelas que se deformaram na região inferior obtiveram maior rigidez, possivelmente, devido a resistência longitudinal gerada pela base da fixação.

O presente estudo buscou responder a seguinte pergunta problema: Como o revestimento polimérico adicionado a longarina pode interferir na absorção de energia quando submetida a colisão? Para respondê-la, foram realizados estudos teóricos e ensaios de colisão e, após a análise dos resultados obtidos, foi possível perceber que o revestimento selecionado não apresentou nenhuma mudança significativa na energia absorvida pelas longarinas durante a colisão.

Apesar do presente trabalho não ter apresentados resultados esperados (aumento da absorção de energia), estudos indicam que a adição de polímeros no interior das longarinas pode proporcionar um aumento da energia absorvida pelo componente, indicando que essa é uma linha de pesquisa que deve continuar sendo explorada.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Os resultados obtidos por esse trabalho sugerem novas propostas para a continuidade do estudo:

- Avaliar a adição de outros materiais ou estruturas no interior das longarinas, submetidas as mesmas condições, a fim de analisar a energia absorvida pelo corpo de prova.
- Avaliar a adição de reforço na base da fixação das longarinas, submetidas as mesmas condições, a fim de analisar a energia absorvida pelo corpo de prova;

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABDULLAH, N. A. Z., SANI, M. S. M., SALWANI, M. S., HUSAIN, N. A. **A Review on Crashworthiness Studies of Crash Boc Structure**. Thin-Walled Structures, v. 153, 2020.

ABETRAN. **Visão Zero: é possível zerar as mortes no trânsito**, s.d. Disponível em: <https://www.abetran.org.br/index.php/noticias/noticias-gerais/150-visao-zero-e-possivel-zerar-as-mortes-no-transito>. Acesso em: 04 fev. 2023.

ABRAMOWICZ, W., JONES, N. **Dynamic axial crushing of square tubes**. Liverpool, 1984.

ADRIAZONA-STEIL, Claudia. Já sabemos como evitar que milhões de pessoas morram em sinistros de trânsito. **WRI Brasil**, 2018. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/ja-sabemos-como-evitar-que-milhoes-de-pessoas-morram-em-sinistros-de-transito>. Acesso em: 04 fev. 2023.

ALSHAHRANI, H., ALMESHARI B., EL-BAKY, M., A. Abd. SABAHEY, T. A. **Crashworthiness assessment of foam-filled internally strengthened carbon fibre-reinforced composite tubes under axial compression**. International Journal of Crashworthiness, 2023.

ANUÁRIO 2021 – ACIDENTES, CRIMINALIDADE, FISCALIZAÇÃO E EDUCAÇÃO PARA O TRÂNSITO. Polícia Rodoviária Federal, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/prf/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/diest-arquivos/anuario-2021_final.html/view. Acesso em: 10 dez. 2022.

ASLANLAR, S., OGUR, A., OZSARAC, U., ILHAN, E. Welding Time Effect on Mechanical Properties of Automotive Sheets in Electrical Resistance Spot Welding. **Materials & Design**, v. 29, n. 7, p. 1427-1431, 2008

BERTOCCHI, M. **Segurança Veicular**. São Paulo: Skill Elaboração de Materiais Didáticos Ltda, 2005. 221 p.

BOIS, P. D., P. D., CHOU, C. C., FILETA, B. B., KHALIL, T. B., KING, A. I., MAHMOOD, H. F., MERTZ, H. J., WISMANS, J., **Vehicle crashworthiness and occupant protection**. American Iron and Steel Institute, 2000 Town Center Southfield, Michigan, 2004, p. 11-102.

BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. Tradução: Euryale de Jesus Zerbini, Gunter W. Prokesch, Helga Madjderey, Suely Pfeferman. São Paulo: Blucher, 2005.

CARDOSO, E., OLIVEIRA, B.F. **Estudo do comportamento do chassi do veículo em espuma metálica submetido a teste de impacto**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CASTRO, B.M. **Estrutura veicular**. São José dos Campos, 2009. Disponível em: http://breno.freeshell.org/Est_veic.pdf. Acesso em: 12 jan. 2023.

CHAUUA, K.T, WONGA, R.H.C, WUB, J.J. **Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39, 2002.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. Resolução nº 311, de 03 de abril de 2009. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/resolucao_contran_311_09.pdf. Acesso em: 04 fev. 2023.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. Resolução nº 380, de 28 de abril de 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/cons380.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2023.

FARIAS, E. Teste de Travessa. **Revista CESVI**, n. 115, p. 22-23, 2019.

FECHOVÁ, E., KMEC, J., VAGASKÁ, A., DRAŽAN, K. **Material Properties and Safety of Cars at Crash Tests**. Procedia Engineering, 2016.

FURTADO, D. **Análise Estrutural de Chassi de Veículos Automotivos**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Automotiva) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

GIL, A.C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. Grupo GEN, 2022. E-book. ISBN 9786559771653. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559771653/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. **Fundamentos da Física: Mecânica**. 10ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. **Fundamentos da Física: Mecânica**. 12ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

HAPPIAN-SMITH, J. **An introduction to modern vehicle design**. Oxford, UK: Butterworth Heinemann, 2002.

HIBBELER, R.C. **Dinâmica: Mecânica para Engenharia**. 10^a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

HIBBELER, R.C. **Dinâmica: Mecânica para Engenharia**. 12^a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

HIBBELER, R.C. **Estática: Mecânica para Engenharia**. 12^a edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

HONORATO, B. As Peças Mais Amigas do Bom Reparo. **Revista CESVI**, n. 90, p. 12-16, 2014.

IVODITOV, V. A., PERKAS, M. M., SHELESR, A. E., YUSUPOV, V. S. **Materials Science in Automobile Design**. Steel in Translation, v. 38, n. 10, p. 876–880, 2008.

LAKATOS, E.M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. Grupo GEN, 2021. E-book. ISBN 9788597026580. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597026580/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

LI, X., ZHU, X., WANG, R., LI, T., GU, Y., ZHANH, Q. **Experimental study on the impact resistance of hollow thin-walled aluminum alloy tubes and foam-filled aluminum tubes (6063-T5)**. International Journal of Crashworthiness, 2023.

MAIA, C.F. **Avaliação da absorção de energia durante colisão de uma longarina origami soldada pelos processos RSW e GMAW**. 2021. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

MARQUES, G.C. **Energia Mecânica: Dinâmica do Movimento dos Corpos**. São Paulo, s.d. Disponível em: https://midia.atp.usp.br/plc/plc0002/impressos/plc0002_13.pdf. Acesso em: 19 jan. 2023.

PEREIRA, W.P. **Análise da Plasticidade de Material Aplicado a Automóvel: Estudo de um Veículo Compacto Utilizando o Modelo de Johnson-Cook**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

PIMENTEL, R.C. **Análise da Influência da Velocidade e da Massa de Colisão na Deformação de Estruturas com Geometria Similar às Longarinas Veiculares**, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

RANA, R., BRAT, S. **Singh Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications**. 1ª edição. WP Woodhead Publihing, p. 1-16, 2017.

RAO, S.S. **Vibrações Mecânicas**. 4ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

REGISTRO NACIONAL DE ACIDENTES E ESTATÍSTICAS DE TRÂNSITO. Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/docs/renaest>. Acesso em: 10 dez. 2022.

RUBIO, A. Nascidos para Proteger, **Revista CESVI**, n. 91, p. 18-20, 2014.

RUSINEK, A., ZAERAB, R., FORQUINA, P., KLEPACZKOA, J. R. **Effect of plastic deformation and boundary conditions combined with elastic wave propagation on the collapse site of a crash box**. Thin-Walled Structures, 2006.

SANTOS, W.A., PAULISTA, C.R., PESSANHA, D.C., JUNIOR, M.E., REIS, A.C. **Uma breve análise da utilização da liga de alumínio 6061 em carrocerias automotivas**. 13º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica Lisboa, 2017.

SILVA, C., NETO, M., FILHO, J. **A Integração Da Ergonomia No Desenvolvimento De Produtos**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA INDUSTRIAL, 18, 1998, Niterói. **Canais eletrônicos** do 18º Congresso Internacional de Engenharia Industrial. Niterói: 1998.

SOUSA, D.A. **Influência da resistência mecânica de pontos de solda sobre o desempenho de estruturas similares a longarinas veiculares submetidas a teste de colisão**. 2018. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

PEREIRA, F., SOUZA, R. **Segurança Veicular Ativa: sistemas de monitoramento do motorista**. Trabalho de Conclusão de Curso em Tecnologia em Autotônica, Faculdade de Tecnologia de Santo André, Santo André, 2013.

TIPLER, P.A., MOSCA, G. **Física: para Cientistas e Engenheiros**. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

VERGARA, S.C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**, 16ª edição. Grupo GEN, 2016. E-book. ISBN 9788597007480. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597007480/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

VINODH, S., JAYAKRISHNA, K. **Environmental impact minimization in an automotive component using alternative materials and manufacturing processes.** Materials and Desing, 2011.

YALÇIN, M.M., GENEL K. **Crashworthiness performance of novel pre-deformation method applied square aluminum tubes.** International Journal of Crashworthiness, 2022.

YUSOF, N. S. B.; SAPUAN, S. M.; SULTAN, M. T. H.; JAWAID, M.; MALEQUE, M. A. **Design and Materials Development of Automotive Crash Box: a review.** Ciência & Tecnologia dos Materiais, v. 29, p. 129-144, 2017.

ZANOTTI, A. **Estrutura veicular: processos de fabricação.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, Pirassununga, 2018.

ANEXO