



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**GABRIEL LUIZ ALVES DE SOUZA**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA DEFORMAÇÃO DINÂMICA DE  
ESTRUTURAS SIMILARES AS LONGARINAS VEICULARES COM  
MESMO MOMENTO DE INÉRCIA**

**OURO PRETO - MG  
2025**

**GABRIEL LUIZ ALVES DE SOUZA**  
**gabrieel47@gmail.com**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA DEFORMAÇÃO DINÂMICA DE  
ESTRUTURAS SIMILARES AS LONGARINAS VEICULARES COM  
MESMO MOMENTO DE INÉRCIA**

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**  
**2025**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729i Souza, Gabriel Luiz Alves de.  
Influência da geometria na deformação dinâmica de estruturas similares as longarinas veiculares com mesmo momento de inércia. [manuscrito] / Gabriel Luiz Alves de Souza. - 2025.  
50 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. Deformações (Mecânica). 2. Soldagem - Solda por resistência elétrica. 3. Deformações (Mecânica) - Longarina. 4. Veículos - Segurança veicular. 5. Veículos - Acidentes - Prevenção - Ensaio de colisão. 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

**Gabriel Luiz Alves de Souza**

### **Influência da geometria na deformação dinâmica de estruturas similares as longarinas veiculares com mesmo momento de inércia**

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

Aprovada em 14 de agosto de 2025

#### Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
DSc. Washington Luis Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)  
MSc. Sávio Sade Tayer (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 22/08/2025



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/08/2025, às 18:07, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0965366** e o código CRC **94342798**.

Dedico aos meus pais, Célio e Clarice  
essa conquista. Obrigado por todo o apoio  
e amor incondicional.

## **AGRADECIMENTO**

Deixo meu agradecimento especialmente à minha família, por toda a base e apoio que sempre tive. Sou quem sou porque somos todos nós. Obrigado.

Agradeço a minha parceira de vida Camila, por todo o carinho e companheirismo.

Agradeço ao meu orientador Diogo Antônio de Sousa, por todo o incentivo, empenho e suporte na realização deste trabalho

A todos professores da gloriosa Escola de Minas de Ouro Preto, especialmente do DEMEC, por todo o conhecimento e aprendizado que levarei por toda a vida.

Obrigado a todas as pessoas que compõem o Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da UFMG, pelo suporte e parceria na realização deste trabalho.

A República Território Xavante por ser outro lar que em minha vida encontrei.

A todos os amigos que estiveram comigo nessa jornada que foi Ouro Preto, obrigado!

*“O segredo do sucesso é a constância do propósito.”*

Benjamin Disraeli

## RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar a influência da geometria na deformação de estruturas similares a longarinas veiculares, por meio da realização de testes de colisão. Dados divulgados por organizações internacionais, como a Organização Mundial da Saúde, apontam que o número de acidentes automobilísticos supera 1 milhão de ocorrências anualmente, logo, o estudo acerca da segurança veicular é fundamental para a redução do número de vítimas. As longarinas, objeto de estudo do presente trabalho, é o principal componente feito com o objetivo de absorver a energia cinética nas colisões frontais e é representada como uma estrutura retangular de parede fina, feita com duas partes soldadas. A fim de compreender a relação entre a geometria utilizada na fabricação das amostras e sua deformação durante as colisões, foram fabricadas seis amostras, sendo três do tipo cartola (grupo A) e três do tipo duplo cartola (grupo B), cujas dimensões foram definidas de forma a manter o mesmo momento de inércia para ambos os grupos. Todas as amostras foram submetidas a um ensaio de colisão, realizado com um martelo em queda livre, mantendo a mesma massa e altura de queda. As chapas que compõe os corpos de prova foram unidas por meio do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, método amplamente utilizado em chapas aplicadas na fabricação de veículos. Posteriormente a seleção dos parâmetros de soldagem, foram produzidos os corpos de prova e realizados os ensaios, cujos resultados foram mensurados paquímetro (tipo traçador de altura). Embora as amostras terem sido submetidas à mesma energia de colisão, os resultados de deformação sugerem que a geometria influencia no comportamento de compressão, uma vez que o grupo A de amostras sofreu uma deformação média de 118mm, enquanto o grupo B apresentou média de 59,3mm. Portanto, as amostras do grupo B, ao apresentarem menor deformação, indicam maior rigidez e, possivelmente, maior desaceleração em relação ao grupo A. Esses achados ressaltam a contribuição do estudo para a análise das correlações entre rigidez estrutural, mecanismos de deformação e resposta dinâmica dos materiais em função da geometria.

**Palavras-chave:** Deformação. Soldagem a ponto por resistência elétrica. Longarina. Segurança veicular. Ensaio de colisão.

## ABSTRACT

This study was carried out with the objective of analyzing the influence of geometry on the deformation of structures similar to vehicle side rails through crash tests. Data released by international organizations, such as the World Health Organization, indicate that the number of automobile accidents exceeds 1 million occurrences annually; therefore, research on vehicle safety is essential for reducing the number of victims. The side rails, the object of study in this work, are the main components designed to absorb kinetic energy in frontal collisions and are represented as thin-walled rectangular structures composed of two welded parts. To understand the relationship between the geometry used in manufacturing the samples and their deformation during collisions, six samples were produced: three of the hat-type profile (Group A) and three of the double-hat type (Group B), with dimensions defined to maintain the same moment of inertia for both groups. All samples were subjected to a crash test using a free-fall hammer, maintaining the same mass and drop height. The sheets that make up the specimens were joined using the resistance spot welding process, a method widely used for joining sheets in vehicle manufacturing. After selecting the welding parameters, the specimens were produced and the tests were performed, with results measured using a caliper (height gauge type). Although the samples were subjected to the same collision energy, the deformation results suggest that geometry influences compression behavior, as Group A samples experienced an average deformation of 118 mm, while Group B showed an average of 59.3 mm. Therefore, the Group B samples, exhibiting lower deformation, indicate greater stiffness and possibly higher deceleration compared to Group A. These findings highlight the contribution of this study to the analysis of correlations between structural stiffness, deformation mechanisms, and the dynamic response of materials as a function of geometry.

**Key-words:** Deformation. Electric resistance spot welding. Frame rail. Vehicle safety. Crash test.

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1 - Zona de sacrifício veicular.....	15
FIGURA 2 – Perfis de longarina utilizados.....	18
FIGURA 3 - Crashworthiness: estrutura de proteção à colisão.....	19
FIGURA 5 - Fluxograma das etapas da metodologia de pesquisa.....	24
FIGURA 6 - Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica.....	25
FIGURA 7 - Parâmetros utilizados na unidade de programação móvel da máquina de solda por resistência elétrica.....	26
FIGURA 8 - Dispositivo acoplado na máquina de soldagem para apoio do corpo de prova..	27
FIGURA 9 - Geometria, dimensões e espaçamentos dos pontos de solda (mm). (a) Longarina tipo A; (b) Longarina tipo B.....	28
FIGURA 10 - Processo de marcação para soldagem a ponto por resistência nas longarinas.....	29
FIGURA 11 - Longarinas prontas para serem soldadas.....	30
FIGURA 12 - Longarinas soldadas prontas para os testes de colisão.....	31
FIGURA 13 - Torre de colisão.....	34
FIGURA 14 - Martelo de colisão.....	35
FIGURA 15 - Comparativo de deformação nas longarinas tipo A.....	36
FIGURA 16 - Comparativo de deformação nas longarinas tipo B.....	37
FIGURA 17 – Tipos mais comuns de apoio de coluna.....	41
FIGURA 18 – Processo de construção das bases de fixação.....	42
FIGURA 19 – Razões de proporcionalidade das rigidezes.....	43

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 - Composição química do aço utilizado.....	24
TABELA 2 - Propriedades mecânicas do aço utilizado.....	24
TABELA 3 - Medições realizadas na longarina tipo A.....	30
TABELA 4 - Medições realizadas na longarina tipo B.....	31
TABELA 5 - Instrumentos e materiais utilizados.....	37
TABELA 6 - Variáveis e indicadores.....	37
TABELA 7 - Variáveis do ensaio.....	38
TABELA 8 - Deformação nas longarinas tipo A.....	39
TABELA 9 - Deformação nas longarinas tipo B.....	39
TABELA 10 - Deformação nas amostras.....	39
TABELA 11 - Análise estatística Anova (fator único) .....	40
TABELA 12 – Teste -t: duas amostras presumindo diferentes variâncias.....	40
TABELA 13 – Cálculo das cargas críticas.....	42

## LISTA DE SIMBOLOS

ONU = Organização das Nações Unidas

MAG = Metal Active Gas

ABS = Ani-lock Braking System

MIG = Metal Inert Gas

Q = calor gerado [Joule]

i = corrente elétrica [Ampére]

R = Resistência elétrica [Ohm]

t = tempo [s]

p = quantidade de movimento

m = massa [kg]

v = velocidade [m/s]

K = energia cinética [Joule]

W = trabalho [Joule]

F = força [Newton]

U = energia potencial [Joule]

LE = Limite de elasticidade

LR = Limite de resistência

BM = Base de medição

V = Volts

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral .....	4
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1	Estrutura veicular.....	5
2.3	Segurança veicular.....	6
2.3.1	Segurança veicular passiva.....	6
2.4	Processo de soldagem.....	7
2.4.1	Soldagem a ponto por resistência .....	7
2.5	Efeito Joule .....	8
2.6	Momento e colisão.....	9
2.6.1	Energia cinética .....	10
2.6.2	Energia potencial .....	10
2.7	Flambagem .....	11
2.7.1	Rigidez.....	11
2.8	Análise de Variância.....	12
2.8.1	Teste t de Student .....	12
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>13</b>
3.1	Tipo de Pesquisa.....	13
3.2	Materiais e métodos.....	14
3.3	Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica .....	15
3.4	Corpo de prova .....	17
3.4.1	Experimento de colisão .....	21
3.5	Variáveis e indicadores.....	23
3.6	Instrumentos de coleta de dados .....	23
3.7	Tabulação dos dados.....	23
3.8	Considerações finais .....	23

<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>24</b>
4.1	Deformação das longarinas .....	24
4.1.1	Flambagem .....	28
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>31</b>
5.1	Conclusões.....	31
5.2	Recomendações .....	31
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>32</b>
	<b>ANEXO</b> .....	<b>35</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

Os acidentes automobilísticos, de acordo com relatório da Organização Mundial da Saúde, chegaram ao número de 1,19 milhões de ocorrências no ano de 2023. Em 2024, segundo dados da Polícia Rodoviária Federal Brasileira (2025), foram registrados 73.156 sinistros de trânsito em rodovias federais brasileiras. Desse total, as colisões traseiras representaram a maior parcela, com 13.960 ocorrências, correspondendo a aproximadamente 19,1% do total. As colisões transversais somaram 9.385 registros, o que equivale a cerca de 12,8% dos acidentes. Já as colisões frontais totalizaram 4.862 sinistros, representando 6,6% do total, enquanto os engavetamentos – caracterizados por múltiplas colisões traseiras em sequência – contabilizaram 1.224 casos, equivalendo a 1,7% dos registros (BRASIL, 2025).

A área da engenharia que desenvolve os métodos de proteção de passageiros e pedestres é a segurança veicular, que abrange desde cintos de segurança até o design de estruturas de deformação programada, que são responsáveis por atenuar a energia cinética percebida pelos passageiros em eventos de colisão. Diante disso, é notório que a estrutura dos veículos constitui um elemento importante na seguridade dos ocupantes (BOIS *et al*, 2004).

A combinação de processos de fabricação adequados e a correta seleção de materiais são fundamentais para a fabricação de veículos que ofereçam um alto nível de segurança (IKEDA, 2012). O processo produtivo de um único veículo requer além de centenas de chapas metálicas estampadas, milhares de pontos de solda, estas geralmente sendo realizadas por resistência elétrica (BATISTA, 2011).

Sousa (2018) afirma que a longarina é o principal componente veicular projetado para absorver a energia cinética nas colisões frontais, sendo representada como uma estrutura retangular de parede fina constituída por duas partes soldadas. Conforme demonstra a figura 1, a peça faz parte da chamada zona de sacrifício (deformação), que idealmente absorveria toda a energia advinda de colisões. No entanto, isso não ocorre em condições reais, assim, estudos que abrangem as formas de deformação e a resposta dessas estruturas mediante os choques mecânicos são essenciais para atingir as metas estabelecidas pela ONU (2020) na resolução denominada “Segunda Década de Ação pela Segurança no Trânsito”, cujo intuito é reduzir pela metade o número de mortos e feridos no trânsito até 2030.

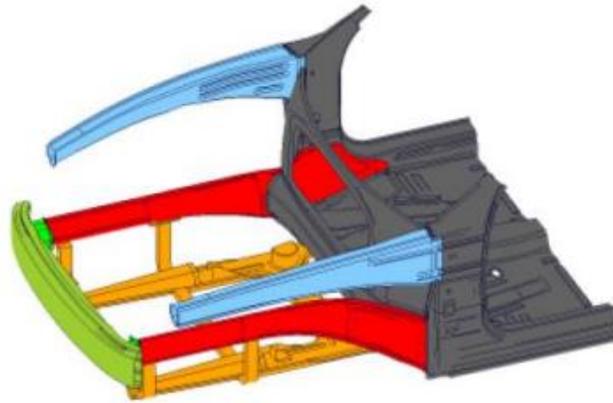


Figura 1 - Zona de sacrifício veicular  
 Fonte - Porsche Engineering Services (1998)

O conhecimento acerca da resposta em deformação nas longarinas é crucial para atender e melhorar os padrões de segurança veicular estabelecidos (IKEDA, 2012). Diversos autores já desenvolveram estudos objetivando investigar este comportamento, mas ainda é um campo com lacunas a serem preenchidas (SOUSA, 2018).

Assim, para o presente trabalho foram fixadas algumas variáveis de controle a fim de examinar a influência da geometria da seção transversal de estruturas similares as longarinas veiculares na resposta mecânica sob carregamento dinâmico, sendo elas: momento de inércia, espaçamento entre os pontos de solda, direção uniaxial da força de compressão, energia de colisão, produção no sentido de laminação da chapa e a máquina de teste de colisão. Foram definidas duas geometrias como variáveis independentes, conforme representado na figura 2, tipo cartola (2a) e duplo cartola (2b). É importante destacar que, entre as variáveis de controle, o momento de inércia de área é a mais relevante neste estudo, pois apesar de a seção transversal diferir entre os grupos, os valores de momento de inércia são aproximadamente iguais, de modo que, teoricamente, espera-se que a deformação seja a mesma.

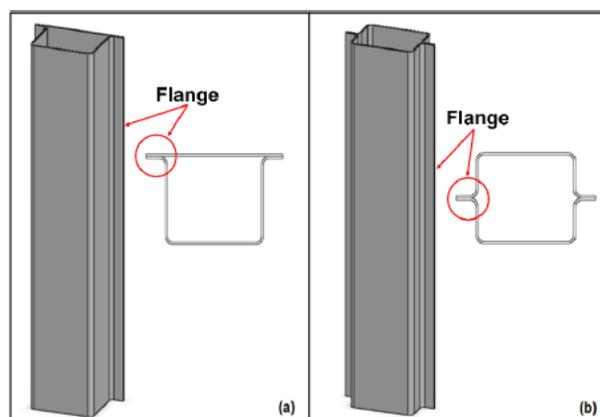


Figura 2 – Perfis de longarina utilizados  
 Fonte: Sousa (2018)

Na primeira situação foi utilizada uma geometria conhecida como *top-hat*, que consiste em uma chapa conformada em perfil cartola soldada a uma chapa plana. Por outro lado, a segunda geometria utilizada é comumente denominada *double-cell*, que se constitui por dois perfis cartola soldados. Considerando as duas situações foi proposta a seguinte pergunta problema:

**Qual influência da geometria na deformação dinâmica de estruturas similares as longarinas veiculares com mesmo momento de inércia?**

## **1.2 Justificativa**

O principal ensaio realizado nos estudos de segurança veicular, de acordo com Bois *et al* (2002) é o teste de colisão frontal. O conhecimento acerca da deformação de longarinas veiculares, tem o objetivo de contribuir para a compreensão deste comportamento, visto que a busca pela melhoria da capacidade de absorção de energia por estas peças é de suma importância para uma maior seguridade veicular. Em colisões frontais, esses componentes são responsáveis por absorver a maior parte da energia cinética, garantindo que o impacto seja dissipada de forma estável e controlada, reduzindo os riscos aos ocupantes. Estudos internacionais, como os de Peroni *et al.* (2002), demonstram que a geometria da seção transversal é um fator determinante no comportamento de colapso, influenciando tanto a estabilidade quanto a capacidade de absorção de energia.

Além disso, conforme destacado por Fay e Suthurst (2002) e também por Peroni e Avalle (2002), a escolha da geometria influencia a progressividade do colapso e a manutenção da integridade estrutural, o que é fundamental para evitar mecanismos de falha abruptos que possam comprometer a segurança. Esses trabalhos reforçam que soluções geométricas adequadas contribuem para aumentar a eficiência da estrutura sem necessariamente elevar a massa, um fator crítico diante das atuais exigências de redução de peso e emissões.

Portanto, a presente pesquisa busca contribuir para esse campo ao investigar como variações geométricas, mantendo constante o momento de inércia, afetam a deformação sob impacto controlado. Assim, o estudo irá contribuir para futuros projetos de carroceria, uma vez que serão explicitadas as diferenças de resposta para cada um dos casos, produzindo dados sobre a deformação das estruturas de segurança

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Geral**

Analisar a influência da geometria da seção transversal, com mesmo momento de inércia, de estruturas similares as longarinas veiculares na resposta mecânica sob carregamento dinâmico.

### **1.3.2 Específicos**

- Elaborar um estudo teórico acerca dos processos de soldagem e da geometria da longarina utilizados em veículos com foco na análise da absorção de energia cinética em colisões frontais;
- Produzir amostras com duas geometrias distintas: o perfil *top-hat* (perfil cartola soldado a chapa plana) e a *double-cell* (dois perfis cartola soldados);
- Realizar o ensaio de colisão sobre as amostras produzidas;
- Avaliar os resultados de deformação das amostras testadas.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

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

O segundo capítulo consiste na revisão bibliográfica dos conceitos e teorias a respeito da estrutura veicular, processos de soldagem e fenômenos de colisão. Também são tratados teoria e conceitos sobre o fenômeno de colisão.

O terceiro capítulo trata-se da metodologia e como foram realizados os ensaios para este trabalho, contendo imagens para o melhor entendimento dos testes efetuados.

No quarto capítulo estão os resultados obtidos com os experimentos realizados.

O quinto capítulo trás uma análise dos resultados obtidos e as considerações finais do autor.

Por fim, estão as referências bibliográficas, em que estão apresentadas todas as fontes utilizadas durante a realização da monografia.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estrutura veicular

A estrutura veicular é predominantemente fabricada com chapas de aço soldadas por resistência elétrica, em virtude de sua simplicidade, fácil controle e menor investimento (RUIZ, 2004). Esta deve absorver parte da energia nas colisões para promover maior segurança para os passageiros, o que significa que veículos com boa performance absorvem bem a energia recebida em um impacto, por exemplo. De acordo com Happian-Smith (2002), os componentes estruturais, tais como: longarinas, travessas, para-choque, capô, para-lamas, motor, suspensão e outros menos expressivos absorvem a maior parte da energia envolvida em uma colisão frontal.

Sousa (2018) refere que há uma relação direta entre o risco de ferimentos para os ocupantes de um veículo que sofre uma colisão e o tipo de colisão que ocorre, podendo ser frontal, lateral ou traseira. O mesmo autor afirma que a desaceleração do ocupante no momento do impacto também está relacionada ao risco de lesão – isso significa que uma perda rápida de velocidade no impacto reflete em maiores riscos.

As longarinas desempenham um papel fundamental na segurança e na integridade estrutural durante as colisões veiculares, sendo projetadas de forma que a transferência de força para os ocupantes seja mínima (BOIS *et al*, 2004). Além disso, o mesmo autor diz que a geometria, os materiais e os processos utilizados na fabricação das longarinas devem ser cuidadosamente selecionados para maximizar sua capacidade de absorção de energia. Estruturas com maior rigidez são capazes de deformar de maneira controlada durante um impacto, reduzindo a aceleração experimentada pelos ocupantes e melhorando a proteção nas colisões. Na figura 3 está exibida o modelo 3D de uma longarina perfil cartola.

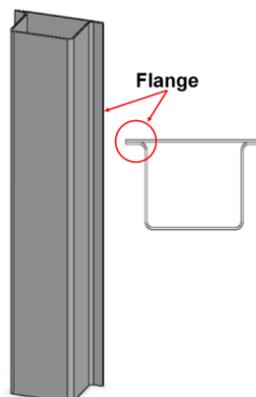


Figura 3 - Estrutura similar às longarinas utilizadas por carros nacionais populares  
Fonte: Adaptado de Sousa (2018)

## 2.3 Segurança veicular

Segundo Ikeda (2012), a segurança veicular começou a ganhar destaque a partir da década de 1950, quando a indústria começou a priorizar a proteção dos ocupantes em casos de acidente. De acordo com o mesmo autor, um grande marco aconteceu com o Volvo *Amazon* em 1959, o primeiro carro produzido com cintos de segurança, tornando o cinto de segurança um equipamento de série nos veículos. A partir daí, a segurança veicular continuou a evoluir, incorporando novos dispositivos e tecnologias para proteger os ocupantes e reduzir a gravidade dos acidentes.

Ikeda (2012) diz que se pode dividir os estudos de segurança veicular em dois grandes ramos: segurança ativa e passiva. A finalidade da segurança ativa é prevenir acidentes, tendo como principais mecanismos e equipamentos: acústica, sistema de direção, freios (ABS), pneus, câmbio, suspensão, ergonomia, conforto, campo de visão, limpador e desembaçador de vidro, identificação de comando e sensor de estacionamento (IKEDA, 2012). Em contrapartida, a segurança veicular passiva visa proteger os ocupantes quando da ocorrência de acidentes, apresentando como ferramentas e mecanismos mais relevantes: portas, direção, reservatório de combustível, célula de sobrevivência, deformação programada, cintos de segurança e pré-tensionadores, bancos e apoios de cabeça, sistema bag (*air bag, side bag, head bag*), painéis internos, para-choque e *crash box* (SOUSA, 2018).

### 2.3.1 Segurança veicular passiva

Bois *et al* (2012) diz que ao se adotar como principal objetivo absorver a energia do impacto e proteger a integridade dos ocupantes do veículo, a segurança passiva envolve um conjunto de características e dispositivos que atuam sem a necessidade de ação direta do motorista e passageiros. O mesmo autor discorre que estudo destas ferramentas e mecanismos passou a evoluir significativamente na década de 1970, quando a Chrysler comercializou o primeiro veículo possuindo airbags. A partir de então, os fabricantes começaram a integrar sistemas mais sofisticados de retenção e melhorias nas estruturas de deformação dos veículos (BOIS *et al*, 2012). A figura 4 exhibe os principais componentes das estruturas fabricadas para absorver a energia nas colisões veiculares.

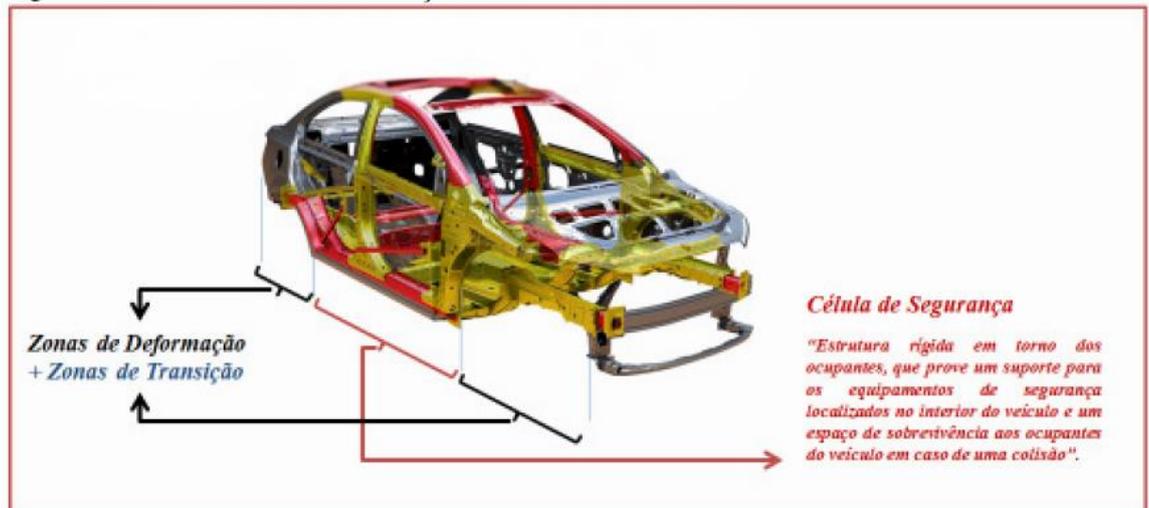


Figura 4 – *Crashworthiness*: estrutura de proteção à colisão  
 Fonte: Ikeda (2012)

## 2.4 Processo de soldagem

O processo de soldagem é uma técnica de união de materiais, geralmente metais, que envolve a fusão ou deformação das superfícies a serem unidas, utilizando calor, pressão ou ambos. Durante a soldagem, o calor pode ser gerado por diversas fontes, como arcos elétricos, resistência elétrica ou combustão de gases (MODENESI, 2011).

O tipo de solda pode ter uma influência significativa nas rupturas, afetando tanto a resistência mecânica quanto a durabilidade das juntas soldadas. No ramo automobilístico o processo de soldagem mais utilizado é a soldagem por resistência, especialmente a soldagem por ponto (*Resistance Spot Welding – RSW*), devido à sua eficiência e rapidez. Apesar disso, outros processos como soldagem MIG/MAG, soldagem a laser e adesivos estruturais também são utilizados na fabricação de veículos (SOUSA, 2018).

### 2.4.1 Soldagem a ponto por resistência

Segundo Modenesi (2011), a soldagem a ponto por resistência consiste na aplicação de pressão e passagem de uma corrente elétrica de alta intensidade para gerar calor, promovendo a fusão localizada das superfícies a serem soldadas. No processo, as duas chapas a serem unidas são posicionadas entre dois eletrodos e, ao aplicar-se a corrente elétrica, o calor gerado pelo efeito Joule aquece a área de contato e causa a fusão dos materiais (MODENESI, 2011).

De acordo com Zhang (2012), a seleção correta das condições de soldagem afeta diretamente a resistência mecânica do ponto de solda. O mesmo autor diz que uma pressão ou

corrente muito altas aplicadas nas chapas que serão unidas podem causar uma série de complicações no local de solda, como a expulsão de material do núcleo fundido.

Para a determinação das condições ideais de soldagem, alguns fatores devem ser levados em consideração: o estado das superfícies, diâmetro da face de contato dos eletrodos, propriedades mecânicas dos materiais, força entre eletrodos, tempo de soldagem, entre outros (DAMASCO, 1995).

Sousa *apud* Zhang (2018) diz que ao realizar soldagem a ponto por resistência elétrica, deve-se atentar à intensidade da corrente elétrica, visto que altas correntes ocasionam maior geração de calor por meio do Efeito Joule, o que juntamente com a pressão aplicada pelo eletrodo favorece a expulsão do metal do núcleo fundido.

## 2.5 Efeito Joule

De acordo com Modenesi (2011) o efeito Joule é um fenômeno físico fundamental em diversos processos de soldagem, sendo responsável pela geração do calor utilizado para fundir as superfícies a serem unidas. O mesmo autor diz que a geração de calor ocorre mediante a passagem de corrente elétrica por um condutor, cuja resistência elétrica induz dissipação de energia na forma de calor.

A Lei de Joule é definida pela equação 1 (PASSOS, 2009):

$$Q = Ri^2t \quad (1)$$

Em que:

Q = calor gerado [Joule]

i = corrente elétrica que passa pelo condutor [Ampére]

R = resistência elétrica do condutor [Ohm]

t = intervalo de tempo de passagem da corrente pelo condutor [segundo]

Segundo Modenesi (2011), no contexto da soldagem, o efeito Joule é utilizado para aquecer a região de contato entre as peças metálicas. Na soldagem a ponto, por exemplo, a corrente elétrica é aplicada através dos eletrodos, gerando calor suficiente para fundir o metal na área de contato, formando a solda.

## 2.6 Momento e colisão

Segundo Halliday (2007), o momento de inércia linear de uma partícula, também denominado quantidade de movimento é uma grandeza vetorial que descreve o estado de movimento de um corpo. O momento pode ser definido pelo produto da massa do objeto pela sua velocidade, sendo expresso pela equação 2.

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (2)$$

Em que:

$\vec{p}$  = quantidade de movimento [kg\*m/s]

m = massa do corpo [kg]

$\vec{v}$  = velocidade do corpo [m/s]

O princípio da quantidade de movimento é essencial para o entendimento das colisões. Neste fenômeno, a ação de força sobre o corpo ocorre de maneira rápida e intensa, provocando uma alteração abrupta no momento do objeto (HALLIDAY, 2007).

Segundo Hibbeler (2007) o fenômeno de colisão ocorre quando há interação, com tempo limitado, entre dois corpos livres e havendo ao final uma força de reação gerada pelo contato entre os corpos. O mesmo autor diz que a energia cinética dos corpos que interagem pode ser totalmente ou parcialmente conservada ou totalmente dissipada, embora a quantidade de movimento só é afetada quando ocorre aplicação de forças externas.

Colisões podem ser classificadas como central ou oblíqua, sendo que o primeiro caso ocorre quando as direções das velocidades dos centros de massa coincidem com a linha de colisão (linha que une os centros de massa). Em contrapartida, a colisão oblíqua ocorre quando uma ou as duas velocidades dos centros de massa formam um ângulo com a linha de colisão (HIBBELER, 2007).

Na colisão entre dois veículos, a prioridade máxima é a integridade física dos ocupantes e, dessa forma, a estrutura frontal deve ser capaz de absorver o máximo de energia cinética possível, de forma a atenuar os efeitos percebidos (CARDOSO, 2010). Sousa (2018) dispõe que nas colisões veiculares, almeja-se diminuir o máximo possível do tempo de deformação.

### 2.6.1 Energia cinética

Halliday (2016) define a energia cinética como a energia associada ao estado de movimento de um objeto. Assim, quando este se move com uma alta velocidade, estará dotado de uma maior energia cinética e quando o objeto estiver em repouso, sua energia cinética será nula.

A energia cinética no Sistema Internacional de Unidades é o joule (J) e pode ser determinada em termos das unidades de massa e velocidade:

$$E_c = \frac{1}{2} m * v^2 \quad (3)$$

Onde:

$E_c$  = energia cinética [Joule]

$m$  = massa do corpo [kg]

$v$  = velocidade do corpo [m/s]

### 2.6.2 Energia potencial

A energia potencial é aquela que está associada à configuração de um sistema submetido à uma força conservativa, isto é, cujo trabalho realizado sobre uma partícula representa um ciclo fechado (HALLIDAY, 2016). Dessa forma, ao considerarmos um sistema que contém um objeto submetido a um trabalho (W) exercido por uma força conservativa qualquer (F), é possível calcular a variação de energia potencial associada ao deslocamento do objeto de um ponto inicial para o final, através da equação 4.

$$\Delta U = - \int_{x_i}^{x_f} F(x) dx \quad (4)$$

Em que:

$\Delta U$  = variação da energia potencial [Joule]

$x_i$  = posição inicial [metro]

$x_f$  = posição final [metro]

$F(x)$  = força em função da posição [Newton]

$dx$  = elemento infinitesimal de deslocamento [metro]

## 2.7 Flambagem

Segundo Hibbeler (2007), elementos estruturais compridos e esbeltos, quando sujeitos a uma força de compressão axial são denominadas colunas, e a deflexão lateral que ocorre é a flambagem. A carga máxima que pode ser aplicada a uma coluna antes que essa sofra flambagem é chamada carga crítica ( $P_{cr}$ ). A aplicação deste conceito necessita da determinação do tipo de coluna analisada - para uma coluna dotada de uma extremidade engastada e outra livre, têm-se a equação 4.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (5)$$

Em que:

E = Módulo de elasticidade [MPa]

I = Momento de inércia da área [ $mm^4$ ]

K = Fator de comprimento efetivo

L = Comprimento da coluna [mm]

### 2.7.1 Rigidez

Beer *et al* (2015) discorre que a rigidez é uma propriedade estrutural que representa a capacidade de um corpo resistir à deformação quando submetido a uma força externa. No contexto das estruturas veiculares, está associada a grandezas como o módulo de elasticidade e o momento de inércia. Duas estruturas inercialmente equivalentes podem apresentar rigidez diferente a depender de sua geometria e do modo de carregamento. O efeito da geometria, aliado às condições de contorno influencia diretamente na resistência à flambagem e à deformação.

Dessa forma, a rigidez (k) é uma propriedade essencial nos elementos projetados para absorver energia durante colisões, podendo ser expressa pela equação 5:

$$k = EI \quad (6)$$

Onde:

k = rigidez à flexão [ $N \cdot m^2$ ]

E = módulo de elasticidade [ $N/m^2$ ]

I = momento de inércia da seção transversal [ $m^4$ ]

## 2.8 Análise de Variância

Colosimo (2011) diz que a análise de variância, comumente conhecida como ANOVA (*Analysis of Variance*), é uma ferramenta particularmente útil em experimentos que envolvem mais de um fator ou variável independente, verificando se há diferenças estatisticamente significativas entre as médias de dois ou mais grupos de amostra. Ainda segundo o mesmo autor, a ferramenta baseia-se na suposição de que os dados são normalmente distribuídos, possuem variância homogênea e que as observações são independentes, comparando a variância entre os grupos e a variância dentro dos grupos.

No contexto da engenharia, a ANOVA é especialmente útil para validar experimentalmente a influência de parâmetros estruturais, tais como a geometria, tipo de material ou processo de fabricação, sobre a resposta de componentes a um determinado ensaio (MONTGOMERY, 2017). Sua aplicação torna-se essencial para garantir que as conclusões obtidas em ensaios sejam estatisticamente fundamentadas.

### 2.8.1 Teste t de Student

De acordo com Triola (2017), o teste t de Student é uma das principais ferramentas estatísticas para comparar médias entre dois grupos, tendo como principal objetivo a verificação de significância nas diferenças observadas entre as médias, considerando a variabilidade e tamanho das amostras. Ainda de acordo com o mesmo autor, o teste baseia-se na diferença das médias em relação à variabilidade dos dados e ao tamanho das amostras.

Em contextos experimentais, onde se analisam dois grupos distintos de amostras submetidas às mesmas condições de teste, o uso conjunto do teste t e da ANOVA permite uma verificação estatística mais completa (MONTGOMERY, 2017). Enquanto a ANOVA fornece uma visão global da variância envolvida, o teste t atua como análise complementar, reforçando a consistência das conclusões.

Por meio deste capítulo de revisão bibliográfica foi fornecido o alicerce teórico necessário para o desenvolvimento e execução do trabalho, estabelecendo a base contextual para o estudo que está nos capítulos a seguir.

### **3 METODOLOGIA**

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, que será dividida nos seguintes tópicos: tipo de pesquisa, materiais e métodos, variáveis e indicadores, instrumentos de coleta de dados e tabulações de dados.

#### **3.1 Tipo de Pesquisa**

O presente trabalho desenvolve uma pesquisa quantitativa, uma vez que seu intuito é avaliar a influência da geometria da seção transversal, após ensaios de colisão em longarinas. Também pode-se enquadrar como uma pesquisa qualitativa, porque os resultados observados serão estudados.

Podem-se classificar diversas modalidades da pesquisa científica, uma delas é a pesquisa bibliográfica, cujo intuito é elencar cada uma das etapas que devem ser realizadas em sua realização. De acordo com Gil (2002), esse tipo de pesquisa, quando ligada ao Trabalho de Conclusão de Curso pode ser categorizada em três categorias: descritiva, exploratória e explicativa.

A pesquisa descritiva descreve detalhadamente sobre uma população ou fenômeno específico, ao passo que as pesquisas exploratórias possuem um conhecimento limitado sobre o tema em estudo. A última, como o próprio nome sugere, explica um fenômeno específico (VERGARA, 2010).

Gerhardt (2009) diz que as pesquisas explicativas utilizam quase exclusivamente o método experimental, sendo a preocupação deste tipo de pesquisa a identificação dos fatores que determinam ou contribuem para que o fenômeno ocorra. Trata-se do tipo de estudo mais complexo, por se concentrar no entendimento da realidade e esclarecer as origens do problema.

Este trabalho pode se enquadrar na categoria de pesquisa exploratória, pois emprega o método de pesquisa bibliográfica, utilizando como fonte de pesquisa artigos e trabalhos acadêmicos. O estudo pode ser classificado uma pesquisa bibliográfica e também como pesquisa explicativa, já que visa examinar o impacto do método de reparo mediante a colisão em estruturas similares às longarinas veiculares, por meio de métodos experimentais.

### 3.2 Materiais e métodos

A figura 4 apresenta o fluxograma das etapas metodológicas utilizadas na pesquisa. O processo inicia-se com a seleção das variáveis (etapa 1), seguida pela preparação do corpo de prova (etapa 2). Em seguida, realiza-se o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (etapa 3) e, posteriormente, o experimento de colisão (etapa 4). Após a realização dos ensaios, procede-se à análise dos resultados junto à bibliografia (etapa 5) e à discussão dos resultados (etapa 6).

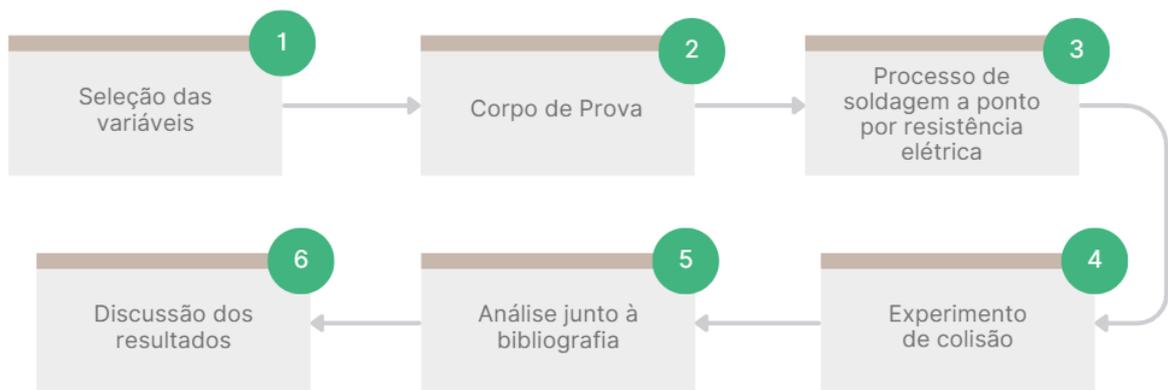


Figura 5 – Fluxograma das etapas da metodologia de pesquisa  
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Na construção dos corpos de prova, foi utilizado aço SAE 1010 comercial. Embora esse material não apresente alta resistência mecânica, ele se mostrou adequado para avaliar a influência da geometria na resposta à deformação dinâmica. As chapas empregadas possuíam espessura de 0,9 mm, e todos os corpos de prova foram produzidos no sentido de laminação do material. A composição química e as propriedades mecânicas do aço estão apresentadas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1010

ELEMENTO	TEOR (%)
Ferro [Fe]	98,18-99,62%
Manganês [Mn]	0,30-0,60%
Enxofre [S]	≤ 0,050%
Fósforo [P]	≤ 0,040%
Carbono [C]	0,080 - 0,13%

Fonte: Adaptado de AZoM (2012)

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço SAE 1010

PROPRIEDADES MECÂNICAS			
Limite de escoamento	Limite de resistência a tração	Alongamento	
		BM [mm]	% mín
365 MPa	305 MPa	50	20

Fonte: Adaptado de Matweb (2025)

### 3.3 Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica

As soldas foram executadas com uma máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica, possuindo uma pinça de soldagem suspensa com cilindro pneumático da fabricante FASE modelo X/4 – 200. Os transformadores da máquina apresentam uma frequência média de 440V e potência nominal de 54kVA modelo Cabine Compacta PTI número de série P0400095161, controlador Weld334MHC, unidade de programação móvel 4300 HHT da fabricante FASE, sendo um transformador de 220V para 440V Auto Trafo monofásico de 15 kVA e 60 Hz, modelo ELT78 (figuras 5 e 6). Os eletrodos utilizados foram de liga Cu-Cr-Zr com 6mm de diâmetro de contato.



Figura 6 - Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica  
Fonte: Pimentel (2022)



Figura 7 – Parâmetros utilizados na unidade de programação móvel da máquina de solda por resistência elétrica

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Para eliminar possíveis riscos, como a possibilidade de o operador segurar manualmente os corpos de prova, a máquina é dotada de um dispositivo de posicionamento dos corpos de prova (Figura 7).

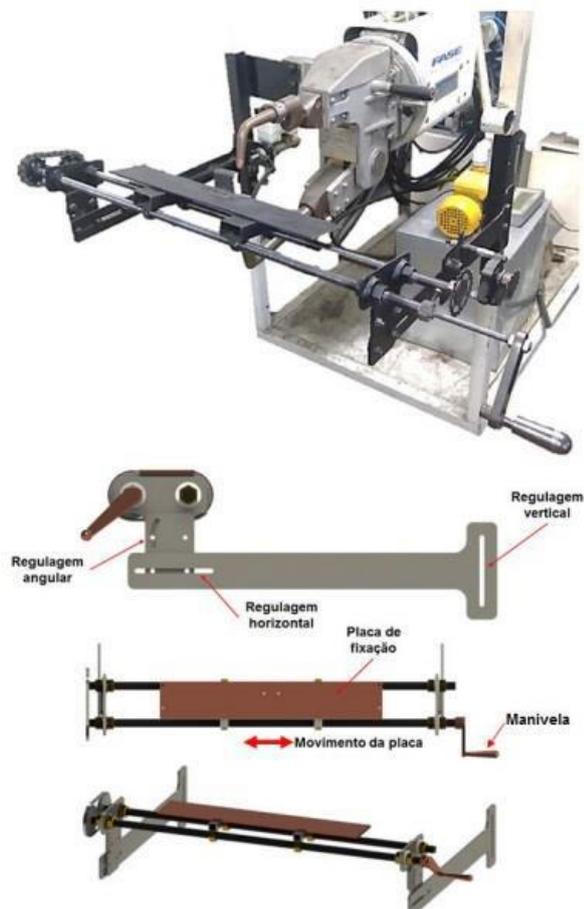


Figura 8 - Dispositivo acoplado na máquina de soldagem para apoio do corpo de prova  
Fonte: Sousa (2018)

### 3.4 Corpo de prova

Na realização do experimento foram utilizadas duas geometrias de corpo de prova, o primeiro (tipo A – Figura 8a) consiste em um perfil cartola soldado a uma chapa plana, enquanto no segundo (tipo B – Figura 8b) foram soldados dois perfis cartola. As dimensões foram definidas de forma a manter o momento de inércia igual para os dois tipos e estão ilustradas na figura 8. Para o dimensionamento da peça considerou-se que a indústria automobilística utiliza longarinas com dimensões e geometria similares em seus veículos. Realizando a medição utilizando uma régua e um paquímetro, as medidas encontradas estão dispostas nas tabelas 3 e 4. Os pontos de solda foram instalados a uma distância de 10 mm das extremidades e espaçados entre si por 40 mm.

Tabela 3 – Medições realizadas na longarina tipo A

MEDIDA	(mm)
Comprimento	300
Flange	20
Largura	118,2
Altura	60

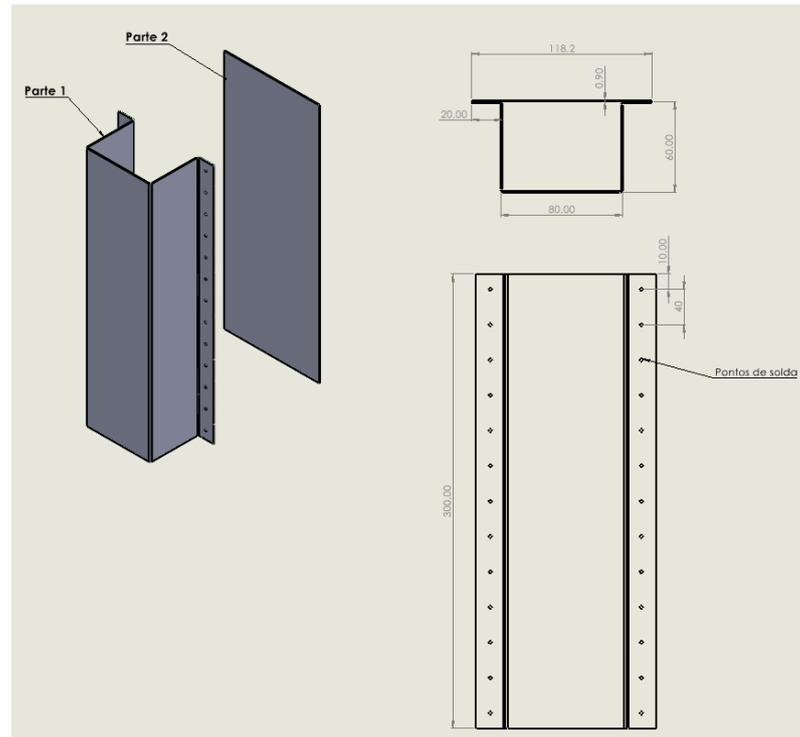
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Tabela 4 – Medições realizadas na longarina tipo B

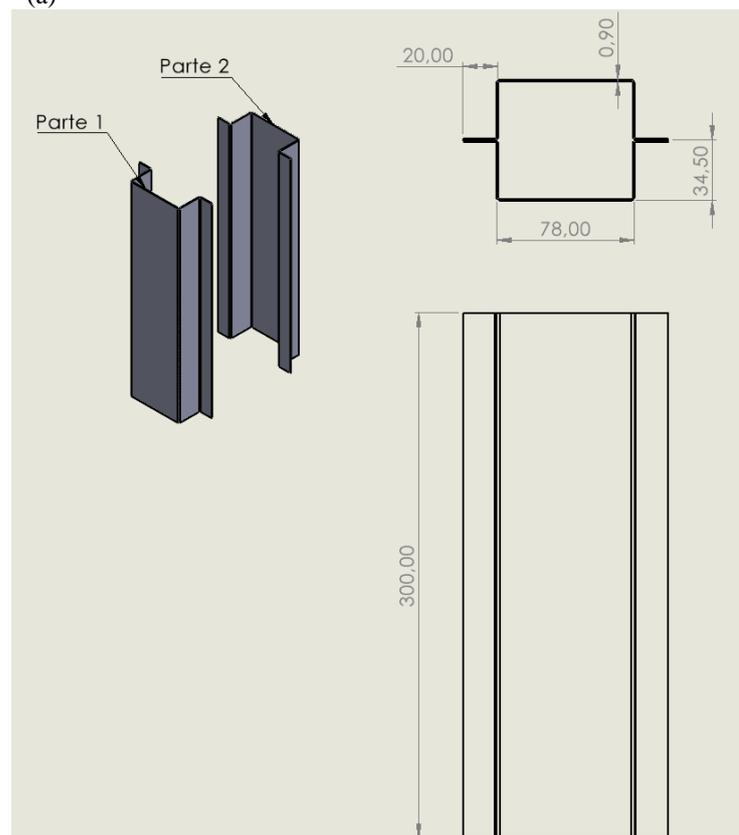
MEDIDA	(mm)
Comprimento	300
Flange	20
Largura	116,2
Altura	69

Fonte: Pesquisa direta (2025)

As propriedades geométricas das seções transversais dos corpos de prova foram obtidas por modelagem computacional. As amostras do tipo 1 apresentam área de 322,38 mm<sup>2</sup> enquanto as amostras do tipo B têm 335,16 mm<sup>2</sup>. Os momentos principais de inércia em relação ao centroide da seção para as amostras do tipo 1 são: 209.835,32 mm<sup>4</sup> em torno do eixo X e 425.607,29 mm<sup>4</sup> em torno do eixo Y. Para os corpos de prova do tipo B, os valores obtidos foram 215.164,76 mm<sup>4</sup> (eixo X) e 428.897,53 mm<sup>4</sup> (eixo Y). Com isso, verifica-se que as duas geometrias possuem momentos de inércia muito próximos, garantindo a equivalência inercial necessária para os ensaios comparativos de deformação dinâmica.



(a)



(b)

Figura 9 - Geometria, dimensões e espaçamentos dos pontos de solda (mm)

(a) Longarina tipo A; (b) Longarina tipo B

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Após aprovação do dimensional, seguiu-se o estudo marcando os pontos em que seriam realizados os pontos de solda nos flanges das longarinas, utilizando régua, paquímetro e canetas

para marcação, conforme demonstrado na figura 9. As peças devidamente demarcadas estão exibidas na figura 10.



Figura 10 - Processo de marcação para soldagem a ponto por resistência nas longarinas  
Fonte: Pesquisa direta (2025)



Figura 11 - Longarinas prontas para serem soldadas  
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Posterior ao processo de soldagem, todas as amostras estavam identificadas e aptas para serem testadas na torre de ensaio de colisão. As amostras podem ser observadas na figura 11.



(a)



(b)

Figura 12 - Longarinas soldadas prontas para os testes de colisão

(a) Longarina tipo A; (b) Longarina tipo B

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Todos os pontos de solda foram produzidos com as seguintes condições de soldagem: 7kA de corrente de soldagem, 20 ciclos (0,333s) de tempo de passagem de corrente e 1,8kN de força aplicada entre as pinças da máquina. Além disso, ambos os tipos de corpo de prova foram produzidos de forma a manter o mesmo momento de inércia, a fim de que fosse garantida a repetibilidade e congruência nas condições de todos os ensaios de impacto realizados.

O estudo de Fay e Suthurst (1990), avaliando a melhoria de performance na colisão de longarinas para diferentes geometrias, conclui que as soldas a ponto com distanciamento entre 40 e 80mm apresentam o melhor desempenho na absorção de energia, ou seja, o presente estudo foi realizado com um espaçamento considerado ótimo para as aplicações em longarinas automotivas de acordo com a literatura.

### 3.4.1 Experimento de colisão

Para a realização dos testes, utilizou-se uma torre (figura 17) cuja máximas cargas de içamento e altura são, respectivamente, 300kg e 11,5m. O equipamento fica localizado em Belo Horizonte, no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação da Escola de Engenharia da UFMG. Para os ensaios realizados no presente trabalho, foi utilizada somente a altura de 1,5m de altura e uma massa total de 147 kg para todos os testes.



Figura 13 - Torre de colisão.  
Fonte: Pimentel (2022)

Após o içamento do martelo de colisão (Figura 18), a carga foi liberada e sofreu queda livre até atingir o corpo de prova, que foi previamente fixada na base da torre. O equipamento utilizado para fixação da amostra – constituído por uma estrutura rígida e buchas deslizantes de cobre que permitem a movimentação da estrutura móvel – é responsável por garantir que as solicitações de força sobre a longarina sejam exclusivamente verticais e atuem no sentido longitudinal. Isso implica que a amostra não estará sujeita à outras componentes vetoriais de força que não sejam verticais.



Figura 14 - Martelo de colisão.  
Fonte: Pimentel (2022)

Foram realizados 6 ensaios, sendo 3 destes utilizando as amostras tipo A e os 3 restantes com amostras tipo B. O objetivo do ensaio foi observar e comparar a deformação nos dois tipos de longarina mais utilizados no mercado automobilístico.

A tabela 5 exhibe os instrumentos e materiais utilizados no ensaio:

Tabela 5 - Instrumentos e materiais utilizados

MATERIAIS	INSTRUMENTOS
Chapas de aço	Equipamento de ensaio de colisão
Estrutura andaime	Máquina de solda
Solda a ponto por resistência elétrica	Longarinas

Fonte: Pesquisa direta (2025)

### 3.5 Variáveis e indicadores

Para análise dos fatores que influenciam na colisão, no presente tópico são apresentadas as variáveis e respectivos indicadores empregados na execução dos ensaios de colisão e na soldagem das chapas que compõe as amostras, descritos na tabela 6.

Tabela 6 - Variáveis e indicadores

VARIÁVEIS	INDICADORES
Energia Potencial	Massa, aceleração da gravidade e altura
Energia Cinética	Velocidade
Processo de soldagem	Força das pinças, intensidade da corrente e tempo de corrente

Fonte: Pesquisa direta (2024)

### 3.6 Instrumentos de coleta de dados

Nesta etapa ocorre a coleta de dados em torno dos processos e ensaios realizados, afim de obter o embasamento necessário para a realização do estudo por meio de revisões bibliográficas, dissertações e experimentos. Desta forma, o levantamento de dados será realizado por meio de medição direta e comparação.

### 3.7 Tabulação dos dados

A tabulação dos dados extraídos foi disposta em planilhas do Microsoft Excel.

### 3.8 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados dos os métodos para desenvolvimento do presente trabalho, assim como o tipo de pesquisa, os materiais e métodos utilizados, além dos indicadores e variáveis levados em consideração no estudo, instrumentos de coleta e análise de dados – em conformidade com os objetos propostos na pesquisa.

No próximo capítulo serão apresentadas as análises dos resultados referentes aos experimentos de colisão nos dois tipos de corpos de prova.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Deformação das longarinas

Após a produção dos corpos de prova, sendo três longarinas do tipo A e três do tipo B, foi estabelecida a altura e peso total do martelo para garantir energias potenciais equivalentes para todos os ensaios. Dessa forma foram definidos os valores apresentados na tabela 7 como parâmetros para cada uma das variáveis do sistema.

Tabela 7 – Variáveis do ensaio

PARÂMETRO	VALOR
Altura	1,5 metros
Massa	147 kg

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Analisando primeiramente as longarinas do tipo A, tem-se que a amostra 1A sofreu deformação de 118mm, enquanto a amostra 2A apresentou deformação de 120 mm e a amostra 3A sofreu 116 mm de deformação, conforme exibido na figura 14.



Figura 15 – Comparativo de deformação nas longarinas tipo A  
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Para as longarinas do tipo B, obtiveram-se os seguintes resultados; na amostra 1B 61mm de deformação, na amostra 2B ocorreu 60mm, enquanto a amostra 3B sofreu 57mm de deformação. A figura 15 demonstra os resultados.



Figura 16 – Comparativo de deformação nas longarinas tipo B  
 Fonte: Pesquisa direta (2025)

As tabelas 8 e 9 apresentam quantitativamente as deformações nas longarinas, considerando as condições de ensaio apresentadas na tabela 7, sendo possível observar que os corpos de prova do tipo A sofreram maior compressão que os corpos de prova do tipo B.

Tabela 8 – Deformação nas longarinas tipo A

AMOSTRA	DEFORMAÇÃO (milímetros)
1A	118
2A	120
3A	116

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Tabela 9 – Deformação nas longarinas tipo B

<b>AMOSTRA</b>	<b>DEFORMAÇÃO (milímetros)</b>
1B	61
2B	60
3B	57

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Nas tabelas 10 e 11, está descrita a análise estatística dos resultados dos testes.

Tabela 10 – Deformação nas amostras

<b>AMOSTRA</b>	<b>Deformação - tipo A (mm)</b>	<b>Deformação - tipo B (mm)</b>
1	118	61
2	120	60
3	116	57
<b>MÉDIA</b>	118	59,3
<b>DESVIO PADRÃO</b>	1,633	1,7

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Aplicando a análise de variância Anova (fator único) com nível de significância de 0,05, constata-se que a variância entre os grupos (tipos A e B) apresentaram diferenças significativas, conforme exibido na tabela 11.

Tabela 11 – Análise estatística Anova (fator único)

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
A [mm]	3	354,00	118,00	4,00
B [mm]	3	178,00	59,33	4,33

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5162,67	1	5162,67	1239,04	3,89E-06	7,708647
Dentro dos grupos	16,67	4	4			
Total	5179,33	5				

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Tendo em vista que ocorrem diferenças na variância entre os grupos, foi utilizado o método teste-t, com nível de significância de 0,05, a fim de avaliar se há diferença relevante entre as médias dos grupos de amostras (tabela 12).

Tabela 12 – Teste-t: duas amostras presumindo diferentes variâncias

Teste-t

	<i>A [mm]</i>	<i>B [mm]</i>
Média	118,00	59,33
Variância	4,00	4,33
Observações	3	3
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	4	
Stat t	35,20	
P(T<=t) uni-caudal	1,944E-06	
t crítico uni-caudal	2,1318468	
P(T<=t) bi-caudal	3,887E-06	
t crítico bi-caudal	2,7764451	

Fonte: Pesquisa direta (2025)

A análise estatística dos resultados aponta que as médias entre os grupos apresentam diferenças significativas, portanto, os resultados sugerem que, apesar de os grupos de amostras apresentarem o mesmo momento de inércia, a geometria influencia à resposta à deformação dinâmica.

De forma análoga aos resultados obtidos no presente estudo, Peroni *et al.* (2002), ao investigar a influência de diferentes materiais e geometrias em aplicações automotivas,

identificaram que a configuração denominada ‘célula dupla’, semelhante ao perfil duplo cartola utilizado no presente trabalho, apresenta desempenho superior na dissipação de energia. Tal comportamento decorre da maior rigidez estrutural associada à geometria, que promove redução da deformação global e, conseqüentemente, maior capacidade de absorção controlada de energia. No presente trabalho, observou-se fenômeno semelhante nas amostras do grupo B: embora possuam o mesmo momento de inércia de seção transversal que as amostras do grupo A, resultaram em menor deformação e maior desaceleração durante o impacto. Esses resultados reforçam que não apenas o material, mas também a configuração geométrica exerce papel decisivo no mecanismo de dissipação de energia em sistemas dinâmicos.

#### **4.1.1 Flambagem**

Durante os testes de colisão foi possível observar que, embora todas as amostras tenham sido submetidas à mesma energia de impacto e possuam momentos de inércia equivalentes, os modos de deformação apresentados variaram significativamente entre os dois grupos. Essa variação pode ser atribuída diretamente às diferenças geométricas das seções transversais.

O estudo teórico da flambagem de estruturas associado a rigidez corrobora com a afirmativa de que a geometria da seção transversal influencia a capacidade da estrutura em se deformar dinamicamente, visto que o cálculo da carga crítica para as duas geometrias é equivalente, conforme demonstrado na tabela 13, porém diferenças na rigidez mecânica podem levar a respostas distintas.

Para calcular a carga crítica de cada um dos casos, temos os tipos mais comuns ilustrados na figura 16. No presente trabalho foi escolhido o modelo de uma extremidade engastada e a outra livre, uma vez que o corpo de prova foi engastado por meio da utilização de uma base de apoio fabricada para cada um dos tipos de amostra, conforme demonstra a figura 17.

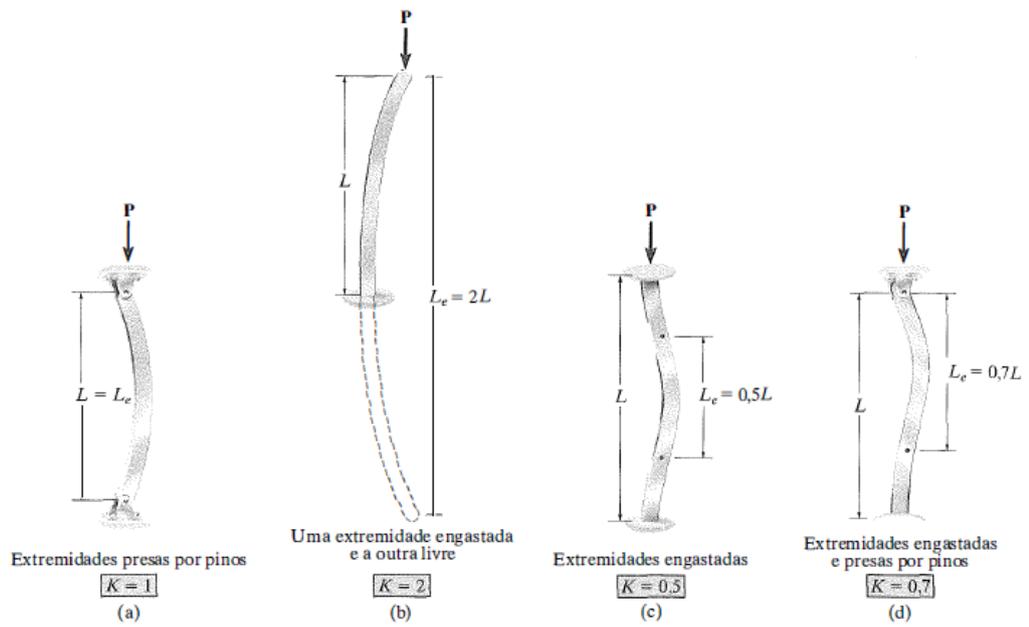


Figura 17 – Tipos mais comuns de apoio de coluna  
Fonte: Hibbeler (2007)



Figura 18 – Processo de construção das bases de fixação  
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Dessa forma, após a definição do modelo de apoio, foi possível calcular as cargas críticas por meio da equação 4.

Tabela 13 – Cálculo das cargas críticas

TIPO	VALOR ENCONTRADO [ $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$ ]
A	117,6 Ton
B	120,9 Ton

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Então, levando em consideração a compressão média para cada um dos grupos, é possível, a partir da equação 6 e as deformações médias dos grupos, comparar as razões de proporcionalidade das constantes de rigidez entre os grupos, conforme ilustrado na figura 18.

$$K = \frac{\vec{F}_A}{\delta} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$K_A = \frac{\vec{F}_A}{118} \text{ e } K_B = \frac{\vec{F}_B}{60}$$

Figura 19 – Razões de proporcionalidade das rigidezes  
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que, embora as amostras tipo A e B tenham sido projetadas para apresentar momentos de inércia semelhantes, a geometria exerceu influência significativa na deformação dinâmica. A diferença entre as deformações médias demonstra que não apenas o valor do momento de inércia, mas também a forma como ele se distribui ao longo da seção transversal, influencia diretamente a rigidez estrutural e a capacidade de absorção controlada de energia. Portanto, a configuração geométrica desempenha papel decisivo no desempenho dinâmico das longarinas, uma vez que geometrias que elevem a rigidez global da peça favorecem um desempenho superior em colisões frontais.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os processos de soldagem a ponto por resistência elétrica e sobre a geometria das longarinas veiculares, abordando a influência desses fatores na absorção de energia em colisões frontais. Esse estudo permitiu definir parâmetros adequados para a fabricação dos corpos de prova e realização dos ensaios.

Foram produzidas amostras com duas geometrias distintas – perfil *top-hat* e seção *double-cell* – e submetidas a ensaios de colisão controlados, mantendo constante a energia de impacto e o momento de inércia entre os grupos de amostras. A análise comparativa dos resultados evidenciou que a geometria da seção transversal exerce influência significativa na deformação dinâmica das amostras.

Os resultados dos ensaios de colisão sugerem que a geometria influencia diretamente na deformação das longarinas. O grupo A apresentou compressão média de 118 mm, enquanto no grupo B a média foi de 59,3 mm. Assim, mesmo sob as mesmas condições de impacto, as longarinas com geometria *double-cell* demonstraram maior resistência à deformação, indicando melhor desempenho para aplicações veiculares em colisões frontais

### 5.2 Recomendações

A partir da análise dos resultados discutidos neste trabalho, surgiram novas propostas para a continuidade do estudo, sendo elas:

- Utilizar aços avançados de alta resistência – amplamente aplicados na indústria automobilística, para a construção das longarinas;
- Realizar gravação dos ensaios por meio de câmara de alta velocidade, para análise de deformação e desaceleração durante o impacto;
- Aplicar o estudo à outras geometrias de longarina.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZOM. **AISI 1010 Carbon Steel (UNS G10100)**. AZoM, 21 set. 2012. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6539>. Acesso em: 9 ago. 2025.

BATISTA, M. **Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para indústria automotiva utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência**. 2011. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BEER, F. P.; JOHNSTON JUNIOR, E. R. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

BRASIL. Polícia Rodoviária Federal. **Anuário Estatístico 2024**. Brasília, DF: Ministério da Justiça e Segurança Pública, 2025. Disponível em: [https://www.gpv.br/prf/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/diest-arquivos/anuario-2024\\_final.html](https://www.gpv.br/prf/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/diest-arquivos/anuario-2024_final.html). Acesso em: 12 ago. 2025.

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.

COLPAERT, H.; SILVA, A. L. V. da C. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

COLOSIMO, E. A. **Princípios da Bioestatística: Análise de Variância (ANOVA)**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, [s. d.]. Disponível em: <https://www.est.ufmg.br/~enricoc/pdf/medicina/anova.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2025.

DAMASCO, A. **Soldagem a ponto por resistência elétrica de juntas de chapa/chapa e chapa/tubo de aço de baixo carbono com diferentes composições químicas, espessuras e revestimentos**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

DATA SHEET. **Especificação do aço**. MatWeb. Disponível em: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=025d4a04c2c640c9b0eaaef28318d761>. Acesso em: 10 ago. 2025.

DU BOIS, P. et al. **Vehicle crashworthiness and occupant protection**. Editado por Priya Prasad e Jamel E. Belwafa. Southfield, MI: American Iron and Steel Institute, 2004.

ERCOLANI, J. **Caracterização dos aços DP600 e DP780 para uso na conformação mecânica**. *Revista Tecnológica*, v. 31, p. 35-46, 29 nov. 2022.

FAY, M.; SUTHURST, D. **Redesign of adhesively bonded box beam sections for improved impact performance**. *International Journal of Impact Engineering*, v. 9, n. 3, p. 383–397, 1990.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: volume 1 – mecânica**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- HAPPIAN-SMITH, J. (Ed.). **An introduction to modern vehicle design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- IKEDA, T. **Segurança veicular: dispositivos de segurança passiva – descrição e recomendações**. 2012. 72 f. Monografia (Especialização em Engenharia Automotiva) – Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.
- MAZZAFERRO, C. C. P. et al. **Avaliação microestrutural e propriedades mecânicas de um aço TRIP soldado a ponto por fricção e mistura mecânica**. Soldagem & Inspeção, v. 14, n. 4, p. 278–287, out. 2009.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos processos de soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica, 2011.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- PASSOS, J. C. **Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 3, p. 3603.1–3603.8, jul. 2009.
- PERONI, L. et al. **Strain-rate effects on the energy absorption capability of crash boxes with different geometry**. In: STRUCTURES UNDER SHOCK AND IMPACT VII. Southampton: WIT Press, 2002. p. 259–270.
- PIMENTEL, R. C. **Análise da influência da velocidade e da massa de colisão na deformação de estruturas com geometria similar às longarinas veiculares**. 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.
- RIFFEL, M. H.; DA ROCHA, R. P.; MOZETIC, H.; SCHAEFFER, L. **Alterações microestruturais dos aços AHSS no processo de dobramento em “V”**. Observatorio de la Economía Latinoamericana, v. 21, n. 12, p. 27752–27769, 2023. DOI: 10.55905/oelv21n12-230. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/2633>. Acesso em: 13 maio 2025.
- RUIZ, D. C.; BATALHA, G. F. **Estudo de um critério de modo de falha para solda a ponto por resistência**. In: WORKSHOP SOBRE NOVOS DESENVOLVIMENTOS EM ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. São Paulo: USP, 2004.
- SOUSA, D. A. de. **Influência da resistência mecânica de pontos de solda sobre o desempenho de estruturas similares a longarinas veiculares submetidas a teste de**

**colisão.** 2018. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração.** 16. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016. E-book. ISBN 9788597007480.

YUAN, X. et al. **Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels.** Journal of Materials Processing Technology, v. 239, p. 31–41, 2017.

ZHANG, H.; SENKARA, J. **Resistance welding: fundamentals and applications.** New York: Taylor & Francis, 2012.

**ANEXO**