



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



**Álefe Januário de Abreu**

**Construção de um dispositivo para realização de ensaio tração  
dinâmico: análise do comportamento**

**OURO PRETO - MG**  
**2023**

**Álefe Januário de Abreu**  
**Alefe.abreu@aluno.ufop.edu.br**

**Construção de um dispositivo para realização de ensaio tração  
dinâmico: análise do comportamento**

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

**Professor orientador:** DSc. Diogo Antônio de Sousa

**OURO PRETO – MG**  
**2023**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Álefe Januário de Abreu

### Construção de um dispositivo para realização de ensaio de tração dinâmico: análise do comportamento

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 março de 2023

#### Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

DSc. Cláudio Márcio Santana (Universidade Federal de Ouro Preto)

DSc. Washington Luis Vieira da Siva (Universidade Federal de Ouro Preto)

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/03/2023, às 23:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Marcio Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/03/2023, às 09:50, 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 **0495098** e o código CRC **AF6CB2D6**.

Aos meus pais dedico mais esta etapa  
vencida, pelos ensinamentos e suporte.

## **AGRADECIMENTO**

Aos meus pais por sempre me incentivarem a correr atrás dos meus sonhos, e me formaram antes de tudo uma grande pessoa.

Ao meu orientador Diogo Antônio de Sousa, pelo incentivo, orientação e paciência neste trabalho.

*“Tudo aquilo que passei é reflexo do que sou hoje, nem sempre é fácil, mas é na dificuldade que vencem os lutadores, nada acontece por acaso, a sorte só vem para quem procura”.*

## RESUMO

Nas aplicações de engenharia há um número significativo de equipamentos que são construídos e/ou submetidos a altas taxas de deformação, isso significa que estes performam a velocidades consideravelmente superiores a velocidade admitida em ensaios de tração quase estático, portanto, tem-se a necessidade de conhecer as propriedades dos materiais quando submetidos a esforços dinâmicos. Este trabalho propõe a construção de um dispositivo para realização de ensaios de tração dinâmicos a fim de caracterizar as propriedades mecânica dos materiais considerando diferentes taxas de deformação. O trabalho se baseia no método desenvolvido por Hopkinson, porém, o acionamento do dispositivo de tração foi por meio da colisão de uma massa em queda livre que, conseqüentemente, promoveu a tração dinâmica do corpo de prova padrão (norma ISO6892). Para o desenvolvimento do dispositivo utilizou se do recurso da engenharia reversa, esse método facilitou o dimensionamento e seleção dos componentes para construção. Após construção do dispositivo foram realizados os ensaios de tração dinâmico sobre os corpos de prova produzidos com o aço SAE 1006. A energia potencial dimensionada para colisão foi de 300 J. Para análise de resistência do dispositivo e corpo de prova utilizou-se uma câmera de alta velocidade que registrou 4500 quadro por segundo, o que permitiu observar e quantificar as deformações, tanto do dispositivo quanto do corpo de prova. Os resultados sugerem que o dispositivo apresentou baixa rigidez localizada ocasionada por folga, no entanto, cumpriu o requisito referente a tração dinâmica, visto que, a taxa de deformação resultante do corpo de prova foi de, aproximadamente,  $650 \text{ s}^{-1}$ . Contudo, é importante ressaltar que o dispositivo produziu réplicas e suportou às solicitações impostas (colisão) e promoveu a ruptura de todos os corpos de prova ensaiados.

**Palavras-chave:** Ensaio de tração dinâmico. Taxa de deformação. Rigidez. Hopkinson.

## ABSTRACT

*In engineering applications there is a significant number of equipment that is built and/or visible at high rates of deformation, this means that they perform at speeds considerably higher than the speed admitted in quasi-static traction tests, therefore, there is a need to know the properties of materials when manifesting animated emotions. This work proposes the construction of a device to perform dynamic dynamic tests in order to characterize the mechanical properties of materials considering different strain rates. The work is based on the method developed by Hopkinson, however, the activation of the traction device was through the collision of a mass in free fall that, consequently, promoted the dynamic traction of the standard specimen (ISO6892 standard). For the development of the device used if the resource of reverse engineering, this method facilitates the dimensioning and selection of components for construction. After the construction of the device, dynamic emotion tests were carried out on the test specimens produced with SAE 1006 steel. The potential energy dimensioned for collision was 300 J. For analysis of the resistance of the device and the test specimen, a camera was used. high speed that recorded 4500 frames per second, which allowed observing and quantifying the deformations of both the device and the specimen. The results suggest that the device presented low localized protection caused by play, however, it meets the requirement regarding dynamic traction, since the resulting deformation rate of the specimen was approximately  $650 \text{ s}^{-1}$ . However, it is important to emphasize that the device produced replicas and withstood the imposed requests (collision) and promoted the rupture of all tested specimens.*

**Key-words:** *Dynamic tensile test. Strain rate. Stiffness. Hopkinson.*

**LISTA DE SIMBOLOS**

$\varepsilon$	Taxa de deformação
$v$	Velocidade
$l$	Deslocamento
$m$	Metro
$s$	Segundo
Si	Silício
Mn	Manganês
L	Comprimento inicial
d	Diâmetro do corpo de prova
P <sub>cr</sub>	Pressão crítica
P	Pressão
E	Modulo de elasticidade
L <sub>e</sub>	Comprimento efetivo
I	Momento de inércia
K	Fator de resistência
t	Tempo
F	Força
$a$	Aceleração
M	Massa

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Dispositivo montado em estudos de Kaiser (1998) .....	7
Figura 2 - Desenho demonstrativo do equipamento .....	7
Figura 3 - Demonstração de dimensões do corpo de prova .....	8
Figura 4 – Flambagem .....	11
Figura 5 - Coeficiente de rigidez .....	12
Figura 6 - Metodologia de estudo .....	16
Figura 7 - Torre de ensaio de colisão .....	17
Figura 8 - Dispositivo em CAD .....	18
Figura 9 - Câmera de alta velocidade .....	19
Figura 10 - Dimensões do corpo de prova .....	20
Figura 11 - Montagem do sistema .....	23
Figura 12 - Encontro do rolamento linear .....	25
Figura 13 - Limitadores de queda .....	26
Figura 14 - Base improvisada .....	27
Figura 15 - Gancho e esticador .....	28
Figura 16 - Disco inferior e superior .....	29
Figura 17 - Angulação da garra .....	30
Figura 18 - Parafuso trocado .....	31
Figura 19 - Indicador de direção das forças .....	32
Figura 20 - Angulação pós impacto .....	33
Figura 21 - Cordões de solda .....	36
Figura 22 - Corpo de prova durante ensaio .....	36
Figura 22 - Corpo de prova pós ensaio .....	36



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Composição química e propriedades mecânicas do aço SAE 1006 .....	20
Tabela 2 - Variáveis e indicadores .....	21

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral .....	4
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho .....	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1	Método de Hopkinson: ensaio tração dinâmico .....	6
2.1.1	Equipamento de Hopkinson .....	7
2.1.1.1	Corpo de prova.....	8
2.2	Propagação de ondas de tensão em sólidos .....	9
2.3	Projetos Mecânicos.....	10
2.3.1	Metodologia de projeto.....	10
2.4	Flambagem de coluna.....	11
2.4.1	Comprimento efetivo.....	12
2.5	Conservação de movimento.....	12
2.5.1	Momento Linear .....	12
2.5.2	Colisão.....	13
2.6	Engenharia Reversa .....	13
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>15</b>
3.1	Tipo de pesquisa .....	15
3.2	Materiais e métodos.....	15
3.2.1	Torre de ensaio de colisão .....	16
3.2.2	Dispositivo de ensaio de tração .....	17
3.2.3	Câmera de alta velocidade.....	19
3.2.4	Corpo de prova .....	19
3.2.5	Ensaio de tração.....	20
3.3	Variáveis e indicadores.....	20
3.4	Coleta de dados.....	21

3.5	Tabulação de dados .....	22
3.6	Considerações finais .....	22
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>23</b>
4.1	Energia da colisão e resistência mecânica do corpo de prova .....	23
4.2	Fixação do Dispositivo .....	24
4.2.1	Limitador de queda .....	24
4.2.2	Base para alocação do dispositivo .....	26
4.2.3	Sistema de fixação .....	27
4.2.4	Discos complementares .....	29
4.3	Solução de projeto e elementos mecânicos .....	30
4.3.1	Garras .....	30
4.3.2	Barras .....	32
4.3.3	Rolamento Linear .....	34
4.4	Ajuste e tolerância .....	34
4.5	Análise dos corpos de prova .....	35
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>388</b>
5.1	Conclusão .....	38
5.2	Recomendações para trabalhos futuros .....	39
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>40</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

Na engenharia mecânica, conhecer a resposta de um determinado material submetido a esforços mecânicos, seja numa aplicação quase estática ou dinâmica, se faz necessário para que este possa ser utilizado com segurança numa prática de engenharia (HIBBELER, 2005). Para isso utiliza-se o ensaio de tração para caracterização dos materiais quanto as suas propriedades mecânicas, tais como: limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade, coeficiente de encruamento, coeficiente de resistência e parâmetros relativos à ductilidade (estricção e alongamento) (GARCIA, 2012; HIBBELER, 2005).

Dieter (1981) relata que o ensaio de tração é realizado por uma máquina universal de ensaios mecânicos, a qual consiste na aplicação de uma força uniaxial trativa e velocidade constante até o rompimento do corpo sólido na direção do esforço. O mesmo autor destaca que por meio de uma célula de carga e um extensômetro obtém-se, respectivamente, força e alongamento, conseqüentemente, a curva tensão *versus* deformação.

Garcia (2012) afirma que o ensaio de tração é amplamente utilizado na indústria de transformação com aplicação em desenvolvimentos de projetos de componentes mecânicos e que por meio da padronização, pode-se relacionar o material com o produto em desenvolvimento, o que auxilia projetistas em tomadas de decisão.

O ensaio de tração em condição quase estático realizado a velocidade muito baixa deve ser realizado seguindo alguma norma técnica, por exemplo, a ISO6892 que padroniza e garante que as informações obtidas possam ser correlacionadas, visto que, os resultados são influenciados pela geometria do corpo de prova, temperatura e velocidade de aplicação da força (GARCIA, 2012). Dentre essas variáveis que influenciam a resposta do material a uma determinada sollicitação mecânica, a temperatura e a velocidade de deformação (taxa de deformação) são significativas (DIETER, 1981).

Wang *et al.* (2013) estudou o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas do aço estrutural Q460 de liga de alta resistência, geralmente esse aço diminui sua resistência e sua ductilidade com o aumento da temperatura em intervalos de 20 a 100°C e de 500 a 700°C,

porém, em intervalos de temperatura de 200 a 450°C sua resistência mecânica aumenta em relação a temperatura de 20°C.

Ekrami (2005) em seus estudos, também, apresentou resultados os quais um aço Dual Phase com 0,25 de fração volumétrica de martensita em sua estrutura aumentou sua resistência mecânica com o aumento da temperatura no intervalo de 25 a 450°C, após esse intervalo a resistência diminui. O autor sugere então, que a temperatura é uma variável que influencia significativamente a propriedade mecânica do material.

Dieter (1961) afirma que em componentes mecânicos submetidos a solicitação dinâmica à temperatura ambiente, foco desse trabalho, a velocidade de deformação tem influência significativa na resistência mecânica, considerando que a taxa de deformação é dada por  $\dot{\epsilon} = v/l [s^{-1}]$ , sendo que  $v$  é a velocidade de deformação [ $m/s$ ] e  $l$  é o deslocamento [ $m$ ]. Geralmente, para os aços de baixo carbono, quanto maior a taxa de deformação maior será sua resistência mecânica (SCHAEFFER, 2004).

Schaeffer (2004) concluir então que a velocidade de deformação é relevante, e modifica as propriedades de um material, que por este motivo, deve ser submetido a testes em alta velocidade para melhor caracterização, por exemplo o teste de tração dinâmico.

John Hopkinson foi um dos primeiros pesquisadores a levar a velocidade de deformação em consideração, e foi a partir de seus estudos, que Kolsky, desenvolveu um dispositivo para ensaiar corpos de prova de modo dinâmico e estudar as variáveis envolvidas neste processo (KAISER, 1998). O autor ainda afirma que os resultados obtidos foram expressivos e relevantes para o estudo e desenvolvimento do ensaio de tração dinâmico, e que o teste de Hopkinson é o método mais utilizado para determinar as propriedades mecânicas de materiais submetidos a alta taxa de deformação.

Wei *et al.* (2007) em seus trabalhos estudaram a influência da taxa de deformação no comportamento mecânico de dois aços TRIP Si-Mn utilizado na indústria automotiva, e para ambas as variações de composição química dos aços TRIP a resposta em resistência aumentou com o aumento da taxa de deformação, porém, o alongamento do material diminuiu com o aumento da taxa de deformação.

Visto que, esses aços serão utilizados na produção de peças que serão solicitadas em eventos de colisão veicular, essa característica dos materiais de aumentar a resistência mecânica com o aumento da taxa de deformação é excelente, pois nestas condições deseja-se que o material absorva o máximo de energia (WEI *et al.*, 2007). No entanto, o mesmo autor afirma

que em uma situação de conformação mecânica, a exemplo do processo de estampagem, deseje-se que o material tenha menor resistência mecânica e maior alongamento com o aumento da taxa de deformação, porém, no geral o aço e outros materiais metálicos não se comportam dessa forma, o comum é aumentar a resistência e diminuir o alongamento.

Portanto, um dos objetivos e desafios no desenvolvimento de novos materiais é aumentar o alongamento, por exemplo, nos estudos de Tang *et al.* (2021) referentes a influência da taxa de deformação na resposta mecânica de um aço de alta resistência mecânica, material em desenvolvimento, observou-se que para a faixa de 50 a 1000  $s^{-1}$  de taxa de deformação, a resistência mecânica aumenta, porém, o alongamento não diminui, se comportou semelhante a condição de 0,1  $s^{-1}$  de taxa de deformação.

Ashby (2012) afirma que selecionar materiais é encontrar o ponto comum que combine os requisitos do projeto e as propriedades do material a ser usado, e isso pode e deve estar atrelado também ao custo do projeto. O mesmo autor comenta que máquinas, possuem peças com propriedades mecânicas diversas, variando, por exemplo, dureza e ductibilidade, assim, em um mesmo equipamento, serão empregados diferentes materiais, em diferentes geometrias, logo, conhecer as propriedades do material base é fundamental para otimizar o projeto quanto ao seu desempenho e custo.

No desenvolvimento de um novo produto, o custo com ensaios destrutivos é elevado, e como solução para este problema surgem simuladores computacionais que permitem prever o comportamento do produto, reduzindo o número de testes destrutivos (ASHBY,2012). De acordo com o autor, uma simulação numérica computacional não pode ser realizada sem, por exemplo, as propriedades mecânicas dos materiais, pois só assim o *software* poderá executar o algoritmo de cálculo com respostas fidedignas a realidade de aplicação do produto em desenvolvimento.

Considerando uma peça que sofre esforços dinâmicos, propriedades mecânicas obtidas por meio de um ensaio de tração em condição quase estático não produzirão resultados condizentes com aplicações dinâmicas (ASHBY,2012). Dieter (1981) afirmou que a maioria dos equipamentos de conformação comerciais, performam a velocidades consideravelmente superiores a velocidade de um ensaio de tração padronizado, portanto, cria-se a necessidade de conhecer as propriedades dos materiais quando submetidos a esforços dinâmicos.

Visto a demanda pela caracterização de propriedades mecânicas dos materiais quando submetidos a esforços dinâmicos. Este trabalho propõe a construção de um dispositivo para

realização de ensaios de tração dinâmicos, uma adaptação do projeto de dispositivo de compressão dinâmica desenvolvido por Sousa (2018). Considerando o contexto supracitado, têm-se a seguinte pergunta problema:

### **Como construir um protótipo para realização de ensaio dinâmico de tração?**

#### **1.2 Justificativa**

Motivado pela necessidade que a indústria de desenvolvimento de produtos e projetos mecânicos possui de se conhecer como materiais reagem quando submetidos a esforços dinâmicos, este trabalho apresenta uma alternativa para a execução de um ensaio de tração dinâmico, testando um protótipo de dispositivo para execução do teste.

Posteriormente, o resultado deste trabalho proporcionará a realização de outros, a exemplo do estudo da instrumentação necessária para obtenção da curva tensão/deformação dos materiais ensaiados nesse dispositivo. Após essa etapa de desenvolvimento, o ensaio de tração dinâmico poderá ser inserido a um programa de extensão prestando serviços a empresas metalúrgicas (por exemplo) que desejarem caracterizar dinamicamente o comportamento de seus materiais quanto as suas propriedades mecânicas. Enfim, estas propriedades, poderão ser úteis em empresas de desenvolvimento de produtos e simulação de equipamentos, bem como empresas automobilísticas, balísticas ou de conformação mecânica.

#### **1.3 Objetivos**

##### **1.3.1 Geral**

Construir e avaliar o comportamento dinâmico e estrutural do protótipo de um dispositivo para a realização de ensaios de tração dinâmico por meio de colisão.

##### **1.3.2 Específicos**

- Realizar uma pesquisa bibliográfica acerca do ensaio de tração dinâmico;
- Construir o dispositivo com base no projeto predeterminado, utilizando recursos de engenharia;
- Avaliar o comportamento estrutural do dispositivo após testes práticos;
- Avaliar a viabilidade do ensaio considerando o dispositivo desenvolvido;
- Avaliar a influência do dispositivo na resposta de resistência mecânica dos corpos de prova.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O trabalho está dividido em 5 capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito do teste de tração dinâmico, e as variáveis físicas envolvidas. Também mostra a evolução do teste proposto ao longo das décadas.

O terceiro capítulo explicita a metodologia adotada para aplicação dos conceitos teóricos, bem como as variáveis que podem interferir nos resultados.

O quarto capítulo demonstra a realização prática do teste, explicita as variáveis encontradas e propõe melhorias para futuros projetos.

O quinto capítulo conclui o experimento, confirma teorias e objetivos do trabalho, e propõe melhorias para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Método de Hopkinson: ensaio tração dinâmico

O *Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)* é a técnica mais comumente utilizada para determinar propriedades de materiais a altas taxas de deformação (KAISER, 1998). Consiste em uma ferramenta de caracterização de propriedades mecânicas de materiais que se deformam em altas taxas de deformação ( $10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$ ) (CHEN, 2011).

A técnica é derivada das experiências das ondas de tensão em fios de aço concluídas por John Hopkinson em 1872, e foi evoluída por Bertram Hopkinson em 1905 (CHEN, 2011). Em 1872, John Hopkinson realizou experiência sobre a ruptura de um fio de ferro pelo impacto de um peso em queda. Seu filho, Bertram Hopkinson, em 1914, inventou uma barra de pressão para medir a pressão produzida por explosivos de alta velocidade ou impacto de balas em alta velocidade (GAMA, 2004; CHEN, 2011).

Em 1941, Dennison Bancroft expressou a velocidade das ondas longitudinais em barras cilíndricas para uma onda de comprimento de onda infinito, a razão de Poisson e a razão entre o diâmetro da barra e o comprimento de onda de interesse, o que posteriormente seria relevante para simulações computacionais (CHEN, 1998).

Em 1948, Davis discutiu a técnica, e estudou a deformação da barra proveniente da propagação da onda através de sua extensão, medindo eletricamente os movimentos axiais e radiais da barra carregada pela detonação, usando um circuito de condensadores, o que garantiu maior confiabilidade a técnica (CHEN, 2011).

Em 1949 Kolsky introduziu o modelo conhecido hoje, conseguindo extrair propriedades mecânicas sob condições dinâmicas (KAISER, 1998). O autor afirma que seu experimento foi similar ao de Davis, porém consiste em duas barras intercaladas pelo corpo de prova, que se colidem, e esse impacto dá origem a uma onda de tensão compressiva que se propaga pelo corpo de prova e pela barra de impacto. Kolsky mensurou a deformação do corpo de prova com condensadores, assim como Davis, e apresentou equações para dimensionar as propriedades mecânicas dos materiais, calculando ainda a deformação das barras de impacto (Kolsky, 1949). Em 1970 Hauser utilizou extensômetros na Barra de Pressão de Hopkinson para medir o deslocamento na superfície da barra (KAISER, 1998).

Atualmente, a partir dos estudos de Hopkinson, são criadas adaptações para realização de ensaio de tração usando o mesmo conceito (MIRONE *et al.*, 2017).

### 2.1.1 Equipamento de Hopkinson

Como descrito na seção 2.1, o equipamento de Hopkinson passou por melhorias ao longo do tempo, e no estudo realizado por Kaiser (1998), o dispositivo foi montado como ilustra a figura 1.

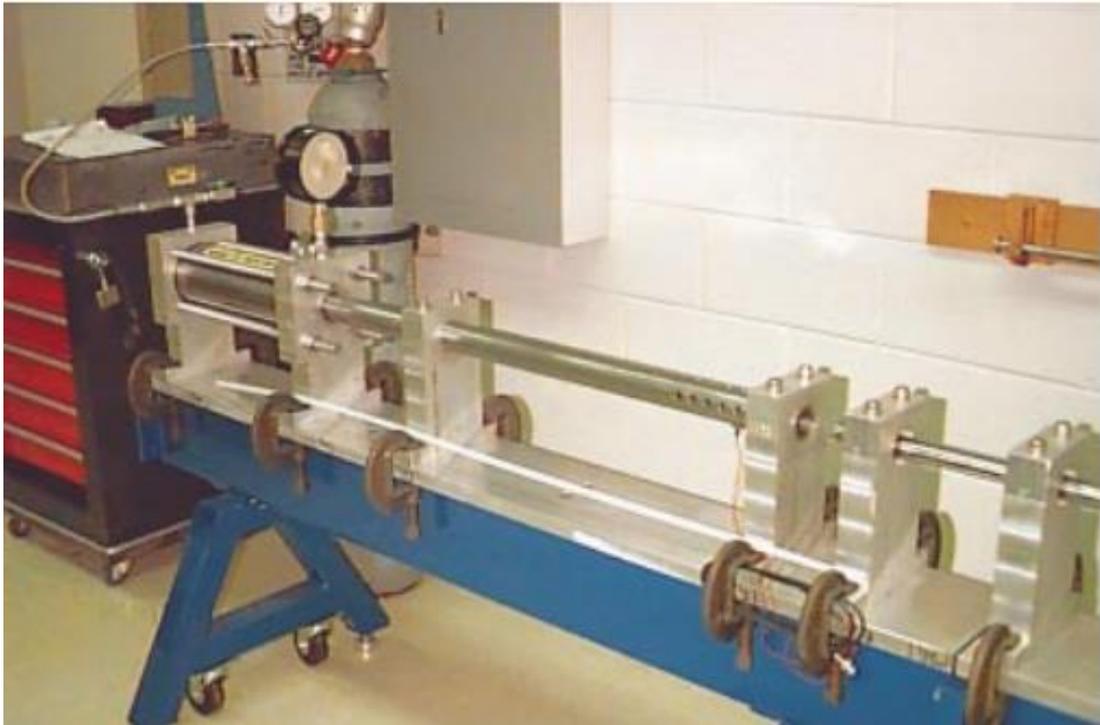


Figura 1 - Dispositivo montado em estudos de Kaiser (1998)  
Fonte - *Advancements in the Split Hopkinson Bar Test* (KAISER, 1998)

Como mostra a figura 1, a estrutura consiste em duas barras intercaladas pelo corpo de prova, onde a barra incidente é impactada pelo projétil, que comprimirá o corpo de prova, e a compressão produzirá ondas de tensão que se propagarão nas duas barras e no material testado (CHEN, 2011).

A figura 2 exhibe esquematicamente o equipamento:

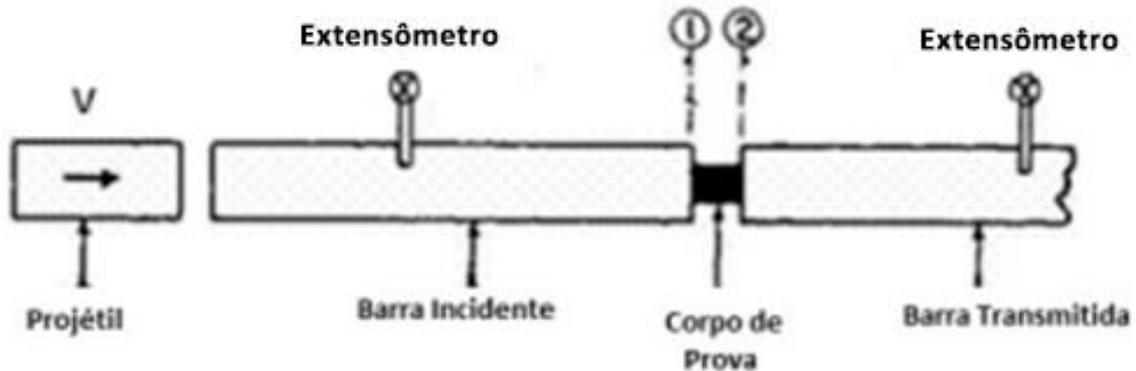


Figura 2 - Desenho demonstrativo do equipamento.  
Fonte - Adaptado (SILVA, 2010)

A figura 2 mostra como são anexados extensômetros nas duas barras para mensurar intensidade e tempo de passagem da onda de compressão, osciloscópios são usados para registrar os sinais de deformação dos extensômetros, e são usados sensores de velocidade para mensurar a velocidade de impacto, e a partir disso é possível caracterizar o comportamento dos materiais ensaiados (CHEN, 2011).

As barras devem ser constituídas de material com maior resistência mecânica que o material do corpo de prova, e devem permanecer em estado elástico durante todo o processo, geralmente possuem diâmetro entre 10 e 25 mm e devem ser mensuradas de acordo com a dimensão da força que será aplicada (CHEN, 2011). As barras devem possuir razão entre comprimento e diâmetro superior a 20, e estar devidamente alinhadas e com atrito minimizado para que as ondas se propaguem longitudinalmente (GRAY, 1998)

### 2.1.1.1 Corpo de Prova

A figura 3 exhibe dimensões de um corpo de prova para ensaio de Hopkinson adaptado para tração.

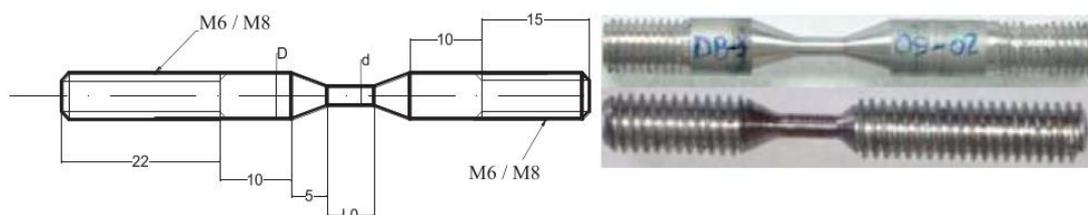


Figura 3 - Demonstração de dimensões do corpo de prova  
Fonte - Adaptado (MIRONE et al, 2017)

Quando se projeta um corpo de prova de tração, similar à figura 3, os fatores mais relevantes são o diâmetro e o comprimento inicial. Mirone et al. (2017) destacou que em testes rápidos, o comprimento do corpo de prova é reduzido, e para valores de  $L/d$  abaixo de 1, sendo  $L$  o comprimento e  $d$  o diâmetro, a interação do corpo de prova com comprimentos de bitola muito curtos pode prejudicar a uniaxialidade do estresse. Para valores de  $L/d$  entre 1 e 4, os testes apresentam melhor uniaxialidade, com fraturas próximas ao centro do corpo de prova, apesar dos efeitos de triaxialidade e não uniformidade gerados pela amarração. No entanto, para valores de  $L/d$  superiores a 4, a ruptura do corpo de prova tende a não ser centralizada (MIRONE et al., 2017).

## 2.2 Propagação de ondas de tensão em sólidos

Chen (2011) afirma que um corpo sólido, quando sujeito a um impacto, são formadas ondas de estresse que são propagadas para todas as partes desse corpo, e podem ser formadas três tipos de ondas: longitudinais, ondas de torção e de flexão. A velocidade da aplicação de uma onda longitudinal varia de acordo com as propriedades do material, e devido a geometria do corpo de prova no ensaio de Hopkinson, somente ondas longitudinais interessam, sendo as de torção e flexão desprezíveis devido ao tipo de esforço empregado. (CHEN 2011).

A velocidade de transmissão da onda é muito importante, pois durante a sua passagem pelo corpo de prova, a velocidade pode ser grande de modo a não permitir que as forças se distribuam corretamente no corpo de prova e podem causar trinca ou ruptura neste, antes que as ondas atinjam o comprimento final do material testado (DIETER, 1961). A geometria também se torna relevante, por exemplo, um corpo sólido com paredes finas, a carga pode gerar grandes deflexões, criar tensão e deformação localizada (HIBBELER, 2003)

A velocidade de propagação das ondas de tensão em sólidos varia no intervalo de 900 a 6.000 m/s, enquanto que a velocidade de propagação da trinca é de cerca de 1.800 m/s, sendo comum que trincas se formem mas que não haja tempo suficiente de se propagarem antes que o estado de tensões mude (DIETER, 1961). O mesmo autor afirma que para velocidades de impacto entre 30 e 150 m/s, a diferença entre fraturas sob ensaio dinâmico e estático é evidenciada, sendo que existe uma velocidade de impacto crítica para cada material, na qual ele se rompe na extremidade atingida no instante do impacto.

Kaiser (1998) ressalta que no ensaio de Hopkinson, as ondas são transmitidas desde a barra incidente até o corpo de prova, porém parte dessas ondas são refletidas de volta para a barra, e para garantir a acuracidade do ensaio, deve-se observar também as deformações nas

barras que comprimirão o corpo de prova. Alguns fatores influenciam a precisão dos resultados como: dispersão, incompatibilidade de impedância das barras com as amostras e transdutor (KAISER, 1998).

## **2.3 Projetos Mecânicos**

Um projeto mecânico consiste em traçar um plano para suprir uma necessidade ou solucionar um problema e para que o projeto seja viável, e que se torne físico, então ele deverá ser funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável e replicável (SHIGLEY, 1993). Em definição, peças que se inter-relacionam, são chamadas de elementos de máquinas. Essas partes dos equipamentos convertem energia em força e velocidade, sendo essas variáveis fundamentais no estudo de um projeto (NORTON, 2013).

O objetivo final de um equipamento é dimensionar geometria e material, de modo que ele possa desempenhar a função desejada sem falhar, sendo necessário calcular condições de falha para cada componente, e para máquinas com aceleração significativa, como é o caso desse experimento, será necessária uma análise dinâmica das forças (NORTON, 2013). DIETER (1961) confirma esta teoria, afirmando que colisões de alta velocidade podem causar uma ruptura prematura do material.

### **2.3.1 Metodologia de projeto**

Norton (2013) afirma que existem diversas metodologias para execução de um projeto, e a escolhida dependerá da sua aplicação, como exemplo, ele cita 10 etapas que ajudarão organizar e enfrentar o problema. As etapas são:

O método de projeto de Norton (2013) é um processo estruturado em 10 etapas para o desenvolvimento de novos produtos, começando com a identificação de oportunidades e a definição do problema a ser resolvido, o processo envolve a especificação clara dos objetivos do produto, a geração e seleção de ideias, a análise de negócios para avaliar a viabilidade financeira e comercial, o desenvolvimento do produto e testes de mercado para garantir que ele atenda às especificações e seja aceito pelos consumidores. Finalmente, o produto é lançado e monitorado pós-lançamento para avaliar o desempenho e realizar melhorias se necessário. Esse processo ajuda a garantir que o desenvolvimento do produto seja bem-sucedido e atenda às necessidades do mercado e dos consumidores (NORTON, 2013).

## 2.4 Flambagem de coluna

Elementos compridos e esbeltos que são sujeitos a uma força axial de compressão, são chamados de colunas, e a deflexão lateral que sofrem é chamada de flambagem, que pode levar a falha súbita do sistema, e devem ser projetadas de modo a evitar esse fenômeno (HIBBELER, 2003).

A figura 4 exibe um exemplo de flambagem:

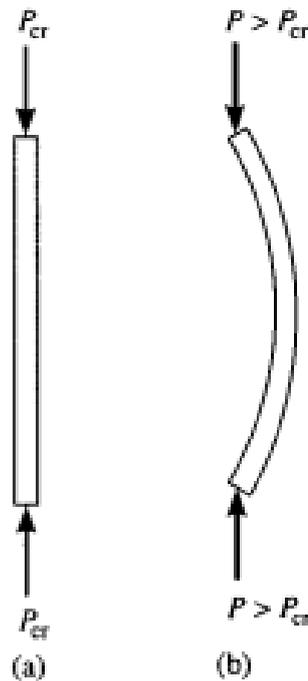


Figura 4 - Flambagem.  
Fonte – Adaptado Hibbeler (2003).

A figura 4 mostra que a barra (a) é submetida a  $P_{cr}$ , pressão crítica, pressão que representa o limite suportado pela barra antes que ocorra a flambagem, que ocorre em (b) devido ao incremento de tensão compressiva (HIBBELER, 2003).

Para um perfil metálico retangular o cálculo da pressão crítica é feito de acordo com a equação 1, sendo  $P_{cr}$  a pressão crítica,  $E$  módulo de elasticidade,  $I$  momento, e  $L_e$  comprimento efetivo (HIBBELER, 2003):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(L_e)^2} \quad (1)$$

### 2.4.1 Comprimento efetivo

$L_e$  é denominado comprimento efetivo da coluna, e um coeficiente dimensional  $K$ , fator de comprimento efetivo, é usado para calcular  $L_e$  (HIBBELER, 2003).

$$L_e = KL \quad (2)$$

O valor de  $K$  (coeficiente de rigidez) é parametrizado de acordo com a figura 5:

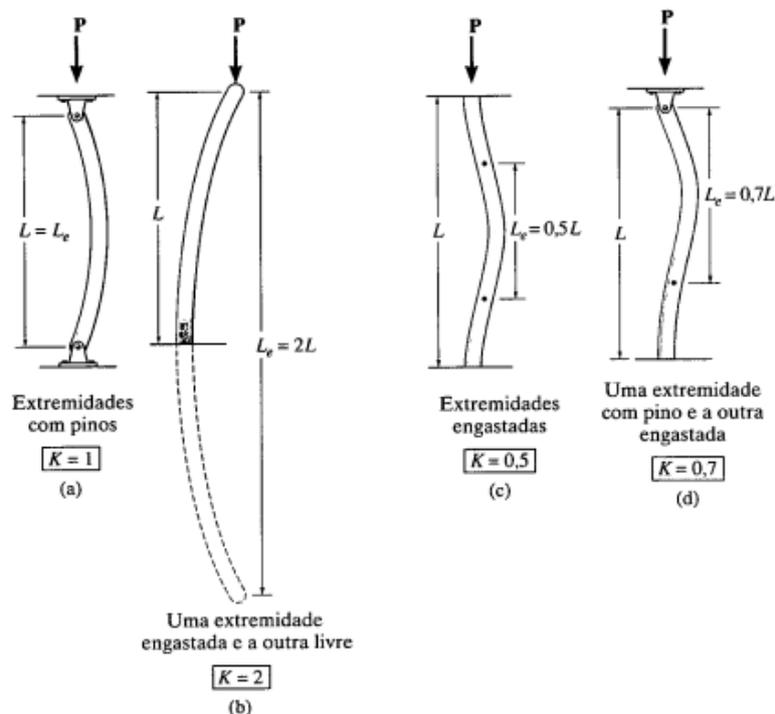


Figura 5 - Coeficiente de rigidez  
Fonte - Adaptado Hibbler (2003).

Hibbler (2003), de acordo com demonstração da figura 5, conclui que para um mesmo diâmetro, quão maior o comprimento efetivo, menor será a resistência do material a flambagem.

## 2.5 Conservação de movimento

### 2.5.1 Momento Linear

Young (2015) afirma que a Primeira Lei de Newton afirma: Se nenhuma força atua sobre um corpo, sua velocidade não pode mudar, o corpo não pode sofrer aceleração, e um corpo em repouso se mantém em repouso, e um corpo em movimento permanece em movimento a menos que uma força externa atue sobre o mesmo. Assim, uma massa em queda

livre, por exemplo, tende a permanecer em queda até que colida com algum corpo sólido (HALLIDAY; RESNICK, 2016).

Seguindo o mesmo raciocínio, tem-se o momento linear, também conhecido como quantidade de movimento, e a segunda lei de Newton, afirma que quando uma força atua sobre uma partícula, esta partícula acelerará na direção da força com uma intensidade que é proporcional à força (HIBBELER, 2010). Assim, é feita a seguinte relação:

$$\Sigma F = ma = \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

Sendo:

$a$  = aceleração

$v$  = velocidades medidas num referencial inercial

$m$  = massa

Integrando a equação acima, entre os limites  $v = v_1$  em  $t = t_1$  e  $v = v_2$  em  $t = t_2$ , temos:

$$\Sigma \int_{t_1}^{t_2} F dt = m \int_{v_1}^{v_2} dv \quad (4)$$

$$\Sigma \int_{t_1}^{t_2} F dt = mv_2 - mv_1 \quad (5)$$

Essa equação traduz o princípio do impulso e quantidade de movimento, também conhecida como momento linear, que é definida pelo produto entre massa e velocidade em grandeza vetorial, possuindo direção e sentido, sendo essa razão fundamental para estudo da transferência de movimento (HALLIDAY; RESNICK, 2016).

O presente estudo goza da energia de colisão entre um corpo em queda livre e um corpo estático para realização de um ensaio de tração dinâmico, assim, conhecer o comportamento dos corpos sólidos após a colisão é fundamental (YOUNG; FREEDMAN, 2015).

### 2.5.2 Colisão

Considerando a colisão de dois corpos, como tem-se neste trabalho, deve-se observar a energia cinética do sistema, podendo ser considerados três tipos de colisão, elástica, inelástica e perfeitamente inelástica (YOUNG, 2015). A elástica considera os corpos sólidos como duas partículas, e tem-se a conservação de toda energia do impacto, a inelástica considera outras

formas de energia, como a térmica e sonora, e a perfeitamente inelástica acontece quando os corpos permanecem juntos após a colisão (HALLIDAY; RESNICK, 2016).

Considerando uma colisão unidimensional, como é o caso da queda livre, tem-se a seguinte relação:

$$M_1 \cdot \vec{v}_1 = M_2 \cdot \vec{v}_2 \quad (5)$$

A partir desta equação, é possível estimar a velocidade alcançada por um corpo sólido após a colisão (HALLIDAY; RESNICK, 2016).

## 2.6 Engenharia reversa

De acordo com Voas (2004) engenharia reversa é um processo que envolve desmontar um produto ou equipamento e analisar seus componentes para entender como ele funciona tendo como principal objetivo criar uma cópia ou melhorar o produto original. O mesmo autor afirma que a análise de materiais e a medição de dimensões são essenciais para determinar como o produto foi construído, e a partir disso, é possível criar desenhos técnicos precisos para reproduzir o produto ou melhorá-lo.

A próxima etapa é estudar os componentes do produto e entender como eles funcionam juntos. E segundo o autor Chikofsky (1990), a análise de sistemas mecânicos pode ser feita através da observação direta, testes de funcionamento ou uso de software de simulação. O mesmo autor afirma que após entender como cada componente funciona, é possível criar modelos e protótipos para testar as funcionalidades. De acordo com o autor Ulrich (1995), a prototipagem rápida é uma ferramenta valiosa na engenharia reversa, pois permite criar modelos físicos rapidamente para testar as ideias sendo possível identificar problemas e fazer melhorias antes de produzir o produto final.

Em resumo, a engenharia reversa é um processo importante para entender como um produto funciona e pode ser aprimorado, utilizando ferramentas de análise de materiais, medição de dimensões, e prototipagem rápida, é possível criar desenhos técnicos precisos e modelos funcionais para testar as ideias (ULRICH, 1995).

### **3 METODOLOGIA**

Este capítulo apresenta metodologia aplicada ao trabalho, dividida entre os 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 tem características de uma pesquisa bibliográfica pois apoia-se em estudos prévio e livros relacionados ao assunto, para elaboração do dispositivo e para desenvolvimento de testes do ensaio dinâmico (GIL, 2002).

Após o estudo e dimensionamento teórico este estudo apresenta características de pesquisa exploratória pois tem como base experimentos já consolidados para criar protótipo de equipamento de ensaio de tração dinâmico (GERHARDT, 2009).

Além disso, apresenta características de pesquisa quantitativa pois é realizado dimensionamento de equipamento para realização de teste de ensaio dinâmico, sendo realizado estudo e experimento prático. Haverá discussão e comprovação de hipóteses (VERGARA, 2010).

O presente trabalho apresenta características de pesquisa experimental pois levantará hipóteses relacionadas ao desenvolvimento de equipamento e realização do ensaio. Serão estudados os fenômenos e propostas soluções (VERGARA, 2010).

Também apresenta características de pesquisa qualitativa pois discutirá os resultados observados de modo a entender a natureza dos fenômenos envolvidos no experimento, e dará hipóteses para os mesmos, descrevendo e compreendendo-os (GIL, 2002).

#### **3.2 Materiais e métodos**

Na Figura 6 está representado as etapas de desenvolvimento do trabalho segundo Norton (2009), no qual a formulação do problema se correlaciona com a identificação da necessidade.

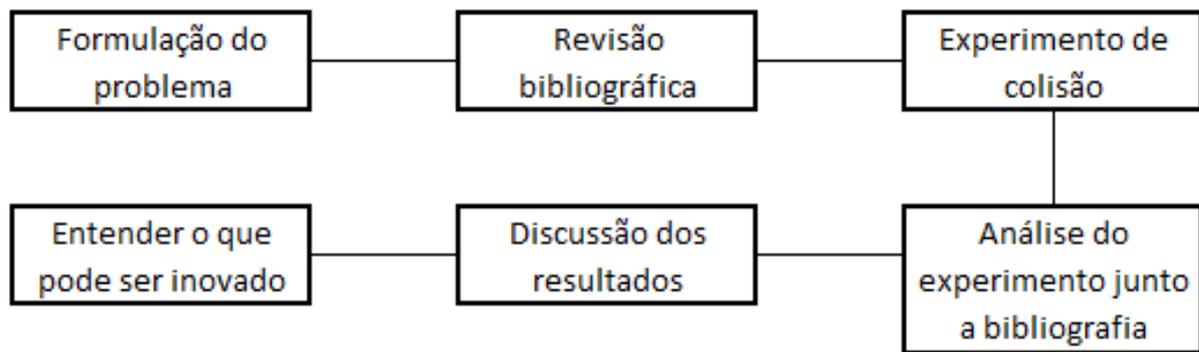


Figura 6 - Metodologia de estudo.  
 Fonte - Adaptado de Norton (2009).

Ainda na Figura 6, a revisão bibliográfica está relacionada ao estado da arte e literaturas para embasamento do tema abordado. Uma vez identificada a necessidade e o estado da arte foi estabelecido os objetivos do trabalho, posteriormente, as especificações de desempenho define o que o sistema precisa fazer, por exemplo, o dispositivo deve tracionar as amostras, acondicionar um transdutor de força (célula de carga), etc. Superado as etapas anteriores, o próximo passo foi a idealização que teve o intuito de promover o maior número de ideias para atender os requisitos estabelecidos. Nas etapas de análise e seleção, as ideias para a solução do problema foram ponderadas afim de selecionar a que melhor atendesse aos requisitos. No presente trabalho utilizou se do recurso da engenharia reversa sobre o dispositivo desenvolvido por Sousa (2018), o qual tem a mesma cinemática necessária para tracionar o corpo de prova. Porém, o modelo construído nesse trabalho tem aplicações e corpos de prova distintos.

Na elaboração do experimento de colisão considerou se as limitações e recursos financeiros para execução dos testes. Após execução dos testes experimentais foi realizada uma análise do comportamento estrutural do dispositivo de tração e uma avaliação qualitativa da deformação do corpo de prova, considerando se houve ou não ruptura do corpo de prova e, se este se comportou conforme descrito na literatura. Por fim os resultados referente ao comportamento dinâmico e estrutural do dispositivo de tração foram discutidos e soluções foram propostas a fim de conferir réplicas nos ensaios e rigidez estrutural.

### 3.2.1 Torre de ensaio de colisão

A torre retratada na figura 7 é utilizada no estudo em questão para içar um martelo de colisão cuja energia de movimento, quando liberada após a queda, será responsável por realizar o ensaio.

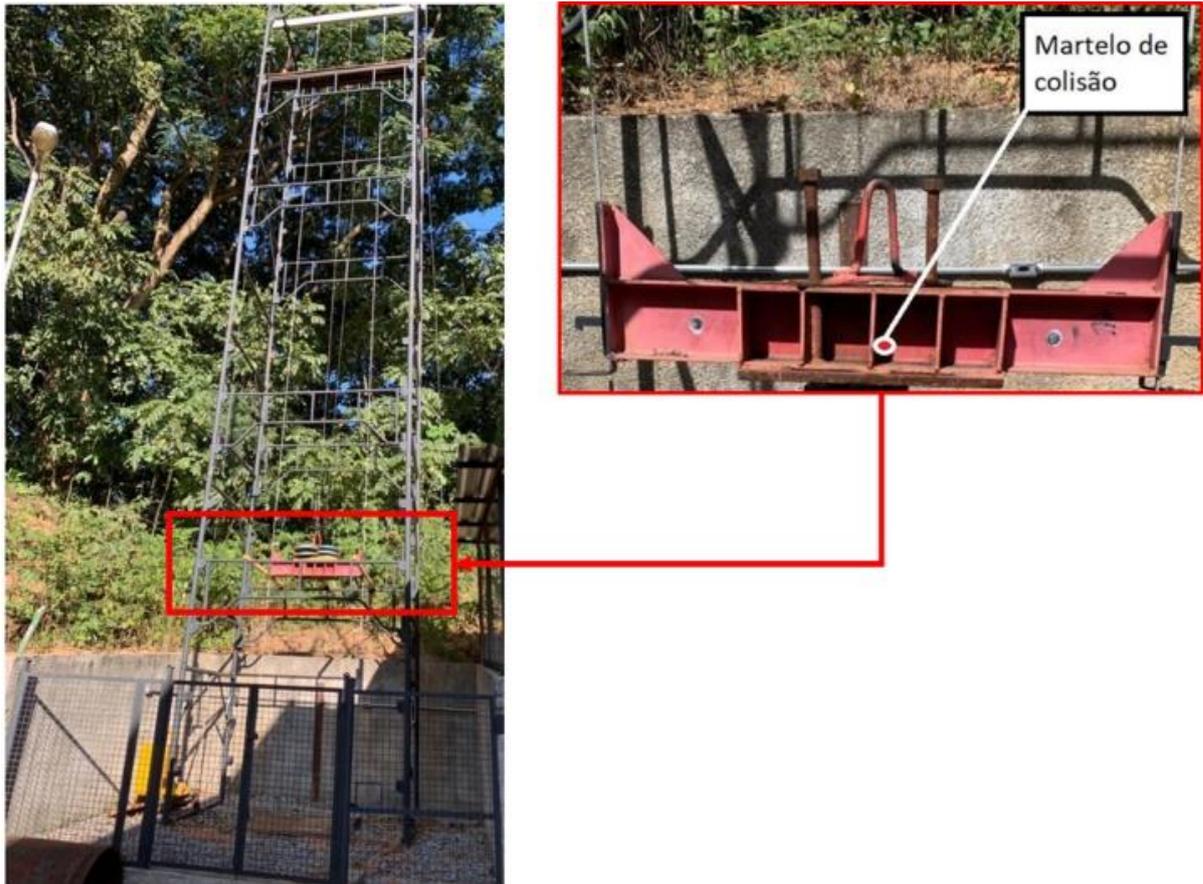


Figura 7 - Torre de ensaio de colisão.  
Fonte - Pesquisa direta (2022).

Na Figura 7 está representada a torre utilizada para reproduzir a colisão veicular, a qual tem capacidade máxima de içamento (martelo de colisão) de 300 kg a uma altura máxima útil de 11,5 m (queda livre). Este banco de testes está instalada no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação da Universidade Federal de Minas Gerais. Com o intuito de minimizar o amortecimento do solo, foi construída uma base de concreto, medindo: 1,3 x 1,3 x 1,5 m (SOUSA, 2018).

### 3.2.2 Dispositivo de ensaio de tração

A figura 8 representa o dispositivo de ensaio de tração.

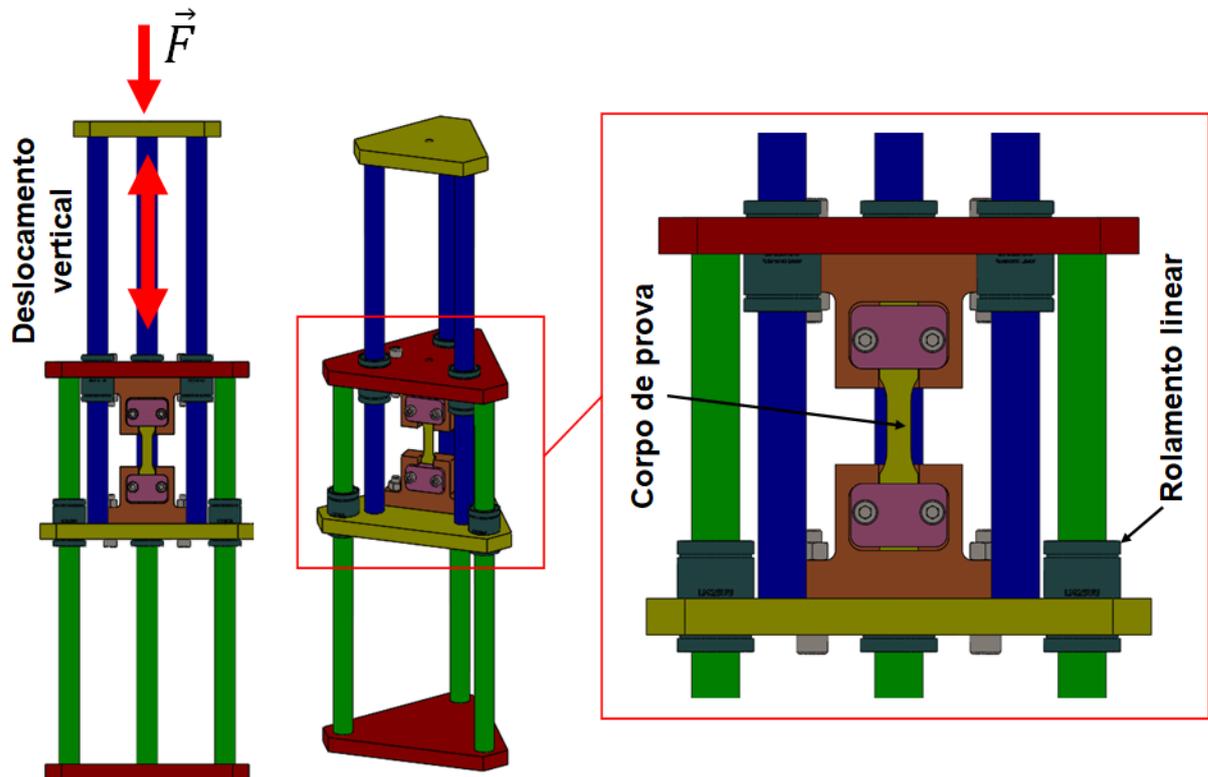


Figura 8 - Dispositivo em CAD.  
Fonte – Pesquisa direta (2022)

O dispositivo representado na Figura 8 é composto por duas estruturas de base triangular demonstradas nas cores amarelas e vermelhas. As barras verdes são a base do dispositivo, fixas. As barras azuis representam a parte móvel do dispositivo, que desloca verticalmente sobre rolamentos lineares. Estes rolamentos são fixados nas bases por meio de ajustes de interferência.

O corpo de prova é fixado nas extremidades por meio de garras as quais são fixadas nas chapas em vermelho (fixa) e amarelo (móvel), conforme a figura 8. Quando uma força é exercida sobre a base superior da estrutura móvel (geometria triangular em amarelo), ocorre a movimentação vertical do dispositivo e a transmissão da força para o corpo de prova (tensão uniaxial). Essa força aplicada a base superior da estrutura móvel (geometria triangular em amarelo) é obtida por meio da colisão de uma massa em queda livre sobre o dispositivo, ocasionando fratura/ruptura do corpo de prova a altas taxas de deformação, logo, esse evento caracteriza o ensaio de tração dinâmico.

### 3.2.3 Câmera de alta velocidade

Para registrar o comportamento do dispositivo em teste, tração dinâmica do corpo de prova, foi utilizada uma câmera de alta velocidade modelo Phantom Miro 110, resolução 1280 x 800, 1,6 Gpx/s e 2  $\mu$ s captura mínima. As imagens foram capturadas com resolução 512 x 704 e a 4500 frames por segundo.

Para processamento de imagens foi utilizado o software Phantom Camera Control (PCC), que permitiu análise do ensaio nas seções posteriores. O sistema foi montado conforme a conforme figura 9.

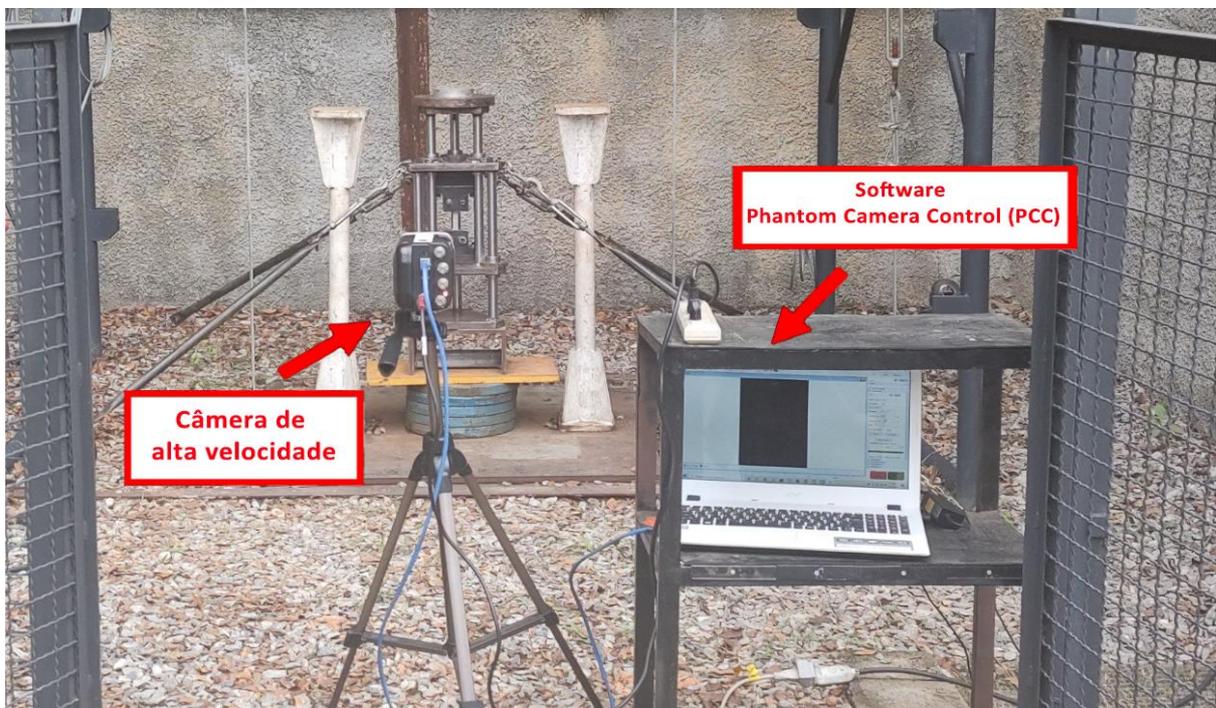


Figura 9 – Câmera de alta velocidade  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

### 3.2.4 Corpo de prova

O corpo de prova é uma adaptação ao padrão ASTM E8/E8M (2013), apesar de não ser foco deste trabalho, buscou-se um corpo de prova com dimensões equivalentes à norma para que os resultados dos ensaios possam ser comparados e correlacionados à testes descritos na literatura. O corpo de prova tem dimensões como mostra a figura 10.

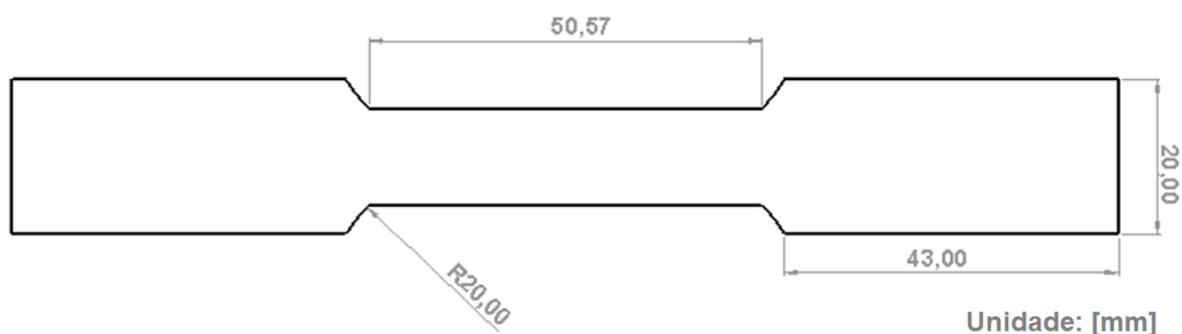


Figura 10 - Dimensões do corpo de prova.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

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.

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%													

Fonte – SOUSA (2018)

### 3.2.5 Ensaio de tração

Após preparados os corpos de prova, foram executados os testes de colisão. Uma massa foi posta em queda livre, até colidir com a base superior do equipamento, que se movimentará verticalmente, transmitindo a energia da colisão para o corpo de prova.

A escolha de altura de içamento e massa, conseqüentemente, energia de colisão, dependerá das propriedades mecânicas do material que será testado e, da taxa de deformação desejada que está relacionada a aplicação do material.

### 3.3 Variáveis e indicadores

Segundo Marconi et al. (2005), uma variável é uma classificação, medida ou conceito operacional que apresenta valores ou propriedades mensuráveis, atreladas ao processo

operacional que interferem em qualidade, característica, magnitude ou traços que se alteram a cada caso particular e podem ser abrangentes ou mutuamente exclusivos, sendo o conceito operacional, por sua vez, um objeto, processo, agente, fenômeno, problema etc.

Gil (2002) afirma que as variáveis são importantes elementos a serem consideradas no processo de pesquisa, tornando possível identificar e mensurar os fenômenos que se deseja estudar. As variáveis apresentam quatro partes distintas de acordo com Marconi et al. (2005), sendo elas um nome, algum tipo de definição verbal, um sistema classificatório ou um conjunto de categorias e um processo que permita a sua ordenação.

De acordo com Marconi et al. (2005), existirem diversas definições de indicadores, mas o relevante a se observar é que ele seja um instrumento que permita a percepção de um fenômeno ou condição de modo simplificado, compreensível e comparável.

A tabela 2 exhibe variáveis e indicadores que influenciam o comportamento estrutural do dispositivo de tração dinâmico:

Tabela 2 – Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Energia Cinética (instante da colisão)	Rigidez
Resistência mecânica corpo de prova	
Fixação do dispositivo (base da torre)	
Solução de projeto	
Elementos mecânicos construtivos	
Ajuste e tolerância	

Fonte – Pesquisa direta (2022)

As variáveis e indicadores citados na tabela 2 são provenientes de imperfeições geométricas nas peças. Por se tratar de um protótipo e uma versão inicial do dispositivo, há de se evoluir em rigidez do dispositivo.

### 3.4 Coleta de dados

A coleta de dados será feita por meio de captação de imagens com câmera de alta velocidade que permitirá interpretação humana.

### **3.5 Tabulação de dados**

Os dados serão tratados por meio dos aplicativos: Phantom Camera Control (PCC), Excel, Word e Solidworks.

### **3.6 Considerações finais**

Este capítulo apresentou em detalhes a realização experimento e expõe ferramentas que apoiam sua execução. São explanadas ainda variáveis que acompanham o processo e serão discutidas no capítulo seguinte, onde serão apresentadas análises dos resultados relativos a pesquisa e discussão de variáveis do processo.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Energia da colisão e resistência mecânica do corpo de prova

Neste experimento, devido às características dos corpos de prova utilizados, sendo eles de espessura 0,9 mm e com resistência ao escoamento de 285 MPa conforme descrito na seção 3.2.4 pela tabela 1, o peso utilizado foi de 30 kg que é o peso do martelo de colisão sem complementos, e a altura utilizada foi de 1 metro, visando a energia de aproximadamente 300J, que seria suficiente para superar a tensão de escoamento e romper o corpo de prova. A figura 11 ilustra momento antes da realização do experimento.



Figura 11 - Montagem do sistema.  
Fonte: Pesquisa direta (2022).

Após a realização do teste demonstrado na figura 11 a estrutura móvel superior do dispositivo de tração movimentou-se verticalmente, ocasionando a ruptura do corpo de prova

conforme descrito na seção 3.2.2. Observou-se pelas imagens da câmera de alta velocidade que houve a presença de vibrações transitórias oriundas do impacto nos eixos principais do dispositivo, que neste experimento não comprometeram a execução do teste, mas é um ponto de atenção para construção de um dispositivo mais robusto, ou seja, com maior rigidez.

Para o desenvolvimento de um novo dispositivo de tração com maior rigidez, o qual seja capaz de fraturar corpos de prova com maior tenacidade, dimensão e tensão de escoamento, será preciso se atentar às dimensões dos eixos do dispositivo. Para ensaios que demandem uma força de magnitude superior, será necessário reforçar o diâmetro dos eixos, e os demais componentes mecânicos utilizados.

## **4.2 Fixação do Dispositivo**

A fixação do dispositivo é uma etapa que requer atenção, pois o dispositivo deve permanecer estático para execução de todos os ensaios de modo a garantir a réplica do ensaio. Outro fator relevante é que o dispositivo deve estar fixado de modo a garantir a uniaxialidade do ensaio, visto que qualquer desnivelamento pode ocasionar decomposição das forças verticais, o que comprometeria o ensaio.

Neste trabalho, por ser um teste avaliativo de um protótipo, algumas adaptações foram feitas para que fosse possível executá-lo, por exemplo, mantendo o dispositivo em mesma posição e protegendo sua estrutura como as bases superiores e rolamentos lineares, contra impactos da queda do martelo de colisão.

### **4.2.1 Limitador de queda**

Após a colisão, as bases deslizam nos eixos verticais até o fim de curso, e encontram a base inferior do dispositivo. A base superior se choca com o rolamento linear preso na base superior interna conforme figura 12, que ilustra o dispositivo após a realização do ensaio.

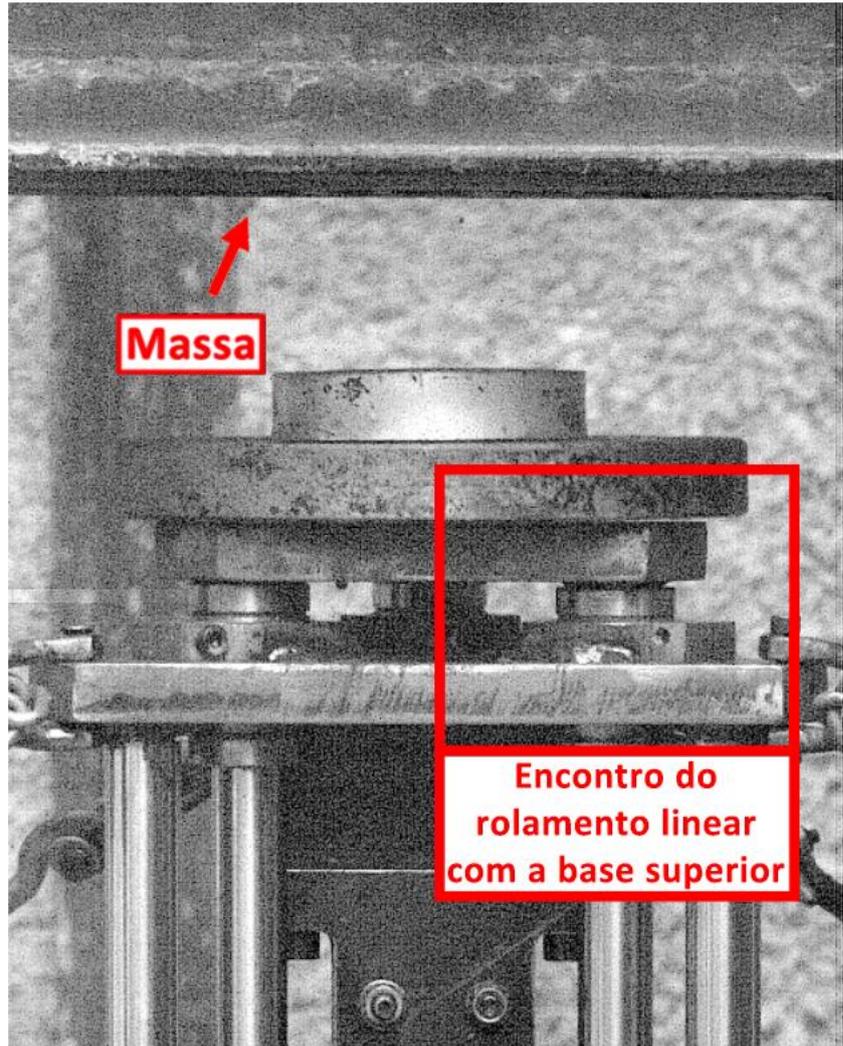


Figura 12 – Encontro do rolamento linear.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

Durante o experimento ocorreu uma colisão parcialmente elástica onde houve desaceleração na massa e uma aceleração na base do dispositivo, o que faz com que após o final do deslocamento do dispositivo, a massa tenha uma segunda colisão no mesmo, e visto a posição que este se encontra ao final do experimento e o potencial dano que esse segundo impacto pode causar, podendo deslocar o rolamento linear ou deformar a base do dispositivo, foram utilizados limitadores de curso.

Para proteger o protótipo, foram aproveitados limitadores de curso de outro estudo, que têm como função interromper a trajetória da massa em queda livre para que não ocorram avarias no dispositivo. A figura 13 mostra limitadores.



Figura 13 - Limitadores de queda.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

A figura 13 pode se observar as dimensões do limitador, que deve ser posicionado a uma altura tal que permita o contato da massa com a base superior do dispositivo ao início do experimento, mas que restrinja a continuidade do movimento da massa, e impeça o segundo impacto supracitado. Neste experimento, houve a adaptação de limitadores de um estudo prévio realizado por Sousa (2018), e por não ter as dimensões adequadas para este protótipo foram realizadas adaptações que serão discutidas.

#### **4.2.2 Base para alocação do dispositivo**

Como mencionado na seção 4.2.1, os limitadores de queda têm uma altura maior que o dispositivo, sendo necessário elevá-lo para o ensaio. Então, uma base foi improvisada para que o protótipo atingisse a altura necessária para realização do ensaio e preservação do equipamento. A Figura 14 mostra base improvisada.



Figura 14 – Base improvisada.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

Na base (figura 14) foram improvisadas anilhas empilhadas, uma chapa retangular e uma base menor confeccionada para que a altura necessária fosse alcançada, o que inclui novos componentes e conseqüentemente novas variáveis no experimento.

A aderência da chapa sobrepondo as anilhas comprometeu a fixação do dispositivo, visto que há irregularidades entre as superfícies dos componentes da base improvisada, propiciando trepidações e rotações em torno do eixo central, que são uma forma de dissipação de energia. Essa dissipação é prejudicial à confiabilidade do teste, visto que é esperado que toda energia da colisão seja direcionada ao corpo de prova.

Para a realização do projeto definitivo do dispositivo de tração, deve-se atentar às alturas dos equipamentos auxiliares, como mostrado na seção 4.2.1 para que haja correta fixação do equipamento e que as forças envolvidas no ensaio sejam direcionadas exclusivamente para o corpo de prova.

### 4.2.3 Sistema de fixação

Como visto nas seções anteriores, as rotações entre outros movimentos que não contribuem para a execução do teste são um problema, e para antever este, foi utilizado um sistema para fixar o dispositivo e mantê-lo em mesma posição para todos os ensaios. Uma corrente, fixada no solo, foi acoplada no dispositivo com ajuda de ganchos em 4 pontos estratégicos, e esticada com um esticador para garantir a fixação do dispositivo, conforme figura 15.

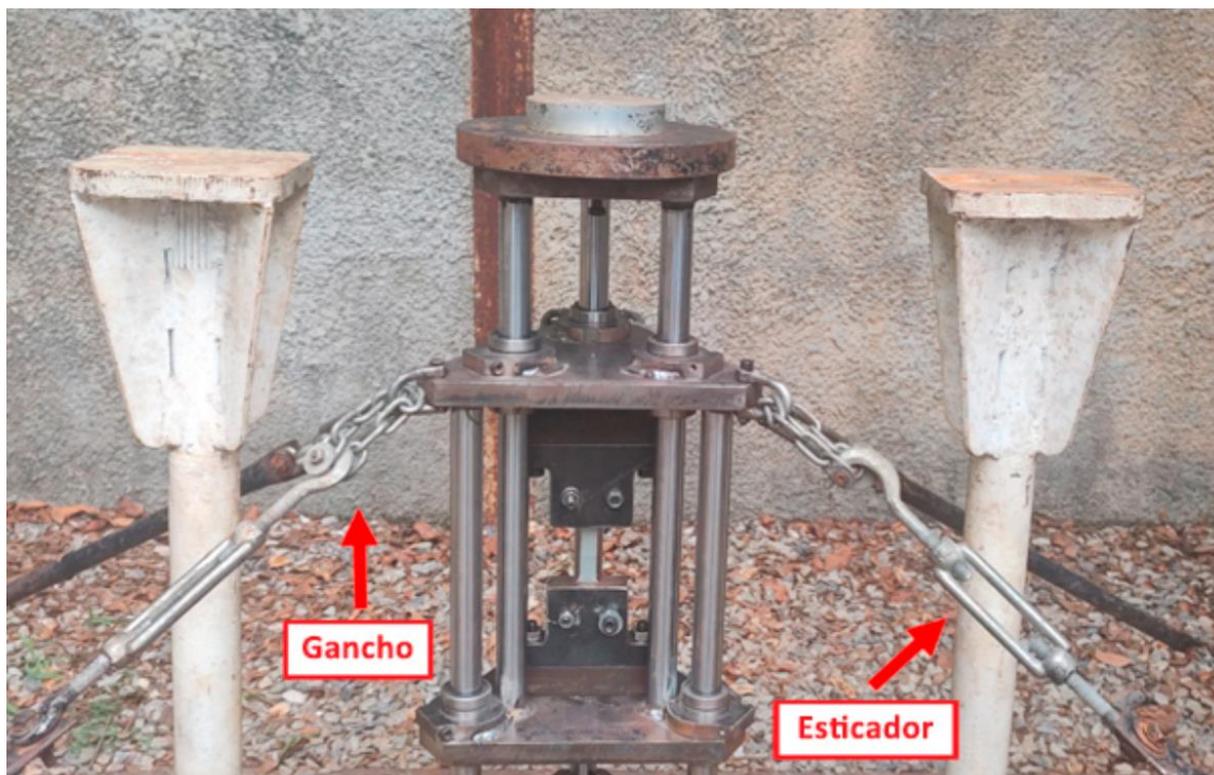


Figura 15 – Gancho e esticador.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

A estratégia funcionou e permitiu que o dispositivo se mantivesse em mesma posição em todos os testes realizados. Embora o dispositivo tenha mantido posição, a corrente não foi suficiente para manter a estabilidade completa do dispositivo, que sofreu com pequenas rotações em torno de seu eixo central, conforme discutido em seções anteriores.

Essas rotações são causadas pois a tensão aplicada as correntes, componentes responsáveis pelo estaiamento do dispositivo de tração, permitem certa liberdade de movimentação, devido a elasticidade das correntes. Porém, somente isso, provavelmente, não seria significativo para os movimentos rotacionais, as observações sugerem que há outros fatores, que somados a elasticidade das correntes agrava significativamente esse problema, por exemplo, os elementos de ajuste de altura (anilhas e chapa) do dispositivo de tração que são instáveis devido as suas superfícies irregulares, ou seja, não há paralelismo entre as partes.

Para a versão definitiva do equipamento torna-se necessário um dispositivo de fixação que manterá o equipamento fixado ao solo e que acomode a geometria da base inferior de modo que impeça as rotações da base, sem folgas que permitam movimentações.

#### 4.2.4 Discos complementares

Durante a execução do ensaio foram observadas oportunidades de melhoria no contato inicial da massa com o dispositivo e na equidade da distribuição de forças. A figura 16 demonstra discos complementares utilizados para melhorar a distribuição de forças, descrito na figura 8.

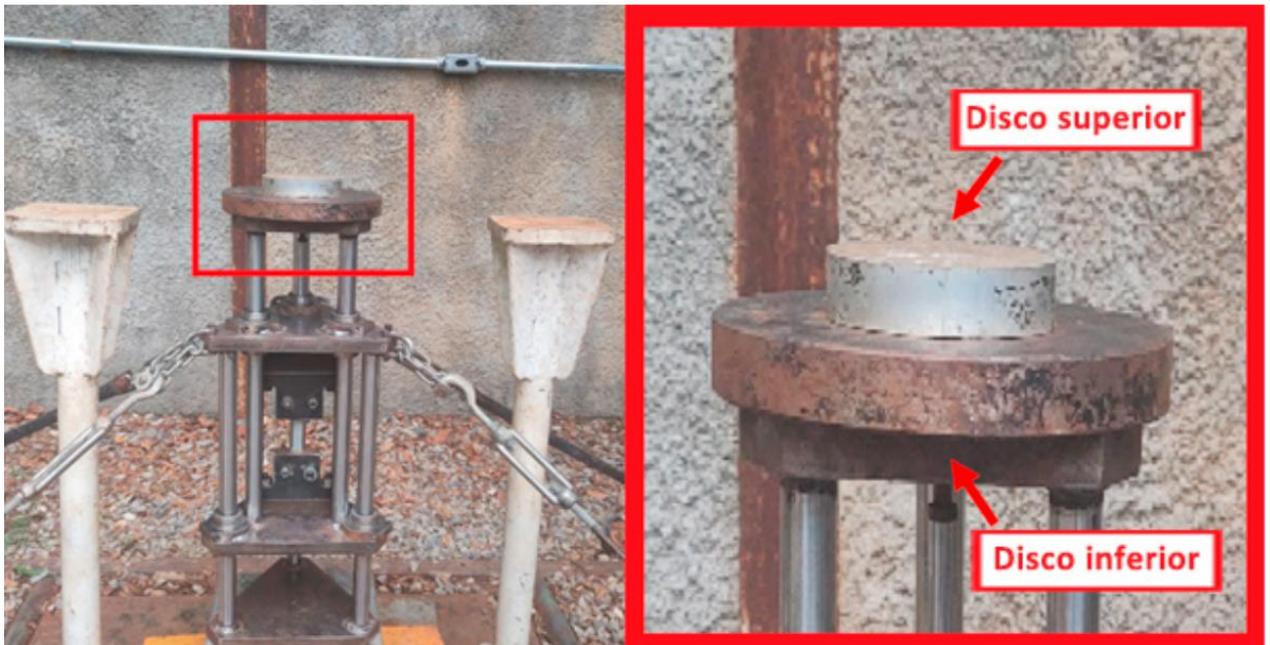


Figura 16 – Disco inferior e superior.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

Quando a massa colide com a base superior do dispositivo, foi observado que o contato massa-base ocorria de forma irregular, atingindo de maneira antecipada uma das laterais da base, comprometendo a correta distribuição de forças. Isso ocorre devido a movimentações irregulares da massa antes da colisão, e é agravado pela grande área de contato massa-base e sua geometria triangular.

A má distribuição de forças pode ocasionar em vibrações no dispositivo e resultados inconsistentes no teste dinâmico. O disco superior tem a função de reduzir a área de contato massa-base, permitindo concentração da força no centro geométrico do dispositivo conforme figura 16.

O disco inferior tem um rebaixo que alivia a tensão na região central, distribuindo esforços para extremidades. A sua funcionalidade é absorver o impacto e distribuí-lo uniformemente entre os três eixos do dispositivo. Além disso serve como proteção para a estrutura do equipamento contra deformações causadas pela colisão.

Para a versão definitiva do equipamento deve-se utilizar base superior com estrutura otimizada, com menor área de exposição ao contato, para que o contato do martelo com a base superior seja uniforme e centralizado.

### 4.3 Solução de projeto e elementos mecânicos

Para este projeto foram utilizadas algumas adaptações que serão discutidas neste capítulo. Serão discutidos também os elementos que compõem o projeto e propostas melhorias.

#### 4.3.1 Garras

A garra utilizada neste dispositivo, é composta por duas chapas metálicas que são pressionadas em sentido contrário por dois parafusos M8x1,25, e a pressão obtida entre as chapas é responsável por fixar o corpo de prova até sua ruptura. A figura 17 representa uma imagem obtida pela câmera de alta velocidade utilizada nesse estudo, nela, um determinado instante foi observado.

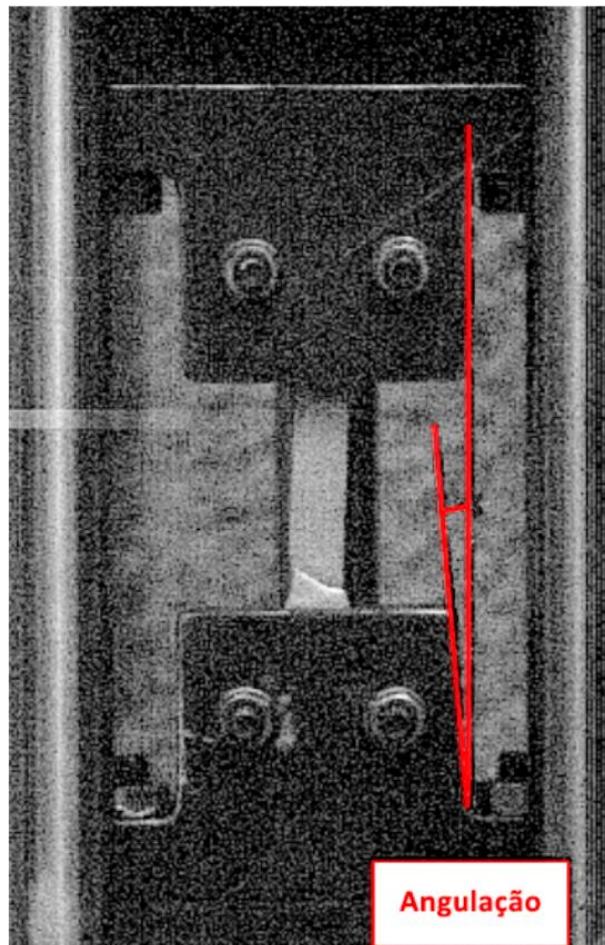


Figura 17 – Angulação da garra.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

Durante o experimento, após o impacto, algumas instabilidades ocorrem na estrutura do dispositivo, e puderam ser observadas nas imagens obtidas pela câmera de alta velocidade. Foi possível observar momentos em que estas movimentações exibem angulações entre as garras, como demonstrado na figura 17. Este problema pode comprometer a distribuição uniforme de forças no corpo de prova, comprometendo os resultados do teste ao fraturar o corpo de prova em um ponto indevido.

Outro fator relevante é que após a realização de um teste, é necessário desparafusar o corpo de prova que foi rompido e parafusar o novo corpo de prova na garra. Após a realização de alguns testes, devido a várias aplicações de torque nos parafusos, pode-se notar que os parafusos sofreram deformação plástica, “espanaram”, e não mantiveram a força normal equivalente ao primeiro torque aplicado, sendo necessária a troca de parafusos em mais de uma oportunidade como mostra a figura 18. Em um dos testes realizados, a perda de aderência do parafuso ocasionou em um cisalhamento na base do corpo de prova, que se desvencilhou da garra. A garra não é o foco do estudo, e deverá ser trocada em dispositivos futuros.

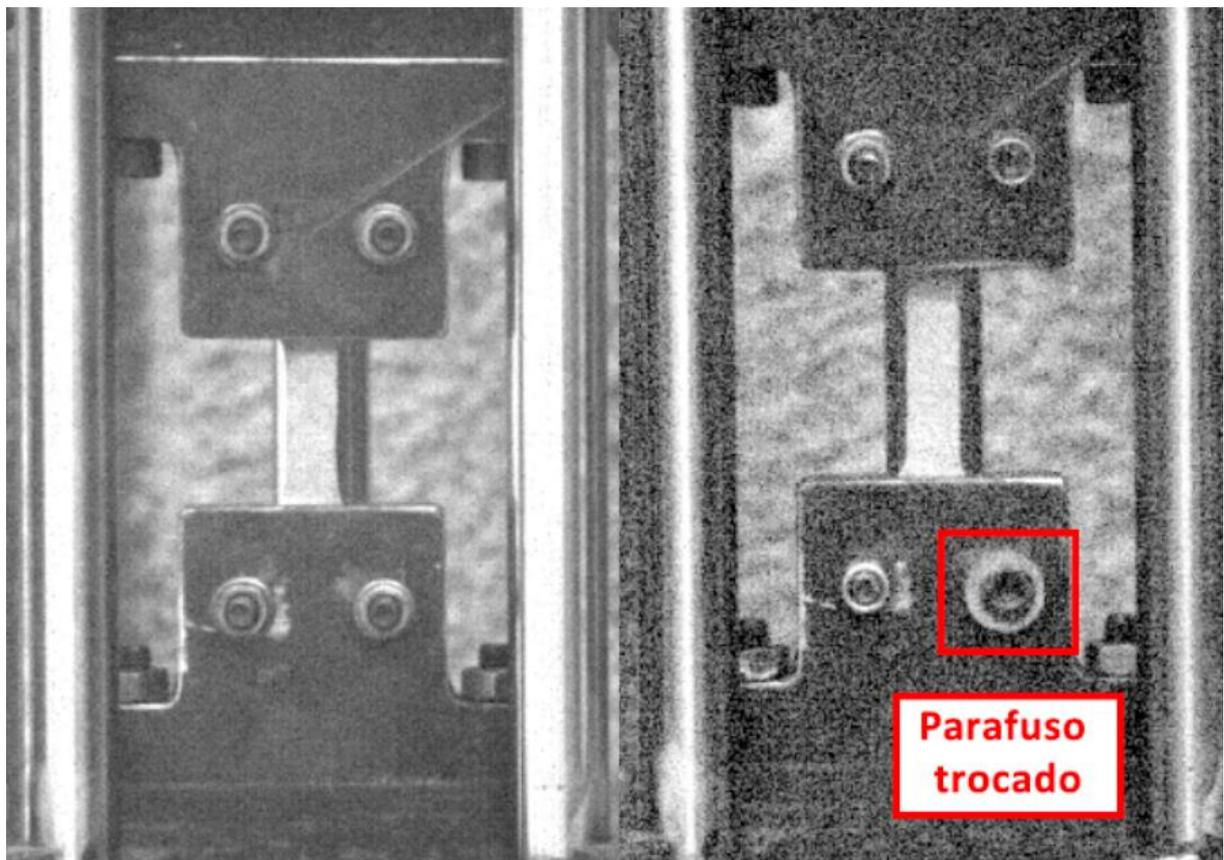


Figura 18 – Parafuso trocado.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

Para a versão final, deve-se atentar às imperfeições geométricas que descentralizem o corpo de prova de modo a manter a uniaxialidade do sistema. Os componentes devem ser fabricados de modo a conferir correta simetria do equipamento. Outras opções de geometria de garra devem ser levadas em consideração, e o motivo do desgaste dos parafusos deve ser estudado, de modo a tornar o projeto mais duradouro, e garantir a repetibilidade dos testes.

#### 4.3.2 Barras

O protótipo contém seis barras, como mostra a figura 8, as quais promovem a rigidez do sistema. Porém, analisando as imagens capturadas pela câmera de alta velocidade, foi possível observar certa liberdade do dispositivo ao se movimentar em torno de seu centro geométrico horizontalmente, a figura 19 demonstra a orientação das movimentações horizontais.

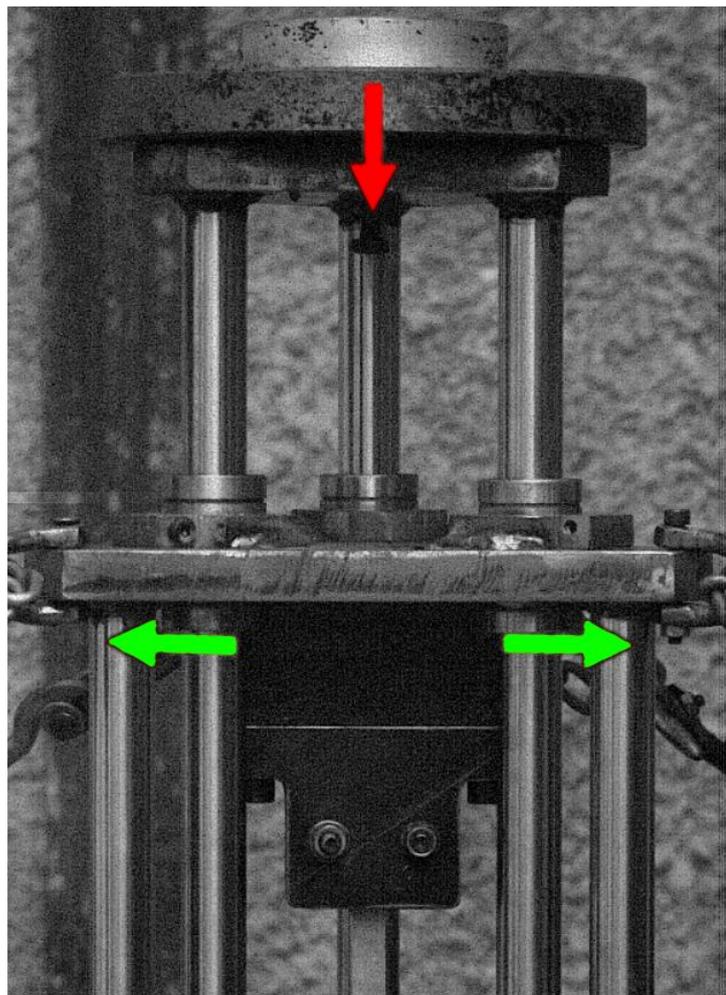


Figura 19 – Indicador de direção das forças.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

A figura 19 demonstra as movimentações do dispositivo durante a realização do teste: em vermelho o movimento uniaxial que é o esperado, e em verde, estão representados os movimentos horizontais ocasionados por vibrações do dispositivo. Este movimento pode comprometer a correta execução do ensaio pois há dissipação de esforços e também compromete a correta fixação dos componentes nas bases, que podem sofrer desgaste, causando folgas. A figura 20 representa um determinado instante, observado no sistema *Phantom Camera Control* (PCC).

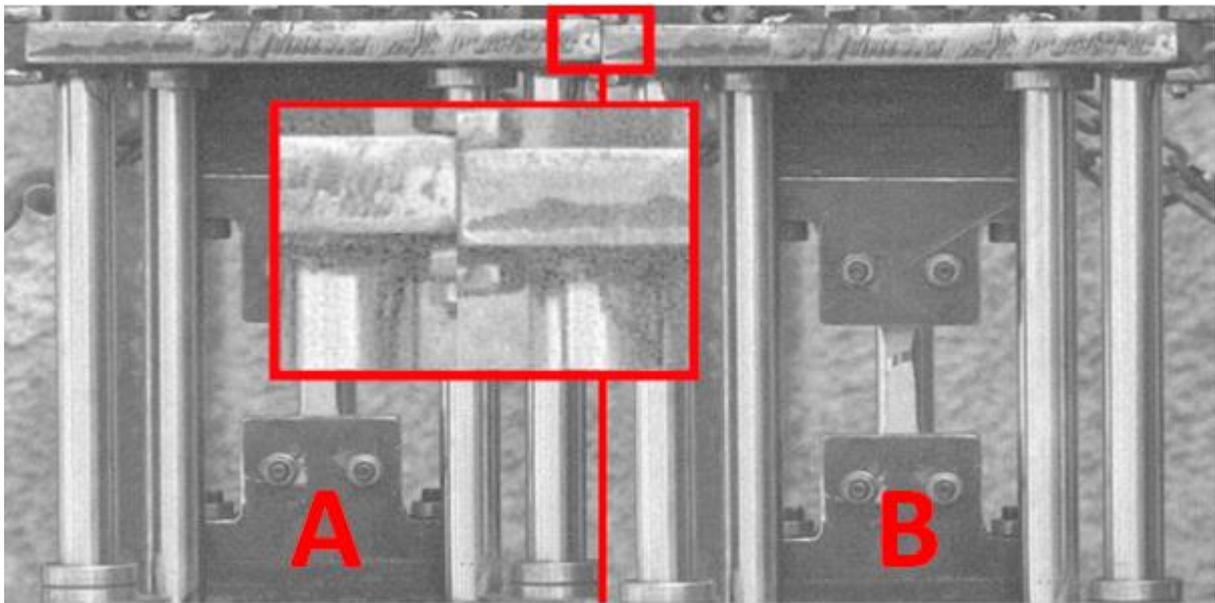


Figura 20 – Angulação pós impacto.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

A figura 20 mostra quadro antes do impacto, instante “A”, e o instante “B” após a colisão, sendo possível observar, quando o dispositivo sofre o impacto, o lado esquerdo da base desloca antes do lado direito causando angulação. O mesmo problema ocorre para o lado direito, com trepidações e movimentos horizontais não esperados para o ensaio. Este problema pode comprometer a distribuição uniforme de forças no corpo de prova e promover dissipação de energia, e ocorre, pois, a geometria de três barras permite que o sistema sofra com movimentações horizontais.

Como mencionado previamente, a presença de movimentações horizontais e verticais, que não são esperadas, e não fazem parte da correta execução dos testes, podem comprometer os resultados, bem como invalidar os testes, pois estas se refletem diretamente no gráfico tensão-deformação, que é o produto final de um ensaio de tração.

Para a construção da versão final do equipamento recomenda-se a utilização de 4 barras, de modo a garantir maior rigidez durante a movimentação das bases conforme explica a seção 3.2.2. Além disso as barras devem ser reforçadas, utilizando barras de maiores diâmetros, para que o ensaio possa ser realizado com cargas maiores.

### **4.3.3 Rolamento Linear**

Um rolamento linear é um componente mecânico que consiste em um trilho linear e uma série de esferas, que são inseridas em um conjunto de gaiolas, que permitem a movimentação no eixo, sendo utilizado para guiar ou suportar o movimento linear de uma carga, com o objetivo de reduzir o atrito e aumentar a eficiência do sistema.

Porém, se uma carga cisalhante for aplicada nas esferas de um rolamento linear, ou seja, uma força que age na direção tangencial ao eixo, isso pode danificar o rolamento. O rolamento não é projetado para suportar cargas cisalhantes e, caso aplicadas, as esferas podem sair do trilho linear, causando falhas e danos ao equipamento. A figura 19 e a seção 4.3.2, comprovam que neste ensaio há movimentação horizontal do dispositivo, o que pode ser prejudicial aos rolamentos lineares.

Uma solução é a utilização da bucha grafitada, que é frequentemente usada como guia linear para pistões dos equipamentos de ensaio de tração, ajudando a garantir um movimento suave e preciso durante o ensaio de tração, reduzindo o desgaste em componentes críticos. Além disso resiste melhor aos esforços cisalhantes e permite maior carga, sendo uma opção que deve ser avaliada como melhoria para um dispositivo futuro.

## **4.4 Ajuste e tolerância**

O dispositivo apresentou oportunidades de melhoria quanto a sua rigidez, principal indicador de confiabilidade do dispositivo, conforme citado na seção 3.3. O principal ponto de atenção foi a vibração nos eixos deslizantes ocasionadas pelo encaixe entre as peças fixas do dispositivo.

O encaixe utilizado foi deslizante justo (McCauley, 2012) com a montagem sendo realizada a mão com algum esforço. O uso de um ajuste deslizante justo em montagem de equipamentos pode apresentar alguns problemas na aplicação deste dispositivo, como problemas de vibração, caso o ajuste não for dimensionado corretamente ou estiver desgastado, ocorre vibração excessiva nos componentes, como mencionado na seção 4.3.3.

Para solucionar os problemas supracitados foram feitos cordões de solda nos encaixes das bases com as barras fixas para garantir a estaticidade da estrutura como mostra a figura 21.

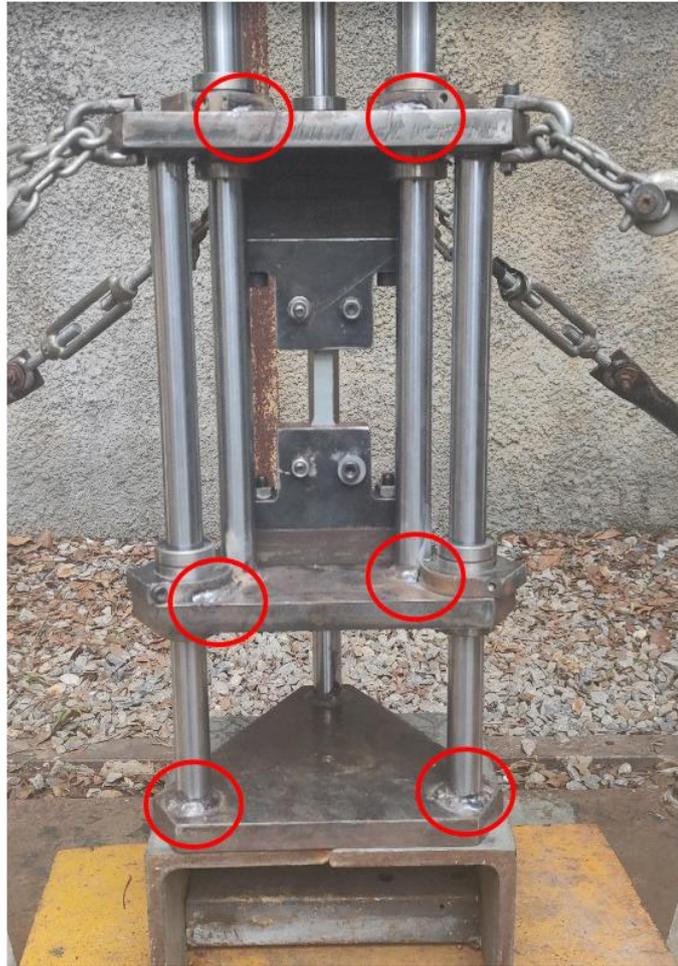


Figura 21 – Cordões de solda.  
Fonte – Pesquisa direta (2022).

A figura 21 expõe alguns cordões de solda realizados em pontos onde há acoplamento de peças. Visando maior estabilidade no dispositivo devem ser realizados ajustes do tipo forçado duro ou à pressão com esforço.

#### **4.5 Análise dos corpos de prova**

Na figura 22 está representada a evolução do ensaio de tração dinâmico.

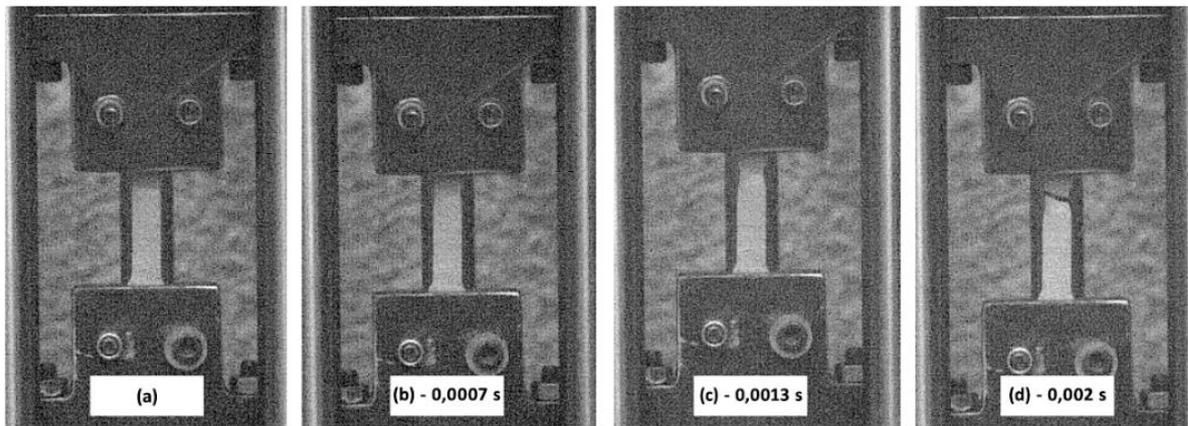


FIGURA 22 - Corpo de durante ensaio.  
FONTE: Pesquisa direta (2022).

A figura 22 ilustra o ensaio, sendo o momento (a) o momento antes ao impacto, e os momentos (b), (c), e (d) frames após a colisão, sendo demonstrados os segundos para a finalização do ensaio, que ocorre dentro de 2 milissegundos. A figura 23 demonstra corpos de prova após realização do ensaio de tração dinâmico.



FIGURA 23 - Corpo de prova pós ensaio.  
FONTE: Pesquisa direta (2022).

Os resultados obtidos (figura 23) reforçam a teoria embasada pelos trabalhos de DIETER (1961) e MIRONE et al. (2017). A teoria afirma que ensaios sob alta velocidade pode ocasionar fratura prematura e fora do centro geométrico do corpo de prova, conforme seção 2.2.

Além disso, é importante ressaltar que o dispositivo construído (protótipo) foi capaz de executar o ensaio de tração de dinâmico, visto que, a taxa de deformação resultante do corpo de prova foi de, aproximadamente,  $650 \text{ s}^{-1}$  ( $\dot{\epsilon} = v/l$ ). Para cálculo dessa taxa de deformação considerou-se que a velocidade de colisão da massa em queda sobre o dispositivo de compressão foi de 4,42 m/s ( $v = \sqrt{2 * 9,81 * 1}$ ) e que as perdas devido a colisão parcialmente inelástica resultaram numa velocidade média de deformação do corpo de prova de 3,54 m/s e um alongamento médio de 0,0054 m (desvio padrão de 0,00012). Ainda, considerando que o  $l_0$ , comprimento do corpo de prova antes do ensaio, foi de 50 mm e que o  $l_f$ , comprimento médio do corpo de prova após os ensaios, foi de 55,4 mm, logo, o alongamento percentual foi de, aproximadamente, 12%. Este resultado sugere que o alongamento percentual do Aço 1006 (corpo de prova) diminui com o aumento da taxa de deformação, visto que, Onzi (2022) descreve em seu trabalho que o alongamento percentual referente a esse material é de 20% para o ensaio realizado na condição quase estático. Wei *et al.* (2007) avaliou a resistência mecânica de um Aço TRIP considerando a variação da taxa de deformação, seus resultados sugerem que quanto maior a taxa de deformação maior a resistência mecânica e menor o alongamento percentual para o aço estudado. Apesar de não ter sido o mesmo material, os resultados de Wei *et al.* (2007) corroboram para sustentar os obtidos no presente trabalho, no qual observou se que o aumento da taxa de deformação resultou em uma diminuição do alongamento percentual.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusão

A revisão da base teórica acerca da taxa de deformação, do projeto mecânico, dos ensaios de tração em condição quase estático e dinâmico contribuíram para o desenvolvimento do trabalho, bem como, nas discussões dos resultados.

O dispositivo para realização do ensaio de tração dinâmico foi construído embasando se no projeto desenvolvido por Sousa (2018). Logo, para o desenvolvimento do dispositivo de tração dinâmica utilizou-se do recurso da engenharia reversa para dimensionamento e seleção dos materiais utilizados na sua construção.

Foi avaliado o comportamento estrutural do dispositivo durante a realização do ensaio por meio de uma câmera de alta velocidade. Então, observou-se as principais variáveis presentes no sistema, que resultaram no indicador principal, a rigidez. Durante os testes foram observadas vibrações e rotações que podem influenciar na repetibilidade dos ensaios.

Embora o dispositivo tenha apresentado baixa rigidez localizada, a exemplo da rotação da base móvel ocasionada por folga e por estar fixada somente a três eixos, é importante ressaltar que o dispositivo suportou às solicitações impostas (colisão) e promoveu a ruptura de todos os corpos de prova ensaiados. Além disso, cumpriu o requisito referente a tração dinâmica, visto que, a taxa de deformação resultante do corpo de prova foi de, aproximadamente,  $650 \text{ s}^{-1}$ .

Apesar da baixa rigidez localizada do dispositivo, os corpos de prova apresentaram deformações e rupturas similares, logo, sugerem que são réplicas. Os resultados obtidos no teste dinâmico, referentes ao alongamento percentual dos corpos de prova, foram de, aproximadamente, 12%, no entanto, a literatura descreve que para o material utilizado (aço SAE 1006) o alongamento percentual, considerando o teste quase estático, é de 20%. Portanto, este resultado sugere que o aumento da taxa de deformação diminui significativamente o alongamento percentual.

## **5.2 Recomendações para trabalhos futuros**

Os resultados obtidos nesse trabalho estabelecem novas perspectivas de estudo. Podem-se destacar como possíveis sugestões para trabalhos futuros:

- Construção de um dispositivo para realização do ensaio de tração dinâmico utilizando 8 barras de modo a conferir maior rigidez ao dispositivo;
- Estudo do comportamento da bucha grafitada em substituição ao rolamento linear quando submetidos a esforços triaxiais.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GAMA, Bazle; SERGEY, L. Lopatnikov; GILLESPIE, W. *Hopkinson bar experimental technique: A critical review*. [s.l.]. American Society of Mechanical Engineers, 2004.

CHEN, W.; SONG, B. *Split Hopkinson (kolsky) Bar: Design, Testing and Applications*. Nova Iorque, Springer, 2011.

KOLSKY, H. *An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading*. Proc. Phys. Soc. Londres B62, 1949.

GRAY, G.T. III. *An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading*. ASM Handbook, Vol. 8, p. 462-476, 1998.

MIRONE G., CORALLO D., BARBAGALLO R. *Experimental issues in tensile Hopkinson bar testing and a model of dynamic hardening*. International Journal of Impact Engineering, Vol. 103, p. 180-194, 2017.

DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. Nova Iorque, McGraw-Hill, 1961.

EKRAMI, A. *Materials Letters High temperature mechanical properties of dual phase steels*. [s.l.], Materials Letters, 2005.

HIBBELER, R.C. *Resistência dos Materiais*. São Paulo, Pearson, 5ª. ed., 2003.

SCHAEFFER, L. *Conformação Mecânica*. Porto Alegre, Imprensa Livre, 2ª ed, 2004.

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

SOUZA, S. A. *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: fundamentos teóricos e práticos*. São Paulo, E. Blucher, 5. ed., 1982.

TANG, J., HE, M., QIAO, Y., XIA, M., TAO, Z. *Tensile behavior of a novel high-strength and high-toughness steel at strain rates from  $0.1 s^{-1}$  to  $1000 s^{-1}$* . [s.l.], Construction and Building Materials, 2021.

WANG, W, LIU, B, KODUR, V.P.E. *Effect of Temperature on Strength and Elastic Modulus of High-Strength Steel*. [s.l.], J. Mater. Civ. Eng., 2013.

WEI, X., FU, R., LI, L. *Tensile deformation behavior of cold-rolled TRIP-aided steels over large range of strain rates*. [s.l.], Materials Science and Engineering A, 2007.

MCCAULEY, C. *Machinery's Handbook*. New York, Industrial Press Inc, 2012.

GARCIA, A; SPIM, J.; SANTOS, C. *Ensaio dos Materiais*. Rio de Janeiro, LTC, 2012.

ASHBY, M. *Seleção de Materiais no Projeto Mecânico*. Rio de Janeiro, Elsevier, 2012.

KAISER, Michael Adam. *Advancements in the Split Hopkinson Bar Test*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. 1998.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre, Editora da UFRGS, 1ª Ed, 2009.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo, Editora Atlas, 4ª Ed, 2002.

VEGARA, Sylvia Constant. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. São Paulo, Atlas, 12. Ed, 2010.

NORTON, R.L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. Porto Alegre, Ed. AMGH / Mc Graw Hill, 1ª. ed. 2009.

ASTM E8. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM International, 2007.

YOUNG, Hugh; FREEDMAN, Roger. **Física de Sears & Zemansky: Mecânica**. Rio de Janeiro, Pearson Universidades, 14ª edição, 2015.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física – Mecânica**. [s.l.], LTC, Vol. 1, 2016.

SHIGLEY, J.E.; MITCHELL, L.D. *Mechanical Engineering Design*. Nova Iorque, McGraw-Hill, 4th Ed., 1993.

MARCONI, Marina; LAKATOS, Eva. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo, Atlas, 2005.

ONZI, C. L. *Avaliação do retorno elástico no processo de dobramento empregando aço SAE 1006*. Dissertação de Mestrado Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.

ULRICH, K. T. *The role of product architecture in the manufacturing firm*. [s.l.], Research Policy, v. 24, n. 3, p. 419-440, 1995.

Chikofsky, E. J., & Cross, J. H. *Reverse engineering and design recovery: A review*. In *Advances in software engineering and knowledge engineering*. Alburn, World Scientific, 1990.

Voas, J. M. *Engineering reverse engineering*. California, IEEE Software, 2004.