



**UFOP**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**MATHEUS ASSIS GONÇALVES MARTINHO**

**ESTUDO DA VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS CABOS DE AÇO  
UTILIZADOS EM ACIONAMENTOS DE SISTEMAS MECÂNICOS**

**OURO PRETO – MG  
2025**

**MATHEUS ASSIS GONÇALVES MARTINHO**

**[matheus.martinho@aluno.ufop.edu.br](mailto:matheus.martinho@aluno.ufop.edu.br)**

**ESTUDO DA VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS CABOS DE AÇO  
UTILIZADOS EM SISTEMAS MECÂNICOS**

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.

Orientador: DSc.Paulo Henrique Vieira Magalhães

**OURO PRETO – MG  
2025**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M385e Martinho, Matheus Assis Goncalves.

Estudo da verificação da resistência dos cabos de aço utilizados em  
acionamentos de sistemas mecânicos. [manuscrito] / Matheus Assis  
Goncalves Martinho. Matheus Assis Gonçalves Martinho. - 2025.

41 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Vieira Magalhães.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Engenharia mecânica. 2. Cabos de aço. 3. Ruptura. I. Martinho,  
Matheus Assis Gonçalves. II. Magalhães, Paulo Henrique Vieira. III.  
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Digite o nome do autor Matheus Assis Gonçalves Martinho  
Estudo da verificação da resistência dos cabos de aço utilizados em sistemas mecânicos

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 22 de Outubro de 2025

### Membros da banca

Dr. - Paulo Henrique Vieira Magalhães - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. - Washington Luis Vieira da Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. - Diogo Antônio de Sousa - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Paulo Henrique Vieira Magalhães, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 17/12/2025



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Vieira Magalhaes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/12/2025, às 21:02, 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 **1034422** e o código CRC **4DF1D409**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.016387/2025-70

SEI nº 1034422

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

## **AGRADECIMENTO**

A jornada até a conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso foi repleta de aprendizados, desafios e transformações. Neste momento tão significativo, é com gratidão que reconheço e agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade.

Agradeço primeiramente a Deus, por me fortalecer nos momentos difíceis e me permitir chegar até aqui com fé e perseverança.

À minha família, meu amor e minha base. Obrigado por acreditarem em mim, pelo apoio incondicional e pelas palavras de incentivo nos momentos em que mais precisei. Sem vocês, nada disso faria sentido.

Ao meu orientador, Paulo Henrique Vieira, minha sincera gratidão pela paciência, dedicação e orientação ao longo desta caminhada. Sua escuta atenta, críticas construtivas e incentivo foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e professoras que fizeram parte da minha formação acadêmica, agradeço pelos ensinamentos, pelo comprometimento e pela inspiração que levarei para além da graduação.

Aos colegas e amigos que estiveram comigo durante essa trajetória, compartilho esta conquista com vocês. As conversas, risos, trocas e apoios foram essenciais para que este caminho fosse mais leve e significativo.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para este processo, meu muito obrigado.

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

Martin Luther King

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento mecânico de cabos de aço utilizados em sistemas mecânicos, por meio de ensaios de tração realizados em seis corpos de prova com geometria padronizada. A metodologia consistiu na realização de testes experimentais utilizando uma máquina universal de ensaios, na qual foram monitorados parâmetros como resistência à tração, tempo até a ruptura e o incremento de tensão ao longo do tempo. Apesar de os corpos de prova possuírem características dimensionais semelhantes, os resultados demonstraram variações significativas, especialmente em relação à resistência máxima suportada e ao tempo até a falha. O corpo de prova CP4 apresentou o melhor desempenho, com maior resistência e durabilidade, enquanto o CP1 rompeu prematuramente, indicando possíveis imperfeições estruturais ou falhas no processo de fabricação. A análise dos dados foi confrontada com parâmetros normativos e com a literatura técnica, revelando que fatores como microdefeitos, tensões residuais, composição química e condições de ensaio têm papel determinante no desempenho mecânico do material. Conclui-se, portanto, que a capacidade de resistência estrutural dos cabos depende não apenas de suas propriedades físicas, mas também de um rigoroso controle de qualidade, tanto na fabricação quanto na execução dos testes, especialmente em aplicação crítica.

**Palavras-chave:** ensaio de tração; cabo de aço; resistência mecânica; ruptura.

## ABSTRACT

This work aimed to analyze the mechanical behavior of wire ropes used in aeronautical systems, through traction tests performed in three proof bodies with standard geometry. The methodology consisted of experimenting testing using a universal testing machine, in which parameters such as traction resistance, time to break and stress increase over time were monitored. Although the test bodies have similar dimensional characteristics, the results showed significant variations, especially in relation to the maximum supported resistance and time to failure. The CP4 specimen presented the best performance, with greater resistance and durability, while CP1 broke prematurely, indicating possible structural imperfections or failures in the manufacturing process. Data analysis was confronted with normative parameters and technical literature, revealing that factors such as microdefects, residual tensions, chemical composition and test conditions play a determining role in the mechanical performance of the material. It is concluded, therefore, that the structural reliability of the cables depends not only on their physical properties, but also on a strict quality control, both in manufacturing and in the execution of the tests, especially in critical application.

**Key-words:** traction test; wire rope; mechanical resistance; rupture; structural reliability.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Imagem demonstrativa do corpo de prova no ensaio de tração .....	16
Figura 2 – Imagem demonstrativa do comportamento da curva no ensaio de tração .....	17
Figura 3 – Imagem relativa ao passos da pesquisa seguidos neste trabalho.....	28
Figura 4 – Máquina Emic DL20000.....	32
Figura 5 – Demonstração dos corpos de prova utilizados na realização no ensaio de tração ..	34
Figura 6 – Demonstração da forma da retirada da medida do diâmetro dos corpos de prova .	34
Figura 7 – Resultados obtidos do ensaio de tração.....	37
Figura 8 – Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 1 .....	38
Figura 9 – Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 2 .....	39
Figura 10 – Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 3 .....	39
Figura 11 – Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 4 .....	40
Figura 12 – Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 5 .....	40
Figura 13 – Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 6 .....	41

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 –Variáveis e Indicadores.....	30
Tabela 2 –Medidas do diâmetro dos corpos de prova .....	35
Tabela 3 –Construção e propriedades físicas do cabo de aço tipo I, em aço carbono e aço resistente a corrosão.....	42

## LISTA DE SÍMBOLOS

**$\sigma$** : Tensão — força por unidade de área (N/mm<sup>2</sup> ou MPa).

**$\varepsilon$** : Deformação específica — razão adimensional entre o alongamento e o comprimento inicial.

**E**: Módulo de elasticidade ou Módulo de Young — medida da rigidez do material, calculado por  $E = \sigma / \varepsilon$ .

**$\alpha$** : Inclinação da curva na região elástica — usada para obter o módulo de elasticidade.

**$\sigma_0$** : Tensão convencional — valor obtido pela divisão da força aplicada pela área inicial da seção transversal.

**$\Delta L$** : Variação de comprimento — diferença entre o comprimento final e inicial do corpo de prova.

**$L_0$** : Comprimento inicial do corpo de prova.

**$A_0$** : Área inicial da seção transversal do corpo de prova.

**$\sigma_p$** : Tensão no limite de proporcionalidade — ponto onde a relação linear entre tensão e deformação deixa de existir.

**$\sigma_e$** : Tensão no limite de elasticidade — fim do comportamento elástico reversível.

**$\sigma_{eL}$** : Tensão de escoamento inferior — início da deformação plástica permanente.

**$\sigma_{eH}$** : Tensão de escoamento superior — pico inicial no escoamento com movimentação de discordâncias.

**$\sigma_t$** : Tensão máxima (ou tensão última) — valor mais alto da curva tensão-deformação antes do início da estrição.

**$\sigma_r$** : Tensão de ruptura — tensão correspondente ao ponto em que ocorre a falha final do material.

**$\Delta \sigma$** : Amplitude de tensão em ensaios de fadiga — diferença entre a tensão máxima e mínima no ciclo.

**NNN:** Número de ciclos até a falha — utilizado em ensaios de fadiga para estimar a durabilidade do material.

**$\sigma_{\text{limite de fadiga}}$ :** Valor de tensão abaixo do qual o material pode resistir a um número infinito de ciclos sem falhar.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1	Formulação do Problema .....	8
1.2	Justificativa.....	9
1.3	Objetivos.....	10
1.3.1	Geral .....	10
1.3.2	Específicos.....	10
1.4	Estrutura do Trabalho .....	10
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
2.1.1	Propriedades Mecânicas dos materiais: .....	11
2.1.3	Dureza.....	12
2.1.4	Tenacidade:.....	12
2.1.5	Resiliência: .....	13
2.1.6	Fadiga: .....	14
2.1.7	Fragilidade.....	14
2.2	Classificação dos ensaios dos materiais .....	15
2.2.1	Ensaio destrutivos e não destrutivos .....	16
2.2.2	Ensaio de tração.....	16
2.2.3	Modulo de elasticidade, modulo de resiliência .....	23
2.3	Ensaio de Fadiga.....	24
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
3.1	Tipo de pesquisa .....	26
3.2	Materiais e Métodos .....	27
3.3	Variáveis e indicadores.....	30
	Fonte: Pesquisa direta (2024). .....	31
3.4	Instrumento de coleta de dados .....	31
3.5	Tabulação dos dados.....	31
3.6	Considerações finais .....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>49</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

Os cabos de aço são componentes amplamente empregados em diversas indústrias, incluindo à aeronáutica, construção civil e setores de petróleo e gás, entre outros. Esses cabos desempenham um papel essencial no transporte de equipamentos, como aviões elevadores e guias.

Um cabo de aço é um conjunto de fios ou filamentos de aço, frequentemente trançados ou agrupados, aproveitando as propriedades do aço (alta resistência à tração, ductilidade, tenacidade) cujo objetivo é a transmissão de cargas ou suportar tensões de tração em aplicações estruturais ou mecânicas.(CALLISTER,2020).

No entanto, seu projeto e aplicação devem ser executados de maneira a para prevenir possíveis falhas. Os cabos de aço podem ser suscetíveis a problemas de desgaste devido ao atrito com outros componentes das máquinas, bem como devido a cargas externas de tração, torção e flexão (CRUZADO, 2012).

Segundo Norton (2013) as peças inter-relacionadas também são chamadas, às vezes, de elementos da máquina neste contexto. A noção de trabalho útil é básica para a função de uma máquina, existindo quase sempre alguma transferência de energia envolvida.

Umas das formas de se determinar as características mecânicas de um material é através da realização de testes destrutivos em amostras, sob condições de carregamento controlado. No entanto, as cargas aplicadas nos testes geralmente não conseguem replicar com precisão as condições reais de serviço às quais as peças da máquina são submetidas, a menos em situações específicas.

De acordo com apresentado acima determinar as propriedades de um material com precisão é algo de extrema importância para os componentes e sistemas mecânicos, assim temos a seguinte pergunta problema:

**Como verificar a resistência dos cabos de aço de sistemas mecânicos?**

## 1.2 Justificativa

Tratando-se das áreas de possíveis e diversas aplicações dos cabos de aço eles precisam ser bem projetados e dimensionados para que não ofereçam riscos aos usuários. Em vista disso, a escolha do tipo do cabo de aço, como também, o cálculo do diâmetro correto, seguindo fatores de segurança indicados pelas literaturas, é de fundamental importância para garantir a segurança do equipamento.

Os cabos de aço sendo utilizados como componentes estruturais, como reforço para pneus, pontes e barcos, também desempenham um papel fundamental em sistemas de transporte, como guindastes, elevadores, teleféricos e aviões. Em cabos que operam sobre polias, um sistema de tração fundamental na indústria de elevação, ocorre um movimento oscilatório entre os arames do cabo, levando ao desgaste natural ao longo do tempo (CRUZADO,2012).

O estudo da fadiga em cabos de aço é uma parte importante da engenharia mecânica e estrutural, especialmente quando se trata de aplicações que envolvem elevação de cargas, como guindastes, guinchos, pontes suspensas, linhas de transmissão, entre outros. A fadiga se refere à falha de um material ou componente estrutural devido à repetição cíclica de cargas, mesmo que essas cargas individuais não excedam o limite de resistência do material.

De acordo com Norton (2013) os testes de tração e torção aplicam cargas de forma gradual e somente uma vez ao corpo de prova, caracterizando-se como ensaios estáticos que avaliam resistências estáticas. Embora algumas peças de máquinas possam ser expostas apenas a cargas estáticas durante sua vida útil, a maioria será submetida a forças e tensões que variam ao longo do tempo.

Os materiais reagem de maneira distinta quando sujeitos a cargas cíclicas que se alternam (conhecidas como solicitações variáveis ou fadiga) em comparação às situações em que as cargas permanecem constantes. Dado que a maior parte do projeto de máquinas envolve componentes sujeitos a solicitações variáveis, é fundamental compreender a resistência à fadiga dos materiais nessas condições de carregamento (CRUZADO,2012).

Conforme o apresentado o estudo e realização de ensaios destrutivos e cílicos são importantes para se realizar uma análise de um cabo aço podendo encontrar numericamente suas resistências a tração e a fadiga.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Geral

Verificar dados sobre a resistência do cabo de aço com intuito de identificar o principal problema que está resultando no rendimento inadequado do cabo de aço.

### 1.3.2 Específicos

- Realizar a revisão bibliográfica dos conceitos que serão abordados no trabalho como: conceituações de elementos de máquina e propriedades dos materiais, revisar normas sobre ensaios de tração e fadiga em cabos aço;
- Buscar a relação entre o diâmetro da roldana com o diâmetro do cabo;
- Realizar o ensaio de tração;

## 1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho será dividido em cinco capítulos, o Capítulo 1 abordará a definição do problema de pesquisa, sua justificativa e os objetivos, tanto gerais quanto específicos. No Capítulo 2, será realizada uma revisão bibliográfica, contemplando os principais conceitos pertinentes ao estudo, incluindo resistência à tração, normas aplicáveis aos ensaios de tração. O Capítulo 3 descreverá a metodologia adotada para a condução dos ensaios, detalhando os procedimentos e parâmetros utilizados nas análises. O Capítulo 4 apresentará os resultados obtidos a partir dos testes realizados, seguidos da respectiva análise e discussão. Por fim, o Capítulo 5 trará as conclusões do estudo, acompanhadas de recomendações e considerações finais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1.1 Propriedades Mecânicas dos materiais:

Muitos materiais, ao serem utilizados, estão sujeitos a forças ou cargas; alguns exemplos incluem a liga de alumínio usada na construção da asa de um avião e o aço empregado no eixo de um carro (CLÁUDIA,2018). Nessas circunstâncias, é fundamental entender as características do material e projetar o componente de modo que a deformação resultante não seja excessiva nem leve à fratura (CLÁUDIA,2018).

Segundo Callister (2020) o comportamento mecânico de um material representa sua reação ou deformação quando uma carga ou força é aplicada. Entre as propriedades mecânicas mais relevantes para um projeto estão a rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade (CALLISTER,2020).

De acordo com Norman Dowling (2017) as propriedades mecânicas dos materiais são avaliadas através de experimentos laboratoriais cuidadosamente planejados, que simulam da maneira mais precisa possível as condições de uso. Dentre os fatores a serem levados em conta estão a natureza da força aplicada, o tempo de sua aplicação e as condições do ambiente (CLÁUDIA,2018).

A seguir abordaremos algumas definições sobre as propriedades mecânicas citadas acima.

### 2.1.2 Ductibilidade

Ductilidade é a propriedade de um material que descreve sua capacidade de sofrer deformação plástica significativa antes da fratura (CLÁUDIA,2018). Um material com alta ductilidade pode ser estirado ou deformado sob tensões elevadas sem quebrar, o que é um indicativo de sua maleabilidade e capacidade de absorver energia durante a deformação (NORMAN,2018).

Ductilidade também pode ser considerada como a medida da capacidade de um material de se deformar plasticamente antes de fraturar (CALLISTER,2020). Um material dúctil pode ser estirado ou alongado sob tensão sem se romper, apresentando grande deformação antes da ruptura. Essa propriedade é importante porque permite que o material absorva energia e se adapte a tensões, diminuindo a chance de falhas catastróficas (CALLISTER,2020).

Entretanto, uma outra definição para ductilidade é que ela pode ser considerada como a capacidade de um material de sofrer deformação plástica significativa sob a ação de uma carga antes de se romper (AMAURI, 2012). Materiais dúcteis podem ser deformados em grande extensão sem fraturar, o que é avaliado normalmente por meio de ensaios de tração, que medem o alongamento e a redução de área do material durante o ensaio (AMAURI, 2012).

### **2.1.3 Dureza**

A dureza pode ser entendida como a resistência de um material à deformação plástica permanente quando submetido a uma carga aplicada (AMAURI, 2012). Segundo Garcia (2012), a dureza está diretamente relacionada à capacidade do material de resistir à penetração de um corpo rígido. Essa resistência é medida utilizando diferentes escalas, como Brinell, Rockwell, e Vickers, cada uma delas com suas próprias características e métodos de aplicação. Materiais com maior dureza tendem a ser mais resistentes à abrasão e desgaste (AMAURI, 2012).

De acordo com Norman Dowling (2017), a dureza de um material está fortemente ligada à sua estrutura cristalina e à forma como os átomos estão organizados. Conforme Norman Dowling(2017) materiais com ligações mais fortes, como as ligações covalentes nos diamantes ou ligações metálicas reforçadas por átomos de impurezas em ligas metálicas, apresentam maiores valores de dureza. Esse conceito mostra que a dureza não é apenas um valor isolado, mas reflete características intrínsecas do material que afetam sua resistência a arranhões, penetrações e deformações.

Segundo Callister (2020), a dureza está intimamente relacionada a outras propriedades mecânicas, como a resistência à tração e a resistência ao escoamento. Isso significa que, muitas vezes, materiais com alta dureza também apresentam alta resistência à fratura. Essa relação torna a dureza um parâmetro amplamente utilizado como um indicador rápido da durabilidade e resistência de materiais em diversas aplicações industriais (CALLISTER,2020).

### **2.1.4 Tenacidade:**

Segundo Garcia (2012), a tenacidade é a capacidade de um material de absorver energia e deformar plasticamente antes de fraturar. Garcia(2012) afirma que os materiais tenazes possuem a combinação de alta ductilidade e alta resistência, permitindo que suportem grandes

deformações sob tensões sem fraturar. É uma propriedade fundamental em materiais usados em aplicações que envolvem impacto e choques, como nos setores automotivo e aeroespacial (GARCIA, 2012).

Callister (2020) define tenacidade como a capacidade de um material de resistir à fratura quando submetido a uma carga súbita. Isso é frequentemente avaliado por meio de ensaios de impacto, como o teste Charpy ou Izod, que medem a energia absorvida por um material ao ser submetido a uma carga de impacto. Materiais com alta tenacidade não apenas resistem ao impacto, mas também têm uma maior capacidade de absorver deformações antes de falharem (CALLISTER,2020).

De acordo com Norman Dowling (2017), a tenacidade pode ser definida como a energia total absorvida por um material até o ponto de fratura. Para ser tenaz, um material deve ter uma combinação balanceada de resistência e ductilidade. Segundo Garcia(2012) um material muito resistente, mas frágil (como o vidro), terá baixa tenacidade, enquanto materiais com alta ductilidade, como o aço, são geralmente mais tenazes, pois conseguem absorver mais energia antes de se romper.

### **2.1.5 Resiliência:**

Budynas (2016) afirma que resiliência é a capacidade de um material de retornar à sua forma original após serem deformado elasticamente. O mesmo autor também diz que a quantidade de energia que pode ser armazenada e recuperada por um material sem danos permanentes é um fator crucial para o desempenho de elementos mecânicos que operam sob cargas variáveis.

Segundo Weinberg e Mares (2020), resiliência é a capacidade de resistir a pequenas deformações sob cargas elásticas. Materiais resilientes têm maior capacidade de resistir a impactos ou forças repetitivas sem danos permanentes. Conforme Garcia (2012), a resiliência de um material depende diretamente de seu módulo de elasticidade. Materiais com um módulo elástico alto absorvem mais energia antes de qualquer deformação plástica.

Dowling (2017) descreve a resiliência como a capacidade de um material de resistir a pequenas deformações e voltar ao seu estado original. Materiais com alta resiliência são aqueles que, após a aplicação de uma força ou deformação, conseguem retornar rapidamente ao seu formato inicial, sem que haja deformações plásticas. É um indicador importante de materiais

usados em sistemas mecânicos que exigem flexibilidade e recuperação rápida (DOWLING,2017).

#### **2.1.6 Fadiga:**

De acordo com Mendes e Silveira (2014), a fadiga ocorre quando um material é submetido a cargas cíclicas ou repetitivas, mesmo que estas estejam abaixo do limite de resistência do material. Mendes e Silveira (2014) também diz que com o tempo, essas tensões repetitivas causam o surgimento de trincas microscópicas, que se propagam até o material falhar,é uma das principais causas de falha em componentes mecânicos e estruturas de engenharia.

Segundo Dowling (2017), a fadiga é caracterizada pela propagação de trincas sob a ação de tensões cíclicas. Essas trincas se formam inicialmente em áreas de concentração de tensões e crescem com o número de ciclos aplicados, até que o material atinja um ponto crítico de falha. A vida útil de um componente sujeito a fadiga depende do número de ciclos e da amplitude da tensão aplicada (DOWLING,2017).

Conforme Askeland (2014), a fadiga é definida como a redução gradual da resistência de um material quando ele é submetido a cargas repetitivas. Já Budynas (2016) diz que diferentemente de outros modos de falha, a fadiga ocorre a longo prazo e pode ser influenciada por fatores como temperatura, meio ambiente e condições superficiais do material, afetando componentes em diversas indústrias, desde a automotiva até a aeroespacial.

#### **2.1.7 Fragilidade**

Segundo Mendes e Silveira (2014), a fragilidade se refere à incapacidade de um material de sofrer deformações plásticas significativas antes de se romper. Materiais frágeis, como o vidro, tendem a se romper rapidamente quando submetidos a tensões, com pouca ou nenhuma deformação antes da falha.

De acordo com Guesser (2019), materiais frágeis possuem um alto módulo de elasticidade e uma baixa capacidade de absorver energia antes da fratura..

Weinberg e Mares (2020) mencionam que a fragilidade é uma característica comum em materiais cerâmicos e materiais cristalinos, nos quais a propagação de trincas ocorre rapidamente devido à falta de ductilidade, resultando em falhas súbitas e catastróficas.

De acordo com Pinheiro e Crivelaro (2021), a fragilidade está intimamente ligada à baixa tenacidade, o que significa que materiais frágeis não conseguem absorver grandes quantidades de energia antes de falhar. Isso os torna inadequados para aplicações que exigem resistência ao impacto.

## 2.2 Classificação dos ensaios dos materiais

Os ensaios de materiais podem ser classificados em duas categorias principais: destrutivos, que envolvem a alteração permanente ou quebra do material testado (por exemplo, ensaios de tração, compressão e dureza), e não destrutivos, que avaliam propriedades sem comprometer a integridade do material (como ensaios ultrassônicos e radiográficos) (ASKELAND *et al.*, 2014).

Os ensaios mecânicos avaliam o comportamento do material sob forças aplicadas. Incluem testes como tração, compressão, torção e flexão, e são utilizados para medir propriedades como resistência, elasticidade, ductilidade e tenacidade (WICKERT; LEWIS, 2022).

Ensaio físicos são ensaios que determinam as propriedades físicas dos materiais, como densidade, condutividade térmica, condutividade elétrica e coeficiente de expansão térmica, sem necessariamente envolver a aplicação de carga (ASKELAND *et al.*, 2014).

Segundo Cláudia (2012) os ensaios químicos, por sua vez, avaliam a composição química dos materiais, permitindo a identificação e quantificação dos elementos presentes. Esses ensaios são essenciais para garantir a conformidade do material com especificações e normas industriais (JR, 2020).

No entanto Callister (2020) considera que os ensaios de fadiga classificam-se como ensaios mecânicos, mas com enfoque específico em determinar a resistência de um material quando submetido a ciclos repetidos de carga. Esses ensaios são importantes para prever a durabilidade do material em aplicações sujeitas a tensões cíclicas (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

Essas classificações cobrem as principais abordagens e metodologias aplicadas nos ensaios de materiais, cada uma com seu objetivo e especificidades.

### **2.2.1 Ensaios destrutivos e não destrutivos**

Os ensaios destrutivos de acordo com Cláudia (2012) são aqueles em que o ensaio é levado a causar a inutilização do material ou do corpo de prova, mesmo que o dano aparente seja mínimo. Esses testes são amplamente utilizados para determinar ou verificar as propriedades dos materiais. Além disso, são frequentemente empregados para avaliar a capacidade de um componente em suportar diferentes tipos de esforços (CLÁUDIA, 2012).

Ensaios não destrutivos (END) são métodos de teste utilizados para avaliar as propriedades ou integridade de um material ou peça sem causar danos permanentes (GARCIA, 2012).

Esses ensaios são cruciais em setores como a indústria aeronáutica e construção civil, onde é essencial garantir a segurança e a qualidade dos materiais e estruturas sem comprometê-los. Exemplos incluem ultrassom, radiografia (CALLISTER, 2020).

### **2.2.2 Ensaio de tração**

Entre os diversos tipos de ensaio existentes para Callister (2020) a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o processo mais amplamente utilizado é o ensaio de tração. Essa aplicabilidade de acordo com Norman (2018) se deve ao fato de ser um tipo de ensaio relativamente simples e de realização rápida, além de fornecer informações importantes e primordiais para projeto e fabricação de peças e componentes.

Para Cláudia (2018) o ensaio de tração envolve a aplicação gradual de cargas de tração ao longo do eixo nas extremidades de um corpo de prova, conforme especificado por norma, até que ocorra a ruptura. Durante o ensaio, a deformação se concentra na região central, que possui seção uniforme e é mais estreita no corpo de prova.(CALLISTER,2020)

Segundo Norman (2018) um ensaio de tração envolve aplicar gradualmente uma força axial a uma amostra de material até a sua ruptura. O mesmo autor também aborda o levantamento da curva de tensão de tração pela deformação sofrida pelo corpo consiste no resultado do teste de traçado. A figura 1 mostra o que ocorre com o corpo de prova neste ensaio.

Figura 1: Corpo de prova.

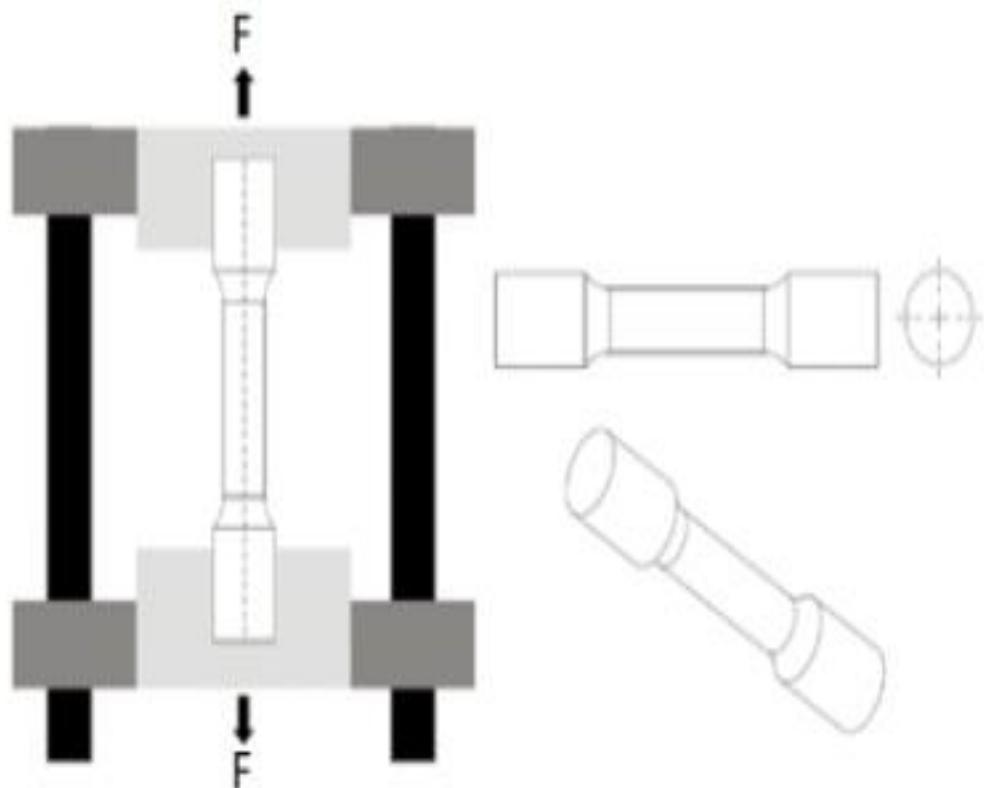


Figura 1: Corpo de prova.

Fonte: Cláudia, 2018, p.45.

A figura 2 a seguir mostra comportamento da curva da curva do ensaio de tração.

Figura 2: Ensaio de tração.

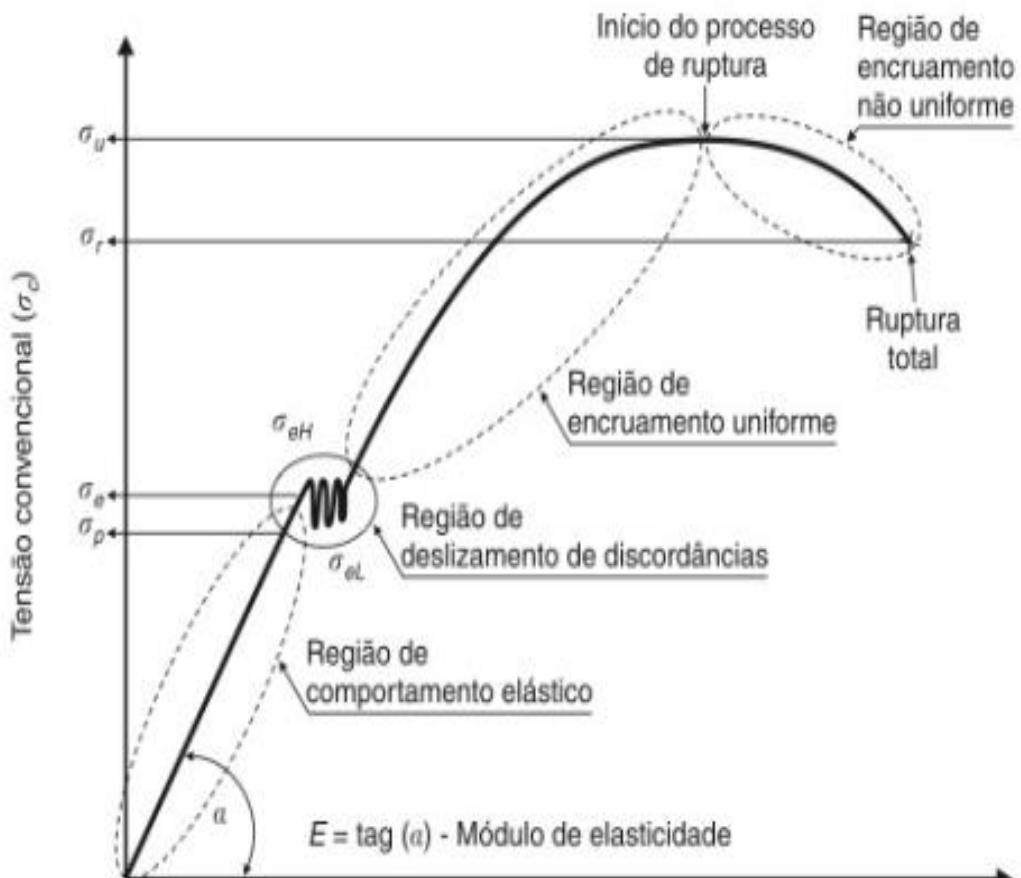


Figura 2: Ensaio de tração.

Fonte: Garcia, Spin Jr. e Santos (2000), p.7.

O gráfico apresentado na figura 2 é uma curva tensão-deformação típica para um material dúctil, como aço ou alumínio, e mostra o comportamento mecânico de um material submetido a um teste de tração.

Na figura 2 Eixo y (vertical) representa a tensão aplicada ao material durante o teste. É dada pela força aplicada dividida pela área inicial da seção transversal do material. O eixo x (horizontal) representa a deformação do material, que é a medida de alongamento relativa do material em resposta à tensão aplicada. A deformação é adimensional e geralmente medida em porcentagem.

Também na figura 2 mostra a região de comportamento elástico no início da curva, temos uma relação linear entre tensão e deformação, que obedece à Lei de Hooke. Nesta fase, o material se deforma elasticamente, ou seja, ele voltará à sua forma original quando a carga for removida.

Ainda na figura 2 o coeficiente de inclinação dessa linha reta é o módulo de elasticidade ( $E$ ), ou Módulo de Young, que é uma medida da rigidez do material. O ponto  $\sigma_{EL}$  marca o limite de elasticidade do material, o ponto em que ele ainda se comporta elasticamente.

Entretanto na figura 2 a região de deslizamento de discordâncias está após do limite de elasticidade, o material entra na fase de deformação plástica, isso significa que o material começa a sofrer deformações permanentes.

O ponto ( $\sigma_{EH}$ ) indica o limite elástico superior, e a região que o sucede mostra o deslizamento de discordâncias, onde os defeitos da rede cristalina (discordâncias) começam a se mover sob a tensão aplicada. A partir deste ponto, se a carga for removida, o material não retornará completamente ao seu estado original.

Conforme a figura 2 a deformação aumenta, o material experimenta um fenômeno chamado encruamento (ou endurecimento por deformação). Durante o encruamento, as discordâncias se acumulam e dificultam mais deformações adicionais, o que resulta em um aumento na tensão necessária para continuar deformando o material.

Também na figura 2 mostra que a curva ainda continua subindo, até atingir o ponto de tensão máxima ( $\sigma_t$ ), que é o pico da curva. Até este ponto, o encruamento é uniforme ao longo de todo o corpo do material. Após o ponto de tensão máxima ( $\sigma_t$ ), o material começa a sofrer estrição (ou pescoçamento). Esse processo ocorre porque uma pequena região do material começa a se afinar, concentrando mais tensão nessa região. A deformação não é mais uniforme.

Na parte descendente da curva, o material está em estrição. Nessa fase, a deformação se concentra em uma pequena região do corpo de prova, o que eventualmente leva à sua ruptura. A tensão aparente diminui porque a seção transversal efetiva do material está diminuindo rapidamente.

Conforme a figura 2 o ponto final da curva é chamado de ruptura total, que marca o ponto em que o material se parte em duas partes. Após esse ponto, o material não pode mais resistir a qualquer carga.

Este é o ponto que separa o comportamento elástico do plástico. A partir deste ponto, o material não recupera mais sua forma original quando a carga é removida, e ocorrem deformações permanentes.

Este é o valor da tensão no ponto em que o material rompe. Note que, devido ao encolhimento da seção transversal durante o processo de estrição, a tensão de ruptura pode ser menor do que a tensão máxima ( $\sigma_{\max}$ ). É a inclinação da parte inicial da curva na região elástica. Quanto maior o módulo, mais rígido é o material.

Esse gráfico apresentado na figura 2 é uma ferramenta importante para engenheiros e projetistas entenderem como um material se comporta sob carga, permitindo escolher o material adequado para aplicações que requerem resistência e ductilidade.

Esse tipo de ensaio de acordo com Garcia, Spin Jr. e Santos (2000) emprega corpos de prova preparados conforme as normas técnicas convencionais (no Brasil, a norma técnica aplicada a materiais metálicos em temperatura ambiente é a NBR ISO 6892:2002, da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT) e envolve a aplicação gradual de uma carga de tração uniaxial crescente nas extremidades de um corpo de prova padronizado.

Ainda de acordo com Garcia, Spin Jr e Santos (2000) o esboço das curvas carga aplicada versus comprimento para a tração realizada nos diferentes corpos de prova. Para determinar valores reais (instantâneos) da área da seção transversal ao longo do ensaio, convencionou-se utilizar a área inicial para a obtenção da tensão relativa em qualquer ponto do ensaio.

Para a variação do comprimento, adotou-se utilizar o alongamento, ou seja, a diferença entre o comprimento inicial e o comprimento instantâneo, dividido pelo comprimento inicial do corpo de prova, chamado de deformação relativa (CALLISTER, 2020).

Desse modo, se as diferentes curvas de carga aplicada versus o comprimento forem transformadas em curvas de tensão (com a convenção da área inicial) versus a deformação relativa.

O ensaio de tração em cabos de aço tem como finalidade determinar a carga de ruptura medida ( $F_m$ ) e verificar se o valor obtido atende ou excede a carga de ruptura mínima ( $F_{min}$ ) definida pela norma de referência (ABNT, 2019a). Este tipo de ensaio é fundamental para avaliar a resistência mecânica e a integridade estrutural de cabos utilizados em aplicações gerais, como içamento, amarração e estruturas de sustentação. O procedimento deve seguir rigorosamente os critérios descritos na ABNT NBR ISO 3108:2017, que estabelece o método de ensaio para determinação da carga de ruptura medida em cabos de aço (ABNT, 2017a).

A amostra utilizada no ensaio deve ser representativa do lote de produção, livre de deformações, dobras ou danos superficiais que possam alterar o resultado do teste (ABNT, 2019a). As extremidades devem ser previamente amarradas ou seladas para evitar a distorção dos fios durante o corte e o manuseio. Conforme a norma, a amostragem deve garantir a rastreabilidade do material, identificando o fabricante, o número do carretel e o diâmetro nominal do cabo (ABNT, 2019).

As extremidades do corpo de prova devem ser preparadas por métodos de terminação apropriados, de modo a assegurar que a ruptura ocorra no corpo do cabo e não na área de fixação (ABNT, 2017a). A norma cita quatro métodos principais de terminação: soqueteamento com metal fundido, conforme a ISO 17558:2014; soqueteamento com resina; prensagem por mangote metálico; e fixação direta por cunhas ou liners adequados (ABNT, 2017a). Para cabos de pequeno diâmetro (até 5 mm), recomenda-se o uso dos métodos de prensagem metálica ou resina, por garantirem uma melhor aderência e menor risco de escorregamento ou rompimento prematuro nas extremidades (ABNT, 2017).

De acordo com a ABNT NBR ISO 3108:2017, o comprimento livre mínimo do corpo de prova ( $L$ ) — excluindo as terminações — deve ser de pelo menos 300 mm para cabos encordoados (stranded ropes) com diâmetro nominal até 6 mm (ABNT, 2017a). Essa exigência aplica-se diretamente aos cabos com diâmetro de até 5 mm. O comprimento total da amostra deve incluir ainda o espaço necessário para a fixação nas garras ou dispositivos de terminação. Essa dimensão mínima assegura que o corpo de prova possua um trecho livre suficiente para o alongamento e ruptura natural do cabo, evitando concentrações de tensão (ABNT, 2017a).

Antes da realização do ensaio de tração, deve-se determinar o diâmetro médio do cabo, seguindo o método descrito na ABNT NBR ISO 2408:2019. As medições são realizadas em uma parte reta do cabo, sem tração ou sob tração inferior a 5% da carga de ruptura mínima ( $F_{min}$ ) (ABNT, 2019a). São realizadas quatro leituras — duas em posições separadas por pelo menos 1 metro e duas a  $90^\circ$  entre si — e a média aritmética desses valores corresponde ao diâmetro real do cabo (ABNT, 2019a). Para cabos com diâmetro igual ou inferior a 26 mm, o instrumento de medição deve ter uma resolução mínima de 0,02 mm (ABNT, 2019a). As tolerâncias dimensionais aceitáveis estão definidas nas Tabelas 2 e 3 da norma, variando entre  $\pm 8\%$  para cabos de 2 a 4 mm e  $-7\% / +9\%$  para cabos de 4 a 6 mm (ABNT, 2019a).

A máquina de tração utilizada deve estar calibrada conforme a norma ISO 7500-1:2018, garantindo precisão e confiabilidade dos resultados (ISO, 2018). O ensaio deve ser realizado sob condições controladas de temperatura, preferencialmente entre 10 °C e 35 °C, sendo ideal a faixa de 23 °C ± 5 °C (ABNT, 2017a). Durante o ensaio, é fundamental evitar rotação ou torção do cabo, utilizando-se dispositivos anti-rotação ou rolamentos de apoio quando necessário, uma vez que esses movimentos podem reduzir o valor medido da força de ruptura (ABNT, 2017a).

Segundo o procedimento descrito na ABNT NBR ISO 3108:2017, o ensaio de tração em cabos de aço é executado em sequência padronizada (ABNT, 2017a). O corpo de prova deve ser posicionado de forma alinhada no eixo da máquina, evitando desalinhamentos e tensões laterais. A carga é aplicada de maneira contínua até 80% da F<sub>min</sub> e, após esse ponto, deve aumentar a uma taxa não superior a 0,5% da F<sub>min</sub> por segundo, até a ruptura do cabo ou até o alcance da carga mínima especificada (ABNT, 2017a). Durante o ensaio, deve-se monitorar e registrar continuamente a força aplicada e o alongamento do cabo. Se a ruptura ocorrer a menos de seis vezes o diâmetro nominal (6d) da garra ou extremidade, o ensaio deve ser considerado inválido e repetido (ABNT, 2019a). Caso o valor medido de F<sub>m</sub> seja inferior a F<sub>min</sub>, o ensaio pode ser repetido até três vezes; se em qualquer repetição o valor de F<sub>m</sub> atingir ou superar F<sub>min</sub>, o cabo é considerado aprovado (ABNT, 2019a).

O resultado do ensaio é expresso pela carga de ruptura medida (F<sub>m</sub>), em quilonewtons (kN), comparada à carga mínima de ruptura (F<sub>min</sub>) definida nas tabelas da ABNT NBR ISO 2408:2019 (ABNT, 2019a). O cabo é considerado conforme quando F<sub>m</sub> ≥ F<sub>min</sub>, desde que a ruptura ocorra em posição válida e dentro dos limites estabelecidos. Caso contrário, o cabo deve ser reclassificado ou rejeitado, podendo ser submetido a novos ensaios para verificação de consistência (ABNT, 2019a).

De acordo com o item 6.1 da ABNT NBR ISO 2408:2019, o relatório de ensaio deve conter, no mínimo: referência às normas aplicadas (ABNT NBR ISO 2408:2019 e ABNT NBR ISO 3108:2017); identificação completa da amostra (fabricante, origem e número de lote); diâmetro nominal e diâmetro medido; comprimento do corpo de prova e método de terminação; condições de ensaio (temperatura, velocidade de carregamento, tipo de fixação); carga de ruptura medida (F<sub>m</sub>) e carga mínima exigida (F<sub>min</sub>); e observações sobre o local de ruptura e validade do ensaio (ABNT, 2019a). Quando o ensaio envolve também a verificação de arames

individuais, o certificado deve incluir os resultados de resistência à tração, número de torções, diâmetro dos arames e massa do revestimento de zinco, conforme aplicável (ABNT, 2019a).

A aplicação conjunta das normas ABNT NBR ISO 2408:2019 e ABNT NBR ISO 3108:2017 garante a padronização dos ensaios de tração em cabos de aço, assegurando precisão, reproduutibilidade e confiabilidade dos resultados. Para cabos de aço de até 5 mm de diâmetro, o cumprimento das tolerâncias dimensionais, o preparo adequado das terminações e a utilização de um corpo de prova com comprimento livre mínimo de 300 mm são fatores determinantes para a validade do ensaio. Esses procedimentos asseguram que o cabo atenda aos requisitos de resistência mecânica, qualidade metalúrgica e conformidade dimensional, fundamentais para sua certificação e aplicação segura em sistemas de tração e sustentação (ABNT, 2019a; ABNT, 2017a).

### **2.2.3 Modulo de elasticidade, modulo de resiliêcia**

Segundo Amauri módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, é uma medida da rigidez de um material, ele é definido como a razão entre a tensão aplicada e a deformação específica resultante na região elástica do material durante um ensaio de tração.

De acordo com Ferdinand o módulo de elasticidade reflete a capacidade de um material de resistir à deformação elástica sob uma carga aplicada. Quanto maior o módulo de elasticidade, mais rígido é o material, e menor será a deformação específica para uma determinada tensão.

Para Callister (2020) no ensaio de tração, o módulo de elasticidade corresponde à inclinação da porção linear inicial da curva tensão-deformação, esta inclinação é uma medida direta da elasticidade do material, indicando a relação linear entre a tensão e a deformação dentro dos limites elásticos, é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação de engenharia.

.Esse ponto corresponde à tensão máxima suportada por uma estrutura sob tração; se essa tensão for aplicada e mantida, ocorrerá fratura. Toda deformação até esse ponto está uniformemente distribuída por toda a região estreita do corpo de prova de tração.(CALLISTER,2020);

Souza (1982) define tensão como a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de área, enquanto deformação é definida como a variação de uma dimensão, por unidade da mesma dimensão, quando o corpo é submetido a um esforço.

### **2.3 Ensaio de Fadiga**

Segundo Garcia, Spim e Santos (2012), a fadiga é definida como a falha progressiva de um material quando submetido a tensões cíclicas repetitivas, mesmo que essas tensões sejam inferiores ao limite de escoamento do material, a exposição prolongada pode causar a nucleação e propagação de trincas, levando à fratura do material.

De acordo com Dowling (2017), o processo de fadiga ocorre pela formação de trincas microscópicas que se propagam com o tempo e com cada ciclo de carga, a trinca se expande até o ponto em que a peça não consegue mais suportar a carga, resultando em falha.

Conforme descrito por Askeland, Fulay e Bhattacharya (2014), a fadiga é responsável pela redução gradual da resistência do material. O mesmo autor também afirma que o número de ciclos que um material pode suportar antes de falhar (vida à fadiga) depende da amplitude da tensão aplicada e das condições de operação, como temperatura e ambiente corrosivo (ASKELAND,2014).

Existem vários tipos de ensaios de fadiga, conforme destacado por Weinberg e Mares (2020), que se baseiam em diferentes tipos de carga cíclica:

- Fadiga axial: O material é submetido a uma carga cíclica axial, onde a tensão alterna entre compressão e tração.
- Fadiga por flexão: O material é dobrado repetidamente, provocando tensões alternadas na sua superfície.
- Fadiga rotativa: Uma barra ou eixo é girado enquanto uma carga é aplicada, gerando tensões cíclicas em diferentes partes do material.

No ensaio de fadiga, uma amostra padronizada do material é submetida a um número repetido de ciclos de carga sob condições controladas. O objetivo é determinar o número de ciclos que o material pode suportar antes de falhar (CALLISTER,2020).

Para Askeland (2014) explicam que o ensaio pode ser realizado com cargas variáveis (senoidal ou triangular), simulando as condições de operação real do componente. A vida à fadiga é medida em termos de número de ciclos até a falha (ASKELAND,2014).

Conforme Budynas e Nisbett (2016), o comportamento dos materiais em ensaios de fadiga varia conforme o tipo de material. Materiais dúcteis, como o aço, geralmente possuem uma resistência à fadiga mais elevada, enquanto materiais frágeis, como cerâmicas ou ferros fundidos, tendem a falhar mais rapidamente. As condições de superfície, como acabamentos ásperos ou entalhes, também podem afetar significativamente a resistência à fadiga, pois atuam como concentradores de tensão, facilitando o início de trincas (DOWLING,2017).

O resultado do ensaio de fadiga é geralmente representado por uma curva S-N, onde S é a amplitude de tensão e N é o número de ciclos até a falha. De acordo com Dowling (2017), essa curva ajuda a determinar o limite de fadiga, que é a tensão máxima que um material pode suportar sem falhar, mesmo após um número infinito de ciclos.

Garcia, (2012) e Weinberg e (2020) indicam vários fatores que afetam o comportamento de fadiga de um material, tais como:

- - Tensão aplicada: Tensões mais altas resultam em menor número de ciclos até a falha.
- - Ambiente: Condições de alta umidade ou exposição a substâncias corrosivas podem acelerar a falha por fadiga.
- - Geometria do componente: Componentes com entalhes ou geometrias complexas tendem a concentrar tensões e, portanto, têm menor resistência à fadiga.
- - Temperatura: Altas temperaturas podem diminuir a resistência à fadiga do material.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como propósito descrever a metodologia utilizada na realização e no desenvolvimento do trabalho. Nele, discute-se a classificação do estudo, os materiais e métodos empregados, as variáveis e indicadores considerados, além da descrição do instrumento de coleta de dados, da forma de organização das informações coletadas e das considerações essenciais para a conclusão da pesquisa.

A metodologia envolve a explicação detalhada, precisa e rigorosa de todas as ações realizadas e dos recursos utilizados no processo de pesquisa (ASSIS, 2018). Assim, este capítulo objetiva esclarecer o percurso metodológico seguido na elaboração deste estudo.

Apresentam-se aqui as escolhas metodológicas adotadas, com a devida justificativa para cada etapa e método selecionado, de modo a garantir a validade e a confiabilidade da pesquisa. A forma como os dados são organizados e analisados também se mostra fundamental para assegurar o rigor científico e a possibilidade de replicação dos resultados obtidos.

#### 3.1 Tipo de pesquisa

A natureza do problema a ser investigado é o fator determinante para a escolha do tipo de pesquisa mais adequado. A partir da formulação das questões norteadoras, estabelecem-se os objetivos do projeto e, para alcançá-los de forma eficaz, é essencial selecionar um delineamento metodológico apropriado (WALLIMAN, 2015).

De acordo com Marconi e Lakatos (2017), a metodologia corresponde a um processo estruturado, composto por técnicas e métodos utilizados ao longo do desenvolvimento da pesquisa desde a identificação do problema até a análise e interpretação dos resultados. Esse processo funciona como um guia para o pesquisador, assegurando que os objetivos propostos sejam atingidos de maneira sistemática e organizada. Compreende, portanto, a definição da modalidade de pesquisa, a seleção dos participantes, os procedimentos de coleta e tratamento dos dados, bem como a análise e interpretação das informações obtidas.

A pesquisa, por sua vez, é compreendida como um processo sistemático de busca e organização de informações relevantes, com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre determinado fenômeno ou tema. Conforme Gil (2002), o processo de investigação científica visa à resolução de problemas previamente identificados, por meio da aplicação criteriosa de métodos e instrumentos adequados. Desenvolve-se com base no conhecimento existente, sendo orientado pela lógica e pelo rigor metodológico (GIL, 2002).

No presente estudo, adota-se uma pesquisa aplicada, de natureza experimental e abordagem quantitativa. A metodologia segue um encadeamento lógico e sequencial de etapas, que se inicia com a fundamentação teórica, passa pela simulação e construção de uma bancada de acionamento aeronáutico, e culmina na realização de ensaios de tração e fadiga. O objetivo é avaliar o desempenho e a resistência dos componentes envolvidos, proporcionando dados que contribuam para a solução prática do problema proposto.

A investigação científica, nesse contexto, constitui um processo metódico e racional voltado para a obtenção de respostas objetivas e precisas às questões formuladas. Trata-se, portanto, de um procedimento que visa oferecer soluções fundamentadas, com base em critérios técnicos e científicos previamente definidos (GIL, 2002).

### **3.2 Materiais e Métodos**

O ensaio de tração é um dos métodos mais utilizados para determinar as propriedades mecânicas dos materiais, permitindo compreender o seu comportamento quando submetidos a esforços de alongamento. Para que o processo experimental seja conduzido de forma adequada e os resultados obtidos sejam confiáveis, é necessário seguir uma sequência de etapas bem definidas, que vão desde a revisão bibliográfica até a avaliação final dos resultados.

A primeira etapa consiste nas revisões bibliográficas, fundamentais para o embasamento teórico e técnico do trabalho. Nessa fase, o pesquisador realiza um levantamento de referências em livros, normas técnicas e artigos científicos sobre ensaios de tração. O objetivo é compreender os conceitos fundamentais de tensão, deformação, limite de escoamento, resistência última e ductilidade, além de analisar metodologias utilizadas em estudos anteriores, parâmetros experimentais e critérios normativos. Essa etapa garante que o ensaio seja conduzido de acordo com práticas consolidadas e que a interpretação dos resultados se apoie em fundamentos científicos sólidos.

Após o embasamento teórico, inicia-se a preparação da amostra, uma etapa essencial para assegurar a precisão e reproduzibilidade dos resultados. Os corpos de prova do material a ser testado são confeccionados conforme dimensões padronizadas. É fundamental que as superfícies estejam bem acabadas e isentas de defeitos, evitando concentrações de tensões que possam interferir no resultado. As dimensões iniciais, como o comprimento útil ( $L_0$ ) e a área da seção transversal ( $A_0$ ), são medidas com precisão utilizando instrumentos adequados, como o paquímetro. A correta preparação das amostras é determinante para garantir que o comportamento do material reflita suas propriedades intrínsecas, e não falhas experimentais.

Com as amostras preparadas, passa-se à execução do ensaio, que representa o momento central do processo. O corpo de prova é fixado em uma máquina universal de ensaios, que aplica uma carga axial crescente até a ruptura do material. Durante o ensaio, são registradas continuamente a força aplicada ( $F$ ) e o alongamento ( $\Delta L$ ). Esses dados permitem calcular a tensão ( $\sigma = F/A_0$ ) e a deformação ( $\epsilon = \Delta L/L_0$ ) a cada instante, possibilitando a construção da curva tensão-deformação, um dos principais resultados desse tipo de teste. Essa curva permite observar visualmente as fases de comportamento do material — região elástica, escoamento, encruamento e ruptura — evidenciando suas características mecânicas e ductilidade.

Concluída a etapa experimental, realiza-se a análise dos dados, onde os resultados obtidos são tratados e interpretados quantitativamente. A partir da curva tensão-deformação, calculam-se as propriedades mecânicas fundamentais do material: o módulo de elasticidade ( $E$ ), o limite de escoamento ( $\sigma_e$ ), a resistência máxima à tração ( $\sigma_u$ ), o alongamento na ruptura ( $\epsilon_r$ ) e a redução de área ( $\Delta A\%$ ). Além dos cálculos, é feita uma análise do comportamento do material em cada estágio do ensaio, observando se houve deformações uniformes, deslizamento plástico ou fratura frágil. Essa análise permite identificar o tipo de comportamento predominante (dúctil ou frágil) e relacioná-lo à composição e microestrutura do material ensaiado.

Por fim, chega-se à avaliação dos resultados, etapa que consolida todo o trabalho experimental e teórico. Nessa fase, os valores obtidos são comparados com dados da literatura e especificações normativas, verificando a coerência e a validade dos resultados. O pesquisador avalia possíveis desvios ou erros experimentais, como desalinhamentos na fixação do corpo de prova, calibração incorreta da máquina ou imperfeições geométricas. Além disso, os resultados são interpretados à luz do comportamento esperado do material, permitindo tirar conclusões sobre sua qualidade, desempenho mecânico e adequação a determinadas aplicações. Essa avaliação crítica é essencial para validar o ensaio e compreender de maneira abrangente o comportamento mecânico do material estudado.

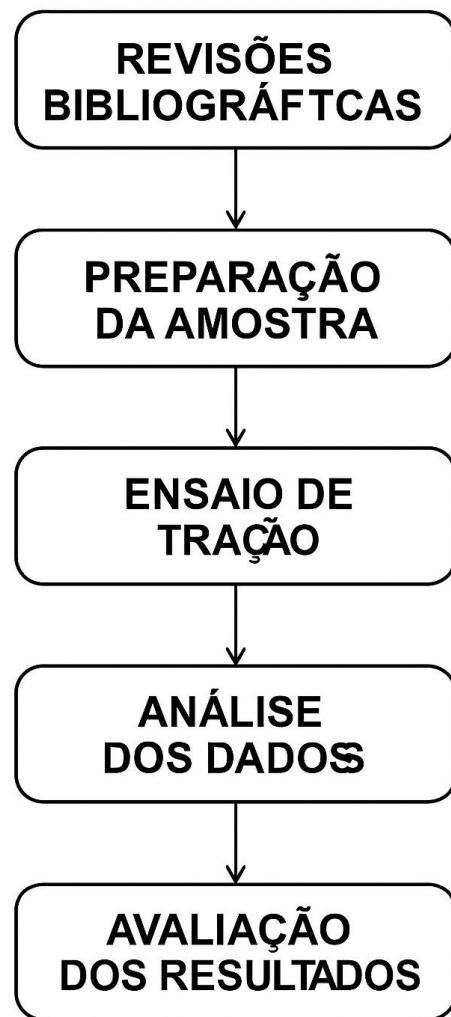


Figura 3: Passos da pesquisa.

Fonte: Pesquisa direta(2024)

### 3.3 Variáveis e indicadores

Uma variável pode ser entendida como uma classificação ou medida, uma quantidade que se modifica, ou um conceito operacional que contém ou expressamente determinados valores (LAKATOS,2021). Ela representa um aspecto, característica ou fator subjacente em um objeto de estudo e que pode ser quantificado.

Os valores atribuídos ao conceito operacional, que o convertem em uma variável, podem ser detalhes, qualidades, características, magnitudes, ou traços, as quais variações conforme cada situação específica, sendo abrangentes e mutuamente excludentes (LAKATOS,2021). O conceito operacional, por sua vez, pode representar um objeto, processo, agente, aparência ou problema.

O conceito de indicadores está relacionado a uma medida ou variável que possibilita avaliar um fenômeno tanto de forma quantitativa quanto qualitativa, sendo sua escolha baseada na capacidade de refletir os aspectos centrais da hipótese de pesquisa. (Walliman ,2015)

Além disso, de acordo com Gil (2002), os indicadores têm a função de determinar o valor da variável. Dessa forma, pode-se concluir que a escolha dos indicadores é de extrema relevância nas pesquisas, uma vez que é o indicador que caracterizará as variáveis.

Conforme Marconi e Lakatos (2017), uma variável pode ser entendida como uma categoria ou medida que varia e pode ser quantificada, representando um aspecto ou característica de um objeto de investigação. Dessa forma, uma variável pode ser dividida em duas ou mais categorias.

Segundo Gil (2002), as variáveis são elementos cujos valores ou classificações podem ser alterados, sendo classificadas em variáveis de entrada, que são aquelas obtidas, medidas ou observadas, e variáveis de saída, que representam os resultados gerados pelas variáveis de entrada após um determinado processo.

Para garantir maior precisão nos resultados, a definição dos indicadores está intimamente ligada aos objetos de estudo desta pesquisa e às variáveis de entrada já determinadas durante a pesquisa bibliográfica. A Tabela 1 destaca os indicadores mais significativos para cada um dos objetos de estudo escolhidos.

Tabela 1: Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Ensaio de tração	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Gráfico Tensão deformação</li> <li>● Tensão máxima</li> <li>● Tensão admissível</li> <li>● Incremento de tensão</li> <li>● Força Máxima</li> </ul>

Fonte: Pesquisa direta (2024).

### 3.4 Instrumento de coleta de dados

A coleta de dados foi realizada através da máquina de ensaio de tração (Emic DL20000). Também foi usada a revisão bibliográfica para coletar dados iniciais do ensaio de tração e fadiga.

### 3.5 Tabulação dos dados

A organização dos dados foi realizada utilizando o programa da máquina EMmic DL20000: o Tesc versão 3.04, que foi responsável para gerar o gráfico de tensão e deformação do ensaio de tração. Posteriormente, esses resultados, juntamente com as informações obtidas na pesquisa bibliográfica, foram sistematizados e analisados com o auxílio dos softwares word e excel.

### **3.6 Considerações finais**

A estruturação das etapas metodológicas em sequência lógica desde a revisão bibliográfica até a avaliação dos resultados assegura o rigor científico necessário e favorece a organização do trabalho, garantindo confiabilidade e replicabilidade dos procedimentos adotados. A construção da bancada e a execução dos ensaios de tração fornecem dados empíricos relevantes para validar o comportamento dos materiais sob condições reais de operação.

## 4 RESULTADOS

A seguir na figura 4 é apresentado a imagem da máquina DL 20000 que foi utilizada para realizar o ensaio de tração. A mesma possui algumas especificações citadas a seguir:

- A ficha da linha: o modelo “DL-20000” aparece como capacidade **20 000 kgf** ( $\approx$  200 kN) no catálogo da EMIC.
- Faixa de velocidade típica para essa série: 0,01 à 500 mm/min para modelos maiores (note: dependendo da versão) segundo catálogo.
- Medição de força: via células de carga intercambiáveis. Medição de deslocamento: sensor óptico (encoder) com resolução de 0,01m



Figura 4: Máquina Emic DL20000

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

De acordo com a ABNT NBR ISO 2408:2019, a preparação do corpo de prova para o ensaio de tração em cabos de aço com diâmetro inferior a 5 milímetros requer atenção especial para garantir a precisão dos resultados e a integridade estrutural do material durante o ensaio.

Inicialmente, o cabo de aço foi ser cortado em um segmento reto de 600 milímetros de comprimento, assegurando que o trecho selecionado esteja livre de deformações, curvaturas, dobras ou danos superficiais. Esse comprimento foi adotado em conformidade com o que recomenda a ABNT NBR ISO 3108, citada como referência normativa na NBR 2408, a qual orienta que o corpo de prova possua comprimento suficiente para permitir uma distribuição uniforme da carga e evitar rupturas próximas às garras da máquina de ensaio.

Durante a preparação, as extremidades do corpo de prova foram amarradas e seladas, de forma a impedir a destorção das pernas e a abertura do cabo de aço antes e durante o ensaio. Esse procedimento é essencial para cabos de pequeno diâmetro ( $d < 5$  mm), pois suas estruturas internas são mais suscetíveis à separação quando submetidas a esforços de tração, o que comprometeria o resultado do ensaio.

Antes do ensaio, conforme determinado pela seção 5.3 da NBR ISO 2408, foi realizada a medição do diâmetro nominal do cabo de aço. A medição ocorreu em uma parte retilínea do corpo de prova, sob uma tração inferior a 5% da carga de ruptura mínima ( $F_{min}$ ), garantindo que o cabo não sofresse alongamentos significativos. As medições foram feitas em duas posições ao longo do corpo de prova de 600 mm, com espaçamento mínimo de 1 metro sendo ajustado proporcionalmente ao comprimento total disponível, e em cada posição realizaram-se duas medições ortogonais (defasadas em  $90^\circ$ ) para determinar o diâmetro médio circunscrito do cabo.

Figura 5: Demonstração dos corpos de prova e realização do experimento.



Figura 5: Demonstração dos corpos de prova e realização do experimento Fonte: Pesquisa Direta (2025)



Figura 6: Demonstração da forma da retirada da medida do diâmetro dos corpos de prova Fonte: Pesquisa Direta (2025)

Na figura 6 é mostrado como foi medido o diâmetro do cabo de aço, onde foi posicionado as pontas do paquímetro perpendicularmente ao cabo, de forma que ele meça a maior largura (o diâmetro externo total), lembrando sempre de medir entre uma crista e outra para garantir uma melhor exatidão da medida. A seguir na tabela 3 será mostrado o encontrado na medição do diâmetro de cada corpo de prova.

Tabela 2:Medidas do Diâmetro dos corpos de prova.

Corpo de Prova	Diâmetro Aproximado (mm)	Número Total de Fios	Comprimento da Amostra (mm)
CP1	2,5	133	600
CP2	2,5	133	600
CP3	2,5	133	600
CP4	3,2	133	600
CP5	3,2	133	600
CP6	3,2	133	600

Os resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova indicam variações significativas nos parâmetros analisados, como resistência à tração, tempo até a ruptura e incremento da tensão ao longo do tempo. Apesar de possuírem a mesma área de seção transversal, os corpos de prova CP1, CP2 e CP3 apresentaram comportamentos mecânicos distintos, refletidos principalmente na resistência máxima suportada e no tempo até o rompimento (Figura 4). Os CPs 1, 2 e 3, com área de seção transversal de 5 mm<sup>2</sup>, apresentaram desempenhos inferiores em comparação aos CPs 4, 5 e 6, que possuem área de 8 mm<sup>2</sup>. O CP1 obteve a menor força máxima, de 3,0 kN, e a menor resistência à tração, de 602,7 MPa, com tempo máximo de ensaio de 65 segundos e incremento de tensão de 8,91 MPa/s. O CP2, com a mesma área, apresentou desempenho superior. Já o CP3 apresentou valores intermediários entre os dois, com força máxima de 3,4 kN, resistência de 699,8 MPa, tempo de 61 segundos e incremento de tensão de 11,31 MPa/s.

Entre os corpos de maior área ( $8 \text{ mm}^2$ ), o CP4 se destacou por apresentar a maior força máxima, de 7,5 kN, e a maior resistência à tração, de 935,0 MPa. No entanto, seus valores de tempo máximo (-5 s) e incremento de tensão (-204,39 MPa/s) indicam possíveis inconsistências ou falhas na medição. O CP5 apresentou excelente desempenho, com força de 7,3 kN, resistência de 907,0 MPa, maior tempo de ensaio entre todos os corpos (78 segundos) e incremento de tensão de 11,41 MPa/s. O CP6 também teve resultados elevados, com força máxima de 6,9 kN, resistência de 852,1 MPa, tempo de 75 segundos e incremento de 11,14 MPa/s, demonstrando estabilidade nos dados.

A resistência média obtida foi de aproximadamente 697 MPa, contudo, o desvio padrão relativamente elevado demonstra uma dispersão considerável entre os valores individuais, evidenciando diferenças no desempenho dos materiais testados. No gráfico tensão versus tempo, observa-se que o CP2 apresentou o melhor desempenho, suportando a maior resistência e resistindo por um tempo mais longo até a falha, seguido pelo CP3 e, por fim, pelo CP1, que teve a menor resistência e rompeu mais rapidamente (Figura 7).

Essa variação observada no ponto de ruptura em relação ao limite padrão do cabo pode ser atribuída a uma série de fatores que impactam diretamente a integridade estrutural e o comportamento mecânico do material sob esforço. Em primeiro lugar, destacam-se as diferenças na qualidade intrínseca do material utilizado na confecção dos corpos de prova. Aspectos como a presença de microdefeitos, trincas microscópicas, porosidades, inclusões ou impurezas atuam como pontos críticos que comprometem a resistência mecânica global. Essas imperfeições funcionam como locais de concentração de tensões, onde a solicitação mecânica se intensifica, facilitando a iniciação e a propagação de fissuras. Isso explica, em parte, o desempenho inferior do CP1, que provavelmente possui maior quantidade ou gravidade desses defeitos em sua estrutura interna.

Além disso, falhas e inconsistências no processo de fabricação são fatores determinantes para a heterogeneidade dos resultados. Processos como tratamentos térmicos inadequados, variações na composição química do material ou imperfeições no controle do resfriamento podem gerar microestruturas não homogêneas e tensões residuais internas. Essas condições desfavoráveis comprometem a uniformidade e a resistência final do material, tornando alguns corpos de prova mais suscetíveis a falhas prematuras. A influência desses fatores pode variar bastante, dependendo da precisão dos controles industriais e do rigor aplicado durante a produção.

Máquina: Emic DL20000 Célula: Trd 12 Extensômetro: - Data: 11/09/2024 Hora: 11:34:30 Trabalho nº 3167

Programa: Tesc versão 3.04

Método de Ensaio: Tração Aço - Chapa (Arlene) 2

Ident. Amostra: >>>>>>>>>>>>>>>> Identificação: 2024-09-11 - Cabos de Aço Cliente: Mateus OS:

Corpo de Prova	ID	Area (mm <sup>2</sup> )	Força Máxima (kN)	Resistência Tração (MPa)	Tempo Máx. (s)	Incremento de Tensão (MPa/s)
CP 1	2,5	5	3.0	602.7	65	8.91
CP 2	2,5	5	3.9	789.8	66	11.66
CP 3	2,5	5	3.4	699.8	61	11.17
CP 4	3,2	8	7.5	935.0	-5	-204.39
CP 5	3,2	8	7.3	907.0	78	11.41
CP 6	3,2	8	6.9	852.1	75	11.14
Número CPs	0	6	6	6	6	6
Média	*	6.475	5.322	797.7	56.90	-25.02
Mediana	*	6.475	5.364	820.9	65.66	11.15
Desv. Padrão	*	1.714	2.110	127.6	30.80	87.88
Coef.Var.(%)	*	26.48	39.65	16.00	54.13	-351.3
Mínimo	*	4.910	2.959	602.7	4.514	-204.4
Máximo	*	8.040	7.517	935.0	78.37	11.66

### Tensão (MPa)

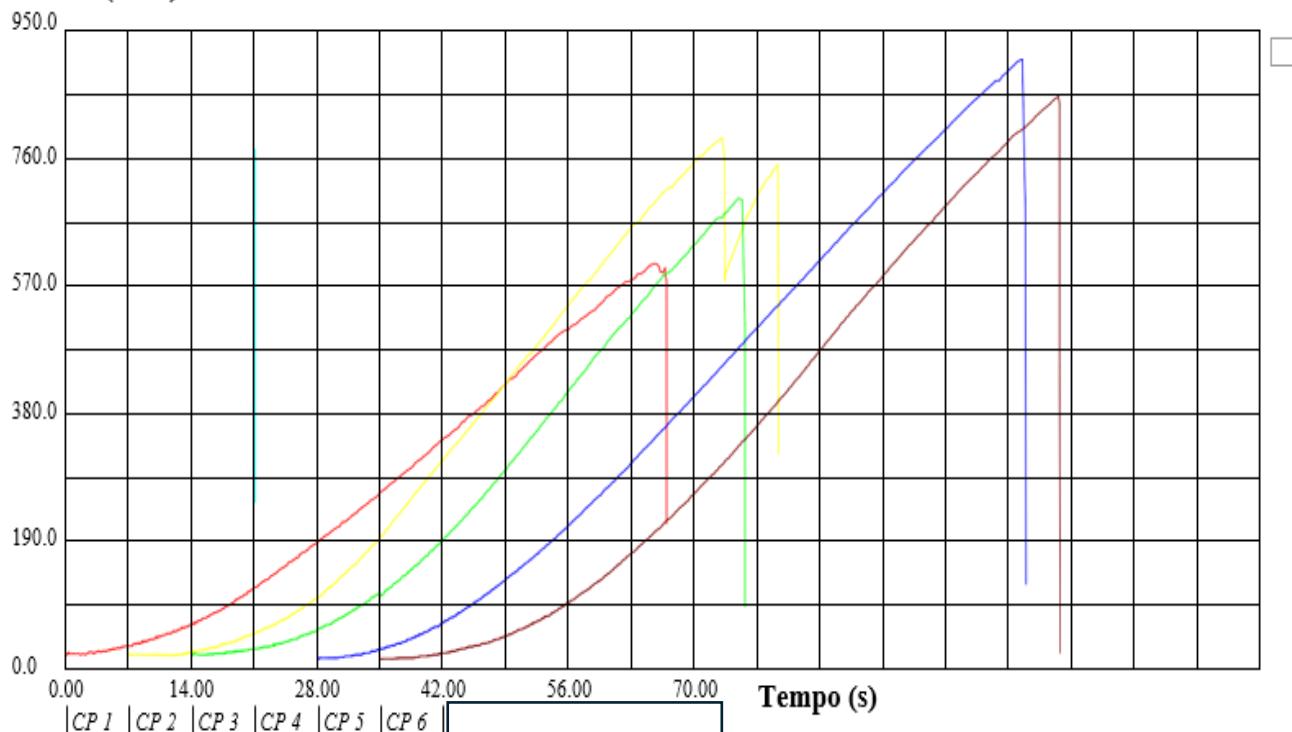


Figura 7: Resultados Obtidos

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

A seguir é representado nas figuras 8 á 13 as curvas separadas de cada corpo de prova compiladas no exel.

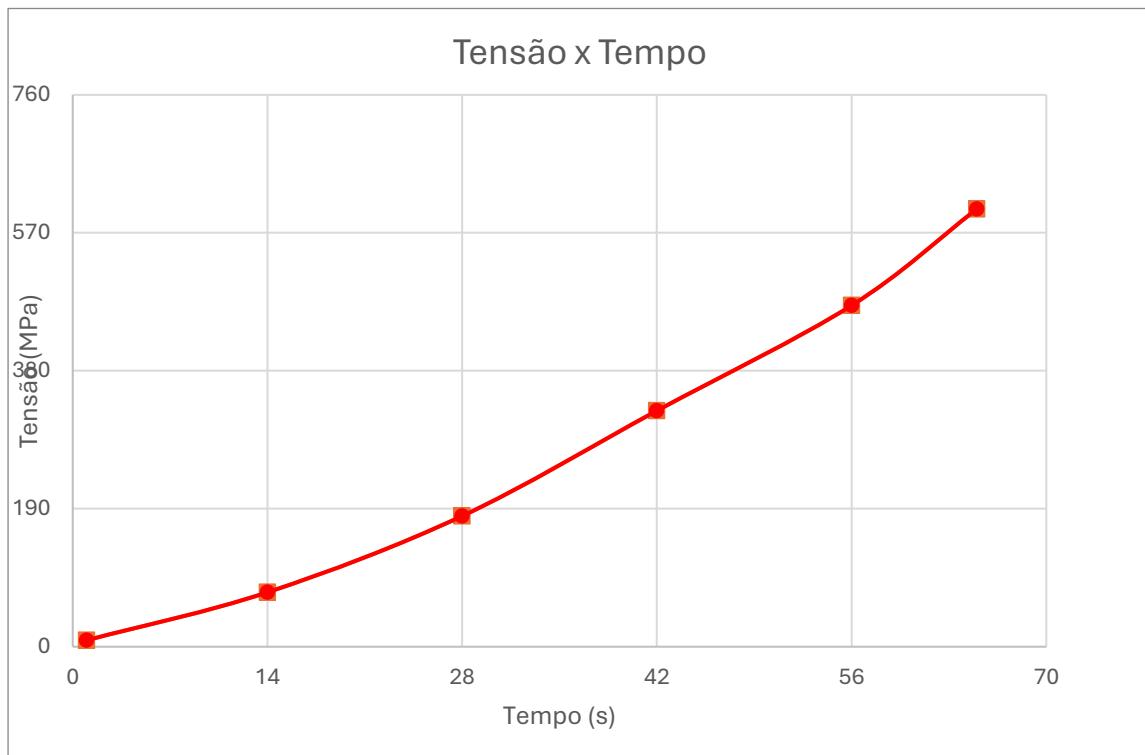


Figura 8: Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 1  
Fonte: Pesquisa Direta (2025)

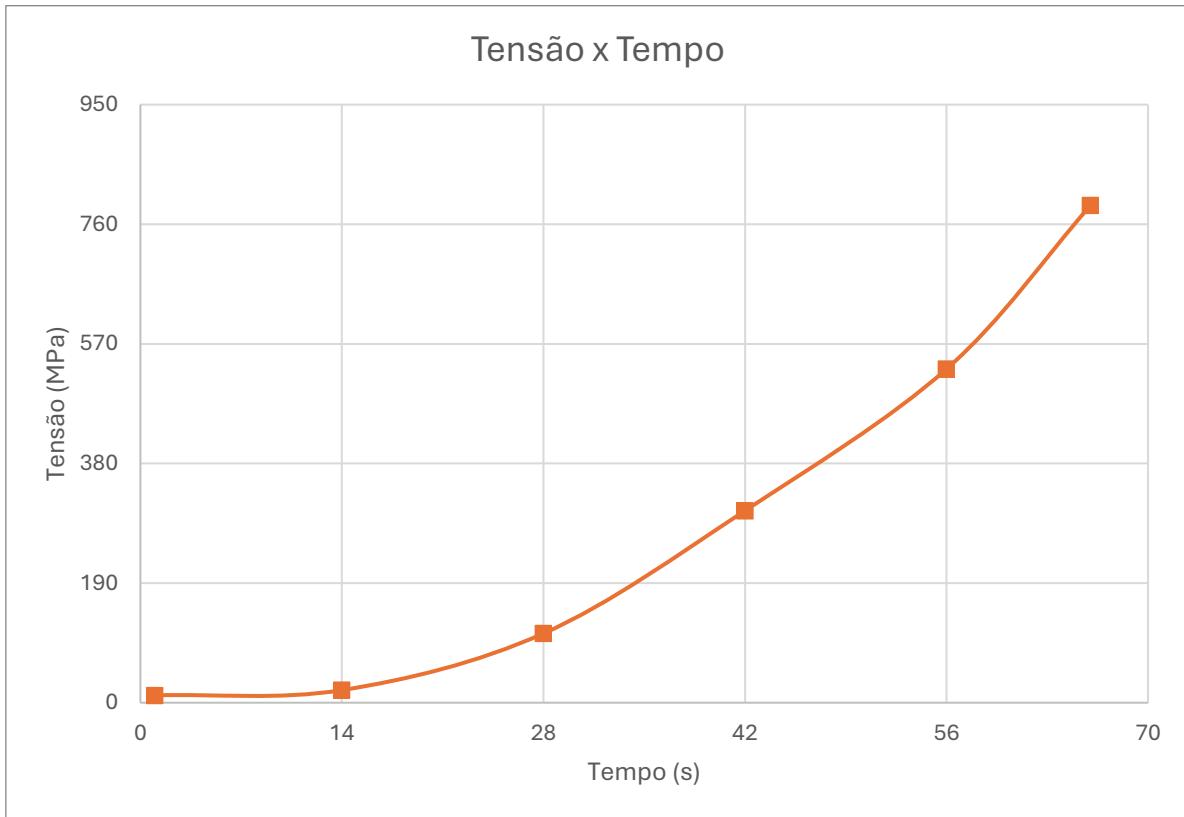


Figura 9: Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 2

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

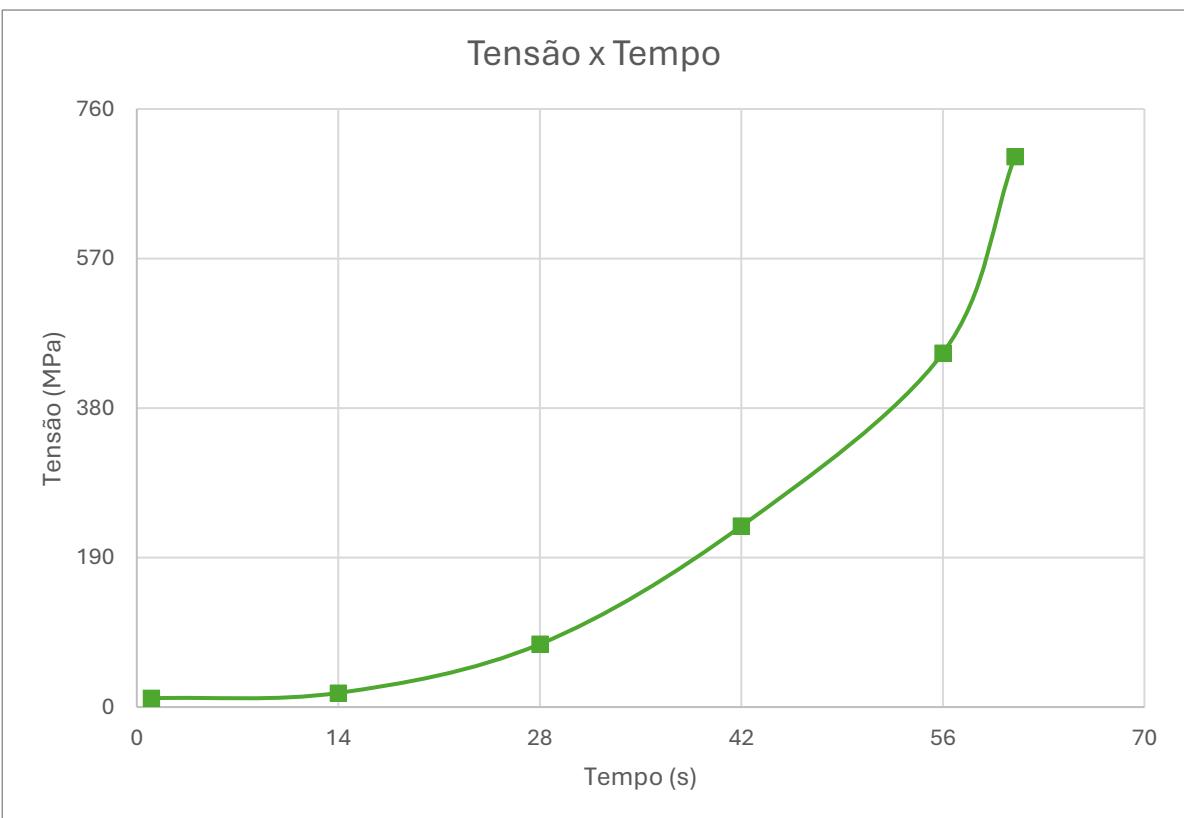


Figura 10: Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 3

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

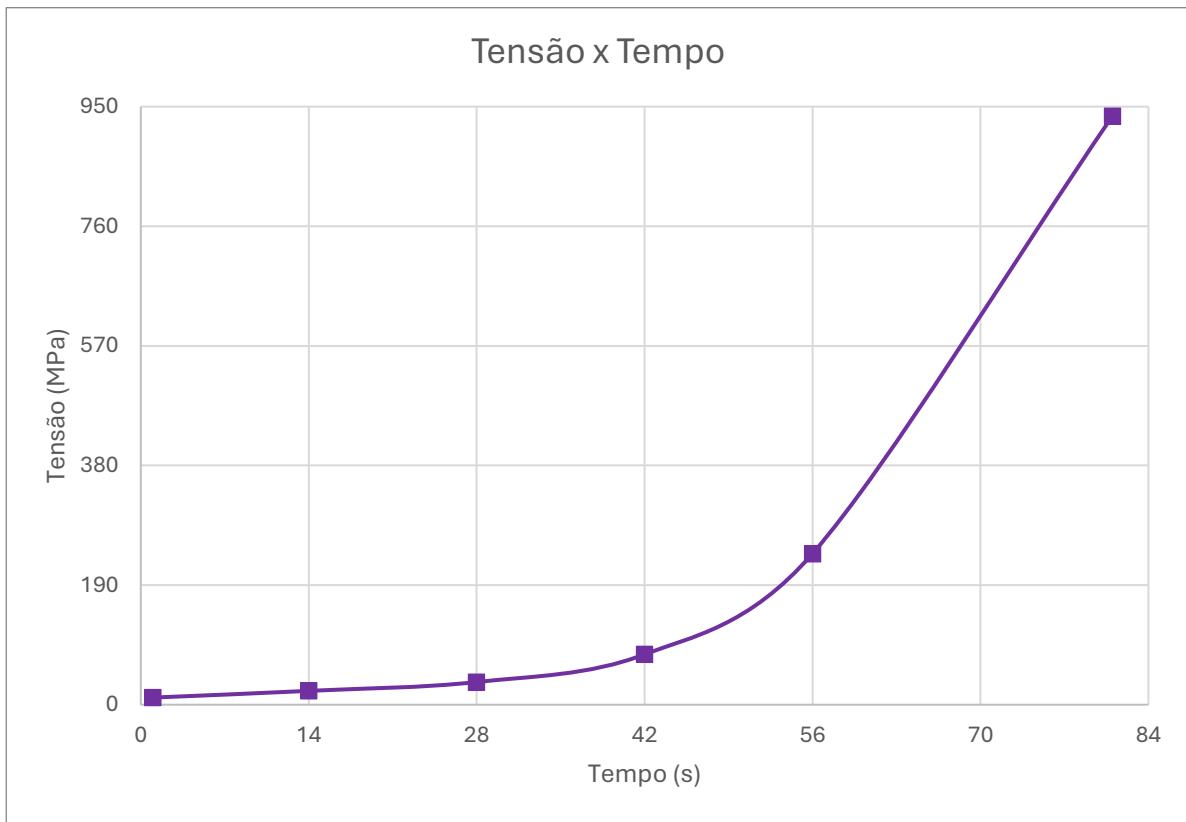


Figura 11: Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 4

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

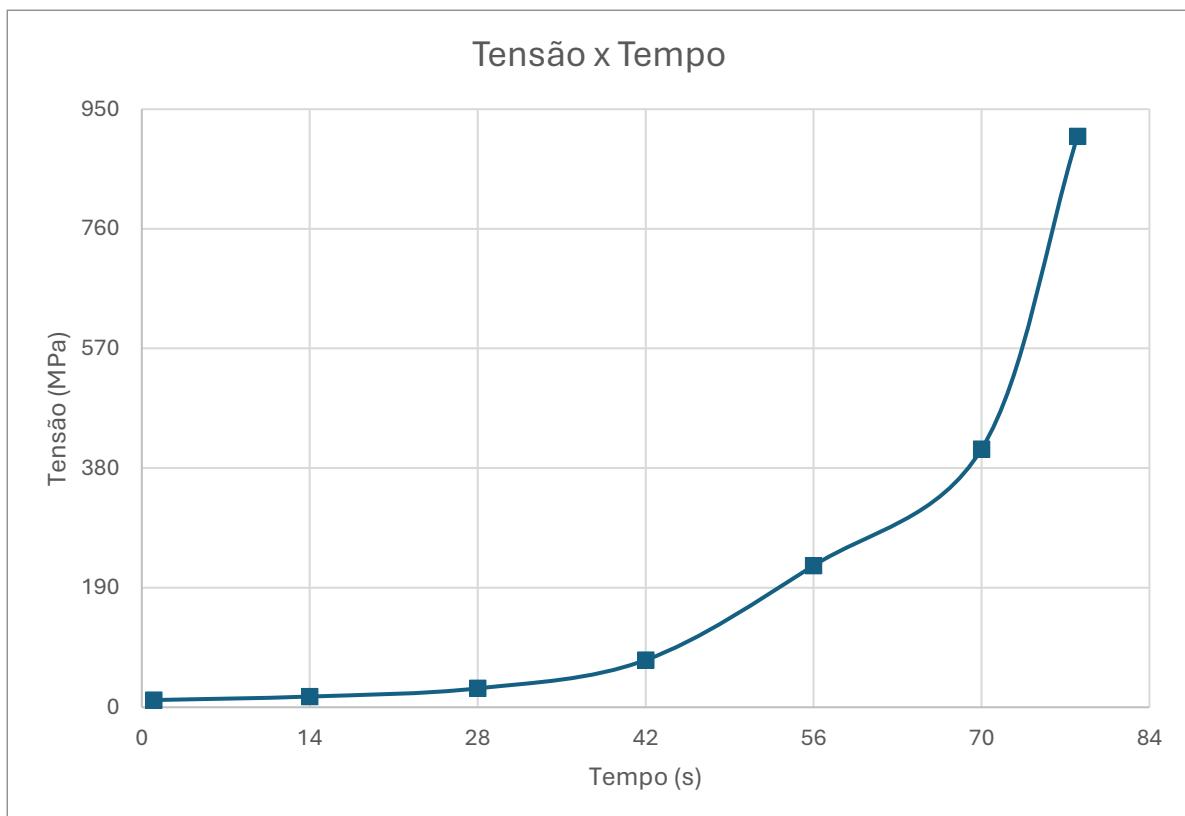


Figura 12: Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 5

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

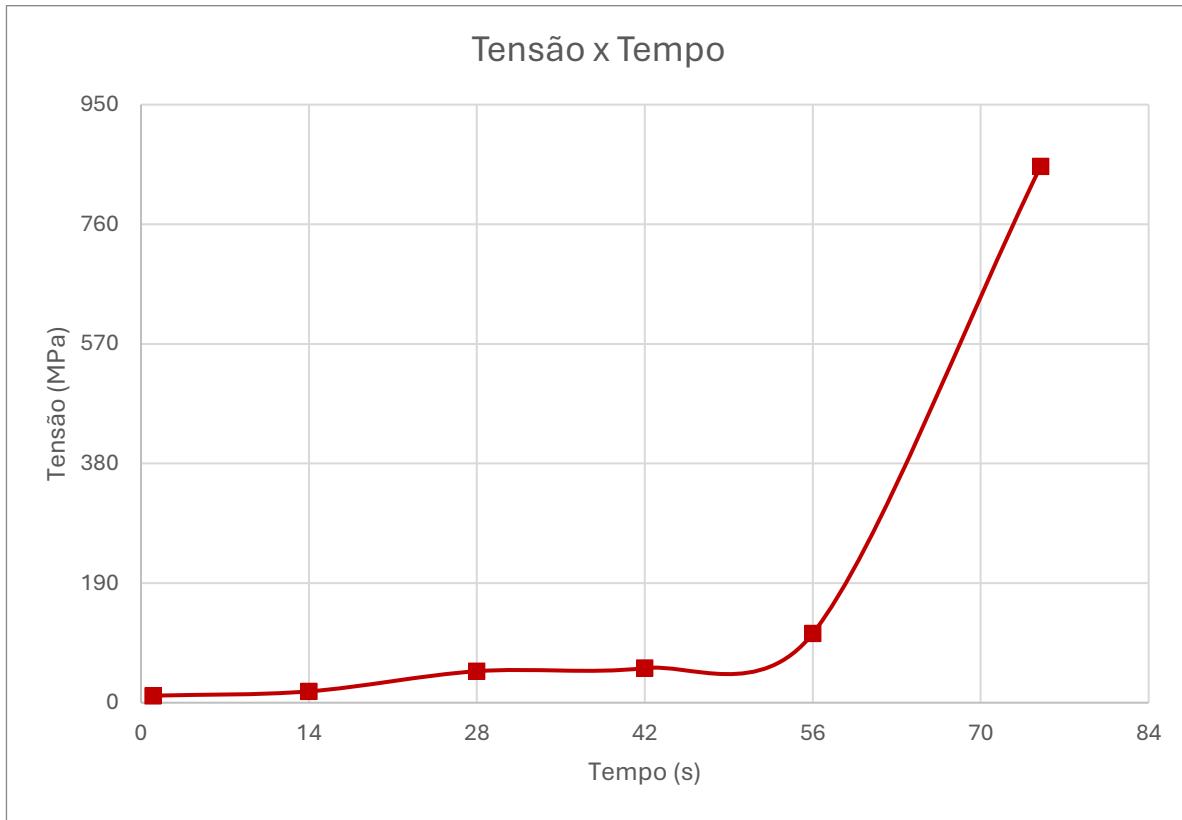


Figura 13: Gráfico tensão x tempo do corpo de prova 6

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

Outro aspecto fundamental a ser considerado são as condições operacionais e experimentais do ensaio. A correta fixação e alinhamento dos corpos de prova na máquina de ensaio são essenciais para garantir que a aplicação da carga ocorra de maneira uniforme e distribuída. Desalinhamentos mínimos ou fixações inadequadas podem provocar concentrações localizadas de tensão, que atuam como pontos de fragilização e antecipam o rompimento do material. Portanto, pequenas variações na preparação ou no posicionamento das amostras durante o ensaio podem gerar diferenças significativas nos resultados, mesmo entre corpos de prova aparentemente idênticos.

Ainda, a velocidade de aplicação da carga é um fator que influencia diretamente o comportamento mecânico observado. No presente estudo, o incremento da tensão por segundo indica a taxa de carregamento aplicada a cada corpo de prova. No caso do CP1, o menor incremento sugere um carregamento mais lento, o que pode ter prolongado o tempo de exposição ao esforço aplicado. Esse aumento do tempo sob carga pode facilitar a ocorrência de mecanismos de degradação gradual, como a fluência do material ou a formação e crescimento de microfissuras progressivas, culminando em uma ruptura prematura em relação aos demais

corpos de prova. Esse fenômeno evidencia como variações nas condições de ensaio, mesmo que sutis, podem alterar significativamente o desempenho dos materiais.

Conforme mostrado no gráfico a curva de coloração vermelha é referente ao CP1,a curva em verde representa o CP3, a azul representa o CP4 e a curva marrom refere-se ao CP5,já as curvas amarelas representam ao CP2 e CP6. Isto ocorre por um processo de geração do gráfico da máquina que avaliou o processo e os resultados e considerou o ensaio de tração de ambos os corpos de prova com uma equivalência até certo ponto e apresentou somente o desnível aonde aparece a diferença junto com o tensão de ruptura e tempo de ensaio de ambos.

Ao comparar esses dados com a resistência à tração e o tempo de ruptura obtidos nos ensaios (com resistências médias em torno de 797 MPa e variações significativas entre os corpos de prova), é possível inferir que a qualidade e a construção do cabo, conforme descritas na tabela, impactam diretamente o desempenho durante os testes. O cabo testado, se for similar ao especificado na tabela 2 (7 x 19 com diâmetro próximo a 1/8 polegada), deve obedecer aos limites dimensionais e resistências listadas, o que serve como referência para avaliar se os corpos de prova apresentam resistência compatível ou estão sujeitos a falhas precoces.

Tabela 3: Construção e propriedades físicas do cabo de aço tipo I, em aço carbono e aço resistente à corrosão.

Diâmetro nominal do cabo (mm)	Diâmetro mínimo do cabo (mm)	Tolerância no diâmetro (mm)	Aumento na extremidade cortada (mm)	Construção	Carga mínima de ruptura (MBS) A composição	Carga de mínima ruptura (MBS) B composição	Peso aproximado (kg/m)
					(N)	(N)	
0,79	0,79	0,15	0,15	3 × 7	489	489	0,0024
1,19	1,17	0,20	0,20	7 × 7	1.202	1.202	0,0063
1,59	1,57	0,25	0,23	7 × 7	2.136	2.136	0,0112
<b>2,36</b>	<b>2,36</b>	<b>0,30</b>	<b>0,25</b>	<b>7 × 19</b>	<b>4.094</b>	<b>4.094</b>	<b>0,0238</b>
<b>3,18</b>	<b>3,18</b>	<b>0,36</b>	<b>0,28</b>	<b>7 × 19</b>	<b>8.896</b>	<b>7.826</b>	<b>0,0431</b>
3,96	3,96	0,41	0,33	7 × 19	12.459	10.676	0,0670
4,75	4,75	0,46	0,48	7 × 19	18.685	16.458	0,0967
5,54	5,54	0,46	0,51	7 × 19	24.916	20.471	0,1265
6,35	6,35	0,53	0,53	7 × 19	31.137	28.481	0,1637

Diâmetro nominal do cabo (mm)	Diâmetro mínimo do cabo (mm)	Tolerância no diâmetro (mm)	Aumento na extremidade cortada (mm)	Construção	Carga mínima de ruptura (MBS) com composição A	Carga de mínima ruptura (MBS) com composição B	Peso aproximado (kg/m)
					(N)	(N)	
7,14	7,14	0,58	0,58	7 × 19	35.585	34.687	0,2070
7,92	7,92	0,61	0,61	7 × 19	43.593	40.032	0,2575
9,53	9,53	0,66	0,69	7 × 19	64.036	53.378	0,3620

Em conjunto, as tolerâncias de diâmetro e o limite de aumento permitido no corte indicam a margem para variações dimensionais que podem influenciar a integridade estrutural do cabo. Pequenas variações no diâmetro, conforme permitido, podem alterar a distribuição das tensões e o comportamento frente aos esforços aplicados nos ensaios. Isso pode explicar, em parte, as diferenças observadas entre os corpos de prova, principalmente se considerarmos que defeitos internos ou imperfeições na fabricação possam ter causado desvios maiores do que os tolerados, levando à redução da resistência.

Outro ponto relevante é a diferença entre as composições MBS A e B, que indicam diferentes resistências máximas de segurança para as composições químicas do aço. Por exemplo, para o cabo 7 x 19 de 1/8 polegada, a composição A apresenta uma resistência máxima segura de 2.000 libras (8.896N), enquanto a composição B é ligeiramente inferior, com 1.760 libras (7.826N). Essas diferenças químicas e mecânicas influenciam a resistência final e a durabilidade do cabo, podendo ser refletidas nos resultados dos testes realizados. Caso os corpos de prova estejam fabricados em aço com composição B, isso pode justificar a menor resistência apresentada por alguns deles.

Dessa forma, a análise detalhada dos dados revela que as diferenças observadas nos pontos de ruptura dos cabos são resultado da complexa interação entre as características intrínsecas do material, as condições específicas do processo de fabricação e as variáveis operacionais durante os testes experimentais. A elevada dispersão nos resultados obtidos reforça a importância de um rigoroso controle de qualidade durante a fabricação, bem como da padronização e precisão na execução dos procedimentos experimentais, para garantir a confiabilidade e a repetibilidade dos ensaios realizados. O desempenho superior exibido pelo CP2 indica que este corpo de prova está mais próximo das condições ideais esperadas para o

material estudado, representando um comportamento mais consistente e robusto. Por outro lado, o desempenho inferior do CP1 evidencia como pequenas imperfeições, sejam elas estruturais ou relacionadas à execução dos testes, podem comprometer significativamente a resistência mecânica e a durabilidade dos cabos, ressaltando a necessidade de constante monitoramento e aprimoramento dos processos envolvidos.

De acordo com Callister (2012), a resistência mecânica de metais é altamente sensível à presença de defeitos internos e às condições de tratamento térmico. Materiais com microestrutura inconsistente tendem a apresentar falhas localizadas, mesmo sob tensões moderadas. No presente estudo, essa premissa é confirmada pela dispersão dos valores de resistência à compressão, o que reforça a ideia de que pequenos desvios microestruturais, imperceptíveis visualmente, podem comprometer significativamente o desempenho sob carga.

Como destaca Dieter (2002), em qualquer análise de resistência mecânica, é fundamental considerar o histórico de processamento do material. Tensões residuais geradas por processos industriais, como trefilação ou recozimento inadequado, podem reduzir a capacidade de carga mesmo quando as dimensões externas estão dentro das especificações. Isso pode explicar o desempenho inferior do CP1, possivelmente submetido a um processamento menos eficaz ou com falhas localizadas.

Segundo a norma ASTM E8/E8M (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials), a preparação e alinhamento dos corpos de prova devem ser criteriosamente controlados, pois desalinhamentos podem induzir tensões secundárias que afetam a precisão dos resultados. Isso se alinha à observação de que diferenças na forma como cada corpo foi fixado e carregado podem ter contribuído para as variações nos tempos até a ruptura.

A velocidade de aplicação da carga também merece destaque. Conforme argumenta Souza (2010), o comportamento dos materiais metálicos pode ser sensível à taxa de deformação, sobretudo em materiais dúcteis. Taxas de carregamento mais lentas tendem a favorecer a atuação de mecanismos de fluência a frio ou nucleação de trincas estáveis, enquanto taxas mais rápidas podem levar a fraturas mais abruptas. Isso está em consonância com os resultados obtidos para o CP1, cujo menor incremento de tensão por segundo sugere maior suscetibilidade à degradação progressiva.

Ao confrontar os resultados experimentais com os limites teóricos descritos na Tabela 2, observa-se que a resistência média dos cabos testados (em torno de 797 MPa) está acima do esperado para composições padrão de cabos 7x19 com diâmetro de 1/8", que conforme Tension Member Handbook (AISI, 2016), deveriam atingir valores superiores a 750 MPa para aço carbono de alta resistência. Essa divergência pode ser interpretada como um indicativo de que o lote testado pertence (em questão o CP1 e CP3) a uma classe de aço inferior (como a composição B da tabela), ou que sofreu degradação em alguma etapa de produção, armazenamento ou manuseio.

Também podemos identificar comparando os dados experimentais com os da tabela 2 onde o CP1 teve uma resistência em torno de 80 por cento do valor que era esperado(750MPa) o CP2 apresentou uma resistência acima em 5 por cento, o CP3 ficou abaixo da resistência esperada em 7 por cento, o CP4 e CP5 apresentaram um resultado acima do esperado de 25 e 21 por cento respectivamente e o CP6 teve uma performance acima de 14 por cento.

Os resultados obtidos e a análise crítica à luz da literatura especializada demonstram que o desempenho mecânico dos cabos de aço está diretamente condicionado a uma complexa interação entre fatores materiais, processuais e operacionais. A variação nos resultados dos corpos de prova evidencia não apenas as limitações naturais do material, mas também a importância de um controle rigoroso durante a fabricação e execução dos ensaios. O cruzamento dos dados experimentais com os parâmetros normativos e com as contribuições teóricas de autores consagrados reforça a necessidade de padronização e monitoramento contínuo, especialmente em contextos que exigem alta confiabilidade estrutural, como o setor aeronáutico. Assim, este estudo reafirma que a compreensão aprofundada dos fatores que afetam a resistência mecânica é essencial para garantir a segurança, o desempenho e a durabilidade de componentes críticos.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de cabos de aço submetidos a ensaios de tração, com foco na análise da resistência à ruptura, tempo até a falha e incremento de tensão ao longo do tempo. Os resultados obtidos evidenciaram diferenças significativas entre os corpos de prova CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6 mesmo com a padronização geométrica das amostras, indicando que variáveis como a qualidade do material, as condições de fabricação e a execução do ensaio interferem diretamente no desempenho final.

A resistência média obtida ficou em torno de 797 MPa, com grande dispersão entre os valores individuais, o que reforça a necessidade de controle rigoroso tanto na produção quanto no processo de ensaio. O corpo de prova CP2, CP5 e CP6 demonstraram o melhor desempenho, indicando maior uniformidade estrutural e resistência compatível com os padrões esperados. Por outro lado, o CP1 e CP3 rompeu de forma prematura, sugerindo a presença de defeitos internos ou inadequações no processo experimental.

A análise crítica dos dados, confrontada com referências acadêmicas como Callister, Dieter e normas técnicas internacionais, mostrou que a integridade mecânica de componentes metálicos é fortemente dependente de fatores como microestrutura, presença de tensões residuais e taxa de aplicação de carga. Além disso, a comparação com a tabela de propriedades físicas dos cabos reforça que pequenas variações nos parâmetros técnicos, como composição química ou tolerâncias dimensionais, podem comprometer a confiabilidade estrutural do cabo.

Portanto, conclui-se que o sucesso de aplicações críticas, como na aviação ou em estruturas de engenharia de alto desempenho, depende não apenas da seleção adequada do material, mas também da aplicação de procedimentos normatizados, da inspeção contínua e da rastreabilidade de todo o processo produtivo. Este trabalho contribui para a compreensão dos fatores que influenciam a resistência mecânica dos cabos de aço e reforça a importância de uma abordagem multidisciplinar, integrando conhecimento técnico, rigor experimental e análise crítica dos resultados.

## 5.1 Recomendações

A partir do estudo realizado sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Construção de uma bancada de simulação com implementação do esforço real que é ocorrido do cabo de aço.
- Realização do ensaio de fadiga para melhor análise do comportamento do cabo de aço e obter informações detalhadas sobre a vida útil e limite de fadiga do mesmo

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ASKELAND, Donald R.; FULAY, Pradeep P.; BHATTACHARYA, D. K. **Ciência e engenharia dos materiais.** Tradução da 3<sup>a</sup> edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2014. E-book. ISBN 9788522118014. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522118014/>. Acesso em: 19 set. 2024.
- BUDYNAS, Richard; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley.** 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. E-book. ISBN 9788580555554. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580555554/>. Acesso em: 07 out. 2024.
- DOWLING, Norman. **Comportamento mecânico dos materiais.** Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. E-book. ISBN 9788595153493. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153493/>. Acesso em: 19 set. 2024.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos materiais.** 2. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2012. E-book. ISBN 9788521621140. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2114-0/>. Acesso em: 19 set. 2024.
- GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 7. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2022. E-book. ISBN 9786559771653. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786559771653/>. Acesso em: 08 out. 2024.
- GUESSER, Wilson L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.** São Paulo: Editora Blucher, 2019. E-book. ISBN 9788521216230. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521216230/>. Acesso em: 07 out. 2024.
- JR., William D. C. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2020. E-book. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 19 set. 2024.
- LAKATOS, Eva M. **Fundamentos de metodologia científica.** 9. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2021. E-book. ISBN 9788597026580. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788597026580/>. Acesso em: 08 out. 2024.
- MENDES, Cláudia L.; SILVEIRA, Aline M. **Ensaios mecânicos.** Porto Alegre: Grupo A, [s.d.]. E-book. ISBN 9788595025028. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025028/>. Acesso em: 19 set. 2024.
- PINHEIRO, Antônio Carlos da Fonseca B.; CRIVELARO, Marcos. **Resistência dos materiais.** Rio de Janeiro: LTC, 2021. E-book. ISBN 9788521637783. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637783/>. Acesso em: 07 out. 2024.

WALLIMAN, Nicholas. **Métodos de pesquisa**. Rio de Janeiro: Saraiva, 2015. E-book. ISBN 9788502629857. Disponível em:  
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788502629857/>. Acesso em: 08 out. 2024.

WEINBERG, Gabriel; MARES, Justino. **Tração**. Rio de Janeiro: Editora Alta Livros, 2020. E-book. ISBN 9786555201604. Disponível em:  
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786555201604/>. Acesso em: 07 out. 2024.

WICKERT, Jonathan; LEWIS, Kemper E. **Introdução à engenharia mecânica**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2022. E-book. ISBN 9786555584493. Disponível em:  
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786555584493/>. Acesso em: 07 out. 2024.

**ABNT — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 2408:2019 — Cabos de aço — Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019a.

**ABNT — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 3108:2017 — Cabos de aço — Método de ensaio — Determinação da carga de ruptura medida.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

**ISO — INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7500-1:2018 — Metallic materials — Calibration and verification of static uniaxial testing machines.** Geneva: ISO, 2018.

**ISO — INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 17558:2014 — Steel wire ropes — Socketing methods.** Geneva: ISO, 2014.

**ISO — INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6892-1:2016 — Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method at room temperature.** Geneva: ISO, 2016.