

ANÁLISE TORCIONAL DE EIXO, COMPARATIVO ENTRE OS AÇOS SAE 1020 E SAE 4340 PELOS MÉTODOS ANALÍTICO, EXPERIMENTAL E ELEMENTOS FINITOS.¹

Carlos Henrique Tavares²

Resumo: Este estudo comparou o comportamento torcional dos aços SAE 1020 e SAE 4340 por três métodos: cálculo analítico (fórmula clássica $\phi = TL/JG$), ensaio experimental com extensômetros elétricos (*strain gauge* BF350) e simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos (*Ansys* 16.0). Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos (24 mm x 310 mm) com braço de alavanca soldado para aplicação de cargas de 21,08 kg, 26,22 kg e 31,48 kg. O arranjo experimental, de caráter didático e simplificado por adotar força concentrada em vez de binário puro, revelou convergência satisfatória entre os métodos analítico e numérico (desvios de 6% a 19%). Os dados experimentais apresentaram maior dispersão (até 59,9%), atribuída a perdas de sinal, resistências de contato e falhas na cura do adesivo do extensômetro. O aço SAE 4340 demonstrou superioridade significativa: deformações 6% a 10% menores e fator de segurança 4,2 vezes superior ao SAE 1020, viabilizando projetos com eixos mais esbeltos e leves, com vantagem adicional de custo-benefício (R\$ 0,0262/MPa contra R\$ 0,0487/MPa do SAE 1020). Conclui-se que o SAE 4340 é mais indicado para aplicações que exigem alta rigidez torcional, recomendando-se para estudos futuros o aprimoramento da instrumentação e a aplicação de binário puro para eliminar efeitos de flexão secundários.

Palavras-chave: Análise torcional; Extensometria; Método dos elementos finitos; Aço SAE 1020; Aço SAE 4340.

1 INTRODUÇÃO

A análise torcional em eixos e outros componentes estruturais exerce um papel fundamental no dimensionamento seguro de sistemas mecânicos. As solicitações de torção estão presentes em diversos equipamentos industriais, na indústria automotiva e em estruturas em geral. De acordo com Hibbeler (2010), o conhecimento do comportamento do material sujeito a esforços de cisalhamento e torção permite determinar as tensões máximas e está diretamente relacionado ao fator de segurança do projeto. Os métodos analíticos auxiliam significativamente na compreensão dos princípios fundamentais da resistência dos materiais (BEER; JOHNSTON, 2008). No entanto, na prática, tais métodos apresentam limitações ao lidar com materiais diferentes, condições complexas de carregamento e geometrias não uniformes.

No contexto da classificação de materiais metálicos, a nomenclatura "SAE" refere-se à *Society of Automotive Engineers* (Sociedade de Engenheiros Automotivos), uma organização internacional responsável pela padronização técnica de materiais amplamente utilizados nos setores automotivo e industrial. A comparação entre diferentes tipos de ligas de aço, como o SAE 1020 e o SAE 4340,

¹ Artigo apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. 2026. Orientador: Prof. Miguel Tobias Bahia, Doutor.

² Discente do curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina. carlos.ht1987@ifsc.edu.br.

ganha destaque neste contexto. O aço SAE 1020 é um material de baixo teor de carbono, com boa ductilidade e facilidade de conformação, sendo amplamente empregado em componentes estruturais de menor exigência mecânica. O SAE 4340, por sua vez, possui maior teor de carbono, manganês e silício em comparação ao SAE 1020, além de conter em sua composição elementos de liga como níquel, cromo e molibdênio. Essa composição confere ao SAE 4340 alta resistência mecânica e boa tenacidade, especialmente após tratamento térmico de normalização. A comparação entre esses dois materiais sob esforços torcionais permite compreender o comportamento da deformação, o deslocamento de pontos em sua superfície e a resistência à torção, auxiliando na escolha do material mais adequado para cada aplicação.

Na parte experimental, o uso da extensometria é uma escolha técnica e eficaz para avaliar deformações em estruturas submetidas à torção. Friedrich et al. (2019) demonstraram que a análise de flexo-torção por métodos analíticos, experimentais e numéricos apresenta boa correlação entre resultados, validando o uso de extensômetros elétricos como ferramenta de medição confiável. É possível comparar os resultados analíticos de uma estrutura com os dados experimentais aferidos por meio de extensômetros. Um exemplo prático é o estudo de Minela (2017), que utilizou extensômetros em corpos de prova sujeitos a tensões de torção e flexão e registrou um erro máximo de apenas 6%. A interface do extensômetro com o multímetro se deu por meio de uma placa de conexão do tipo protoboard. A utilização do multímetro permite a realização de ensaios de deformação e tensão em diferentes ligas metálicas com baixo custo e alta eficiência, visto que sua resolução de leitura permite identificar variações de 0,001 V (1 mV). Esse grau de sensibilidade é excelente para detectar a diferença de rigidez entre os aços.

Comparar os métodos analítico, experimental e de elementos finitos possibilita uma análise mais completa do comportamento dos materiais sob torção. O método analítico fornece uma base teórica para o cálculo de cisalhamento e ângulo de torção, fundamentado nas equações clássicas da resistência dos materiais. O método experimental apresenta na prática a configuração deformada das peças sujeitas aos esforços mecânicos, permitindo a validação ou o questionamento dos modelos teóricos. O método por elementos finitos, segundo Norton (2013), permite a simulação computacional precisa de modelos complexos, simulando condições reais de carregamento com alto grau de detalhamento.

Ressalta-se que o dispositivo experimental foi concebido com caráter didático, utilizando materiais e recursos disponíveis na instituição, sem atender integralmente aos requisitos normativos de ensaios de torção (ISO 18338). Em um ensaio de torção ideal, a aplicação do carregamento deveria ocorrer por meio de um binário puro, ou seja, um par de forças de mesma intensidade, direção oposta e linhas de ação paralelas, mas não coincidentes, de modo a gerar exclusivamente momento torçor e, consequentemente, um estado de cisalhamento puro na seção transversal do corpo de prova. Contudo, devido a limitações práticas, optou-se por uma configuração simplificada na qual o torque é gerado por uma única força concentrada em um braço de alavanca. Essa abordagem introduz efeitos secundários de flexão e cisalhamento transversais, que foram desconsiderados na comparação com os modelos analítico e numérico, assumindo-se que o carregamento se aproxima suficientemente de um torque puro. Tal simplificação, embora limite a precisão experimental, é considerada adequada aos objetivos educacionais e científicos do presente estudo, visto que o foco está na análise

comparativa entre os dois materiais, e não na determinação absoluta de propriedades mecânicas.

Deste modo, o presente estudo propõe comparar o comportamento dos aços SAE 1020 e SAE 4340 sujeitos à torção, combinando três métodos diferentes (analítico, experimental e elementos finitos), a fim de avaliar o desempenho mecânico e a confiabilidade de cada material sob esforços torcionais e validar, dentro das limitações experimentais, os resultados práticos com os teóricos. Adicionalmente, busca-se demonstrar a viabilidade da utilização de instrumentação de baixo custo e de simulações computacionais acessíveis para a caracterização mecânica de materiais em contextos educacionais e de pequenas empresas, contribuindo para a difusão do conhecimento em engenharia de materiais e análise estrutural.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AÇOS

Os aços SAE 1020 e o SAE 4340 podem ser obtido por diferentes métodos de fabricação, sendo os mais comuns o de trefilação e laminação. Para fabricação dos corpos de prova, ambas as barras foram obtidas pelo processo de laminação, sendo assim solicitou-se ao fornecedor do material o certificado de qualidade com sua composição química conforme Tabela 1 para o aço SAE 1020 e Tabela 2 para o aço SAE 4340.

Tabela 1 - Composição química AÇO SAE 1020 em % de peso

C	Mn	P	S	Si	Ni	V	Cu	Mo	Cr	Nb	Al
0,19	0,52	0,024	0,016	0,143	0,07	0,03	0,19	0,014	0,08	0,002	0,009

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 2 - Composição química AÇO SAE 4340 em % de peso

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cu	Mo	Cr	Al
0,39	0,73	0,009	0,004	0,24	1,75	0,13	0,22	0,79	0,023

Fonte: elaborada pelo autor.

Com relação às propriedades mecânicas, os aços SAE 1020 (Tabela 3) e SAE 4340 (Tabela 4) têm parâmetros específicos para cada tipo de processo de fabricação. Neste estudo ambos os aços foram fabricados pelo processo de laminação à quente, porém o SAE 4340 passou pelo processo normalização (recomendado para este tipo de material).

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do AÇO SAE 1020

Densidade kg/m ³	Resistência à tração máxima (MPa)	Resistência à tração limite de escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade Transversal (GPa)
7870	380	205	186	72

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do AÇO SAE 4340

Densidade kg/m ³	Resistência à tração máxima (MPa)	Resistência à tração limite de escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade Transversal (GPa)
7850	1282	862	200	78

Fonte: elaborada pelo autor.

2.2 MÉTODO ANALÍTICO

O método analítico para o cálculo do ângulo de torção utiliza a fórmula clássica dada pela Equação 1. A rotina de cálculo foi implementada em planilha eletrônica (Microsoft Excel) de modo a fornecer maior flexibilidade, rapidez e eficiência ao processo de validação analítica.

Equação 1 – Ângulo de torção.

$$\phi = \frac{TL}{JG}$$

Onde:

ϕ - ângulo de torção (*radianos*)

T - momento torçor (*N.m*)

L - comprimento (*m*)

J - momento polar de inércia (*m⁴*)

G - módulo de elasticidade transversal (*MPa*)

Analizando a equação podemos afirmar que dentro do regime elástico o ângulo de torção ϕ é proporcional ao momento torçor T aplicado no eixo.

Conforme destacado em livros-texto clássicos de Mecânica dos Sólidos, a tensão de cisalhamento máxima em um eixo ocorre na superfície externa do mesmo. Este parâmetro será calculado, e é dado pela Equação 2.

Equação 2 – Tensão de cisalhamento máxima.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Tc}{J}$$

Onde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ - tensão de cisalhamento máxima (*MPa*)

T - torque interno resultante que atua na seção transversal (*N.m*)

J - momento polar de inércia (*m⁴*)

c - raio externo do eixo (*m*)

Convém destacar que ambas as fórmulas são válidas somente no regime elástico linear, para materiais homogêneos e isotrópicos, com seções transversais circulares e submetidas a binários puros que geram torção e cisalhamento puros. Além disso, são pressupostos torque e momento de inércia constantes ao longo do comprimento do eixo, e pequenas deformações. Considerando os fins didáticos e comparativos desta pesquisa, assume-se que o carregamento se aproxima suficientemente de um torque puro. Adicionalmente, pode-se calcular o fator de segurança (coeficiente de segurança) do eixo com relação à tensão de cisalhamento máxima a partir da Equação 3.

Equação 3 – fator de segurança.

$$FS = \frac{\tau_{esc.}}{\tau_{m\acute{a}x}}$$

Onde:

FS - fator de segurança.

$\tau_{esc.}$ - tensão de escoamento do material (Mpa)

$\tau_{m\acute{a}x}$ - tensão de cisalhamento máxima (Mpa)

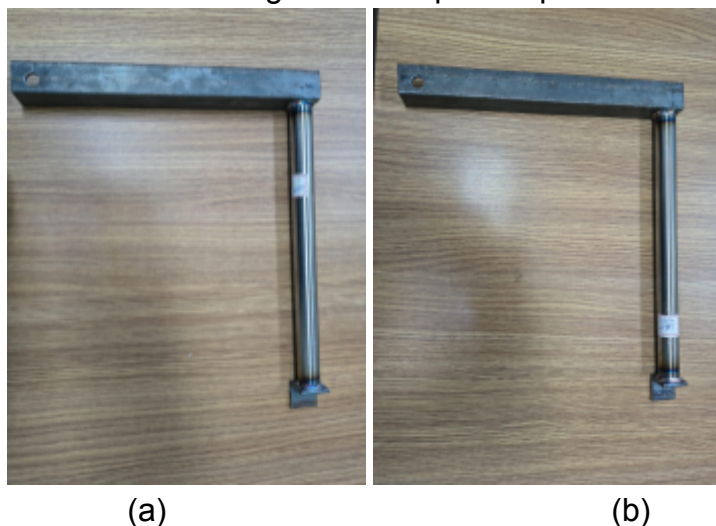
2.3 MÉTODO EXPERIMENTAL

2.3.1 Corpo de prova.

Para a determinação do módulo de elasticidade transversal de uma material por meio de ensaios de torção, aplica-se a norma ISO 18338. Contudo, devido ao caráter estritamente didático e às limitações de recursos deste estudo, os ensaios não seguem os parâmetros normativos, sendo adaptados para execução em bancada industrial.

Para a realização dos ensaios, foram fabricados dois corpos de prova (Imagem 1) com dimensões idênticas, viabilizando a validação do experimento em caráter comparativo, sendo um deles constituído por um eixo em aço SAE 1020 (a) e o outro em aço SAE 4340 (b).

Imagem 1 – corpos de prova



Fonte: o autor.

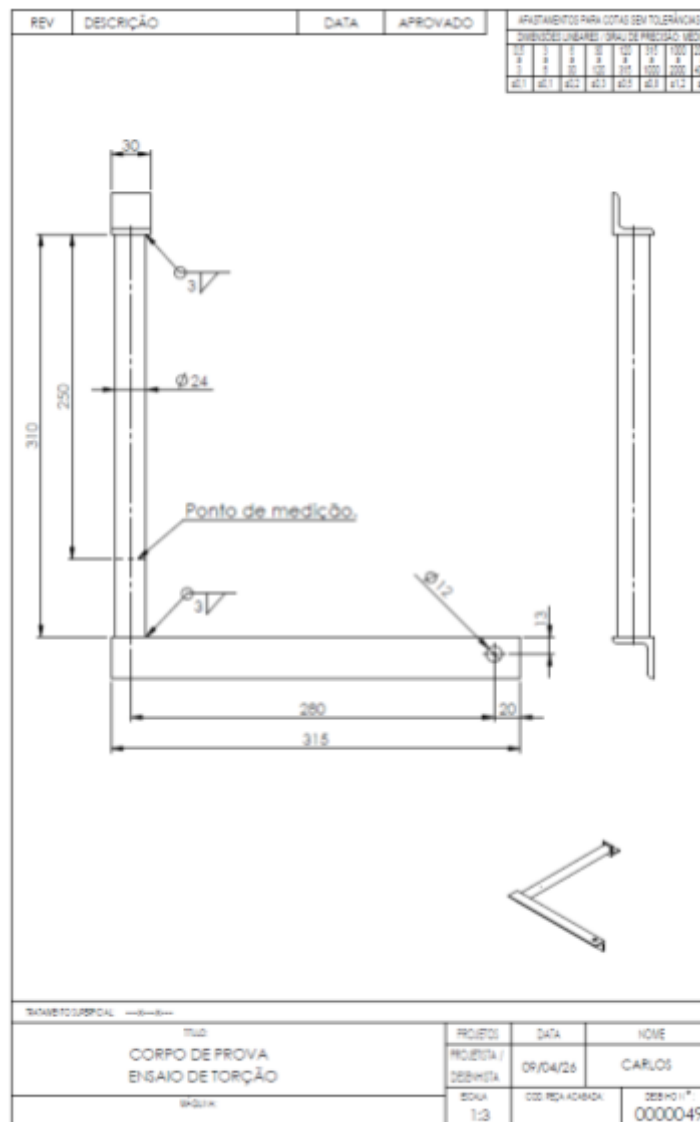
Fluxograma 1 – Sequência de fabricação dos corpos de prova.



Fonte: elaborado pelo autor.

A manufatura dos corpos de prova abrangeu três processos mecânicos sucessivos: usinagem, soldagem e furação, conforme esquematizado no Fluxograma 1

Imagem 3 – desenho de fabricação.



Fonte: elaborado pelo autor.

Inicialmente, as barras brutas cilíndricas com diâmetro nominal de 25,4 mm foram submetidas à operação de torneamento em um torno mecânico convencional, atingindo as dimensões finais de 24 mm de diâmetro por 310 mm de comprimento. Na etapa subsequente de soldagem, duas cantoneiras de aço SAE 1020 (perfil de 3/16" x 1 1/4") foram unidas às extremidades de cada eixo. Na primeira extremidade, soldou-se um segmento de 30 mm de comprimento, destinado ao engastamento do corpo de prova na morsa de bancada. Na extremidade oposta, fixou-se o segundo segmento, com 315 mm de comprimento. Por fim, a operação de furação consistiu na execução de um furo passante com 12 mm de diâmetro na cantoneira de maior dimensão.

A fabricação das peças pautou-se no desenho técnico (Imagem 3), instrumento utilizado para o acompanhamento e a validação do controle dimensional ao longo de todas as etapas de fabricação.

2.3.2 Extensômetro de resistência

O processo de medição da deformação foi realizado por meio de uma instrumentação acessível e de fácil instalação e operação. Para tanto, empregou-se um extensômetro elétrico de resistência (*strain gauge*) modelo BF350 (Imagem 4), da fabricante Saravati, que consiste em um sensor resistivo projetado especificamente para a medição de microdeformações mecânicas.

Imagem 4 – módulo sensor strain gauge BF350



Fonte: o autor.

O princípio de funcionamento dos extensômetros baseia-se na variação da resistência elétrica do sensor quando este é submetido a uma deformação mecânica. Essa variação resistiva, após o devido condicionamento de sinal, permite quantificar a deformação (ϵ) do material, a qual pode ser correlacionada aos níveis de tensão mecânica atuantes. A relação fundamental que descreve a alteração da resistência elétrica em função da deformação é apresentada por Doebelin (2003), conforme demonstrado na Equação 4.

Equação 4 – deformação.

$$\epsilon = \frac{\Delta R_g}{(GF) * R_g}$$

Onde:

ϵ - deformação (*adimensional*)

ΔR_g - variação na resistência do extensômetro (Ohm, Ω)

GF - fator do extensômetro (gage factor) (*adimensional*)

R_g - resistência do extensômetro quando sem deformação (Ohm, Ω)

Especificações técnicas do extensômetro:

Modelo: BF350

Tipo : Strain Gauge

Resistência: 350 (Ohm, Ω)

Fator Gauge: ~2.0

Temperatura: -20°C à +80°C

A partir dos valores de deformação obtidos, determinou-se o ângulo de torção correspondente por meio da formulação apresentada na Equação 5.

Equação 5 – ângulo de torção.

$$\phi = \frac{2 * \epsilon * L}{2}$$

Onde:

ϕ - ângulo de torção (*radianos*)

ϵ - deformação (*adimensional*)

L - comprimento (*m*)

2.3.3 Multímetro.

Para a aquisição dos dados experimentais optou-se pela utilização de um multímetro digital de alta precisão, modelo Fluke 179 (Imagem 5). A escolha deste instrumento é pela necessidade de alta resolução e fidedignidade na captura de variações na ordem de milivolts (mV).

Imagem 5 – Fluke 179



Fonte: o autor.

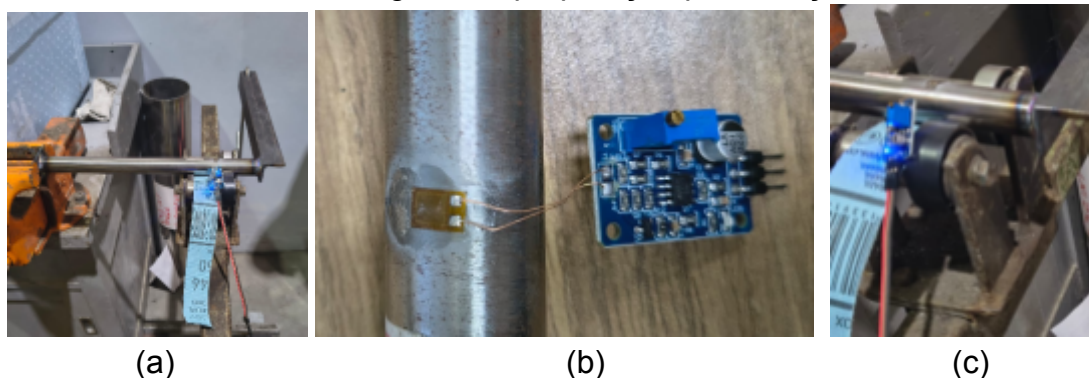
Este equipamento oferece uma precisão básica de tensão contínua de 0,09% e uma resolução de até 0,1 mV em sua escala. Essa característica é essencial para o estudo de extensometria, no qual as variações de resistência no extensômetro resultam em sinais elétricos extremamente sutis.

A utilização do multímetro permite a obtenção de uma leitura pura do sinal de saída (0 a 5V), garantindo que os dados de microdeformação ($\mu\epsilon$) calculados para os aços sejam minimizados por interferências de processamento ou perdas de resolução.

2.3.4 Fixação e preparação da superfície

O arranjo experimental foi configurado fixando-se rigidamente a cantoneira de menor comprimento em uma morsa de bancada (Imagem 6a). A extremidade oposta do eixo, por sua vez, foi apoiada em um suporte provido de dois rolamentos (Imagem 6c). Esse sistema de apoio permitiu o livre grau de liberdade rotacional e mitigou a ocorrência de esforços axiais indesejados (tração e compressão), garantindo a predominância dos esforços de torção. Estabelecido o arranjo mecânico, procedeu-se à instrumentação do corpo de prova. Inicialmente, realizou-se o condicionamento da superfície do eixo, seguindo rigorosamente os protocolos do fabricante do extensômetro. A fixação do sensor ocorreu em duas etapas, o posicionamento preliminar com fita de ancoragem temporária e, posteriormente, a colagem definitiva com a aplicação de um adesivo à base de cianoacrilato de média viscosidade (Tekbond 793) na interface de contato (Imagem 6b). O uso desse adesivo é amplamente referendado para ensaios experimentais de extensometria, contudo, ressalta-se que sua viabilidade é restrita a medições de curta ou média duração e a testes conduzidos em temperatura ambiente.

Imagem 6 – preparação para fixação.



Fonte: o autor.

Outro aspecto crítico da instrumentação refere-se ao alinhamento do sensor, para ensaios de torção, o extensômetro deve ser fixado a um ângulo de 45° em relação ao eixo longitudinal da peça. Essa orientação é indispensável porque, sob torção pura, é nessa direção que atuam as deformações normais principais de tração e compressão. Assim, garante-se que a leitura experimental capte a deformação máxima, viabilizando uma correlação direta e precisa com o modelo analítico.

Conforme discutido na introdução, o arranjo experimental adotado possui caráter didático e foi simplificado em razão das limitações de recursos. A barra engastada-apoiada com cantoneira soldada na extremidade, não assegura um estado de torção pura e portanto, cisalhamento puro. A aplicação da carga por meio de força concentrada em braço de alavanca, embora não reproduza a condição de binário, é suficiente para os objetivos comparativos deste estudo. Os eventuais esforços axiais secundários de tração e compressão derivadas do método de aplicação de carga e das restrições de apoio, foram desconsiderados na comparação com o modelo analítico.

2.3.5 Aplicação da carga e aquisição de dados

Após o engastamento do corpo de prova e a consolidação da instrumentação, procedeu-se à etapa de carregamento. A aplicação da força deu-se por meio do acoplamento de um gancho com massas no furo de 12 mm de diâmetro da cantoneira de maior comprimento (Imagem 7), a qual atuou como um braço de alavanca para induzir o momento torçor no eixo. Em cada corpo de prova, foram aplicados três níveis distintos de carga, cujos valores foram previamente dimensionados para assegurar que as tensões atuantes permaneçam abaixo do limite de escoamento do material, garantindo a integridade do ensaio no regime elástico.

Imagem 7 – aplicação da carga no corpo de prova.



Fonte: o autor.

Após a aplicação de cada incremento de carga, estabeleceu-se um intervalo de 5 segundos para garantir a completa estabilização mecânica do sistema. Somente após a dissipação de eventuais vibrações e a acomodação do sinal, procedeu-se à aquisição dos dados experimentais, registrados a partir da leitura no mostrador do multímetro (Imagem 8).

Imagem 8 – leitura e coleta dos dados.



Fonte: o autor.

Os dados obtidos experimentalmente para os aços SAE 1020 e SAE 4340 estão sintetizados nos Quadros 1 e 2, respectivamente. A partir desses registros com o auxílio de Equação 4 e da Equação 5, calculou-se o ângulo de torção (ϕ) e a deformação específica (ϵ) a que o extensômetro foi submetido durante os ensaios.

Quadro 1 – valores de obtidos para o aço SAE 1020.

Massa (kg)	Volts (V)	Resistência (Ohms)	Δ Resistência (Ohms)	ϕ Ângulo de torção (radianos)	Deformação ϵ (mm/mm)
0	2,536	350	0	0	0
21,08	2,606	359,66	9,66	0,0058	0,0138
26,22	2,619	361,46	11,46	0,0068	0,0164
31,48	2,634	363,53	13,53	0,0081	0,0193

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 2 – valores de obtidos para o aço SAE 4340.

Massa (kg)	Volts (V)	Resistência (Ohms)	Δ Resistência (Ohms)	ϕ Ângulo de torção (radianos)	Deformação ϵ (mm/mm)
0	2,514	350,00	0	0	0
21,08	2,546	354,46	4,46	0,00265	0,0064
26,22	2,563	356,82	6,82	0,00406	0,0097
31,48	2,591	358,43	8,43	0,00502	0,0120

Fonte: elaborado pelo autor.

2.4 MÉTODO POR ELEMENTOS FINITOS.

O método dos elementos finitos constitui uma ferramenta essencial para o dimensionamento e a otimização de componentes e estruturas em diversas áreas da engenharia. A eficácia dessa abordagem, no entanto, está intrinsecamente ligada ao rigor na definição das condições de contorno, na modelagem precisa dos dados de entrada (pré-processamento) e na correta interpretação dos resultados obtidos (pós-processamento).

A adoção deste método mostra-se altamente viável do ponto de vista técnico e econômico por viabilizar a prototipagem virtual. Especialmente em organizações de pequeno e médio porte, a simulação computacional reduz expressivamente os custos operacionais e o tempo de desenvolvimento, mitigando a necessidade de infraestrutura física e ensaios empíricos iterativos para a fabricação de protótipos físicos.

Atualmente, dispõe-se de uma ampla gama de softwares voltados ao método, variando desde soluções básicas até plataformas de alta complexidade que exigem maiores investimentos para implementação. Para o desenvolvimento deste estudo, optou-se pela utilização do software *Ansys* (versão 16.0), uma ferramenta computacional amplamente consolidada e validada tanto no meio acadêmico quanto em simulações industriais complexas.

A execução adequada de uma análise por elementos finitos exige uma rotina estruturada de configuração do modelo físico para que o *solver* consiga processar o sistema de equações. A sequência lógica adotada para a modelagem e solução neste trabalho está sistematizada no Fluxograma 2.

Fluxograma 2 – sequência para simulação no Ansys.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a geração da geometria tridimensional (Imagem 9), empregou-se o programa de computador *SolidWorks*. Tal adoção pautou-se na eficiente integração de dados CAD/CAE (projeto/simulação) com o Ansys, aliada à familiaridade prévia com a ferramenta, por tratar-se da ferramenta oficial adotada pela instituição para as atividades práticas de Desenho Técnico II.

Imagem 9 – modelo 3D.



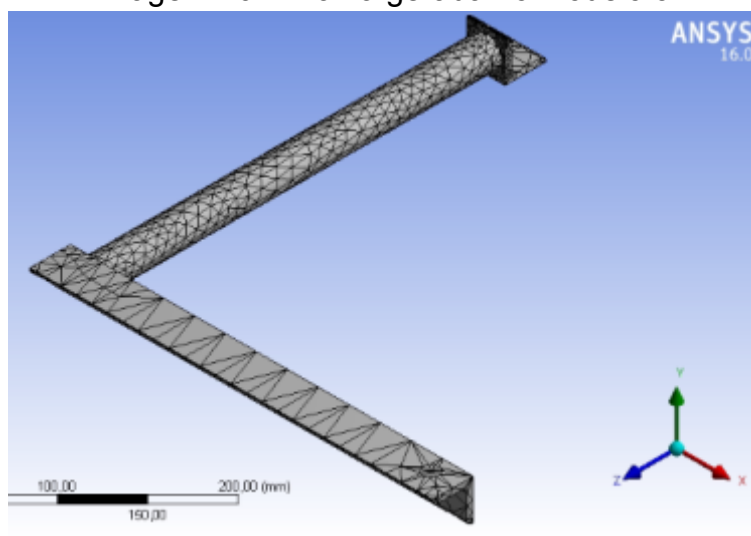
Fonte: elaborado pelo autor.

A importação da geometria para o Ansys foi viabilizada pelo *Geometry Interface*, um suplemento que estabelece a interoperabilidade direta com o *SolidWorks*, permitindo a leitura nativa do arquivo 3D no ambiente de simulação. Com o modelo tridimensional importado, procedeu-se à atribuição do material, garantindo a correta parametrização de suas propriedades mecânicas no programa.

Na fase de pré-processamento subsequente, realizou-se a discretização do domínio espacial por meio da geração da malha de elementos finitos (Imagem 10). Essa etapa é crítica para a convergência e precisão da análise, pois a quantidade de nós define os graus de liberdade do sistema matemático que o *solver* irá processar para obter os resultados. Para a presente simulação, a malha gerada resultou em

10.531 nós e 5.968 elementos. A Imagem 10 apresenta a topologia gráfica desta discretização, ilustrando a distribuição adotada para o modelo.

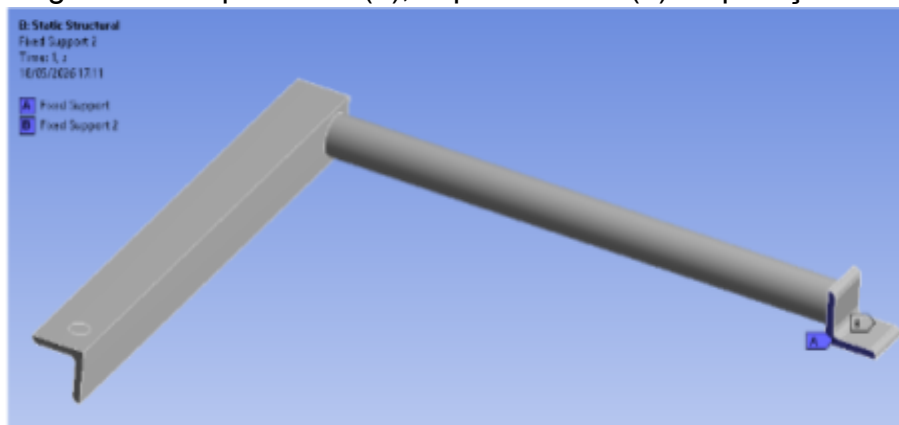
Imagem 10 – malha gerada no modelo 3D.



Fonte: elaborado pelo autor.

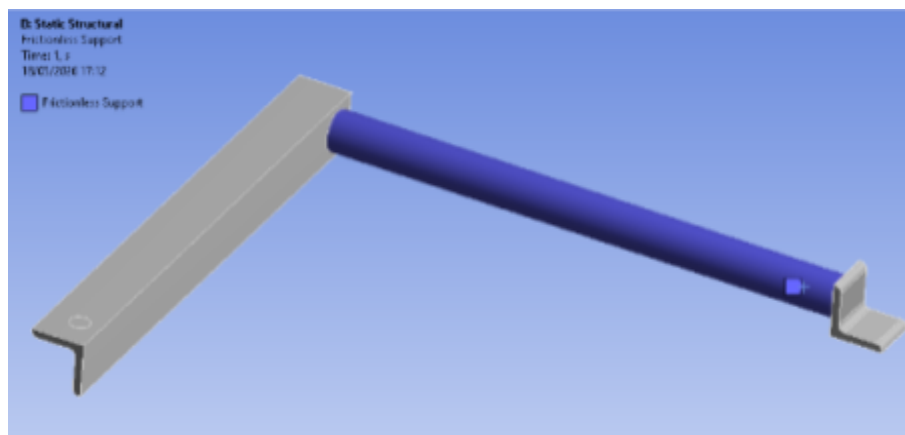
Concluída a discretização do modelo, a etapa subsequente consistiu na definição das condições de contorno, configurando-se o ambiente de simulação exclusivamente para uma análise estática estrutural. A parametrização dos apoios no programa replicou o arranjo experimental físico, a extremidade correspondente à cantoneira menor foi definida como um engaste perfeito (*Fixed Support*) (Imagem 11a), restringindo todos os seus graus de liberdade. No modelo experimental na extremidade oposta, implementou-se um apoio deslizante do tipo rolete, o qual permite a rotação do eixo e isola os efeitos da torção, mitigando a indução de esforços por cargas combinadas. Para o processamento do modelo por elementos finitos foram suprimidos os roletes de apoio aplicando a condição no eixo de o mesmo apenas rotacionar (Imagem 11b). Por fim, procedeu-se à aplicação do carregamento pontual correspondente à massa utilizada no ensaio (Imagem 11c)

Imagem 11 – suporte fixo (a), suporte móvel (b) e aplicação da carga(c).



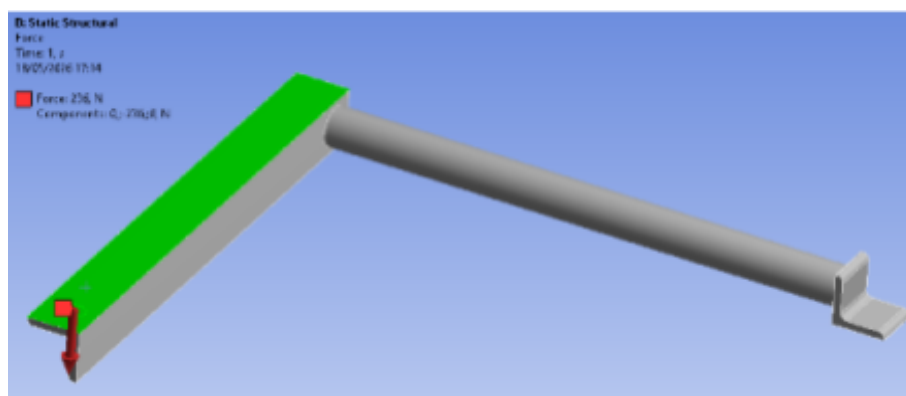
(a)

Fonte: elaborado pelo autor.



(b)

Fonte: elaborado pelo autor.



(c)

Fonte: elaborado pelo autor.

Com a parametrização do pré-processamento finalizada, procedeu-se à etapa de solução do modelo matemático. Cabe ressaltar que o custo computacional e, consequentemente, o tempo de processamento é diretamente proporcional à complexidade geométrica e ao grau de discretização da malha (número de nós e elementos). Por essa razão, a otimização do modelo e a definição assertiva das condições de contorno são etapas cruciais para assegurar a viabilidade da análise.

Neste estudo, o processamento de cada cenário demandou cerca de 10 minutos pelo *solver*, perfazendo um total aproximado de uma hora para o conjunto completo de simulações. Ao término dessa etapa, o programa disponibilizou os dados para a fase de pós-processamento e análise de resultados (Imagem 12).

diretamente no eixo é convertida em ângulo de torção, e posteriormente relacionado ao deslocamento, servindo como base de comparação para os valores obtidos pelo método de elementos finitos e o método analítico. Além de garantir que o sistema opere em regime elástico, mitigando o risco de falhas por escoamento, esta análise permite a avaliação da rigidez estrutural. Para assegurar a confiabilidade desta investigação, os resultados obtidos por meio de cada método foram confrontados para avaliar a convergência e a consistência das respostas de cada material.

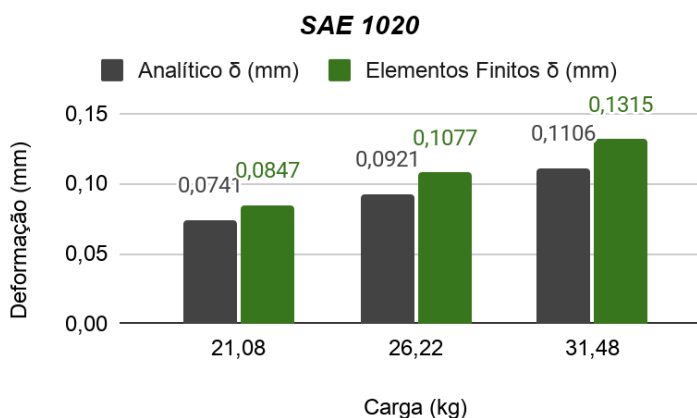
Quadro 4 – deslocamento método analítico x elementos finitos para o SAE 1020.

Carga (kg)	Analítico δ (mm)	Elementos Finitos δ (mm)	$\Delta\delta$ (mm)	Variação(%)
21,08	0,0741	0,0847	-0,0106	14,4
26,22	0,0921	0,1077	-0,0156	16,9
31,48	0,1106	0,1315	-0,0209	18,9

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 1 – deslocamento método analítico x elementos finitos para o SAE 1020.

Deslocamento analítico x elementos



Fonte: elaborado pelo autor.

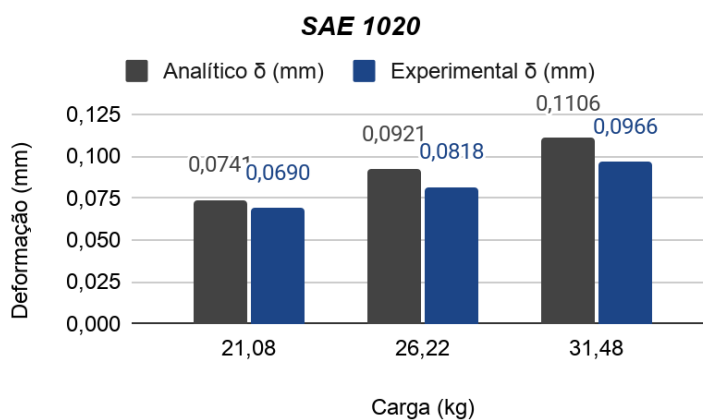
Quadro 5 – deslocamento método analítico x experimental para o SAE 1020.

Carga (kg)	Analítico δ (mm)	Experimental δ (mm)	$\Delta\delta$ (mm)	Variação(%)
21,08	0,0741	0,0690	0,0051	-6,8
26,22	0,0921	0,0818	0,0103	-11,2
31,48	0,1106	0,0966	0,0140	-12,7

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – deslocamento método analítico x experimental para o SAE 1020.

Deslocamento analítico x experimental.



Fonte: elaborado pelo autor.

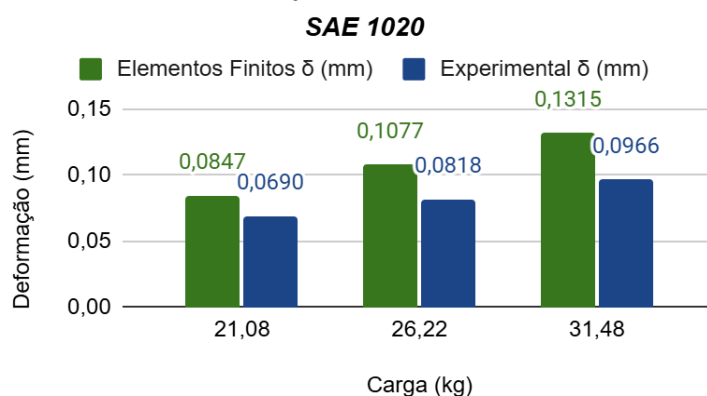
Quadro 6 – deslocamento método elementos finitos x experimental para o SAE 1020.

Carga (kg)	Elementos Finitos δ (mm)	Experimental δ (mm)	$\Delta\delta$ (mm)	Variação(%)
21,08	0,0847	0,0690	0,0157	-18,5
26,22	0,1077	0,0818	0,0259	-24,0
31,48	0,1315	0,0966	0,0349	-26,5

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – deslocamento método elementos finitos x experimental para o SAE 1020.

Deslocamento elementos finitos x experimental.



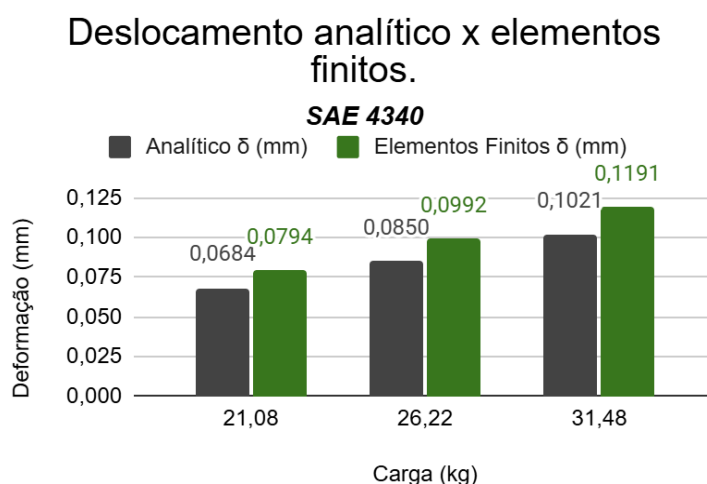
Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 7 – deslocamento método analítico x elementos finitos para o SAE 4340.

Carga (kg)	Analítico δ (mm)	Elementos Finitos δ (mm)	$\Delta\delta$ (mm)	Variação(%)
21,08	0,0684	0,0794	-0,0110	16,1
26,22	0,0850	0,0992	-0,0142	16,6
31,48	0,1021	0,1191	-0,0170	16,6

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4 – deslocamento método analítico x elementos finitos para o SAE 4340.



Fonte: elaborado pelo autor.

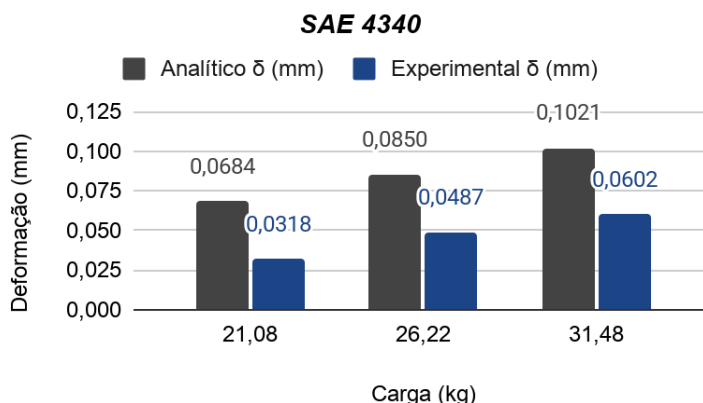
Quadro 8 – deslocamento método analítico x experimental para o SAE 4340.

Carga (kg)	Analítico δ (mm)	Experimental δ (mm)	$\Delta\delta$ (mm)	Variação(%)
21,08	0,0684	0,0318	0,0366	-53,5
26,22	0,0850	0,0487	0,0363	-42,7
31,48	0,1021	0,0602	0,0419	-41,0

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 5 – deslocamento método analítico x experimental para o SAE 4340.

Deslocamento analítico x experimental.



Fonte: elaborado pelo autor.

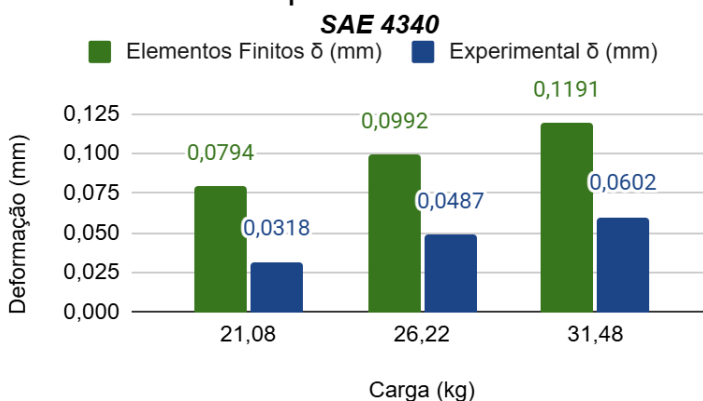
Quadro 9 – deslocamento método elementos finitos x experimental para o SAE 4340.

Carga (kg)	Elementos Finitos δ (mm)	Experimental δ (mm)	$\Delta\delta$ (mm)	Variação(%)
21,08	0,0794	0,0318	0,0476	-59,9
26,22	0,0992	0,0487	0,0505	-50,9
31,48	0,1191	0,0602	0,0589	-49,4

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 6 – deslocamento método elementos finitos x experimental para o SAE 4340.

Deslocamento elem. finitos x experimental.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se, de maneira geral, uma convergência satisfatória entre os métodos analítico, experimental e por elementos finitos para um mesmo material, validando a metodologia empregada. Confirmada a coerência entre as abordagens,

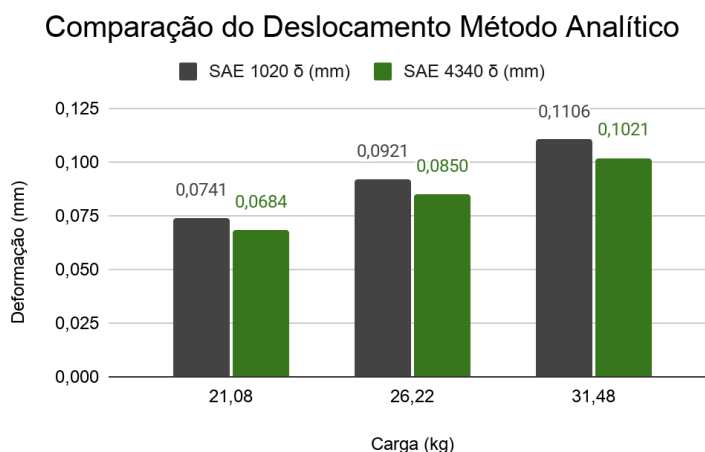
procedeu-se ao estudo comparativo entre os aços SAE 1020 e SAE 4340, cujos resultados e correlações são apresentados a seguir.

Quadro 10 – comparação do descolamento entre os materiais no método analítico.

Carga (kg)	SAE 1020 δ (mm)	SAE 4340 δ (mm)	$\Delta\delta$ (mm)	Variação(%)
21,08	0,0741	0,0684	0,0057	-7,7
26,22	0,0921	0,0850	0,0071	-7,7
31,48	0,1106	0,1021	0,0085	-7,7

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 7 – comparação do deslocamento entre os materiais no método analítico.



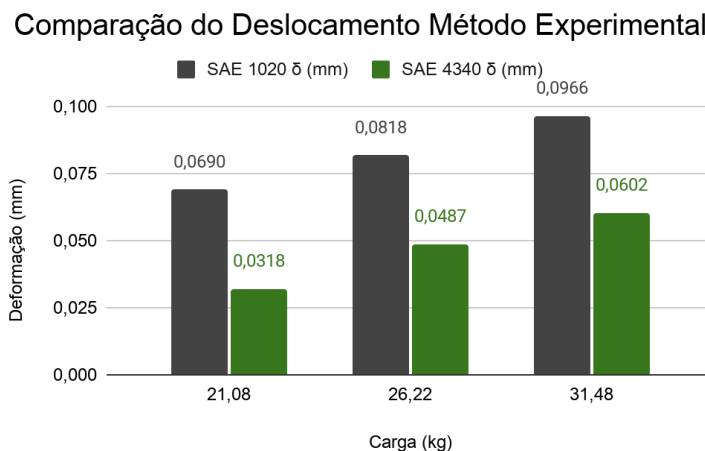
Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 11 – comparação do descolamento entre os materiais no método experimental.

Carga (kg)	SAE 1020 δ (mm)	SAE 4340 δ (mm)	$\Delta\delta$ (mm)	Variação(%)
21,08	0,0690	0,0318	0,0372	-53,9
26,22	0,0818	0,0487	0,0331	-40,4
31,48	0,0966	0,0602	0,0364	-37,7

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 8 – comparação do deslocamento entre os materiais no método experimental.



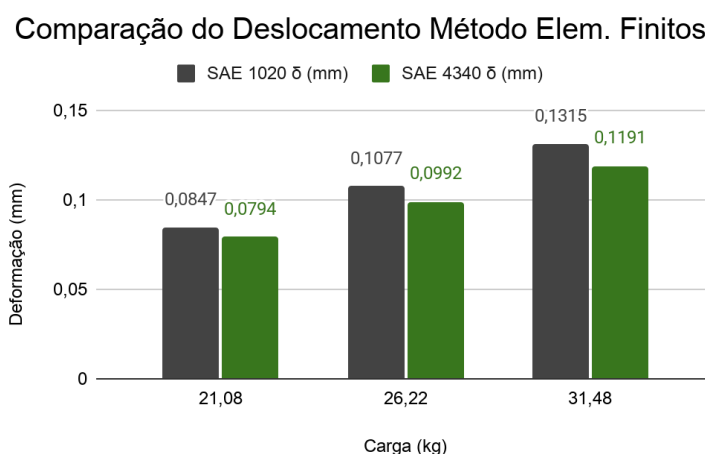
Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 12 – comparação do deslocamento entre os materiais no método elementos finitos.

Carga (kg)	SAE 1020 δ (mm)	SAE 4340 δ (mm)	$\Delta\delta$ (mm)	Variação(%)
21,08	0,0847	0,0794	0,0053	-6,3
26,22	0,1077	0,0992	0,0085	-7,9
31,48	0,1315	0,1191	0,0124	-9,4

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 9 – comparação de deslocamento entre os materiais no método elementos finitos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se uma maior dispersão nos dados obtidos pelo método experimental quando confrontados com as previsões analíticas e por elementos finitos. Essa divergência pode ser atribuída a limitações no processo de fixação do extensômetro, conforme os critérios discutidos na seção 2.3.4. Especificamente, a

espessura excessiva da camada de adesivo na interface entre o sensor e o corpo de prova pode atuar como um componente de amortecimento, absorvendo parte da deformação mecânica antes de sua transferência plena ao sensor.

Adicionalmente, incertezas na aquisição de dados podem ter contribuído para essa discrepância, embora o multímetro possua resolução na escala de miliamperes, resistências de contato na placa *protoboard* e perdas de sinal nas conexões elétricas podem ter introduzido ruídos no circuito de leitura.

3.2 ANÁLISE DO FATOR DE SEGURANÇA E CUSTO-BENEFÍCIO

Conforme estabelecido nas premissas deste estudo, a análise concentrou-se exclusivamente no estado de torção pura, desprezando-se eventuais esforços axiais secundários. Sob essa hipótese simplificadora, a tensão atuante no eixo foi definida pela tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{\max} = Tc/J$), calculada analiticamente. Para o cálculo do fator de segurança (FS), adotou-se a tensão de escoamento ao cisalhamento (τ_{esc}), estimada a partir da tensão de escoamento à tração fornecida pelas tabelas de propriedades mecânicas.

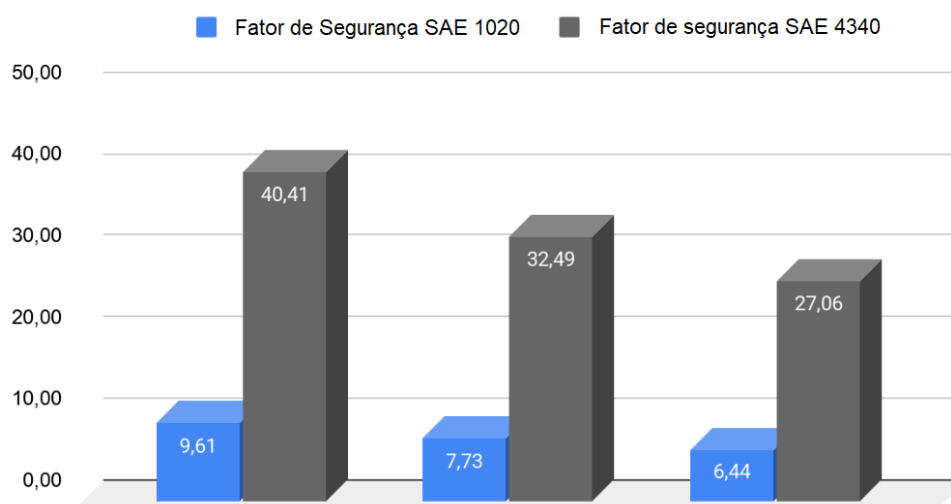
O fator de segurança de cada material foi determinado pela Equação 3, estabelecendo-se a relação entre a tensão de escoamento da liga e a tensão de cisalhamento atuante. A comparação detalhada entre os materiais analisados é apresentada no Quadro 13.

Quadro 13 – Fator de Segurança (FS).

Massa (kg)	Tensão de cisalhamento máxima (MPa)	Tensão de escoamento SAE 1020 (MPa)	Tensão de escoamento SAE 4340 (MPa)	Fator de segurança SAE 1020	Fator de segurança SAE 4340	Proporção
21,08	21,33	205	862	9,61	40,41	4,2
26,22	26,53	205	862	7,73	32,49	4,2
31,48	31,86	205	862	6,44	27,06	4,2

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 10 – Fator de Segurança.



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme ilustrado no Gráfico 10 e corroborado pelo Quadro 13, a análise comparativa entre os materiais evidencia uma superioridade mecânica expressiva do aço SAE 4340. Observa-se que, em todas as condições de carga avaliadas, o SAE 4340 apresenta um fator de segurança 4,2 vezes maior quando comparado ao aço SAE 1020 (destacando-se, por exemplo, o pico de 40,41 contra 9,61 na primeira condição). Essa proporção constante decorre diretamente da razão entre as tensões de escoamento dos materiais ($862/205 \approx 4,2$) e comprova a considerável vantagem do aço ligado em relação ao aço carbono comum no que diz respeito à capacidade de suportar tensões operacionais sob os mesmos parâmetros de carregamento.

Do ponto de vista de dimensionamento, essa diferença nos fatores de segurança traz implicações diretas e vantajosas para o projeto de eixos mecânicos. A utilização do aço SAE 4340 em substituição ao SAE 1020 permite a adoção de eixos com diâmetros significativamente menores, considerando que a tensão de cisalhamento é inversamente proporcional ao cubo do diâmetro ($\tau \propto 1/d^3$), a substituição permitiria uma redução aproximada de 1,6 vezes no diâmetro ($\sqrt[3]{862/205} \approx 1,6$), mantendo-se o mesmo fator de segurança, otimizando o espaço e reduzindo o peso do conjunto. Mesmo com essa redução dimensional, o uso do SAE 4340 garante a manutenção de um fator de segurança razoável e seguro, proporcionando maior flexibilidade de projeto conforme as exigências e a severidade da aplicação final..

Um fator que pode impactar a aplicação do aço SAE 4340 é o seu custo de aquisição, portanto esse aspecto deve ser considerado em projetos comerciais. Para efeito de comparação, o valor de aquisição da barra de SAE 4340 foi de R\$ 22,58/kg, enquanto a barra de SAE 1020 custou R\$ 9,99/kg. Os Quadros 14 e 15 apresentam a relação custo por quilo de material por sua tensão de escoamento.

Quadro 14 – relação custo (R\$/kg) / tensão de escoamento (MPa) SAE 1020.

Custo (R\$/kg)	Tensão de escoamento (MPa)	Relação (R\$/kg)/MPa
9,99	205	0,0487

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 15 – relação custo (R\$/kg) / tensão de escoamento (MPa) SAE 4340.

Custo (R\$/kg)	Tensão de escoamento (MPa)	Relação (R\$/kg)/MPa
22,58	862	0,0262

Fonte: elaborado pelo autor.

Embora o custo de aquisição do SAE 4340 seja significativamente superior ao do SAE 1020, a análise de custo por unidade de resistência mecânica revela que o SAE 4340 é mais eficiente economicamente: R\$ 0,0262/MPa contra R\$ 0,0487/MPa do SAE 1020, ou seja, uma economia de aproximadamente 46% por megapascal de resistência. Esse resultado evidencia que, para aplicações estruturais de alta solicitação, o SAE 4340 não apenas oferece superioridade mecânica, mas também se mostra mais vantajoso sob a ótica do custo-benefício.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo comparou o comportamento torcional dos aços SAE 1020 e SAE 4340 por meio de três métodos: analítico, experimental (extensometria) e numérico (elementos finitos). Para o ensaio experimental, confeccionou-se um corpo de prova cilíndrico (24 mm × 310 mm) com um braço de alavanca soldado em uma extremidade, no qual foram aplicadas cargas de 21,08 kg, 26,22 kg e 31,48 kg para gerar o torque. O dispositivo, de caráter didático, utilizou força concentrada em vez de binário puro, introduzindo efeitos secundários de flexão desconsiderados na análise comparativa.

Inicialmente, compararam-se os resultados dos três métodos para cada material individualmente, verificando-se convergência satisfatória entre os métodos analítico e numérico (desvios de 6% a 19%), enquanto os dados experimentais apresentaram maior dispersão. Em seguida, compararam-se os métodos entre os dois aços, evidenciando que o SAE 4340 apresenta deslocamentos significativamente menores que o SAE 1020 em todas as condições de carga. Observou-se que os valores experimentais foram sistematicamente inferiores aos demais, sugerindo subestimação das deformações.

A maior discrepância observada entre os métodos foi de 59,9% para o SAE 4340 na condição de menor carga. Essa diferença pode ser atribuída a múltiplos fatores tais como: a espessura excessiva do adesivo cianoacrilato na interface extensômetro-eixo, que pode ter absorvido parte da deformação mecânica antes de sua transmissão ao sensor; perdas de sinal decorrentes de resistências de contato na protoboard; e ainda a simplificação do carregamento por força concentrada em braço de alavanca, que introduz efeitos de flexão não capturados pelo modelo de torção pura.

Os resultados confirmam a superioridade estrutural do aço SAE 4340 em relação ao SAE 1020. Sob as mesmas condições de carregamento, o SAE 4340 apresentou deslocamentos 6% a 10% menores nos métodos analítico e numérico, além de um fator de segurança 4,2 vezes superior, decorrente de sua tensão de escoamento significativamente mais elevada (862 MPa contra 205 MPa). Essa maior rigidez torsional viabiliza o dimensionamento de eixos com diâmetros reduzidos e menor peso, sem comprometer a segurança estrutural, com vantagem adicional de custo-benefício (R\$ 0,0262/MPa contra R\$ 0,0487/MPa do SAE 1020).

Para trabalhos futuros, recomenda-se: (a) aprimorar a instrumentação experimental com adesivos específicos para extensometria (baixa viscosidade) e rosetas de extensômetros; (b) desenvolver um dispositivo que aplique binário puro, eliminando efeitos de flexão parasitas; (c) ampliar a faixa de cargas e o número de repetições para análise estatística; (d) realizar estudo de convergência de malha no método de elementos finitos; e (e) estender a análise a outras classes de aços para ampliação do banco de dados comparativos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook: Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. Materials Park, OH: ASM International, 1990.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russell; DEWOLF, John T.; MAZUREK, David F. **Mecânica dos Materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2008.

DOEBELIN, Ernest O. **Measurement Systems: application and design**. 5. ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.

FRIEDRICH, André et al. **Análise estrutural de flexo-torção: um comparativo analítico, experimental e numérico**. Xanxerê: Instituto Federal de Santa Catarina, 2019.

HIBBELER, Russell C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18338: Metallic materials — Torsion test at room temperature**. 2. ed. Geneva: ISO, 2021.

MATWEB. **AISI 1020 Steel, hot rolled**. MatWeb: Material Property Data, [s.d.]. Disponível em: www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b58ee61a3745453a9232f7864abba74f. Acesso em: 15 maio 2026.

MATWEB. **AISI 4340 Steel, annealed**. MatWeb: Material Property Data, [s.d.]. Disponível em: www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fd2df45bffa54018b54989bc14092d9f. Acesso em: 15 maio 2026.

MINELA, Sthefani Neves. **Extensometria: estudo e aplicação**. 2017. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

RODRIGUES, Cristiano Batista et al. Uso do Arduino para medição de deformações em estruturas metálicas de instalações públicas municipais. **International Journal of Development Research**, v. 11, n. 08, p. 49214-49217, 2021.

SILVA, Anderson Langone et al. Estudo da medição de tensões e deformações utilizando o microcontrolador Arduino e extensômetros elétricos de resistência. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 3, 2019.