



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



**MATHEUS ALVES LINHARES**

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA CAPACIDADE DE  
ABSORVER ENERGIA DE TUBOS COM MESMA ÁREA DE SEÇÃO  
TRANSVERSAL QUANDO SUBMETIDOS A SITUAÇÃO DE COLISÃO**

**OURO PRETO - MG**  
**2025**

**MATHEUS ALVES LINHARES**  
**matalves10@gmail.com**

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA CAPACIDADE DE  
ABSORVER ENERGIA DE TUBOS COM MESMA ÁREA DE SEÇÃO  
TRANSVERSAL QUANDO SUBMETIDOS A SITUAÇÃO DE COLISÃO**

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

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

**OURO PRETO – MG**  
**2025**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L755a Linhares, Matheus Alves.

Análise de influência da geometria na capacidade de absorver energia de tubos com mesma área de seção transversal quando submetidos a situação de colisão. [manuscrito] / Matheus Alves Linhares. - 2025.  
48 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. Tubos - Geometria. 2. Energia - Transferência - Absorção. 3. Deformações (Mecânica) - Deformação Plástica. 4. Deformações (Mecânica) - Taxa de Deformação. I. Sousa, Diogo Antônio de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Matheus Alves Linhares**

**Análise da influência da geometria na capacidade de absorver energia de tubos com mesma área de seção transversal quando submetidos a situação de colisão**

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

Aprovada em 14 de agosto de 2025

Membros da banca

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

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/08/2025



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/08/2025, às 15:48, 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 **0962875** e o código CRC **9FE3D264**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.010344/2025-81

SEI nº 0962875

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163  
Telefone: (31)3559-1533 - [www.ufop.br](http://www.ufop.br)

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

A Ana Luiza Fernandes Moraes por todo carinho e companheirismo nos momentos difíceis.

## **AGRADECIMENTO**

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

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

Aos meus pais por sempre me incentivarem a correr atrás dos meus sonhos.

*“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas”.*

Claude Lévi-Strauss

## RESUMO

Este trabalho analisa a influência da geometria de tubos com mesma área de seção transversal na capacidade de absorção de energia em colisões. A motivação decorre da necessidade de otimizar dispositivos de segurança veicular e de contenção viária, nos quais a eficiência de dissipação de energia por deformação plástica é fundamental para reduzir danos e riscos aos ocupantes e ao meio ambiente. O objetivo geral consiste em comparar o desempenho de tubos circulares e quadrados, mantendo constante a área de seção transversal, por meio de ensaios de impacto controlado em duas condições de colisão distintas. A metodologia adotada envolveu doze ensaios de queda de martelo em corpos de prova de aço SAE 1010, com captação de imagens em alta velocidade e análise das curvas de deslocamento, estimativa de impulsos, cálculo de forças médias, avaliação das taxas de deformação e identificação dos modos de colapso. Os resultados demonstraram que, em ambas as condições de impacto, os tubos quadrados atingem deslocamentos máximos (deformação) superiores aos dos circulares, 0,1257 m contra 0,0878 m para a condição 1 e 0,1350 m contra 0,0819 m para a condição 2. Os tubos quadrados também apresentam taxas médias de deformação maiores que os circulares sendo,  $17,6072 \text{ s}^{-1}$  contra  $11,9857 \text{ s}^{-1}$  para a condição 1 e  $29,0682 \text{ s}^{-1}$  contra  $21,3099 \text{ s}^{-1}$  para a condição 2, promovendo resposta mais gradual e amortecimento progressivo mais eficiente. Em regime de alta velocidade, o perfil quadrado prolonga o tempo de contato e reduz picos de força média em até 21%. Cálculos de carga crítica por flambagem segundo a teoria de Euler indicaram valores muito superiores às forças de impacto, sendo 191,80 kN contra 39,93 kN para os tubos de seção circular e 154,58 kN contra 36,98 kN para os tubos de seção quadrada. Conclui-se que a geometria quadrada oferece maior eficiência na dissipação de energia em aplicações que exigem desaceleração controlada, como em *crash boxes* automotivos e em defensas viárias, enquanto o perfil circular apresenta maior rigidez inicial, sendo indicado em dispositivos que demandam resposta imediata, como em suportes estruturais.

**Palavras-chave:** Geometria de tubos. Absorção de Energia. Deformação plástica. Taxa de deformação.

## ABSTRACT

This study analyzes the influence of the geometry of tubes with the same cross-sectional area on their energy absorption capacity in collisions. The motivation stems from the need to optimize vehicle safety and road restraint devices, in which the efficiency of energy dissipation through plastic deformation is fundamental to reducing damage and risks to occupants and the environment. The overall objective is to compare the performance of circular and square tubes, keeping the cross-sectional area constant, through controlled impact tests under two different collision conditions. The methodology adopted involved twelve hammer drop tests on SAE 1010 steel test specimens, with high-speed image capture and analysis of displacement curves, impulse estimation, calculation of average forces, evaluation of deformation rates, and identification of collapse modes. The results showed that, in both impact conditions, square tubes achieve maximum displacements greater than those of circular tubes, 0.1257 m versus 0.0878 m for condition 1 and 0.1350 m versus 0.0819 m for condition 2. Square tubes also have higher average deformation rates than circular tubes, 17.6072 s<sup>-1</sup> versus 11.9857 s<sup>-1</sup> for condition 1 and 29.0682 s<sup>-1</sup> versus 21.3099 s<sup>-1</sup> for condition 2, promoting a more gradual response and more efficient progressive damping. At high speeds, the square profile prolongs contact time and reduces average force peaks by up to 21%. Critical buckling load calculations according to Euler's theory indicated values much higher than the impact forces, with 191.80 kN versus 39.93 kN for circular section tubes and 154.58 kN versus 36.98 kN for square section tubes. It is concluded that the square geometry offers greater efficiency in energy dissipation in applications that require controlled deceleration, such as in automotive crash boxes and road barriers, while the circular profile has greater initial stiffness, being indicated in devices that require immediate response, such as in structural supports.

Key-words: Tube geometry. Energy absorption. Plastic deformation. Strain rate.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Crash box em um automóvel.....                                                                                               | 2  |
| Figura 2 - Gráfico típico de tensão x deformação de um ensaio de tração.....                                                            | 6  |
| Figura 3 - Coluna sem flambagem e com flambagem.....                                                                                    | 8  |
| Figura 4 - Fatores de comprimento efetivo para diferentes tipos de fixação de coluna .....                                              | 9  |
| Figura 5 - Flambagem inelástica localizada .....                                                                                        | 11 |
| Figura 6 - Força impulsiva $F(t)$ variando com o tempo.....                                                                             | 13 |
| Figura 7 - (a) esferas em um impacto central; (b) esferas em um impacto oblíquo .....                                                   | 14 |
| Figura 8 - Um corpo se move de cima para baixo .....                                                                                    | 15 |
| Figura 9 - Representação esquemática de uma colisão inelástica .....                                                                    | 17 |
| Figura 10 - Processo de laminação de tubos sem costura.....                                                                             | 19 |
| Figura 11 - Fabricação de tubos por extrusão.....                                                                                       | 20 |
| Figura 12 - Fabricação de tubos a partir de bobinas de chapa.....                                                                       | 21 |
| Figura 13- Tubo com solda helicoidal.....                                                                                               | 22 |
| Figura 14 - Modos de colapso para tubos circulares sob carga axial: (a) modo de anel; (b) modo de diamante e (c) modo misto.....        | 22 |
| Figura 15 - Curva típica de força-deslocamento em tubo circular .....                                                                   | 23 |
| Figura 16 - Curva típica de força-deslocamento em tubo quadrado.....                                                                    | 23 |
| Figura 17 - Modos de colapso para tubos quadrados: (a) modo compacto (tubo $c/h = 23$ ); (b) modo não compacto (tubo $c/h = 100$ )..... | 24 |
| Figura 18 - Fluxograma das etapas da metodologia de pesquisa .....                                                                      | 26 |
| Figura 19 - (a) Área da seção transversal quadrada; (b) Área da seção transversal circular....                                          | 27 |
| Figura 20 - Corpos de prova de seção transversal circular prontos para os testes de colisão ..                                          | 28 |
| Figura 21 - Torre de colisão .....                                                                                                      | 29 |
| Figura 22 - Martelo de colisão.....                                                                                                     | 30 |
| Figura 23 - Corpo de prova redondo fixado na base. ....                                                                                 | 31 |
| Figura 24 - Câmera de alta velocidade .....                                                                                             | 32 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25 - Deformação do tubo circular: (a) antes da colisão; (b) durante a colisão; (c) após a colisão ..... | 34 |
| Figura 26 - Gráfico com as curvas de deslocamento .....                                                        | 35 |
| Figura 27 - Deformação do tubo circular: (a) antes da colisão; (b) durante a colisão; (c) após a colisão ..... | 36 |
| Figura 28 - Gráfico com as curvas de deslocamento .....                                                        | 36 |
| Figura 29 - Deformação do tubo quadrado: (a) antes da colisão; (b) durante a colisão; (c) após a colisão ..... | 37 |
| Figura 30 - Gráfico com as curvas de deslocamento .....                                                        | 37 |
| Figura 31 - Deformação do tubo quadrado: (a) antes da colisão; (b) durante a colisão; (c) após a colisão ..... | 38 |
| Figura 32 - Gráfico com as curvas de deslocamento .....                                                        | 39 |
| Figura 33 - Gráfico com as Curvas de Deslocamento .....                                                        | 40 |

**LISTA DE TABELAS**

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Condições dos ensaios.....                     | 30 |
| Tabela 2 - Variáveis e indicadores .....                  | 32 |
| Tabela 3 - Condições de colisão .....                     | 34 |
| Tabela 4 - Tempo de colisão médio nos ensaios .....       | 41 |
| Tabela 5 - Força média de deformação da amostra .....     | 41 |
| Tabela 6 - Carga crítica e tensão crítica calculados..... | 42 |
| Tabela 7 - Velocidades médias obtidas nos ensaios .....   | 42 |
| Tabela 8 - Taxas de deformação média calculadas .....     | 42 |

**LISTA DE SIMBOLOS**

$u$  = Energia de deformação

$\Delta U$  = Variação da energia interna

$\Delta V$  = Variação do volume

$\sigma$  = Tensão de engenharia

$\epsilon$  = Deformação de engenharia

$E$  = Módulo de elasticidade ou Módulo de Young

$\dot{\epsilon}$  = Taxa de deformação convencional

$v$  = Velocidade

$L_0$  = Comprimento inicial

$\dot{\epsilon}$  = Taxa de deformação verdadeira

$P_{cr}$  = Carga crítica ou carga axial máxima na coluna imediatamente antes da flambagem

$L$  = Comprimento da coluna

$K$  = Fator de comprimento efetivo

$L_e$  = Comprimento efetivo

$r$  = Raio de giração da coluna

$I$  = Momento de inércia

$A$  = Área da seção transversal

$\vec{p}$  = Quantidade de movimento

$m$  = Massa

$\vec{v}$  = Velocidade

$\sum \vec{F}$  = Força resultante

$\vec{a}$  = Aceleração

$U$  = Energia potencial gravitacional

$g$  = Aceleração devida à gravidade

$y$  = Coordenada vertical do objeto

$m_1$  = Massa do corpo 1

$m_2$  = Massa do corpo 2

$v_{1i}$  = Velocidade do objeto 1 antes da colisão

$v_{2i}$  = Velocidade do objeto 2 antes da colisão

$v_{1f}$  = Velocidade do objeto 1 depois da colisão

$v_{2f}$  = Velocidade do objeto 2 depois da colisão

$V$  = Velocidade final dos corpos

## SUMÁRIO

|          |                                                  |           |
|----------|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                          | <b>1</b>  |
| 1.1      | Formulação do Problema.....                      | 1         |
| 1.2      | Justificativa.....                               | 3         |
| 1.3      | Objetivos.....                                   | 4         |
| 1.3.1    | Geral .....                                      | 4         |
| 1.3.2    | Específicos.....                                 | 4         |
| 1.4      | Estrutura do Trabalho .....                      | 4         |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>               | <b>5</b>  |
| 2.1      | Resistência dos Materiais .....                  | 5         |
| 2.1.1    | Energia de Deformação .....                      | 5         |
| 2.1.2    | Deformação Plástica .....                        | 6         |
| 2.1.3    | Taxa de Deformação.....                          | 7         |
| 2.2      | Flambagem de Colunas .....                       | 8         |
| 2.3      | Conservação de Movimento .....                   | 11        |
| 2.3.1    | Impulso e Quantidade de Movimento .....          | 12        |
| 2.4      | Energia Mecânica: Impacto .....                  | 13        |
| 2.4.1    | Energia Cinética .....                           | 14        |
| 2.4.2    | Energia Potencial Gravitacional .....            | 15        |
| 2.5      | Colisões .....                                   | 16        |
| 2.5.1    | Colisão Elástica .....                           | 16        |
| 2.5.2    | Colisão Inelástica.....                          | 17        |
| 2.5.3    | Colisão Perfeitamente Inelástica .....           | 18        |
| 2.6      | Fabricação de Tubos.....                         | 19        |
| 2.6.1    | Fabricação de Tubos por Laminação.....           | 19        |
| 2.6.2    | Fabricação de Tubos por Extrusão e Fundição..... | 20        |
| 2.6.3    | Fabricação de Tubos com Costura.....             | 20        |
| 2.7      | Deformação de Estruturas Tubulares .....         | 22        |
| 2.7.1    | Tubos circulares.....                            | 22        |
| 2.7.2    | Tubos quadrados.....                             | 23        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                          | <b>25</b> |
| 3.1      | Tipo de pesquisa .....                           | 25        |
| 3.2      | Materiais e métodos.....                         | 26        |

|          |                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1    | Corpo de prova .....                                     | 27        |
| 3.2.2    | Experimento de colisão .....                             | 28        |
| 3.3      | Variáveis e indicadores.....                             | 31        |
| 3.4      | Instrumento de coleta de dados .....                     | 32        |
| 3.5      | Tabulação dos dados.....                                 | 33        |
| 3.6      | Considerações finais do capítulo .....                   | 33        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                                  | <b>34</b> |
| 4.1      | Deformação dos tubos de seção transversal circular ..... | 34        |
| 4.2      | Deformação dos tubos de seção transversal quadrada.....  | 37        |
| 4.3      | Análise comparativa dos resultados .....                 | 39        |
| 4.3.1    | Impulso e força de impacto .....                         | 40        |
| 4.3.2    | Flambagem .....                                          | 41        |
| 4.3.3    | Taxa de deformação nos tubos .....                       | 42        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>                  | <b>44</b> |
| 5.1      | Conclusões.....                                          | 44        |
| 5.2      | Recomendações para trabalhos futuros .....               | 45        |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                  | <b>46</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (2023), todos os anos mais de 1,35 milhão de pessoas morrem nas estradas no mundo. A maioria (93%) dessas mortes ocorrem em países de baixa e média renda, embora esses países tenham apenas 60% dos veículos do mundo (OMS, 2023). As mortes no trânsito são a principal causa de morte entre pessoas de 5 a 29 anos e tornar as estradas mais seguras requer melhorar a infraestrutura, tornar os veículos mais seguros e mudar o comportamento dos usuários das estradas (OMS, 2023). No Brasil, o número oficializado em 2018 foi de 38.651 fatalidades devido a acidentes de trânsito (WHO, 2023). De acordo com a Polícia Rodoviária Federal (PRF), 6.160 pessoas morreram e 84.526 ficaram feridas em meio a 73.156 sinistros de trânsito registrados entre janeiro e dezembro de 2024 nas estradas federais do Brasil (PEDUZZI, 2025).

Os dispositivos de segurança veicular podem ser classificados quanto a sua atuação, podendo trabalhar de forma ativa ou passiva (IKEDA, 2012). Segundo Ikeda (2012), na segurança ativa os dispositivos atuam na contenção do acidente na sua iminência, na tentativa de impedir que o acidente ocorra. Já na segurança passiva, os dispositivos atuam no momento da colisão ou parada repentina, para evitar ou minimizar as lesões provocadas nos ocupantes do veículo (IKEDA, 2012). Ikeda (2012) afirma que alguns dos dispositivos de segurança veicular passiva são: cintos, encostos de cabeça, *airbags*, *crash box*, e a própria carroceria do veículo.

A área de impacto estrutural estuda os fenômenos que ocorrem quando há colisão de corpos, causando a alteração de seu movimento devido à atuação de forças por um curto período de tempo (AUERSVALDT, 2014). Segundo Garcia (2012), os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e/ou deformações.

Garcia (2012) ainda afirma que as duas finalidades mais importantes da execução dos ensaios são: permitir a obtenção de informações rotineiras do produto e desenvolver novas informações sobre os materiais.

Uma das grandes áreas de desenvolvimento do impacto estrutural é a segurança veicular, onde se deseja prever o comportamento da estrutura do veículo no momento de uma colisão.

As consequências de um acidente de trânsito estão diretamente ligadas à reação da estrutura às forças de impacto que resultam da colisão (AUERSVALDT, 2014).

Segundo Karvi (2023), além de proteger os ocupantes do veículo, a capacidade de absorver energia – tanto pela estrutura do automóvel quanto pelos dispositivos de segurança instalados nas rodovias – é essencial para aprimorar a segurança nas estradas e nas cidades. É possível encontrar dispositivos de proteção que protegem no caso de colisão de veículos, esse dispositivo se chama defesa metálica (ABNT, 2012). A NBR 6971 (ABNT, 2012) define tecnicamente defesa metálica como um dispositivo de contenção de proteção contínua, constituída por perfis metálicos, projetados em sua forma, resistência e dimensões, para conter e redirecionar os veículos desgovernados, absorvendo parte da energia cinética do veículo, pela deformação do dispositivo. Conhecidas também como *Guard Rail* ou barreira metálica, elas podem ser encontradas em locais de alto risco de acidentes, como em curvas acentuadas e perto de casas, para que evitem que veículos acidentados invadam as residências (KARVI, 2023).

A Figura 1 ilustra a posição e o funcionamento do crash box em um automóvel, indicando sua localização frontal e ao longo das longarinas laterais. À esquerda, o componente aparece intacto, com suas dobras estruturais bem definidas; à direita, observa-se o crash box após o impacto, deformado e comprimido de forma controlada. Essa comparação evidencia como o dispositivo absorve e dissipa a energia da colisão, reduzindo a transferência de forças para a cabine e aumentando a proteção dos ocupantes.

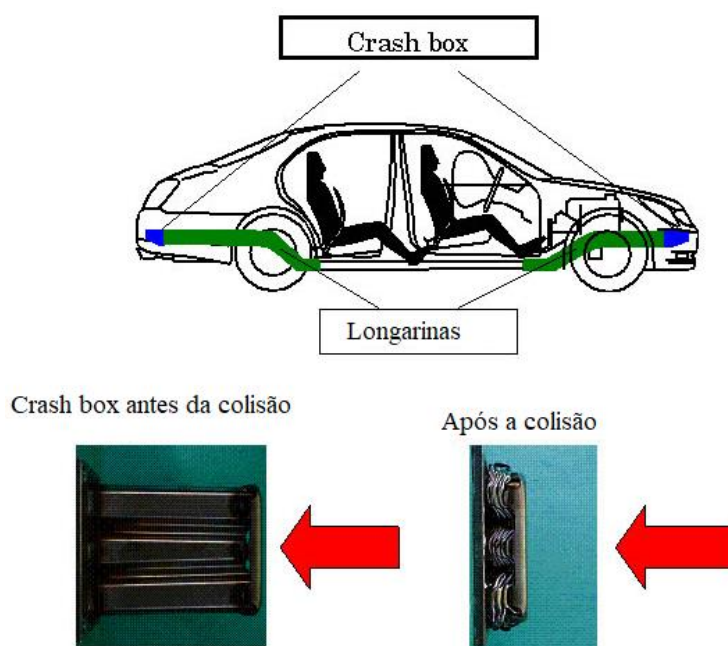


Figura 1 - Crash box em um automóvel  
Fonte: Adaptado de Nippon Steel Corporation (2008).

Visto a demanda pela caracterização de estruturas projetadas para absorver energia quando submetidos a fenômenos de impacto, como a colisão, este trabalho propõe fazer uma análise da capacidade de absorção de energia em tubos com diferentes geometrias e mesma área de seção transversal. Então, tem-se a seguinte pergunta problema:

**Como a geometria de tubos com a mesma área de seção transversal influencia na sua capacidade de absorção de energia quando submetidos a situação de colisão?**

## **1.2 Justificativa**

Em face a necessidade que a indústria possui em conhecer como os materiais e estruturas (geometria) se comportam quando submetidos a fenômenos de impacto e a suas capacidades de absorver energia, este trabalho explora a comparação entre tubos com diferentes geometrias, mas com a mesma área de seção transversal. Essa abordagem proporciona uma compreensão mais precisa e direta do papel da geometria na absorção de energia, isolando a influência da área da seção transversal.

A absorção de energia é um aspecto crucial e sua pesquisa é de grande relevância devido a diversas aplicações práticas. A compreensão dos efeitos da geometria na capacidade de absorção de energia desses tubos pode ter implicações significativas no desenvolvimento de estruturas e dispositivos de segurança mais eficientes e seguros, como sistemas de absorção de impacto, componentes de proteção em veículos, estruturas de proteção em construções e equipamentos de engenharia.

Estudos como o de Alves (2009), investigaram a influência conjunta da geometria e da espessura em perfis tubulares submetidos a carregamento quase-estático, mostrando que diferentes formas (circulares, quadradas e retangulares) apresentam regimes de colapso e eficiências energéticas bem distintos. Por sua vez, Gomes (2021) concentrou-se em perfis elípticos e trapezoidais sob deformação dinâmica, concluindo que ângulos de achatamento mais acentuados tendem a promover colapsos progressivos mais estáveis e maior dissipação de energia. Embora ambos os trabalhos enfatizem o papel fundamental da geometria na resposta ao impacto, eles variaram simultaneamente a área de seção transversal e a forma, o que impede de isolar o efeito da geometria.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Geral**

Analisar a influência da geometria da seção transversal de tubos na capacidade de absorver energia quando submetidos a um impacto, por meio de experimentos e análise de dados.

#### **1.3.2 Específicos**

- Apresentar um estudo teórico sobre resistência dos materiais, flambagem de colunas, conservação de movimento, energia mecânica, colisões, fabricação de tubos e deformação de estruturas tubulares;
- Produzir corpos de prova de seção transversal circular e quadrada (áreas iguais);
- Realizar ensaios de colisão para obtenção de dados experimentais de deformação em função do tempo;
- Analisar os resultados das curvas de deslocamento e dos dados de deformação e absorção de energia.

### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro 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 de resistência dos materiais, conservação de movimento, energia mecânica, colisões, fabricação de tubos e deformação de estruturas tubulares.

O terceiro capítulo trata-se da metodologia e como foi feito o ensaio para esta monografia.

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.

Por fim, tem-se as referências bibliográficas utilizadas durante todo o trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Resistência dos Materiais

O homem tem utilizado diversos tipos e formas de estruturas para a realização de suas atividades. Segundo Pinheiro e Crivelaro (2021), essas estruturas podem ser compostas por diversos elementos estruturais, como por exemplo, por madeiras, pedras, aço estrutural e concreto armado. As estruturas podem ter diferentes finalidades, como abrigos, elevadores, guinchos, pontes, veículos, entre outras; onde cada tipo de elemento estrutural tem suas características mecânicas e químicas próprias (PINHEIRO E CRIVELARO, 2021).

De acordo com Pinheiro e Crivelaro (2021), resistência dos materiais é a ciência que estuda as propriedades mecânicas dos elementos sólidos reais, com o objetivo de determinar as tensões e deformações que ocorrerão nos elementos estruturais.

#### 2.1.1 Energia de Deformação

Conforme Hibbeler (2010), quando um material é deformado por uma carga externa, tende a armazenar energia internamente em todo o seu volume. Como essa energia está relacionada com as deformações no material, ela é denominada energia de deformação. Ao convenientemente formular a energia de deformação por unidade de volume de material, denominada densidade de energia de deformação, pode-se expressar conforme Equação (1):

$$u = \frac{\Delta U}{\Delta V} = \frac{1}{2} \sigma \epsilon \quad (1)$$

Onde:

$u$  = Energia de deformação [J/m<sup>3</sup>];

$\Delta U$  = Variação da energia interna [J];

$\Delta V$  = Variação do volume [m<sup>3</sup>];

$\sigma$  = Tensão de engenharia [Pa];

$\epsilon$  = Deformação de engenharia.

Se o comportamento do material for linear elástico, então a lei de Hooke se aplica,  $\sigma = E\epsilon$  e, portanto, pode-se expressar a densidade de energia de deformação em termos da tensão uniaxial como na Equação (2):

$$u = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \quad (2)$$

Onde:

$E$  = Módulo de elasticidade ou Módulo de Young [Pa].

### 2.1.2 Deformação Plástica

De acordo com Hibbeler (2010), a deformação plástica caracteriza-se pelo escoamento irreversível do material quando submetido a tensões superiores ao limite de proporcionalidade. No regime elástico, as tensões e deformações mantêm relação linear conforme a lei de Hooke; ultrapassado o ponto de escoamento, inicia-se a deformação plástica, que persiste mesmo após a remoção da carga (HIBBELER, 2010).

Segundo Dieter (1981), no diagrama tensão  $\times$  deformação, o início da curva linear corresponde ao comportamento elástico. Logo após o limite de proporcionalidade, observa-se o escoamento, marcado por uma região de platô ou pequeno endurecimento, seguida pelo encruamento, em que a resistência ao fluxo plástico aumenta até a ruptura (DIETER, 1981). A área sob essa curva até o ponto de ruptura representa a energia específica de deformação absorvida pelo material.

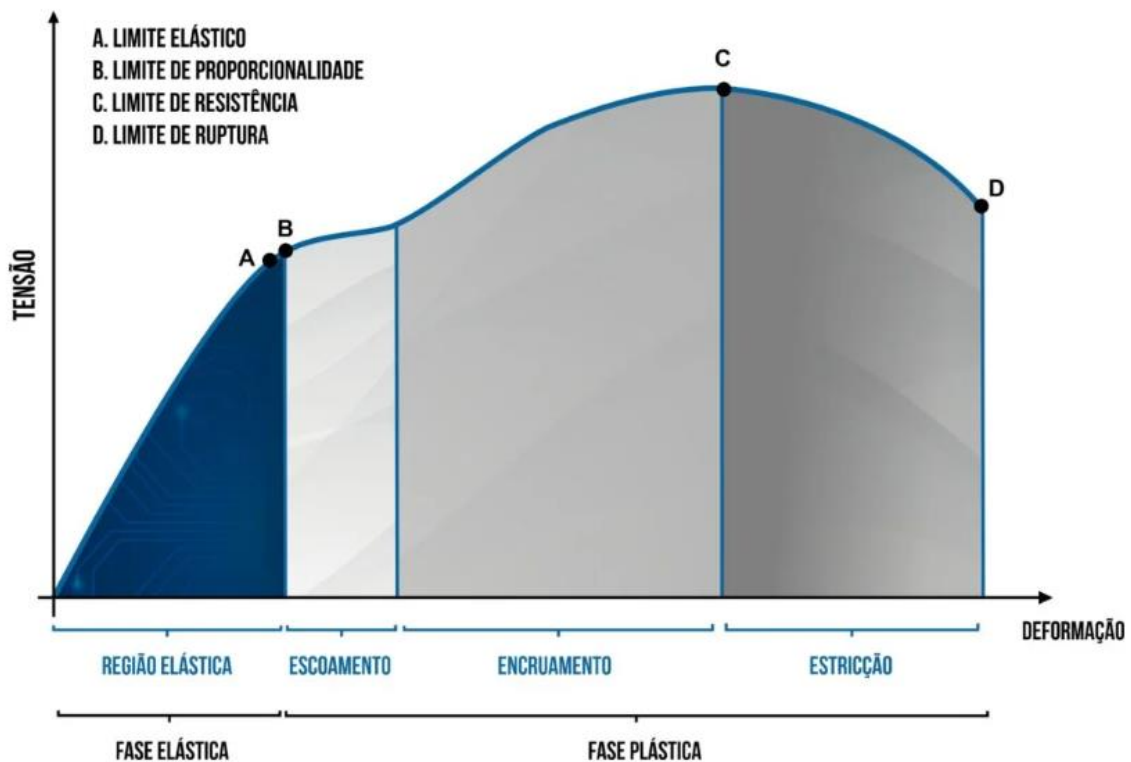


Figura 2 - Gráfico típico de tensão x deformação de um ensaio de tração  
Fonte: Adaptado de Biopdi (2023).

A partir das medidas de cargas e os respectivos alongamentos, constrói-se o gráfico de tensão x deformação, como mostra a Figura 2, a qual mostra essa relação para diferentes tipos de Metais. A análise dos gráficos obtidos com os ensaios de tração permite o levantamento de inúmeras informações sobre os materiais (BIOPDI, 2023).

Em estruturas tubulares submetidas a carregamento axial dinâmico, a deformação plástica localiza-se e progride formando dobras sucessivas. Modos de colapso como “anel”, “diamante” ou “compacto” dependem do índice de esbeltez e da geometria da seção (LU; YU, 2003). Cada dobra consome parte da energia de impacto, convertendo energia cinética em trabalho plástico de deformação.

A taxa de deformação exerce forte influência no comportamento plástico. Aços de baixo carbono, por exemplo, exibem aumento do limite de escoamento e da resistência à tração conforme a velocidade de deformação cresce, embora possam perder ductilidade em taxas muito elevadas (DIETER, 1981). Em ensaios de colisão, essa sensibilidade acelera o colapso local e altera o perfil de força–deslocamento

### 2.1.3 Taxa de Deformação

Conforme a taxa de deformação de aços de baixo carbono aumenta, a tensão de escoamento e o limite de resistência aumentam. No entanto o alongamento por muitas vezes reduz e a ruptura tende a ser frágil para taxas muito elevadas. Para Dieter (1981) a taxa de deformação depende da velocidade com que o material é deformado e de suas dimensões. A taxa de deformação expressa em termos da deformação linear convencional é dada pela Equação (3):

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d(L-L_0)/L_0}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L_0} \quad (3)$$

Onde:

$\dot{\epsilon}$  = Taxa de deformação convencional [s<sup>-1</sup>];

$v$  = Velocidade [m/s];

$L$  = Comprimento no instante que se avalia [m];

$L_0$  = Comprimento inicial [m].

De acordo com Dieter (1981), a taxa de deformação convencional é proporcional à velocidade. Nas máquinas onde a velocidade de deformação pode ser escolhida e controlada

com precisão, pode-se realizar de maneira simples ensaios de tração convencionais com taxa de deformação constante, onde a taxa de deformação verdadeira é dada pela Equação (4):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d[\ln(L-L_0)]}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L} \quad (4)$$

Onde:

$\dot{\varepsilon}$  = Taxa de deformação verdadeira [ $s^{-1}$ ];

A taxa de deformação verdadeira está relacionada à convencional conforme a seguinte Equação (5):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L} = \frac{L_0}{L} \frac{de}{dt} = \frac{1}{1+e} \frac{de}{dt} = \frac{\dot{e}}{1+e} \quad (5)$$

## 2.2 Flambagem de Colunas

Os tubos podem ser analisados como colunas sob uma carga de compressão durante o impacto. Como tal, no dimensionamento de estruturas deve-se levar em consideração a carga máxima para que não ocorra sua deflexão lateral denominada flambagem, levando a uma falha repentina e dramática da estrutura ou mecanismo (HIBBELER, 2010).

Hibbeler (2010) afirma que a carga axial máxima que uma coluna pode suportar quando está na iminência de sofrer flambagem é denominada carga crítica,  $P_{cr}$ . Qualquer carga adicional provocará flambagem na coluna e, portanto, deflexão lateral ou flambagem, como mostra na Figura 3.

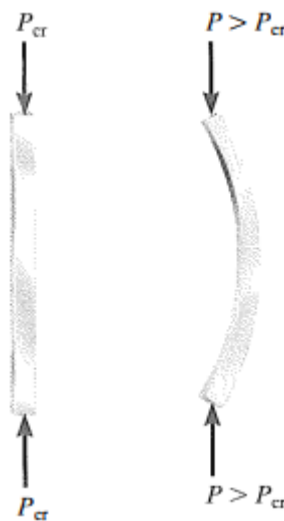


Figura 3 - Coluna sem flambagem e com flambagem  
Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010).

A Figura 3 representa uma coluna sem sofrer flambagem, à esquerda, e uma coluna com flambagem, à direita.

A equação da flambagem para uma coluna comprida e esbelta apoiada por pinos pode ser escrita conforme a Equação (6):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (6)$$

Onde:

$P_{cr}$  = Carga crítica ou carga axial máxima na coluna imediatamente antes da flambagem [N];

$E$  = Módulo de elasticidade para o material [Pa];

$I$  = Menor momento de inércia para a área da seção transversal da coluna [m<sup>4</sup>];

$L$  = Comprimento da coluna, cujas extremidades estejam presas por pinos [m].

Porém, a Equação (6) é a formula de Euler, que foi pensada para uma coluna suportada por pinos em ambas as extremidades, ela deve ser modificada quando os apoios forem diferentes. Para isso, Hibbeler (2010) descreve uma Equação (7) geral onde é levado em consideração um fator adimensional  $K$ , ilustrado na Figura 4, que depende do tipo de engaste nas extremidades da coluna e é utilizado para calcular o fator de comprimento efetivo,  $L_e$ . O fator  $K$  compensa o comprimento total da coluna, de forma que as extremidades delimitadas pelo comprimento efetivo sejam pontos onde há momento fletor nulo.

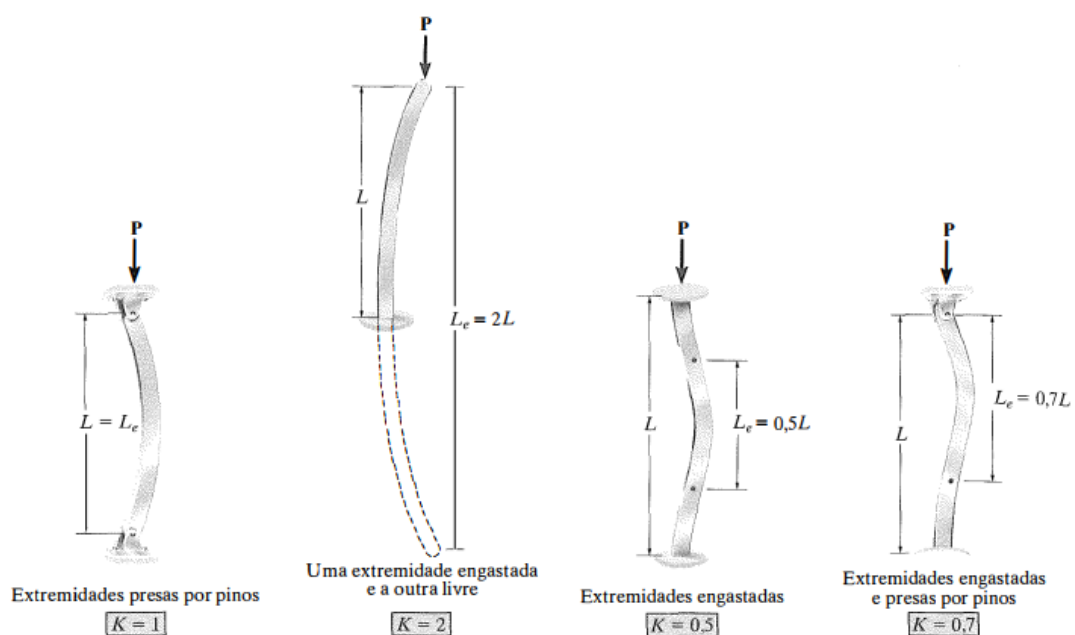


Figura 4 - Fatores de comprimento efetivo para diferentes tipos de fixação de coluna  
Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010).

A Figura 4 representa os possíveis valores para o fator adimensional  $K$  de acordo com os diferentes tipos de engastes nas extremidades da coluna.

A Equação (7) é utilizada para calcular a carga crítica na coluna imediatamente antes da flambagem para diferentes tipos de apoios, utilizando o fator adimensional  $K$ .

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (7)$$

Onde:

$K$  = Fator de comprimento efetivo;

$L_e$  = Comprimento efetivo [m].

A Equação (7) pode ainda ser manipulada para fornecer a tensão crítica de flambagem, dada pela Equação (8):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (8)$$

Onde:

$(KL/r)$  = Índice de esbeltez efetiva da coluna;

$r$  = Raio de giração da coluna [m].

O raio de giração é calculado em torno do eixo neutro ou de flexão (HIBBELER, 2010). É dado pela Equação (9):

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (9)$$

Onde:

$I$  = Momento de inércia [m<sup>4</sup>];

$A$  = Área da seção transversal [m<sup>2</sup>].

A flambagem elástica, segundo Hibbeler (2010), ocorre apenas em colunas consideradas esbeltas e longas. Colunas intermediárias falham devido à instabilidade plástica ou inelástica, o que significa que a tensão de compressão na falha é maior do que o limite de proporcionalidade do material.

A separação entre coluna longa e coluna intermediária é feita através do índice de esbeltez efetivo da coluna. Este índice, calculado pela Equação (8), indica o valor em que a

tensão crítica de flambagem será igual à tensão do limite de proporcionalidade do material ( $\sigma_{lp}$ ), que é a tensão máxima em que ocorre a flambagem elástica, como pode-se observar na Equação (10):

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_{lp} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{lp}}} \quad (10)$$

Colunas intermediárias e curtas tem índice de esbeltez efetivo menor que o especificado pela Equação (10) e irão falhar por flambagem plástica localizada em vez de flambagem elástica. Para o dimensionamento dessas colunas, deve ser feita uma correção na equação de Euler, conhecida como equação de Engesser, proposto por F. Engesser em 1889 (HIBBELER, 2010). O módulo de elasticidade do material é substituído pelo módulo tangente,  $E_t$ . No momento da falha, a coluna comporta-se como se fosse feita de um material que tivesse rigidez menor que quando se comporta elasticamente,  $E_t < E$ . Desse modo tem-se a Equação (11):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \quad (11)$$

A Figura 5 é um exemplo de coluna com falha devido à flambagem inelástica.



Figura 5 - Flambagem inelástica localizada  
Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010).

A Figura 5 mostra uma coluna que sofreu flambagem inelástica, identificada por uma seta.

### 2.3 Conservação de Movimento

Segundo Halliday *et al.* (2002), a primeira lei de Newton afirma que: considerando um corpo o qual não atua nenhuma força resultante, se o corpo estiver em repouso, ele permanecerá em repouso. Ainda conforme Halliday *et al.* (2002), se o corpo estiver em movimento com velocidade constante, ele continuará nesse mesmo movimento.

### 2.3.1 Impulso e Quantidade de Movimento

Conforme Halliday *et al.* (2002), para analisar colisões, faz-se necessário definir uma variável dinâmica chamada de quantidade de movimento ou momento. A quantidade de movimento de um corpo é definida como sendo o produto da sua massa pela sua velocidade, como na Equação (12):

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (12)$$

Onde:

$\vec{p}$  = Quantidade de movimento [kg·m/s];

$m$  = Massa [kg];

$\vec{v}$  = Velocidade [m/s].

Newton expressou a segunda lei do movimento em termos da quantidade de movimento e ela pode ser escrita como: a taxa de variação da quantidade de movimento de um corpo é igual à força resultante que age sobre o corpo e tem a direção e o sentido dessa força (HALLIDAY *et al.*, 2002). Se  $m$  é constante, então tem-se a Equação (13):

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} \quad (13)$$

Onde:

$\sum \vec{F}$  = Força resultante [N];

$\vec{a}$  = Aceleração [m/s<sup>2</sup>].

Ainda segundo Halliday *et al.* (2002), durante uma colisão, a força varia com o tempo, Figura 6. A força é exercida somente durante a colisão, que começa no tempo  $t_i$  e termina no tempo  $t_f$ . A força é nula antes e depois da colisão.

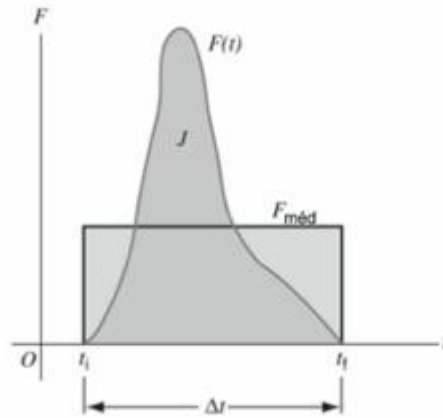


Figura 6 - Força impulsiva  $F(t)$  variando com o tempo  
Fonte: Adaptado de Halliday *et al.* (2002).

A Figura 6 mostra como a intensidade da força varia com o tempo durante a colisão.

Para encontrar a variação total da quantidade de movimento durante a colisão, efetua-se uma integração na Equação (13) ao longo do intervalo de tempo da colisão, iniciando no instante  $t_i$  e terminando no instante  $t_f$ , obtendo a Equação (14):

$$\int_{\vec{p}_i}^{\vec{p}_f} d\vec{p} = \int_{t_i}^{t_f} \Sigma \vec{F} dt \quad (14)$$

O lado esquerdo da Equação (14) representa a variação da quantidade de movimento e o lado direito define uma nova grandeza chamada de impulso. Para uma força arbitrária  $\vec{F}$ , o impulso  $\vec{J}$  é definido como na Equação (15):

$$\vec{J}_{res} = \Delta\vec{p} = \vec{p}_f - \vec{p}_i \quad (15)$$

## 2.4 Energia Mecânica: Impacto

O impacto ocorre quando dois corpos colidem entre si por um período muito curto de tempo, fazendo com que forças relativamente grandes sejam exercidas entre os corpos. A batida de um martelo em um prego e de um taco de golfe na bola são exemplos de cargas de impacto (HBBELER, 2011).

Ainda segundo Hibbeler (2011), há dois tipos de impactos, o impacto central é aquele que ocorre quando a direção de movimento dos centros de massa de duas partículas em colisão está ao longo da linha que passa através dos centros de massa das partículas, essa linha é chamada de linha de impacto e é perpendicular ao plano de contato. Quando o movimento de

alguma das partículas faz um ângulo com a linha de impacto, ocorre o impacto oblíquo (HIBBELER, 2011). A Figura 7 (a) e (b), mostra os dois tipos de impacto entre duas esferas.

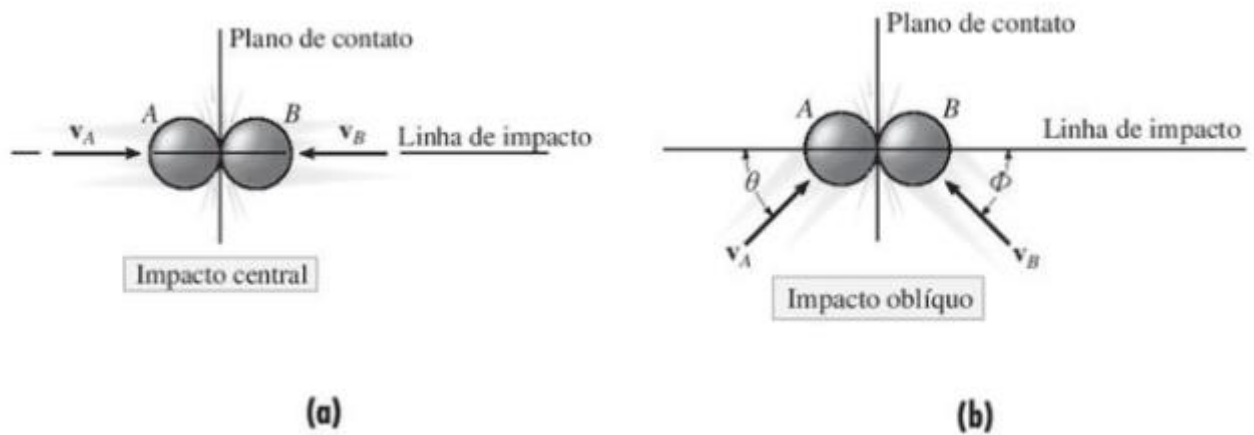


Figura 7 - (a) esferas em um impacto central; (b) esferas em um impacto oblíquo  
Fonte: Hibbeler (2011).

Para ilustrar o método de análise da mecânica do impacto central, visto na Figura 7 (a), segundo Hibbeler (2011), os corpos têm quantidade de movimento distintas ( $V_A > V_B$ ) e, durante a colisão as partículas são consideradas deformáveis e sofrerão um período de deformação onde exercerão uma sobre a outra um impulso de deformação igual, mas oposto. Somente no instante da deformação máxima as partículas irão mover-se com a mesma velocidade e a seguir, ocorre um período de restituição, onde as partículas retornam à sua forma original ou continuam deformadas permanentemente (HIBBELER, 2011).

#### 2.4.1 Energia Cinética

Segundo Halliday *et al.* (2002), a energia associada ao movimento de um corpo é chamada de energia cinética.

A energia cinética tem as mesmas dimensões do trabalho e é medida na mesma unidade (Joule) (HALLIDAY *et al.*, 2002). Assim como no trabalho, a energia cinética é uma grandeza escalar, ela depende somente da massa e do módulo da velocidade do corpo; ela nunca pode ser negativa, sendo igual a zero somente quando o corpo está em repouso e sendo maior quanto maior for a velocidade do corpo (YOUNG *et al.*, 2016).

Young *et al.* (2016) define a grandeza  $\frac{1}{2}mv^2$  como energia cinética  $K$  de um corpo e é expressa pela Equação (16):

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (16)$$

Onde:

$m$  = Massa do corpo [kg];

$v$  = Velocidade do corpo [m/s].

## 2.4.2 Energia Potencial Gravitacional

De acordo com Halliday *et al.* (2002), em situações nas quais uma força conservativa atua entre objetos de um sistema, fornece a eles a capacidade de realizar trabalho. Essa capacidade é associada com a posição do objeto e denomina-se energia potencial. Existe uma energia potencial associada com o peso do corpo e com sua altura acima do solo, chamada de energia potencial gravitacional (YOUNG *et al.*, 2016).

Conforme Young *et al.* (2016), ao considerarmos um corpo de massa  $m$  que se move ao longo do eixo  $y$  (vertical), como mostra a Figura 8, as forças que atuam sobre ele são seu peso, com módulo  $p = mg$ , e algumas outras forças resultantes ( $\vec{F}_{outra}$ ). O trabalho  $W_{grav}$  realizado pelo peso quando o corpo cai de uma altura  $y_1$  acima da origem até uma altura menor  $y_2$  é positivo, pois o peso e o deslocamento possuem o mesmo sentido (YOUNG *et al.*, 2016). Pode-se observar pela Equação (17):

$$W_{grav} = Fd = p(y_1 - y_2) = mgy_1 - mgy_2 \quad (17)$$

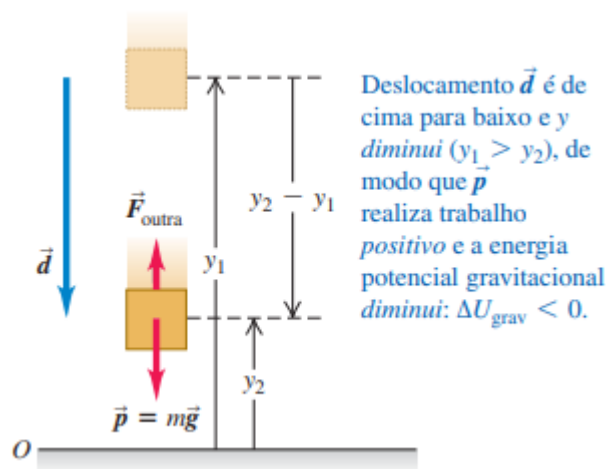


Figura 8 - Um corpo se move de cima para baixo  
Fonte: Adaptado de Young *et al.* (2016).

A Figura 8 ilustra o movimento de um corpo em queda livre e as forças envolvidas.

A Equação (17) mostra que é possível expressar  $W_{grav}$  em termos dos valores das quantidades  $mgy$  no início e no final do deslocamento. Essa grandeza, o produto do peso  $mg$  pela altura  $y$  acima da origem do sistema de coordenadas, denomina-se energia potencial gravitacional,  $U$  (YOUNG *et al.*, 2016). Pode-se expressá-la como na Equação (18):

$$U = mgy \quad (18)$$

Onde:

$U$  = Energia potencial gravitacional [J];

$m$  = Massa do objeto [m];

$g$  = Aceleração devida à gravidade [ $m/s^2$ ];

$y$  = Coordenada vertical do objeto (aumenta se o objeto se mover para cima) [m].

## 2.5 Colisões

Segundo Halliday *et al.* (2016), o momento  $\vec{p}$  de um corpo que se comporta como uma partícula permanece constante, a menos que o corpo seja submetido a uma força externa. Em uma colisão, a força exercida sobre o corpo é de curta duração, tem um módulo elevado e provoca uma mudança brusca do momento do corpo.

### 2.5.1 Colisão Elástica

Uma colisão elástica é um tipo especial de colisão em que a energia dos corpos que colidem é conservada, isso não quer dizer que a energia dos corpos envolvidos não varia, a energia cinética dos corpos pode variar, mas a energia cinética total do sistema permanece a mesma (HALLIDAY *et al.*, 2023). Halliday *et al.* (2023) ainda afirma que no caso de uma colisão unidimensional na qual o corpo 1 é o projétil e o corpo 2 é o alvo, a conservação da energia cinética e do momento linear fornecem as seguintes Equações (19) e (20) para a velocidade dos dois corpos imediatamente após a colisão:

$$v_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_{1i} \quad (19)$$

$$v_{2f} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_{1i} \quad (20)$$

### 2.5.2 Colisão Inelástica

Nas colisões entre corpos comuns, como a colisão de dois carros ou de uma bola com um taco, parte da energia é transferida de energia cinética para outras formas de energia, como energia térmica, energia sonora e energia na deformação permanente e, isso mostra que a energia cinética não é conservada (HALLIDAY *et al.*, 2023). Esse tipo de colisão, onde a energia cinética total do sistema depois da colisão é menor do que antes dela, é chamado de colisão inelástica, como ilustrado na Figura 9.

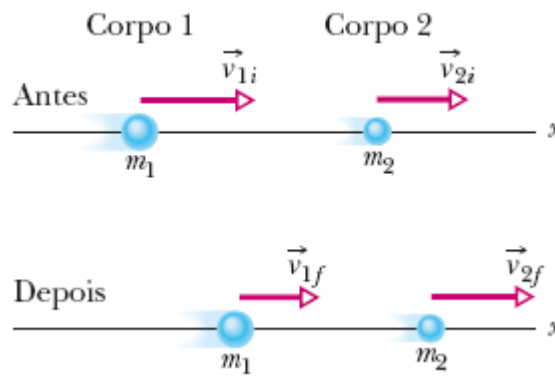


Figura 9 - Representação esquemática de uma colisão inelástica  
Fonte: Halliday *et al.* (2023).

A Figura 9 mostra dois corpos pouco antes e pouco depois de sofrerem uma colisão inelástica e as velocidades antes da colisão (índice *i*) e depois da colisão (índice *f*) estão indicadas.

De acordo com Halliday *et al.* (2023), pode-se escrever a lei de conservação do momento linear para esse sistema de dois corpos como demonstra a Equação (21):

$$\vec{p}_{1i} + \vec{p}_{2i} = \vec{p}_{1f} + \vec{p}_{2f} \quad (21)$$

Considerando o movimento como unidimensional, é possível substituir os vetores por componentes em relação a um único eixo. Assim, a partir da Equação (12), é possível reescrever na forma da Equação (22):

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f} \quad (22)$$

Onde:

$m_1$  = Massa do corpo 1 [kg];

$m_2$  = Massa do corpo 2 [kg];

$v_{1i}$  = Velocidade do objeto 1 antes da colisão [m/s];

$v_{2i}$  = Velocidade do objeto 2 antes da colisão [m/s];

$v_{1f}$  = Velocidade do objeto 1 depois da colisão [m/s];

$v_{2f}$  = Velocidade do objeto 2 depois da colisão [m/s].

Segundo Filho *et al.* (2017), o coeficiente de restituição consiste na medida de elasticidade de uma colisão e para uma colisão entre dois corpos é definido como na Equação (23):

$$e = \frac{|v_{2f} - v_{1f}|}{|v_{2i} - v_{1i}|} \quad (23)$$

Onde:

$e$  = Coeficiente de restituição;

$|v_{2f} - v_{1f}|$  = Módulo da velocidade relativa após a colisão;

$|v_{2i} - v_{1i}|$  = Módulo da velocidade relativa antes da colisão.

De acordo com Alves (2009), as colisões inelásticas possuem coeficiente de restituição entre 0 e 1. Nessas condições as velocidades dos corpos após a colisão são diferentes e através da lei da conservação do momento linear tem-se as Equações (24) e (25) para calcular as velocidades finais dos corpos 1 e 2:

$$v_{1f} = \frac{(1+e)m_2v_{2i}}{m_1+m_2} - \frac{v_{1i}(m_2e-m_1)}{m_1+m_2} \quad (24)$$

$$v_{2f} = \frac{(1+e)m_1v_{1i}}{m_1+m_2} - \frac{v_{2i}(m_1e-m_2)}{m_1+m_2} \quad (25)$$

### 2.5.3 Colisão Perfeitamente Inelástica

Conforme Halliday *et al.* (2023), a colisão inelástica de dois corpos sempre envolve uma perda de energia cinética por parte do sistema e a maior perda acontece quando os dois corpos permanecem juntos, caso em que a colisão é chamada de colisão perfeitamente inelástica. Neste tipo de colisão a velocidade dos corpos após a colisão será a mesma e assim é possível encontrar a velocidade final pela Equação (26):

$$V = \frac{m_1}{m_1+m_2} v_{1i} \quad (26)$$

Onde:

$V$  = Velocidade final dos corpos [m/s].

## 2.6 Fabricação de Tubos

Segundo Telles (2001), tubos são condutos fechados, destinados principalmente ao transporte de fluidos.

Telles (2001) diz que há quatro grupos de processos industriais de fabricação de tubos: Tubos sem costura: Laminação, extrusão e fundição; Tubos com costura: Fabricação por solda.

### 2.6.1 Fabricação de Tubos por Laminação

Há vários processos de fabricação por laminação, o mais importante é o chamado “Manesmann”, que consiste na passagem de uma barra redonda maciça entre dois rolos de dupla conicidade, como ilustrado na Figura 10 (KIMINAMI *et al.*, 2013).

Kiminami *et al.* (2013) também diz que por esse processo é possível a fabricação de tubos com diâmetro externo na faixa de 60 a 660 mm, com espessura entre 3 e 125 mm e com comprimento de até 28m.

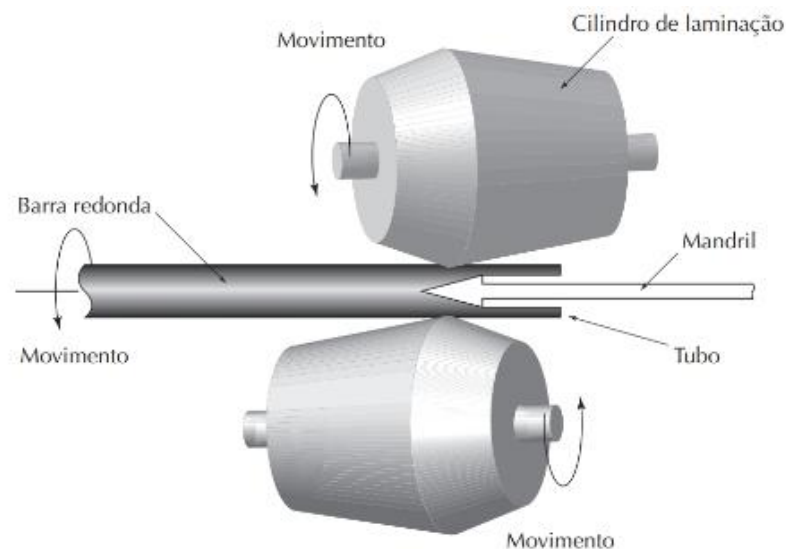


Figura 10 - Processo de laminação de tubos sem costura  
Fonte: Kiminami *et al.* (2013).

A Figura 10 representa o processo de fabricação de tubos sem costura através da laminação.

### 2.6.2 Fabricação de Tubos por Extrusão e Fundição

De acordo com Telles (2001), na fabricação por extrusão, Figura 11, um tarugo cilíndrico maciço do material em alta temperatura é posto em uma câmara, posteriormente é furado por uma haste e forçado por uma prensa a passar por uma matriz que contém o formato da tubulação. Em seguida o tubo passa por laminadores para regularizar suas medidas.

Fabricam-se por extrusão tubos de aço de diâmetro abaixo de 80 mm e também tubos de alumínio, cobre e outros metais não ferrosos, assim como de materiais plásticos (TELLES, 2001).

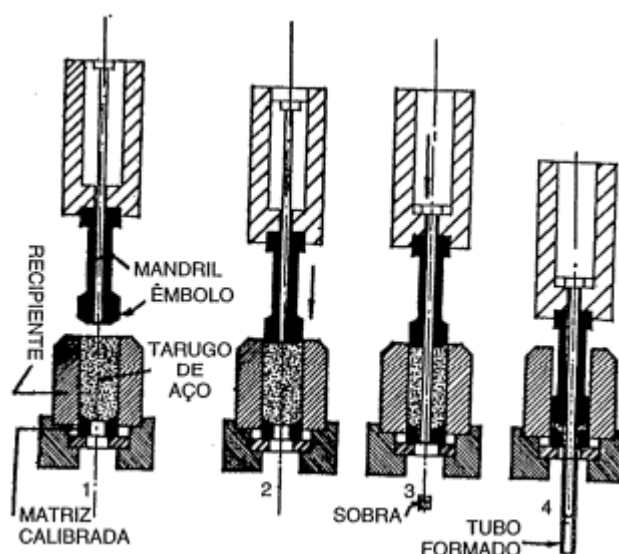


Figura 11 - Fabricação de tubos por extrusão  
Fonte: Telles (2001).

A Figura 11 representa a fabricação de tubos por extrusão.

Telles (2001) afirma que na fabricação por fundição o material do tubo, em estado líquido, é despejado em moldes especiais onde solidifica-se e adquire a forma final. Esse processo é utilizado na fabricação de tubos de ferro fundido e de materiais não-metálicos e os moldes podem ou não ser centrifugados.

### 2.6.3 Fabricação de Tubos com Costura

Nas palavras de Telles (2001), fabricam-se pelo processo de costura tubos de diversos materiais, como aço-carbono, aço-liga, aço inoxidável e ferro forjado, em toda a faixa de diâmetros que se usam na indústria.

Existem duas disposições da costura de solda: longitudinal e helicoidal, sendo a longitudinal utilizada na maioria dos casos. A soldagem é feita automaticamente e os processos de solda mais utilizados são a soldagem por arco submerso e por resistência elétrica, sem adição de metal (TELLES, 2001).

Como aponta Telles (2001), para os tubos com solda longitudinal, Figura 12, a matéria prima pode ser uma bobina de chapa, para tubos de pequeno e médio diâmetro (aproximadamente até 450 mm) e pode ser chapas planas, para tubos de médio e grande diâmetro (até 760 mm).

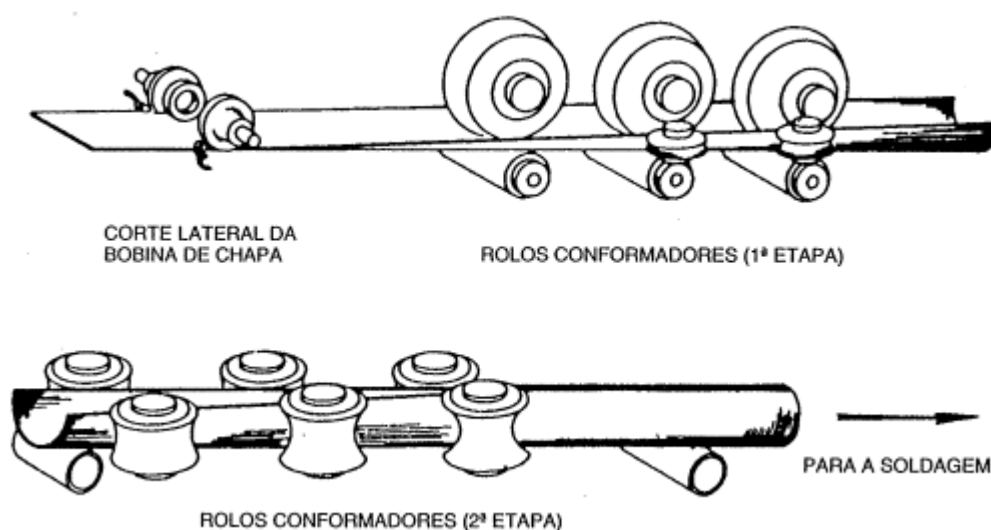


Figura 12 - Fabricação de tubos a partir de bobinas de chapa  
Fonte: Telles (2001).

A Figura 12 mostra a fabricação de tubos a partir de bobinas de chapa, onde a chapa passa por rolos conformadores deformando-se até o formato da tubulação e então é feita a costura de solda, que neste caso normalmente é usado a soldagem por resistência elétrica.

Segundo Telles (2001), com a solda helicoidal, a matéria prima é sempre uma bobina para qualquer diâmetro do tubo, permitindo assim a fabricação de tubos sem limitação de diâmetro. A bobina é enrolada sobre si mesma, sendo a largura da bobina igual à distância de duas espiras sucessivas, como mostra a Figura 13. A soldagem pode ser feita por arco submerso ou por resistência elétrica e pode ser feita por dentro e por fora ou somente por fora do tubo (TELLES, 2001).

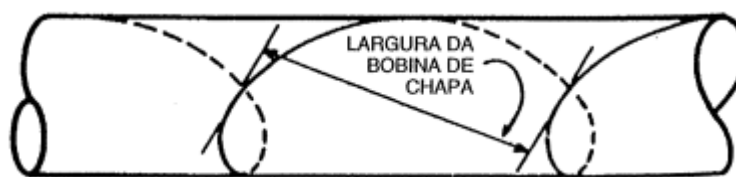


Figura 13- Tubo com solda helicoidal

Fonte: Telles (2001).

A Figura 13 ilustra um tubo fabricado com o processo de solda helicoidal.

## 2.7 Deformação de Estruturas Tubulares

### 2.7.1 Tubos circulares

De acordo com Lu e Yu (2003), quando um tubo circular de paredes finas é comprimido axialmente, ele colapsa axissimetricamente ou não simetricamente, dependendo principalmente da relação entre diâmetro e espessura ( $D/h$ ). O modo axissimétrico é chamado de modo de anel, enquanto o modo não simétrico é chamado de modo de diamante. Para certos valores de  $D/h$ , um tubo pode começar a entrar em colapso com o modo de anel e então mudar para o modo de diamante, tornando-se assim um modo misto (LU e YU, 2003). Pode-se ver os modos de colapso na Figura 14 abaixo:

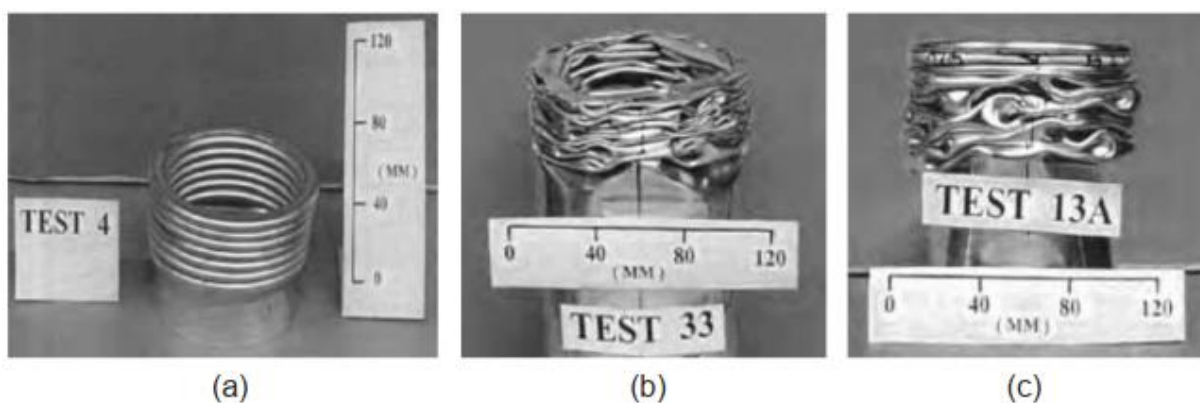


Figura 14 - Modos de colapso para tubos circulares sob carga axial: (a) modo de anel; (b) modo de diamante e (c) modo misto

Fonte: Adaptado de Lu e Yu (2003).

A Figura 14 representa os diferentes modos de colapso para tubos circulares sob carga axial, onde à esquerda tem-se o modo de anel, ao centro tem-se o modo de diamante e à direita tem-se o modo misto.

Lu e Yu (2003) afirmam que de um modo geral, o modo de diamante ocorre quando  $D/h$  é maior que 80. Para  $D/h$  menor que 50, o modo de anel está presente se  $L/h$  for menor que 2 e o modo misto acontecerá se  $L/h$  for maior que 2. Para tubos longos ocorre a flambagem do tipo Euler.

### 2.7.2 Tubos quadrados

Segundo Lu e Yu (2003), tubos quadrados de paredes finas são frequentemente submetidos a cargas axiais e seus modos de colapso são diferentes daqueles para tubos circulares, mas as características gerais das curvas força-deslocamento são semelhantes (Figura 15 e Figura 16), isso ocorre pois os tubos quadrados e circulares sofrem colapso progressivo quando submetidos a carregamento axial.

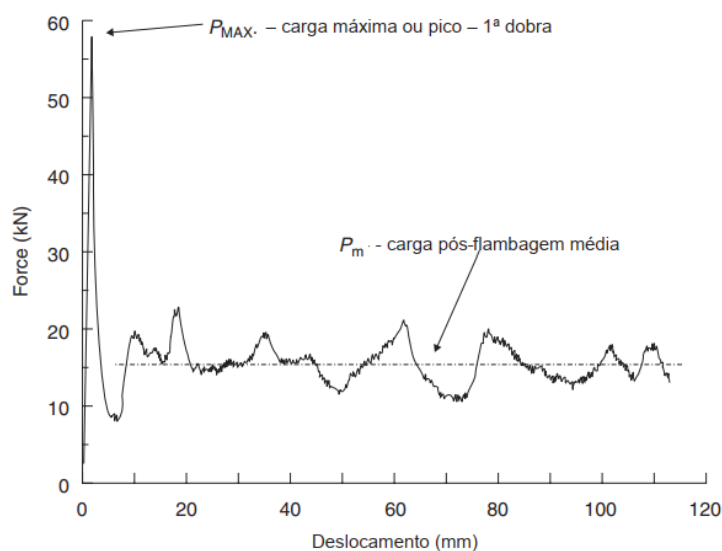


Figura 15 - Curva típica de força-deslocamento em tubo circular  
Fonte: Adaptado de Lu e Yu (2003).

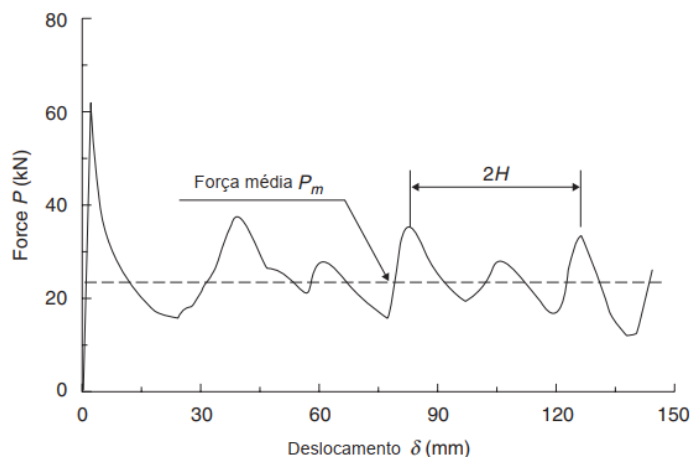


Figura 16 - Curva típica de força-deslocamento em tubo quadrado  
Fonte: Adaptado de Lu e Yu (2003).

Uma visão típica de um tubo quadrado totalmente esmagado é mostrada na Figura 17(a), que é para um tubo com  $c/h = 23$  ( $c$  é o comprimento do lado e  $h$  é a espessura). A parede do tubo sofre dobras plásticas severas para dentro e para fora, com possível estiramento (LU e YU, 2003). Este modo de colapso é chamado de modo compacto.

Lu e Yu (2003) também dizem que quando o tubo é fino pode ocorrer o modo de colapso não compacto, neste caso, as dobras não são contínuas, como nas seções compactas, e são separadas por painéis ligeiramente curvos. A Figura 17(b) mostra o modo não compacto em um tubo com  $c/h = 100$ .

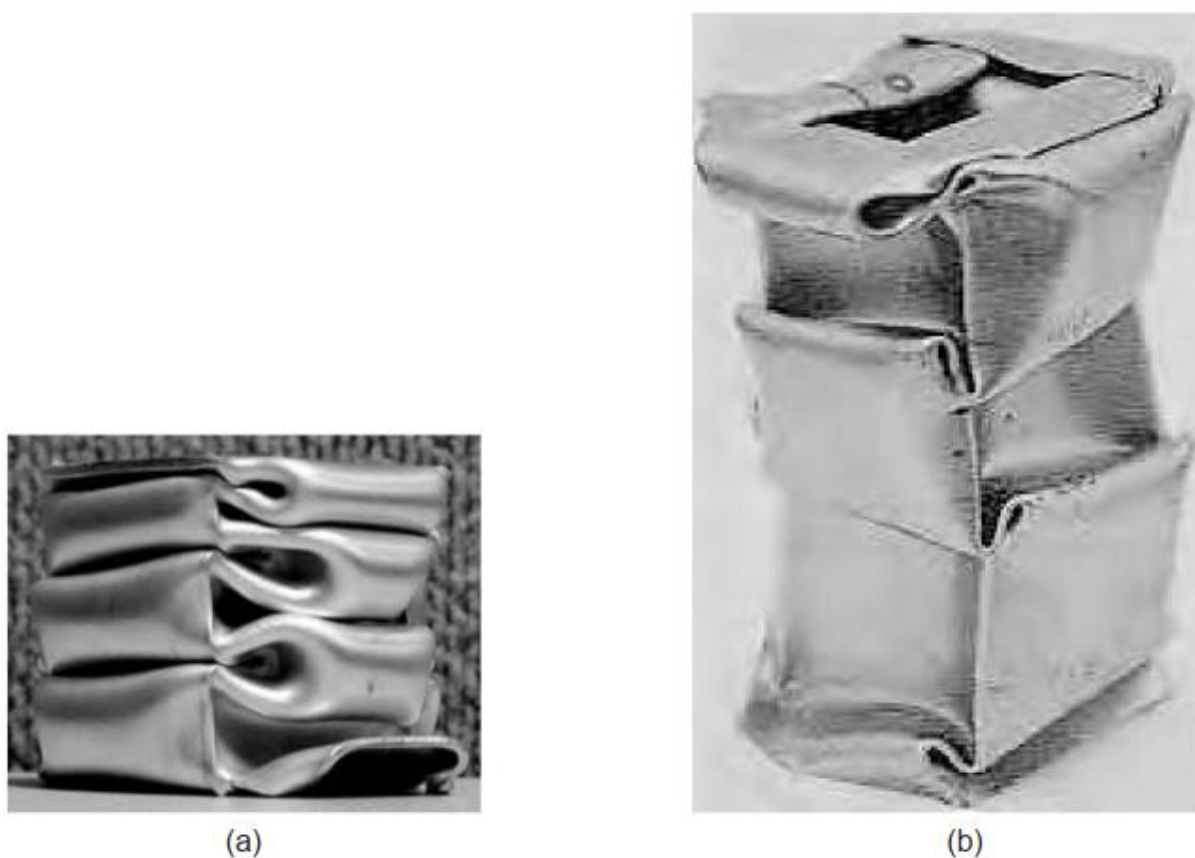


Figura 17 - Modos de colapso para tubos quadrados: (a) modo compacto (tubo  $c/h = 23$ ); (b) modo não compacto (tubo  $c/h = 100$ )

Fonte: Adaptado de Lu e Yu (2003).

A Figura 17 representa os diferentes modos de colapso para tubos quadrados sob carga axial, onde tem-se à esquerda o modo compacto e à direita o modo não compacto.

Este capítulo de revisão bibliográfica fornece o alicerce teórico contextual necessário para o desenvolvimento e execução do estudo, estabelecendo base para o estudo que será apresentado nos capítulos seguintes.

### **3 METODOLOGIA**

Neste capítulo, descreve-se a metodologia empregada na realização do trabalho, que está dividida nos seguintes tópicos: tipo de pesquisa, materiais e métodos, variáveis e indicadores, instrumentos de coleta de dados e tabulação de dados.

#### **3.1 Tipo de pesquisa**

Toda pesquisa tem seus objetivos e tendem a ser diferentes dos objetivos de outras pesquisas. Em relação aos objetivos, as pesquisas podem ser classificadas como exploratórias, descritivas e explicativas (GIL, 2002).

Segundo Gil (2002), as pesquisas exploratórias têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema para poder torna-lo mais explícito e construir hipóteses. Seu planejamento costuma ser mais flexível, pois interessar considerar variados aspectos relativos ao fato ou fenômeno estudado.

Gil (2002) diz que as pesquisas descritivas têm como objetivo a descrição das características de determinada população ou fenômeno e também podem ser elaboradas com a finalidade de identificar possíveis relações entre variáveis.

Ainda de acordo com Gil (2002), as pesquisas explicativas têm como propósito identificar fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência de fenômenos e são as pesquisas que mais aprofundam o conhecimento da realidade, pois têm como finalidade explicar o porquê das coisas. Uma pesquisa explicativa pode ser a continuação de outra descritiva.

Para avaliar a qualidade dos resultados de uma pesquisa, é necessário saber como os dados foram obtidos, assim como os procedimentos adotados na sua análise e interpretação, assim surgem sistemas que classificam as pesquisas segundo a forma de abordagem (pesquisa quantitativa e qualitativa), o ambiente em que os dados são coletados (pesquisa de campo ou de laboratório) e o grau de controle das variáveis (pesquisa experimental e não experimental) (GIL, 2002).

Para Almeida (2014), a pesquisa com abordagem qualitativa tem o ambiente natural como fonte direta de dados e o pesquisador como instrumento fundamental e não é necessária a utilização de ferramentas de análise de dados.

Conforme Almeida (2014), a pesquisa com abordagem quantitativa caracteriza-se pelo uso de ferramentas estatísticas para o tratamento de dados, visando medir as relações existentes entre as variáveis.

Os procedimentos técnicos adotados em uma pesquisa podem ser utilizados como critério de diferenciação. Nesse sentido, Gil (2002) destaca que o sistema por ele adotado leva em consideração o ambiente de pesquisa, a abordagem teórica e as técnicas de coleta e análise de dados, definindo assim alguns seguintes procedimentos técnicos: 1) pesquisa bibliográfica; 2) pesquisa documental; 3) pesquisa experimental; 4) estudo de caso; 5) pesquisa-ação e 6) pesquisa participante.

O presente trabalho pode ser classificado como uma pesquisa exploratória, utilizando método de pesquisa bibliográfica, uma vez que foram consultados artigos, monografias, dissertações e livros como fonte de estudo. Além disso, pode ser considerado uma pesquisa bibliográfica e também uma pesquisa experimental, com o objetivo de investigar a influência da geometria na capacidade de absorção de energia em tubos com mesma seção transversal por meio de métodos experimentais. O trabalho é classificado como uma pesquisa quantitativa, uma vez que visa analisar a relação entre a geometria e a capacidade de absorção de energia nos tubos. Também é uma pesquisa qualitativa, pois será avaliado os resultados obtidos.

### 3.2 Materiais e métodos

Os materiais e métodos utilizados são apresentados abaixo, no fluxograma da Figura 18.

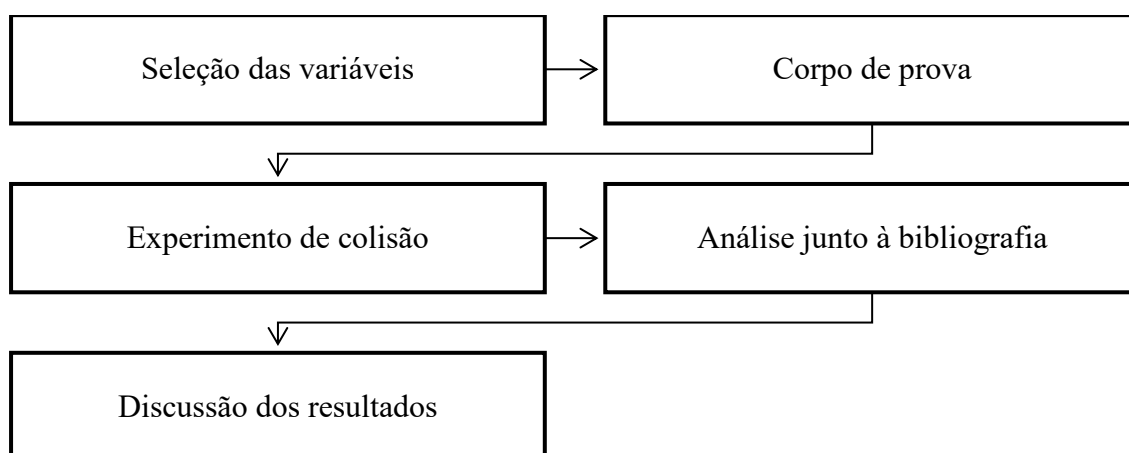


Figura 18 - Fluxograma das etapas da metodologia de pesquisa  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

### 3.2.1 Corpo de prova

Uma das premissas estabelecidas para esse trabalho foi que o material e geometria fossem comerciais, então, através de catálogos de fornecedores foram selecionados tubos com medidas padrões e que a área da seção transversal fosse a mais próxima possível.

Para a construção dos corpos de prova utilizou-se tubos de aço SAE 1010 fabricados com costura longitudinal e com comprimento de 250mm, sendo os tubos circulares com diâmetro de 38,1mm e espessura de 1,20mm e os tubos quadrados com lado de 30mm e espessura de 1,20mm.

Com essas medidas os corpos de prova circulares têm  $139,11\text{mm}^2$  de área de seção transversal e os corpos de prova quadrados têm  $138,24\text{mm}^2$  de área de seção transversal. Na Figura 19 observa-se a comparação da seção transversal dos tubos quadrados e redondos.

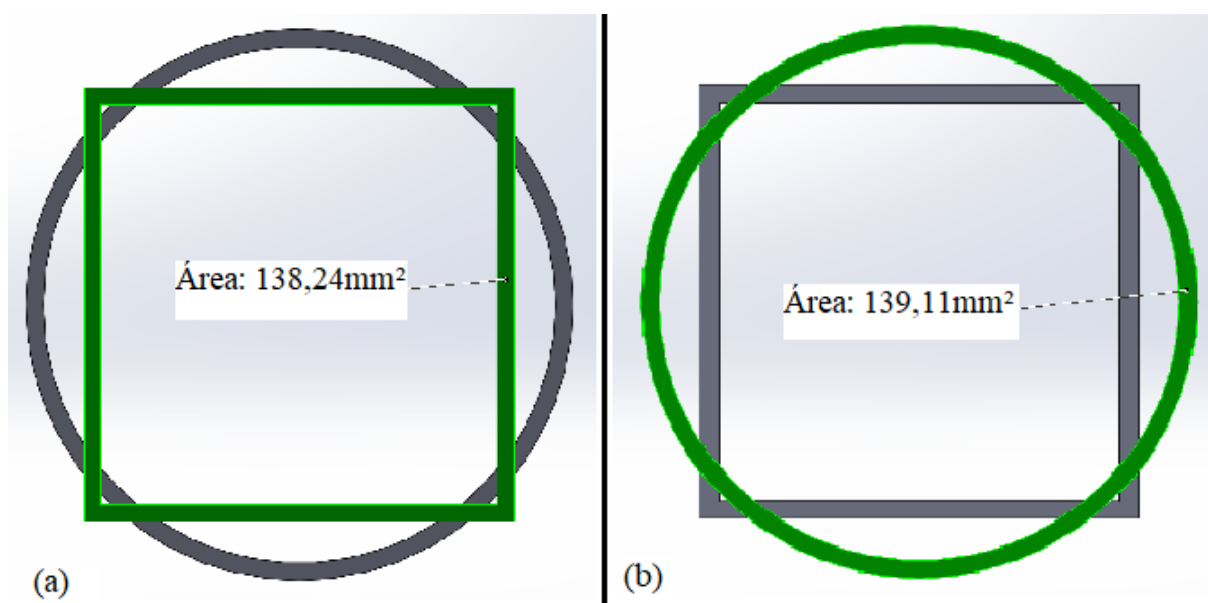


Figura 19 - (a) Área da seção transversal quadrada; (b) Área da seção transversal circular  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Os corpos de prova foram enumerados, Figura 20, para então ser feito o ensaio de colisão.



Figura 20 - Corpos de prova de seção transversal circular prontos para os testes de colisão  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 20 mostra os corpos de prova de seção transversal circular prontos para os testes de colisão.

### 3.2.2 Experimento de colisão

Para o ensaio de colisão foi utilizada uma torre, Figura 21, que faz o içamento do martelo de colisão, com capacidade de içamento de 300kg e altura máxima de 11,5m, cuja energia mecânica é liberada após a queda e é responsável por realizar o ensaio. Essa torre está localizada em Belo Horizonte, no Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação da Escola de Engenharia da UFMG. Para os ensaios no presente trabalho foram utilizadas duas alturas diferentes. A primeira altura, 1,70m de altura, foi usada para a realização de seis ensaios (1A-, 2A-, 3A-, 1B-, 2B- e 3B-). A segunda altura, 4,97m de altura, também foi usada em seis ensaios (1A+, 2A+, 3A+, 1B+, 2B+ e 3B+).



Figura 21 - Torre de colisão  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 21 apresenta a torre de colisão utilizada nos ensaios.

Depois de içada a carga (martelo de colisão) o martelo, Figura 22, é liberado e cai em queda livre até atingir o corpo de prova, que é fixado em uma base, Figura 23, que é responsável por garantir que as solicitações de força sobre o corpo de prova sejam somente na vertical e no sentido longitudinal.



Figura 22 - Martelo de colisão  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 22 apresenta destacado o martelo de colisão e embaixo o suporte com o corpo de prova fixado.

O martelo foi usado com duas cargas diferentes. A primeira, usada nos testes 1A-, 2A-, 3A-, 1B-, 2B- e 3B-, teve uma massa equivalente a 182,3kg. Já nos ensaios 1A+, 2A+, 3A+, 1B+, 2B+ e 3B+, a massa utilizada foi equivalente à 62,3kg.

O intuito do ensaio foi alterar a massa e altura dos ensaios, mas manter uma energia potencial de colisão aproximada, de 3038,85J, com ambos os corpos de prova, os de seção transversal circular e os de seção transversal quadrada. Como observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Condições dos ensaios

| Ensaio | Altura (m) | Massa (kg) | Energia (J) |
|--------|------------|------------|-------------|
| 1A-    | 1,70       | 182,30     | 3040,22     |
| 2A-    | 1,70       | 182,30     | 3040,22     |
| 3A-    | 1,70       | 182,30     | 3040,22     |
| 1B-    | 1,70       | 182,30     | 3040,22     |
| 2B-    | 1,70       | 182,30     | 3040,22     |
| 3B-    | 1,70       | 182,30     | 3040,22     |
| 1A+    | 4,97       | 62,30      | 3037,48     |
| 2A+    | 4,97       | 62,30      | 3037,48     |
| 3A+    | 4,97       | 62,30      | 3037,48     |
| 1B+    | 4,97       | 62,30      | 3037,48     |
| 2B+    | 4,97       | 62,30      | 3037,48     |
| 3B+    | 4,97       | 62,30      | 3037,48     |

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 23 mostra o corpo de prova fixado no suporte e pronto para ser feito o ensaio.



Figura 23 - Corpo de prova redondo fixado na base  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Foram realizados doze ensaios, seis com altura e massa de 1,70m e 182,3kg, respectivamente, e outros seis com altura e massa de 4,97m e 62,3kg, respectivamente.

### 3.3 Variáveis e indicadores

Segundo Marconi e Lakatos (2022, p. 185), uma variável pode ser considerada como “uma classificação ou medida; uma quantidade que varia; um conceito, constructo ou conceito operacional que contém ou apresenta valores; aspecto, propriedade ou fator, discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração”.

Para Gil (2022, p. 82), as variáveis contidas nas hipóteses de uma pesquisa experimental devem possibilitar o esclarecimento do que se pretende investigar. Isso pode ser conseguido através da definição operacional, que é a definição específica das operações que serão realizadas para que o conceito possa ser medido.

Neste tópico estão listados as variáveis e seus indicadores usados para a realização dos ensaios de colisão (Tabela 2).

Tabela 2 - Variáveis e indicadores

| Variáveis         | Indicadores                                                  |
|-------------------|--------------------------------------------------------------|
| Energia Mecânica  | Massa;<br>Aceleração da gravidade;<br>Altura;<br>Velocidade. |
| Geometria do Tubo | Deformação;<br>Absorção de energia;<br>Taxa de deformação    |

Fonte: Pesquisa direta (2025).

### 3.4 Instrumento de coleta de dados

A obtenção de dados será feita através da captação de imagens no momento de deformação. Foi utilizada uma câmera de alta velocidade, Figura 24, modelo Phantom Miro 110, resolução 1280 x 800, 1,6Gpx/s e 2 $\mu$ s captura mínima. As imagens foram capturadas em resolução de 512 x 512 e a 6200 frames por segundo.



Figura 24 - Câmera de alta velocidade  
 Fonte: Pesquisa direta (2025).

Para processamento de imagens, análises de deslocamento, velocidade e aceleração e deformação dos tubos foi utilizado o *software* Phantom Camera Control (PCC), que permitiu análise do ensaio nas seções posteriores.

### **3.5 Tabulação dos dados**

Análises de deslocamento, velocidade, aceleração e deformação dos tubos serão realizadas utilizando o *software* da câmera (Phantom Camera Control) e os dados serão tabulados e analisados utilizando o Microsoft Excel.

### **3.6 Considerações finais do capítulo**

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

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Deformação dos tubos de seção transversal circular

Após a produção das amostras 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”, utilizando a Equação (17), foram muito próximas (erro máximo de 2,74 J). Assim, foram selecionados os valores representados na Tabela 3 como parâmetros para cada variável do sistema (exceto a velocidade de colisão, que foi obtida usando o *software* PCC).

Tabela 3 - Condições de colisão

|                             | Condição 1 | Condição 2 |
|-----------------------------|------------|------------|
| Altura de queda [m]         | 1,70       | 4,97       |
| Massa [kg]                  | 182,30     | 62,30      |
| Velocidade de colisão [m/s] | 5,80       | 9,80       |
| Energia Potencial [J]       | 3040,22    | 3037,48    |

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Calculando-se a velocidade teórica considerando a aceleração da gravidade como  $g=9,81\text{m/s}^2$  obtém-se as velocidades de 5,78 m/s e 9,87 m/s para as condições 1 e 2 respectivamente, o que conferem com os valores medidos utilizando o *software*.

A Figura 25 representa as deformações nos tubos redondos submetidos à condição de colisão “1” (Tabela 3), onde a Figura 25(a) representa o tubo antes da deformação, a Figura 25(b) representa o tubo durante a deformação e a Figura 25(c) representa o tubo após a deformação.

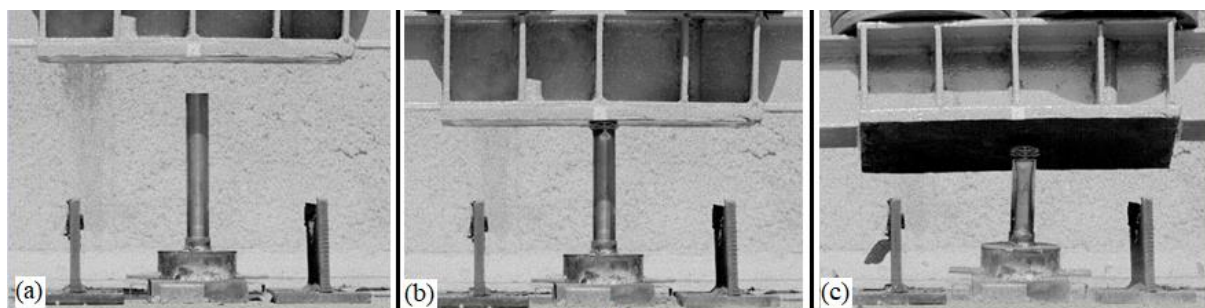


Figura 25 - Deformação do tubo circular: (a) antes da colisão; (b) durante a colisão; (c) após a colisão. Imagens da câmera de alta velocidade.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Após a coleta de dados com o *software* da câmera e o tratamento dos mesmos, foram elaborados gráficos com as curvas de deslocamento. A Figura 26 representa as curvas de deslocamento obtidas nos ensaios 1A-, 2A- e 3A-.

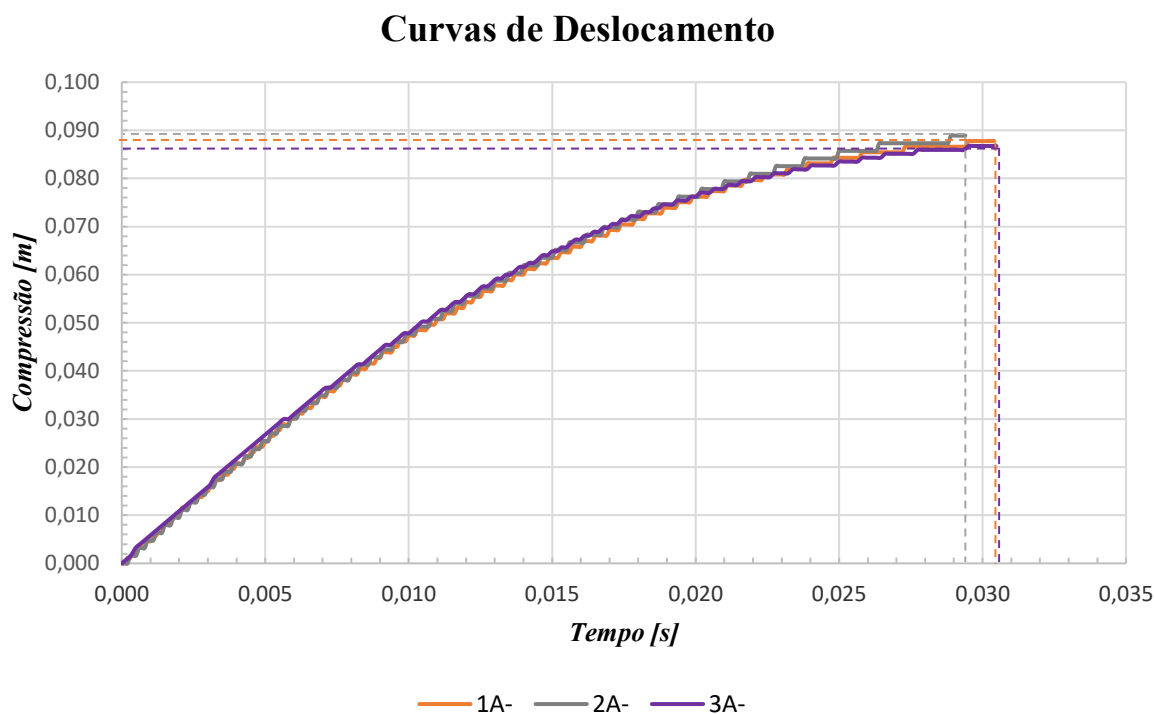


Figura 26 - Gráfico com as curvas de deslocamento  
 Fonte: Pesquisa direta (2025).

Observando as curvas de deslocamento das provas 1A-, 2A- e 3A- (Figura 26), constata-se a repetibilidade do ensaio sob energia e geometria constantes. Todas as amostras iniciam a deformação imediatamente após o impacto, crescem de forma similar até cerca de 0,088m em aproximadamente 0,030s. Essa sobreposição de curvas indica que as pequenas diferenças geométricas e de posicionamento não afetam significativamente o processo de colapso axissimétrico (modo misto).

Após realizados os ensaios com a condição de colisão “1”, foram realizados os ensaios utilizando a condição de colisão “2”.

A Figura 27 representa as deformações nos tubos redondos submetidos à condição de colisão “2” (Tabela 3), onde a Figura 27(a) representa o tubo antes da deformação, com a seção tubular perfeitamente circular e sem qualquer deformação; a Figura 27(b) representa o tubo durante a deformação, onde inicia-se o amassamento do tubo e surgem as primeiras dobras plásticas na região de impacto e a Figura 27(c) representa o tubo após a deformação, com o tubo totalmente colapsado em padrão misto, demonstrando como a energia cinética é dissipada por sucessivas dobras plásticas.

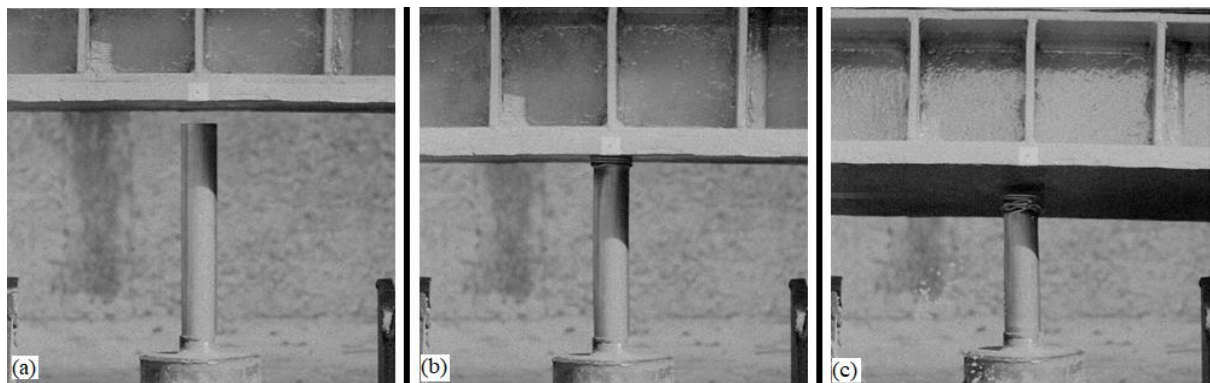


Figura 27 - Deformação do tubo circular: (a) antes da colisão; (b) durante a colisão; (c) após a colisão. Imagens da câmera de alta velocidade.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Após a coleta de dados com o *software* da câmera e o tratamento dos mesmos, foram elaborados gráficos com curvas de deslocamento. A Figura 28 representa as curvas de deslocamento obtidas nos ensaios 1A+, 2A+ e 3A+.

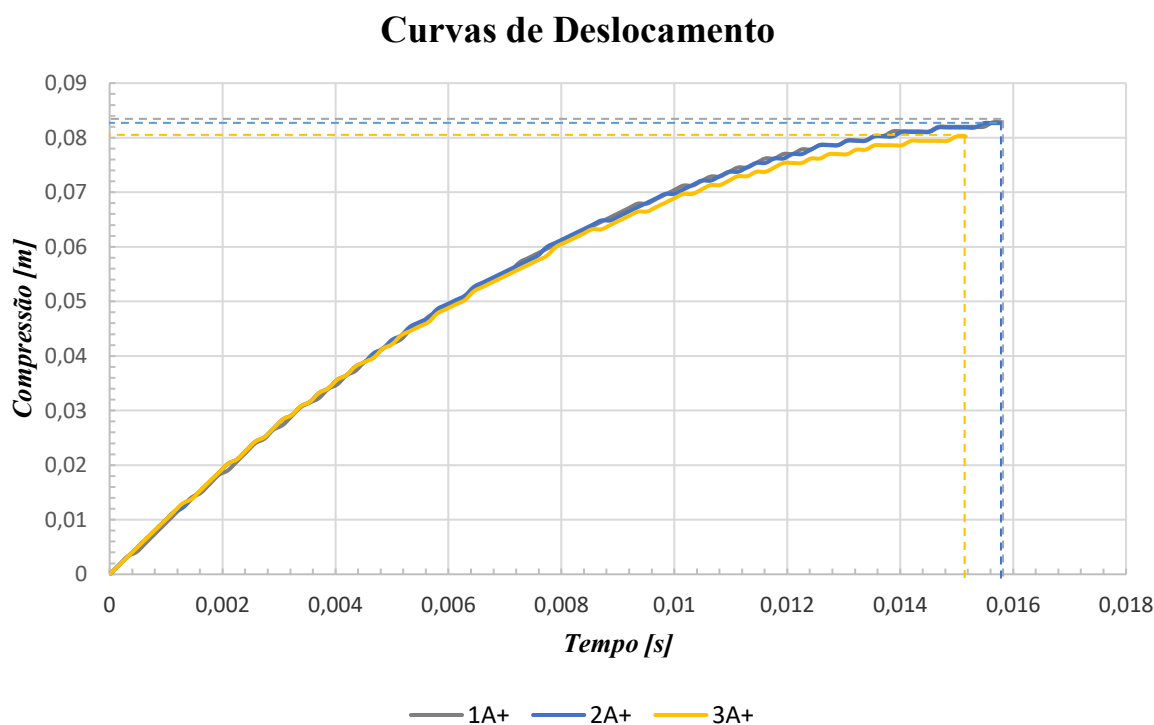


Figura 28 - Gráfico com as curvas de deslocamento

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Nas curvas apresentadas na Figura 28 observa-se que todas as amostras iniciam a deformação imediatamente após o impacto e crescem de forma semelhante até atingir o pico de deslocamento, cerca de 0,082m em torno de 0,015s. Essa sobreposição de curvas indica que as pequenas diferenças geométricas e de posicionamento não afetam significativamente o processo de colapso axissimétrico (modo misto).

## 4.2 Deformação dos tubos de seção transversal quadrada

Para os ensaios com os corpos de prova de seção transversal quadrada foram adotadas as condições de colisão apresentadas na Tabela 3 supracitada.

A Figura 29 representa as deformações nos tubos quadrados submetidos à condição de colisão “1” (Tabela 3), onde a Figura 29(a) representa o tubo antes da deformação, a Figura 29(b) representa o tubo durante a deformação e a Figura 29(c) representa o tubo após a deformação.

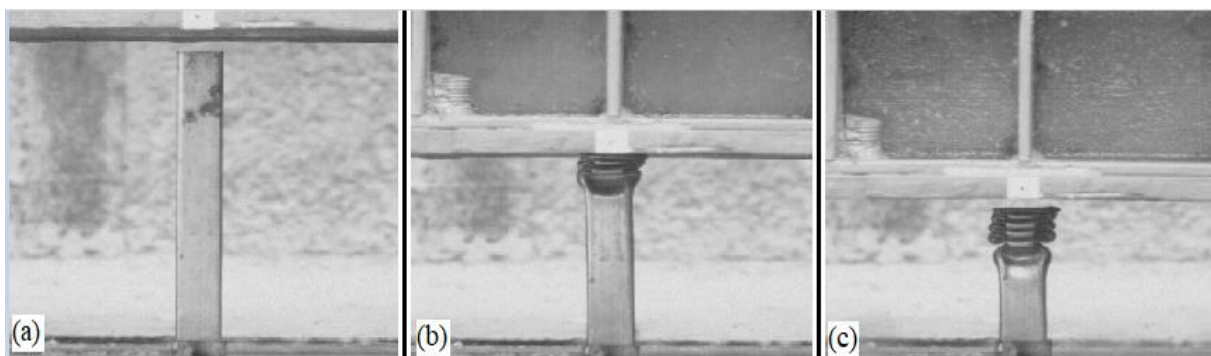


Figura 29 - Deformação do tubo quadrado: (a) antes da colisão; (b) durante a colisão; (c) após a colisão. Imagens da câmera de alta velocidade.  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Após a coleta de dados com o *software* da câmera e o tratamento dos mesmos, foram elaborados gráficos com curvas de deslocamento. A Figura 30 representa as curvas de deslocamento obtidas nos ensaios 1B-, 2B- e 3B-.

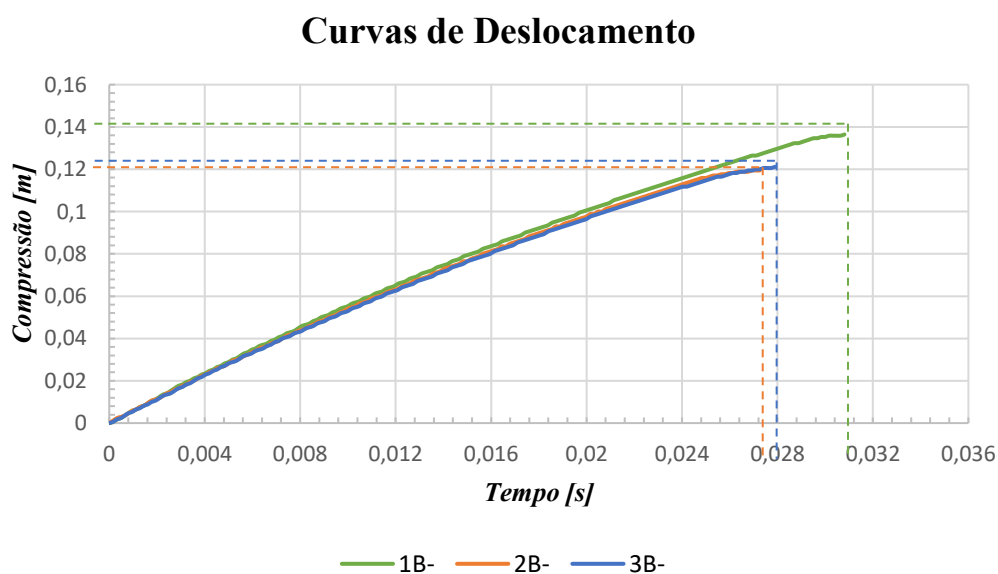


Figura 30 - Gráfico com as curvas de deslocamento  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Observa-se que na Figura 30 que os três ensaios em tubos quadrados (1B-, 2B- e 3B-) apresentam curvas quase sobrepostas, o comprova a reprodutibilidade dos ensaios. Logo após o impacto, o deslocamento cresce de maneira semelhante até atingir, em torno de 0,028s, um pico entre 0,12m e 0,14m. A pequena variação entre os picos não altera significativamente o comportamento do colapso (modo compacto).

Após realizados os ensaios com a condição de colisão “1”, foram realizados os ensaios utilizando a condição de colisão “2”.

A Figura 31 representa as deformações nos tubos redondos submetidos à condição de colisão “B” (Tabela 3), onde a Figura 31(a) representa o tubo antes da deformação, com a seção perfeitamente quadrada e sem deformação; a Figura 31(b) representa o tubo durante a deformação, quando as faces planas começam a amassar e surgem as primeiras dobras plásticas nos quatro lados e a Figura 31(c) representa o tubo após a deformação, exibindo o padrão completo de dobras múltiplas (modo compacto), que demonstra como a energia cinética do martelo é dissipada sucessivamente pelas dobras no tubo.

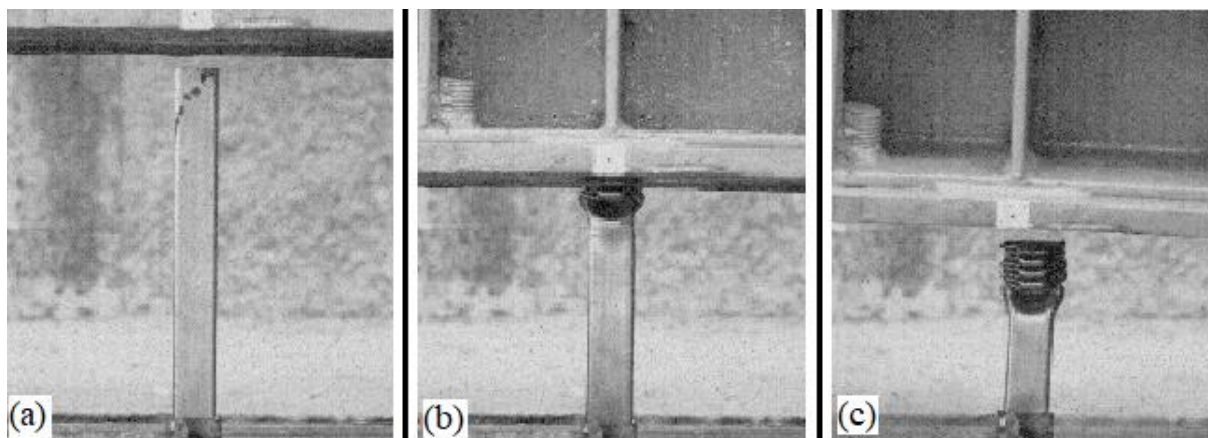


Figura 31 - Deformação do tubo quadrado: (a) antes da colisão; (b) durante a colisão; (c) após a colisão. Imagens da câmera de alta velocidade.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Após a coleta de dados com o *software* da câmera e o tratamento dos mesmos, foram elaborados gráficos com curvas de deslocamento. A Figura 32 representa as curvas de aceleração obtidas nos ensaios 1B+, 2B+ e 3B+.

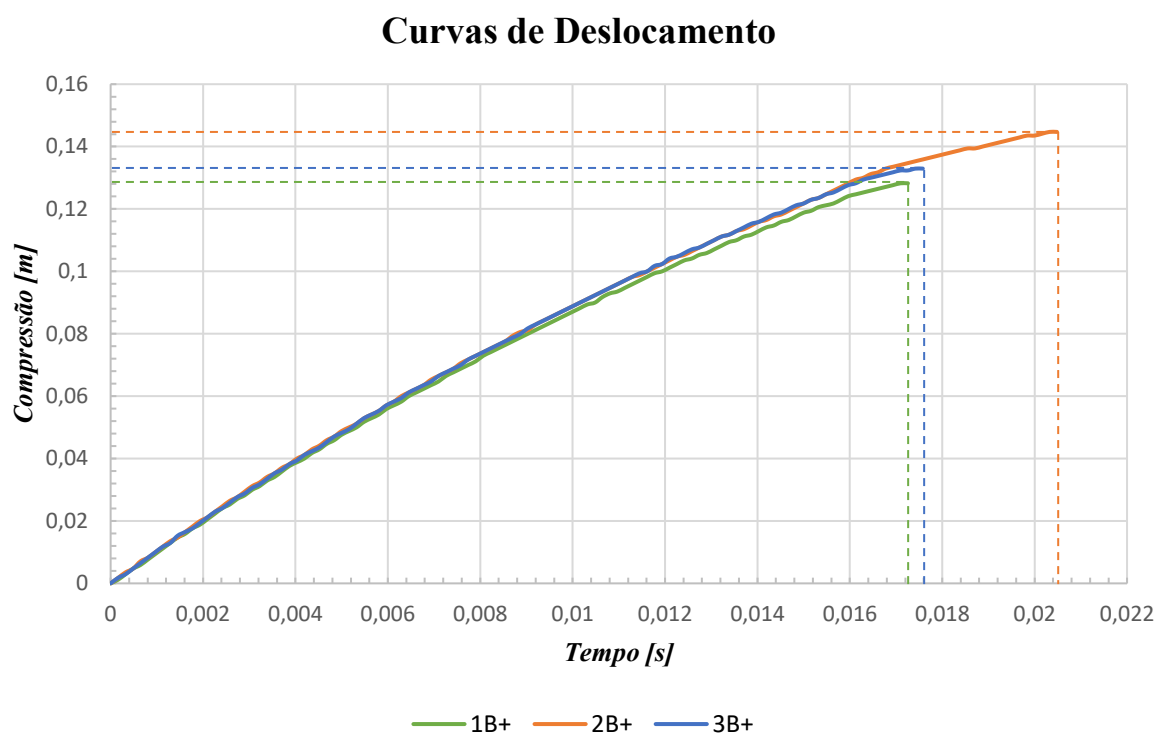


Figura 32 - Gráfico com as curvas de deslocamento  
 Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na Figura 32 observa-se que, logo após o impacto, o deslocamento evolui de maneira semelhante até atingir picos entre 0,13m e 0,15m, por volta de 0,017s a 0,021s. A sobreposição das curvas comprova a uniformidade do modo de colapso compacto nesses tubos.

### 4.3 Análise comparativa dos resultados

Após a elaboração das curvas para cada ensaio elas foram dispostas agrupadas em um único gráfico afim de melhor visualização e comparação dos resultados obtidos. Vê-se na Figura 33.

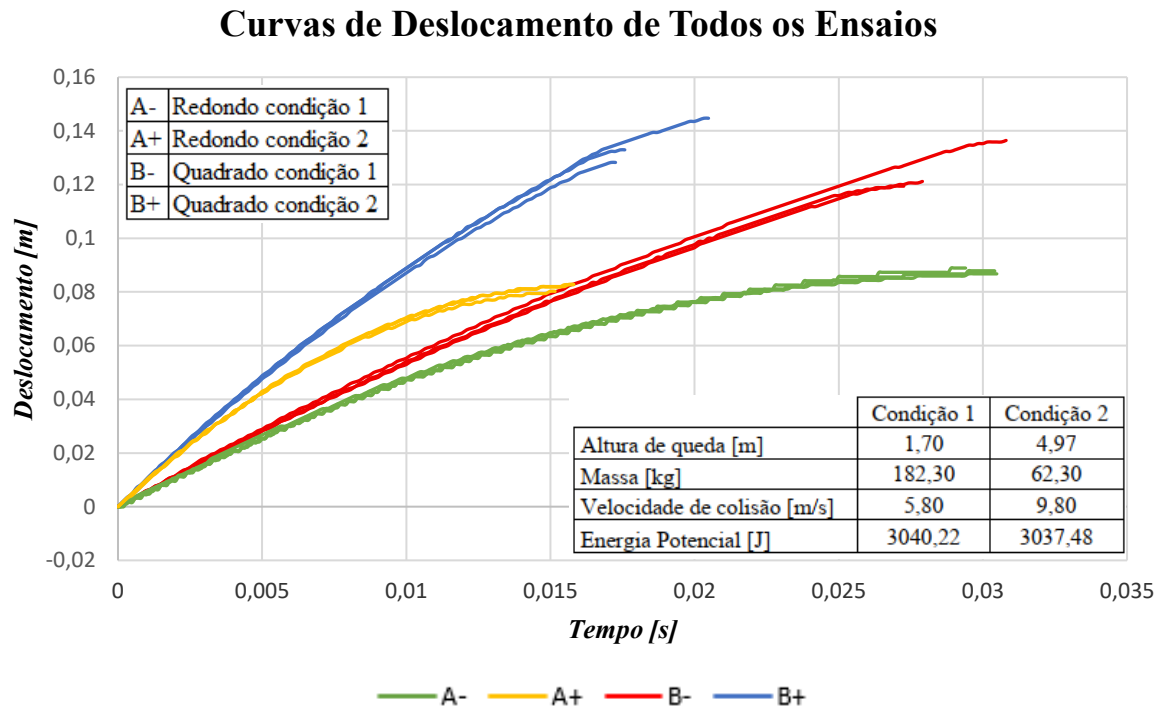


Figura 33 - Gráfico com as Curvas de Deslocamento  
 Fonte: Pesquisa direta (2025).

Observa-se na Figura 33 que os tubos de seção quadrada atingem deslocamentos máximos superiores aos de seção circular, passando de cerca de 0,0878m para 0,1257m com a condição 1 e de 0,0819m para 0,1350m com a condição 2. Esse acréscimo de deformação demonstra maior “folga” antes do bloqueio estrutural. O tempo para alcançar o pico de deslocamento também se distingue: para a condição 1 o quadrado deforma um pouco mais rápido (0,0285s contra 0,0293s), mas para a condição 2 sua deformação é mais demorada (0,0186s contra 0,0154s), indicando resposta mais distribuída ao impacto.

A inclinação inicial das curvas é mais acentuada nos tubos circulares, o que reflete rigidez inicial mais elevada e formação concentrada de dobras (modo misto). Já os quadrados exibem início de deformação mais gradual, fruto do modo de colapso compacto, reforçando sua capacidade de amortecimento.

#### 4.3.1 Impulso e força de impacto

Pela variação da quantidade de movimento (Equações 12-15):  $J = m * v$  e força média de contato é aproximada por:  $\vec{F} = \frac{J}{\Delta t}$ .

$\Delta t$  é extraído dos dados obtidos pelo *software*, podendo ser observado no gráfico da Figura 33, e os valores obtidos estão descritos abaixo na Tabela 4.

Tabela 4 - Tempo de colisão médio nos ensaios

|                         | Redondo<br>Condição 1<br>(A-) | Redondo<br>Condição 2<br>(A+) | Quadrado<br>Condição 1<br>(B-) | Quadrado<br>Condição 2<br>(B+) |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Tempo de colisão<br>[s] | 0,0293                        | 0,0154                        | 0,02855                        | 0,0186                         |

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Com o  $\Delta t$  calculado obtém-se a força média de contato, descritas na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 - Força média de deformação da amostra

| Ensaio | m [kg] | v [m/s] | $J = m \cdot v$<br>[N·s] | $\Delta t$ [s] | $\bar{F} = J/\Delta t$<br>[kN] |
|--------|--------|---------|--------------------------|----------------|--------------------------------|
| A-     | 182,3  | 5,78    | 1054                     | 0,0293         | 35,972                         |
| A+     | 62,3   | 9,87    | 615                      | 0,0154         | 39,935                         |
| B-     | 182,3  | 5,78    | 1054                     | 0,0285         | 36,982                         |
| B+     | 62,3   | 9,87    | 615                      | 0,0186         | 33,064                         |

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Observa-se que nos ensaios com velocidade menor o  $\Delta t$  varia pouco entre A- e B-. Como J é igual, a pequena redução de  $\Delta t$  em B- gera um  $\bar{F}$  aproximadamente 3% maior.

Nos ensaios com maior velocidade,  $\Delta t$  em A+ é aproximadamente 17% menor que em B+. Isso faz com que  $\bar{F}$  em A+ seja aproximadamente 21% maior que em B+.

Essa análise implica que em deformação mais lenta, a geometria quadrada tende a formar dobras iniciais mais rapidamente, acelerando o contato e elevando um pouco a força média. Em regimes de deformação mais rápida, o perfil quadrado distribui melhor o colapso, alonga o tempo de contato e reduz o pico médio de força.

#### 4.3.2 Flambagem

Ao adotar-se o módulo de elasticidade do aço carbono  $E = 205\text{GPa}$  (HIBBELER, 2010), comprimento inicial  $L = 0,250\text{m}$  e  $K = 2$  (uma extremidade engastada e a outra livre, apresentado na Figura 4) é possível calcular o momento de inércia, raio de giração (Equação 9), carga crítica (Equação 6) e tensão crítica (Equação 8). Segundo Hibbeler (2010) a fórmula para o momento de inércia em um tubo circular oco é  $I = \frac{\pi}{64} * (D_{int}^4 - D_{ext}^4)$  e para um tubo quadrado oco é  $I = \frac{b \cdot h^3 - b_{int} \cdot h_{int}^3}{12}$ . Os valores calculados estão representados na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 - Carga crítica e tensão crítica calculados

| Geometria | Dimensões [mm]                                    | I [m <sup>4</sup> ]   | A [m <sup>2</sup> ]    | r [m]  | KL/r  | P <sub>cr</sub> [kN] | $\sigma_{cr}$ [MPa] |
|-----------|---------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------|-------|----------------------|---------------------|
| Circular  | D <sub>ext</sub> =38,1;<br>D <sub>int</sub> =35,7 | 2,37*10 <sup>-8</sup> | 1,391*10 <sup>-4</sup> | 0,0130 | 38,46 | 191,80               | 1367                |
| Quadrada  | b=30,0;<br>b <sub>int</sub> =27,6                 | 1,91*10 <sup>-8</sup> | 1,382*10 <sup>-4</sup> | 0,0118 | 42,37 | 154,58               | 1127                |

Fonte: Pesquisa direta (2025).

### 4.3.3 Taxa de deformação nos tubos

Para obter-se a taxa de deformação dos tubos ocorrida nos ensaios foi calculado a velocidade média através dos dados obtidos com o *software Phantom Camera Control* e os resultados encontrados estão descritos abaixo na Tabela 7.

Tabela 7 - Velocidades médias obtidas nos ensaios

|                        | Redondo<br>Condição 1<br>(A-) | Redondo<br>Condição 2<br>(A+) | Quadrado<br>Condição 1<br>(B-) | Quadrado<br>Condição 2<br>(B+) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Velocidade Média [m/s] | 2,9964                        | 5,3275                        | 4,4018                         | 7,2670                         |

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Com as velocidades médias calculadas para cada condição de colisão e sabendo-se que o  $L_0 = 0,250\text{m}$  pode-se calcular as taxas de deformação média ao aplicar a Equação (3). A Tabela 8 abaixo representa os resultados encontrados.

Tabela 8 - Taxas de deformação média calculadas

|                                       | Redondo<br>Condição 1<br>(A-) | Redondo<br>Condição 2<br>(A+) | Quadrado<br>Condição 1<br>(B-) | Quadrado<br>Condição 2<br>(B+) |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Taxa de Deformação [s <sup>-1</sup> ] | 11,9857                       | 21,3099                       | 17,6072                        | 29,0682                        |

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na condição 1 (menor altura), o tubo quadrado tem velocidade média e taxa de deformação média aproximadamente 47% maiores que o redondo.

Na condição 2 (maior altura), o tubo quadrado mantém a vantagem, com velocidade média e taxa de deformação média cerca de 36% acima do redondo.

Os resultados sugerem que para uma mesma energia de impacto aplicada a tubos de parede fina com mesma área de seção transversal, a seção circular tende a apresentar menor deformação lateral e modos de colapso mais regulares (axissimétrico) do que a seção quadrada, que normalmente mostra maior deformação lateral, as arestas longitudinais (ângulos de  $90^\circ$ ) de um tubo quadrado são locais de concentração de tensões e também atuam como descontinuidades que iniciam modos locais de colapso.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

A revisão da base teórica sobre resistência dos materiais, flambagem de colunas, conservação do movimento, energia de impacto, fabricação de tubos e modos de colapso foi fundamental para embasar este estudo.

A metodologia experimental empregou 12 ensaios de colisão com martelo de massas distintas e quedas em duas alturas, mantendo a energia potencial constante (aproximadamente 3040J). O uso da câmera de alta velocidade e o *software PCC* garantiu as medições de deslocamento, velocidade e tempo de contato e mostrou boa reprodutibilidade dos experimentos.

Os resultados sugerem que os tubos com seção transversal circular tiveram um número de arestas de dobra (formação de lóbulos) maior que os tubos de seção transversal quadrada e, conseqüentemente, apresentaram menor taxa de deformação — sendo  $11,9857\text{ s}^{-1}$  na Condição 1 (A-) e  $21,3099\text{ s}^{-1}$  na Condição 2 (A+), contra  $17,6072\text{ s}^{-1}$  na Condição 1 (B-) e  $29,0682\text{ s}^{-1}$  na Condição 2 (B+).

A análise de taxa de deformação média e força média sugerem que os tubos quadrados apresentam maior taxa de deformação média, cerca de 47% para a condição 1 e 36% para a condição 2, e esse resultado independe da velocidade de colisão, considerando a mesma energia de colisão entre os tubos de seção redondos e quadrados. Os resultados teóricos obtidos de força média estão coerentes, pois esperava-se menor força média para taxas de deformação médias maiores.

Este trabalho atingiu o objetivo geral de analisar a influência da geometria na capacidade de absorção de energia e os objetivos específicos de revisar o referencial teórico, executar ensaios de colisão e interpretar curvas de deslocamento e dados de deformação. Os achados indicam que tubos quadrados são mais eficientes quanto a desaceleração do martelo de colisão, já os tubos circulares oferecem maior rigidez em testes de impacto.

## **5.2 Recomendações para trabalhos futuros**

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

- Análise comparativa da absorção de energia em tubos de geometrias triangular, hexagonal e convencionais;
- Estudo do comportamento estrutural de tubos circulares e quadrados reforçados com espumas metálicas, polímeros e compósitos;
- Modelagem numérica e análise paramétrica de tubos estruturais: geração de mapas de desempenho para projetos de absorção de impacto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOWICZ, W.; JONES, N. **Dynamic axial crushing of square tubes**. International Journal of Impact Engineering, p. 179–208, 8 jun. 1984.

ABRAMOWICZ, W. **Thin-walled structures as impact energy absorbers**. Elsevier, 2003. p. 91–107.

ALMEIDA, Mário de S. **Elaboração de projeto, TCC, dissertação e tese: uma abordagem simples, prática e objetiva**. São Paulo: Grupo GEN, 2014. E-book. ISBN 978-85-9702-592-7. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597025927/>. Acesso em: 18 jul. 2023.

ALVES, G. T. **Avaliação de absorção de energia de impacto: uma abordagem baseada em testes com estruturas similares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, p. 153. 2009. Disponível em: [http://meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br/teses/MSc09\\_Gilvania.pdf](http://meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br/teses/MSc09_Gilvania.pdf). Acesso em: 06 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6971: defesa metálica – projeto e implantação**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://cdn.awsli.com.br/1012/1012749/arquivos/6971-1999-DefensaMetalica-ProgetoEImplantacao-completo.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2025.

AUERSVALDT, R. R. **Análise paramétrica de absorvedores de energia de impacto poligonais com janelas laterais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 125. 2014.

BIOPDI. **Diagrama tensão deformação: principais conceitos**. Biopdi, [s.d.]. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/diagrama-tensao-deformacao/>. Acesso em: 06 ago. 2025.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA. **Segurança veicular: dispositivos de segurança passiva — descrição e recomendações**. Disponível em: <https://maua.br/files/monografias/seguranca-veicular-dispositivos-de-seguranca-passiva-descricao-e-recomendacoes.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2023.

DIETER, George E. **Metalurgia mecânica**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

FILHO, Damiao Meira; KAMASSURY; SANTOS, Jorge Kysnney; MEIRA, Rose. **Uma discussão sobre o coeficiente de restituição**. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2017. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/315984787\\_Uma\\_discussao\\_sobre\\_o\\_coeficiente\\_d\\_e\\_restituicao](https://www.researchgate.net/publication/315984787_Uma_discussao_sobre_o_coeficiente_d_e_restituicao). Acesso em: 06 jul. 2023.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaaios dos materiais**. 2ª edição. São Paulo: Grupo GEN, 2012. E-book. ISBN 978-85-216-2114-0. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2114-0/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Grupo GEN, 2022. E-book. ISBN 978-65-5977-165-3. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559771653/>. Acesso em: 18 jul. 2023.

GOMES, Marcello de Oliveira. **Estudo da absorção de energia em diferentes geometrias de estruturas de paredes finas em aço DP600 submetidas a compressão progressiva dinâmica para uso na indústria automobilística**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/38286>. Acesso em: 05 ago. 2025.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física – Vol. 1**. 5ª edição. São Paulo: Grupo GEN, 2002. E-book. ISBN 978-85-216-1945-1. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1945-1/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física – Mecânica – Volume 1**. São Paulo: Grupo GEN, 2023. E-book. ISBN 978-85-216-3855-1. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521638551/>. Acesso em: 06 jul. 2023.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7ª edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010. ISBN 978-85-7605-373-6.

HIBBELER, Russell C. **Dinâmica: mecânica para engenharia**. 12ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

IKEDA, T. **Descrição de itens de segurança veicular passiva e recomendações de seu uso adequado na condição de ocupante de um veículo automotivo**. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Automotiva) – Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, p. 72. 2012.

KARVI. **Guard rail (defensa metálica): entenda o que é e seu papel**. Karvi, 28 fev. 2023. Disponível em: <https://blog.karvi.com.br/guard-rail-defensa-metalica-entenda-papel/>. Acesso em: 06 jun. 2025.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Editora Blucher, 2013. E-book. ISBN 978-85-2120-683-5. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521206835/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

LU, Guoxing; YU, Tongxi. **Energy Absorption of Structures and Materials**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003. ISBN 978-1-85573-688-7.

MARCONI, Marina de A.; LAKATOS, Eva M. **Metodologia científica**. São Paulo: Grupo GEN, 2022. E-book. ISBN 978-65-5977-067-0. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559770670/>. Acesso em: 25 jul. 2023.

NIPPON STEEL CORPORATION. **High-efficiency crash box mounted on Mazda Corporation's new "Atenza"**. Press Release, 05 Feb. 2008. Disponível em: [https://www.nipponsteel.com/en/news/old\\_smi/2008/news2008-02-05.html](https://www.nipponsteel.com/en/news/old_smi/2008/news2008-02-05.html). Acesso em: 05 ago. 2025.

PEDUZZI, Pedro. **Acidentes em rodovias federais matam 6,16 mil pessoas em 2024**. Agência Brasil, 17 abr. 2025. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2025-04/acidentes-em-rodovias-federais-matam-616-mil-pessoas-em-2024>. Acesso em: 05 ago. 2025.

PINHEIRO, Antônio Carlos da Fonseca B.; CRIVELARO, Marcos. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Grupo GEN, 2021. E-book. ISBN 978-85-2163-778-3. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637783/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

TELLES, P. C. S. **Tubulações industriais – materiais, projeto, montagem**. 10ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Death on the roads**. Disponível em: <https://extranet.who.int/roadsafety/death-on-the-roads/#ticker>. Acesso em: 05 mai. 2023.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física: mecânica**. 14ª edição. São Paulo: Pearson, 2016. ISBN 978-85-430-0568-3.