



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



RAFAEL CARVALHO PIMENTEL

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE E DA MASSA DE
COLISÃO NA DEFORMAÇÃO DE ESTRUTURAS COM GEOMETRIA
SIMILAR ÀS LONGARINAS VEICULARES**

OURO PRETO - MG
2022

RAFAEL CARVALHO PIMENTEL
carvpimentel@gmail.com

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE E DA MASSA DE
COLISÃO NA DEFORMAÇÃO DE ESTRUTURAS COM GEOMETRIA
SIMILAR ÀS LONGARINAS VEICULARES**

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
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P644a Pimentel, Rafael Carvalho.

Análise da influência da velocidade e da massa de colisão na deformação de estruturas com geometria similar às longarinas veiculares. [manuscrito] / Rafael Carvalho Pimentel. - 2022.
72 f.: il.: color., gráf., 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. Engenharia mecânica - Velocidade. 3. Soldagem - Soldagem a ponto. 4. Engenharia mecânica - Queda livre. 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

Rafael Carvalho Pimentel

Análise da influência da velocidade e da massa de colisão na deformação de estruturas com geometria similiar as longarinas veiculares

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 13 de Outubro de 2022.

Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Sávio Sade Tayer (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 19/10/2022



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/10/2022, às 18:25, 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 **0414700** e o código CRC **84FD7475**.

Grato à Deus por mais essa oportunidade,
aos meus pais e meu irmão por
acreditarem em mim mesmo nos
momentos difíceis.

AGRADECIMENTO

Primeiramente quero agradecer a Deus, por me proporcionar tantas histórias, experiências e bênçãos nesses anos.

Ao meu orientador Diogo, pelo solicitude do tema, empenho para realização, orientação e suporte neste trabalho. Ao Gabriel pela ajuda nos experimentos.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto pelos aprendizados dentro e fora das salas de aula, aprendizados estes que foram importantes para a realização deste trabalho.

Após longos anos, começo a me despedir dessa fase que com certeza está marcada na minha história.

Quero agradecer aos meus pais, Sônia e Marcelo por todo apoio, financeiro e emocional, desde o primeiro dia. Devo tudo a vocês! Ao Arthur pela parceria de sempre e pra sempre. A família Carvalho e Pimentel por serem as melhores famílias que eu poderia ter. À Flávia pelo amor incondicional e por me ensinar que não existe felicidade se não compartilhada.

A cidade de Ouro Preto, por me proporcionar grandes histórias e me mostrar que a universidade e a vida universitária são apenas uma prévia da caminhada. Por ser essa cidade incrível onde vivi, entre erros e acertos, os melhores anos da minha vida.

E por fim, a todos que fizeram parte, de alguma forma para que esse momento chegasse, meu muito obrigado!!

“A tarefa não é ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

Este trabalho teve a finalidade de avaliar a influência da velocidade na deformação de longarinas automotivas realizando experimentos de colisão. Sabe-se que com o crescimento no número de veículos nas ruas, o número de acidentes tende a aumentar, e por isso, o estudo sobre segurança veicular se torna cada vez mais importante crucial, a fim de diminuir o máximo possível o número de vítimas. Para entender a influência da velocidade nas deformações das longarinas, foi feito seis experimentos em queda livre, divididos em dois grupos (A e B), sendo que a energia do sistema foi admitida como igual para os ensaios dos dois grupos, mas houve variação quanto a massa do martelo de colisão e a altura em que o martelo foi posicionado, alterando assim, a velocidade de colisão. Para a união das chapas por meio do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica foi selecionada uma condição de soldagem e, posteriormente, amostras foram testadas, conforme descrito na norma AWS D8.9M, e atestado que os pontos produzidos foram considerados aprovados segundo critérios de qualidade definidos pela norma. Na norma AWS 8.9M atribui as diretrizes para avaliar a qualidade do ponto de solda por resistência em chapas de aço revestidas e não revestidas. Após seleção das condições de soldagem as longarinas foram produzidas. Com o auxílio de uma câmera de alta velocidade, Modelo Phantom Miro 110, capturou-se as imagens do ensaio. Os resultados foram tratados estatisticamente pelo método de *t-Student* para a comparação das médias de compressão das amostras, a fim de avaliar se havia variâncias significativas entre elas. Apesar das longarinas terem sido submetidas a mesma energia de colisão, as velocidades (Grupo A = 13,8 m/s e Grupo B = 8,9 m/s) e as massas de colisão (Grupo A = 63,2 kg e Grupo B = 149,2 kg) foram distintas entre os grupos de amostras. Os resultados sugerem que a velocidade e a massa têm influência na deformação das longarinas, uma vez que as longarinas submetidas a uma menor velocidade de colisão, porém com a massa maior, apresentaram maior compressão. O Grupo A de longarinas apresentaram compressão média de 185,2 mm, enquanto que, o Grupo B apresentou compressão média de 243,8 mm. O estudo da compressão das estruturas com geometria similar às longarinas veiculares visa ajudar os projetistas a desenvolverem uma longarina que tenha a menor compressão possível com o veículo carregado e que ajude este mesmo veículo a ter a menor desaceleração possível quando descarregado.

Palavras-chave: Longarina. Deformação. Velocidade. Queda livre. Soldagem a ponto.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the influence of speed on the deformation of automotive stringers by carrying out collision experiments. It is known that with the growth in the number of vehicles on the streets, the number of accidents tends to increase, and therefore, the study on vehicle safety becomes increasingly important, in order to reduce the number of victims as much as possible. In order to understand the influence of velocity on the deformations of the stringers, six experiments were carried out in free fall, divided into two groups (A and B), and the energy of the system was assumed to be the same for the tests of the two groups, but there was variation as to the mass of the collision hammer and the height at which the hammer was positioned, thus changing the collision speed. For joining the sheets through the electrical resistance spot welding process, a welding condition was selected and, later, samples were tested, as described in the AWS D8.9M standard, and attested that the points produced were considered approved according to criteria of quality defined by the standard. The AWS 8.9M standard contains several standardized test methods that are designed to evaluate the resistance spot welding behavior of coated and uncoated steel sheets in a laboratory environment. After selecting the welding conditions the stringers were produced. With the help of a high-speed camera, Phantom Miro Model 110, we captured the rehearsal images with great precision. After performing the collision tests on the stringers, he used a method of statistical inference called the t-Student Test, to compare the compression averages of the samples in order to understand whether or not there were significant variances between them. Although the stringers were subjected to the same collision energy, the velocities (Group A = 13.8 m/s and Group B = 8.9 m/s) and collision masses (Group A = 63.2 kg and Group B = 149.2 kg) were different between the sample groups. The results suggest that speed and mass influence the deformation of the stringers. Since the stringers subjected to a lower collision speed, but with a greater mass, presented greater compression. Group A of stringers had a mean compression of 185.2 mm, while Group B had a mean compression of 243.8 mm. The study of the compression of structures with similar geometry to vehicular stringers aims to help designers to develop a stringer that has the least possible compression with the vehicle loaded and that helps this same vehicle to have the least possible deceleration when unloaded.

Key-words: *stringer, deformation, speed, free fall, spot welding.*

LISTA DE SIMBOLOS

Q = Calor gerado

i = Corrente elétrica que percorre o condutor

R = Resistência elétrica do condutor

t = Intervalo de tempo em que a corrente elétrica transitou pelo condutor

v_a = velocidade final do dispositivo de compressão após o impacto

v_b = velocidade final do martelo após o impacto

u_a = velocidade do dispositivo de compressão no instante anterior ao impacto

u_b = é a velocidade do martelo no instante anterior ao impacto

m_a = massa do dispositivo de compressão

m_b = massa do martelo

C_R = coeficiente de restituição

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Longarinas de uma carroceira veicular.....	2
Figura 2: Estrutura similar às longarinas utilizadas por carros nacionais populares.....	6
Figura 3: Exemplo de colisão entre dois corpos.....	11
Figura 4: Deformação axial de uma estrutura (coluna).....	13
Figura 5: Deformação por flambagem de uma estrutura.....	13
Figura 6: Tabela para o cálculo das áreas do gráfico de t-Student.....	15
Figura 7: Gráfico t-Student.....	16
Figura 8: Fluxograma das etapas da metodologia de pesquisa.....	18
Figura 9: Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica.....	19
Figura 10: Unidade de programação móvel da máquina de solda por resistência elétrica.....	20
Figura 11: Dinamômetro hidráulico.....	21
Figura 12: Dispositivo acoplado na máquina de soldagem para apoio do corpo de prova.....	22
Figura 13: Uso do nível para medir a posição correta da máquina e do corpo de prova.....	23
Figura 14: Soldagem do corpo de prova usado no ensaio de arrancamento do ponto de solda.....	24
Figura 15: Corpos de prova utilizados para testar qualidade da solda de acordo com a norma AWS D8.9M.....	25
Figura 16: Geometria, dimensões e espaçamentos dos pontos de solda (mm).....	25
Figura 17: Longarina lixada pronta para ser soldada.....	26
Figura 18: Processo de soldagem a ponto por resistência nas longarinas lixadas.....	27
Figura 19: Longarinas soldadas prontas para os testes de colisão.....	27
Figura 20: Torre de colisão.....	28
Figura 21: Martelo de colisão.....	29
Figura 22: Longarinas prontas para ensaio.....	30
Figura 23: Dispositivo de fixação da longarina com uma longarina pronta para ensaio.....	31
Figura 24: Câmera de alta velocidade.....	33
Figura 25: Ensaio de arrancamento.....	35

Figura 26: Corpo de prova cortado ao meio para melhor precisão na medição da lente de solda.....	36
Figura 27: Medida da lente de solda realizada por uma paquímetro.....	37
Figura 28: Deformação final das longarinas.....	38
Figura 29: Deformações das amostras: comparativo entre os Grupos.....	39
Figura 30: Progressão do ensaio de colisão.....	43
Figura 31: Curvas de deslocamento, velocidade e aceleração do dispositivo de compressão em função do tempo.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química e propriedades mecânicas do aço SAE 1006.....	18
Tabela 2: Condições dos ensaios.....	31
Tabela 3: Instrumentos e materiais utilizados.....	31
Tabela 4: Variáveis e indicadores.....	31
Tabela 5: Condições de colisão.....	36
Tabela 6: Compressão das amostras.....	38
Tabela 7: Análise estatística: Anova (Único fator).....	39
Tabela 8: <i>Teste-t</i> : duas amostras presumindo variâncias diferentes.....	39
Tabela 9: Estimativa da velocidade do martelo e do dispositivo de compressão considerando dois eventos distintos.....	41

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.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Estrutura Veicular.....	5
2.2	Segurança veicular.....	6
2.3	Segurança veicular passiva.....	7
2.4	Processo de Soldagem	7
2.4.1	Soldagem a ponto por resistência	8
2.5	Efeito Joule.....	8
2.6	Colisão.....	9
2.6.1	Energia cinética	10
2.6.2	Energia potencial	11
2.6.3	Energia parcialmente inelástica.....	111
2.7	Deformação de estruturas tubulares de paredes finas.....	12
2.8	Test-t Student.....	14
3	METODOLOGIA.....	18
3.1	Tipo de pesquisa	18
3.2	Materiais e métodos.....	18
3.2	Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica	19
3.3	Ensaio de arrancamento para testar qualidade da solda	25
3.4	Corpo de prova	26
3.4.1	Experimento de colisão	28
3.5	Variáveis e indicadores.....	32
3.6	Instrumentos de coleta de dados.....	33
3.7	Tabulação dos dados.....	33
3.8	Considerações finais	34

4	RESULTADOS	34
4.1	Caracterização do ponto de solda.....	354
4.2	Deformações das longarinas.....	376
5	CONCLUSÃO	476
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	497
	ANEXO	520

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Com o aumento significativo do número de automóveis nas ruas do Brasil, o número de acidentes cresce proporcionalmente. O impacto frontal é o mais comum entre os tipos de colisões, sendo responsável por cerca de 40% de todos os acidentes, e devido a essas colisões milhares de pessoas perdem a própria vida ou ficam gravemente feridas em todo o mundo (SOUSA, 2018).

A segurança veicular, nos dias atuais, é tão importante quanto um design sofisticado e a potência de um veículo, podendo ser definida como a capacidade de automóvel tem de proteger quem está no interior em casos de acidentes. A segurança veicular pode ser dividida em dois grandes segmentos, a ativa e a passiva, sendo que esta última estuda os mecanismos estruturais de proteção dos ocupantes em caso de acidente (MAIA, 2021).

A segurança veicular passiva é umas áreas que está em expansão na engenharia automotiva, há incentivos particulares e governamentais para aumentar a segurança do veículo em uma condição de colisão. As montadoras precisam projetar seus produtos para atender aos protocolos de homologação de cada mercado. Com isso foram criados padrões de teste e avaliações que são utilizados pelas marcas ao redor do mundo, como o “New Car Assessment Programme” (NCAP), que é o utilizado na América Latina como Latin NCAP, iniciada em 2010, além de ser utilizado também na Ásia e Europa, este último desde a década de 90.

Na Figura 1 está representada uma carroceria veicular na qual foi destacada a longarina, um componente estrutural do automóvel, que tem como objetivo proteger o carro de batidas e colisões e conseqüentemente o motorista e passageiros, sendo uma zona de sacrifício em caso de acidentes (SOUSA, 2018).



Figura 1 – Longarinas de uma carroceria veicular.

Fonte: Adaptado de Bois et al (2004).

O estudo do comportamento de deformação de longarinas é de extrema importância, já que esse componente estrutural veicular, representado na Figura 1, absorve o impacto em uma colisão frontal, assegurando a integridade física dos ocupantes no interior do veículo. Muitos autores já estudaram temas relacionados às longarinas, mas ainda há bastante o que estudar e lacunas a serem preenchidas (SOUSA, 2018).

Nesse trabalho foram fixadas algumas variáveis de controle a fim de analisar a influência da velocidade e da massa de colisão na deformação de longarinas. As variáveis de controle foram: o material (aço SAE 1006), a geometria (seção transversal e comprimento), resistência mecânica dos pontos de solda, espaçamento entre pontos de solda, direção uniaxial da força de compressão e energia de colisão. As estruturas com geometria similar às longarinas veiculares foram estudadas considerando duas situações hipotéticas e distintas a fim de avaliar a influência da velocidade na deformação dessa estrutura submetida a colisão. A primeira condição hipotética de colisão foi representada por um veículo descarregado (somente motorista e sem bagagem) que colidiu contra uma barreira rígida a uma determinada velocidade e energia cinética. Já a segunda condição foi representada pelo mesmo modelo de veículo, porém, carregado (cinco ocupantes e bagagem) que colidiu contra a mesma barreira rígida, mas, com velocidade inferior a primeira condição. Apesar da menor velocidade de colisão, nesta segunda condição, a energia cinética foi igual a primeira condição. Ou seja, para os dois ensaios,

tem-se energia cinética de colisão iguais, mas velocidades diferentes. Considerando essas duas situações foi proposta a seguinte pergunta problema:

Como analisar a influência da velocidade e da massa de colisão na deformação de estruturas com geometria similar às longarinas veiculares?

1.2 Justificativa

O principal teste realizado para avaliar o desempenho da estrutura veicular em relação à segurança veicular passiva é o ensaio de colisão frontal. O estudo da deformação de estruturas com geometria similar às longarinas veiculares visa ajudar a entender e a padronizar essas deformações, a fim de otimizar a capacidade dessas estruturas em absorver energia em diferentes condições de colisão. Por exemplo, diminuindo a desaceleração dos veículos numa condição de veículo descarregado, ou diminuindo a deformação (compressão) numa condição de veículo carregado. Esse trabalho contribuirá para futuros projetos de carrocerias, pois independentemente dos resultados os projetistas poderão dimensionar as carroceiras considerando ou desprezando as variáveis velocidade e/ou massa de colisão.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar a influência da velocidade da massa de colisão na deformação de estruturas com geometria similar às longarinas veiculares.

1.3.2 Específicos

- Apresentar um estudo teórico sobre: quantidade de movimento, soldagem a ponto por resistência, colisão e deformação de estruturas tubulares;
- Avaliar a resistência mecânica do ponto de solda para produção de estruturas com geometrias similares às longarinas automotivas;
- Realizar ensaio de colisão sobre estruturas com geometrias similares às longarinas automotivas;
- Entender a influência da velocidade de colisão no modo de deformação das longarinas considerando a mesma energia 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 à respeito de colisões, longarinas e demais temas abordados. Também são relatados teoria e conceitos sobre movimento.

O terceiro capítulo trata-se da metodologia e como foi feito o ensaio para esta monografia, abordando imagens para o melhor entendimento possível dos testes realizados.

No quarto capítulo, trata dos resultados obtidos com os experimentos feitos.

O quinto capítulo, trata-se da conclusão do trabalho, onde se analisa os resultados encontrados e tem a descrição do que foi esperado pelos autores em relação aos resultados.

E para finalizar, temos as referências bibliográficas, que são referentes às fontes utilizadas para extrair todo com o conteúdo do trabalho, e no fim os anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estrutura Veicular

As estruturas veiculares são compostas basicamente por chapas de aços e unidas por meio do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. De acordo com Bois et al. (2004), durante uma colisão veicular parte da energia cinética deve ser absorvida pela estrutura, portanto, quanto maior a sua capacidade em absorver energia, maior sua performance. Ainda de acordo com o autor, a rigidez da estrutura é uma variável de extrema importância, uma vez que determina a resposta em desaceleração e capacidade para absorver energia. Isto significa que, na condição de baixa rigidez, a estrutura absorve pouca energia cinética, enquanto que, com alta rigidez, aumenta a desaceleração.

O risco de lesão física para os ocupantes de um veículo submetido a colisão está diretamente associado com o tipo de colisão (frontal, lateral ou traseira) e quão rápido eles perdem a velocidade durante um impacto, ou seja, está associado com a desaceleração do ocupante no momento do impacto (SOUSA, 2018).

Os componentes estruturais, como: longarinas, para-choque, capô, travessas, para-lamas, motor, suspensão entre outros, irão absorver a maior parcela da energia envolvida numa colisão frontal (HAPPIAN-SMITH, 2002).

O desempenho da longarina pode ser significativamente melhorado pela otimização da sua geometria e/ou processo de soldagem. A Figura 2 representa estrutura similar as longarinas utilizadas por veículos brasileiros, e são as mais utilizadas, a exemplo do veículo Chevrolet Onix, Volkswagen Gol, Fiat Uno, Hyundai HB20, dentre outros, esses são os mais vendidos no Brasil (SOUSA, 2018).

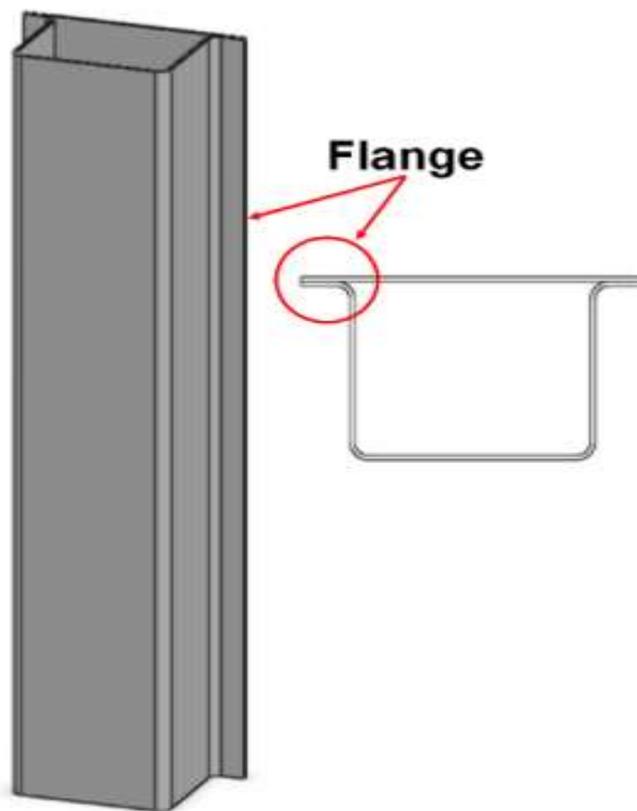


Figura 2 – Estrutura similar às longarinas utilizadas por carros nacionais populares.
Fonte: Souza (2018).

2.2 Segurança veicular

De acordo com Bertocchi (2005) o surgimento da Engenharia de Segurança Veicular tem seu início efetivo no pós-guerra no século XX. Inicialmente, os esforços foram concentrados na indústria aeronáutica e posteriormente grande parte do conhecimento adquirido fora migrado para os centros de pesquisas automotivos, principalmente na Europa e nos Estados Unidos.

A segurança dos automóveis tem atualmente sua importância reconhecida pelos consumidores em todo o mundo. Já há algumas décadas, esta característica dos veículos divide, juntamente com o design, o consumo, o *package*, o conforto e a potência dos motores, as páginas das mais renomadas publicações automotivas (BERTOCCHI, 2005).

A engenharia de segurança veicular é dividida em duas grandes áreas; a segurança ativa e passiva. A diferença entre elas é que a segurança veicular ativa tem o objetivo de evitar acidentes, e os principais mecanismos e equipamentos responsáveis são: acústica, campo de visibilidade, sistema de direção, limpador e desembaçador de vidro, freios (ABS), identificação de comando (luz espia), pneus, cambio, espelho retrovisor, suspensão, sensor de

estacionamento, ergonomia e conforto. Já a segurança veicular passiva tem o objetivo de proteger os ocupantes em caso de acidentes, e os principais mecanismos e equipamentos responsáveis são: portas, reservatório de combustível, direção (têm a função de absorver energia), para-choque (têm a função de absorver energia) e *crash box*, célula de sobrevivência, deformação programada frontal e traseira, cintos de segurança e pré-tensionadores, bancos e apoios de cabeça, sistema *bag* (*air bag*, *side side bag*, *head bag*) e painéis internos (têm a função de absorver energia) (SOUSA, 2018).

2.3 Segurança veicular passiva

O conceito original de segurança passiva de um carro surgiu associado a permanente integridade da célula de sobrevivência, a cabine ou compartimento do ocupante. Dessa forma a estrutura de um carro é considerada uma casca a qual pode proteger o ocupante, mas pode se deformar, em situações específicas de carregamentos estáticos e dinâmicos (MAIA, 2021).

De acordo com Bois et al. (2004) a segurança veicular passiva é subdividida em quatro macros áreas, sendo elas a estrutura (carroceria), *air bag*, biomecânica e interiores. Destas áreas, a estrutura é que tem maior importância e com isso é a estrutura mais significativa, uma vez que serve de base para a incorporação dos outros itens de segurança e suporta cargas estáticas e dinâmicas durante o ciclo de vida do veículo, sendo projetada para manter sua integridade e fornecer proteção adequada aos ocupantes em situação de colisão veicular.

2.4 Processo de Soldagem

A união soldada utilizada na construção das peças tem grande influência no modo de colapso e conseqüentemente, na quantidade de energia que o componente é capaz de absorver. Embora a soldagem por pontos utilizando resistência elétrica (Resistance Spot Welding - RSW) seja a mais utilizada no ramo automobilístico, os elevados requisitos de Segurança Veicular estabelecidos por órgãos como a LNCAP tem exigido das montadoras uma renovação das tecnologias (MAIA, 2021).

Como dito anteriormente, a soldagem a ponto por resistência elétrica é o processo de soldagem mais utilizado na indústria, pois apresenta alta produtividade e é um processo de fácil automatização. Mas apesar disso, existem outros processos de união que são utilizados na

produção de estruturas veiculares, como: soldagem MIG/MAG, soldagem a laser e adesivos estruturais (SOUSA, 2018).

2.4.1 Soldagem a ponto por resistência

A soldagem por resistência compreende um grupo de processos nos quais a união de peças metálicas é produzida em superfícies sobrepostas ou em contato topo a topo, pelo calor gerado através de resistência à passagem de uma corrente elétrica e pela aplicação de pressão (MAIA, 2021).

O princípio de funcionamento da soldagem a ponto por resistência elétrica consiste na passagem da corrente elétrica entre os eletrodos de contato não consumíveis e as chapas a serem unidas, assim, é gerado, por Efeito Joule, o calor necessário para a fusão dos metais. Os eletrodos são movimentados através de força mecânica, pneumática, hidráulica ou a combinação destas as quais promovem pressão necessária para soldagem das partes a serem unidas (SOUSA, 2018).

A escolha adequada das condições de soldagem tem influência direta resistência mecânica do ponto de solda, a exemplo da força dos eletrodos sobre as chapas a serem unidas, caso essa força seja muito alta, pode ocorrer a expulsão de material do núcleo fundido causando uma série de problemas metalúrgicos ao ponto de solda. A corrente elevada, também, pode ocasionar o mesmo problema de expulsão de material (ZHANG, 2012).

De acordo com Sousa apud Damasco (1995), a corrente de soldagem necessária para a fusão de duas peças com espessura determinada é função de vários fatores: estado das superfícies, diâmetro da face de contato dos eletrodos, propriedade mecânica do material, força entre eletrodos, tempos de soldagem etc.

A intensidade da corrente elétrica no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é uma variável de grande influência na qualidade da solda, pois, correntes elevadas resultam em maior calor gerado por Efeito Joule, isso somado a força do eletrodo, propiciam a expulsão do metal na zona de soldagem (SOUSA, 2018).

2.5 Efeito Joule

Para Sousa apud Pierri (1971), enquanto uma corrente elétrica flui em um circuito, está havendo transformação de energia. Assim, por exemplo, a energia química de uma pilha ligada a um circuito transforma-se em energia elétrica, térmica, além de outras formas de energia:

luminosa, magnética, etc. Ainda de acordo com Sousa apud Pierri (1971), produção de energia térmica pela corrente elétrica, que é uma transformação de energia elétrica em energia térmica, chama-se efeito Joule (PIERI et al., 1971).

Para Passos (2009) a quantidade de calor dissipado quando uma corrente elétrica de intensidade i atravessa um fio com resistência elétrica R , durante um intervalo de tempo t , é:

$$Q = Ri^2t \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

Q = Calor gerado

i = Corrente elétrica que percorre o condutor

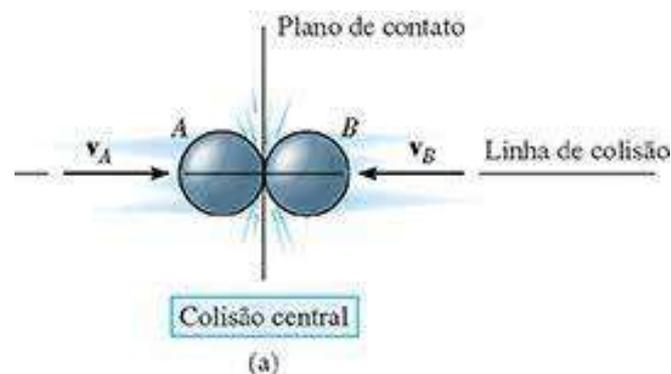
R = Resistência elétrica do condutor

t = Intervalo de tempo em que a corrente elétrica transitou pelo condutor

2.6 Colisão

Uma colisão, choque ou impacto entre dois corpos ocorre quando estes entram em contato durante um breve intervalo de tempo, desenvolvendo forças de relativa alta intensidade. A batida de um martelo num prego ou de um taco de golfe numa bola são exemplos comuns (HIBBELER, 2007).

Ainda de acordo com Hibbeler (2007) as colisões podem ser classificadas como colisão central e colisão oblíqua. A Figura 3 (a) e (b), mostra os dois tipos de colisões entre duas esferas. Uma colisão central ocorre quando as direções das velocidades dos centros de massa dos corpos em colisão coincidem com a linha que unem esses centros de massa (linha de colisão), e uma colisão oblíqua acontece quando uma ou ambas as velocidades dos centros de massa formam um ângulo com a linha de colisão (HIBBELER, 2007).



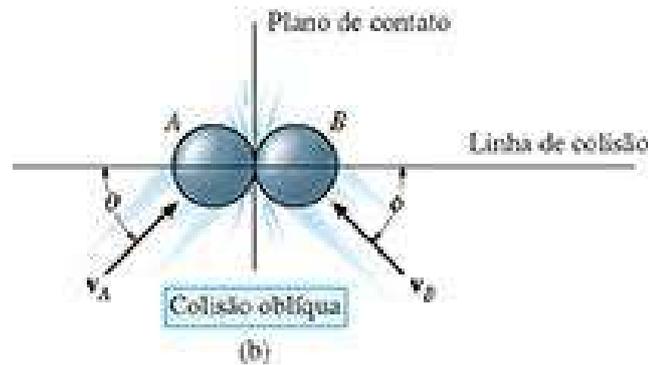


Figura 3: (a) duas esferas em uma colisão central; (b) duas esferas em uma colisão oblíqua.

Fonte: Hibbeler (2007).

Para ilustrar o método de análise da mecânica de colisões centrais, dado pela Figura 3 (a), segundo Hibbeler (2007) os corpos têm quantidade de movimento distintas ($v_A > v_B$) e, durante a colisão os corpos são pensados como deformáveis. Durante o tempo de deformação, os corpos exercem mutuamente impulsos de deformação opostos. E, somente no instante de deformação máxima ambos os corpos se movem com a mesma velocidade v , pois o movimento relativo é nulo. A seguir, ocorre um tempo de restituição, no qual os corpos voltam a sua forma original ou ficam permanentemente deformados.

Tanto na colisão, quanto na frenagem veicular, a desaceleração está presente. A diferença está no módulo e no comportamento da curva de desaceleração. Além disso, na frenagem, deseja-se parar o veículo o mais rápido possível. No entanto, na colisão, deseja-se que o tempo de deformação seja o maior possível (SOUSA, 2018).

2.6.1 Energia cinética

Segundo Resnick *et al.* (2003), a energia cinética, a energia associada ao movimento de um corpo.

Quanto mais depressa o objeto se move, maior é a energia cinética e, quando um objeto está em repouso, a energia cinética é nula (HALLIDAY e RESNICK, 2016).

A energia cinética é medida na unidade Joules), e assim como o trabalho, a energia cinética é uma grandeza escalar. De fato, ela pode ser representada como um produto escalar entre dois vetores (RESNICK *et al.* (2003):

$$E_c = m * \frac{v^2}{2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde, m é a massa do objeto e v é a velocidade do objeto.

2.6.2 Energia potencial

Quando uma força conservativa age sobre um corpo, fornece a ele a capacidade de realizar trabalho. Essa capacidade, medida como energia potencial, depende da localização do corpo. (HIBBELER, 2016).

Segundo Tipler (2009), energia potencial é um tipo de energia que se encontra armazenada no sistema, de acordo com a posição do corpo, a energia potencial é uma energia associada à configuração do sistema, enquanto a energia cinética é uma energia associada ao movimento (TIPLER, 2009)

A energia potencial é manifestada, geralmente, em dois principais tipos: energia potencial gravitacional e energia potencial elástica, podendo ser encontrada em outros tipos como a energia potencial elétrica, por exemplo (TIPLER, 2009)

Neste trabalho, o foco é a energia potencial gravitacional, que segundo Hibbeler (2016), se o corpo está localizado a uma distância y acima de um referencial horizontal fixo ou uma referência (neste trabalho a referência é a longarina), o peso do corpo (neste trabalho é o martelo) tem energia potencial gravitacional positiva, pois tem capacidade de realizar trabalhos positivo quando o corpo se move para baixo.

A equação para energia potencial é:

$$E_p = mgh \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde, m é a massa do objeto, g é a aceleração da gravidade e h é a altura de queda do objeto.

2.6.3 Energia parcialmente inelástica

Ocorre conservação de apenas uma parte da energia cinética de forma que a energia final é menor do que a energia inicial. Constituem a maioria das colisões que ocorre na natureza

e, nesse caso, após o choque, as partículas separam-se, e a velocidade relativa final é menor do que a inicial (HALLIDAY e RESNICK, 2016).

$$v_a = \frac{C_R m_b (u_b - u_a) + m_a u_a + m_b u_b}{m_a + m_b} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$v_b = \frac{C_R m_a (u_a - u_b) + m_a u_a + m_b u_b}{m_a + m_b} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde, v_a é a velocidade final do dispositivo de compressão após o impacto, v_b é a velocidade final do martelo após o impacto, u_a é a velocidade do dispositivo de compressão no instante anterior ao impacto, u_b é a velocidade do martelo no instante anterior ao impacto, m_a é a massa do dispositivo de compressão, m_b é a massa do martelo e C_R é o coeficiente de restituição (nesse estudo foi admitido como 0,2), que de acordo com Filho et al. (2017) pode ser encontrado de acordo com as velocidades relativas finais e as velocidades relativas iniciais no processo de colisões.

2.7 Deformação de estruturas tubulares de paredes finas

Dentre os grupos de aços utilizados para componentes automotivos estampados o principal é o dos aços HSLA. Os HSLA fazem parte de um grupo ainda maior, os AHSS (Advanced High Strength Steel) que contêm uma gama de diversos aços de alta resistência e elevado alongamento desenvolvidos com foco na indústria automotiva (MAIA, 2021).

Ainda de acordo com Maia (2021) a maioria das estruturas é projetada para não sofrer deformação plástica. Estruturas que necessitam absorver energia se deformando são exceções. Considerando que o alongamento total até a ruptura para a maioria dos aços gira em torno de 15%, e que apenas 2% correspondem a deformação elástica, a deformação plástica pode ser o modo mais eficiente de absorver energia.

Deformação plástica é a deformação permanente acompanhada por deslocamentos atômicos no material. Essa deformação não é recuperável, logo, um corpo submetido a um carregamento que lhe cause deformação plástica não recuperará seu formato original quando o carregamento for removido (CALLISTER, 2008).

Segundo Bois et al. (2004) há duas considerações importantes na concepção de estruturas automotivas para a gestão de energia de colisão: a absorção da energia cinética do veículo e a força necessária para garantir ou manter a integridade do habitáculo no processo de deformação da estrutura.

Quanto à absorção de energia, dois modos ou mecanismos básicos são encontrados em estruturas de paredes finas: deformação axial, como demonstrado na Figura 4, e flexional. A maioria dos componentes estruturais que compõem as estruturas de extremidade dianteira e traseira dos veículos, estão sujeitos a modos mistos constituídos por deformação axial e de flambagem, como identificado na Figura 5. Em uma estrutura de absorção de energia bem planejada e executada, os modos mistos serão evitados para garantir um desempenho previsível durante o acidente (SOUSA, 2018).



Figura 4 – Deformação axial de uma estrutura (coluna).

Fonte: Maia (2021).

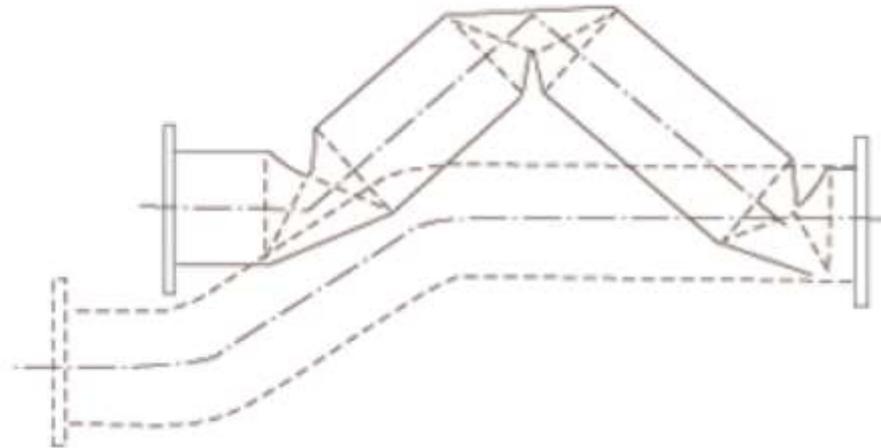


Figura 5 – Deformação por flambagem de uma estrutura.
Fonte: Sousa (2018).

O modo de deformação por flambagem, Figura 5, é o mecanismo predominante no colapso de elementos estruturais veiculares em comparação com a deformação axial, Figura 4. Essa predominância é resultado não só do design da estrutura, mas também, da tendência natural das estruturas colapsarem em modos que exigem menos energia (BOIS et al., 2004).

2.8 Análise de variância (ANOVA)

O procedimento correto para se evitar esse aumento no nível global de significância do experimento consiste em utilizar a técnica da Análise de Variância (ANOVA) (COLOSIMO, 2011). Ainda segundo Colosimo (2011), este método compara todas as médias em um único teste e visa a identificar a existência de ao menos uma diferença entre grupos, se alguma existir.

Caso o resultado seja significativo, aplica-se posteriormente uma das várias técnicas existentes de comparações múltiplas entre as médias. Estes procedimentos permitem identificar quais as populações são diferentes entre si, mantendo controlado o nível de significância do teste (COLOSIMO, 2011).

Neste trabalho será aplicado o teste t- Student.

2.8.1 Test-t Student

De acordo com Lopes (2003), a distribuição de t-Student é um modelo de distribuição contínua semelhante a distribuição normal padrão. É muito utilizada em inferências estatísticas, principalmente aquelas que possuem amostras inferiores a 30 elementos.

Para v pequeno, a curva da função densidade de probabilidade da distribuição t possui a mesma forma da normal padrão, sendo diferente somente no aspecto do achatamento (AZEVEDO, 2016).

O teste t Student pode ser conduzido para comparar uma amostra com uma população, comparar duas amostras pareadas ou comparar duas amostras independentes, ou seja, amostragem aleatória (LOPES et al, 2015).

Segundo Azevedo (2016) a distribuição t de Student também tem suas probabilidades tabeladas, conforme a Figura 27, sendo que essa fornece valores “ α ” para alguns valores de p (graus de liberdade), sendo $p=1, 2, 3, \dots, 30, 35, 40, 50, 60, 120$.

Distribuição de t de Student. Valor crítico t_0 tal que $P(t > t_0) = P(t < t_0) = \alpha/2$

Número de graus de liberdade	Nível de significância para o teste bilateral (α)					
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,005
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	127,32
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,089
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,832
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,090
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,056
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	2,915
120	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	2,860
∞	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807

Figura 6: Tabela para o cálculo das áreas do gráfico de t-Student.
Fonte: Theil (1971)

O gráfico de t-Student é demonstrado na Figura 7 abaixo, com as devidas probabilidades.

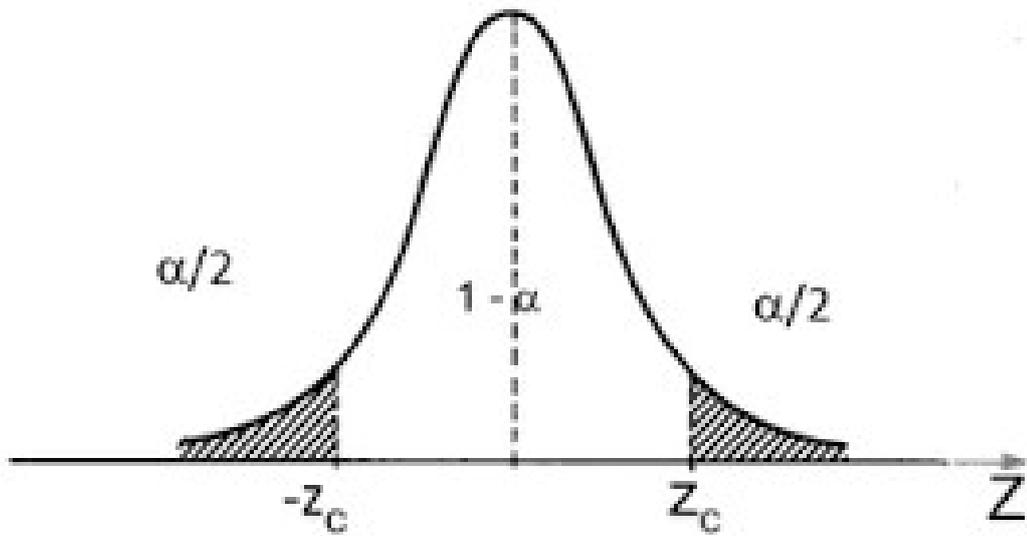


Figura 7: Gráfico t-Student.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.

Onde a linha pontilhada representa a média dos testes ou das amostras, z_c e $-z_c$, representam respectivamente o t-crítico positivo e negativo, de acordo com a Figura 7, e α é geralmente igual a 0,05, mas varia de acordo com a significância de cada estudo.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado a metodologia utilizada para a realização do trabalho, dividido 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

Este trabalho se configura numa pesquisa quantitativa, pois visa analisar a influência da velocidade nas deformações das longarinas. Mas também é uma pesquisa qualitativa pois será avaliado o resultado encontrado.

A pesquisa científica apresenta várias modalidades, sendo uma delas a pesquisa bibliográfica, que expõe todas as etapas que devem ser seguidas na sua realização. Esse tipo de pesquisa é concebida por diversos autores (GIL, 2002).

As pesquisas relacionadas ao Trabalho de Conclusão de Curso, de acordo com Gil (2002), são separadas em três grupos: exploratórias, descritivas e explicativas.

As pesquisas exploratórias contêm pouco conhecimento sobre o assunto a ser pesquisado, enquanto a pesquisa descritiva descreve determinada população ou fenômeno, e por último a explicativa, que como o próprio nome já diz: explica determinado fenômeno (VERGARA, 2010).

As pesquisas explicativas se preocupam em identificar os fatores que determinam ou contribuem para que o fenômeno ocorra. Sendo o tipo de pesquisa mais complexo, por se aprofundar no conhecimento da realidade e explicar as causas do problema. De forma que, as pesquisas explicativas valem-se quase exclusivamente do método experimental (GERHARDT, 2009).

Este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa exploratória, por utilizar o método de pesquisa bibliográfica, utilizando como material de estudo artigos e trabalhos científicos. Pode ser considerado uma pesquisa bibliográfica e, o trabalho também pode ser classificado como pesquisa explicativa, pois tem o objetivo de analisar a influência da velocidade e da massa de colisão na deformação de estruturas com geometria similar às longarinas veiculares através de métodos experimentais.

3.2 Materiais e métodos

Os materiais e métodos utilizados são apresentados no fluxograma da figura 8, abaixo.

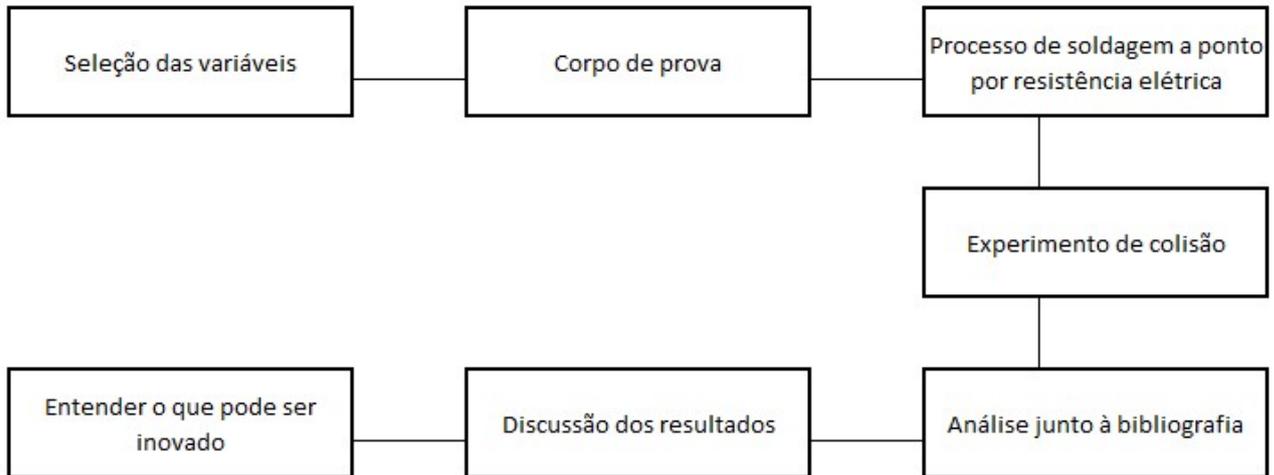


Figura 8 – Fluxograma das etapas da metodologia de pesquisa.

Fonte: Pesquisa direta, 2022.

Para construção dos corpos de prova utilizou-se um aço carbono SAE/ABNT 1006. A espessura da chapa foi de 0,90 mm e todos os corpos de prova foram produzidos no sentido de laminação do material. A composição química e propriedades mecânicas estão destacadas na Tabela 1. Antes da soldagem as partes foram lixadas.

Tabela 1: Composição química e propriedades mecânicas do aço SAE 1006.

Composição química (%)														
Aço	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Sn	N	B
SAE-J403-14-1006	0,05	0,01	0,22	0,011	0,012	0,044	0,01	0,001	0,001	0,01	0,01	0,001	0,0023	0,0038
Propriedades mecânicas														
Limite de resistência à tração	330 MPa													
Tensão de escoamento	285 MPa													
Alongamento	20%													

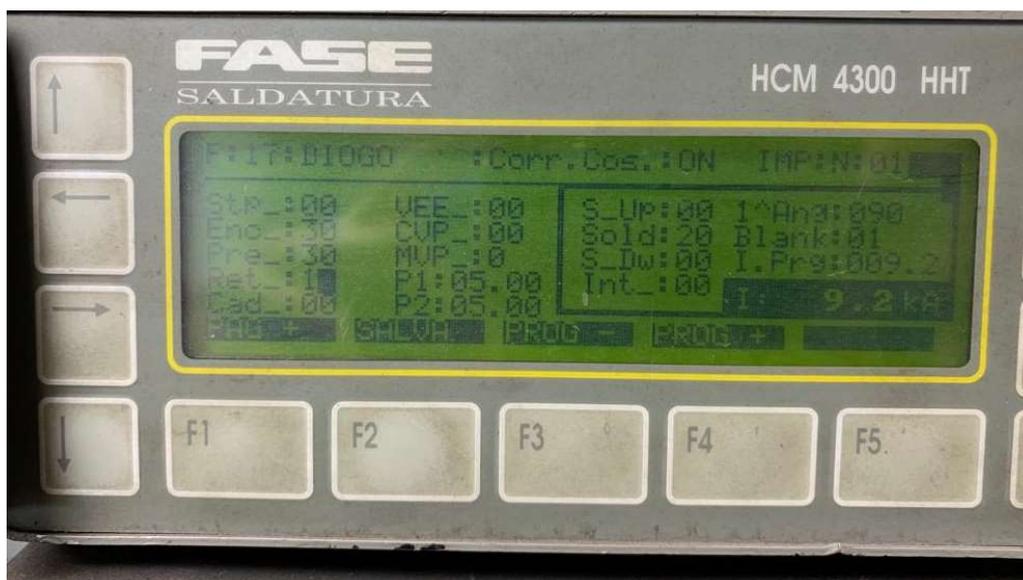
3.3 Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica

As soldas foram realizadas utilizando uma máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica, que tem uma pinça de soldagem suspensa com cilindro pneumático da fabricante FASE modelo X/4 – 200. Esta máquina possui um transformador de frequência média de 440V e potência nominal de 54 kVA modelo Cabine Compacta PTI número de série P04000951 61 com controlador Weld334MHC e unidade de programação móvel HCM 4300 HHT da fabricante FASE; um transformador de 220V para 440V Auto Trafo monofásico de 15 kVA e

60 Hz, modelo ELT78, Figura 9 (a) e (b). Os eletrodos utilizados foram de liga Cu-Cr-Zr com 6 mm de diâmetro de contato.



Figura 9: Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.



(a)



(b)

Figura 10: Unidade de programação móvel da máquina de solda por resistência elétrica. (a) ilustrativo; (b) destaque para os valores usados durante a soldagem.
Fonte: Sousa (2018).

Para a calibração da máquina representada na Figura 9, usou-se o kiloamperímetro representado na Figura 10, que certifica a força aplicada pelos eletrodos, a intensidade da corrente elétrica, de 9,2 kA, e o tempo de passagem da corrente elétrica durante o tempo de soldagem.

Na Figura 11, está representado o dinamômetro hidráulico (dispositivo de calibração da força do eletrodo). Este equipamento é composto por um cilindro hidráulico adaptado do

sistema de freio automotivo, comumente empregado em cilindro da roda (freios a tambor). Um manômetro analógico foi utilizado para fazer a medição da pressão de compressão dos eletrodos sobre o cilindro hidráulico. E, para pressurização do circuito hidráulico usou-se um cilindro mestre com reservatório de óleo, também adaptado do sistema de freio automotivo. Para impedir o retorno do óleo pressurizado ao reservatório, uma válvula direcional foi acoplada na saída do cilindro mestre.

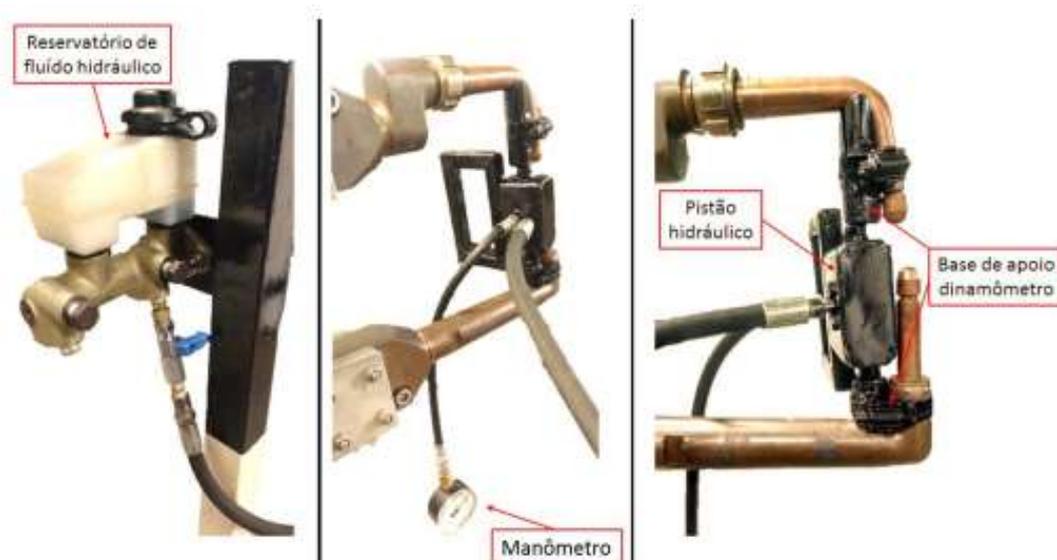


Figura 11: Dinamômetro hidráulico.
Fonte: Sousa (2018).

O equipamento, representado na Figura 11, foi calibrado em uma máquina de ensaio de tração universal modelo INSTRON, alocada no Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação da Escola de Engenharia da UFMG.

Para eliminar variáveis, como em uma situação onde o operador segura manualmente os corpos de prova, a máquina possui um dispositivo de posicionamento, Figura 12, dos corpos de prova.

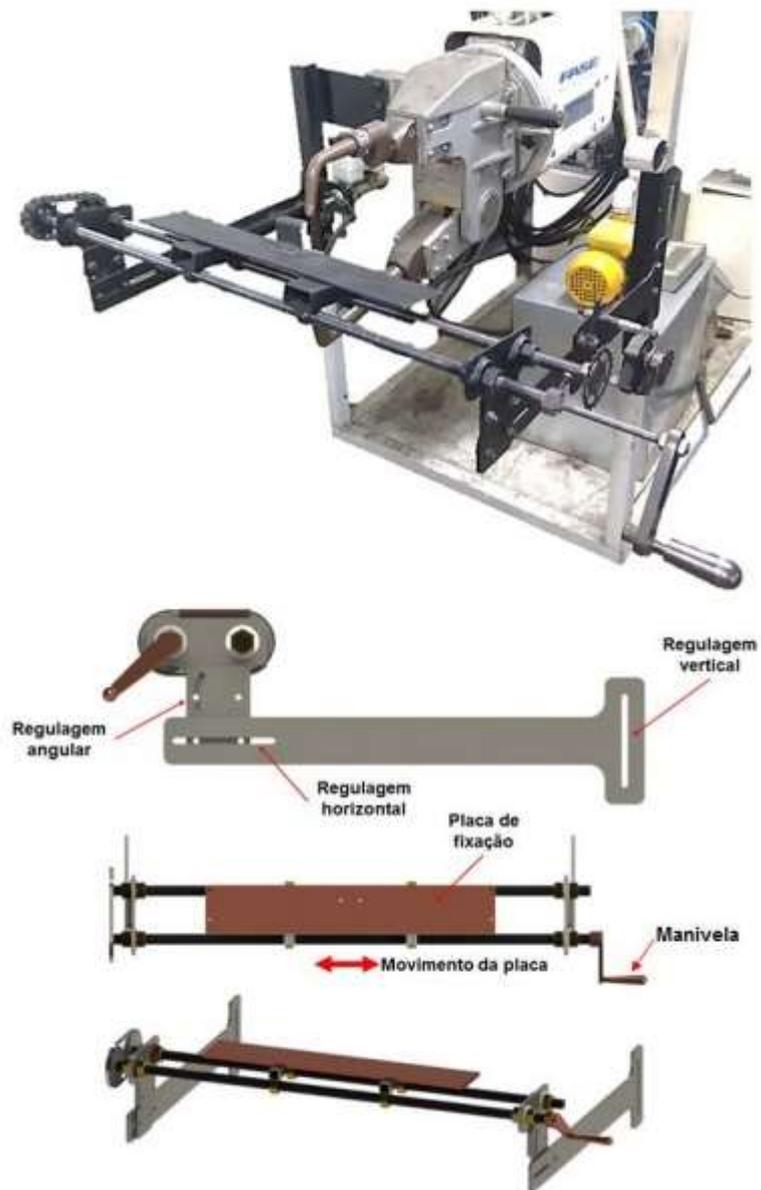


Figura 12: Dispositivo acoplado na máquina de soldagem para apoio do corpo de prova.
 Fonte: Sousa (2018).

Com a ajuda do dispositivo de apoio, Figura 12, fez-se a medição de inclinação da máquina e do corpo de prova, como demonstrado na Figura 13, utilizando um medidor de nível, afim de assegurar a posição correta do corpo de prova e da máquina de soldagem.



(a)



(b)

Figura 13: Uso do nível para medir a posição correta da máquina e do corpo de prova. (a) uso do nível no corpo de prova; (b) uso do nível na máquina. Fonte: Pesquisa direta, 2022.

3.4 Ensaio de arrancamento para testar qualidade da solda

Na Figura 14, está representado o corpo de prova usado no ensaio de arrancamento posicionado para ser soldado e testado a resistência da solda. Nela, um alicate é utilizado para fixar o corpo de prova corretamente para soldagem.



Figura 14: Soldagem do corpo de prova usado no ensaio de arrancamento do ponto de solda. Fonte: Pesquisa direta, 2022.

Foram feitos três corpos de prova. Os três soldados de forma semelhante, e pode-se observar na Figura 15 como ficaram. Após a soldagem dos três corpos de prova, eles foram testados a fim de averiguar se estavam dentro da norma.



Figura 15 – Corpos de prova utilizados para testar qualidade da solda de acordo com a norma AWS D8.9M.

Fonte: Pesquisa direta, 2022.

3.5 Corpo de prova

Para a montagem da longarina, foi necessário soldar duas chapas de aço de paredes finas de seção transversal retangular em juntas sobrepostas. Na Figura 16 estão representadas suas dimensões, e usando uma régua e um paquímetro, as dimensões encontradas foram: 500mm de comprimento, 20mm de flange, 60mm de largura e 80mm de altura. Os pontos de solda foram feitos a 10mm das extremidades e equidistantes entre si, separados por 40mm.

Para as medidas dos corpos de prova, Figura 16, foi levado em conta que as marcas automotivas adotam longarinas com dimensões e geometria semelhantes, podendo haver pequenas variações.

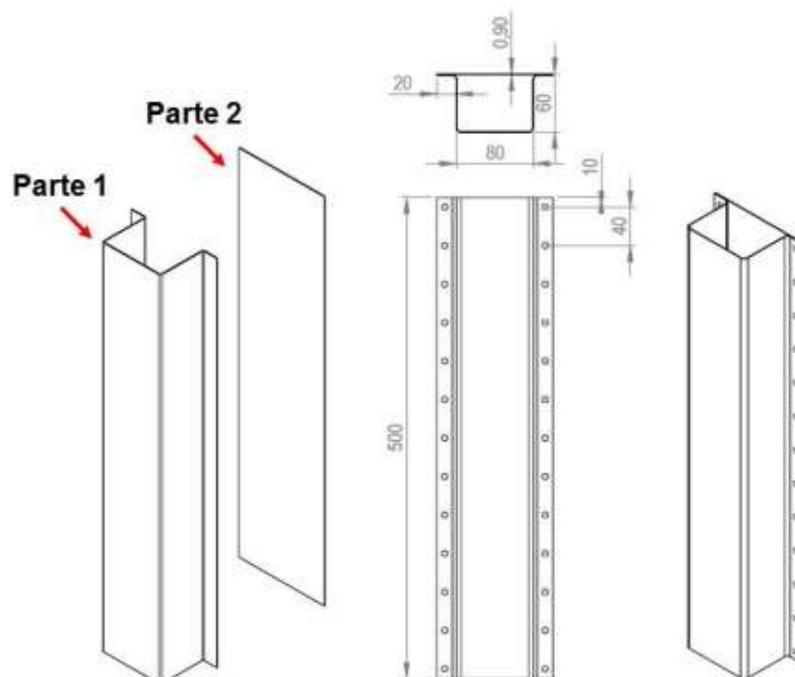


Figura 16: Geometria, dimensões e espaçamentos dos pontos de solda (mm).

Fonte: Sousa (2018).

Com a solda apta a ser usadas nas longarinas, continuou-se a pesquisa fazendo o lixamento das superfícies onde seriam soldadas as longarinas, como representado na Figura 17, e a seguir as soldas nas mesmas, como ilustrado na Figura 18.



Figura 17: Longarina lixada pronta para ser soldada.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.

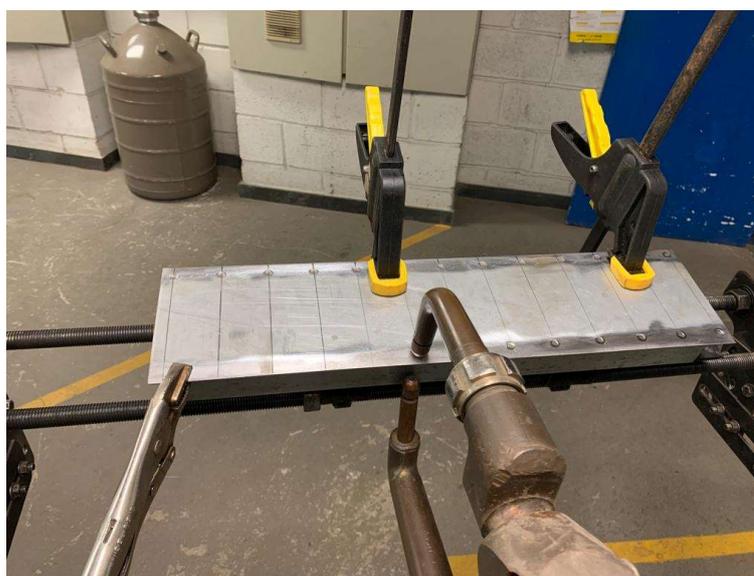


Figura 18: Processo de soldagem a ponto por resistência nas longarinas lixadas.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.

Após os processos representados nas Figuras 17 e 18, depois de soldadas todas as longarinas, Figura 19, os corpos de prova estavam prontos, como na Figura 16, para serem testados na torre de ensaio de colisão, onde foram feitos os testes para este presente trabalho.

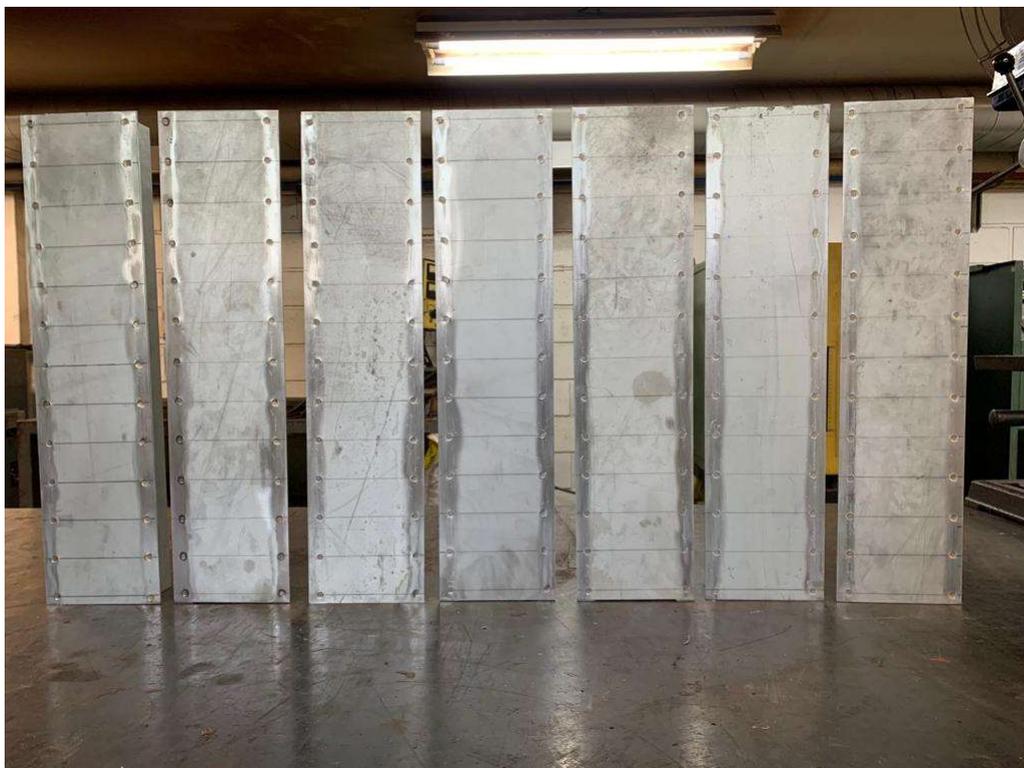


Figura 19: Longarinas soldadas prontas para os testes de colisão.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.

3.5.1 Experimento de colisão

Para o ensaio, foi utilizada uma torre, Figura 20, 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. Para os ensaios no presente trabalho, foi utilizada duas alturas diferentes. A primeira, de 9,5m de altura, foi usada para a realização de três ensaios (1A,2A, 3A). A segunda altura usada, de 4m, e também foi utilizada em três ensaios (ensaio 1B,2B,3B)



Figura 20: Torre de colisão.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.

Depois de içada a carga (martelo de colisão), o martelo, Figura 21 é liberado e cai em queda livre até atingir a longarina, que é fixada na base da torre por um dispositivo, Figura 22, que é responsável por garantir a que as solicitações de força sobre a longarina sejam somente na direção vertical e no sentido longitudinal, isto é, a longarina não será sujeita à outras componentes vetoriais de forças que não sejam na direção vertical. Este dispositivo, Figura 21, é composto por uma estrutura fixa, buchas deslizantes de cobre que permitem a movimentação da estrutura móvel e os eixos da estrutura móvel.



Figura 21: Martelo de colisão.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.

O martelo foi usado com duas cargas diferentes. A primeira, usada nos testes 1A,2A e 3A, teve uma massa equivalente à 63,2kg. Já nos ensaios 1B,2B e 3B, a massa utilizada foi equivalente à 149,2kg. As longarinas utilizadas nos ensaios então ilustrados na Figura 22.



Figura 22: Longarinas prontas para ensaio.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.

O dispositivo, Figura 23, fixado por ganchos e aparafusado, tem o objetivo de garantir a repetibilidade dos ensaios de colisão nas longarinas, o qual fez o intermédio entre o martelo de colisão e a longarina, fazendo com que a força vertical seja concentrada na longarina e não deixando com que forças vetoriais externas atrapalhem os ensaios. A estrutura móvel do dispositivo, aqui denominada de “Guias moveis”, tem uma massa de 23,6 kg sendo a interface entre martelo e longarina.

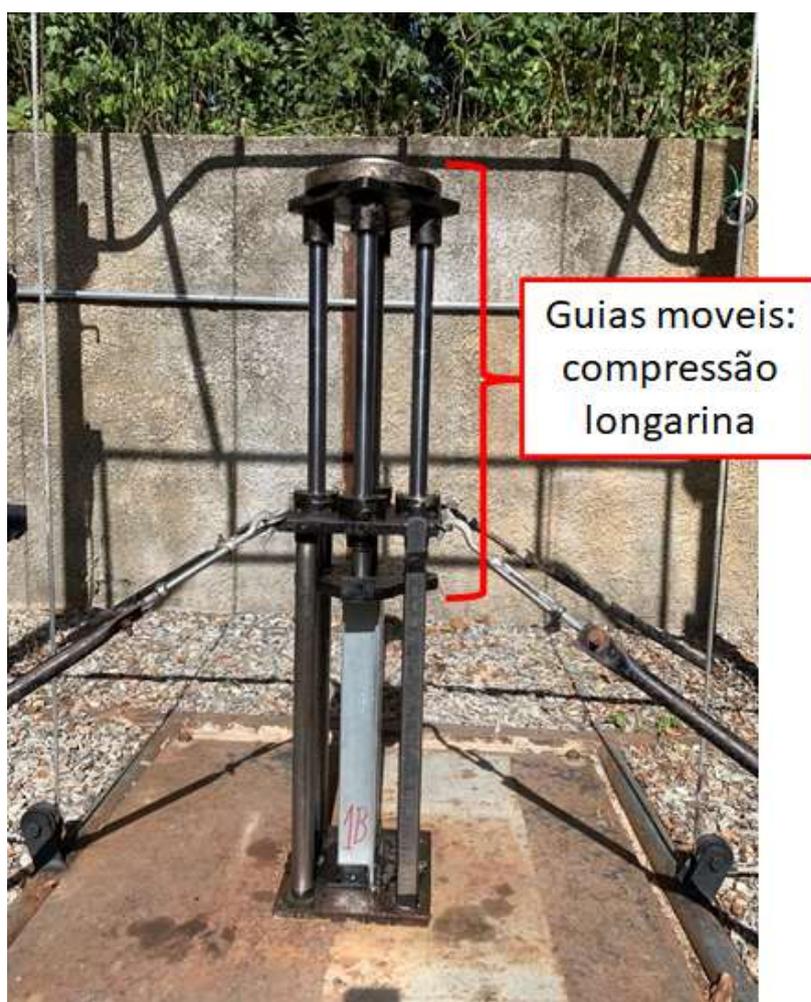


Figura 23: Dispositivo de compressão da longarina.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.

Foram realizados seis ensaios, três com altura e massa de 9,5m e 63,2kg respectivamente, e outros três com altura e massa de 4,0m e 149,2kg, respectivamente.

O intuito do ensaio foi alterar a massa e a altura dos ensaios, mas manter uma energia potencial de colisão aproximada, de 5.889,92J, e diante disso, avaliar a influência da velocidade na deformação das longarinas. Como podemos ver na Tabela 2.

Tabela 2: Condições dos ensaios.

Ensaio	1A	2A	3A	1B	2B	3B
Altura (m)	9,5	9,5	9,5	4,0	4,0	4,0
Massa (kg)	63,2	63,2	63,2	149,2	149,2	149,2
Energia (J)	5889,92	5889,92	5889,92	5854,6	5854,6	5854,6

Fonte: Pesquisa direta, 2022.

A Tabela 3, abaixo, mostra os instrumentos e materiais utilizados no ensaio.

Tabela 3: Instrumentos e materiais utilizados.

Instrumentos	Materiais
Longarina	Chapas de aço 1006
Estrutura do impacto de colisão	Estrutura andaime
Máquina de solda	Solda a ponto por resistência elétrica

Fonte: Pesquisa direta, 2022.

3.6 Variáveis e indicadores

Neste tópico estão listados as variáveis e seus indicadores usados para a realização dos ensaios de colisão e para a soldagem das chapas que deram forma às longarinas (Tabela 4).

Tabela 4: Variáveis e indicadores.

Variáveis	Indicadores
Energia Potencial	Massa, aceleração da gravidade e altura
Energia Cinética	Massa e velocidade
Processo de soldagem	Força das pinças, intensidade da corrente e tempo de corrente.

Fonte: Pesquisa direta, 2022.

3.7 Instrumentos de coleta de dados

Este tópico consiste em determinar os instrumentos utilizados na pesquisa e aquisição de dados. O levantamento dos dados foi adquirido pelo experimento feito, pelo estudo de teses e dissertações e literaturas sobre soldagem e ensaio de colisão.

Para o vídeo e as imagens das longarinas em momento de deformação será utilizada uma câmera de alta velocidade, como mostrado na figura 24. 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 960 x 280 e a 6300 frames por segundo e um celular iPhone XR.



Figura 24 – Câmera de alta velocidade.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.

3.8 Tabulação dos dados

Análises de deslocamento, velocidade e aceleração de deformação da longarina, serão realizadas utilizando o software da PCC (Phantom Camera Control) e o Microsoft Excel.

3.9 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado o tipo de pesquisa e metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, os métodos para realização do experimento, indicadores do processo, instrumentação e coleta de dados.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização do ponto de solda

Uma das formas de avaliar a qualidade do ponto de solda consiste em submeter o corpo de prova a ensaio mecânicos, de acordo com a norma AWS D8.9M. Com isso, utilizou-se o ensaio de arrancamento (ensaio destrutivo) para o teste de qualidade das soldas, no qual uma das chapas soldadas apresentou um “furo” (fratura em botão) após realizado o ensaio, como demonstrado na Figura 25 (d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 25: Ensaio de arrancamento. (a) vista frontal do corpo de prova no ensaio de arrancamento; (b) vista lateral do corpo de prova no ensaio de arrancamento; (c) vista superior do corpo de prova no ensaio de arrancamento; (d) corpo de prova após o ensaio de arrancamento.

Fonte: Pesquisa direta, 2022.

Para a garantia de qualidade da solda, ainda segundo a norma AWS D8.9M, além de apresentar um “furo” em uma das chapas, deve-se medir o diâmetro da lente de solda e, este tem de ser maior que $4\sqrt{w}$ (classe B), onde (w) é a menor espessura entre as chapas (WAN et al., 2014).

O corpo de prova foi cortado ao meio para uma melhor precisão durante a medição da lente de solda, como mostrado na Figura 26.



Figura 26: Corpo de prova cortado ao meio para melhor precisão na medição da lente de solda.

Fonte: Pesquisa direta, 2022.

De acordo com a medição, observou-se que a lente do ponto de solda tinha um diâmetro igual a 5mm, como podemos ver na Figura 27.



Figura 27: Medida da lente de solda realizada por um paquímetro.
Fonte: Pesquisa direta, 2022.

4.2 Deformações das longarinas

Após produção das amostras (6 longarinas) predeterminou-se a altura do martelo e quanto de massa teria que ser acrescentado ao martelo, de um ensaio para o outro, a fim de garantir uma energia potencial “iguais”, foram muito próximas (erro máximo de 35 J). Assim, foram selecionados os valores representados na Tabela 5 como parâmetros para cada variável do sistema (exceto a velocidade de colisão, que foi obtida usando o software PCC).

Tabela 5: Condições de colisão.

	Condição A	Condição B
Altura de queda [m]	9,5	4,0
Massa [kg]	63,2	149,2
Velocidade de colisão [m/s]	13,7	8,9
Energia Potencial [J]	5890	5855

Fonte: Pesquisa direta (2022).

A Figura 28 representa as deformações das longarinas estudadas, considerando as condições de colisão da Tabela 5. Observou-se que a deformação das longarinas que foram submetidas a condição de colisão “A” (Tabela 5) tiveram menor compressão (Figura 28 (b)), enquanto que, as longarinas submetidas a condição de colisão “B” (Tabela 5) tiveram maior compressão (Figura 28 (c)). A Figura 28 (a) representa a longarina antes da deformação.

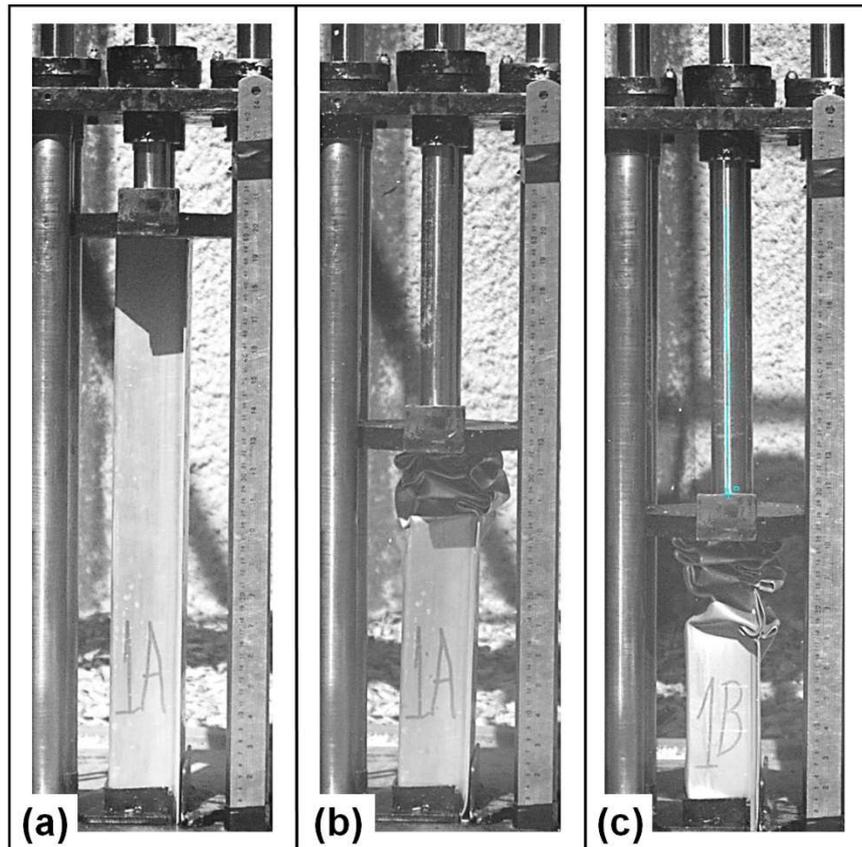


Figura 28 – Deformação final das longarinas: (a) antes da colisão (sem deformação) (b) condição “A” e (c) condição “B” de colisão. Imagens da câmera de alta velocidade.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

Na Figura 29 observa-se os modos de deformação entre os Grupos A e B, ou seja, longarinas construídas com os mesmos parâmetros, porém, submetidas a ensaios de colisão com condições distintas (Tabela 5).



Figura 29 – Deformações das amostras: comparativo entre os Grupos.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

Na Tabela 6, estão descritos dos resultados referentes a compressão das amostras (longarinas) testadas (Figura 28).

Tabela 6: Compressão das amostras.

Amostra	Compressão A [mm]	Compressão B [mm]
1	188,6	241,4
2	187,1	239,3
3	179,9	250,7
Média	185,2	243,8
Desv. Padrão	4,7	6,1

Fonte: Pesquisa direta, 2022.

A compressão das amostras (longarinas) foi medida por meio do software Phantom Camera Control (PCC) o qual faz o monitoramento de um ponto predeterminado no dispositivo de compressão da longarina. Estatisticamente, aplicando a análise da variância (Anova: fator único) com nível de significância de 0,05, concluiu-se que a variância entre os grupos (condição de colisão “A” e “B”) apresentaram diferenças significativas, conforme descrito na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise estatística: Anova (Único fator)

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
A	3	555,5564	185,1855	21,84968		
B	3	731,423	243,8077	36,8622		

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	5154,842	1	5154,842	175,5979	0,000187	7,708647
Dentro dos grupos	117,4238	4	29,35594			
Total	5272,266	5				

Fonte: Pesquisa direta (2022).

Uma vez que há diferenças na variância entre os grupos, aplicou-se o método de *Teste-t*, com nível de significância de 0,05, a fim de avaliar se há diferenças significativas entre as médias dos grupos de amostras (Tabela 8).

Tabela 8: *Teste-t*: duas amostras presumindo variâncias diferentes.

	<i>A</i>	<i>B</i>
Média	185,1855	243,8077
Variância	21,84968	36,8622
Observações	3	3
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t	-13,2513	
P(T<=t) uni-caudal	9,37E-05	
t crítico uni-caudal	2,131847	
P(T<=t) bi-caudal	0,000187	
t crítico bi-caudal	2,776445	

Fonte: Pesquisa direta (2022).

Os resultados estatísticos sugerem que as médias entre os grupos apresentam diferenças significativas, logo, foi possível afirmar que, apesar da energia potencial do martelo ser igual entre os dois grupos, a velocidade e/ou a massa do martelo influencia na compressão das longarinas. Essa influência será discutida na análise das curvas de deslocamento, velocidade e aceleração do dispositivo de compressão.

Com objetivo de entender o fenômeno, diferenças de compressão entre os grupos de amostras estudadas. A câmera de alta velocidade foi posicionada enquadrando a colisão do martelo e o dispositivo de compressão. Assim, na Figura 30 observa-se a evolução da colisão do martelo sobre o dispositivo de compressão da longarina. Na Figura 30(a) observa-se a longarina posicionada sobre o dispositivo de compressão antes da colisão. Na Figura 30(b) observa-se a aproximação do martelo momentos antes da colisão, na sequência, a Figura 30(c) representa o instante da colisão do martelo sobre o dispositivo de compressão, esse momento será denominado nesse estudo por “1º Evento”. Na Figura 30(d) observa-se o momento que o martelo perde contato com o dispositivo de compressão, fenômeno caracterizado pela colisão parcialmente inelástica, ou seja, os elementos envolvidos nas colisões não permanecem juntos e alguma energia cinética é perdida em forma de atrito, som e calor. As Equações 2 e 3 representam tal fenômeno. Por fim, a Figura 30(e) representa o instante da segunda colisão entre o martelo e o dispositivo de compressão, esse momento será denominado nesse estudo por “2º Evento”. Apesar de terem ocorridos outros de eventos de colisão entre martelo e dispositivo de compressão na evolução do ensaio, foram considerados somente “1º e 2º Evento”, uma vez que os demais não ocasionaram deformações significativas as amostras testadas.

A fim de estimar os módulos da velocidade do dispositivo de compressão e martelo no instante após colisão, foram aplicadas as Eq. 4 e 5 considerando as variáveis de entrada, conforme descrito na Tabela 9. Dos valores de entrada, é importante destacar o valor da massa m_a que representa a massa do dispositivo de compressão “Guia móvel”, conforme foi representado na Figura 23.

Tabela 9: Estimativa da velocidade do martelo e do dispositivo de compressão considerando dois eventos distintos.

		Grupo A	Grupo B
Variáveis de saída	$v_a [m/s]$	11,9	9,2
	$v_b [m/s]$	9,2	7,4
Variáveis de Entrada	<i>Coefficiente de restituição (R)</i>	0,2	0,2
	$m_a [kg]$	23,6 *	23,6 *
	$m_b [kg]$	63,2	149,2
	$u_a [m/s]$	0,0	0,0
	$u_b [m/s]$	13,7	8,9
	<i>Altura de queda do martelo [m]</i>	9,5	4,0

	Grupo A	Grupo B
Energia Potencial [J] (Partida: altura máxima preestabelecida - Martelo em queda)	5889,9	5854,6
Energia Cinética [J] (No instante seguinte ao "1º Evento" - Dispositivo de compressão)	1679,0	994,2
Energia Cinética [J] (No instante seguinte ao "1º Evento" - Martelo em queda)	2673,5	4092,8

Fonte: Pesquisa direta (2022).

Na Figura 30 foram representados dois instantes nos quais ocorreram os eventos de colisão do martelo sobre o dispositivo de compressão, visto que, a velocidade calculada do martelo no instante anterior a primeira colisão foi de 13,7 m/s (Grupo A) e de 8,9 m/s (Grupo B). Todavia, a velocidade do dispositivo de compressão para o mesmo instante foi de 0 m/s (Grupo A e B), ou seja, estava em repouso. Porém, no instante posterior a primeira colisão (1º Evento) a velocidade calculada do martelo foi de 9,2 m/s (Grupo A) e de 7,4 m/s (Grupo B). Já a velocidade calculada do dispositivo de compressão foi de 11,9 m/s (Grupo A) e de 9,2 m/s (Grupo B). Esse resultado sugere que, quanto menor a massa do martelo maior será sua desaceleração, no entanto, quanto maior sua massa menor será sua desaceleração no instante após a colisão (1º Evento). A energia cinética do dispositivo de compressão foi maior (1º

Evento) no Grupo A, porém, a energia cinética do martelo foi menor (1º Evento) quando comparado com o Grupo B. Esse resultado sugere que o martelo na condição B de colisão (Tabela 5) teve maior energia cinética no 2º Evento.

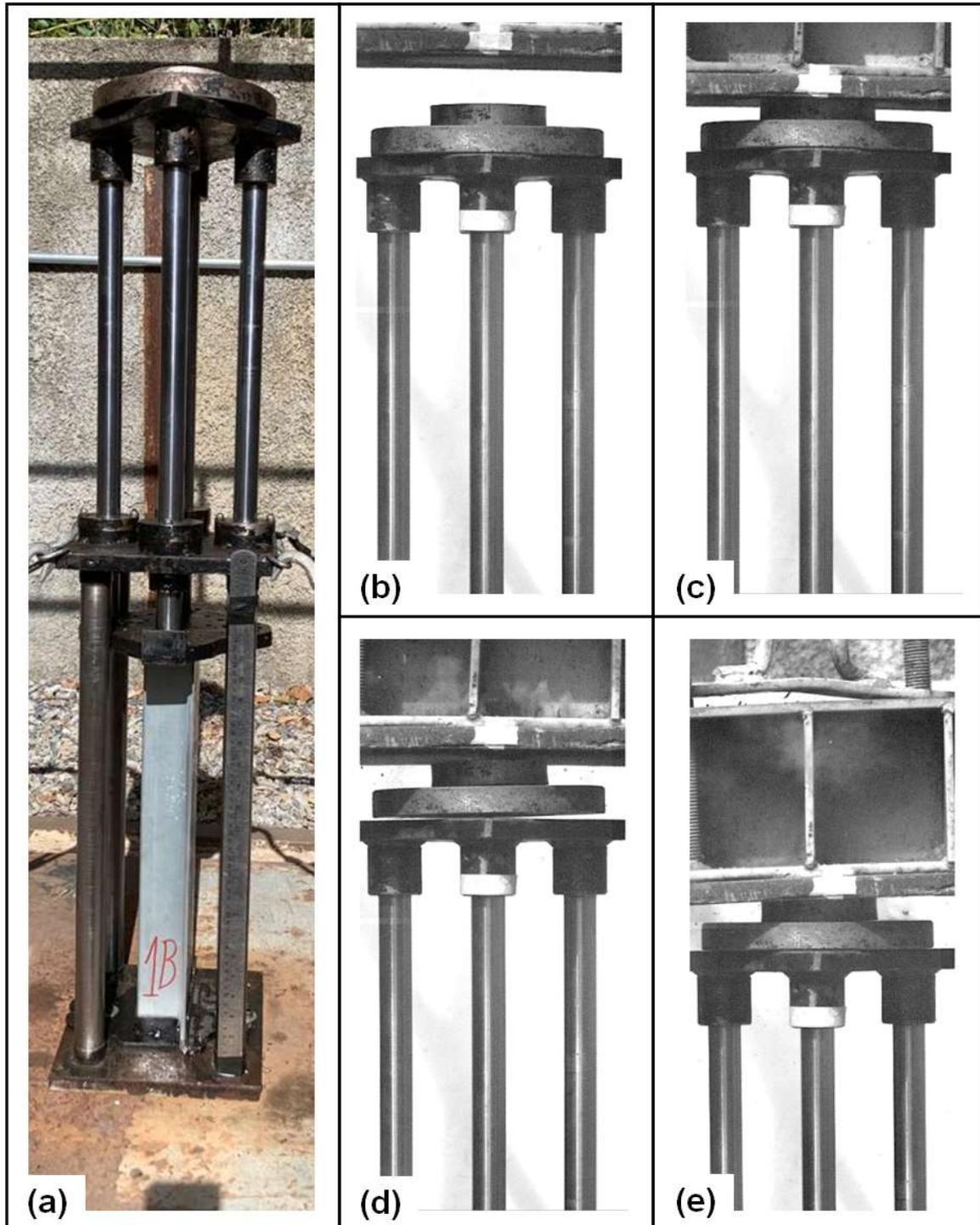


Figura 30 – Progressão do ensaio de colisão: (a) dispositivo de compressão, (b) martelo de colisão momentos antes da colisão, (c) martelo de colisão no instante da colisão (1º Evento), (d) Após colisão o martelo perde contato com o dispositivo de compressão e (e) martelo de colisão no instante do segundo contato de colisão (2º Evento).

Fonte: Pesquisa direta (2022).

Utilizando-se os recursos da câmera de alta velocidade foi realizado o estudo da desaceleração acerca da deformação da longarina. Para tal, as curvas de deslocamento, velocidade e aceleração em função do tempo foram obtidas por meio do software Phantom Camera Control (PCC), conforme já descrito.

Na Figura 31 estão representadas as curvas médias de deslocamento, velocidade e aceleração dos grupos de longarinas (Condição de colisão A e B).

Pode-se perceber na curva de deslocamento, na Figura 31, do instante zero até aproximadamente 0,028 segundos, que as longarinas do Grupo A se deformaram mais que as longarinas do Grupo B. Isso devido ao fato de ter uma diferença entre as energias cinéticas dos dispositivos de compressão considerando as condições de colisão A e B, visto que, a energia cinética no instante após a primeira colisão foi de 1679,0 J e 994,2 J, respectivamente (Tabela 9).

Observa-se na Figura 31 (no gráfico de velocidade em função do tempo) que os resultados de velocidade do dispositivo de compressão, obtidos pelo software da câmera, são semelhantes as velocidades calculadas (1º Evento), sendo: 10,8 m/s (Grupo A) e 9,2 m/s (Grupo B). Ainda no gráfico de velocidade em função do tempo, na Figura 31, têm demarcados dois pontos (linhas tracejadas com setas), estes correspondem ao instante em que o martelo colide pela segunda vez sobre o dispositivo de compressão (2º Evento). Neste instante observou-se que a velocidade do dispositivo de compressão foi maior no Grupo B (condição de colisão B) e com isso a energia cinética também foi maior, então, houve uma maior deformação das longarinas do Grupo B, quando comparadas ao Grupo A.

Apesar da velocidade do dispositivo de compressão do Grupo A ter aumentado, significativamente, após a segunda colisão do martelo sobre o dispositivo, a energia cinética do martelo foi menor (Tabela 9), isso resultou em menor compressão da longarina quando comparada as longarinas do Grupo B.

Quanto a curva de aceleração, Figura 31, observa-se que as longarinas do grupo A tiveram uma desaceleração maior que as longarinas do grupo B, onde a linha azul (Grupo A) ultrapassa da demarcação de 3.500 m/s e num dado momento posterior é inferior a -1.100m/s. Com isso infere-se que a desaceleração das longarinas do Grupo A foram maiores que as do Grupo B.

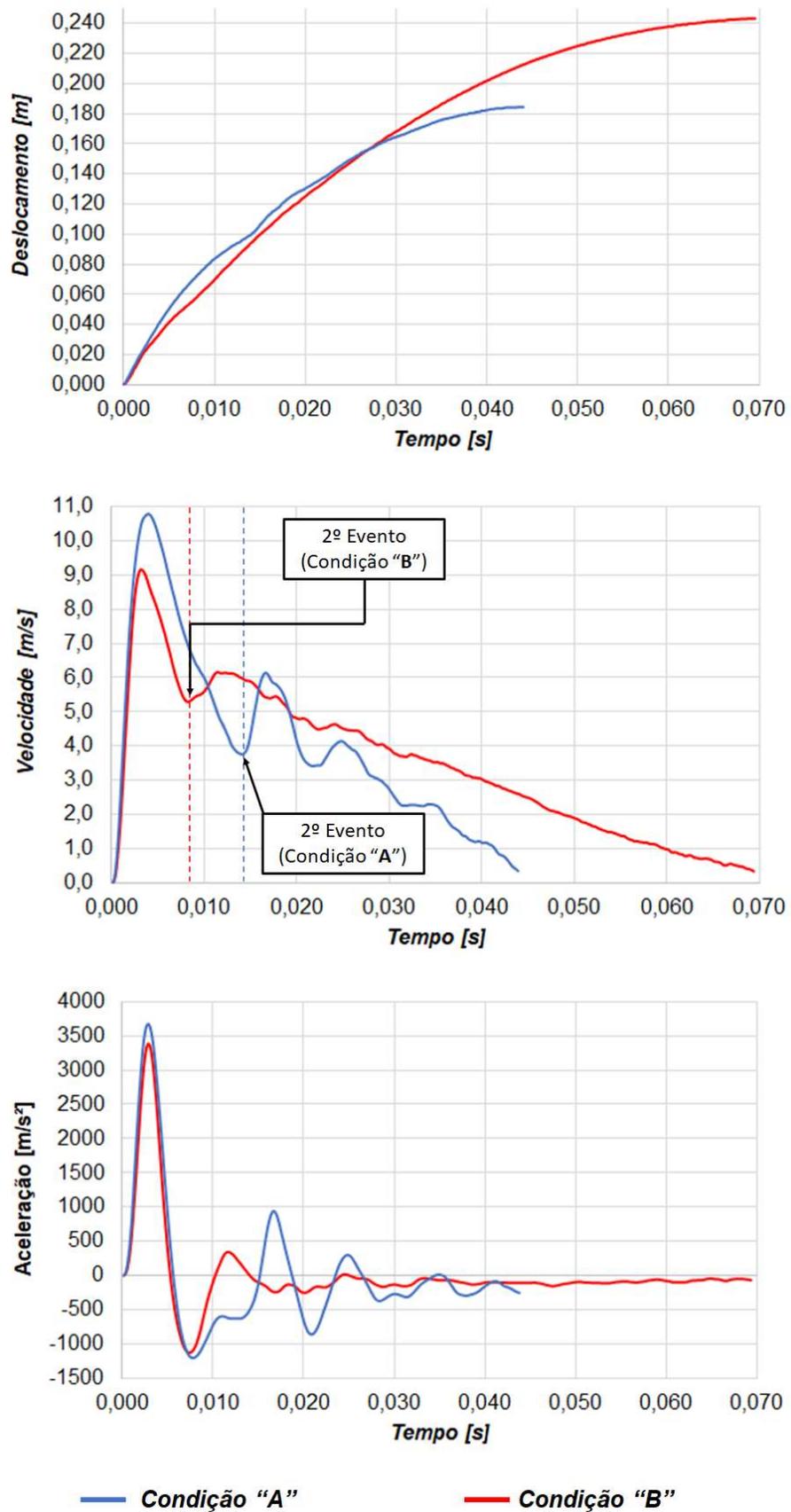


Figura 31 – Curvas de deslocamento, velocidade e aceleração do dispositivo de compressão.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

A fim de simplificar e exemplificar o entendimento pode-se fazer uma analogia dos testes de colisão realizados nesse trabalho com a deformação (amassamento) de uma lata de refrigerante de alumínio. Então, deve-se imaginar uma lata de refrigerante de alumínio, quando se aplica um esforço de compressão, a força inicial para amassá-la é alta quando comparado com o esforço posterior a “primeira dobra”. Logo, o comportamento cinético da longarina é semelhante ao da lata de alumínio. Nessa analogia, a primeira colisão (1º Evento) é caracterizada pelo pico de força, posteriormente a esse evento, os esforços de compressão diminuem. Peroni et al. (2008) em seus estudos, também, observaram queda abrupta na força de deformação após as primeiras deformações da estrutura. Portanto, os resultados desse trabalho estão em conformidade com a literatura.

Os resultados sugerem que a massa e a velocidade influenciam na deformação das longarinas, dado que as longarinas do Grupo A, submetidas a uma massa menor e velocidade maior, (Tabela 5), tiveram menor compressão e maior desaceleração (Figura 31). Já as longarinas do Grupo B, submetidas a massa maior e a uma velocidade menor, (Tabela 5), tiveram maior compressão e menor desaceleração (Figura 31). Ou seja, os resultados sugerem que, se um veículo está carregado, a compressão da longarina é maior e a sua desaceleração durante uma colisão é menor. Se o veículo está descarregado, a compressão das longarinas é menor e a sua desaceleração é maior.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

A revisão da base teórica sobre soldagem a ponto por resistência, colisão, energia cinética, energia potencial e energia parcialmente inelástica, deformação de estruturas tubulares e análise t-Student foi fundamental execução desse trabalho. As informações investigadas contribuíram para os resultados e discussões apresentados neste trabalho.

Os pontos de solda produzidos com as condições de soldagem selecionadas: 9 kA de corrente de soldagem, 20 ciclos (0,333s) de tempo de passagem de corrente e 2,6 kN de força aplicada entre os eletrodos da máquina. Foram considerados de boa qualidade, uma vez que atenderam a alguns requisitos de qualidade estabelecidos na norma AWS D8.9M. Os pontos de solda foram aprovados nos testes de arrancamento e dimensões geométricas.

Uma vez definida a metodologia do trabalho foi possível realizar produzir réplicas de corpos de prova e ensaios de colisão. Os testes foram analisados e discutidos com a literatura.

Neste estudo, a energia de colisão e a condição de soldagem foram as mesmas entre os grupos de amostras (A e B). Porém, apesar de terem sido submetidas a mesma energia de colisão as velocidades de colisão (Grupo A = 13,8 m/s e Grupo B = 8,9 m/s) e a massa do martelo (Grupo A = 63,2 kg e Grupo B = 149,2 kg) foram distintas entre os grupos de amostras. Os resultados sugerem que a velocidade e a massa têm influência na deformação das longarinas. Uma vez que as longarinas submetidas a uma menor velocidade de colisão, porém com a massa do martelo maior, apresentaram maior compressão. O Grupo A de longarinas apresentaram compressão média de 185,2 mm, enquanto que, o Grupo B apresentou compressão média de 243,8 mm.

Se um veículo está carregado, de acordo com os resultados dos testes, a compressão da longarina é maior e a sua desaceleração durante uma colisão é menor. Se o veículo está descarregado, a compressão das longarinas é menor e a sua desaceleração durante uma colisão é maior.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Com o desenvolvimento desse estudo surgiram algumas propostas para a continuidade do trabalho, sendo elas:

* Avaliar a influência da velocidade de colisão sobre longarinas, variando a energia potencial, a fim de caracterizar os modos de deformação e a desaceleração.

* Avaliar a influência da massa de colisão sobre longarinas, variando a energia potencial, a fim de caracterizar os modos de deformação e a desaceleração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS D8.9M, Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials. 3rd Edition, 2012.

AZEVEDO, Paulo Roberto Medeiros de. Introdução a estatística. Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/21298/2/Introduc%CC%A7a%CC%83o%20a%CC%80%20Estati%CC%81stica%20%28digital%29.pdf>. Acesso em: 26/ago/2022.

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.

CALLISTER JR, William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Livros Técnicos e Científicos, 2008.

COLOSIMO, Enrico A. Princípios da Bioestatística: Análise de Variância. Disponível em: <http://www.est.ufmg.br/~enricoc/pdf/medicina/anova.pdf>. Acesso em 18 out. 2022.

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. Universidade Estadual de Campinas, Departamento de engenharia de materiais, Tese de Doutorado, 1995.

DE SOUSA, Diogo Antônio. Influência da resistência mecânica de pontos de solda sobre o desempenho de estruturas similares a longarinas veiculares submetidas a teste de colisão. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

FILHO, Damiao Pedro Meira. KAMASSURY; Jorge Kysnney Santos; MEIRA, Rose Caldas de Souza. Uma discussão sobre o coeficiente de restituição. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/315984787_Uma_discussao_sobre_o_coeficiente_de_restituicao. Acesso em 07 out. 2022.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. Métodos de Pesquisa. Universidade Aberta do Brasil - UAB/UFRGS - Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos da Física: Mecânica. 10ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

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

HIBBELER, Russel C. Dinâmica: Mecânica para Engenharia. 12ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

HIBBELER, Russel C. Resistência dos Materiais. 5ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HIBBELER, Russel C. Estática: Mecânica para Engenharia. 10ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

HOEL, P.G. (1968). Estatística Elementar, 2a ed. Rio de Janeiro, Fundo de Cultura.

LOPES, Aline Cristina Berbet; LEINIOSKI, Amanda da Cruz; CECCON, Larissa. Testes t para comparação de médias de dois grupos independentes. Disponível em: bioestatistica_testes_t_para_comparacao_de_medias_de_dois. Acesso em 10/set/2022.

LOPES, Dr. Luis Felipe Dias. Apostila estatística. Disponível em: <https://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/LIVROS/LIVROS/Luis%20Felipe%20Dias%20Lopes.pdf>. Acesso em 29/ago/2022.

MAIA, Ciro de Faria. Avaliação da absorção de energia durante colisão de uma longarina origami soldada pelos processos RSW e GMAW. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

PASSOS, Júlio César. Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/jxtswrDG3qGSLpjmjsCPwzs/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 25/ago/2022.

PERONI, L., AVALLE, M., BELINGARDI, G., Comparison of the energy absorption capability of crash boxes assembled by spot-weld and continuous joining techniques. International Journal of Impact Engineering, Politecnico di Torino, Dipartimento di Meccanica, Corso Duca degli Abruzzi 24, Torino, Italy, 2008.

PIERI, Eliseu Gabriel de; FILHO, José de Pinhos Alves; ALMEIDA, Judite Fernandes de Almeida. Eletricidade. 2ª ed. Rio de Janeiro: Fename, 1981.

RESNICK, Robert; HALLIDAY, David; KRANE, Kenneth S. Física 1. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.

TEIXEIRA, Mariane Mendes: Colisões elásticas e inelásticas. Mundo Educação, s.d. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/colisoes-elasticas-inelasticas.htm>. Acesso em 07 out. 2022.

THEIL, H. (1971). Principles of Econometrics. New York, John Wiley.

TIPLER, Paul A; MOSCA, Gene. Física: para Cientistas e Engenheiros. Disponível em: <file:///C:/Users/Usuario/Desktop/Tipler%20F%C3%ADsica%201%20Vol%201OCR.pdf>. Acesso em 07 out. 2022.

VERGARA, S. C., Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração. 12. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

ZHANG, H., SENKARA, J., Resistance welding: Fundamentals and Applications. Ed. Taylor & Francis, 2012, p. 19-57.

ANEXO

Seguem abaixo, gráficos comparativos, entre os ensaios de cada Grupo. Grupo A (Figura 35, Figura 36 e Figura 37) e Grupo B (Figura 38, Figura 39 e Figura 40) respectivamente.

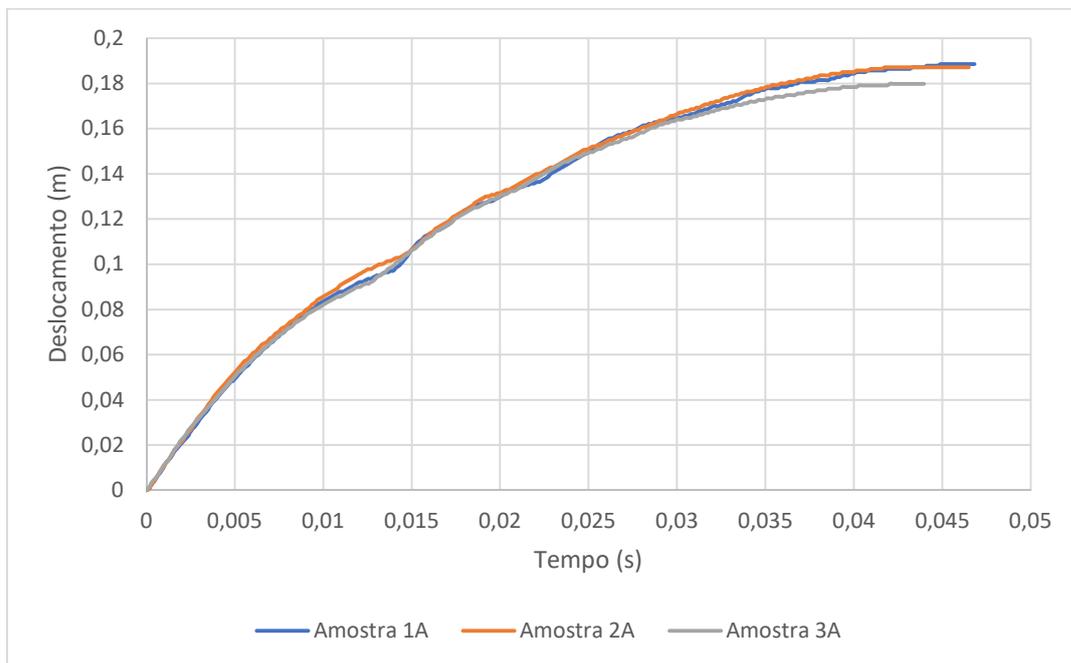


Figura: 33: Gráfico comparativo de Deslocamento x Tempo dos ensaios das longarinas do Grupo A.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

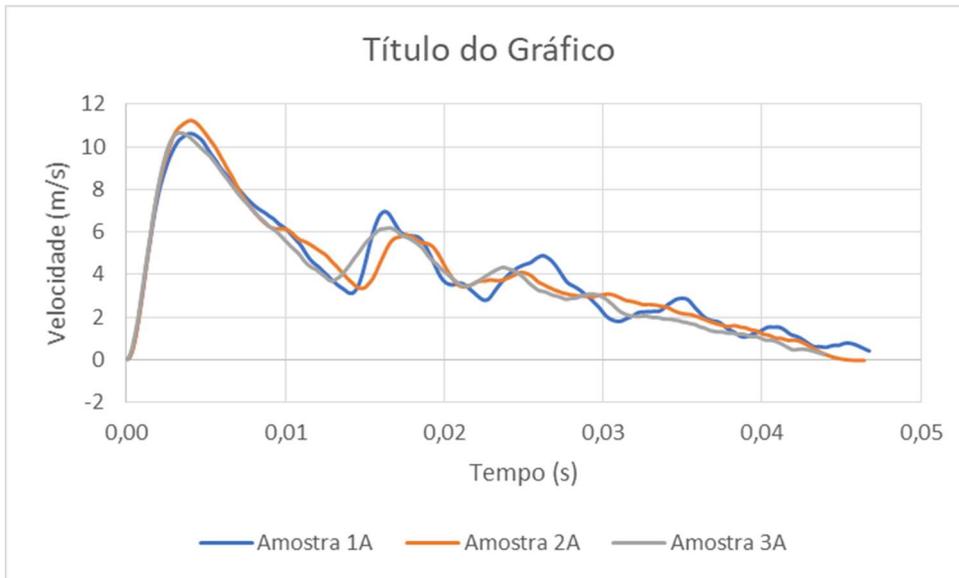


Figura: 34: Gráfico comparativo de Velocidade x Tempo dos ensaios das longarinas do Grupo A. Fonte: Pesquisa direta (2022).

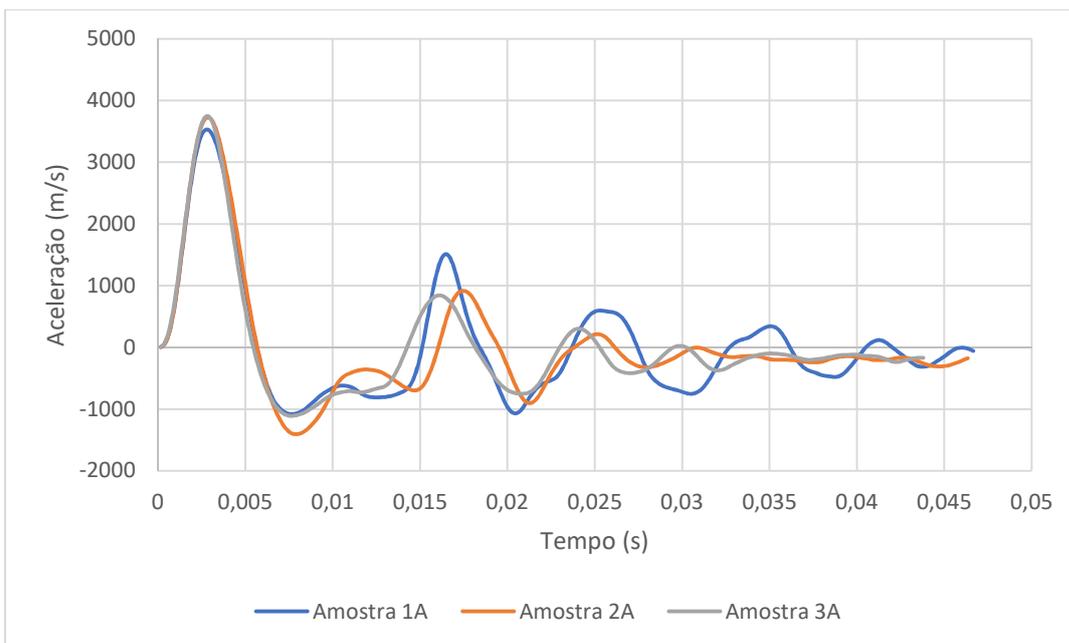


Figura: 35: Gráfico comparativo de Aceleração x Tempo dos ensaios das longarinas do Grupo A. Fonte: Pesquisa direta (2022).

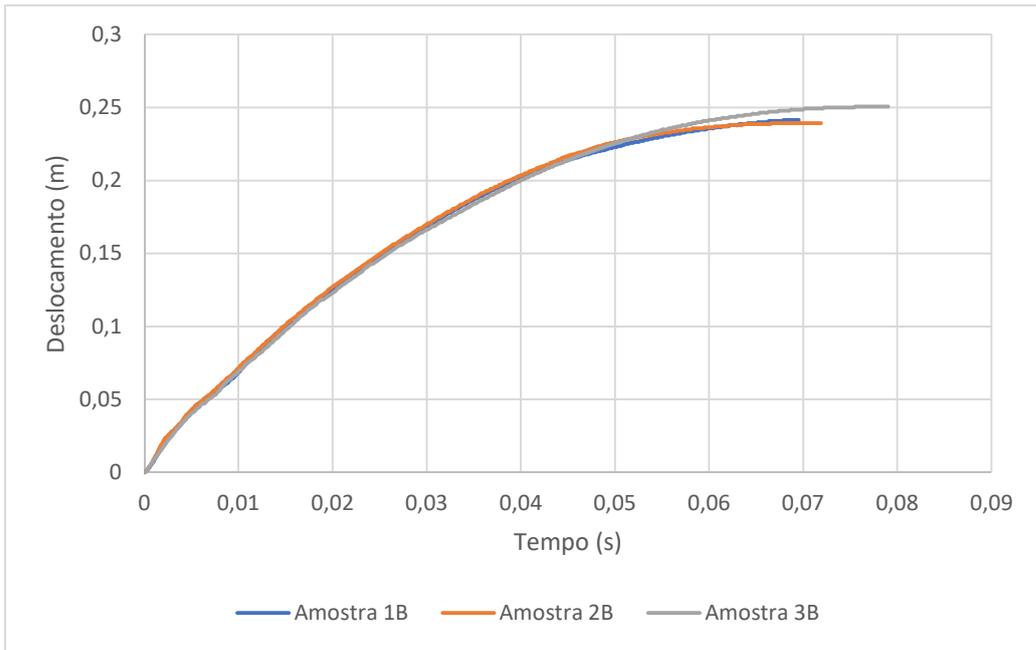


Figura: 36 Gráfico comparativo de Deslocamento x Tempo dos ensaios das longarinas do Grupo B. Fonte: Pesquisa direta (2022).

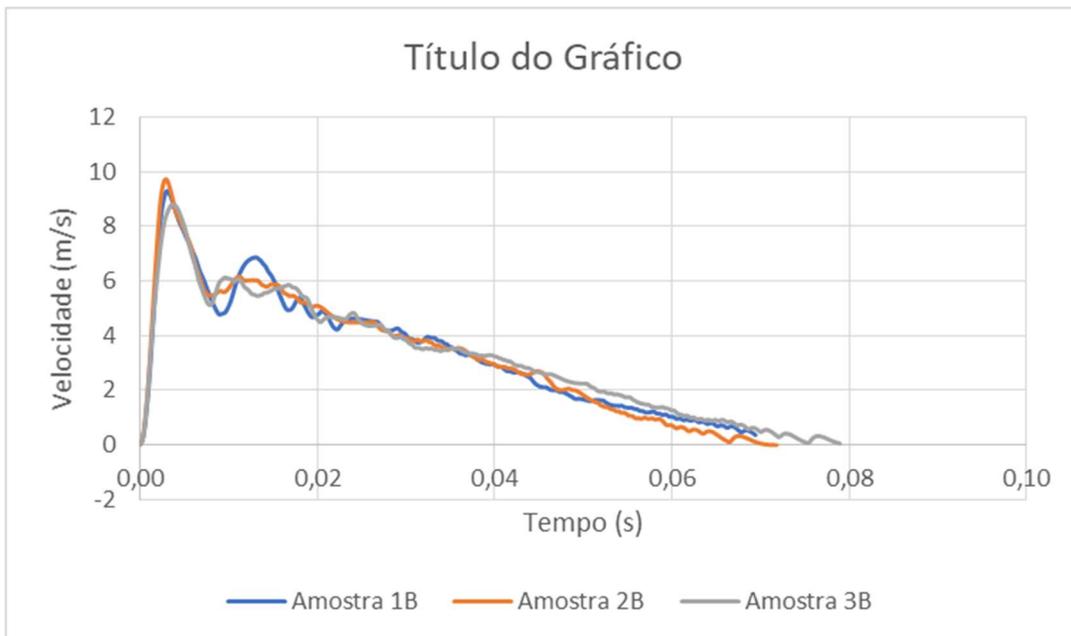


Figura: 37: Gráfico comparativo de Velocidade x Tempo dos ensaios das longarinas do Grupo B. Fonte: Pesquisa direta (2022).

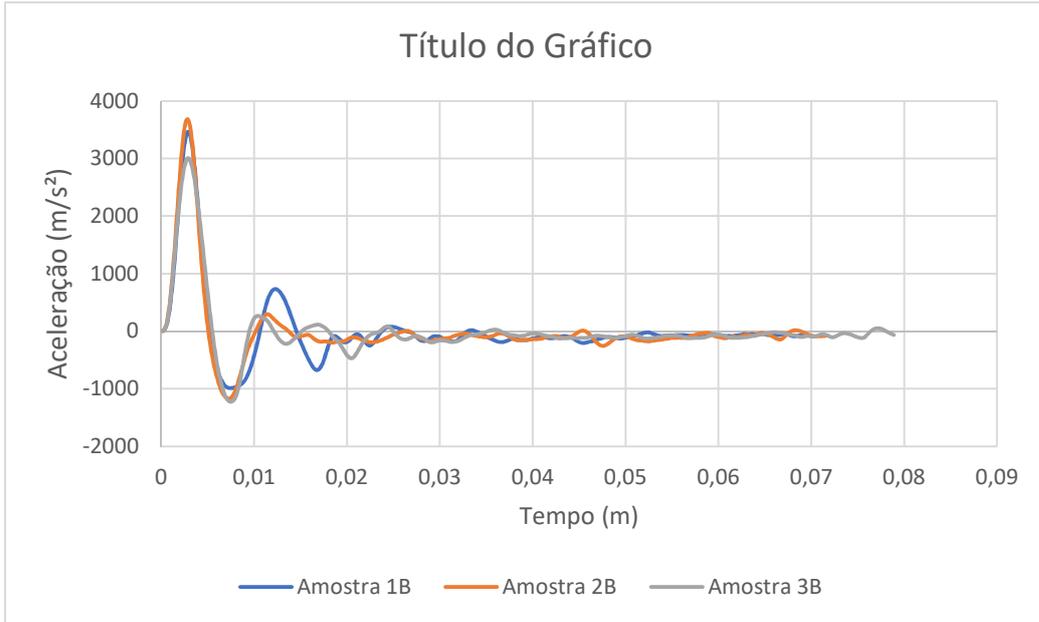


Figura: 38: Gráfico comparativo de Aceleração x Tempo dos ensaios das longarinas do Grupo B.
Fonte: Pesquisa direta (2022).