



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



ALAN MARTINS VENTURA

**CARACTERIZAÇÃO DOS MÓDULOS ELÁSTICOS E
AMORTECIMENTO DO AÇO SAE 1020 POR ENSAIO DINÂMICO DE
EXCITAÇÃO POR IMPULSO**

**OURO PRETO - MG
2024**

ALAN MARTINS VENTURA
alan.ventura@aluno.ufop.edu.br

**CARACTERIZAÇÃO DOS MÓDULOS ELÁSTICOS E
AMORTECIMENTO DO AÇO SAE 1020 POR ENSAIO DINÂMICO DE
EXCITAÇÃO POR IMPULSO**

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. Gustavo Paulinelli Guimarães

OURO PRETO – MG
2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V468c Ventura, Alan Martins.
Caracterização dos módulos elásticos e amortecimento do aço SAE 1020 por ensaio dinâmico de excitação por impulso. [manuscrito] / Alan Martins Ventura. - 2024.
72 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Aço - Testes. 2. Matéria - Propriedades - Elasticidade. 3. Desgaste mecânico - Atrito. 4. Metais - Aço (SAE 1020). 5. Deformações (Mecânica). I. Guimarães, Gustavo Paulinelli. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Alan Martins Ventura

Caracterização dos módulos elásticos e amortecimento do aço SAE 1020 por ensaio dinâmico de excitação por impulso

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 05 de agosto de 2024

Membros da banca

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Diogo Antônio de Sousa - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Leonardo Barbosa Godefroid - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 07/08/2024



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Paulinelli Guimaraes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/08/2024, às 09:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0753978** e o código CRC **61249256**.

Primeiramente dedico aos meus pais, por sempre estarem ao meu lado. À Afronta. À Escola de Minas e meus professores, em especial ao meu orientador. E, por fim, à Magnânima República Pulgatório.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador Gustavo, pelo imenso apoio em tudo. Ao Professor Leonardo Godefroid, pela paciência e imensa ajuda com os ensaios de tração. Ao Marconi, pela boa vontade de ajudar no trabalho. À gloriosa Escola de Minas e seus professores, pelo ensino de qualidade.

Aos meus pais, à República Pulgatório e à Afronta pelo apoio.

A mim, pelo esforço.

“Viver é arriscar tudo. Caso contrário você é apenas um pedaço inerte de moléculas montadas aleatoriamente à deriva onde o universo te sopra”.

- Rick and Morty

RESUMO

Este trabalho aborda a caracterização dos módulos elásticos e amortecimento utilizando ensaio dinâmico, especificamente o ensaio de excitação por impulso, comparando-o com ensaio estático (ou quase estático), o ensaio de tração. O estudo justifica-se pela necessidade crescente de métodos eficientes e precisos para avaliar o desempenho e a integridade dos materiais, contribuindo para a otimização, economia e segurança na engenharia. O objetivo principal é verificar as variações dos módulos elásticos obtidos por diferentes métodos e avaliar os benefícios do ensaio dinâmico em relação ao ensaio convencional. Para isso, foram realizados ensaios de tração no Laboratório de Ensaios Mecânicos do GEsFraM (DEMET). Foram realizados ensaios de excitação por impulso no Laboratório de Acústica, Vibrações e Sistemas Inteligentes (L'AViSI), utilizando-se como método de aquisição de sinal acelerômetro e microfone. Para a validação dos resultados, comparou-se os ensaios dinâmicos com o Método de Elementos Finitos (MEF). Foram utilizados corpos de provas do aço SAE 1020 nos ensaios e simulações. Os resultados sugerem que o método de excitação por impulso apresenta uma alta precisão e consistência nos valores dos módulos de elasticidade, com menor variabilidade em comparação aos ensaios de tração. Além disso, este método dinâmico mostrou-se eficiente em termos de tempo e recursos.

Palavras-chave: Ensaio de Tração. Módulo de Elasticidade. Excitação por Impulso. Amortecimento. Aço SAE 1020.

ABSTRACT

This work addresses the characterization of elastic moduli and damping using dynamic testing, specifically the impulse excitation test, and compares it with static (or quasi-static) testing, the tensile test. The study is justified by the growing need for efficient and accurate methods to assess the performance and integrity of materials, contributing to optimization, economy, and safety in engineering. The main objective is to verify the variations in elastic moduli obtained by different methods and to evaluate the benefits of dynamic testing compared to conventional testing. For this purpose, tensile tests were conducted at the Mechanical Testing Laboratory of GEsFraM (DEMET). Impulse excitation tests were carried out at the Laboratory of Acoustics, Vibrations, and Intelligent Systems (L'AViSI), using accelerometers and microphones for signal acquisition. To validate the results, dynamic tests were compared with the Finite Element Method (FEM). SAE 1020 steel specimens were used in the tests and simulations. The results suggest that the impulse excitation method exhibits high accuracy and consistency in the values of elastic moduli, with lower variability compared to tensile tests. Additionally, this dynamic method proved to be efficient in terms of time and resources.

Keywords: *Tensile Test. Elastic Modulus. Impulse Excitation. Damping. SAE 1020 Steel.*

LISTA DE SÍMBOLOS

σ = Tensão

E = Módulo de Elasticidade

ε = Deformação

ν = Coeficiente de Poisson

G = Módulo de Cisalhamento

K = Módulo Volumétrico (ou Bulk)

k = rigidez

c = amortecimento

m = massa

x = posição

\dot{x} = velocidade

\ddot{x} = aceleração

ω_n = frequência natural

c_c = amortecimento crítico

ζ = fator de amortecimento

δ = Decremento logarítmico

t = tempo

ω_d = frequência natural amortecida

ρ = densidade

u = deslocamento axial

c = velocidade da onda

θ = ângulo de torção

I = momento de inercia

w = deslocamento da viga

A = área

β = parâmetro que depende da condição de contorno

f_f = Frequência natural do modo de flexão

b = Largura

L = Comprimento

t = Espessura

T_1 = Fator de correção para o modo de flexão fundamental

T'_1 = Fator de correção para o modo de flexão fundamental

D = Diâmetro

f_t = Frequência natural do modo de torção (Hz)

A e B = Fator de correção empírico dependente da relação entre largura e espessura do corpo de prova

M_T = módulo a temperatura T (E ou G)

M_0 = módulo a temperatura ambiente (E ou G)

f_T = frequência natural no forno ou câmara criogênica

f_0 = frequência natural a temperatura ambiente

α = expansão térmica linear média (mm/mm·°C) de temperatura ambiente para a temperatura de teste.

Hz = Hertz

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Módulos elásticos e Coeficiente de Poisson	6
Figura 2: Deformação elástica linear	7
Figura 3: Deformação elástica não linear	7
Figura 4: Relação entre força e separação interatômica	7
Figura 5: Diagrama tensão deformação mostrando os fenômenos de recuperação elástica e encruamento.....	8
Figura 6: Sistema vibratório de 1° de liberdade	10
Figura 7: Curva de diferentes tipos de amortecimento.....	12
Figura 8: Curva subamortecida	12
Figura 9: Ciclo de histerese para materiais elásticos.....	13
Figura 10: Método da largura de banda para a determinação do amortecimento em um sistema com 1 grau de liberdade.....	14
Figura 11 Vibração longitudinal de uma barra.....	15
Figura 12 Condições de contorno para uma barra em vibração longitudinal.....	16
Figura 13: Vibração torcional de um eixo	17
Figura 14: Condições de contorno para eixos sujeitos a vibração torcional	17
Figura 15: Representação da vibração transversal em uma viga.....	18
Figura 16: Condições de contorno para a vibração transversal de uma viga	20
Figura 17: Deformação por cisalhamento na teoria da viga de Timoshenko	21
Figura 18: Tipos de Elementos.....	22
Figura 19: Representação esquemática de um dispositivo de ensaio de tração.....	24
Figura 20: Curva Tensão-Deformação	25
Figura 21: Corpo de prova de seção circular.....	26
Figura 22: Corpo de prova de seção retangular.....	26
Figura 23: Corpo de prova retangular para flexão dentro e fora do plano	27
Figura 24: Corpo de prova retangular para vibração longitudinal.....	28

Figura 25: Corpo de prova retangular para vibração torcional.....	28
Figura 26: Representação de um sistema para testes.....	29
Figura 27: Processo interativo para determinar Poisson	32
Figura 28: Comparativo do Modulo de Elasticidade entre a Norma ASTM E 1876 e o ensaio de tração	33
Figura 29: Relação entre os modulos de elasticidade medidos pelo ultrassom, frequência de ressonância e ensaio tração.....	34
Figura 30: Amortecimento de vibrações (Ψ) através do ensaio de frequência de ressonância, para amostras com diferentes níveis de porosidades. Amostras da posição inferior – isentas de porosidades. Amostras da posição superior – algumas microporosidades.....	34
Figura 31: Esquema da concepção da bancada	35
Figura 32: Dados extraídos da curva de amortecimento da viga de aço inoxidável ferrítico...35	35
Figura 33: Verificação do Modulo de Elasticidade do aço	35
Figura 34: Dados extraídos da curva de amortecimento da viga de poliéster	35
Figura 35: Verificação dos fatores de perda obtidos a 27°C, através do ensaio da viga de poliéster em DMTA e na Bancada Experimental.....	36
Figura 36: Diferenças percentuais de amortecimento durante aquecimento e resfriamento em relação as fases das amostras 1 e 2.....	36
Figura 37: Diferenças percentuais de modulo de elasticidade durante aquecimento e resfriamento em relação as fases das amostras 1 e 2.....	37
Figura 38: Fluxograma - Etapas da metodologia.....	39
Figura 39: Corpo de prova para ensaio dinâmico.....	41
Figura 40: Corpo de prova para o ensaio de excitação por impulso.....	41
Figura 41: Balança com corpo de prova.....	41
Figura 42: Corpo de prova para ensaio de tração	42
Figura 43: Modo de vibração transversal	43
Figura 44: Modo de vibração torcional	43
Figura 45: Modo de vibração transversal com acelerômetro	43

Figura 46: Modo de vibração torcional com acelerômetro.....	43
Figura 47: Propriedades do material utilizando o acelerômetro.....	43
Figura 48: Propriedades do material utilizando o microfone	43
Figura 49: Dispositivo para ensaio com acelerômetro (0,224l)	44
Figura 50: Dispositivo para ensaio com acelerômetro (0,5l)	44
Figura 51: Dispositivo para ensaio com microfone (0,224l).....	45
Figura 52: Dispositivo para ensaio com microfone (0,5l).....	45
Figura 53: CP 1,2,3 e 4.....	46
Figura 54: Acelerômetro <i>PCB Piezoelectronics</i> modelo 352C33.....	48
Figura 55: Microphone Type 40PH Serial No. 216985	48
Figura 56: Módulo de entrada de tensão National Instruments NI-9239	48
Figura 57: Máquina Universal de Ensaio	49
Figura 58: Extensômetro	49
Figura 59: Fator de amortecimento	50
Figura 60: Análise de convergência, simulação com acelerômetro	51
Figura 61: Análise de convergência, simulação sem acelerômetro.....	52
Figura 62: Resposta em Frequência com acelerômetro, Vibração Transversal	53
Figura 63: Resposta em Frequência com acelerômetro, Vibração Torcional.....	53
Figura 64: Resposta em Frequência sem acelerômetro, Vibração Transversal.....	54
Figura 65: Resposta em Frequência sem acelerômetro, Vibração Torcional	54
Figura 66: Curva tensão x deformação - real e de engenharia - CP 1	58
Figura 67: Curva tensão x deformação - real e de engenharia - CP 2	58
Figura 68: Curva tensão x deformação - real e de engenharia - CP 3	58
Figura 69: Curva tensão x deformação real - e de engenharia - CP 4	58
Figura 70: Propriedades Mecânicas Típicas de Vários Metais e Ligas em um Estado Recozido	59

Figura 71: Dados chapas laminadas a quente.....	59
Figura 72: Média dos resultados para o módulo de elasticidade por diferentes ensaios	61
Figura 73: Fluxograma da Análise Metalográfica.....	67
Figura 74: Embutimento da amostra	67
Figura 75: Líquido acrílico e catalizador.....	67
Figura 76: Lixadeira arotec Arapol 2V	68
Figura 77: Amostra após o polimento	68
Figura 78: Amostra após ataque químico	68
Figura 79: Prensa manual	68
Figura 80: Microscópio Óptico.....	68
Figura 81: Amostra na escala 1000 μm , antes do ataque químico	69
Figura 82: Amostra na escala 500 μm , antes do ataque químico	69
Figura 83: Microestrutura Aço 1020, na escala de 500 μm	69
Figura 84: Microestrutura Aço 1020, na escala de 200 μm	69
Figura 85: Fratura do CP 2,3 e 4	71
Figura 86: Estricção do CP.....	72
Figura 87: CP's após ensaio.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição Química do Aço SAE 1020	40
Tabela 3.2 – Medidas e propriedades do CP de ensaio de excitação por impulso	41
Tabela 3.3 - Medidas do CP para ensaio de tração após a fabricação	42
Tabela 3.4 - Variáveis e Indicadores	47
Tabela 4.1: Análise de convergência, simulação com acelerômetro	51
Tabela 4.2: Análise de convergência, simulação sem acelerômetro	52
Tabela 4.3 - Comparação dos módulos elásticos e frequências naturais, utilizando a norma 1876-01	55
Tabela 4.4 - Comparação do módulo de elasticidade e frequências naturais, utilizando Euler-Bernoulli	55
Tabela 4.5 - Comparação dos módulos elásticos e frequências naturais, utilizando a norma 1876-01	56
Tabela 4.6 - Comparação do módulo de elasticidade e frequências naturais, utilizando Euler-Bernoulli	57
Tabela 4.7 - Propriedades dos Corpos de Prova	58
Tabela 4.8 - Resultados ensaio de tração	59
Tabela 4.9 - Comparação de Resultados, Tração e Ensaio Dinâmico (ASTM 1876)	60
Tabela 4.10 - Comparação de Resultados, Tração e Ensaio Dinâmico (EULER-BERNOULLI)	60
Tabela 4.11 - Comparação de Resultados, Tração e Ensaio Dinâmico (ASTM 1876)	60
Tabela 4.12 - Comparação de Resultados, Tração e Ensaio Dinâmico (EULER-BERNOULLI)	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Módulos Elásticos.....	5
2.1.1	Deformação Elástica.....	6
2.2	Deformação Plástica	8
2.3	Vibrações Mecânicas	9
2.3.1	Amortecimento	11
2.3.2	Método da Largura de Banda ou Meia Potência	13
2.4	Dinâmica de Estruturas.....	14
2.4.1	Vibração Longitudinal.....	15
2.4.2	Vibração Torcional de Eixo.....	16
2.4.3	Vibração Transversal - Viga de Euler-Bernoulli.....	17
2.4.4	Viga de Timoshenko.....	20
2.5	Análise Modal.....	21
2.5.1	Formas Modais	22
2.6	Método de Elementos Finitos	22
2.7	Normas para Caracterização de Materiais	23
2.7.1	Método Estático, Ensaio de Tração	24
2.7.2	Método Dinâmico, Excitação por Impulso.....	26
2.8	Trabalhos Relacionados.....	32
3	METODOLOGIA.....	38
3.1	Tipo de Pesquisa.....	38
3.2	Materiais e Métodos	39
3.2.1	Corpos de prova.....	40
3.2.2	Simulação	42
3.2.3	Ensaio de Excitação por Impulso	44

3.2.4	Ensaio de Tração	45
3.3	Variáveis e Indicadores	46
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	47
3.5	Tabulação dos Dados.....	49
3.6	Considerações Finais do Capítulo	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	Amortecimento	50
4.2	Frequências Naturais	51
4.2.1	Método de Elementos Finitos (MEF)	51
4.2.2	Método Experimental	52
4.3	Modelo Numérico x Experimental (ensaio de vibração).....	55
4.3.1	Acelerômetro	55
4.3.2	Microfone	56
4.4	Ensaio de Tração	57
4.5	Ensaio de Tração x Ensaio de Excitação por Impulso.....	59
4.5.1	Ensaio de Tração x Ensaio Dinâmico com Acelerômetro.....	60
4.5.2	Ensaio de Tração x Ensaio Dinâmico com Microfone	60
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	63
5.1	Conclusão	63
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	63
	APÊNDICES	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Segundo Silva (2006), no mercado sempre há uma demanda de máquinas mais avançadas com maior capacidade e desempenho a preços acessíveis. Isso tem impulsionado o interesse no desenvolvimento de modelos e técnicas eficientes para a análise de desempenho e integridade de sistemas estruturais. Tendo em vista essa necessidade, as empresas precisam investir mais em análise, desenvolvimento e modelos refinados para estudar e prever o comportamento de sistemas mecânicos, especialmente em questões de segurança e meio ambiente.

Para garantir a operacionalidade de máquinas e estruturas, as propriedades mecânicas são avaliadas por meio de experimentos cuidadosamente planejados em laboratório, seguindo normas específicas. Quando se trata de medir os módulos elásticos, existem métodos dinâmicos que envolvem vibrações com pequenas amplitudes de deformações, enquanto métodos estáticos aplicam uma tensão conhecida no corpo de prova e medem simultaneamente a deformação resultante. Esses ensaios podem ser realizados em temperaturas ambiente ou elevadas, com ou sem controle atmosférico (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

Na avaliação das propriedades mecânicas, os engenheiros estruturais têm a responsabilidade de analisar as distribuições de tensões em componentes sujeitos a cargas específicas. Esse objetivo pode ser alcançado por meio de técnicas experimentais e/ou através de análises teóricas e matemáticas de tensão, as quais dependem do conhecimento dos módulos elásticos. Portanto, é crucial garantir a uniformidade ao realizar os ensaios e interpretar seus resultados. Isso pode ser alcançado ao utilizar técnicas de ensaios padronizados (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

De acordo com Callister e Rethwisch (2016), a maioria dos materiais, ao serem empregados, são sujeitos a cargas. Pode-se citar, como exemplo, uma liga de alumínio que é utilizada na construção da asa de uma aeronave, enquanto o aço pode ser aplicado, por exemplo, em eixos veiculares. Nessas circunstâncias, é necessário compreender as características do material e projetar o componente ou uma estrutura a partir do que eles são feitos, de modo a evitar deformação excessiva e a possibilidade de falhas.

Diante de uma carga aplicada, Callister e Rethwisch (2016) demonstram que o comportamento mecânico de um material é revelado pela relação entre sua resposta em um gráfico Tensão-Deformação. O módulo de elasticidade é a propriedade que relaciona a deformação com a tensão no regime elástico. Além dele, outras propriedades que desempenham papéis significativos para o material são resistência, dureza, ductilidade e tenacidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Uma das técnicas para a determinação das propriedades mecânicas do material é o método do Ensaio Dinâmico (excitação por impulso), que de acordo com a ASTM 1876-01 (2001), determina as propriedades elásticas dinâmicas do material a partir das frequências naturais de vibração, dimensões e massa do corpo de prova.

A vibração para Rao (2008, p. 6) é definida como:

Qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação. Balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda dedilhada são exemplos típicos de vibração. A teoria de vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles.

Considerando o contexto, tem-se a seguinte pergunta problema:

Como as variações dos módulos elásticos se comparam entre diferentes métodos, e quais são os possíveis benefícios do método de vibração por impulso em relação ao ensaio de tração?

1.2 Justificativa

Na atual conjuntura econômica, termos como eficiência, economia, segurança e meio ambiente são tópicos cada vez mais discutidos e que tem relação direta com o desempenho das empresas. Desse modo, quando essas empresas são capazes de equalizar essas variáveis, estas se tornam altamente competitivas e dominantes em seus mercados. Na indústria, esta é uma situação ainda mais séria, pois produtos que sejam baseados em materiais de baixa qualidade, de custo demasiadamente desproporcional e que não proporcione segurança a seus usuários, podem gerar situações desastrosas, economicamente e competitivamente, e em casos extremos, desastres ao meio ambiente e à vida humana.

Desta maneira, em um cenário que busca cada vez mais aprimorar seus resultados, projetos estruturais que não façam uso de modelos de caracterização dos materiais estão propensos a estes erros. Isso é ocasionado por falhas prematuras devido ao dimensionamento inconsistente do projeto. Segundo Callister e Rethwisch (2016, p.156), “os materiais são

selecionados para aplicações estruturais, pois têm combinações desejáveis de características mecânicas”.

Assim, a eficiência e precisão na caracterização de materiais são cruciais para a indústria, influenciando diretamente a qualidade, desempenho e durabilidade dos produtos. O ensaio dinâmico de excitação por impulso oferece uma metodologia simples para uma avaliação precisa das propriedades dos materiais, o que inclui os módulos elásticos e o amortecimento (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

O ensaio de excitação por impulso pode ser uma ferramenta fundamental para a indústria, oferecendo uma abordagem eficiente e econômica para a caracterização de materiais. Sua contribuição vai além da simples avaliação de propriedades, impactando diretamente a inovação, a competitividade e a sustentabilidade das operações industriais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Verificar as variações dos módulos elásticos por diferentes métodos e avaliar possível benefício do ensaio dinâmico (excitação por impulso) em relação ao ensaio tração.

1.3.2 Específicos

- Apresentar um estudo teórico sobre os módulos elásticos e o amortecimento, ensaios dinâmicos e estáticos, dinâmica de estruturas e elementos finitos com foco na análise e comparação dos módulos elásticos;
- Definir a abordagem da pesquisa, especificar os materiais e métodos empregados, identificar os indicadores do projeto e suas variáveis e, por último, detalhar o processo de coleta e análise dos resultados obtidos;
- Realizar ensaios dinâmicos e estáticos, calcular resposta analítica e fazer modelamento em elementos finitos (modelo numérico);
- Analisar os resultados obtidos nos ensaios para verificar os possíveis benefícios do método de vibração por impulso.

1.4 Estrutura do Trabalho

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

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito das propriedades mecânicas dos materiais, ensaios estáticos e dinâmicos, vibrações e elementos finitos. Também serão descritas diferentes normas utilizadas para cada tipo de ensaio e suas aplicações.

O terceiro capítulo trata a metodologia de pesquisa utilizada no trabalho, definição do corpo de prova, soluções analíticas, simulação, materiais utilizados e demonstra como serão realizados os ensaios.

O quarto capítulo traz os resultados obtidos e uma avaliação da eficácia dos modelos.

O quinto capítulo apresenta as conclusões e recomendações acerca do trabalho.

Por fim, tem-se as referências bibliográficas, que apresentam todas as fontes utilizadas durante o trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado a revisão bibliográfica utilizada para a realização do presente trabalho, o capítulo apresenta as informações sobre propriedades mecânicas dos materiais, vibrações, dinâmica de estruturas, método de elementos finitos e trabalhos relacionados.

2.1 Módulos Elásticos

A teoria da elasticidade que se originou com cientistas como Robert Hooke e Thomas Young, fornece a base para o entendimento dos módulos elásticos. Young foi particularmente influente, tendo introduzido o conceito do módulo que leva seu nome em 1807. Desde então, este conceito tem sido fundamental no desenvolvimento de teorias e aplicações relacionadas à resistência dos materiais (TIMOSHENKO e GOODIER, 1970).

Na prática, o módulo de Young é usado para prever o comportamento elástico de materiais sob várias condições de carga. Em engenharia estrutural, por exemplo, é utilizado para calcular a deflexão de vigas e pilares sob carga. Na indústria de materiais ajuda no design de novos compostos e na otimização de suas propriedades mecânicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Além do módulo de Young, existem outros módulos elásticos importantes, como o módulo de cisalhamento (G) e o módulo de volumétrico ou *bulk* (K), que descrevem a resposta do material a diferentes tipos de tensão. Cada um desses módulos fornece informações únicas sobre o comportamento elástico de um material. No entanto, é importante reconhecer que tais módulos são aplicáveis principalmente em regimes elásticos lineares, sendo menos úteis para materiais que exibem comportamento não-linear ou plástico (BEER *et al*, 2015).

A Figura 1 representa alguns módulos elásticos e a razão de Poisson para diferentes tipos de materiais metálicos.

<i>Liga Metálica</i>	<i>Módulo de Elasticidade</i>		<i>Módulo de Cisalhamento</i>		<i>Coefficiente de Poisson</i>
	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	
Aço	207	30	83	12,0	0,30
Alumínio	69	10	25	3,6	0,33
Cobre	110	16	46	6,7	0,34
Latão	97	14	37	5,4	0,34
Magnésio	45	6,5	17	2,5	0,29
Níquel	207	30	76	11,0	0,31
Titânio	107	15,5	45	6,5	0,34
Tungstênio	407	59	160	23,2	0,28

Figura 1: Módulos elásticos e Coeficiente de Poisson

Fonte: Callister e Rethwisch, 2016

Na Figura 1 é mostrado que o Aço possui o módulo de elasticidade de 207 GPa, de cisalhamento 83 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30.

2.1.1 Deformação Elástica

De acordo com Callister e Rethwisch (2016), a deformação dos materiais pode ser classificada em elástica ou plástica. Os autores definem a deformação elástica como reversível e ocorre quando a tensão aplicada está dentro do limite de escoamento do material, ou seja, dentro do limite de proporcionalidade que resulta em uma relação linear da tensão em função da deformação, conforme a lei de Hooke Equação 1.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

A Figura 2 é um exemplo de deformação elástica linear e a Figura 3 é um exemplo de deformação elástica não linear.

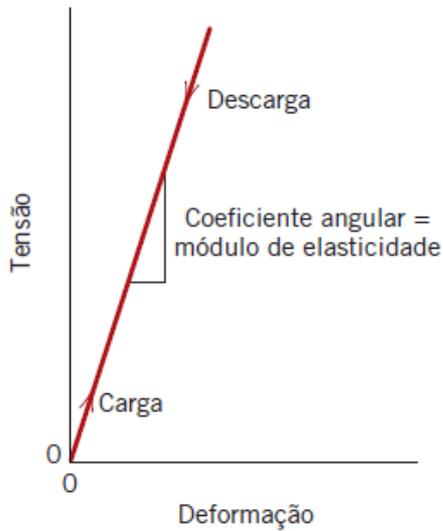


Figura 2: Deformação elástica linear
Fonte: Callister e Rethwisch, 2016

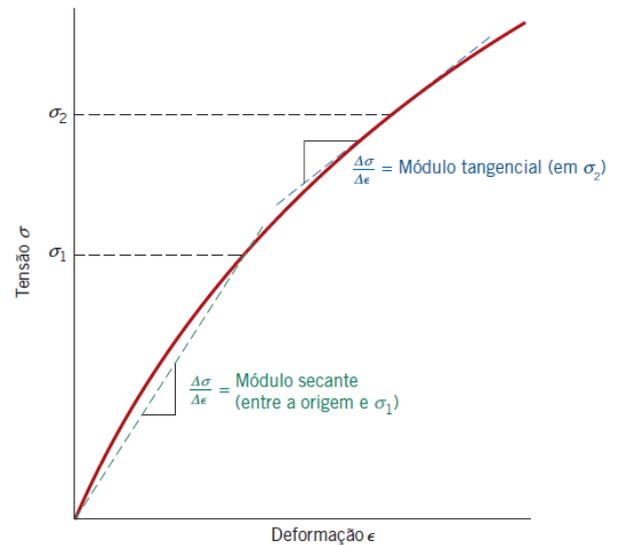


Figura 3: Deformação elástica não linear
Fonte: Callister e Rethwisch, 2016

A Figura 2 apresenta um módulo de elasticidade linear, que é calculado pelo ângulo da curva. Já a Figura 3 demonstra um módulo de elasticidade não linear que pode ser calculado pelo método da tangente ou secante.

Na escala atômica a deformação elástica macroscópica é observada por variações mínimas no espaço entre átomos e no estiramento de suas ligações. O módulo de elasticidade, conseqüentemente, mede a resistência das ligações interatômicas logo, o módulo é proporcional à inclinação da curva força interatômica - separação interatômica, como mostrado na Figura 4 (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

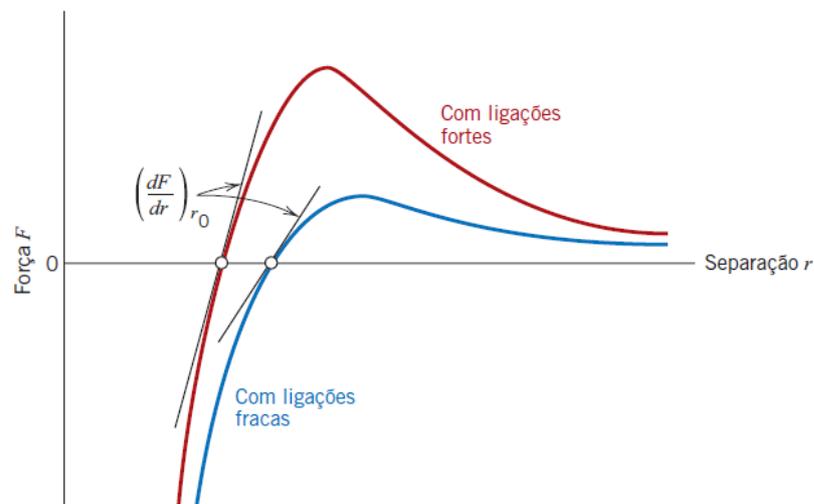


Figura 4: Relação entre força e separação interatômica
Fonte: Callister e Rethwisch, 2016

A Figura 4 ilustra a relação da força em função da separação interatômica para átomos fracos e fortemente ligados.

No campo da engenharia a deformação elástica é essencial para o *design* de sistemas que dependem da elasticidade dos materiais, como molas e componentes de amortecimento. Além disso, a análise da deformação elástica é crucial para garantir que as estruturas resistam às cargas operacionais sem sofrerem danos permanentes (HIBBELER, 2011).

Outra propriedade elástica de grande relevância é o coeficiente de Poisson, que é a razão entre as deformações compreensivas laterais e o alongamento axial, de acordo com a Equação 2. Essa propriedade é capaz de relacionar o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento, para os materiais isotrópicos.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2)$$

2.2 Deformação Plástica

De acordo com Dieter (1986), a deformação plástica refere-se à alteração irreversível na forma ou tamanho de um material quando submetido a uma tensão que excede seu limite elástico. Ao contrário da deformação elástica, que é temporária, a deformação plástica resulta em uma mudança permanente na estrutura interna do material com ilustrado na Figura 5, causada pelo deslizamento de planos cristalinos em metais (Dieter, 1986).

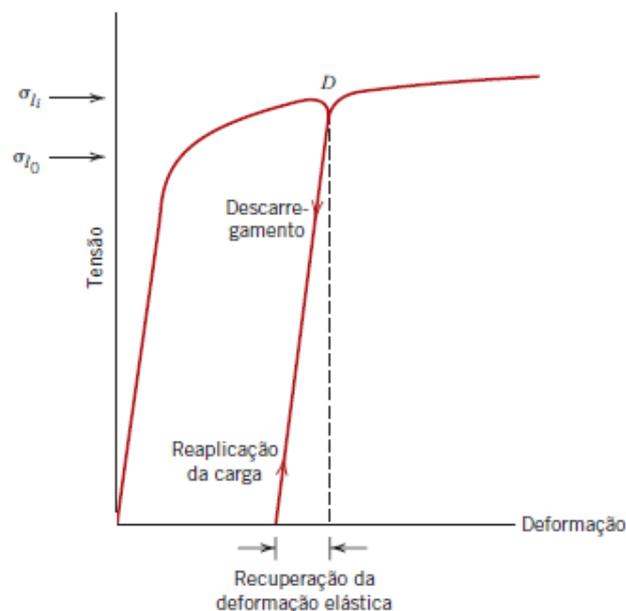


Figura 5: Diagrama tensão deformação mostrando os fenômenos de recuperação elástica e encruamento

Fonte: Callister e Rethwisch, 2016

Os mecanismos subjacentes à deformação plástica incluem movimento de discordâncias, deslizamento cristalino e maclação. O movimento de discordâncias,

particularmente, é crucial para entender como os metais deformam sob cargas aplicadas. O processo envolve a movimentação de linhas de discordância através da estrutura cristalina, facilitando a deformação plástica (HONEYCOMBE, 1984).

Para Callister e Rethwisch (2016), sob o ponto de vista atômico, a deformação plástica é caracterizada pelo rompimento das ligações entre átomos adjacentes e a subsequente criação de novas ligações com diferentes átomos vizinhos. Isso ocorre à medida que um grande volume de átomos ou moléculas se desloca relativamente uns aos outros. Diferentemente da deformação elástica, após a remoção da tensão, esses átomos ou moléculas não regressam às suas posições iniciais.

2.3 Vibrações Mecânicas

De acordo com Rao (2008), vibrações mecânicas referem-se aos movimentos oscilatórios de corpos físicos. Para ele, as vibrações são classificadas como:

- Vibração livre: ocorre quando um sistema é deslocado sua posição de equilíbrio e depois liberado, sem a influência de forças externas contínuas;
- Vibração forçada: um sistema mecânico ou estrutura é submetido a forças externas periódicas ou aleatórias;
- Vibração não amortecida e amortecida: Não amortecida ocorre quando não há perda de energia ao longo do tempo. Por outro lado, a vibração amortecida acontece quando há mecanismos, como atrito ou resistência do ar, que dissipam energia do sistema, levando a uma redução gradual da amplitude da oscilação até que eventualmente o movimento cesse;
- Vibração linear e não linear: Quando o sistema mecânico se comporta de forma linear, ou seja, as equações que descrevem o movimento são lineares. Já o sistema não linear possui alguma das propriedades que é variável, o que leva a equações não lineares e mais complexas;
- Vibração determinística e aleatória: A vibração determinística é aquela cujas causas e comportamentos podem ser precisamente definidos e previstos ao longo do tempo. Em contrapartida, a vibração aleatória é caracterizada por oscilações que não seguem um padrão definido ou previsível.

Para Rao (2008), a frequência natural é conhecida como aquela que após um impulso inicial, continua vibrando por si só sem interferência de forças externas. Ele também demonstra,

a partir da teoria de Euler-Bernoulli, que a frequência natural está ligada diretamente ao módulo de elasticidade.

Segundo Rao (2008, p.6), as partes elementares de sistemas vibratórios são:

Em geral, constituídas por um sistema vibratório inclui um meio para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor).

De acordo com Rao (2008), a oscilação em um sistema ocorre por meio da alternância contínua entre a conversão de energia potencial em energia cinética e vice-versa e em um sistema com amortecimento, uma parte da energia é perdida durante cada ciclo de oscilação.

A Figura 6 demonstra como é um sistema de vibração simples, de 1 grau de liberdade.

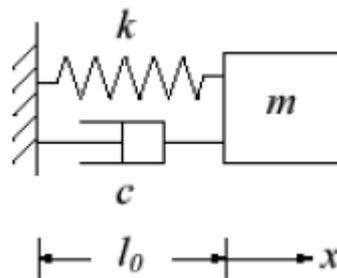


Figura 6: Sistema vibratório de 1° de liberdade
Fonte: Cossolino e Pereira, 2010

É representado na Figura 6 um modelo básico de um sistema de vibração que é composto por uma massa m , uma mola k (rigidez) e um amortecedor c (constante de amortecimento). A força sofrida pelo conjunto massa-mola, descrito pela lei de Hooke, é dada pela Equação 3 e o amortecimento viscoso, descrito por uma força proporcional a velocidade que é dado pela Equação 4. Aplicando a segunda Lei de Newton, Equação 5, chegasse na Equação 6 de movimento para vibração livre (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

$$F = -kx \quad (3)$$

$$F = -c\dot{x} \quad (4)$$

$$F = m\ddot{x} \quad (5)$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (6)$$

A frequência natural desse sistema, como demonstrado por Rao (2008) é dado pela Equação 7:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

2.3.1 Amortecimento

O amortecimento é o mecanismo pelo qual a energia de um sistema oscilante é gradualmente dissipada por meio do calor e do som (RAO, 2008). Existem diferentes tipos de amortecimentos. O mesmo autor caracteriza três deles: Amortecimento viscoso, Coulomb e por histerese.

2.3.1.1 Amortecimento Viscoso

O amortecimento viscoso é caracterizado por uma força de amortecimento proporcional à velocidade do movimento do sistema. É o tipo mais comum de amortecimento modelado em análises de vibração. Este tipo de amortecimento é típico em fluidos em que a resistência ao movimento é devida à viscosidade do fluido (RAO, 2008). O autor define a Equação 8 para amortecimento crítico, Equação 9 para o fator de amortecimento e a Equação 10 para frequência natural amortecida.

$$c_c = 2m\omega_n \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (9)$$

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n \quad (10)$$

Existem três tipos de sistemas para o amortecimento viscoso que são: os sistemas subamortecidos, criticamente amortecidos e superamortecidos, ilustrado na Figura 7. O subamortecido ocorre quando o fator de amortecimento é menor do que 1, o criticamente amortecido quando o fator de amortecimento é 1 e o superamortecido quando o fator de amortecimento é maior do que 1. Quando o amortecimento é igual a 0, indica que é um sistema sem amortecimento (RAO, 2008).

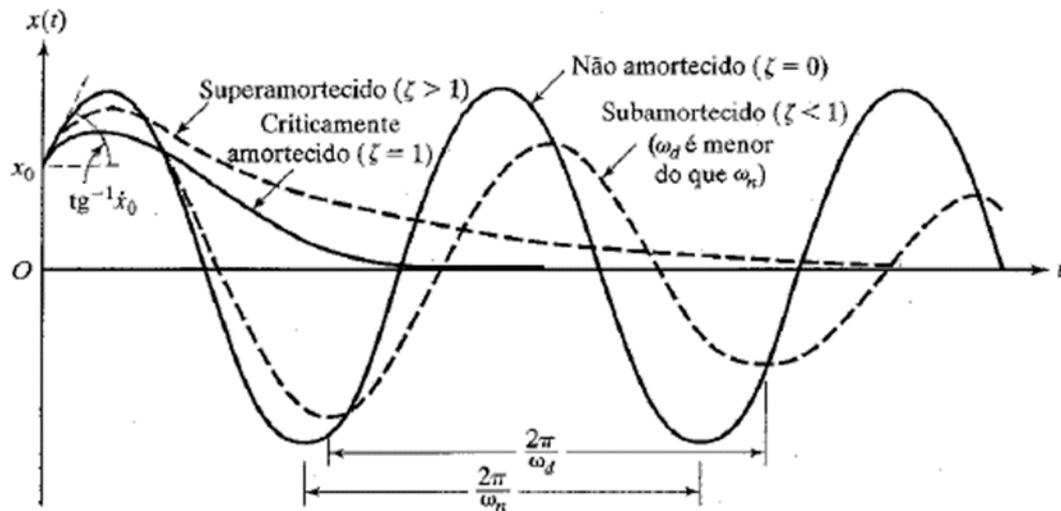


Figura 7: Curva de diferentes tipos de amortecimento
Fonte: Rao, 2008

A Figura 7, posição – tempo, mostra como um corpo se comporta ao longo do tempo com diferentes níveis de fator de amortecimento.

Através da curva do decaimento logarítmico, mostrada na Figura 8, do sistema subamortecido é possível determinar o decremento logarítmico (fator de perda), fator de amortecimento e a frequência natural. O movimento da curva subamortecida é descrito pela Equação 11 e o decremento logarítmico pela Equação 12 (RAO, 2008).

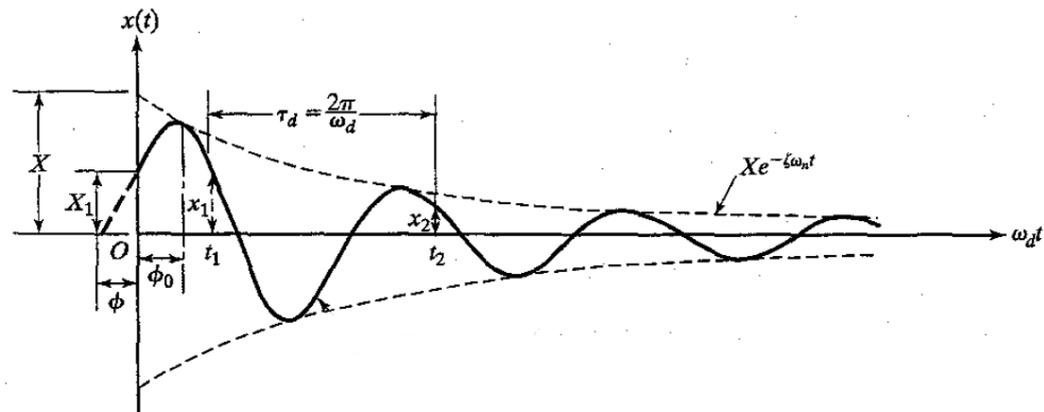


Figura 8: Curva subamortecida
Fonte: Rao, 2008

A Figura 8 representa uma curva de resposta amortecida com amplitude que diminui exponencialmente em relação ao tempo.

$$x(t) = X e^{-\zeta \omega_n t} \quad (11)$$

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} \quad (12)$$

Sabendo o valor do decremento logarítmico podemos calcular o fator de amortecimento pela Equação 13:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (13)$$

2.3.1.2 Amortecimento Coulomb

O amortecimento de Coulomb, também conhecido como amortecimento por atrito seco, ocorre devido ao atrito entre superfícies em contato. Diferente do amortecimento viscoso, a força de amortecimento de Coulomb é constante e independente da velocidade, com direção contrária a direção do movimento (RAO, 2008).

2.3.1.3 Amortecimento por Histerese

Já o amortecimento por histerese, ilustrado pela Figura 9, é uma propriedade intrínseca do material. Ele ocorre devido à dissipação de energia através de um processo microscópico do atrito interno do material devido a deformação dos planos (RAO, 2008).

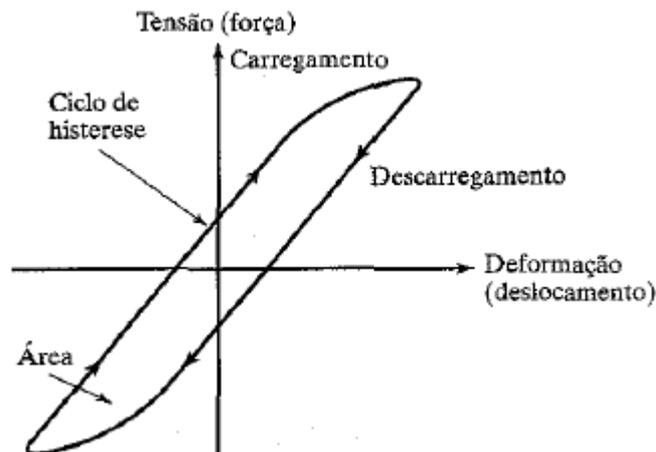


Figura 9: Ciclo de histerese para materiais elásticos
Fonte: Rao, 2008

A área representada na Figura 9, formada por uma curva tensão-deformação ou força deslocamento, representa a dissipação de energia do material durante um ciclo de carregamento (RAO, 2008).

2.3.2 Método da Largura de Banda ou Meia Potência

Como mostrado por Silva (2007), o amortecimento calculado utilizando o método de largura de banda, é medido com base na resposta em frequência. A largura de banda é determinada pela extensão da curva de resposta de frequência quando a magnitude (Q) atinge

1/raiz (2) do valor do pico, o valor da variação da frequência é denotado por $\Delta\omega$, conforme a Figura 10.

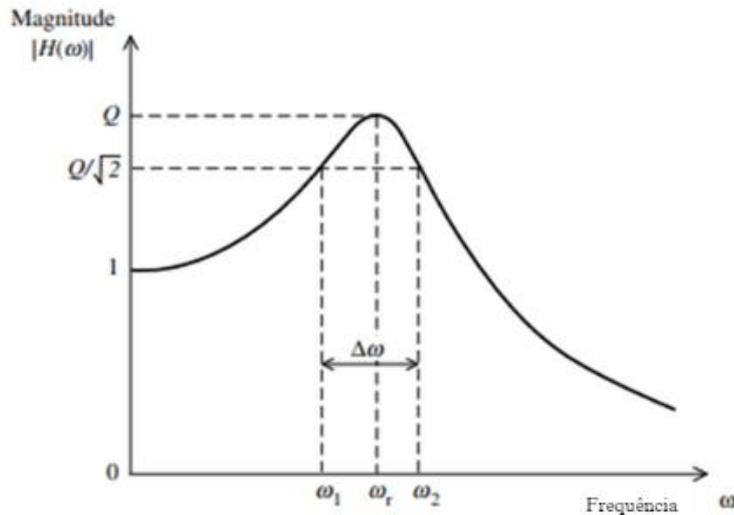


Figura 10: Método da largura de banda para a determinação do amortecimento em um sistema com 1 grau de liberdade.

Fonte: Silva modificado, 2007

O autor demonstra que $\Delta\omega$ está relacionado com o amortecimento pela seguinte equação 14:

$$\Delta\omega = 2\zeta\omega_n = 2\zeta\omega_r \quad (14)$$

Logo, reorganizando a equação 14, obtemos o amortecimento modal através da largura de banda utilizando a equação 15:

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_r} \quad (15)$$

2.4 Dinâmica de Estruturas

A dinâmica de estruturas é o comportamento de estruturas submetidas a cargas dinâmicas, ou seja, qualquer carga cuja magnitude, direção ou posição varia com o tempo como terremotos, ventos ou vibrações de máquinas. Essa área estuda como as forças são aplicadas e transmitidas, levando em consideração fatores como massa, rigidez e amortecimento das estruturas (CLOUGH E PENZIEN, 2003).

2.4.1 Vibração Longitudinal

A vibração longitudinal envolve o movimento oscilatório de um corpo ao longo de seu eixo principal em que as partículas do material se movimentam paralelamente à direção da propagação da onda, representado pela Figura 11 (RAO, 2008). O autor mostra que para uma barra sujeita a uma vibração longitudinal livre, a Equação 16 de movimento é dada por:

$$c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t) \quad (16)$$

onde:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (17)$$

- E = módulo de elasticidade
- ρ = densidade
- u = deslocamento axial
- x = posição
- t = tempo
- c = velocidade da onda

aplicando condições de contorno obtém-se as equações da Figura 12.

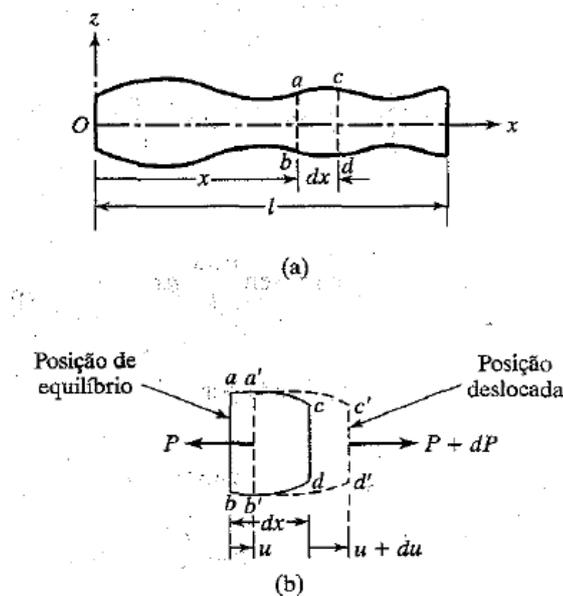


Figura 11 Vibração longitudinal de uma barra
Fonte: Rao, 2008

A Figura 11 demonstra como uma vibração longitudinal percorre a barra ao longo do seu comprimento.

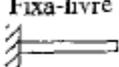
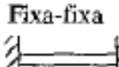
Condições das extremidades da barra	Condições de contorno	Equação de frequência	Forma modal (função normal)	Frequências naturais
 Fixa-livre	$u(0, t) = 0$ $\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0$	$\cos \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_n(x) = C_n \operatorname{sen} \frac{(2n+1)\pi x}{2l}$	$\omega_n = \frac{(2n+1)\pi c}{2l}$ $n = 0, 1, 2, \dots$
 Livre-livre	$\frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = 0$ $\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0$	$\operatorname{sen} \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_n(x) = C_n \cos \frac{n\pi x}{l}$	$\omega_n = \frac{n\pi c}{l}$; $n = 0, 1, 2, \dots$
 Fixa-fixa	$u(0, t) = 0$ $u(l, t) = 0$	$\operatorname{sen} \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_n(x) = C_n \cos \frac{n\pi x}{l}$	$\omega_n = \frac{n\pi c}{l}$; $n = 1, 2, 3, \dots$

Figura 12 Condições de contorno para uma barra em vibração longitudinal
 Fonte: Rao, 2008

A Figura 12 mostra três tipos de condições de contorno para vibração longitudinal barra e suas respectivas equações para forma modal e frequências naturais.

2.4.2 Vibração Torcional de Eixo

A vibração torcional refere-se ao movimento giratório oscilante de uma estrutura ou componente em torno do seu eixo longitudinal, Figura 13 (RAO, 2008). O autor demonstra, que um eixo uniforme em vibração livre é regido pela seguinte Equação 18 de movimento:

$$c^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}(x, t) = \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}(x, t) \quad (18)$$

onde:

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (19)$$

- G = módulo de cisalhamento
- θ = ângulo de torção

aplicando as condições de contorno obtém-se as seguintes equações da Figura 14.

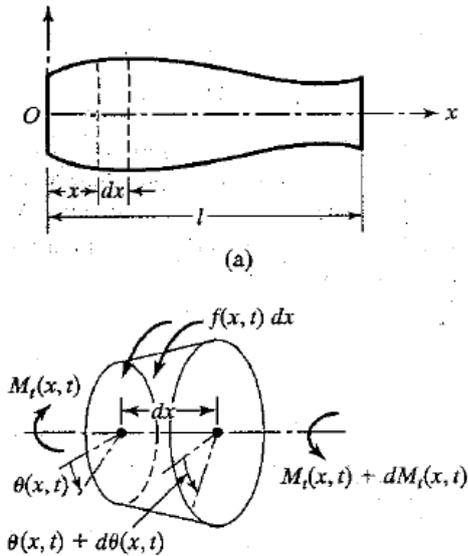


Figura 13: Vibração torcional de um eixo
 Fonte: Rao, 2008

A Figura 13 demonstra como uma vibração torcional percorre o eixo ao longo do seu comprimento.

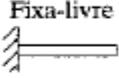
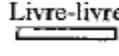
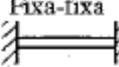
Condições na extremidade do eixo	Condições de contorno	Equação de frequência	Forma modal (função normal)	Frequências naturais
	$\theta(0, t) = 0$ $\frac{\partial \theta}{\partial x}(l, t) = 0$	$\cos \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_x(x) = C_n \operatorname{sen} \frac{(2n + 1) \pi x}{2l}$	$\omega_n = \frac{(2n + 1) \pi c}{2l};$ $n = 0, 1, 2, \dots$
	$\frac{\partial \theta}{\partial x}(0, t) = 0$ $\frac{\partial \theta}{\partial x}(l, t) = 0$	$\operatorname{sen} \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_x(x) = C_n \cos \frac{n \pi x}{l}$	$\omega_n = \frac{n \pi c}{l};$ $n = 0, 1, 2, \dots$
	$\theta(0, t) = 0$ $\theta(l, t) = 0$	$\operatorname{sen} \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_x(x) = C_n \cos \frac{n \pi x}{l}$	$\omega_n = \frac{n \pi c}{l};$ $n = 1, 2, 3, \dots$

Figura 14: Condições de contorno para eixos sujeitos a vibração torcional
 Fonte: Rao, 2008

A Figura 14 mostra três tipos de condições de contorno para vibração torcional de eixo e suas respectivas equações para forma modal e frequências naturais.

2.4.3 Vibração Transversal - Viga de Euler-Bernoulli

Também conhecida como teoria da flexão de viga, desenvolvida independentemente por Leonhard Euler e Daniel Bernoulli no século XVIII, essa teoria proporciona um modelo simplificado para análise do comportamento de vigas sob carga especialmente útil para descrever a flexão em vigas longas e delgadas (TIMOSHENKO, 1983). Este modelo assume

que a viga se deforma apenas em seu plano e que a deformação é linearmente proporcional à distância da linha neutra (TIMOSHENKO e YOUNG, 1968).

O modo de vibração transversal, representado pela Figura 15, é o mais complexo entre os três modos pois ele considera tanto a translação quanto a rotação o que nos leva a uma equação diferencial de segunda ordem no tempo e uma de quarta ordem em relação ao espaço (RAO, 2008). O autor, modela a vibração transversal (para uma viga uniforme e vibração livre) através da teoria de Euler-Bernoulli para elasticidade pela Equação 20 diferencial:

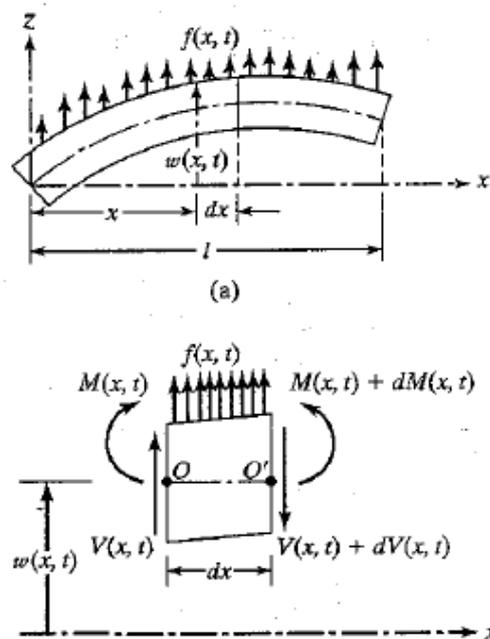


Figura 15: Representação da vibração transversal em uma viga
Fonte: Rao, 2008

$$c^2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = 0 \quad (20)$$

onde:

$$c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (21)$$

- I = momento de inercia
- w = deslocamento da viga
- A = área

Para resolver a Equação 20, Rao (2008) demonstra que são necessárias duas condições iniciais e quatro condições de contorno. Admitindo que as condições iniciais sejam:

$$w(x, t = 0) = w_0(x) \quad (22)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}(x, t = 0) = w_0(x) \quad (23)$$

E utilizando o método de separação por variáveis

$$w(x, t) = W(x)T(t) \quad (24)$$

onde $W(x)$ equivale ao domínio do espaço e $T(t)$ ao domínio do tempo, substituindo a Equação 24 na Equação 16 obtém-se:

$$\frac{c^2}{W(x)} \frac{d^4 W(x)}{dx^4} = -\frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = \omega^2 \quad (25)$$

A Equação 25 pode ser separada para cada domínio:

$$\frac{d^4 W(x)}{dx^4} - \beta^4 W(x) = 0 \quad (26)$$

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \omega^2 T(t) = 0 \quad (27)$$

onde

$$\beta^4 = \frac{\rho A \omega^2}{EI} \quad (28)$$

o valor de β pode ser determinado pelas condições de contorno como mostra a Figura 16 e a frequência natural ou módulo de elasticidade obtém-se ao reorganizar a Equação 28:

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (29)$$

$$E = \frac{\omega_n^2 \rho A}{I \beta_n^4} \quad (30)$$

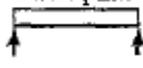
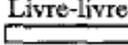
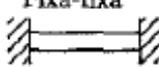
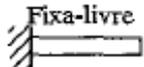
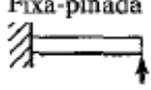
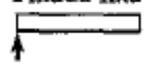
Condições nas extremidades da viga	Equação de frequência	Forma modal (função normal)	Valor de $\beta_n l$
 Pinada-pinada	$\text{sen } \beta_n l = 0$	$W_n(x) = C_n [\text{sen } \beta_n x]$	$\beta_1 l = \pi$ $\beta_2 l = 2\pi$ $\beta_3 l = 3\pi$ $\beta_4 l = 4\pi$
 Livre-livre	$\cos \beta_n l \cdot \cosh \beta_n l = 1$	$W_n(x) = C_n [\text{sen } \beta_n x + \sinh \beta_n x + \alpha_n (\cos \beta_n x + \cosh \beta_n x)]$ onde $\alpha_n = \left(\frac{\text{sen } \beta_n l - \sinh \beta_n l}{\cosh \beta_n l - \cos \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 4,730041$ $\beta_2 l = 7,853205$ $\beta_3 l = 10,995608$ $\beta_4 l = 14,137165$ ($\beta l = 0$ para corpo rígido)
 Fixa-fixa	$\cos \beta_n l \cdot \cosh \beta_n l = 1$	$W_n(x) = C_n [\sinh \beta_n x - \text{sen } \beta_n x + \alpha_n (\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x)]$ onde $\alpha_n = \left(\frac{\sinh \beta_n l - \text{sen } \beta_n l}{\cos \beta_n l - \cosh \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 4,730041$ $\beta_2 l = 7,853205$ $\beta_3 l = 10,995608$ $\beta_4 l = 14,137165$
 Fixa-livre	$\cos \beta_n l \cdot \cosh \beta_n l = -1$	$W_n(x) = C_n [\text{sen } \beta_n x - \sinh \beta_n x - \alpha_n (\cos \beta_n x + \cosh \beta_n x)]$ onde $\alpha_n = \left(\frac{\text{sen } \beta_n l + \sinh \beta_n l}{\cos \beta_n l + \cosh \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 1,875104$ $\beta_2 l = 4,694091$ $\beta_3 l = 7,854757$ $\beta_4 l = 10,995541$
 Fixa-pinada	$\text{tg } \beta_n l - \text{tgh } \beta_n l = 0$	$W_n(x) = C_n [\text{sen } \beta_n x - \sinh \beta_n x + \alpha_n (\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x)]$ onde $\alpha_n = \left(\frac{\text{sen } \beta_n l - \sinh \beta_n l}{\cos \beta_n l - \cosh \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 3,926602$ $\beta_2 l = 7,068583$ $\beta_3 l = 10,210176$ $\beta_4 l = 13,351768$
 Pinada-fixa	$\text{tg } \beta_n l - \text{tgh } \beta_n l = 0$	$W_n(x) = C_n [\text{sen } \beta_n x + \alpha_n \sinh \beta_n x]$ onde $\alpha_n = \left(\frac{\text{sen } \beta_n l}{\sinh \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 3,926602$ $\beta_2 l = 7,068583$ $\beta_3 l = 10,210176$ $\beta_4 l = 13,351768$ ($\beta l = 0$ para corpo rígido)

Figura 16: Condições de contorno para a vibração transversal de uma viga

Fonte: Rao, 2008

A Figura 16 apresenta seis tipos de condições de contorno para vibração transversal de barra e suas respectivas equações para forma modal e frequências naturais.

2.4.4 Viga de Timoshenko

A teoria da viga de Timoshenko é uma extensão da teoria de Euler-Bernoulli, considerando os efeitos de cisalhamento e rotação da seção transversal, como demonstrado na Figura 17. Este modelo é mais preciso para descrever o comportamento de vigas curtas e grossas, em que os efeitos de cisalhamento são mais significativos (TIMOSHENKO e GERE, 1961).

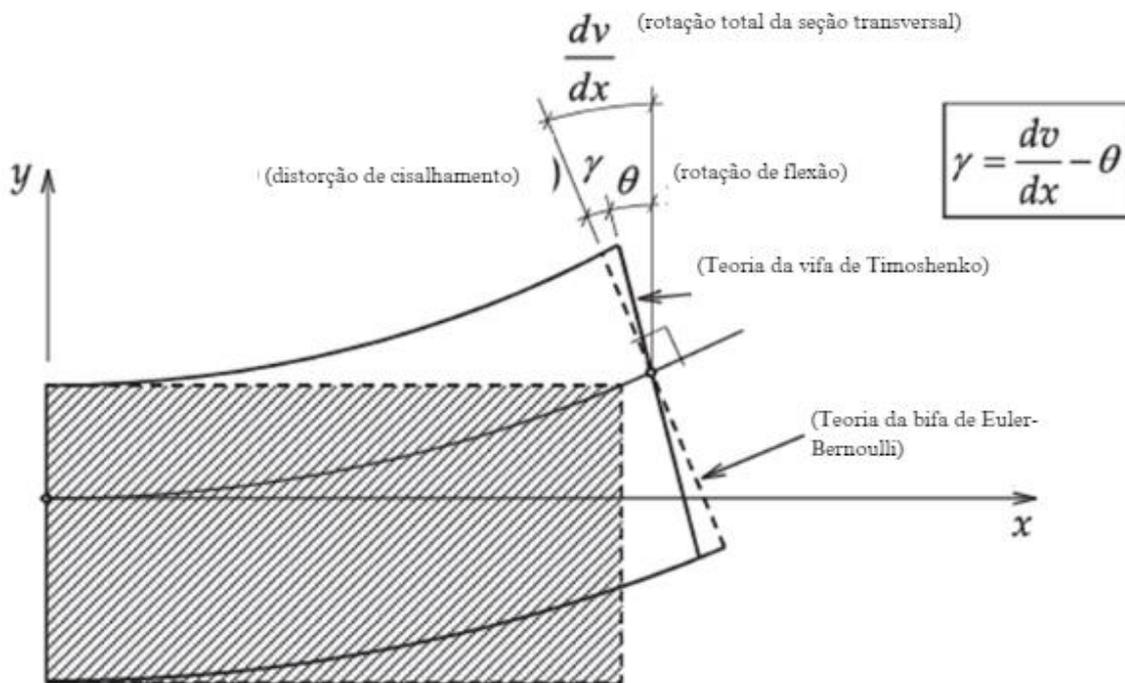


Figura 17: Deformação por cisalhamento na teoria da viga de Timoshenko
 Fonte: Rodrigues *et al* modificado, 2021

De acordo com Rodrigues *et al* (2021, p.4) “a distorção pelo cisalhamento é constante para cada seção transversal e é considerada uma rotação adicional da seção. Portanto, a rotação da seção e o deslocamento transversal não estão associadas e são consideradas como variáveis independentes”, conforme a Figura 17.

2.5 Análise Modal

A análise modal é um procedimento para determinar as propriedades dinâmicas de estruturas de sistemas mecânicos, essa técnica é utilizada para compreender e prever o comportamento das estruturas sob diversas condições de carga e excitação. A análise modal envolve a identificação de frequências naturais, modos de vibração e amortecimento das estruturas (INMAN, 2013).

A base teórica da análise modal se assenta na teoria de vibrações. Como apresentado por Meirovitch (2001), o objetivo é decompor um complexo movimento vibratório em uma série de movimentos mais simples, cada um associado a uma frequência natural e um modo de vibração específico. Esta decomposição facilita a compreensão e a solução de problemas complexos de vibração na engenharia.

2.5.1 Formas Modais

Por Inman (2013), as formas modais, também conhecidas como modos de vibração, são um conceito central na análise modal. Elas representam os padrões de deslocamento que uma estrutura pode adotar quando vibra em suas frequências naturais. A compreensão das formas modais são essenciais para prever a resposta de uma estrutura a estímulos dinâmicos e para a identificação de potenciais problemas de ressonância (INMAN, 2013).

Cada forma modal de acordo com Meirovitch (2001) é caracterizada por uma frequência natural, um modo de vibração e um fator de amortecimento. As frequências naturais são as frequências nas quais a estrutura vibra de forma mais intensa, enquanto os modos de vibração descrevem o padrão de deslocamento da estrutura em cada uma dessas frequências. O amortecimento, por sua vez, refere-se à capacidade da estrutura em dissipar energia vibratória (MEIROVITCH, 2001).

A identificação das formas modais pode ser realizada por meio de análises experimentais, analíticas ou numéricas. Ewins (2000) descreve métodos experimentais que envolvem a excitação da estrutura e a medição das respostas para extrair as características modais. Técnicas analíticas e numéricas, como aquelas baseadas em elementos finitos, são discutidas por Bathe (1996), permitindo a simulação e análise detalhada das formas modais em estruturas complexas.

2.6 Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) baseia-se na subdivisão de um domínio de problema em um conjunto de elementos menores e mais simples, geralmente com forma geométrica regular, como triângulos ou quadriláteros para problemas bidimensionais e tetraedros ou hexaedros para problemas tridimensionais como mostrado na Figura 18 (ZIENKIEWICZ e TAYLOR, 2000).

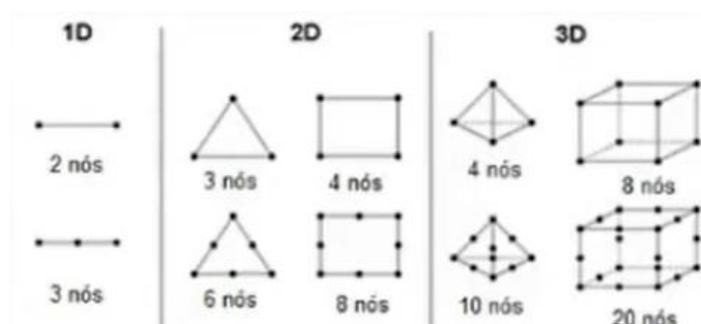


Figura 18: Tipos de Elementos
Fonte: Guimarães, 2015

Como Zienkiewicz e Taylor (2000) explicam, em cada elemento, as equações que regem o problema são simplificadas e resolvidas, e as soluções locais são então combinadas para formar uma solução aproximada para todo o domínio.

A aplicabilidade do MEF é vasta e inclui a análise de tensões e deformações em estruturas, dinâmica dos fluidos, transferência de calor, eletromagnetismo, entre outros (BATHE,1996). O autor destaca a importância do MEF no projeto e análise de estruturas em engenharia civil, mecânica, aeroespacial e automotiva, em que o método permite prever o comportamento das estruturas sob diferentes condições de carga e ambientes.

2.7 Normas para Caracterização de Materiais

As normas para a caracterização de materiais são essenciais para garantir a qualidade, segurança e confiabilidade dos materiais usados em diversas aplicações de engenharia. Elas fornecem diretrizes e procedimentos padronizados para a realização de testes e análises de materiais. Segundo Callister e Rethwisch (2016), normas bem definidas são fundamentais para a comparação objetiva de dados de materiais, possibilitando a escolha adequada e o uso eficiente dos materiais em aplicações específicas.

Várias organizações internacionais e nacionais desenvolvem e publicam normas para a caracterização de materiais. Entre elas, a ASTM International (*American Society for Testing and Materials*) e a ISO (*International Organization for Standardization*) são as mais reconhecidas. A ASTM desenvolve normas amplamente usadas em testes de materiais nos Estados Unidos, enquanto a ISO publica normas internacionais utilizadas globalmente (ASTM, 2020; ISO, 2020). Outras normas mais comuns são:

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- DIN - *Deutsches Institut für Normung*
- AFNOR - *Association Française de Normalisation*
- BSI - *British Standards Institution*
- ASME - *American Society of Mechanical Engineer*
- JIS - *Japanese Industrial Standards*
- SAE - *Society of Automotive Engineers*
- COPANT - Comissão Panamericana de Normas Técnicas

A padronização dos métodos de teste é crucial no desenvolvimento e na escolha de materiais para aplicações específicas. De acordo com Smith (2019), a utilização de normas

estabelecidas permite que engenheiros e cientistas comparem de forma eficaz as propriedades dos materiais, assegurando a adequação para a aplicação desejada e a conformidade com regulamentos de segurança e desempenho.

2.7.1 Método Estático, Ensaio de Tração

O método estático ou quase estático, baseia-se no princípio de aplicar cargas ou deslocamentos de forma controlada e monitorar a resposta do material, como demonstrado na Figura 19. Esses testes incluem ensaios de tração, compressão, flexão e cisalhamento (DIETER, 1986). Como explicado pelo autor, a velocidade de aplicação da carga é um fator crítico nestes métodos, pois deve ser suficientemente lenta para assegurar um estado quase estático.

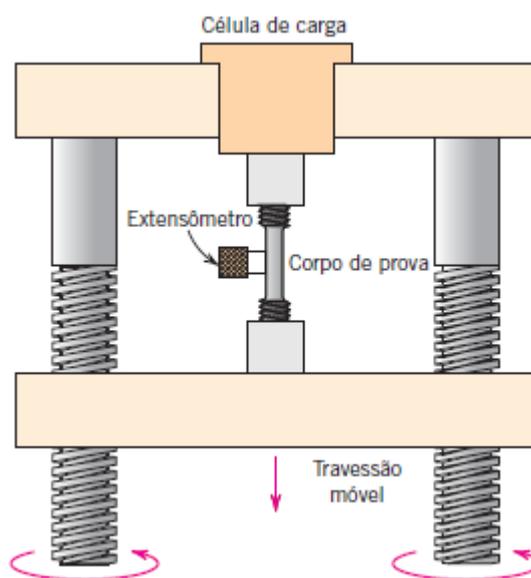


Figura 19: Representação esquemática de um dispositivo de ensaio de tração
Fonte: Callister e Rethwisch, 2016

A Figura 19 demonstra um corpo de prova sofrendo uma força aplicada pela célula de carga enquanto o extensômetro lê a deformação dele.

Durante um ensaio de tração, uma amostra do material (corpo de prova) é alongada até sua ruptura e os dados de força e deformação são registrados. A partir desses dados, diversas propriedades mecânicas podem ser calculadas, incluindo o módulo de elasticidade, limite de escoamento, limite de resistência à tração, ductilidade, resiliência e tenacidade (ASTM E8 / E8M, 2011).

A curva tensão-deformação obtida no ensaio de tração, vista na Figura 20, oferece informações valiosas sobre o comportamento do material. A região elástica da curva, em que

a relação entre tensão e deformação é linear, é descrita pela Lei de Hooke. A inclinação desta região linear é uma medida do módulo de elasticidade do material. A região plástica da curva caracteriza-se por uma deformação permanente e o ponto em que a curva deixa de ser linear indica o limite de escoamento do material (DIETER, 1986).

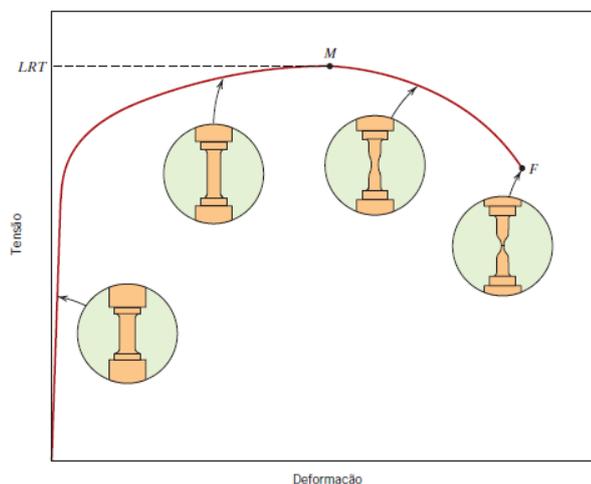
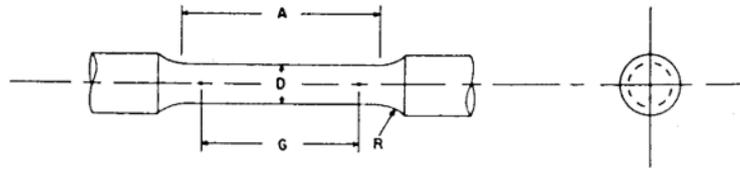


Figura 20: Curva Tensão-Deformação
Fonte: Callister e Rethwisch, 2016

A Figura 20 apresenta diferentes estágios do corpo de prova durante o ensaio de tração. No primeiro momento a curva se comporta linearmente e o corpo de prova está em sua fase elástica, no segundo momento a curva não é mais linear e o material já atingiu sua fase plástica. Passando do ponto M, que é o limite de resistência a tração, o corpo começa a sofrer estricção (estreitamento da seção transversal) e perder sua resistência, logo após acontece o rompimento.

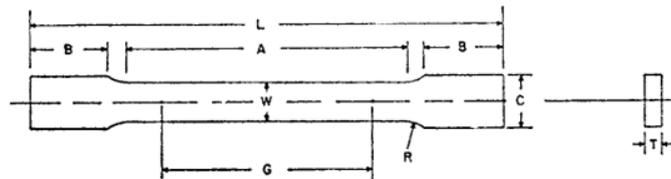
Normas como ASTM E8/E8M (2011) para ensaios de tração são um exemplo de padrão a ser usado para garantir a consistência e a confiabilidade dos resultados. Ela define a geometria e as dimensões de diversos tipos de corpos de prova. A Figura 21 e Figura 22 demonstram dois possíveis tipos de corpos de prova de acordo com a norma.



Dimensões, mm [pol.]					
Para amostras de teste com comprimento de gage quatro vezes o diâmetro [E8].					
	Espécime padrão	Espécimes de tamanho pequeno Proporcionais ao Padrão			
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3	Espécime 4	Espécime 5
Comprimento do Gage	50.0 \pm 0.1 [2.000 \pm 0.005]	36.0 \pm 0.1 [1.400 \pm 0.005]	24.0 \pm 0.1 [1.000 \pm 0.005]	16.0 \pm 0.1 [0.640 \pm 0.005]	10.0 \pm 0.1 [0.450 \pm 0.005]
Diâmetro D (Nota 1)	12.5 \pm 0.2 [0.500 \pm 0.010]	9.0 \pm 0.1 [0.350 \pm 0.007]	6.0 \pm 0.1 [0.250 \pm 0.005]	4.0 \pm 0.1 [0.160 \pm 0.003]	2.5 \pm 0.1 [0.113 \pm 0.002]
R-Raio de filete, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A-Comprimento da seção reduzida, min (Nota 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Figura 21: Corpo de prova de seção circular
Fonte: ASTM E8/E8M, 2011

A Figura 21 mostra o padrão a ser seguido para 5 tamanhos diferentes de corpo de prova de seção circular.



	Dimensões		
	Espécime de Specimens		submedida padrão
	Tipo Placa, 40 mm [1.500 in.] Largo	Tipo de folha, 12,5 mm [0.500 in.] Largo	6 mm [0.250 in.] Largura
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
Comprimento do Gage (Nota 1 e Nota 2)	200.0 \pm 0.2 [8.00 \pm 0.01]	50.0 \pm 0.1 [2.000 \pm 0.005]	25.0 \pm 0.1 [1.000 \pm 0.003]
Largura (Nota 3 e Nota 4)	40.0 \pm 2.0 [1.500 \pm 0.125, -0.250]	12.5 \pm 0.2 [0.500 \pm 0.010]	6.0 \pm 0.1 [0.250 \pm 0.005]
Espessura T (Nota 5)		es espessura do material	
R-Raio de filete, min (Nota 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L-comprimento total, min (Nota 2, Nota 7 e Nota 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A-Comprimento da seção reduzida, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B - Comprimento da seção de aderência, min (Nota 9)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C - Largura da seção de aderência, aproximada (Nota 4 e Nota 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

Figura 22: Corpo de prova de seção retangular
Fonte: ASTM E8/E8M, 2011

A Figura 22 apresenta o padrão a ser seguido para 3 tamanhos diferentes de corpo de prova de seção retangular.

2.7.2 Método Dinâmico, Excitação por Impulso

O ensaio de excitação por impulso baseia-se na geração e medição de vibrações que propagam através do material. A análise das características dessas vibrações, como as frequências naturais e o amortecimento de vibração, permite determinar os módulos elásticos, coeficiente de Poisson e amortecimento do material (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

O módulo de Young é determinado pela frequência de ressonância na flexão, Figura 23, ou no modo de vibração longitudinal, Figura 24, já o módulo de rigidez (ou cisalhamento) Figura 25 é encontrado usando a frequência de ressonância torcional e estes dois módulos possuem uma relação entre si, que permite calcular a razão de Poisson (ASTM 1876, 2001).

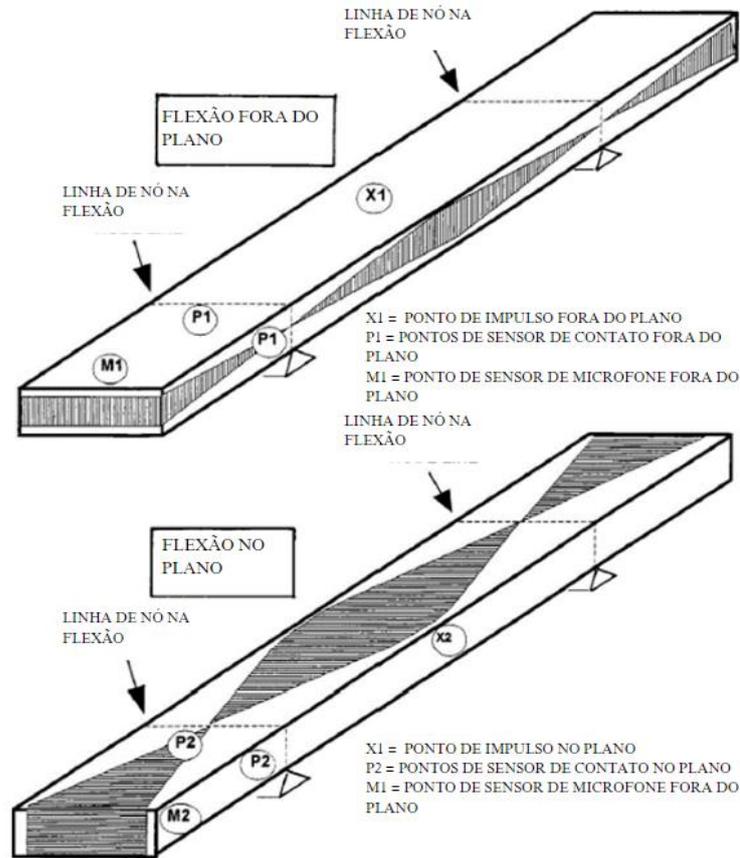


Figura 23: Corpo de prova retangular para flexão dentro e fora do plano
Fonte: ASTM 1876, 2001

A Figura 23 ilustra onde os pontos de apoio e aparelhos de medição devem ser colocados de acordo com a vibração e mostra onde deve ser o impulso para vibração transversal.

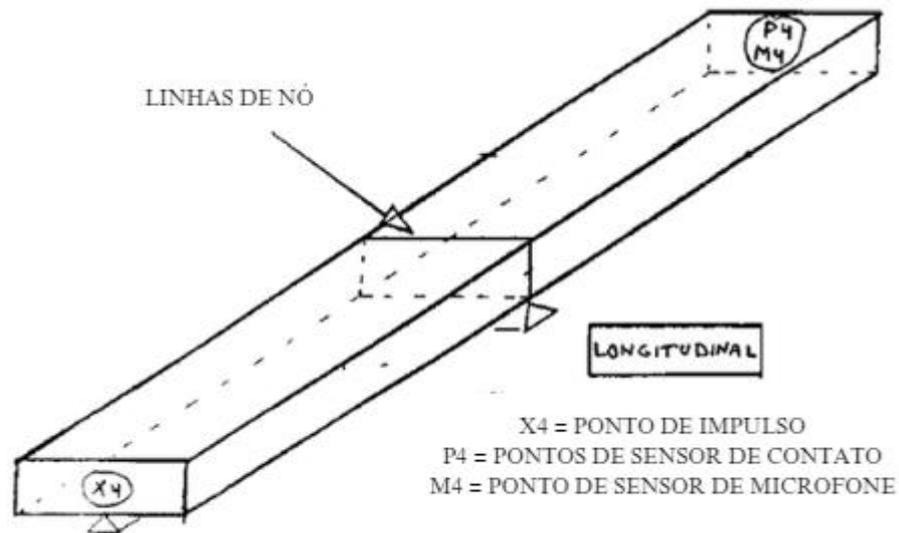


Figura 24: Corpo de prova retangular para vibração longitudinal
 Fonte: ASTM 1876 modificado, 2001

A Figura 24 ilustra onde os pontos de apoio e aparelhos de medição devem ser colocados de acordo com a vibração e mostra onde deve ser o impulso para vibração longitudinal.

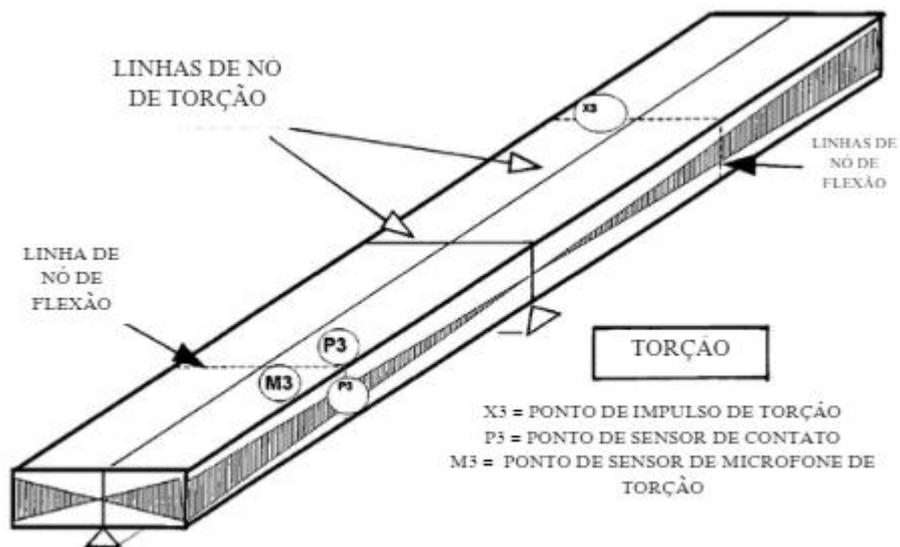


Figura 25: Corpo de prova retangular para vibração torcional
 Fonte: ASTM 1876 modificado, 2001

A Figura 25 ilustra onde os pontos de apoio e aparelhos de medição devem ser colocados de acordo com a vibração e mostra onde deve ser o impulso para vibração torcional.

O método de excitação por impulso, de acordo com a ASTM-1876 (2001), consiste em medir a frequência natural do corpo de prova, excitando mecanicamente por um impacto de curta duração com uma ferramenta de impulso, de acordo com Figura 26. Um acelerômetro ou microfonação detecta as vibrações e as transformam em sinais elétricos. Posteriormente, os

sinais são analisados e a frequência natural é encontrada pelo analisador. A frequência natural juntamente com a geometria e massa do corpo de prova são utilizados para o cálculo do módulo de Young, Módulo de Cisalhamento e a Coeficiente de Poisson.

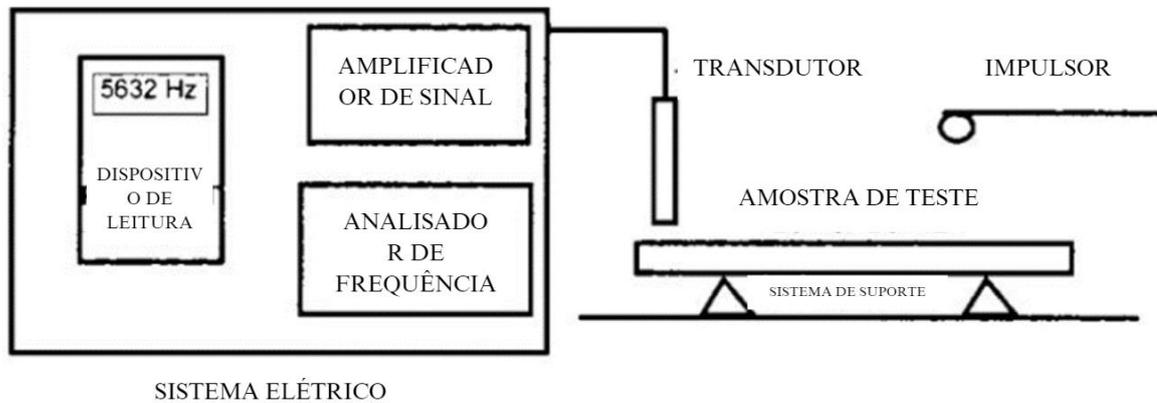


Figura 26: Representação de um sistema para testes
Fonte: ASTM 1876 modificado, 2001

A Figura 26 é uma representação esquemática de como deve ocorrer o teste e quais aparelhos são necessários.

O corpo de prova deve ser apoiado nas posições dos nós da frequência natural, que para a frequência de ressonância flexional o ponto de apoio é $0,224L$ e para torcional é $0,5L$. O impulso deve ser aplicado no local de maior amplitude (ASTM 1876, 2001).

A ASTM 1876 (2001) define diferentes modelos matemáticos para cada tipo de corpo de prova e excitação aplicada (vibração flexional e torcional), que são:

- Barra de seção retangular excitada em flexão:

$$E = 0,9465 \left(\frac{mf_f}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T_1 \quad (31)$$

onde:

- E = Módulo de Young (Pa)
- f_f = Frequência natural do modo de flexão (Hz)
- m = Massa (g)
- b = Largura (mm)
- L = Comprimento (mm)
- t = Espessura (mm)
- T_1 = Fator de correção para o modo de flexão fundamental

$$T_1 = 1 + 6,585(1 + 0,0752 * v + 0,8109 * v^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \left[\frac{8,340(1 + 0,2023v + 2,173v^2) \left(\frac{t}{L}\right)^4}{1 + 6,338(1 + 0,1408v + 1,536v^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2} \right] \quad (32)$$

onde:

➤ $v =$ Coeficiente de Poisson

1) Se $L/t \geq 20$, T_1 pode ser simplificado para:

$$T_1 = [1 + 6,585 \left(\frac{t}{L}\right)^2] \quad (33)$$

2) Se $L/t \leq 20$ e a razão de Poisson for conhecida, calcular T_1 pela Equação 32.

3) Se $L/t \leq 20$ e a razão de Poisson não for conhecida, deve-se usar um processo iterativo entre o módulo de Young e cisalhamento experimentais, de acordo com a Figura 27.

• Barra de seção circular excitada em flexão:

$$E = 1,6067 \left(\frac{L^3}{D^4}\right) (m f_f^2) T'_1 \quad (34)$$

onde:

➤ $T'_1 =$ Fator de correção para o modo de flexão fundamental

➤ $D =$ Diâmetro (mm)

$$T'_1 = 1 + 4,939(1 + 0,0752\mu^2) \left(\frac{D}{L}\right)^2 - 0,4883 \left(\frac{D}{L}\right)^4 - \left[\frac{4,691(1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \left(\frac{D}{L}\right)^4}{1 + 4,754(1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2) \left(\frac{D}{L}\right)^2} \right] \quad (35)$$

1) Se $L/t \geq 20$, T_1 pode ser simplificado para:

$$T'_1 = \left[1 + 4,939 \left(\frac{D}{L} \right)^2 \right]$$

- 2) Se $L/t \leq 20$ e a razão de Poisson for conhecida, calcular T'_1 pela Equação 35.
- 3) Se $L/t \leq 20$ e a razão de Poisson não for conhecida, deve-se usar um processo iterativo entre o módulo de Young e cisalhamento experimentais, de acordo com a Figura 27.

- Barra de seção retangular excitada em torção:

$$G = \frac{4Lmf_t}{bt} \left[\frac{B}{1+A} \right] \quad (36)$$

- G = Módulo de cisalhamento
- f_t = Frequência natural do modo de torção (Hz)
- A e B = Fator de correção empírico dependente da relação entre largura e espessura do corpo de prova

$$B = \left[\frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \left(\frac{t}{b} \right) - 2,52 \left(\frac{t}{b} \right)^2 + 0,21 \left(\frac{t}{b} \right)^6} \right] \quad (37)$$

$$A = \frac{[0,5062 - 0,8776 \left(\frac{b}{t} \right) + 0,3504 \left(\frac{b}{t} \right)^2 - 0,0078 \left(\frac{b}{t} \right)^3]}{[12,03 \left(\frac{b}{t} \right) + 9,892 \left(\frac{b}{t} \right)^2]} \quad (38)$$

- Barra de seção circular excitada em torção:

$$G = 16mf_t \left(\frac{L}{D} \right) \quad (39)$$

Para um material isotrópico a razão de Poisson se relaciona com E e G pela seguinte equação:

$$\nu = \left(\frac{E}{2G} \right) - 1 \quad (40)$$

Caso as medições forem feitas em temperaturas elevadas ou criogênicas, os módulos devem ser corrigidos da seguinte maneira:

$$M_T = M_0 \left[\frac{f_T}{f_0} \right]^2 \left[\frac{2}{1 + \alpha \Delta T} \right] \quad (41)$$

onde:

- M_T = módulo a temperatura T (E ou G)
- M_0 = módulo a temperatura ambiente (E ou G)
- f_T = frequência natural no forno ou câmara criogênica
- f_0 = frequência natural a temperatura ambiente
- α = expansão térmica linear média (mm/mm·°C) de temperatura ambiente para a temperatura de teste.

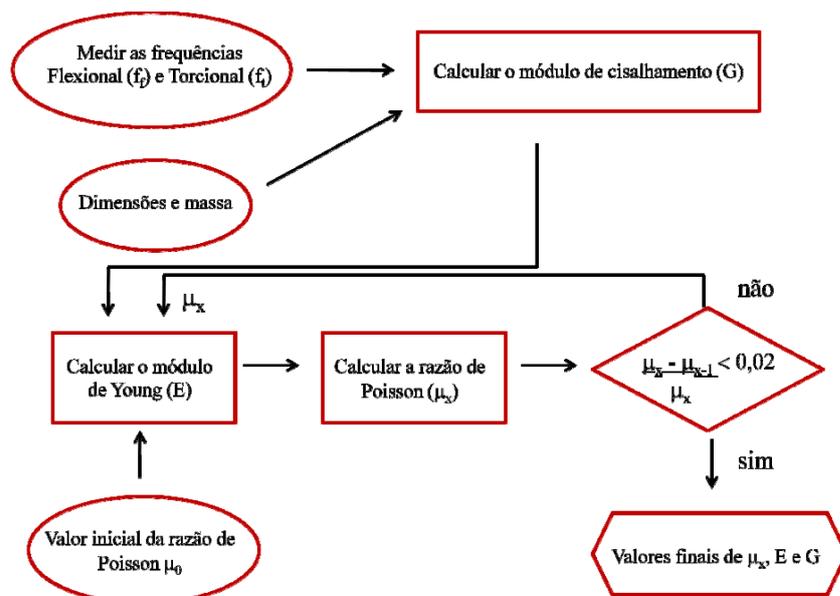


Figura 27: Processo interativo para determinar Poisson

Fonte: Cossolino e Pereira, 2010

A Figura 27 representa um fluxograma de interação de variáveis para calcular a razão de Poisson.

2.8 Trabalhos Relacionados

Essa seção será destinada à análise de trabalhos relacionados com o cálculo do módulo de elasticidade utilizando ensaio não destrutivos.

Os autores Mezzomo e Moraes (2019) mediram o módulo de elasticidade de aços e alumínio por meio do ensaio de excitação por impulso comparando com o ensaio de tração.

Os ensaios foram de acordo com as normas ASTM 1876 e ASTM E8. Obtiveram os seguintes resultados demonstrados na Figura 28:

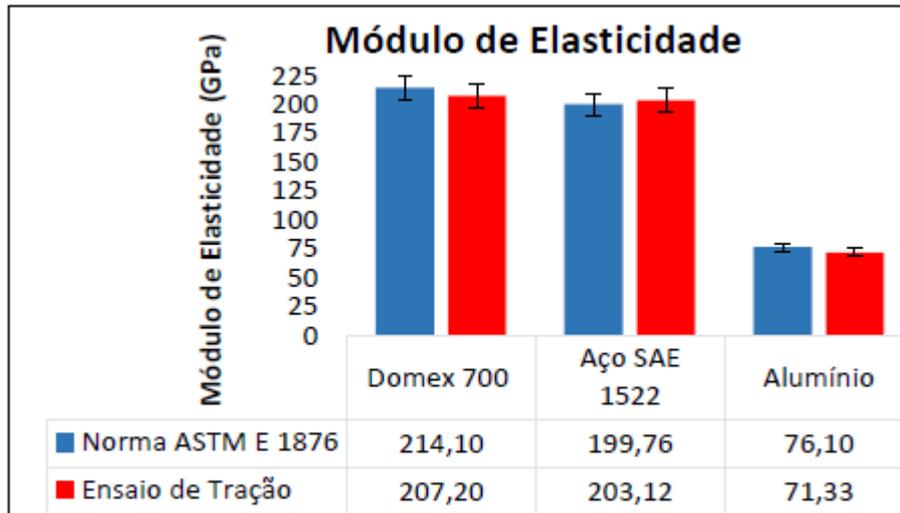


Figura 28: Comparativo do Módulo de Elasticidade entre a Norma ASTM E 1876 e o ensaio de tração
Fonte: Mezzomo e Moraes (2019)

De acordo com a Figura 28 podemos observar que a variação do módulo de elasticidade entre os dois métodos de ensaio foi de 3,22% para o Domex 700, -1,68% para SAE 1522 e 6,27% para o Alumínio.

Já os autores Martins *et al* (2015) fizeram um estudo sobre as propriedades físicas dos ferros fundidos vermiformes por meio de dois ensaios não destrutivos, excitação por impulso e ultrassom e um ensaio de tração (módulo de elasticidade através do método da secante à 25%). As normas utilizadas foram ASTM 1876-01, ASTM E2001-13 e VDG P441. A Figura 29 apresenta a comparação dos três métodos utilizados. Consequentemente, no mesmo trabalho por meio do equipamento *Sonelastic*, foi analisado o fator de amortecimento para frequência longitudinal e flexional como mostra a Figura 30.

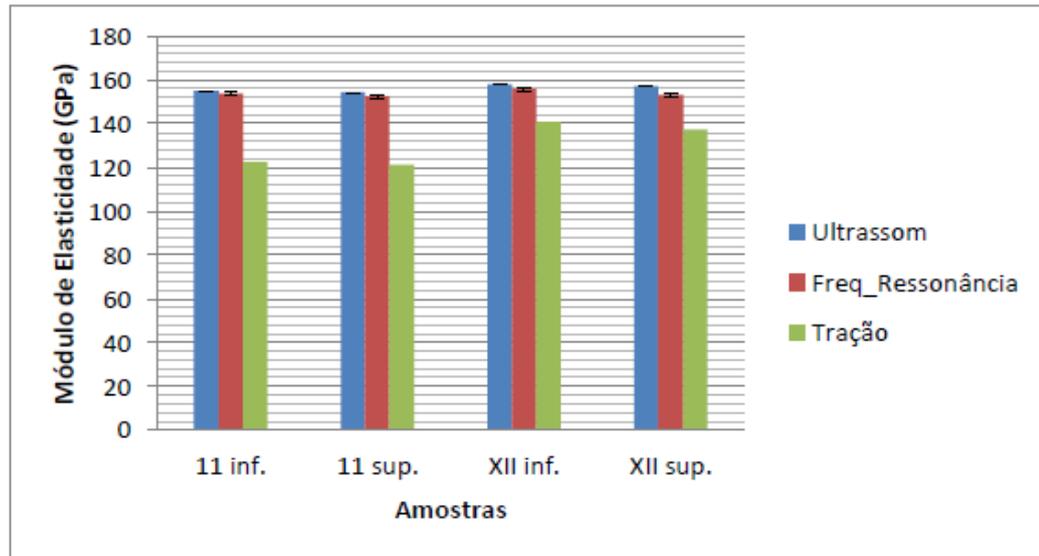


Figura 29: Relação entre os módulos de elasticidade medidos pelo ultrassom, frequência de ressonância e ensaio tração

Fonte: Martins *et al*, 2015

Pode-se perceber na Figura 29 que o ensaio de tração teve uma diferença significativa em relação aos outros dois ensaios. De acordo com autor isso se deve pelo método escolhido para o cálculo do módulo de elasticidade no ensaio de tração que foi o método da secante.

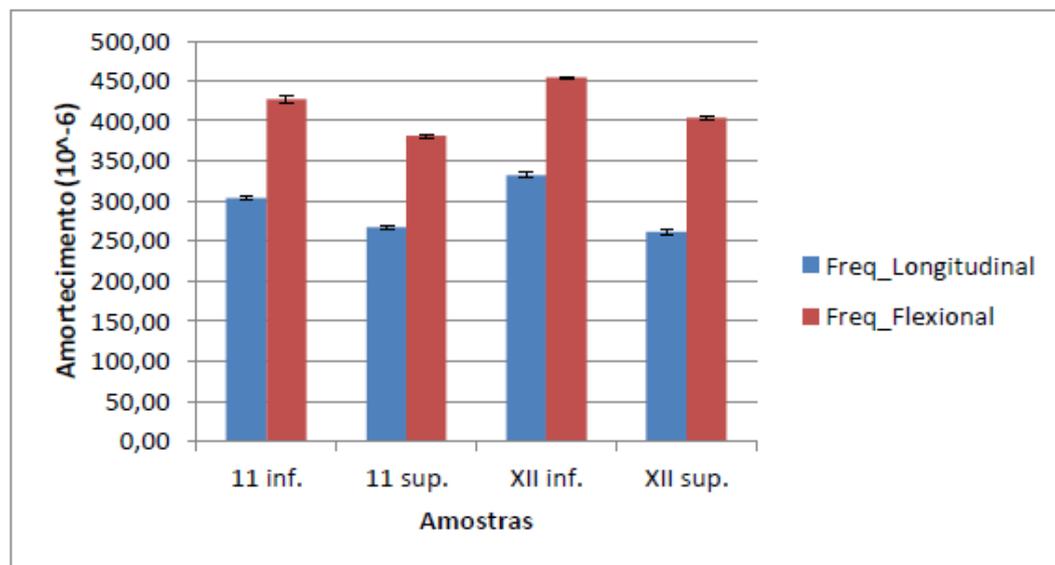


Figura 30: Amortecimento de vibrações (Ψ) através do ensaio de frequência de ressonância, para amostras com diferentes níveis de porosidades. Amostras da posição inferior – isentas de porosidades. Amostras da posição superior – algumas microporosidades.

Fonte: Martins *et al*, 2015

Na Figura 30, Martins *et al* (2015) mostram o nível de amortecimento das suas amostras tanto na frequência longitudinal quanto na flexional.

Diferente dos autores anteriormente citados, Abrantes *et al* (2018), desenvolveram uma bancada experimental para caracterização dinâmico-mecânica de materiais por amortecimento de vibração, Figura 31. Os autores utilizaram a curva do amortecimento

viscoso ou decaimento exponencial e a teoria de viga de Euler-Bernoulli e comparam com o resultado do equipamento DMTA (*Dynamic-Mechanical Thermal Analyzer*). Os materiais utilizados para os experimentos foram: uma viga de aço inoxidável ferrítico e uma viga de poliéster.

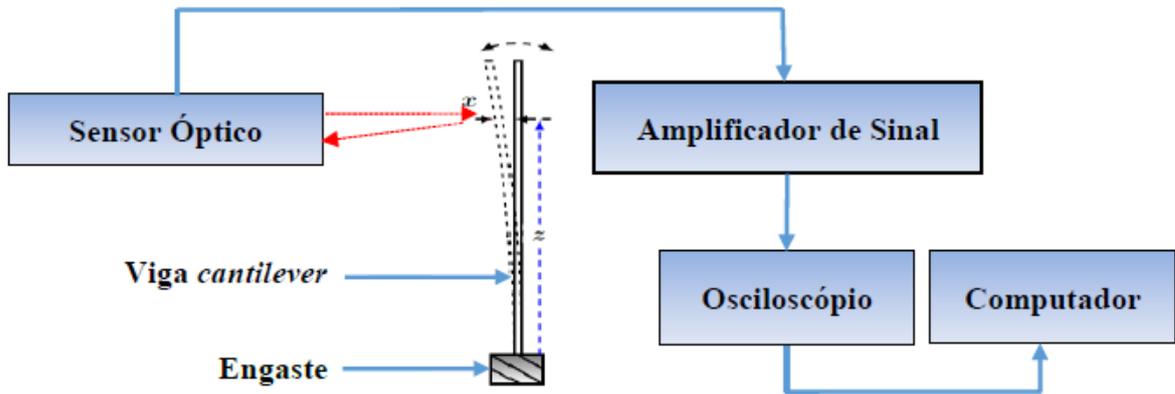


Figura 31: Esquema da concepção da bancada
Fonte: Abrantes *et al*, 2018

A Figura 31 mostra uma representação esquemática de como deve ocorrer o teste e quais aparelhos são necessários.

A Figura 32 e Figura 33 mostram os resultados do fator de amortecimento, fator de perda e o módulo de elasticidade do aço ferrítico. A Figura 34 mostra os resultados do fator de amortecimento do poliéster. Por fim, a Figura 35 mostra a comparação entre o fator de perda do poliéster pela bancada desenvolvida e pelo DTMA.

ω_0 - Freq. Angular de Ressonância (rad/s)	ζ - Fator de Amortecimento	$\tan \delta$ - Fator de Perda
238,485	$1,845 \times 10^{-3}$	$3,690 \times 10^{-3}$

Figura 32: Dados extraídos da curva de amortecimento da viga de aço inoxidável ferrítico
Fonte: Abrantes *et al*, 2018

	Módulo de Elasticidade - E (GPa)
Dado da Literatura	193,00
Medido	197,280

Figura 33: Verificação do Módulo de Elasticidade do aço
Fonte: Abrantes *et al*, 2018

ω_0 - Freq. Angular de Ressonância (rad/s)	ζ - Fator de Amortecimento
315,617	0,031684

Figura 34: Dados extraídos da curva de amortecimento da viga de poliéster
Fonte: Abrantes *et al*, 2018

	Fator de Perda - $\tan \delta$ (27°C)
Resultado em DMTA	0,062746
Resultado na Bancada Desenvolvida	0,063368

Figura 35: Verificação dos fatores de perda obtidos a 27°C, através do ensaio da viga de poliéster em DMTA e na Bancada Experimental

Fonte: Abrantes *et al*, 2018

Por meio da concepção e realização de experimentos na bancada de caracterização dinâmico mecânica, Abrantes et al (2018), demonstrou a eficiência do método para calcular o módulo de elasticidade e o fator de amortecimento.

Costa (2015) verificou, através do equipamento *Sonelastic* utilizando a técnica de excitação por impulso, a variação do módulo de elasticidade e amortecimento em função da temperatura de uma liga NiTi (55 e 45%). As Figura 36 e Figura 37 mostram o resultado das duas amostras (com e sem tratamento térmico) utilizadas pelo autor.

Fator de amortecimento (ζ)				
Amostra	Região	Fase	Valor médio (e-6)	Erro \pm (e-6)
Amostra_1	Aquecimento	Martensita	3253,98	685,9771
		Austenita	3124,63	565,2477
	Resfriamento	Martensita	3619,56	671,3244
		Austenita	240,37	86,96114
Amostra_2	Aquecimento	Martensita	3163,1	622,6282
		Austenita	2884,16	942,9444
	Resfriamento	Martensita	3910,24	1028,988
		Austenita	468,92	152,99
Diferenças percentuais				
Região	Fase	Valor percentual (%)		
Aquecimento	Martensita	- 2,79		
	Austenita	- 7,69		
Resfriamento	Martensita	+ 8,03		
	Austenita	+ 95,07		

Figura 36: Diferenças percentuais de amortecimento durante aquecimento e resfriamento em relação as fases das amostras 1 e 2.

Fonte: Costa, 2018

Módulo de elasticidade (E)				
Amostra	Região	Fase	Valor médio (GPa)	Erro \pm (GPa)
Amostra_1	Aquecimento	Martensita	63,33	1,87
		Austenita	61,33	1,56
	Resfriamento	Martensita	49,50	1,61
		Austenita	71	1,86
Amostra_2	Aquecimento	Martensita	65,34	1,92
		Austenita	59,72	1,70
	Resfriamento	Martensita	49,29	1,41
		Austenita	69,62	2,00
Diferenças percentuais				
Região	Fase	Valor percentual (%)		
Aquecimento	Martensita	+ 3,17		
	Austenita	- 2,62		
Resfriamento	Martensita	- 0,42		
	Austenita	- 1,94		

Figura 37: Diferenças percentuais de módulo de elasticidade durante aquecimento e resfriamento em relação as fases das amostras 1 e 2.

Fonte: Costa, 2018

Os trabalhos revisados demonstram que os ensaios não destrutivos, como a excitação por impulso e ultrassom, são eficazes para a medição do módulo de elasticidade e amortecimento em diferentes materiais. Comparações com métodos tradicionais, como o ensaio de tração, revelam variações pequenas entres os métodos o que confirma a eficácia dos ensaios dinâmicos. A utilização de bancadas experimentais e equipamentos específicos, como o *Sonelastic* e o DMTA, proporcionam uma análise mais detalhada e precisa das propriedades dinâmico-mecânicas dos materiais, destacando a importância dessas técnicas na pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e suas aplicações industriais.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada no trabalho. É descrito o tipo de pesquisa, os materiais e métodos utilizados nos ensaios, as variáveis e indicadores, determinar os instrumentos de coleta de dados, a tabulação de dados e, por fim, as considerações finais.

3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com Oliveira *apud* Richardson (2011 p.10), o método científico é:

A forma encontrada pela sociedade para legitimar um conhecimento adquirido empiricamente, isto é, quando um conhecimento é obtido pelo método científico, qualquer pesquisador que repita a investigação, nas mesmas circunstâncias, poderá obter um resultado semelhante.

Para Marconi e Lakatos (2017) não há ciência sem o emprego de métodos científicos. Os autores definem o método científico como uma série de procedimentos sistemáticos e lógicos que, de maneira eficiente e econômica, facilitam atingir a meta de gerar conhecimento que seja tanto válido quanto preciso. O método orienta a trajetória a ser percorrida, identifica equívocos e contribui para decisões do pesquisador.

Segundo Gil (2008), o método pode ser conceituado como a via adotada para alcançar um objetivo específico. O método científico refere-se ao agrupamento de processos intelectuais e técnicos empregadas na busca pelo aprendizado.

Gil (2002), classifica pesquisa quanto aos objetivos em três variedades:

- Pesquisa exploratória;
- Pesquisas descritiva;
- Pesquisa explicativa.

Neste trabalho, é realizado pesquisa de caráter explicativa. A pesquisa explicativa busca identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Seu foco está em entender as relações de causa e efeito, utilizando geralmente métodos quantitativos e experimentais (GIL, 2008). O autor afirma que essa abordagem é essencial para aprofundar o conhecimento sobre as causas dos fenômenos estudados e para testar hipóteses formuladas anteriormente.

Quanto a forma de abordagem, a pesquisa pode ser quantitativa, qualitativa ou ambas. A pesquisa desenvolvida neste trabalho tem caráter quantitativo, uma vez que serão realizados experimentos para coleta de dados e comparação deles. De acordo com Gil (2008), pesquisa

quantitativa envolve a coleta de dados quantificáveis e utiliza métodos estatísticos para analisar as relações entre variáveis, buscando padrões que possam ser generalizados.

Os procedimentos técnicos que foram realizados neste trabalho são:

- Pesquisas biográficas que se baseiam na análise de materiais como livros, artigos científicos, monografia e materiais disponíveis na internet;
- Pesquisa experimental que é caracterizada pela manipulação de variáveis em um ambiente controlado, a fim de demonstrar o comportamento de materiais através dos resultados.

3.2 Materiais e Métodos

O trabalho foi organizado de acordo com o fluxograma da Figura 38. Os ensaios dinâmicos foram realizados no Laboratório de Acústica, Vibrações e Sistemas Inteligentes (L'AViSI), os ensaios de tração foram no laboratório de Ensaios Mecânicos do GEsFraM (DEMET) e a análise metalográfica foi realizada no laboratório de metalografia (DEMEC), ambos localizados na UFOP, campus Ouro Preto.

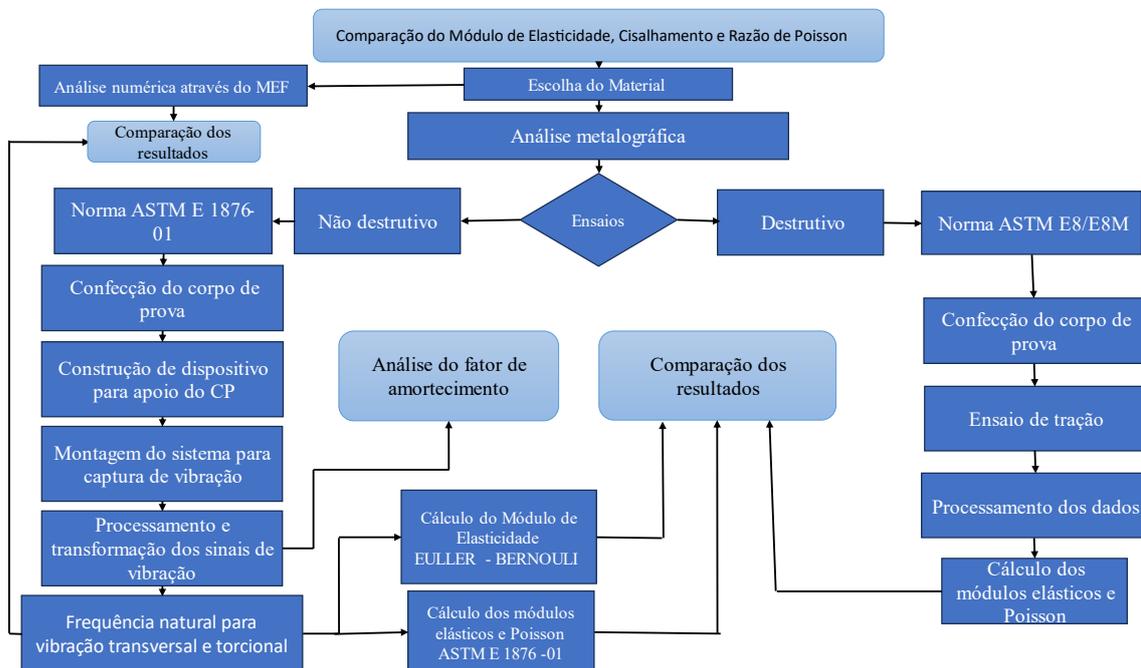


Figura 38: Fluxograma - Etapas da metodologia
Fonte: Pesquisa direta, 2024

A Figura 38 representa as etapas seguidas nesse trabalho para comparação do módulo de elasticidade, cisalhamento e coeficiente Poisson. Além disso, realiza a comparação das frequências naturais com o modelo numérico e analisa o fator de amortecimento do material.

Os materiais utilizados foram:

- Bancada para ensaio de excitação por impulso;
- Acelerômetro *PCB Piezoelectronics* modelo 352C33;
- Módulo de entrada de tensão *National Instruments NI-9239*;
- Chapa para corpo de prova SAE 1020;
- *Microphone Type 40PH Serial No. 216985*;
- Máquina de ensaio de tração;
- Extensômetro;
- Pulsador;
- Computador.

3.2.1 Corpos de prova

O material dos corpos de prova analisados neste presente trabalho é o Aço SAE 1020. Sua composição química, de acordo com a norma SAE 1020, está descrita na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição Química do Aço SAE 1020

Elemento	Porcentagem (% em massa)
Carbono (C)	0.18 - 0.23
Manganês (Mn)	0.30 - 0.60
Fósforo (P)	≤ 0.040
Enxofre (S)	≤ 0.050
Silício (Si)	até 0.15 (ou traços)
Ferro (Fe)	Balanceamento

Fonte: SAE 1020 modificado, 2024.

Para o experimento de excitação por impulso foi feito um corpo de prova com as medidas de acordo com a Figura 39, seguindo as indicações da norma ASTM E 1876-01. A Figura 40 mostra o corpo de prova já usinado e nas medidas corretas para a realização do ensaio dinâmico.

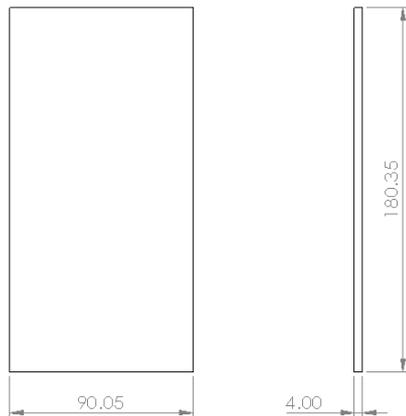


Figura 39: Corpo de prova para ensaio dinâmico
Fonte: Pesquisa direta, 2024

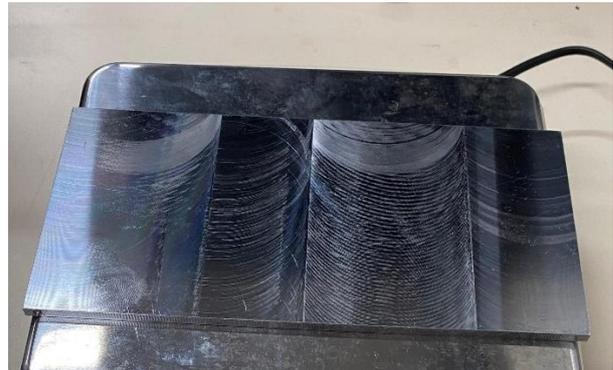


Figura 40: Corpo de prova para o ensaio de excitação por impulso
Fonte: Pesquisa direta, 2024

Na Tabela 3.2 está descrito as medidas do corpo de prova, sua massa (m) e densidade. Em relação às medidas, t indica a espessura, b a largura e l o comprimento.

Tabela 3.2 – Medidas e propriedades do CP de ensaio de excitação por impulso

Medidas	CP
t (mm)	4
b (mm)	90.05
l (mm)	180.35
m (kg)	508.5
DENSIDADE (kg/m^3)	7827.644655

Fonte: Pesquisa direta, 2024.

A massa do corpo de prova foi aferida com uma balança de precisão Marte Slim modelo M 6k, Figura 41.



Figura 41: Balança com corpo de prova
Fonte: Pesquisa direta, 2024

Já para o ensaio de tração foram feitos 4 corpos de prova, obedecendo a norma ASTM E8/E8M, Figura 42. Ambos os corpos de prova correspondem ao mesmo material.

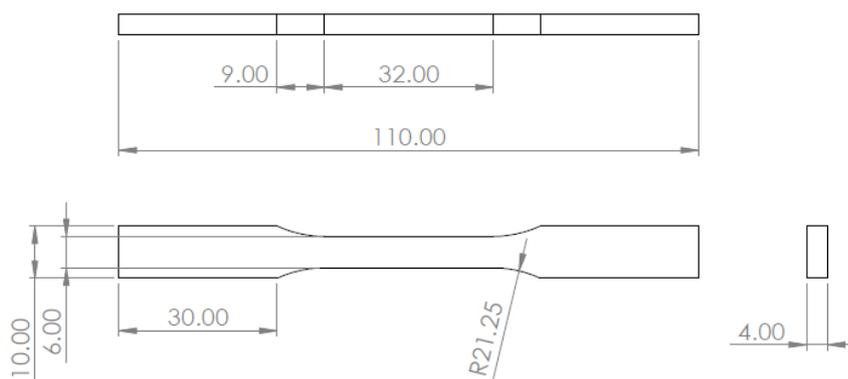


Figura 42: Corpo de prova para ensaio de tração
Fonte: Pesquisa direta, 2024

A Tabela 3.3 mostra as medidas dos corpos de prova após a confecção.

Tabela 3.3 - Medidas do CP para ensaio de tração após a fabricação

Medidas	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4
G (mm)	25	25	25	25
W (mm)	6.3	6.3	6.3	6.8
T (mm)	4	4	4	4
R (mm)	21.25	21.25	21.25	21.25
L (mm)	110.2	110.2	110.2	110.5
A (mm)	32	32	32	32
B (mm)	30	30	30	30
C (mm)	10.01	10.1	10.1	10.5

Fonte: Pesquisa direta, 2024.

Na Tabela 3.3, G representa comprimento útil, W é a largura, T é a espessura, R é o raio do filete, L é o comprimento total, A é o comprimento da seção reduzida, B é o comprimento da seção de aderência e C é a largura da seção de aderência.

3.2.2 Simulação

Para simulação, foi utilizado o programa *Ansys Student*, que é um software de análise em elementos finitos desfrutado por diversas áreas da engenharia.

A condição de contorno adotada para análise modal, tanto no software como experimentalmente, foi a Livre-Livre (modo de corpo rígido). A escolha não acarreta nenhum problema, pois os apoios localizam-se nos pontos nodais, logo não causa interferência para as frequências desejadas.

Realizou-se uma análise baseada nos primeiros modos, sendo eles de vibração transversal, nas Figura 43 e Figura 45, e de vibração torcional, nas Figura 44 e Figura 46.

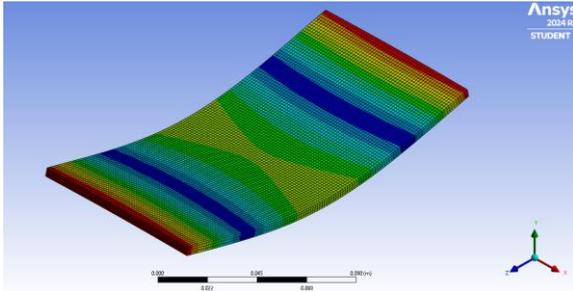


Figura 43: Modo de vibração transversal
Fonte: Pesquisa direta, 2024

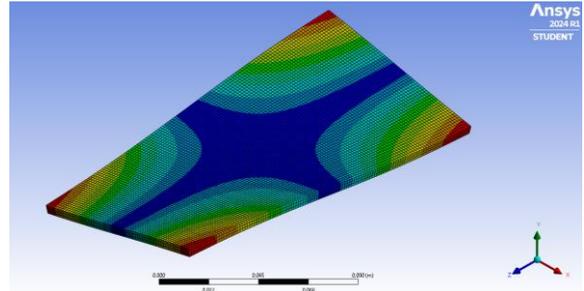


Figura 44: Modo de vibração torcional
Fonte: Pesquisa direta, 2023

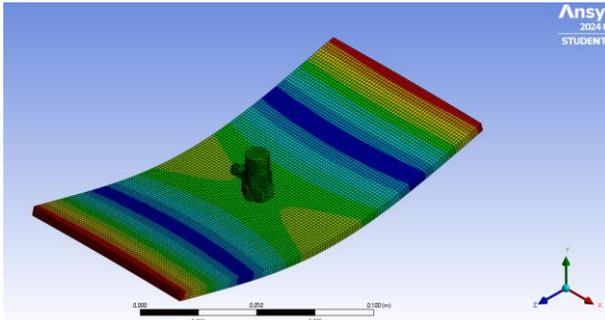


Figura 45: Modo de vibração transversal com acelerômetro
Fonte: Pesquisa direta, 2024

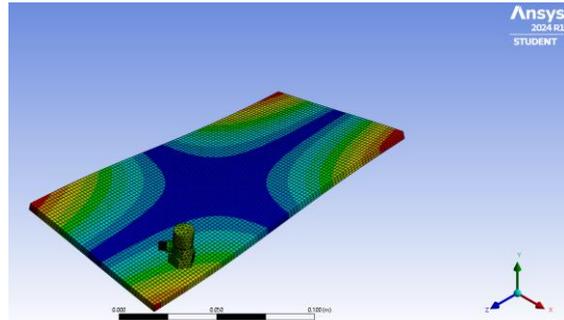


Figura 46: Modo de vibração torcional com acelerômetro
Fonte: Pesquisa direta, 2024

Para ambos os casos acima foram feitas convergências de malha, de modo que o erro seja o menor possível.

As propriedades do material criadas e inseridas no software foram obtidas através do experimento, calculadas pela Norma ASTM 1876-01. A Figura 47 apresenta as características adicionadas ao material com a utilização do acelerômetro, e a Figura 48 não apresenta a utilização do acelerômetro (utilizando o microfone para aquisição de sinais).

Properties of Outline Row 3: 4-90.05-180.35				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7827.6	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Shear Modulus and Young's M...		
6	Young's Modulus	210.41	GPa	
7	Poisson's Ratio	0.26236		
8	Bulk Modulus	1.4757E+11	Pa	
9	Shear Modulus	83.339	GPa	

Figura 47: Propriedades do material utilizando o acelerômetro
Fonte: Pesquisa direta, 2024.

Properties of Outline Row 3: 4-90.05-180.35				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7827.6	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Shear Modulus and Young's M...		
6	Young's Modulus	212.24	GPa	
7	Poisson's Ratio	0.25412		
8	Bulk Modulus	1.4387E+11	Pa	
9	Shear Modulus	84.618	GPa	

Figura 48: Propriedades do material utilizando o microfone
Fonte: Pesquisa direta, 2024.

Após a análise numérica, coleta-se as frequências naturais obtidas na simulação. Dessa forma, é possível calcular novamente os módulos elásticos e coeficiente de Poisson, para posteriormente fazer a comparação de resultados entre o modelo experimental e numérico.

3.2.3 Ensaio de Excitação por Impulso

O ensaio foi realizado de acordo com a Norma ASTM 1876-01.

A bancada para o ensaio foi montada com o intuito de apoiar o corpo de prova em seus pontos nodais. Nela, consegue-se trabalhar em duas situações diferentes: na frequência de vibração transversal, onde o corpo de prova (CP) é apoiado na distância de $0,224 \cdot l$, sendo l o comprimento, como representado nas Figura 49 e Figura 51; e na frequência de vibração torcional, onde o CP é apoiado em uma distância de $0,5 \cdot l$, como representado nas Figura 50 e Figura 52.

As Figura 49 e Figura 50 mostram o ensaio com o acelerômetro:

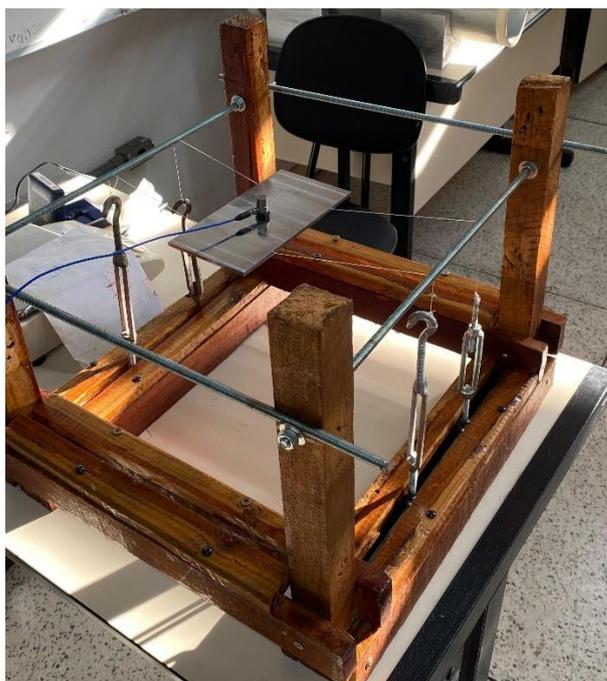


Figura 49: Dispositivo para ensaio com acelerômetro ($0,224l$)

Fonte: Pesquisa Direta, 2024



Figura 50: Dispositivo para ensaio com acelerômetro ($0,5l$)

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Na Figura 49, o corpo de prova apresenta um apoio em cada uma de suas duas extremidades, no sentido longitudinal ($0,224 \cdot l$). A distância entre cada apoio e a extremidade mais próxima é de 40,4mm. O acelerômetro está localizado no centro do CP.

Na Figura 50, o corpo de prova apresenta um apoio nos pontos médios entre suas extremidades, sendo 45mm no sentido transversal e 90,2mm no sentido longitudinal. O acelerômetro localiza-se na extremidade inferior direita.

As Figura 51 e Figura 52 demonstram o ensaio efetuado com o microfone:



Figura 51: Dispositivo para ensaio com microfone (0,224l)

Fonte: Pesquisa Direta, 2024



Figura 52: Dispositivo para ensaio com microfone (0,5l)

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

As posições dos apoios seguem o mesmo padrão apresentado anteriormente. No entanto, nesse caso, utiliza-se um microfone para captar as vibrações. O microfone encontra-se no centro de uma das extremidades longitudinais, enquanto os apoios são representados pela distância $0,224 \cdot l$, como na Figura 51, para vibração transversal. Já para a vibração torcional, onde os apoios estão localizados na distância $0,5 \cdot l$, o microfone fica localizado no quadrante oposto ao da aplicação da carga, como mostrado na Figura 52.

Para o amortecimento é utilizado o método da largura de banda (ou meia potência). Dessa forma, é possível caracterizar o fator de amortecimento para cada um dos modos de vibração.

3.2.4 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado de acordo com a Norma ASTM E8/E8-M.

Os corpos de provas (CP) para o ensaio de tração foram retirados do corpo de prova utilizado para o ensaio dinâmico por meio do processo de usinagem, no sentido longitudinal da peça, como demonstrado na Figura 53.

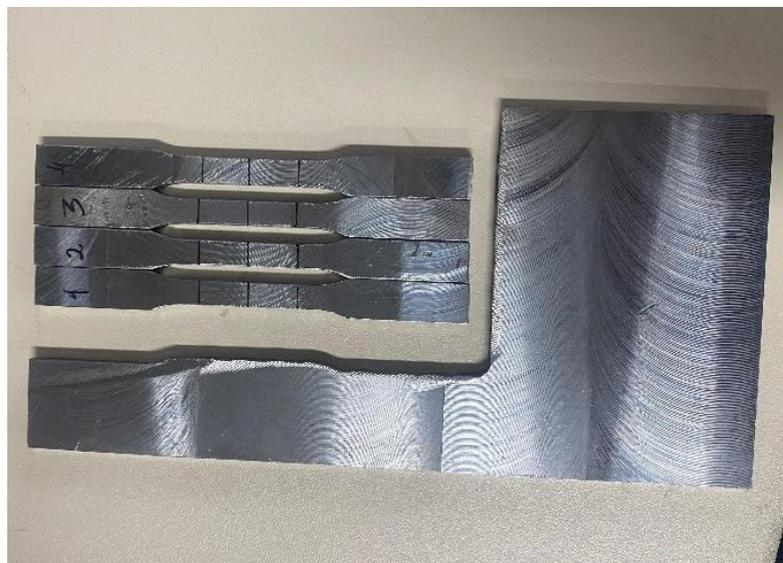


Figura 53: CP 1,2,3 e 4
Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Para este ensaio foi utilizado uma Máquina Universal de Ensaio da marca Instron Figura 57 e, para medir a deformação, foi utilizado um extensômetro Instron, Figura 58.

3.3 Variáveis e Indicadores

Variáveis são características que podem assumir diferentes valores em uma pesquisa, sendo classificadas como independentes, dependentes, intervenientes e de controle (Marconi e Lakatos, 2003). Indicadores são medidas específicas que quantificam essas variáveis, transformando conceitos abstratos em dados quantificáveis (Gil, 2008), essenciais para a análise e interpretação dos resultados.

Na Tabela 3.4 são apresentadas as variáveis e indicadores do presente trabalho.

Tabela 3.4 - Variáveis e Indicadores

Variável	Indicadores
Frequência Natural	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidez • Massa • Amortecimento • Geometria • Condição de contorno • Formas modais • Densidade
Módulo de Elasticidade (E)	<ul style="list-style-type: none"> • Frequência natural do modo de flexão
Módulo de Cisalhamento (G)	<ul style="list-style-type: none"> • Frequência natural do modo de torção
Razão de Poisson (μ)	<ul style="list-style-type: none"> • E e G

Fonte: Pesquisa direta, 2024.

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Para aquisição de dados de vibração, foi utilizado o acelerômetro disposto na Figura 54 e o microfone apresentado na Figura 55, dispositivos usados para medir a aceleração e o módulo de entrada de tensão *Nacional Instruments NI-9239*, demonstrado na figura Figura 56, que envia os sinais para o software *Labview*.



Figura 54: Acelerômetro *PCB Piezotronics* modelo 352C33
 Fonte: Pesquisa Direta, 2024

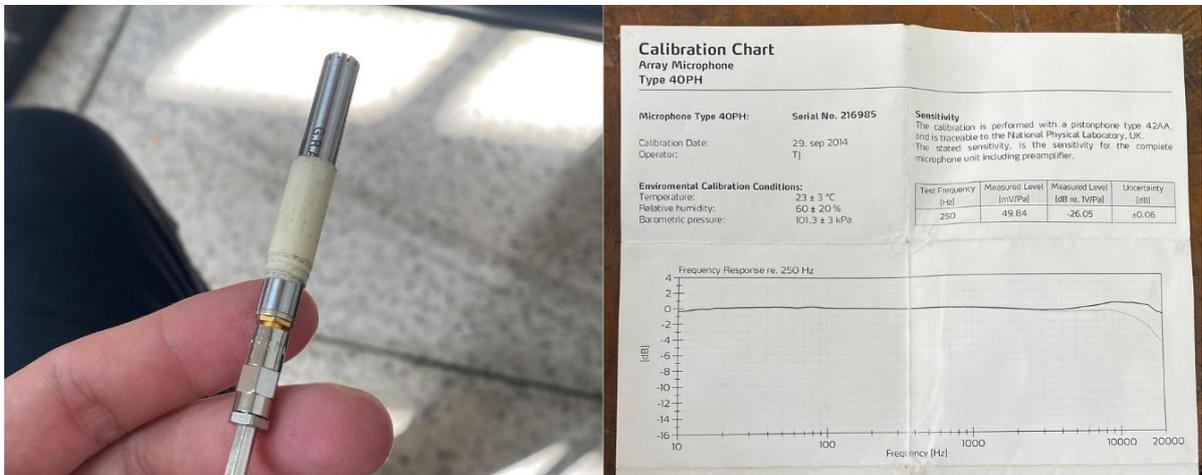


Figura 55: Microphone Type 40PH Serial No. 216985
 Fonte: Pesquisa Direta, 2024



Figura 56: Módulo de entrada de tensão National Instruments NI-9239
 Fonte: Pesquisa Direta, 2024

As frequências naturais do modelo numérico foram coletadas pelo software Ansys utilizando a análise modal.

No ensaio de tração foi utilizado a máquina universal de tração, Figura 57, para adquirir os dados de tensão e o extensômetro para deformação, Figura 58. Os dados foram coletados pelo software Bluehill.



Figura 57: Máquina Universal de Ensaio
Fonte: Pesquisa Direta, 2024



Figura 58: Extensômetro
Fonte: Pesquisa Direta, 2024

3.5 Tabulação dos Dados

Todos os dados obtidos foram tratados no software Excel e posteriormente apresentados no Word.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo, foram detalhados os tipos de pesquisa e as metodologias aplicadas na elaboração do trabalho, incluindo os materiais e métodos para o desenvolvimento dos ensaios realizados, as variáveis estudadas e seus indicadores, assim como os instrumentos de coleta e tabulação de dados que viabilizaram a análise dos resultados. Também foram descritos os equipamentos, softwares e etapas de coleta e análise de dados. Os resultados obtidos a partir dessa metodologia serão apresentados e discutidos no capítulo seguinte.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo desta seção é apresentar e discutir as implicações dos resultados e suas limitações. Os métodos a serem comparados incluem o ensaio de tração e o ensaio dinâmico (excitação por impulso), com validação via MEF. Os principais parâmetros avaliados serão os módulos elásticos, o coeficiente de Poisson, a frequência natural e o amortecimento.

4.1 Amortecimento

Os resultados dos fatores amortecimentos (ζ) obtidos para o mesmo CP, utilizando diferentes métodos de aquisição de sinal, estão apresentados na Figura 59.

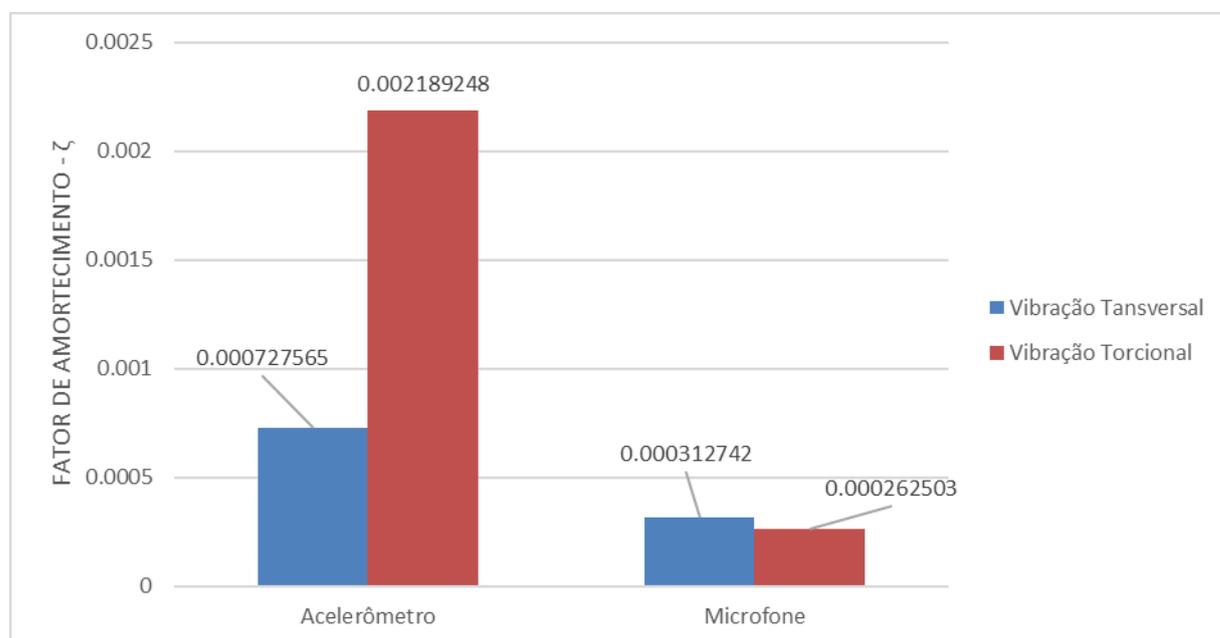


Figura 59: Fator de amortecimento

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Como visto nos trabalhos Martins *et al* (2015), Oliveira (2006) e Abrantes *et al* (2018), os fatores de amortecimento encontrados nesse trabalho estão condizentes aos dos aços em geral. Devido ao acréscimo da massa do acelerômetro em contato com o CP houve um aumento do fator de amortecimento já esperado. Isso explica a diferença entre os dois métodos, já que pelo método acústico (microfone) não há nada em contato com o CP.

Neste presente trabalho, é possível observar que o ζ é sensível à técnica de ensaio. Nos trabalhos de Martins *et al* (2015) e Oliveira (2006), é mostrado que além da sensibilidade da técnica de ensaio, o ζ também é bastante sensível às condições microestruturais, dimensões e geometrias do CP.

4.2 Frequências Naturais

Este tópico é destinado à comparação das frequências naturais entre os dois modelos do MEF e os dois ensaios dinâmicos apresentados com e sem acelerômetro. Para o método experimental, o ensaio foi realizado 5 vezes para cada condição para validar a frequência natural, como é pedido na norma.

4.2.1 Método de Elementos Finitos (MEF)

Na Tabela 4.1, é apresentada a análise de convergência obtida pelo MEF no software Ansys. Estes dados são referentes à simulação do CP com acelerômetro. A Figura 60 ilustra esta convergência.

Tabela 4.1: Análise de convergência, simulação com acelerômetro

TAMANHO DO ELEMENTO (mm)	Nº DE NÓS	Nº DE ELEMENTOS	1º f_t (Hz)	1º f_t (Hz)
10	3356	1173	656.84	805.17
6	5468	1404	656.39	804.89
4	9893	2156	656.14	804.76
2	52882	11774	655.54	803.58
1.5	122820	28542	655.45	803.51

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

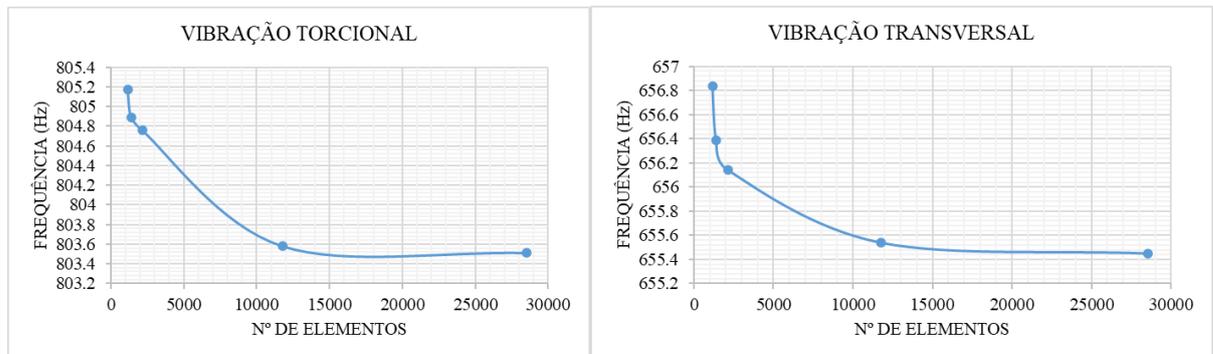


Figura 60: Análise de convergência, simulação com acelerômetro

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Os resultados obtidos para simulações do CP com acelerômetro foram:

- 1º Frequência de translação: 655,45 Hz
- 1º Frequência de torção: 803.51 Hz

Já na Tabela 4.2 é apresentada a análise de convergência referente ao CP sem acelerômetro. A Figura 61 ilustra a convergência.

Tabela 4.2: Análise de convergência, simulação sem acelerômetro

TAMANHO DO ELEMENTO (mm)	Nº DE NÓS	Nº DE ELEMENTOS	1º f_t (Hz)	1º f_i (Hz)
10	1340	171	659.71	821.97
6	3488	465	659.71	821.97
4	7754	1058	659.71	821.97
2	46138	8190	659.63	820.97
1.5	110898	21780	659.63	820.92

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

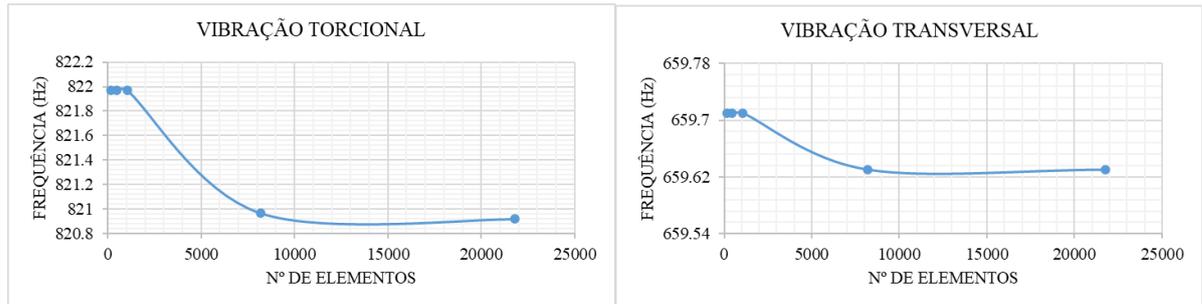


Figura 61: Análise de convergência, simulação sem acelerômetro

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Os resultados obtidos para simulações do CP sem acelerômetro foram:

- 1º Frequência de translação: 659,63 Hz
- 1º Frequência de torção: 820,92 Hz

Com estes resultados obtidos pelo MEF, é constatado que a adição do acelerômetro ao CP causa uma diferença nas frequências apresentadas pelos dois métodos, visto que há uma adição de massa ao CP. Como é demonstrado na Equação 29, a frequência natural é inversamente proporcional à raiz da densidade.

O erro entre as frequências naturais de translação (f_t) e torção (f_i) são, respectivamente, 0,63% e 2,12%. Essa pequena variação entre as frequências naturais ocorre devido ao fato de a massa do acelerômetro ser muito pequena em relação ao CP, cerca de 1,57% do CP.

4.2.2 Método Experimental

Nas Figura 62 e Figura 63 estão apresentados os valores de frequência natural de vibração transversal (f_t) e torcional (f_i), respectivamente. Ambos utilizaram um acelerômetro para aquisição de sinal.

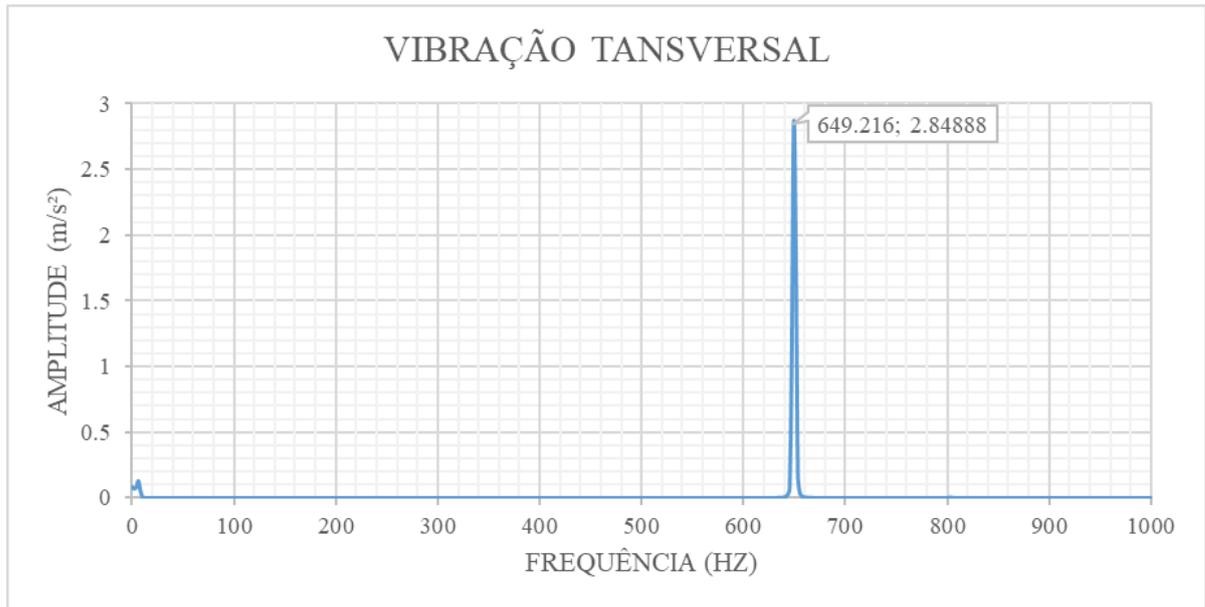


Figura 62: Resposta em Frequência com acelerômetro, Vibração Transversal

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

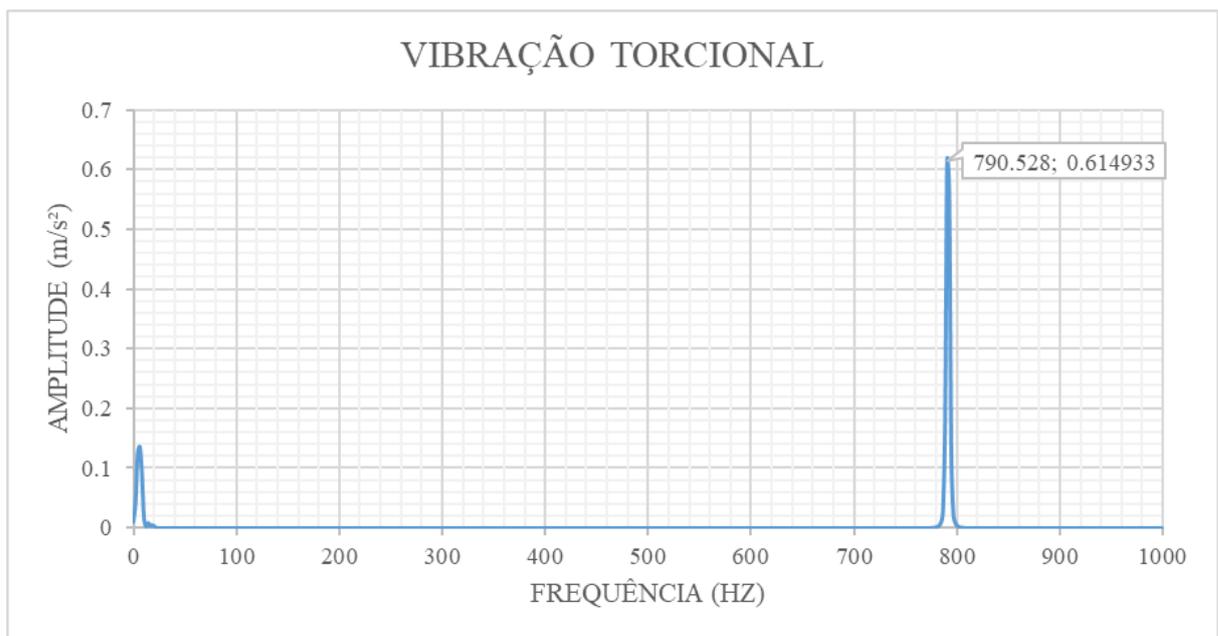


Figura 63: Resposta em Frequência com acelerômetro, Vibração Torcional

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Os resultados obtidos nos ensaios do CP com acelerômetro foram:

- 1º Frequência de translação: 649,216 Hz
- 1º Frequência de torção: 790,528 Hz

Nas Figura 64 e Figura 65, estão apresentados os valores de frequência natural de vibração transversal e torcional. Respectivamente. Ambas aquisições de sinais foram feitas com microfone (sem acelerômetro no CP).

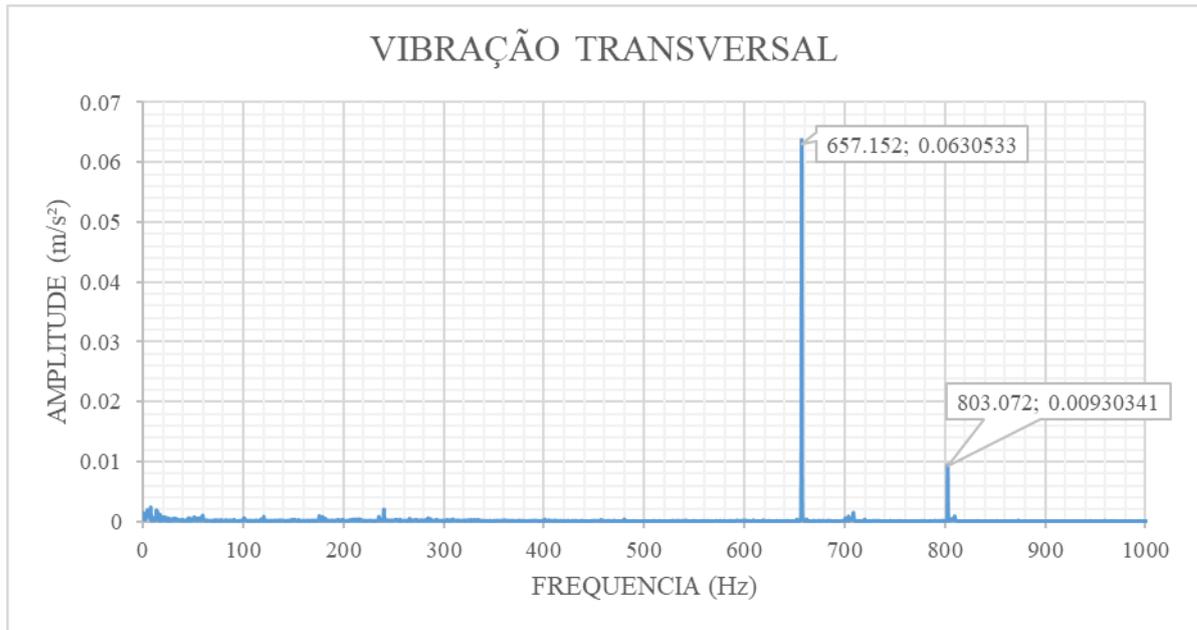


Figura 64: Resposta em Frequência sem acelerômetro, Vibração Transversal
 Fonte: Pesquisa Direta, 2024

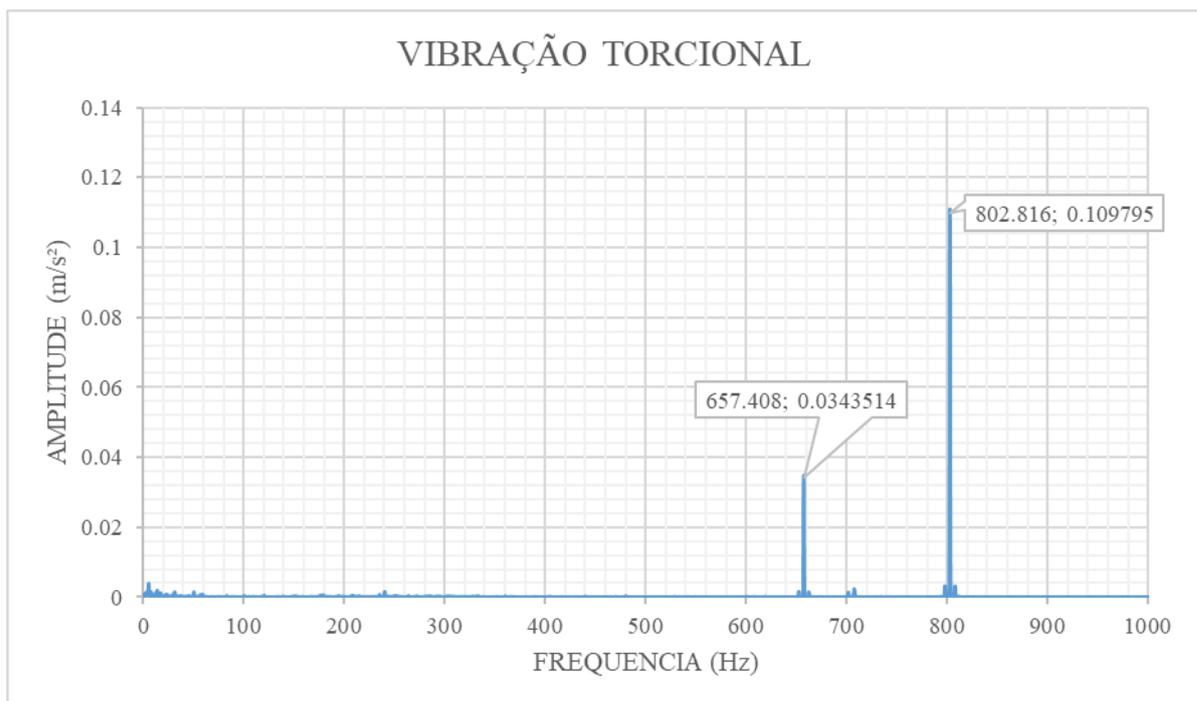


Figura 65: Resposta em Frequência sem acelerômetro, Vibração Torcional
 Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Os resultados obtidos nos ensaios do CP com Microfone foram:

- 1º Frequência de translação: 657,152 Hz
- 1º Frequência de torção: 802.816 Hz

Posteriormente à análise dos dados experimentais, constata-se o mesmo padrão obtido na simulação. A adição do acelerômetro ao CP acarretou uma pequena variação das

frequências naturais, 1,22% de erro entre as f_f e 1,55% entre as f_t . Assim, pode-se afirmar que isso demonstra a coerência entre o modelo computacional e experimental.

Também é possível notar que, no ensaio com microfone, as duas frequências são capturadas independentemente da condição de contorno do ensaio (posição de apoio e do microfone), contudo ocorre uma pequena variação entre elas. Já no ensaio com acelerômetro, as frequências de translação e torção aparecem separadamente, cada uma em sua condição de contorno.

4.3 Modelo Numérico x Experimental (ensaio de vibração)

Este tópico é destinado à comparação entre dois ensaios dinâmicos apresentados (microfone e acelerômetro) em relação ao MEF, utilizando duas maneiras distintas para calcular o módulo de elasticidade: pela norma ASTM 1876-01 e por Euler-Bernoulli.

4.3.1 Acelerômetro

A Tabela 4.3 está comparando os resultados obtidos por meio do método experimental, feito em laboratório, e o método numérico (MEF), feito no Ansys.

Tabela 4.3 - Comparação dos módulos elásticos e frequências naturais, utilizando a norma 1876-01

CORPO DE PROVA	1º f_f (Hz)	1º f_t (Hz)	E (GPa)	G (GPa)	ν	K (GPa)
CP ASTM 1876 Experimental	649.216	790.528	210.41	83.34	0.262	147.57
CP ASTM 1876 Simulação	655.45	803.51	214.47	86.10	0.245	140.44
Média	652.33	797.02	212.44	84.72	0.25	144.00
Desvio Padrão médio	3.12	6.49	2.03	1.38	0.01	3.56
%Erro	0.96	1.64	1.93	3.31	-6.43	-4.83

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Os cálculos realizados para obtenção dos módulos elásticos e Poisson da Tabela 4.3, foram feitos de acordo com as Equações 31,36 e 40, retiradas da norma ASTM 1876.

Já na Tabela 4.4 é comparado o módulo de elasticidade (E) utilizando Euler-Bernoulli, Equação 30. As frequências naturais são as mesmas da Tabela 4.3.

Tabela 4.4 - Comparação do módulo de elasticidade e frequências naturais, utilizando Euler-Bernoulli

CORPO DE PROVA	E(GPa)
CP EULER-BERNOULLI Experimental	206.46
CP EULER-BERNOULLI Simulação	210.44
Média	208.45
Desvio Padrão médio	1.99
%Erro	1.93

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

As equações de vibração torcional de eixo demonstradas no estudo de Rao (2008), ilustradas na Figura 14, não fornecem ferramentas de cálculos do módulo de cisalhamento (G) para peças de seção retangular, apenas circular. Desta forma, não é possível efetuar o cálculo do G e o coeficiente de Poisson para o CP estudado neste trabalho.

Ao verificar a Tabela 4.3, é perceptível um comportamento similar entre as variáveis em comparação do método dinâmico e o MEF. A variável com maior erro entre as comparadas é o coeficiente de Poisson, devido à dependência de E e G, como demonstrado na Equação 40. Por conseguinte, ela carrega o erro das variáveis anteriormente calculadas.

Comparando as Tabela 4.3 e Tabela 4.4, é possível afirmar uma pequena vantagem ao calcular E pela Norma ASTM 1876 em relação ao método de Euler-Bernoulli, visto que o erro, quando comparado ao MEF, é menor.

Os resultados obtidos por ambos os métodos estão de acordo com a literatura, como apresentado na Figura 1 e em outros trabalhos.

4.3.2 Microfone

A Tabela 4.5 compara os resultados obtidos por meio do método experimental feito em laboratório e o método numérico (MEF) feito pelo Ansys.

Tabela 4.5 - Comparação dos módulos elásticos e frequências naturais, utilizando a norma 1876-01

CORPO DE PROVA (micro)	1º f_f (Hz)	1º f_t (Hz)	E (GPa)	G (GPa)	ν	K (GPa)
CP ASTM 1876 Experimental	657.152	802.816	212.24	84.62	0.254	143.87
CP ASTM 1876 Simulação	659.63	820.92	213.85	88.48	0.208	122.26
Média	658.39	811.87	213.04	86.55	0.23	133.06
Desvio Padrão médio	1.24	9.05	0.80	1.93	0.02	10.80
%Erro	0.38	2.26	0.76	4.56	-17.96	-15.02

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Os cálculos utilizados para obter os módulos elásticos e Poisson da Tabela 4.5 foram realizados com as mesmas equações da situação anterior.

Utilizando equação de Euler-Bernoulli, a Tabela 4.6 compara os módulos de elasticidade entre os métodos já apresentados.

Tabela 4.6 - Comparação do módulo de elasticidade e frequências naturais, utilizando Euler-Bernoulli

<u>CORPO DE PROVA</u>	<u>E(GPa)</u>
CP EULER-BERNOULLI Experimental	211.54
CP EULER-BERNOULLI Simulação	213.14
Média	212.34
Desvio Padrão médio	0.80
%Erro	0.76

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Avaliando as Tabela 4.5 e Tabela 4.6 pode-se observar que os resultados para o E estão similares e de acordo com a literatura. No entanto, a Tabela 4.5 nos mostra uma considerável grande entre os G e ν .

O modo de vibração da primeira frequência natural de torção não segue a orientação dos grãos, diferentemente do modo de translação. Isso pode ser observado nas Figura 43 e Figura 44, se comparadas com a Figura 83. Possivelmente, esta variação ocorre devido ao material real ser anisotrópico. Conforme o Apêndice A, a orientação dos grãos provenientes da laminação modifica as propriedades mecânicas do material e no software Ansys o material é considerado isotrópico. Ou seja, no MEF o material possui propriedades físicas que são independentes da direção.

A menor variação das propriedades mecânicas, quando utilizado o acelerômetro, eventualmente, ocorre em razão da interferência da massa adicional que acaba mascarando a diferença maior dos resultados ocasionados pela anisotropia do material.

4.4 Ensaio de Tração

Foram utilizados quatro corpos de provas para validar o resultado, e em todos, conforme as medidas apresentadas na Tabela 3.3, realizados com uma velocidade de 1,5 mm/min. Os gráficos Tensão-Deformação representados pelas Figura 66, Figura 67, Figura 68 e Figura 69, apresentam os resultados obtidos pelos ensaios de tração.

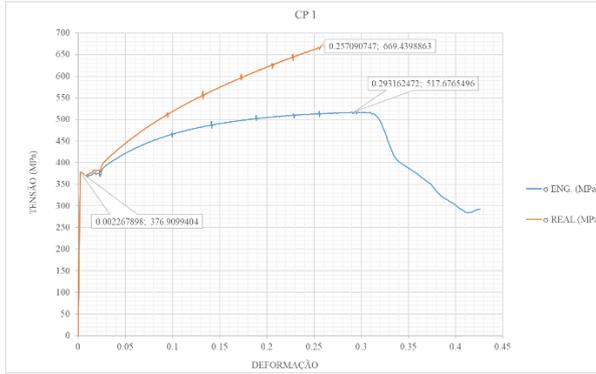


Figura 66: Curva tensão x deformação - real e de engenharia - CP 1

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

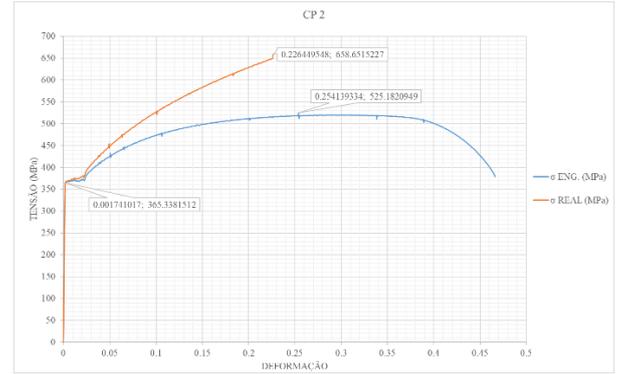


Figura 67: Curva tensão x deformação - real e de engenharia - CP 2

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

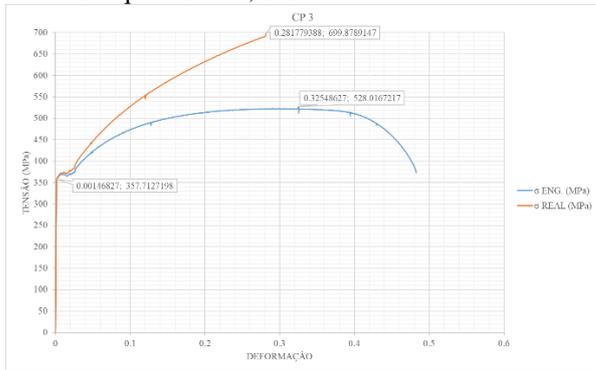


Figura 68: Curva tensão x deformação - real e de engenharia - CP 3

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

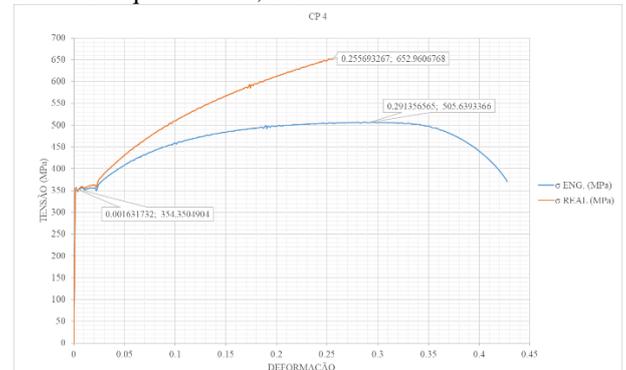


Figura 69: Curva tensão x deformação real - e de engenharia - CP 4

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Por meio das curvas adquiridas pelo ensaio de tração, são retiradas propriedades de cada CP como mostrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Propriedades dos Corpos de Prova

CORPO DE PROVA	ϵ_{el}	ϵ_{pl}	%AL	%RA
CP-1 TRAÇÃO	0.00227			
CP-2 TRAÇÃO	0.00174	0.4650832	34	58
CP-3 TRAÇÃO	0.00147	0.4820192	33	57
CP-4 TRAÇÃO	0.00163	0.4260868	26	64
Média	0.00161	0.45773	31.00	59.67
Desvio médio	0.00010	0.02110	3.33	2.89

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

- ϵ_{el} : Deformação elástica
- ϵ_{pl} : Deformação plástica
- %AL: Alongamento percentual
- %RA: Redução percentual na área

Como relatado no Apêndice B, o CP – 1 não foi considerado. A Tabela 4.8 apresenta os dados retirados das curvas Tensão – Deformação.

Tabela 4.8 - Resultados ensaio de tração

CORPO DE PROVA	E(GPa)	G (GPa)	ν	K (GPa)	σ_{LE} (MPa)	σ_{lr} (MPa)
CP-1 TRAÇÃO	165.63				376.06	517.68
CP-2 TRAÇÃO	209.29				364.70	525.18
CP-3 TRAÇÃO	243.63				357.71	528.02
CP-4 TRAÇÃO	217.16				354.35	506.63
Média	223.36				358.92	519.94
Desvio Padrão Médio	13.51				3.85	8.88

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Nos ensaios do CP – 2 e CP – 4, os valores de E (GPa) estão dentro do esperado, quando se comparam com a literatura. Já no CP – 3, o módulo de elasticidade ficou acima do que é considerado normal para um aço SAE 1020, fazendo com que a média dos resultados fique um pouco acima do que é indicado pela literatura. O CP – 1 não foi considerado.

Não foi possível obter os resultados dos Módulos de Cisalhamento (G), Bulk (V) e coeficiente de Poisson (ν), visto que havia apenas um extensômetro axial, o que limita o experimento apenas à medição apenas do Módulo de Elasticidade (E).

Quanto aos valores dos Limites de Resistência ao Escoamento (σ_{LE}) e a Tração (σ_{lr}), os resultados encontrados são superiores aos valores referencias do Callister e Rethwisch (2016) e Braz e Pontin (2019), ilustrados nas Figura 70 e Figura 71.

Liga Metálica	Resistência ao Escoamento, MPa (ksi)	Limite de Resistência à Tração, MPa (ksi)
Alumínio	35 (5)	90 (13)
Cobre	69 (10)	200 (29)
Latão (70 Cu-30 Zn)	75 (11)	300 (44)
Ferro	130 (19)	262 (38)
Níquel	138 (20)	480 (70)
Aço (1020)	180 (26)	380 (55)
Titânio	450 (65)	520 (75)
Molibdênio	565 (82)	655 (95)

Figura 70: Propriedades Mecânicas Típicas de Vários Metais e Ligas em um Estado Recozido
Fonte: Callister e Rethwisch modificado, 2016

Amostra	Força Máxima (kN)	Tensão de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)
1	13.86	339.34	276.08
2	13.88	339.85	271.30
3	13.85	339.08	272.99
4	13.86	339.24	274.15
5	13.84	338.89	259.41
6	13.86	339.31	272.96
7	13.86	339.23	271.95
8	13.85	339.05	276.29
9	13.86	339.25	274.85
10	13.85	339.05	272.77

Figura 71: Dados chapas laminadas a quente
Fonte: Braz e Pontin modificado, 2021

Torna-se possível, portanto, deduzir que o aço SAE 1020 utilizado no presente trabalho passou por um processo de fabricação de laminação a frio. Esse processo aumenta a resistência mecânica do aço devido ao encruamento ocorrido no processo. Assim, isso explicaria a elevada resistência em comparação aos outros.

4.5 Ensaio de Tração x Ensaio de Excitação por Impulso

Este tópico visa comparar os ensaios experimentais de tração e excitação por impulso com e sem acelerômetro.

4.5.1 Ensaio de Tração x Ensaio Dinâmico com Acelerômetro

A Tabela 4.9 mostra a comparação entre os resultados obtidos pelo ensaio de tração e o ensaio dinâmico com acelerômetro, utilizando a norma ASTM 1876.

Tabela 4.9 - Comparação de Resultados, Tração e Ensaio Dinâmico (ASTM 1876)

CORPO DE PROVA	E(GPa)	G (GPa)	ν	K (GPa)	σ_{LE} (MPa)	σ_{lr} (MPa)
CP TRAÇÃO (MÉDIA)	223.36				363.21	519.38
CP ASTM 1876 Experimental	210.41	83.34	288.67	147.57		
%ERRO	5.8%					

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Como dito no capítulo 4.4, não foi possível a obtenção de G, ν e K no ensaio de tração, apenas o E. Já para o ensaio dinâmico, a Norma 1876 não oferece ferramentas para o cálculo do limite de escoamento e para o limite de resistência à tração. Logo, só é possível a comparação de E entre os dois ensaios.

A Tabela 4.10 também mostra os resultados obtidos pelo ensaio de tração e compara com o ensaio dinâmico, porém utilizando a teoria de Euler-Bernoulli para obtenção dos resultados.

Tabela 4.10 - Comparação de Resultados, Tração e Ensaio Dinâmico (EULER-BERNOULLI)

CORPO DE PROVA	E(GPa)	G (GPa)	ν	K (GPa)	σ_{LE} (MPa)	σ_{lr} (MPa)
CP TRAÇÃO (MÉDIA)	223.36				363.21	519.38
EULER-BERNOULLI Experimental	206.46					
%ERRO	7.57%					

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Os dois resultados, utilizando a Norma e Euler-Bernoulli para a determinação do módulo de elasticidade, são muito próximos quando comparados ao ensaio de tração convencional. Com estes resultados, é possível comprovar a qualidade do método dinâmico para determinar o módulo de elasticidade.

4.5.2 Ensaio de Tração x Ensaio Dinâmico com Microfone

A Tabela 4.11, representa a comparação entre os resultados obtidos pelo ensaio de tração e o ensaio dinâmico com microfone, utilizando a norma ASTM 1876.

Tabela 4.11 - Comparação de Resultados, Tração e Ensaio Dinâmico (ASTM 1876)

CORPO DE PROVA	E(GPa)	G (GPa)	ν	K (GPa)	σ_{LE} (MPa)	σ_{lr} (MPa)
CP TRAÇÃO (MÉDIA)	223.36				363.21	519.38
CP ASTM 1876 Experimental	212.24	84.62	0.254	143.87		
ERRO%	4.98%					

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Já a Tabela 4.12, compara o ensaio de tração com o ensaio dinâmico utilizando as equações de Euler-Bernoulli.

Tabela 4.12 - Comparação de Resultados, Tração e Ensaio Dinâmico (EULER-BERNOULLI)

CORPO DE PROVA	E(GP)	G(GPa)	ν	K (GPa)	σ_{LE} (MPa)	σ_{lr} (MPa)
CP TRAÇÃO (MÉDIA)	223.36				363.21	519.38
EULER-BERNOULLI Experimental	211.54					
ERRO%	5.29%					

Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Assim como no ensaio em que se utilizou o acelerômetro, o erro do ensaio dinâmico utilizando o microfone, quando comparamos os módulos de elasticidade com o ensaio de tração, é baixo para os dois métodos de cálculo. Portanto, essa maneira para determinar o E também é muito eficiente.

Por fim, a Figura 72 compara a média de todos os ensaios de tração com a média de todos os diferentes métodos dinâmicos para o cálculo do módulo de elasticidade, com e sem acelerômetro, e suas respectivas dispersões.

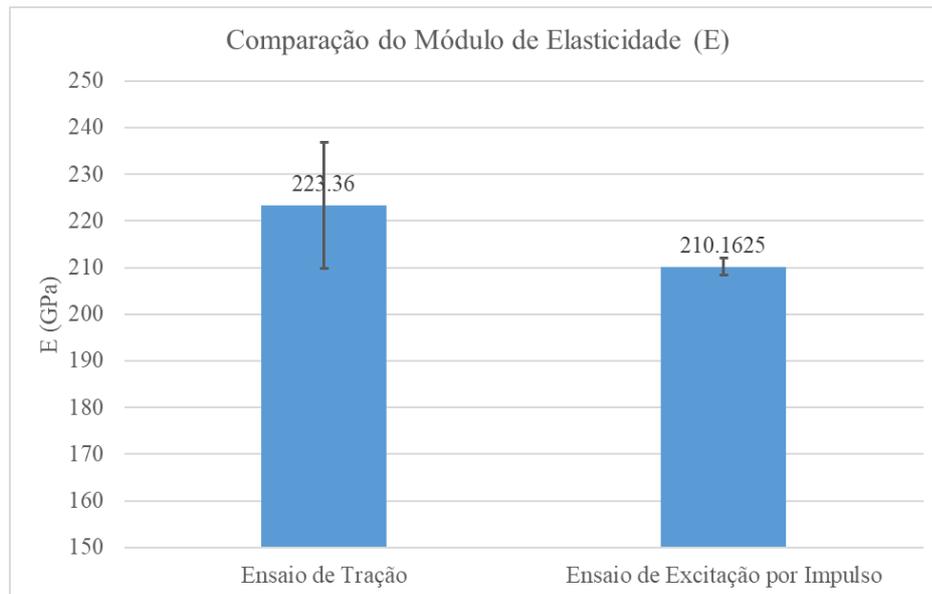


Figura 72: Média dos resultados para o módulo de elasticidade por diferentes ensaios
Fonte: Pesquisa Direta, 2024

Os resultados da Figura 72 mostram que ambos os métodos fornecem valores de módulo de elasticidade próximos, com uma diferença em que o ensaio de excitação por impulso tem um valor médio menor (210,16 GPa) em comparação ao ensaio de tração (223.36 GPa). A menor variabilidade é a do ensaio dinâmico, com 1,85, enquanto no ensaio de tração é de 13,51. Isso sugere que este método pode ser mais preciso e reproduzível, uma vez que apresenta um desvio padrão menor. Porém, como a quantidade de corpos de prova para os

ensaios de tração foi pequena, não é possível afirmar que o ensaio dinâmico possa ter alguma superioridade.

A Figura 72 indica que ambos os métodos são eficazes para determinar o módulo de elasticidade, porém o ensaio de excitação por impulso pode oferecer maior precisão devido à menor variabilidade nos resultados. As pequenas diferenças entre os valores médios também sugerem que qualquer um dos métodos pode ser utilizado com confiabilidade, dependendo dos recursos e das condições disponíveis no laboratório.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Por fim, neste capítulo final, é apresentada a conclusão e são feitas recomendações.

5.1 Conclusão

Os ensaios realizados demonstraram que o método de excitação por impulso é eficaz para determinar os módulos elásticos e o coeficiente de Poisson, oferecendo resultados consistentes com os obtidos por meio do ensaio de tração. Além disso, o método dinâmico permite uma avaliação mais rápida e não destrutiva dos materiais, sendo também capaz de identificar o fator de amortecimento do material estudado.

A análise comparativa dos resultados dos ensaios de tração e de excitação por impulso indicou que as variações nos módulos elásticos obtidos pelos dois métodos são mínimas, apesar da quantidade pequena de CPs para o ensaio de tração, reforçando a confiabilidade do método dinâmico. Contudo, o ensaio de tração ainda é essencial para avaliar as propriedades mecânicas básicas, as quais o método de excitação por impulso não abrange de forma direta.

A utilização do Método de Elementos Finitos (MEF) complementou a análise experimental, validando os resultados obtidos e demonstrando a importância de combinar métodos experimentais e teóricos para uma caracterização completa do material.

O método de excitação por impulso, apesar de suas limitações, oferece vantagens significativas em termos de rapidez e não destrutividade. Em aplicações industriais, em que a caracterização rápida e eficiente dos materiais é crucial, esse método pode ser particularmente útil. No entanto, para uma avaliação completa das propriedades mecânicas, o ensaio de tração ainda é indispensável.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Os resultados obtidos por esse trabalho abrem possibilidades para novos estudos como:

- Avaliar a variação do módulo de elasticidade em função da temperatura;
- Relacionar a frequência natural do corpo de prova com o limite de escoamento e resistência à tração, com a finalidade de caracterizar essas propriedades apenas com ensaio de excitação por impulso.
- Aumentar o número de CPs para o ensaio de tração.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABRANTES, A. O.; SILVA, C. E. R. da; AMORIM JÚNIOR, W. F. de; BATISTA, A. A. **Desenvolvimento de bancada experimental para caracterização dinâmico-mecânica de materiais por amortecimento de vibração.** Apresentado no X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 20 a 24 de maio de 2018, Salvador - Bahia.

ASTM INTERNATIONAL. **Annual Book of ASTM Standards.** ASTM, 2020.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E1876-01: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2001.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E8 / E8M-11: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.

BATHE, K.-J. **Finite Element Procedures.** Prentice Hall, 1996.

BEER, F. P.; JOHNSTON Jr., E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais.** 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

BORGES, A. S. **Análise Modal Baseada Apenas Na Resposta: Decomposição No Domínio Da Frequência.** 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Paulista, Ilha Solteira, 2006.

BRAZ, Gabrielle Schutz; PONTIN, Gabriel Inácio. **Análise de propriedades de chapas de aço SAE 1020 laminadas a quente e a frio.** Ciência e Cultura, Barretos, SP, v. 17, e211704, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/1980-0029.032019>.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures.** 3. ed. Berkeley: Computers and Structures, Inc., 2003.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. **Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização.** Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP. 2010.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica.** 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1986.

EWINS, D. J. **Modal Testing: Theory, Practice, and Application.** 2nd ed. Research Studies Press, 2000.

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

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social.** 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais.** 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

HONEYCOMBE, R. W. K. **The Plastic Deformation of Metals.** 2nd ed. London: Edward Arnold, 1984.

- INMAN, D. J. **Engineering Vibration**. 4. ed. Pearson, 2014.
- ISO. **ISO Standards Catalogue**. ISO, 2020.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia do trabalho científico**. 8ª ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- MARTINS, L. P. R.; GUESSER, W. L.; VALENTINA, L. V. O. D.; MÜLLER, A. L. **Estudo das propriedades físicas dos ferros fundidos vermiculares através de ensaios não destrutivos – frequência de ressonância e ultrassom**. Congresso Anual da ABM, 2015.
- MEIROVITCH, L. **Fundamentals of Vibrations**. McGraw-Hill, 2001.
- MEZZOMO, M. H.; MORAES, A. G. de. **Determinação do módulo de elasticidade em aços e alumínio através da frequência natural comparado ao ensaio de tração**. *Matéria*, v. 25, n. 2, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1035>.
- OLIVEIRA, M. F.; **Metodologia Científica: um manual para a realização de pesquisas em Administração**. Catalão: UFG, 2011.
- RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- RODRIGUES, M. A. C.; BURGOS, R. B.; MARTHA, L. F. **A unified approach to the Timoshenko 3D beam-column element tangent stiffness matrix considering higher-order terms in the strain tensor and large rotations**. *International Journal of Solids and Structures*, v. 222-223, p. 111003, 2021. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.02.014.
- SILVA, Clarence W. de (Ed.). **Vibration Damping, Control, and Design**. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- SMITH, J. **"Integrating Machine Learning in Modal Analysis"**. *Journal of Computational Engineering*, 2018.
- TIMOSHENKO, S. P. **History of Strength of Materials**. New York: Dover Publications, 1983.
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. **Theory of Elastic Stability**. New York: McGraw-Hill, 1961.
- TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1970.
- TIMOSHENKO, S. P.; YOUNG, D. H. **Elements of Strength of Materials**. 5th ed. Princeton: Van Nostrand, 1968.
- VERGARA, S. C. **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 2005.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method: The Basis. 5th ed.**
Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Análise Metalográfica

A análise metalográfica está representada no fluxograma conforme a Figura 73:

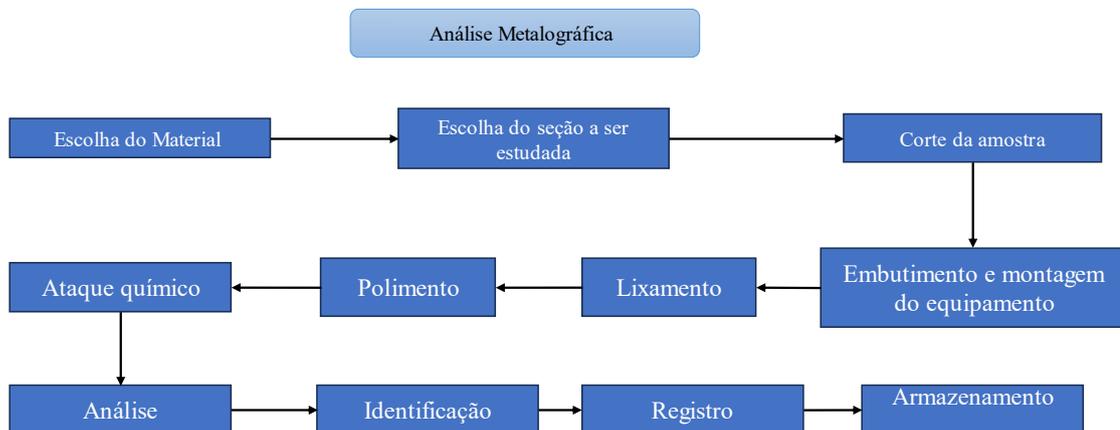


Figura 73: Fluxograma da Análise Metalográfica
Fonte: Pesquisa direta, 2024

Após a escolha do material e da seção, foi utilizado um disco de corte para retirada da amostra a ser estudada e, posteriormente, é feito o embutimento da amostra como mostrado na Figura 74. O material utilizado para criar a resina do embutimento está descrito na Figura 75.



Figura 74: Embutimento da amostra
Fonte: Pesquisa direta, 2024



Figura 75: Líquido acrílico e catalizador
Fonte: Pesquisa direta, 2024

Após a secagem da resina a amostra é levada para o lixamento na lixadeira ilustrada na Figura 76. São utilizadas as seguintes lixas: 320, 400, 600 e 1000. A cada troca de lixa, é realizada uma limpeza na amostra com água e álcool. Além disso, a amostra é rotacionada em 90° até que as linhas do lixamento anterior sumam. Na etapa de polimento, é utilizado alumina

1 μm , 0,3 μm e 0,05 μm , a Figura 77 apresenta a amostra após o polimento. A Figura 78 apresenta a amostra posteriormente ao ataque químico, que é utilizado Nital 3%.



Figura 76: Lixadeira arotec Arapol 2V
Fonte: Pesquisa direta, 2024



Figura 77: Amostra após o polimento
Fonte: Pesquisa direta, 2024



Figura 78: Amostra após ataque químico
Fonte: Pesquisa direta, 2024

Na Figura 79, a amostra é fixada em uma lâmina com uma prensa manual e levada ao microscópio óptico, apresentado na Figura 80, para análise da microestrutura.



Figura 79: Prensa manual
Fonte: Pesquisa direta, 2024



Figura 80: Microscópio Óptico
Fonte: Pesquisa direta, 2024

Os materiais utilizados para análise metalográfica foram:

- Amostra aço SAE 1020
- Lixa 320, 400, 600 e 1000
- Álcool
- Líquido acrílico e catalizador
- Pano de polimento
- Lixadeira arotec Arapol 2V
- Alumina 1 μm , 0,3 μm e 0,05 μm
- Nital 3%
- Prensa manual
- Microscópio Óptico

As Figura 81 e Figura 82, apresentam a superfície de um aço SAE 1020 antes do ataque químico, observadas por meio de um microscópio óptico.

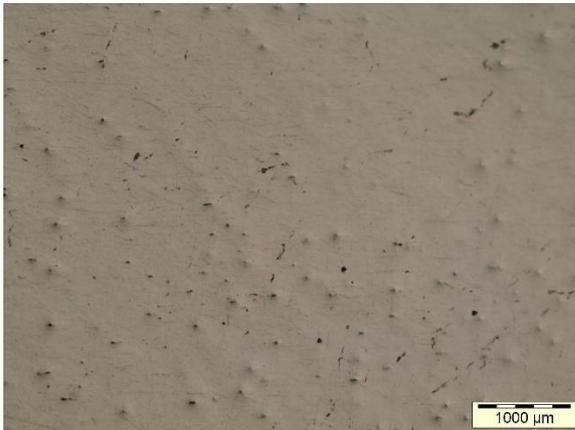


Figura 81: Amostra na escala 1000 μm , antes do ataque químico
Fonte: Pesquisa Direta, 2024

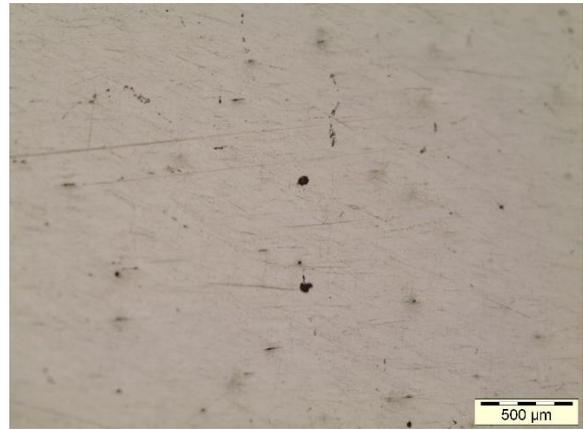


Figura 82: Amostra na escala 500 μm , antes do ataque químico
Fonte: Pesquisa Direta, 2024

As imagens apresentadas pelas Figura 81 e Figura 82 mostram várias pequenas inclusões ou impurezas, indicadas pelos pontos escuros. Estas inclusões podem ser compostas por óxidos, sulfetos ou outros contaminantes que se encontram no aço devido aos processos de fabricação e refinamento. Além, é possível observar riscos provenientes do processo de polimento.

As Figura 83 e Figura 84 mostram a superfície de um aço SAE 1020 após o ataque químico, observadas por meio de um microscópio óptico.

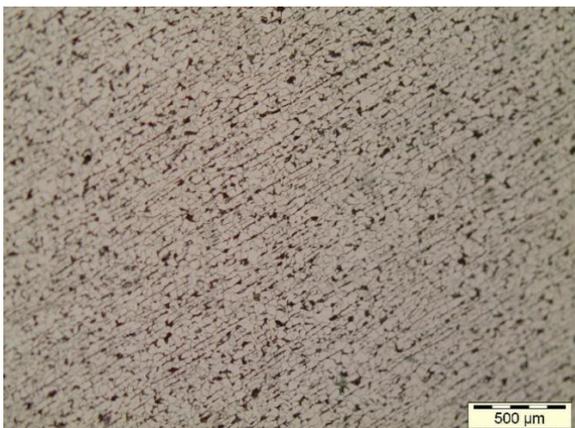


Figura 83: Microestrutura Aço 1020, na escala de 500 μm
Fonte: Pesquisa Direta, 2024

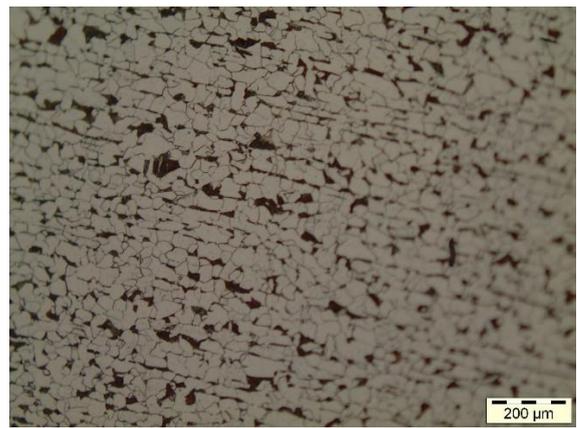


Figura 84: Microestrutura Aço 1020, na escala de 200 μm
Fonte: Pesquisa Direta, 2024

As imagens mostram a microestrutura típica de um aço SAE 1020, composto principalmente por ferrita (áreas claras) e perlita (áreas escuras). A ferrita é a fase mais macia e dúctil, enquanto a perlita é uma mistura de ferrita e cementita (Fe_3C) que proporciona maior

resistência ao material. A quantidade e a distribuição dessas fases influenciam diretamente as propriedades mecânicas do aço.

O fibramento mecânico observado nas duas imagens indica que o material passou por um processo de laminação, que orientou os grãos na direção da deformação causando anisotropia. Essa característica é comum em aços laminados, influenciando as propriedades mecânicas, como a resistência e a ductilidade.

APÊNDICE B – Análise de Fratura

Utilizando a análise macroscópica (inspeção visual ou ampliação até 10x) da fratura, é possível observar na Figura 85 uma fratura fibrosa, com estrias de deformação considerável e de aparência opaca. Também foram observados um elevado alongamento e uma área de redução da seção transversal do CP antes da fratura, Figura 86. Após o rompimento do CP, a fratura observada é equivalente a fratura taça e cone, Figura 87.

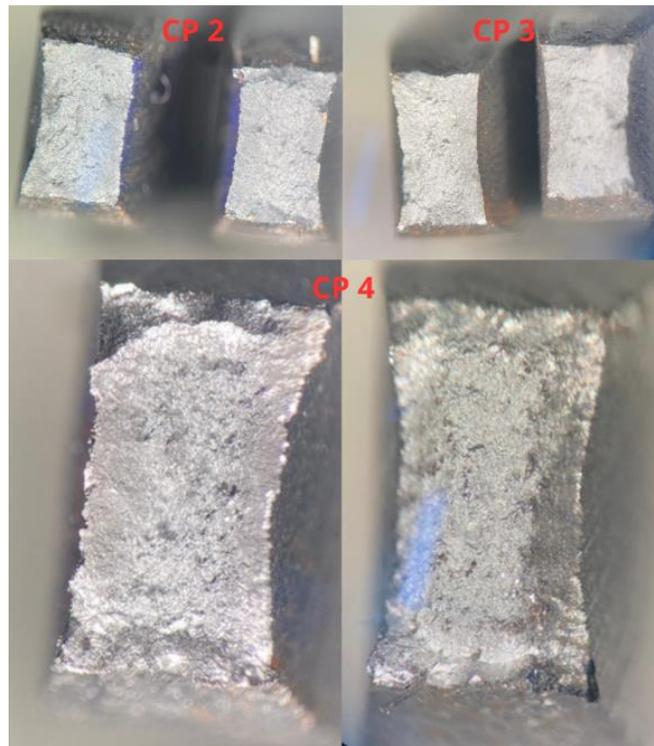


Figura 85: Fratura do CP 2,3 e 4
Fonte: Pesquisa Direta, 2024

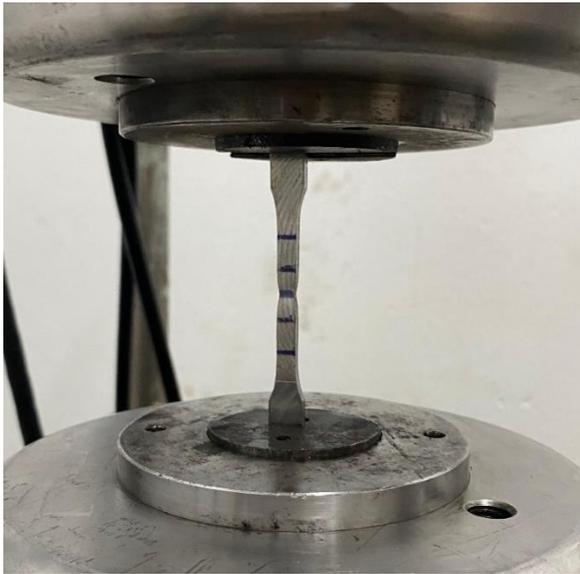


Figura 86: Estricção do CP
Fonte: Pesquisa Direta, 2024



Figura 87: CP's após ensaio
Fonte: Pesquisa Direta, 2024

O corpo de prova 1 não se rompeu, portanto não foi considerado para fins de comparação de resultados. Todas as características analisadas mostram que se trata de um comportamento dúctil. O que já era de se esperar de um material com baixo teor de carbono, como o SAE 1020.