



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

SAMUEL RODRIGUES FORTES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PORTÁTIL DE BAIXO CUSTO PARA
MEDIÇÃO DE FORÇA AXIAL EM PARAFUSOS COM STRAIN GAUGES**

Sorocaba
2025

SAMUEL RODRIGUES FORTES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PORTÁTIL DE BAIXO CUSTO PARA
MEDIÇÃO DE FORÇA AXIAL EM PARAFUSOS COM STRAIN GAUGES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba,
como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Bacharel(a) em Engenharia de Controle
e Automação.

Orientador(a): Prof. Dr. Everson Martins

Sorocaba

2025

F738d Fortes, Samuel Rodrigues
Desenvolvimento de um sistema portátil de baixo custo para
medição de força axial em parafusos com strain gauges/ Samuel
Rodrigues Fortes. -- Sorocaba, 2025
46 p.: il., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de
Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Everson Martins

1. Parafusos. 2. Extensômetro. 3. Arduino (Microcontroladores). 4.
Aquisição de dados. 5. Mecânica. I. Título.

SAMUEL RODRIGUES FORTES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PORTÁTIL DE BAIXO CUSTO PARA
MEDIÇÃO DE FORÇA AXIAL EM PARAFUSOS COM STRAIN GAUGES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia de Controle e Automação.

Data da defesa: 14/11/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Everson Martins
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

Prof. Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

Prof. Dr. Ivando Severino Diniz
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

AGRADECIMENTOS

Tudo o que vive é projetado para acabar. Não importa o quanto lutemos, estamos todos inseridos em uma espiral interminável de vida e morte. Entretanto, é dentro desse ciclo, nesse espaço limitado, que cada passo ganha significado. Não pela promessa de permanência, mas pelo simples ato de prosseguir.

À *família*, Eliana Cristina de Oliveira, Akari, Astro e Poppy, que suportaram o peso da minha existência e me ofereceram abrigo mesmo quando eu já não sabia se havia forças para prosseguir. Vocês foram o elo que me prendeu ao mundo quando tudo parecia ruir.

Aos *amigos*, Alan Tonon da Silveira, Ana Vitória Elias Martins, Dimitri Margutti, Guilherme Moysés Ginack, Guilherme Pedroso Xavier Santos, Fernanda Carvalho, Luigi Marson Grandi e Natan Razera Pinto que caminharam ao meu lado mesmo sabendo da fragilidade de tudo. Vocês deram calor a uma jornada fria e lembraram que, por mais efêmeros que sejamos, ainda podemos compartilhar instantes verdadeiros.

Às inúmeras pessoas cujas presenças marcaram minha trajetória de forma breve, porém intensa. Cada gesto e cada palavra representaram fragmentos de luz na escuridão inevitável do ciclo.

À *Metalac*, que me mostrou que até os menores elementos carregam a responsabilidade de sustentar estruturas inteiras. Cada esforço, cada detalhe, mostrou que não existe função pequena quando o propósito é manter algo de pé. Foi nesse espaço que compreendi que o sentido não está em escapar desse peso, mas em carregá-lo, juntos, até onde nossas forças permitirem.

À *UNESP*, que se tornou o espaço onde pude enfrentar meus próprios limites e compreender que o conhecimento também faz parte da luta dentro do ciclo. Foi nesse ambiente que encontrei não apenas aprendizado técnico, mas também a oportunidade de amadurecer como indivíduo.

Se nada escapa ao fim, se tudo retorna ao mesmo ponto, que estas palavras sejam apenas um registro silencioso de uma vida vivida dentro da espiral. Não lutei para vencê-la, lutei apenas para não me perder em seu interior.

RESUMO

A medição precisa da força axial em fixadores roscados, como parafusos e porcas, é fundamental para garantir a integridade estrutural de sistemas mecânicos e prevenir falhas decorrentes da perda de pré-carga ou do afrouxamento das uniões aparafusadas. Métodos convencionais de monitoramento, incluindo sensores ultrassônicos, piezoelétricos, de fibra óptica e extensometria, embora ofereçam alta precisão, apresentam custos elevados, complexidade operacional e limitada portabilidade, restringindo sua aplicação em campo, em testes de prototipagem rápida e em ambientes industriais de pequeno porte. Nesse contexto, soluções acessíveis, portáteis, robustas e confiáveis tornam-se essenciais para permitir o monitoramento eficaz de parafusos em condições reais de operação, incluindo ensaios experimentais, manutenção preditiva e validação de projetos mecânicos. Diante dessa necessidade, o presente projeto desenvolveu um sistema de aquisição de força para parafusos sensorizados com extensômetros (strain gauges) baseado em Arduino e sensor HX711, capaz de realizar a leitura de dados em tempo real e converter os valores brutos do sensor em força aplicada com precisão e repetibilidade. O desempenho do sistema foi comparado com aquisitores profissionais, demonstrando confiabilidade, baixo custo e robustez, consolidando-se como uma ferramenta adequada para monitoramento de fixadores, análise experimental e controle de qualidade de uniões aparafusadas. Assim, o projeto atende plenamente aos objetivos propostos, oferecendo uma solução prática, portátil e confiável para o monitoramento da força em parafusos, com potencial aplicação em pesquisa acadêmica, treinamentos técnicos, ensaios experimentais e manutenção preditiva de estruturas mecânicas.

Palavras-chave: Parafusos, Medição de Força, Extensometria, Sistema de Aquisição de Dados, Arduino, Protótipo Portátil.

ABSTRACT

The precise measurement of axial force in threaded fasteners, such as bolts and nuts, is essential to ensure the structural integrity of mechanical systems and to prevent failures resulting from the loss of preload or the loosening of bolted joints. Conventional monitoring methods, including ultrasonic sensors, piezoelectric sensors, fiber optic sensors, and strain gauges, although highly accurate, involve high costs, operational complexity, and limited portability, which restricts their application in field measurements, rapid prototyping tests, and small-scale industrial environments. In this context, affordable, portable, robust, and reliable solutions are essential to enable effective monitoring of bolts under real operating conditions, including experimental testing, predictive maintenance, and validation of mechanical designs. In response to this need, the present project developed a force acquisition system for bolts instrumented with strain gauges, based on Arduino and HX711 sensors, capable of performing real-time data acquisition and converting raw sensor readings into applied force with precision and repeatability. The system's performance was compared with professional acquisition devices, demonstrating reliability, low cost, and robustness, establishing it as a suitable tool for fastener monitoring, experimental analysis, and quality control of bolted joints. Thus, the project fully achieves the proposed objectives, providing a practical, portable, and reliable solution for monitoring bolt forces, with potential applications in academic research, technical training, experimental testing, and predictive maintenance of mechanical structures.

Keywords: Bolts, Force Measurement, Strain Gauges, Data Acquisition System, Arduino, Portable Prototype.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Junta Aparafusada.....	15
Figura 2 – Diagrama Tensão x Deformação do aço.....	16
Figura 3 – Elementos para cálculo de resiliência de parafusos.....	17
Figura 4 – Forças atuantes durante processo de aperto.....	19
Figura 5 – Deformações sob carga.....	19
Figura 6 – Diagrama de sistemas necessários para medição de Strain Gauges.....	21
Figura 7 – Circuito de Ponte Balanceado.....	22
Figura 8 – Circuito de Ponte Desbalanceado.....	23
Figura 9 – Strain Gauge Linear.....	24
Figura 10 – Strain Gauge Linear Roseta.....	24
Figura 11 – Esquemático do módulo integrado HX711.....	25
Figura 12 – DAQ Spider 8.....	26
Figura 13 – CompactDAQ.....	27
Figura 14 – Cartucho NI 9219.....	27
Figura 15 – Janela de Aperto.....	28
Figura 16 – Parafuso Sensorizado.....	29
Figura 17 – ZwickRoell Vibrophore 600.....	30
Figura 18 – Verificação da Linearidade da colagem do Strain Gauge.....	31
Figura 19 – Esquemático da Proposta.....	31
Figura 20 – Código utilizado para calibração inicial.....	32
Figura 21 - Resistores de 120 Ω e 0,05%.....	32
Figura 22 – Ponte de WheatStone Confeccionada.....	32
Figura 23 – Ponte Ômega BCM-2-120R.....	33
Figura 24 – Apertadeira utilizada.....	33
Figura 25 – Linearidade da ponte proposta.....	34
Figura 26 – Linearidade da calibração.....	36
Figura 27 – Código Final.....	37
Figura 28 – Resultados Individuais – Validação N°1 – Spider 8.....	39
Figura 29 – Resultados Individuais – Validação N°1 – NI 9219.....	39
Figura 30 – Resultados Individuais – Validação N°1 – Proposta	39
Figura 31 – Resultados Individuais – Validação N°2 – Spider 8.....	39

Figura 32 – Resultados Individuais – Validação N°2 – NI 9219.....	39
Figura 33 – Resultados Individuais – Validação N°2 – Proposta.....	39
Figura 34 – Resultados Comparativos das Validações 1.....	40
Figura 35 – Resultados Comparativos das Validações 2.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valor medido e constante obtida para força aplicada.....	30
Tabela II – Valores medidos pela ponte proposta.....	34
Tabela III – Valores medidos durante a calibração.....	35
Tabela IV – Valores medidos durante as validações.....	38

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{SM}	Alongamento Do Parafuso Dentro Da Junta
A	Área Da Seção Transversal
A_{d3}	Área Da Seção Transversal Do Diâmetro Efetivo De Rosca
ν	Coefficiente De Poisson
f_{PM}	Compressão Da Peça Ou Conjunto De Peças Na Junta
l	Comprimento
l_{SK}	Comprimento Da Cabeça Do Parafuso
l_M	Comprimento Da Parte Roscada Do Parafuso
l_G	Comprimento Da Rosca Da Porca
l_{GM}	Comprimento Total Da Parte Roscada Da Junta
i_i	Corrente Elétrica Na Ponte
ε ou f	Deformação
d	Diâmetro Do Parafuso
$\frac{dQ}{Q}$	Efeito De Variação De Geometria Ou Temperatura Sobre A Resistência
F	Força Aplicada
F_M	Força De Montagem
E	Módulo De Elasticidade
σ	Pressão
δ	Resiliência
δ_{SK}	Resiliência Da Cabeça Do Parafuso
δ_{GM}	Resiliência Da Parte Roscada
δ_P	Resiliência Da Placa
δ_M	Resiliência Da Rosca Do Parafuso
δ_G	Resiliência Da Rosca Da Porca
δ_1	Resiliência De Haste 1
δ_2	Resiliência De Haste 2
δ_{Gew}	Resiliência De Rosca
δ_s	Resiliência Do Parafuso
R_0	Resistência Inicial Do Strain Gauge
R_i	Resistência Na Ponte
V_{ex}	Tensão De Excitação Aplicada À Ponte
V_{out}	Tensão De Saída
dR	Variação Da Resistência Elétrica Do Strain Gauge

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa e Objetivos.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	Propriedades Mecânicas.....	15
2.1.1	Juntas Aparafusadas.....	15
2.1.2	Lei de Hooke.....	15
2.1.3	Resiliência.....	17
2.1.4	Força Axial.....	19
2.2	Extensometria.....	20
2.2.1	O Sistema de Medição.....	21
2.2.2	Ponte de Wheatstone.....	21
2.2.3	Configurações de Ponte.....	23
2.2.4	Tensão Mecânica.....	23
2.2.5	Calibração.....	24
2.3	Arduino IDE.....	24
2.3.1	HX711.....	25
2.4	Spider 8.....	26
2.5	National Instruments CompactDAQ.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	Célula de Carga.....	28
3.2	Circuito de Medição.....	31
3.3	Calibração.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5	CONCLUSÃO.....	42
5.1	Trabalhos Futuros.....	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Os fixadores roscados, como parafusos e porcas, são componentes fundamentais em diversas áreas da engenharia, incluindo os setores mecânico, aeroespacial, civil e naval. Sua função principal é assegurar a conexão, fixação e vedação entre elementos estruturais, sendo amplamente utilizados devido ao seu baixo custo, facilidade de instalação e remoção, além da intercambialidade entre componentes. Apesar de sua aparente simplicidade, os fixadores exercem papel crítico na integridade e confiabilidade de estruturas complexas. Em uma ligação aparafusada, o processo de aperto do parafuso gera uma deformação axial que induz uma força interna conhecida como pré-carga, a qual mantém os elementos firmemente unidos. A perda dessa pré-carga ao longo do tempo — provocada por relaxamento do material, variações térmicas ou carregamentos cíclicos — pode comprometer seriamente o desempenho da união mecânica, resultando em falhas como vazamentos, afrouxamento ou até colapso estrutural. Dessa forma, o monitoramento e o controle da pré-carga tornam-se etapas cruciais tanto para o controle de qualidade quanto para a validação de projetos mecânicos (LU; JING; ZHAO, 2023).

Dada a importância de se manter a integridade das conexões aparafusadas, múltiplos métodos de detecção de perda de pré-carga e afrouxamento têm sido propostos ao longo das últimas décadas. Esses métodos incluem medições ultrassônicas baseadas no princípio acustoelástico, sensores piezoelétricos, redes de Bragg de fibra óptica (FBG), sensores de impedância, métodos vibracionais e técnicas de visão computacional. Apesar de oferecerem alta precisão, essas soluções geralmente exigem equipamentos sofisticados e de alto custo, limitando sua aplicação a ambientes laboratoriais ou industriais de grande porte. Nesse cenário, a extensometria — técnica baseada na medição direta da deformação mecânica por meio de strain gauges — destaca-se como uma alternativa eficaz e consolidada para o monitoramento da força em elementos de fixação. Os strain gauges, quando aplicados corretamente na superfície de parafusos, fornecem dados precisos sobre as microdeformações resultantes do aperto, permitindo inferir com elevada sensibilidade a força axial aplicada e, por consequência, a pré-carga existente na união (HUANG *et al.*, 2022).

A instrumentação de fixadores com strain gauges é uma prática amplamente reconhecida tanto em ambientes industriais quanto acadêmicos. Essa abordagem possibilita não apenas a avaliação da qualidade do processo de montagem, mas também o monitoramento em tempo real do comportamento estrutural sob condições de carga complexas, como vibração, ciclos térmicos ou esforços de fadiga. A extensometria se mostra especialmente útil em testes experimentais de validação de modelos numéricos, como aqueles realizados por meio do

método dos elementos finitos (FEM), ao fornecer dados localizados e precisos de deformação em regiões críticas do componente. Além disso, a capacidade de realizar medições contínuas permite que o sistema detecte variações ao longo do tempo, como a perda progressiva de pré-carga, viabilizando estratégias de manutenção preditiva e contribuindo para o aumento da confiabilidade do sistema como um todo (GUTERRES *et al.*, 2024).

No entanto, sua adoção em campo ainda é limitada devido ao custo elevado, à complexidade dos equipamentos e à necessidade de infraestrutura especializada. Essas limitações restringem seu uso a ambientes laboratoriais ou aplicações industriais altamente especializadas, dificultando a adoção em tarefas de campo ou em testes de engenharia mais ágeis. Além disso, a configuração e a operação desses sistemas geralmente exigem conhecimento técnico avançado, o que também inviabiliza sua aplicação em contextos didáticos e prototipagem rápida. Assim, existe uma lacuna entre a demanda industrial por sistemas de medição eficientes e a disponibilidade de soluções acessíveis e adaptáveis para uso em situações reais, especialmente em ambientes onde a mobilidade e o custo são fatores decisivos, como por exemplo, em linhas de montagem (U Sanskruti, 2025).

1.1 Justificativa e objetivos

A necessidade de monitoramento eficiente e acessível de deformações mecânicas em aplicações industriais motiva o desenvolvimento de soluções inovadoras e econômicas, especialmente em ambientes onde as opções comerciais apresentam custos elevados ou limitações de portabilidade. Visa-se, então, por meio deste projeto, estudar as soluções comerciais referentes a extensometria, células de carga e aquisitores de sinais, bem como desenvolver um sistema de aquisição portátil e de baixo custo para a leitura de deformações mecânicas em parafusos instrumentados com strain gauges. A plataforma será baseada em microcontrolador Arduino, utilizando um amplificador específico para sinais de ponte de Wheatstone, e será validada com testes práticos de simulação de força de montagem. Além disso, os resultados obtidos com o sistema proposto serão comparados com soluções comerciais, utilizando métricas como linearidade, faixa de medição, tempo de resposta e custo-benefício, visando avaliar de forma concreta sua precisão, responsividade e aplicabilidade em diferentes contextos de engenharia.

O sistema integra três frentes tecnológicas principais. A primeira está relacionada à compreensão das características mecânicas dos parafusos, permitindo avaliar a força axial —

ou seja, a força exercida ao longo do eixo do parafuso, resultado da tensão aplicada durante o aperto (pré-carga). A segunda frente envolve a extensometria, técnica que utiliza sensores para medir pequenas deformações nos materiais. Para detectar essas variações, é empregado um circuito elétrico chamado ponte de Wheatstone, juntamente com um amplificador de instrumentação, que converte mínimas mudanças de resistência elétrica em sinais elétricos detectáveis. Por fim, a terceira frente consiste no uso de um microcontrolador de baixo custo, responsável pela leitura dos sinais, pelo tratamento digital e pelo envio dos dados para visualização ou armazenamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante o processo de revisão bibliográfica, foram encontrados diversos estudos que abordam tanto os princípios mecânicos relacionados ao comportamento de fixadores. A compreensão adequada das forças atuantes em elementos de fixação, como parafusos submetidos a carregamentos axiais e torcionais, é essencial para o dimensionamento correto de juntas aparafusadas. Trabalhos como o de Junker (1969) destacam a importância da aplicação da pré-carga e sua influência na integridade estrutural das montagens, além de discutirem os desafios associados à perda dessa força ao longo do tempo.

Tanto a aplicação da extensometria como uma alternativa eficiente para a análise experimental de tensões em elementos mecânicos, quanto a utilização de técnicas de instrumentação com extensometria permite investigar fenômenos como a perda de pré-carga, a redistribuição de esforços e a influência de variações térmicas nas forças em diversas áreas. Tais investigações são especialmente relevantes em montagens críticas, como aquelas presentes na indústria automotiva e aeroespacial, onde a confiabilidade das conexões é imprescindível. Assim, a integração entre análise mecânica, extensometria e sistemas de aquisição embarcados configura-se como uma estratégia eficaz para ampliar o entendimento sobre o comportamento estrutural de juntas aparafusadas e promover avanços na engenharia aplicada (HUANG,2022).

Paralelamente, a literatura também apresenta exemplos significativos de desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados de baixo custo, especialmente utilizando plataformas como Arduino e ESP32. Tais estudos reforçam a viabilidade técnica e econômica da utilização de extensometria em projetos aplicados à análise de resistência de materiais, sobretudo em contextos que envolvem cargas reduzidas ou aplicações experimentais de pequeno porte (GULL *et al.*, 2021). A convergência entre os fundamentos da mecânica dos fixadores e as tecnologias acessíveis de instrumentação evidencia uma tendência promissora na integração entre teoria e prática em projetos de engenharia.

2.1 Propriedades Mecânicas

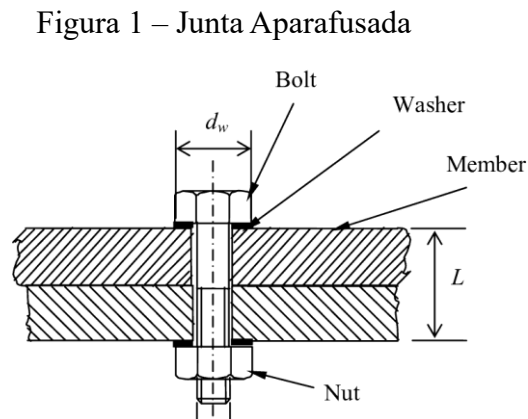
A norma VDI 2230, emitida pela Associação de Engenheiros Alemães (Verein Deutscher Ingenieure), é amplamente reconhecida como referência técnica para o dimensionamento e verificação de juntas aparafusadas em aplicações de engenharia mecânica. Ela fornece diretrizes detalhadas para o cálculo de parafusos submetidos a diferentes tipos de

carregamentos, considerando aspectos como tensões de tração e cisalhamento, influência do torque de aperto, efeitos de pré-carga, comportamento sob fadiga e relaxamento de material.

Sua aplicação baseia-se no uso de fixadores submetidos a cargas constantes ou cíclicas, especificamente para parafusos de alta solicitação. As normas aplicam-se ao dimensionamento de bitolas de diâmetros de 4 a 39 milímetros, com razão do comprimento não engajado do parafuso pelo seu diâmetro (Lk/d) menor que 10, considerando parafusos de aço em temperatura ambiente e rosca com ângulo de 60° (VDI-2230, 2015).

2.1.1 Juntas Aparafusadas

Juntas aparafusadas são conexões mecânicas formadas pela união de dois ou mais componentes utilizando elementos de fixação roscados, como parafusos, porcas e arruelas. Elas funcionam aplicando uma pré-carga em elementos roscados, que geram uma força de compressão nos componentes unidos, garantindo resistência à separação e transferência segura de cargas durante o funcionamento do conjunto, a Figura 1 apresenta um exemplo de fixador montado (VDI-2230, 2015).



Fonte: Tippabhotla (2008)

2.1.2 Lei de Hooke

Beer et al. (2010) menciona que muitas estruturas são projetadas para operar dentro da faixa de deformações pequenas, em que a relação entre tensão e deformação é linear, conforme estabelecido pela Lei de Hooke. Essa lei fundamental da mecânica dos materiais expressa a rigidez intrínseca do material (σ), que determina a sua capacidade de resistir a deformações

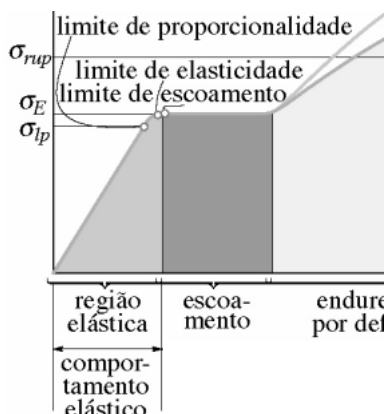
elásticas quando submetido a uma tensão aplicada, a partir do módulo de Young do material (E) e da deformação ocasionada (ε), Equação 1.

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

Essa propriedade é crucial para a análise estrutural, pois permite prever o comportamento do material sob cargas dentro do limite elástico, garantindo que a estrutura mantenha sua integridade sem sofrer deformações permanentes. O limite até o qual essa proporcionalidade é válida é denominado limite de proporcionalidade, o qual, em materiais dúcteis, coincide aproximadamente com o ponto de escoamento.

Um material é considerado elástico quando as deformações provocadas por uma força desaparecem completamente após a remoção dessa carga. O maior valor de tensão que o material suporta mantendo esse comportamento é denominado limite elástico. Para materiais com ponto de escoamento bem definido, o limite elástico, o limite de proporcionalidade e o ponto de escoamento praticamente coincidem, caracterizando uma resposta linear até esse limite. Ao ultrapassar o ponto de escoamento, ocorrem deformações permanentes (plásticas), evidenciadas na Figura 2, devido ao fato de a deformação não retornar a zero após a retirada da carga, Beer et al (2010).

Figura 2 – Diagrama Tensão x Deformação do aço



Fonte: Adaptado de Hibbeler, R. C. (2010)

Por sua vez, a ISO 898-1 (2013) é uma norma internacional que especifica os requisitos mecânicos e físicos para parafusos, parafusos de cabeça sextavada, prisioneiros e elementos de fixação semelhantes fabricados em aço carbono e aço liga temperados e revenidos. Definindo aspectos como a classe de resistência Mecânica define os valores mínimos de limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e dureza para diferentes classes de parafusos.

2.1.3 Resiliência

A VDI 2230, Parte 1 (2015), menciona que a resiliência elástica (δ) indica a capacidade de um corpo se deformar elasticamente sob a ação de uma força F aplicada. O conhecimento da resiliência tanto do parafuso quanto da junta é essencial para determinar o parafuso. Partindo da Lei de Hooke, e da área da seção transversal (A) da região de análise do fixador e da deformação gerada (f), onde l representa o comprimento a ser deformado da seção de análise, tem-se as seguintes equações:

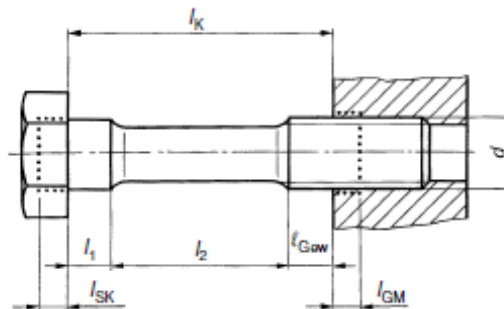
$$f = \frac{F \cdot l}{E \cdot A} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{F}{A} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{f}{F} \rightarrow \delta = \frac{l}{E \cdot A} \quad (4)$$

Assim, o cálculo da resiliência total de um parafuso é composto por um número finitos de elementos individuais, os quais podem ser substituídos por copos cilíndricos de vários comprimentos l e de várias seções transversais, como indica a Figura 3.

Figura 3 – Elementos para cálculo de resiliência de parafusos



Fonte: VDI 2230, Parte 1 (2015)

Dessa forma, como cada elemento do parafuso está conectado, então a resiliência do parafuso (δ_s) se dá pela somatória das resiliências de cada seção, com diferentes comprimentos (l_i) e áreas de seções transversais (A_i), além de outras características.

$$\delta_s = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (5)$$

Onde,

$$\delta_i = \frac{f_i}{F} = \frac{l_i}{E_s \cdot A_i} \quad (6)$$

Portanto, a resiliência total do parafuso, será a somatória das resiliências da cabeça (δ_{SK}), das hastes (δ_i), da parte não engajada da rosca (δ_{Gew}) e da parte roscada (δ_{GM}).

$$\delta_s = \delta_{SK} + \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_{Gew} + \delta_{GM} \quad (7)$$

Entretanto, para o cálculo da resiliência, é necessário considerar alguns fatores, onde adota-se diferentes valores para o cálculo do comprimento da cabeça (l_{SK}) do fixador, a depender se a montagem é realizada com chave externa ou interna, são eles:

$$l_{SK} = 0,5 \cdot d \text{ Para parafusos com chave externa} \quad (8)$$

$$l_{SK} = 0,4 \cdot d \text{ Para parafusos com chave interna} \quad (9)$$

Ademais, a resiliência da parte não engajada da rosca é determinada pela secção transversal de menor diâmetro da rosca (A_{d3}):

$$\delta_{Gew} = \frac{l_{Gew}}{E_s \cdot A_{d3}} \quad (10)$$

Por sua vez, para a porção de rosca engajada (δ_{GM}), é considerado a resiliência do núcleo da parte engajada da rosca (δ_G) mais o deslocamento elástico dos filetes (δ_M):

$$\delta_{GM} = \delta_G + \delta_M \quad (11)$$

$$l_{GM} = l_G + l_M \quad (12)$$

Onde adota-se diferentes valores para o cálculo do comprimento baseado se a montagem é com porca ou furo roscado, são eles:

$$l_G = 0,5 \cdot d \quad (13)$$

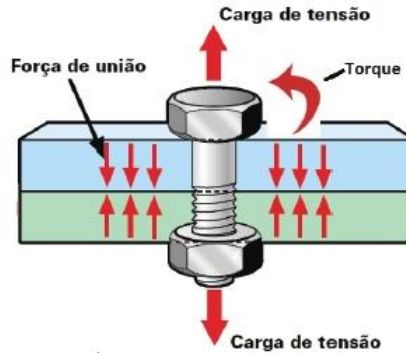
$$l_M = 0,4 \cdot d \text{ Para montagens com Porca} \quad (14)$$

$$l_M = 0,33 \cdot d \text{ Para montagens em furo roscado} \quad (15)$$

2.1.4 Força Axial

Conforme a VDI 2230 (2015), em uma junta aparafusada, as placas são comprimidas pelo carregamento aplicado. Dessa forma, a pré-carga no parafuso possui a mesma magnitude da pré-carga na junta, porém em sentido oposto. Assim, no estado montado e na ausência de carga externa, a força de pré-carga no parafuso é igual à força de pré-carga na junta, enquanto a pré-carga nas placas corresponde à carga de formação da junta, Figura 4.

Figura 4 – Forças atuantes durante processo de aperto



Fonte: Ensus (2018)

Na maioria dos casos simples, sem carga externa de trabalho, o parafuso é o único elemento responsável por gerar a força de aperto. Durante o aperto, o parafuso sofre um alongamento elástico (f_{SM}) resultante da pré-carga de montagem (F_{SM}), Figura 5. O alongamento do parafuso pode ser calculado pelas equações:

$$f_{SM} = \delta_S \cdot F_{SM} \quad (16)$$

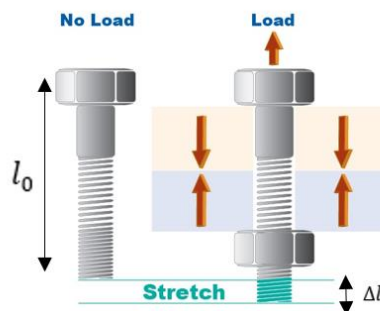
Enquanto as placas são comprimidas de acordo com a equação:

$$f_{PM} = \delta_P \cdot F_{PM} \quad (17)$$

No estado de montagem as deformações no conjunto são dadas pelas somas das deformações do parafuso e da chapa, como mostra a equação:

$$f_{SM} + f_{PM} = (\delta_S + \delta_P) \cdot F_M \quad (18)$$

Figura 5 – Deformações sob carga



Fonte: Adaptado Advanced Torque Products (2025)

2.2 Extensometria

O funcionamento dos strain gauges baseia-se na variação da resistência elétrica de um material condutor quando este é submetido a deformação mecânica. Para interpretar essa variação com elevada sensibilidade e confiabilidade, emprega-se tradicionalmente a configuração de medição conhecida como ponte de Wheatstone, que equilibra o sinal e possibilita detectar alterações mínimas de resistência, convertendo-as em tensão elétrica. Quando associada a amplificadores, essa configuração permite a leitura de micro deformações com excelente relação sinal-ruído. A extensometria, por sua vez, oferece alta precisão em medições estáticas ou dinâmicas diretamente relacionadas à deformação do material, o que a torna especialmente adequada para o monitoramento de fixadores em operação (Hoffman, 1989).

Esse método de medição remonta à descoberta de Robert Hooke, em 1678, ao identificar a relação proporcional entre tensão e deformação, hoje consagrada como Lei de Hooke. A partir desse princípio, desenvolveu-se a análise experimental de tensões, fundamentada na medição precisa das deformações sofridas por materiais sob carga (Beer et al., 2010). Na prática, a medição com *strain gauges* parte do pressuposto de que a deformação do objeto é transmitida integralmente a um sensor colado à superfície do material. Nos modelos resistivos, essa deformação provoca alongamento ou compressão física da resistência, decorrente de mudanças em seu comprimento, área de seção transversal e microestrutura, resultando em uma variação mensurável na resistência elétrica do sensor (Hoffman, 1989).

A partir das deformações medidas e das propriedades conhecidas do material, como o módulo de elasticidade e a razão de Poisson, é possível determinar o valor absoluto e a direção das tensões mecânicas atuantes, Equações fundamentais do strain gauge resistivo (19 e 20). Onde dR representa a variação da resistência do strain gauge causada pela deformação e por outros fatores; $\varepsilon(1+2\nu)$ descreve a mudança geométrica, incluindo o alongamento e o efeito transversal de Poisson, sendo a deformação ε definida como a variação do comprimento dividida pelo comprimento inicial; R_0 é a resistência elétrica inicial do strain gauge; e $\frac{dQ}{Q}$ representa a contribuição da variação piezoresistiva. Esses cálculos se baseiam na Lei de Hooke, válida na faixa de deformação elástica de materiais linearmente elásticos (Hoffman, 1989).

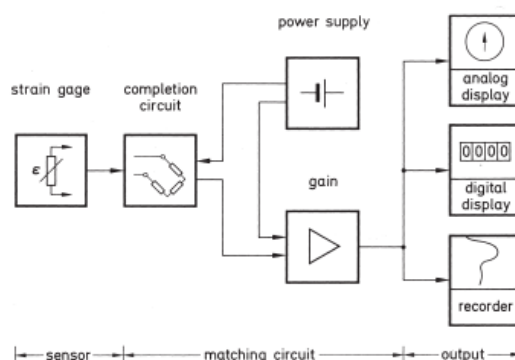
$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{dQ}{Q} \quad (19)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (20)$$

2.2.1 O Sistema de Medição

Hoffman (1989), apresenta que a medição de deformações com strain gauges requer alta precisão, pois as variações de resistência elétrica provocadas pelas deformações na região linear. Para garantir essa sensibilidade, o strain gauge é integrado a um sistema composto por quatro elementos principais, Figura 6. O primeiro é o próprio sensor, responsável por converter a deformação mecânica em variação de resistência. O segundo é o circuito de medição, geralmente uma ponte de Wheatstone, que detecta essa variação. Como ambos são componentes passivos, é necessário fornecer energia externa, normalmente uma tensão constante, para gerar um sinal mensurável. Quando ocorre deformação, a ponte se desequilibra e produz uma tensão de saída proporcional à variação sofrida. O terceiro elemento é o amplificador, que eleva essa tensão a um nível adequado para leitura, e, por fim, o quarto é o dispositivo de exibição, que apresenta o valor da deformação medida.

Figura 6 – Diagrama de sistemas necessários para medição de Strain Gauges



Fonte: Hoffman (1989)

2.2.2 Ponte de Wheatstone

Alciatore e Histan (2012), apresentam o equacionamento do circuito mais utilizado para medir pequenas variações de resistência, a ponte de Wheatstone, formada por quatro resistores interligados e alimentada por uma tensão contínua (DC). Essa configuração é preferida em relação a um simples divisor de tensão por permitir fácil balanceamento para estabelecer uma posição zero precisa, oferecer compensação de temperatura e proporcionar

maior sensibilidade e precisão. A ponte de Wheatstone pode operar em dois modos principais: o estático ou desequilibrado.

No modo estático, R_2 e R_3 são resistores de precisão, R_4 é um potenciômetro também de precisão com escala calibrada e R_1 corresponde ao strain gauge cuja resistência será monitorada, Figura 7. A tensão de excitação V_{ex} é a tensão DC aplicada à ponte. Para equilibrar o circuito, ajusta-se R_4 até que a diferença de tensão entre os pontos A e B seja zero. Nesse estado, as tensões nos nós A e B são iguais, permitindo medir com precisão a resistência do strain gauge e, a partir dela, calcular a deformação. Embora o modo estático seja útil para medir resistência sob carga fixa, na prática o balanceamento é usado principalmente como etapa inicial antes de registrar variações de resistência ao longo do tempo, seguindo as equações abaixo.

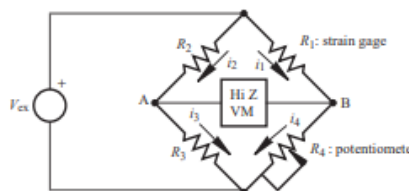
$$i_1 R_1 = i_2 R_2 \quad (21)$$

$$i_1 = i_4 = \frac{V_{ex}}{R_1 + R_4} \quad (22)$$

$$i_2 = i_3 = \frac{V_{ex}}{R_2 + R_3} \quad (23)$$

$$R_1 = \frac{R_4 R_2}{R_3} \quad (24)$$

Figura 7 – Circuito de Ponte Balanceado



Fonte: Alciatore e Histan (2012)

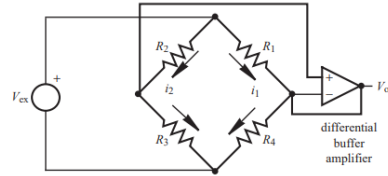
No modo de operação por deflexão desequilibrada, a ponte de Wheatstone é inicialmente balanceada antes da aplicação de cargas, e qualquer variação na resistência de R_1 causada por esforços ao longo do tempo gera uma tensão de saída proporcional à deformação. Essa diferença é então aplicada a um amplificador diferencial com retroalimentação negativa, que garante linearidade, estabilidade e alta rejeição de sinais em modo comum. Essa tensão pode ser expressa em função das correntes nos resistores, permitindo analisar em tempo real os esforços dinâmicos no componente. Obtendo as seguintes equações:

$$V_{out} = i_1 R_1 - i_2 R_2 = -i_1 R_4 + i_2 R_3 \quad (25)$$

$$V_{ex} = i_1 (R_1 + R_4) = i_2 (R_2 + R_3) \quad (26)$$

$$V_{out} = V_{ex} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) \quad (27)$$

Figura 8 – Circuito de Ponte Desbalanceado



Fonte: Alciatore e Hstrand (2012)

2.2.3 Configurações de Ponte

As configurações da ponte de Wheatstone com strain gauges podem ser classificadas em 1/4, meia ou ponte completa. Na configuração de 1/4 de ponte, utiliza-se apenas um strain gauge e três resistores, o que a torna mais simples e econômica, porém menos sensível e mais vulnerável a variações de temperatura e ruídos (HBM, 2025).

A meia ponte (Half-bridge) emprega dois sensores, aumentando a sensibilidade e permitindo compensação térmica parcial. Nesse caso, o segundo sensor, *dummy gauge*, é fixado a uma amostra não carregada, mas feita do mesmo material e mantida próxima ao componente medido. Assim, qualquer variação de resistência provocada pela temperatura afeta igualmente ambos os sensores, anulando-se no circuito e deixando o sinal final responder apenas à deformação do sensor ativo (HBM, 2025).

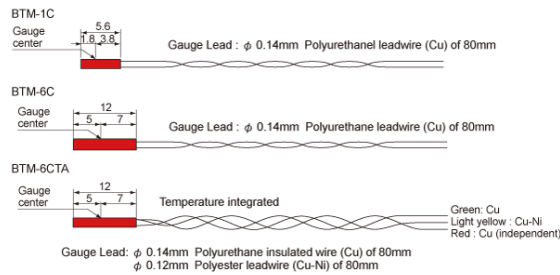
Já a ponte completa utiliza quatro strain gauges, garantindo a maior sensibilidade e excelente compensação térmica, sendo a escolha ideal para medições de alta precisão (HBM, 2025).

2.2.4 Tensão Mecânica

A tensão mecânica é a força interna que surge em um material quando ele é submetido a cargas externas ou internas, as quais podem ser classificadas quanto ao tipo, tensões normais (tração e compressão) e tensões de cisalhamento e torcional. As tensões normais aparecem quando forças de tração ou compressão atuam ao longo do mesmo eixo, esticando ou comprimindo o material. Já as tensões de cisalhamento e torcional ocorrem quando forças atuam em direções opostas, porém em planos paralelos, tendendo a deslizar uma parte do material em relação à outra (Hoffman, 1989).

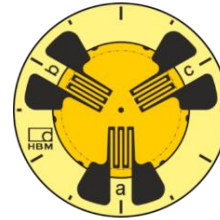
O manual da HBM (2025), apresenta orientações para a seleção de strain gauges conforme a aplicação. De forma geral, para medições de cargas lineares, recomenda-se o uso de strain gauges lineares, enquanto, em situações que envolvem esforços de torção ou cisalhamento, indica-se a utilização de rosetas, conforme ilustrado nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Strain Gauge Linear



Fonte: Tokyo Measurement Instruments (2025)

Figura 10 – Strain Gauge Roseta



Fonte: HBM (2025)

2.2.5 Calibração

A medição consiste em determinar o valor de uma grandeza física e expressá-lo numericamente ou em outra forma convertida. Para isso, utiliza-se um sistema composto por um transdutor, responsável pela etapa de entrada, e um dispositivo de saída, formando a chamada “cadeia de medição”. A precisão desse processo depende da calibração do equipamento, que garante que o valor indicado corresponda ao valor real da grandeza. Dessa forma, é possível estimar o valor desejado de células desconhecidas a partir da constante de calibração (Hoffman, 1989; HBM, 2025).

$$\text{Medição} = \text{Valor Lido} \times \text{Fator de Calibração} \quad (28)$$

2.3 Arduino IDE

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto baseada em hardware e software de fácil utilização, desenvolvida com o objetivo de tornar a programação e o controle de sistemas embarcados mais acessíveis. Seu núcleo é formado por uma placa com microcontrolador, e por um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) que permite a criação e compilação de códigos. Além disso, o Arduino conta com pinos de entrada e saída digitais e analógicos, comunicação serial, e suporte a múltiplos protocolos como I²C e SPI. Essa

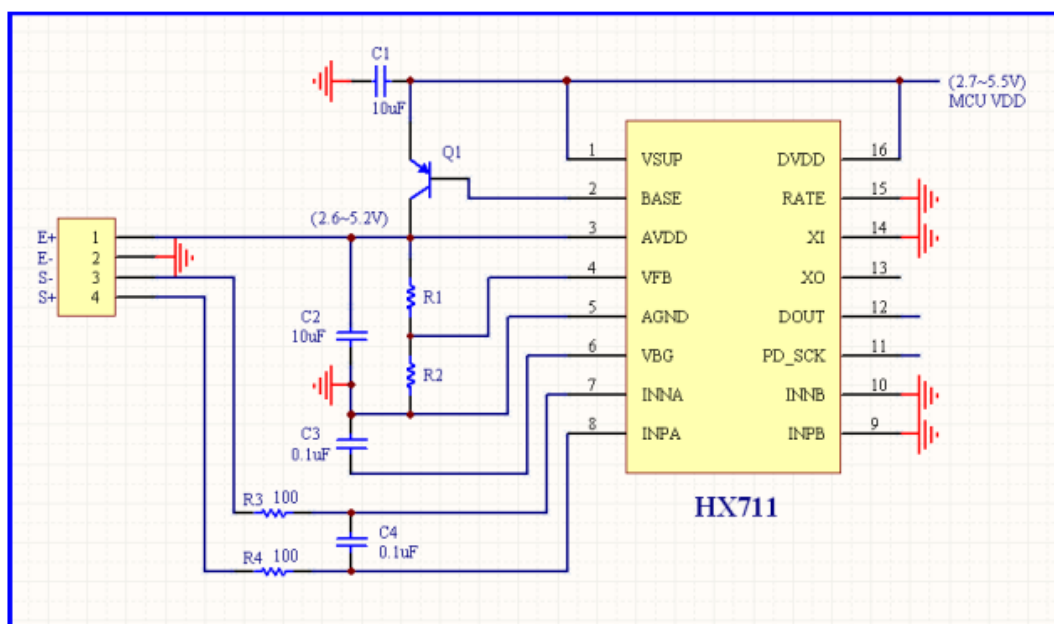
arquitetura torna a plataforma possível para aplicações de sistemas de aquisição de dados, uma vez que torna possível a leitura dos dados do amplificador operacional (Arduino, 2025).

2.3.1 HX711

O módulo circuito integrado HX711, Figura 11, é um amplificador operacional, utilizado em sistemas de aquisição de dados que empregam strain gauges e células de carga. Este componente integra, em um único encapsulamento, funções de amplificação de sinal e conversão analógico-digital com resolução de 24 bits, possibilitando a leitura de sinais de baixa amplitude típicos de strain gauges, assim amplificando o sinal com ganho programável e convertê-lo para formato digital (AVIA, 2016).

A comunicação com plataformas como Arduino e ESP32 ocorre de forma simplificada por meio de dois pinos, e a alimentação é compatível com tensões entre 2,7 V e 5,5 V. O módulo possui dois canais diferenciais, com aplicação típica em configurações de ponte de Wheatstone para conexão de células de carga de quatro fios. Além disso, a saída do HX711 fornece um valor digital bruto ("raw value"), que representa a leitura direta do sinal amplificado antes de qualquer calibração. Com resolução de 24 bits, este valor pode variar entre $-8.388.608$ e $+8.388.607$, correspondendo aos limites da faixa dinâmica do conversor (AVIA, 2016).

Figura 11 – Esquemático do módulo integrado HX711



Fonte: AVIA (2016)

2.4 Spider 8

O Spider 8, Figura 12, é um sistema eletrônico de medição para computadores, desenvolvido para a aquisição elétrica de variáveis mecânicas, como deformação, força, pressão, deslocamento, aceleração e temperatura. Em um único módulo compacto, concentra todas as funções necessárias para o condicionamento de sinais, incluindo excitação para transdutores passivos, amplificação, digitalização, interface com o computador e recursos de conexão, com capacidade para até oito canais simultâneos. Todas as configurações são executadas diretamente via software, dispensando o uso de potenciômetros, chaves, pontes de solda ou jumpers. (HBM, 2003).

Figura 12 – DAQ Spider 8



Fonte: HBM (2003)

2.5 National Instruments CompactDAQ

O CompactDAQ, Figura 13, é uma plataforma de aquisição de dados desenvolvida pela National Instruments, projetada para oferecer flexibilidade e precisão na coleta e processamento de informações provenientes de diversos sensores. Essa plataforma integra módulos de entrada e saída de dados (data I/O) com suporte a diferentes tipos de sinais, possibilitando a utilização em aplicações laboratoriais e industriais. O sistema é gerenciado por um módulo controlador de chassi, responsável pela comunicação entre até oito módulos de E/S e um computador. Esse controlador incorpora um sistema de temporização interno, que sincroniza a aquisição de dados de todos os módulos conectados, assegurando maior precisão, consistência e confiabilidade nas medições (National Instruments, 2017).

O NI 9219, Figura 14, é um módulo universal da série C, projetado para testes multipropósito em qualquer chassi NI CompactDAQ ou CompactRIO. Ele permite a medição de diversos sinais provenientes de sensores como strain gauges, RTDs, termopares, células de carga e outros sensores alimentados. Cada um dos quatro canais é configurável de forma

independente, possibilitando a realização de diferentes tipos de medição simultaneamente. As faixas de medição variam conforme o tipo de sinal, incluindo até ± 60 V para tensão e ± 25 mA para corrente (National Instruments, 2017).

Figura 13 – CompactDAQ



Fonte: National Instruments (2017)

Figura 14 – Cartucho NI 9219



Fonte: National Instruments (2017)

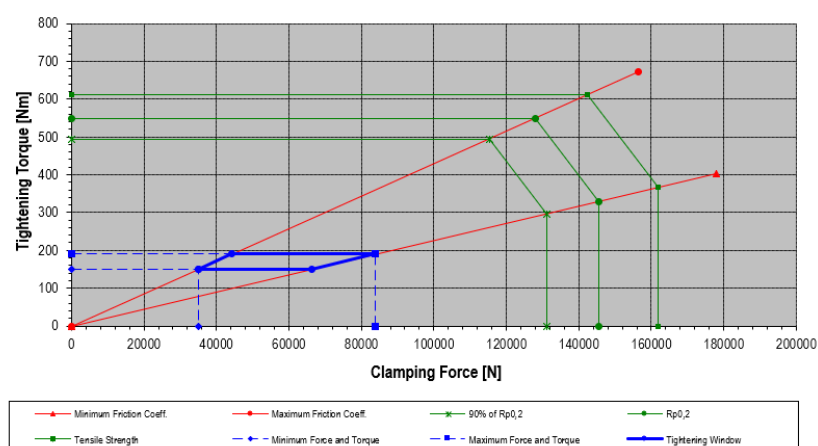
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são descritas as etapas empregadas para o desenvolvimento do programa, detalhando os processos e ferramentas utilizados para garantir que o projeto final atendesse aos objetivos estabelecidos. Primeiramente, aborda-se a escolha e a sensorização do parafuso que será utilizado como célula de carga. Em sequência, é explicado o processo de implementação da ponte de Wheatstone. Por fim, são apresentados os procedimentos adotados para a calibração e testes de bancadas para validação.

3.1 Célula de Carga

Inicialmente, foi necessária a seleção de um fixador adequado para a realização dos ensaios, de modo a possibilitar a aplicação e validação de diferentes valores de força durante as medições. Para tal, optou-se pela utilização de um parafuso de aço com diâmetro nominal de 16 mm, com passo de rosca de 2 mm e classe de resistência 10.9, com 100 mm de comprimento. Essa configuração garante capacidade para suportar elevados níveis de carregamento sem que o fixador atinja a região de deformações plásticas ($R_{p0,2}$), o que resultaria em deformação permanente e inviabilizaria a aplicação da extensometria. A Figura 15 expressa a janela de aperto, relação Torque X Força, para dimensionamento do fixador utilizado.

Figura 15 – Janela de aperto

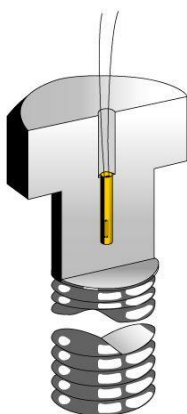


Fonte: Autoria Própria

Diante disso, foram idealizados os dispositivos de ensaio nos quais o conjunto seria montado, tomando como referência aplicações reais de uniões compostas por furo roscado, porca, placa e fixador. Optou-se por sensorizar o próprio fixador, que considerando que as deformações ocorrem predominantemente em um único sentido, foi empregado um strain gauge linear.

O estudo apresentado em (Pan; Yamaguchi; Suzuki, 2011) discute métodos de colagem aplicáveis a essa técnica, sendo adotada, neste trabalho a estratégia de perfuração interna, com espessura semelhante à do sensor, a fim de permitir a inserção adequada do dispositivo. O Strain Gauge utilizado assim como resina para proteção, fixação e centralização, foram os “Bolt strain Gauge Series BTM/BTMC”, da Tokyo Measurement Instruments, dispositivos próprios para extensometria em parafusos. Após a colagem da célula de carga, obteve-se um modelo similar a ilustrada na Figura 16.

Figura 16 – Parafuso Sensorizado



Fonte: ZSE (2025)

Após a fabricação da célula de carga, tornou-se necessário verificar a confiabilidade de suas leituras, uma vez que uma colagem inadequada poderia comprometer a validade dos ensaios subsequentes. Para essa etapa de validação, os testes foram conduzidos em uma máquina de ressonância ZwickRoell Vibrophore 600, a qual também pode operar como equipamento de ensaio estático, com capacidade de tração e compressão de até 600 kN, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – ZwickRoell Vibrophore 600



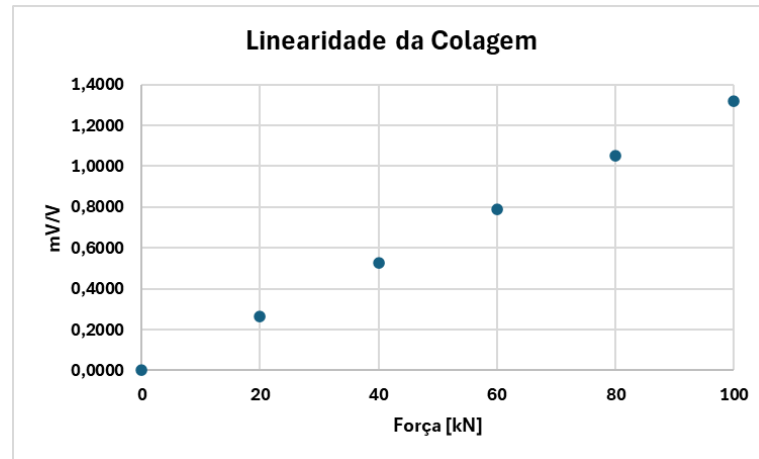
Fonte: ZwickRoell (2025)

Assim, para a validação dos dados, foi utilizado o sistema de aquisição DAQ Spider 8, onde o parafuso sensorizado foi submetido a ensaios na máquina de tração sob diferentes níveis de carga. Durante os testes, registraram-se, por meio do DAQ, os valores de variação em mV/V, os quais foram posteriormente analisados com o objetivo de verificar a linearidade da resposta do sensor e determinar a constante de proporcionalidade da equação da reta que descreve essas deformações. Como resultado, obteve-se um comportamento linear, com constante aproximada de 76,0, assim como mostram a Tabela I e a Figura 18.

Tabela I – Valor medido e constante obtida para força aplicada

Linearidade da Colagem		
Força [kN]	mV/V	Constante K
0	0,0000	0,00
20	0,2631	76,02
40	0,5250	76,19
60	0,7912	75,83
80	1,0513	76,10
100	1,3174	75,91

Figura 18 – Verificação da Linearidade da colagem do Strain Gauge

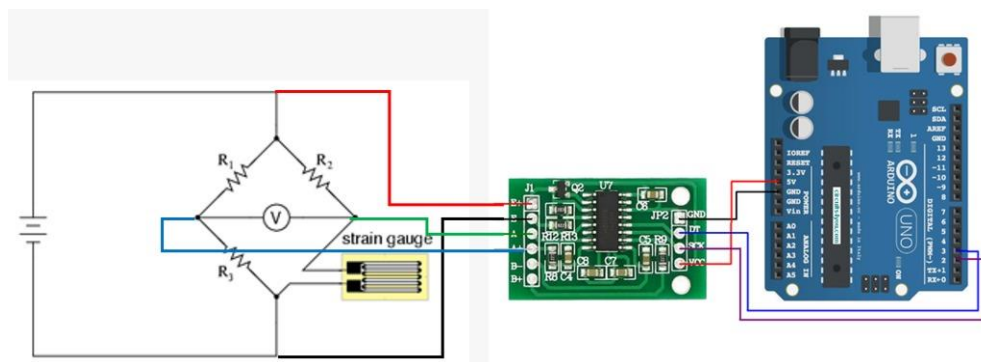


Fonte: Autoria Própria

3.2 Circuito de Medição

Seguindo os princípios da extensometria e as especificações técnicas presentes nos datasheets do Arduino e do módulo HX711, foi desenvolvido um sistema de aquisição conforme ilustrado na Figura 19. Nesse arranjo, o parafuso sensorizado foi integrado a uma ponte de Wheatstone, composta por resistores de $120\ \Omega$, cuja saída foi conectada ao módulo amplificador HX711, responsável por condicionar o sinal e transmiti-lo ao Arduino para posterior processamento.

Figura 19 – Esquemático da Proposta



Fonte: Robotshop (2019)

No Arduino IDE, é possível utilizar códigos fundamentais para a etapa de testes e calibração do sistema. O código ilustrado na Figura 20 implementa um prompt que permite verificar se a leitura proveniente do amplificador está sendo corretamente realizada. Além disso, o programa apresenta a variação captada pelo sistema em forma de *raw value*, ou seja, um valor

digital resultante da conversão do sinal analógico efetuada pelo módulo, o que possibilita confirmar o funcionamento adequado da aquisição de dados.

Figura 20 – Código utilizado para calibração inicial

```

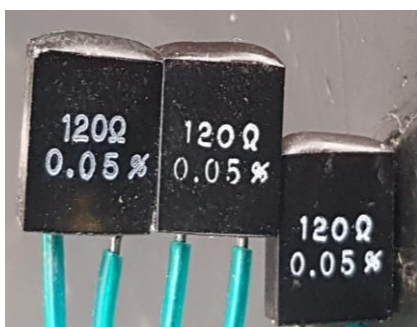
1  #include "HX711.h"
2
3  // HX711 circuit wiring
4  const int LOADCELL_DOUT_PIN = 2;
5  const int LOADCELL_SCK_PIN = 3;
6
7  HX711 scale;
8
9  void setup() {
10     Serial.begin(57600);
11     scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);
12 }
13
14 void loop() {
15
16     if (scale.is_ready()) {
17         long reading = scale.read();
18         Serial.print("HX711 reading: ");
19         Serial.println(reading);
20     } else {
21         Serial.println("HX711 not found.");
22     }
23
24     delay(1000);
25 }
26
27

```

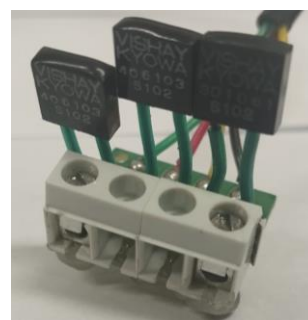
Fonte: Autoria Própria

Dessa forma, diferentes configurações de ponte foram avaliadas. Inicialmente, a montagem foi realizada em protoboard, utilizando resistores comerciais de 120 Ω com tolerância de 1%. Nessa configuração, não foram observadas variações significativas nos dados, independentemente da carga aplicada. Em seguida, optou-se pela utilização de um completador de ponte isolado, empregando resistores de precisão de 0,05%, Figuras 21 e 22. Essa abordagem apresentou resultados mais consistentes; entretanto, ainda se verificaram variações relevantes decorrentes de interferências de ruído elétrico e flutuações de temperatura.

Figura 21 – Resistores de 120 Ω e 0,05% Figura 22 – Ponte de WheatStone Confeccionada



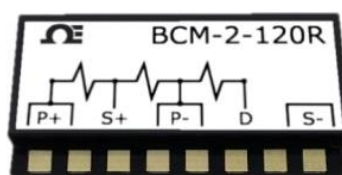
Fonte: Autoria Própria



Fonte: Autoria Própria

Uma terceira configuração de ponte foi adotada, desta vez utilizando o módulo completador de ponte Ômega BCM-2-120R, que conta com blindagem eletromagnética e um módulo dummy destinado à compensação de temperatura. Com essa solução, foi possível obter leituras consistentes e com baixa variação, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Ponte Ômega BCM-2-120R



Fonte: Omega Engineering (2025)

Para a validação experimental do sistema desenvolvido, o parafuso foi submetido a diferentes níveis de aperto, permitindo a análise da resposta do sensor e do comportamento mecânico do elemento de fixação, utilizando uma apertadeira de bancada da Atlas Copco, similar a Figura 24.

Figura 24 – Apertadeira utilizada



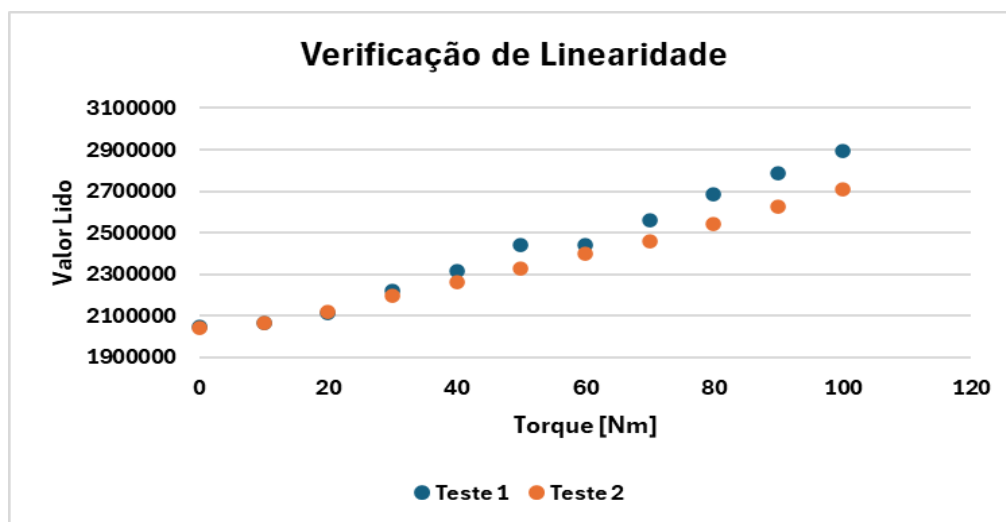
Fonte: Autoria Própria

O objetivo desses ensaios foi verificar a linearidade do sistema de medição e a consistência das leituras obtidas em condições controladas. Os resultados obtidos durante os testes estão apresentados na Tabela II e a Figura 25.

Tabela II – Valores medidos pela ponte proposta

Verificação de Linearidade na Ponte Proposta		
Torque [Nm]	Teste 1	Teste 2
0	2046000	2044000
10	2067000	2066000
20	2111000	2119000
30	2219000	2198000
40	2319000	2260000
50	2443000	2326000
60	2443000	2401000
70	2559000	2460000
80	2685000	2540000
90	2786000	2625000
100	2895000	2707000

Figura 25 – Linearidade da ponte proposta



Fonte: Autoria Própria

Verificando-se dessa forma que, para aplicações práticas, o sistema apresenta comportamento linear consistente, demonstrando sua confiabilidade e adequação para utilização em medições reais de força.

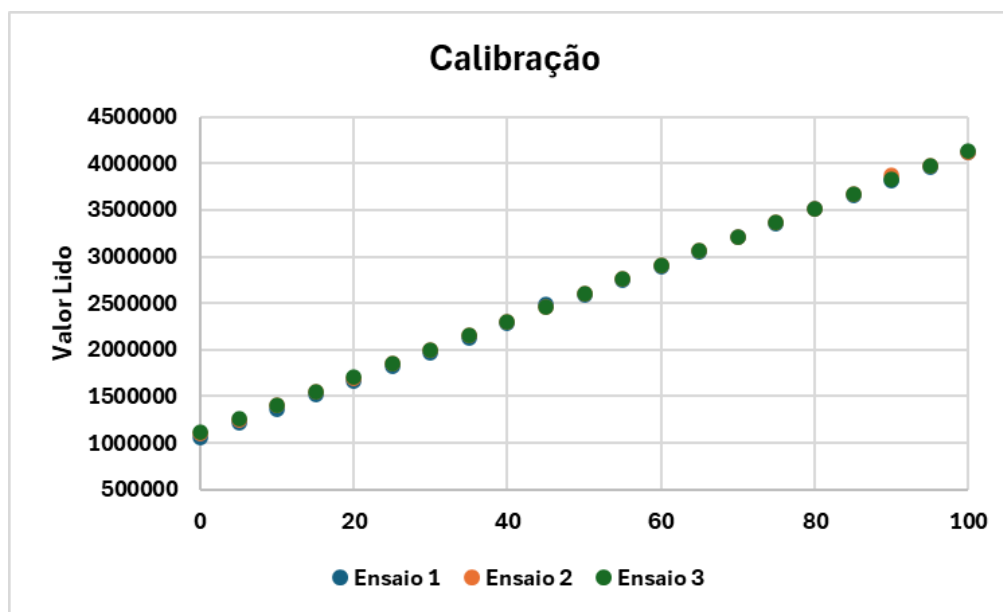
3.3 Calibração

Uma vez verificado que o sistema desenvolvido atende aos critérios de linearidade, tornou-se necessário proceder à calibração do dispositivo, de modo a permitir a conversão do raw value obtido pelo Arduino em valores de força efetivos. Para este fim, o parafuso instrumentado, conectado ao sistema de aquisição, foi submetido a ensaios de tração controlada, variando-se a força aplicada de 0 a 100 kN. Em cada nível de carga, registrou-se o raw value fornecido pelo sistema, onde o procedimento foi repetido três vezes para aumentar a confiabilidade das medições, resultando nos dados apresentados na Tabela III e Figura 25:

Tabela III – Valores medidos durante a calibração

Calibração em Tração			
Força [kN]	Valor Lido		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
0	1058000	1102000	1116000
5	1213000	1248000	1261500
10	1365000	1406000	1407000
15	1520000	1553000	1553500
20	1670000	1698000	1700000
25	1822000	1850000	1851000
30	1973000	1998000	2002000
35	2127000	2153000	2151500
40	2281000	2306000	2301000
45	2487000	2453000	2453500
50	2594000	2606000	2606000
55	2742000	2760000	2757500
60	2895000	2905000	2909000
65	3047000	3058000	3062000
70	3203000	3215000	3215000
75	3355000	3364000	3367500
80	3508000	3515000	3520000
85	3660000	3670000	3674000
90	3812000	3875000	3828000
95	3961000	3977000	3979000
100	4120000	4124000	4130000

Figura 26 – Linearidade da calibração



Fonte: Autoria Própria

A linearidade identificada na resposta do sensor ao incremento de carga reforça a confiabilidade do método adotado para a calibração. Essa característica é fundamental, pois permite prever com segurança o comportamento do sistema em diferentes faixas de carregamento, minimizando a necessidade de correções adicionais.

A análise dos dados revelou que o sistema apresenta constância e repetibilidade nas três medições realizadas durante a calibração. Observou-se que, para um sistema estático sem aplicação de carga (0 kN), a média das leituras foi de 1.092.000, enquanto cada incremento de 1 kN aplicado correspondeu a um aumento médio de 30.300 no valor lido pelo sensor.

Com base nesses parâmetros, os valores obtidos foram incorporados ao código, Figura 26, permitindo definir o valor inicial de referência e realizar a conversão das leituras brutas em força aplicada, garantindo precisão e confiabilidade nas medições subsequentes.

Figura 27 – Código Final

```

1  #include "HX711.h"
2
3  // HX711 circuit wiring
4  const int LOADCELL_DOUT_PIN = 2;
5  const int LOADCELL_SCK_PIN = 3;
6
7  HX711 scale;
8
9  // valores de calibração
10 const long ZERO_OFFSET = 1092000; // valor de tara (zero)
11 const float DIVISOR = 30300.0;    // fator de conversão para kN
12
13 void setup() {
14     Serial.begin(57600);
15     scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);
16 }
17
18 void loop() {
19     if (scale.is_ready()) {
20         long reading = scale.read();
21
22         // aplica a tara e a conversão
23         float force_kN = (reading - ZERO_OFFSET) / DIVISOR;
24
25         Serial.print("Força: ");
26         Serial.print(force_kN, 3); // mostra com 3 casas decimais
27         Serial.println(" kN");
28     } else {
29         Serial.println("HX711 not found.");
30     }
31
32     delay(1000);
33 }
34

```

Fonte: Autoria Própria

O código desenvolvido incorpora a tara do sistema, definindo o offset inicial com base nas medições estáticas do sensor antes do início das leituras efetivas. Essa etapa é fundamental para que os dados adquiridos sejam interpretados a partir de um ponto de referência confiável, eliminando qualquer influência de variações iniciais ou ruído do equipamento.

Após a definição do offset, o sistema inicia a leitura contínua dos valores do sensor, que são posteriormente processados com base na constante de calibração previamente determinada. A aplicação dessa constante permite que cada valor bruto registrado pelo sensor seja convertido diretamente em força aplicada, expressa em kN, mantendo a precisão e a confiabilidade das medições.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos no desenvolvimento do projeto, contemplando tanto o método e os procedimentos experimentais realizados. Além disso, são apresentados os registros obtidos pelo sistema de aquisição de dados, incluindo a resposta do circuito de medição e o comportamento do parafuso instrumentado sob diferentes condições de carregamento, para o sistema proposto em Arduino e comparado com os DAQ Spider 8 e National Instruments NI 9219.

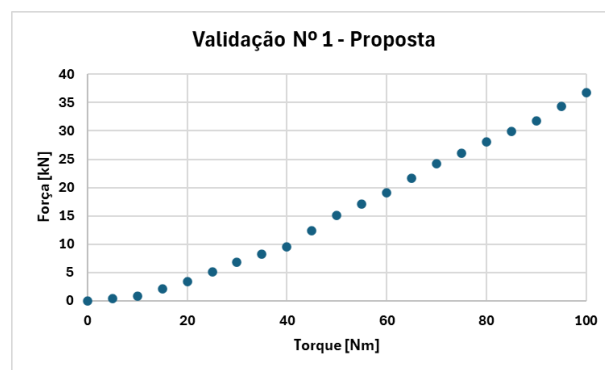
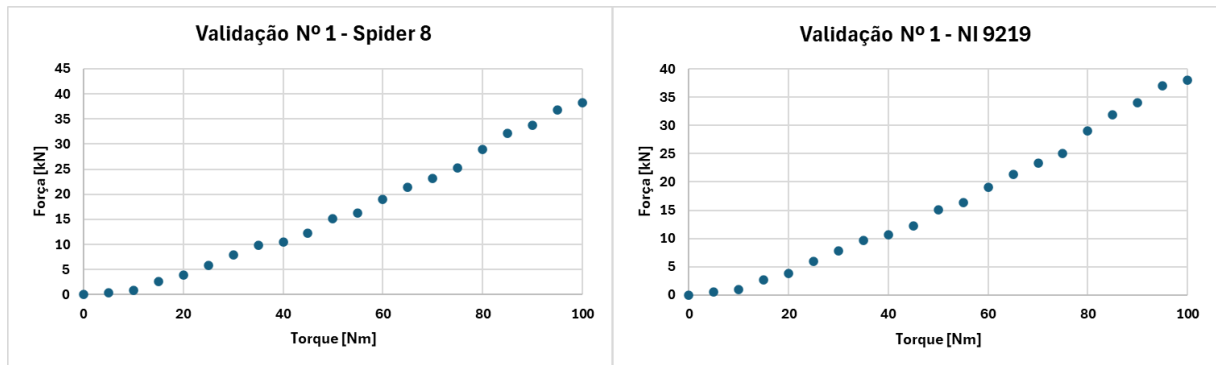
Para a validação do protótipo, foram realizados dois ensaios de bancada, nos quais as medições foram registradas em tempo real e comparadas com os valores obtidos por outros sistemas de aquisição. O procedimento consistiu em aplicar torque ao fixador na faixa de 0 a 100 Nm, utilizando uma apertadeira de bancada equipada com fuso de capacidade máxima de 200 Nm, enquanto as medições eram realizadas simultaneamente nos três aquisitores.

Os resultados obtidos durante os ensaios estão apresentados na Tabelas IV e nas Figuras 27 a 34, permitindo a análise individual e comparativa da precisão, linearidade e confiabilidade do sistema desenvolvido em relação aos demais dispositivos de aquisição utilizados como referência.

Tabela IV – Valores medidos durante as validações

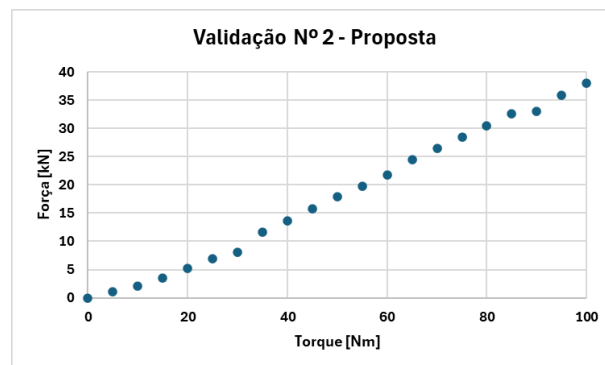
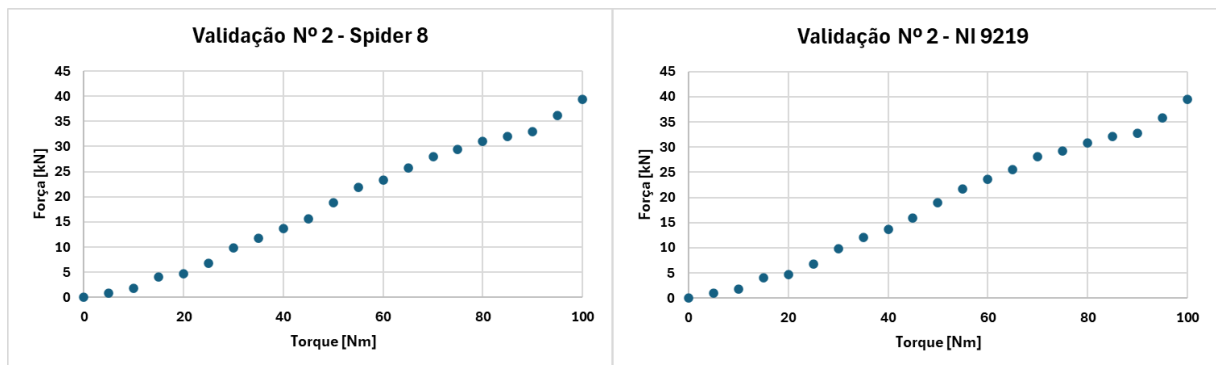
Torque Aplicado [Nm]	Força Medida [kN]					
	Teste Validação Nº1			Teste Validação Nº2		
	Proposta	Spider 8	NI 9219	Proposta	Spider 8	NI 9219
0	0	0	0	0	0	0
5	0,40	0,43	0,46	1,06	0,88	0,92
10	0,79	0,87	0,91	2,08	1,76	1,86
15	2,11	2,66	2,60	3,47	4,04	3,98
20	3,40	3,92	3,81	5,28	4,77	4,66
25	5,13	5,76	5,87	6,90	6,84	6,76
30	6,86	7,93	7,82	8,02	9,86	9,74
35	8,18	9,76	9,71	11,65	11,86	12,01
40	9,50	10,52	10,69	13,63	13,76	13,67
45	12,31	12,18	12,27	15,71	15,67	15,85
50	15,12	15,12	15,07	17,92	18,77	18,98
55	17,13	16,29	16,42	19,74	21,86	21,69
60	19,14	18,91	19,05	21,78	23,35	23,67
65	21,65	21,43	21,30	24,42	25,71	25,59
70	24,19	23,18	23,31	26,40	27,98	28,08
75	26,11	25,30	25,12	28,48	29,49	29,21
80	28,02	28,96	29,09	30,46	31,01	30,91
85	29,93	32,07	31,89	32,61	31,98	32,08
90	31,85	33,82	34,06	33,04	32,96	32,82
95	34,32	36,75	37,00	35,87	36,12	35,87
100	36,83	38,24	38,08	38,09	39,41	39,55

Figuras 28 a 30 – Resultados Individuais – Validação Nº1



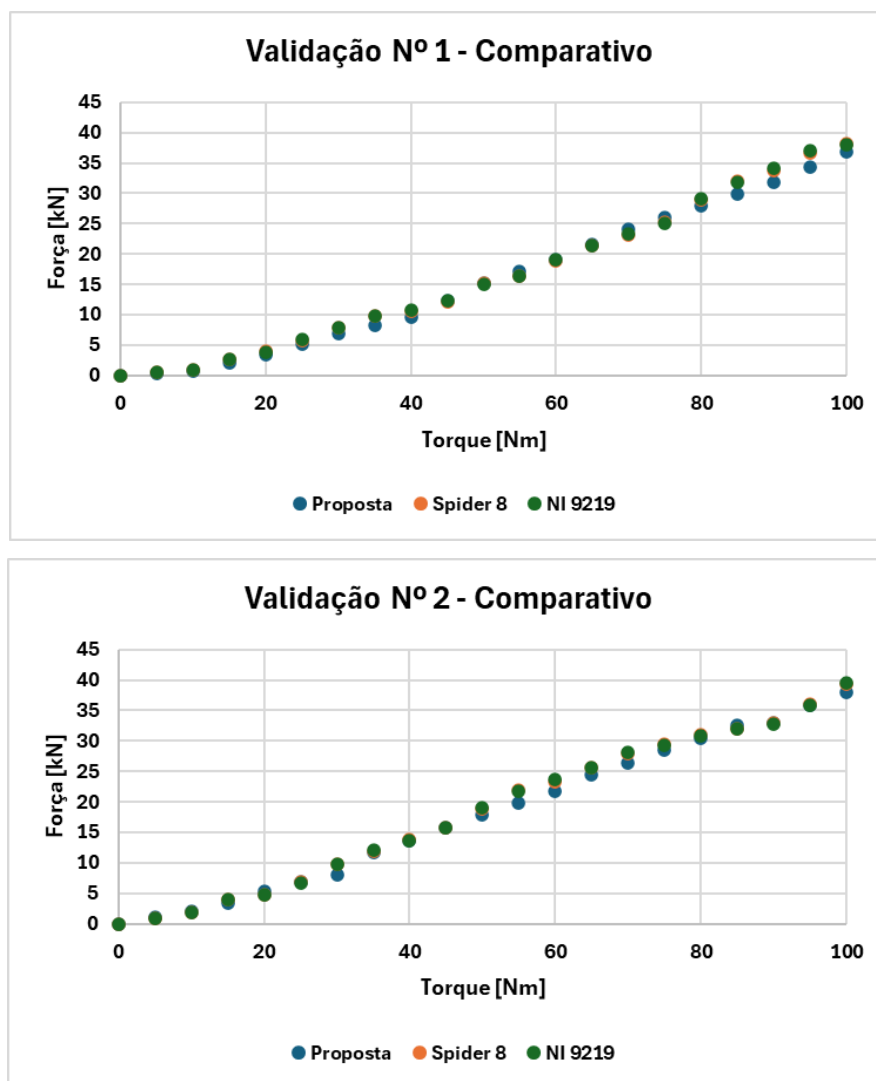
Fonte: Autoria Própria

Figuras 31 a 33 – Resultados Individuais – Validação Nº2



Fonte: Autoria Própria

Figuras 34 e 35 – Resultados Comparativos das Validações 1 e 2, respectivamente



Fonte: Autoria Própria

Observa-se que os sistemas profissionais apresentaram valores mais consistentes entre si, enquanto o sistema proposto forneceu leituras similares, com uma margem de erro inferior a 5% ao atingir cargas elevadas. Essa pequena divergência pode ser atribuída à presença de mecanismos mais avançados de compensação de temperatura e à redução de ruídos nos aquisitores profissionais, que operam em ambientes fixos e com conexão direta à rede elétrica.

Apesar disso, o protótipo demonstrou desempenho satisfatório para uma versão de baixo custo e portátil, apresentando resultados coerentes e confiáveis, com potencial para melhorias futuras em precisão e estabilidade. Além disso, os sistemas profissionais evidenciaram maior velocidade de processamento nas leituras durante variações rápidas de força, o que reforça a eficiência de seus circuitos de aquisição em aplicações de alta demanda.

Outro ponto relevante é a análise da precisão dos sistemas em relação às variações mais suaves de carga. Ao observar os gráficos comparativos, nota-se que a proposta apresenta valores próximos aos sistemas de referência, porém com uma tendência mais linear. Esse comportamento sugere que o protótipo, embora confiável em cargas mais elevadas, apresenta menor sensibilidade para captar flutuações sutis. Em outras palavras, pequenas oscilações de força que foram detectadas pelos sistemas profissionais acabaram sendo suavizadas ou não reproduzidas com a mesma intensidade pelo sistema desenvolvido.

Essa característica pode estar relacionada tanto ao tipo de condicionamento de sinal utilizado quanto ao processamento interno do microcontrolador. Enquanto os equipamentos profissionais contam com filtros digitais e analógicos dedicados, capazes de separar variações relevantes do ruído de fundo, o sistema proposto opera de maneira simplificada, privilegiando estabilidade e linearidade, em detrimento da capacidade de acompanhar nuances. Ainda assim, a linearidade observada é um aspecto positivo, pois assegura que as leituras não apresentem desvios bruscos ou inconsistências inesperadas.

Quanto à portabilidade do protótipo, o sistema é composto por um Arduino, uma bateria, um display e os conectores da ponte de Wheatstone, resultando em uma dimensão aproximada de $12 \times 12 \times 5$ cm. Trata-se de um sistema compacto e de fácil manuseio. Além disso, Devido à simplicidade dos componentes utilizados no desenvolvimento do protótipo, o custo de montagem aproxima-se de R\$ 1.000,00, valor pouco significativo quando comparado aos aquisitores profissionais, cujos preços ultrapassam R\$ 10.000,00.

Em termos práticos, esse resultado indica que o protótipo se mostra bastante adequado para medições em condições mais estáveis ou de cargas progressivamente crescentes. Entretanto, em cenários onde a dinâmica das forças apresenta micro variações importantes ou de alta alternância, o uso de técnicas adicionais de filtragem ou de algoritmos de correção poderá ampliar a precisão.

Portanto, mesmo não contemplando todas as variações mais suaves, o sistema proposto alcançou um equilíbrio interessante entre simplicidade, custo e desempenho. Esse comportamento evidencia o potencial do projeto como uma alternativa viável para aplicações que demandam portabilidade e baixo investimento, sem renunciar à confiabilidade. Com ajustes futuros, como a implementação de técnicas de compensação de temperatura mais robustas, algoritmos de filtragem digital ou calibrações mais refinadas, espera-se que o dispositivo consiga se aproximar ainda mais do desempenho dos sistemas profissionais, reduzindo as discrepâncias nas leituras.

5 CONCLUSÃO

A partir dos procedimentos desenvolvidos para a instrumentação do parafuso M16 classe 10.9 e da implementação do sistema de aquisição de dados baseado em Arduino e HX711, os objetivos do projeto foram atingidos. O protótipo demonstrou capacidade de realizar leituras em tempo real da força aplicada ao parafuso, fornecendo dados consistentes e confiáveis, com comportamento linear ao longo da faixa de operação avaliada. Esse resultado evidencia que o sistema pode ser utilizado para medições precisas em ensaios mecânicos, permitindo a análise detalhada do comportamento de fixadores sob diferentes condições de carga.

A calibração do dispositivo, conduzida por meio de ensaios controlados de tração e torque, permitiu estabelecer de forma precisa a relação entre os valores brutos registrados pelo sensor e a força efetivamente aplicada. Essa etapa assegurou a conversão correta dos raw values em kN, garantindo consistência e repetibilidade das medições. Apesar de pequenas divergências observadas em relação a sistemas profissionais, estas apresentaram margem de erro inferior a 5%, demonstrando que o protótipo atende satisfatoriamente aos requisitos de desempenho para uma versão portátil e de baixo custo, mantendo potencial para futuros aprimoramentos em precisão, filtragem de ruídos e processamento de sinais.

Enquanto os sistemas profissionais utilizam filtros digitais e analógicos dedicados, capazes de isolar de forma eficiente as variações significativas do ruído de fundo, o protótipo desenvolvido adota uma abordagem mais simplificada, priorizando a estabilidade das leituras e a manutenção de uma resposta linear. Essa opção, embora limite a sensibilidade para captar nuances e oscilações mais sutis, confere ao dispositivo um comportamento previsível e consistente. Nesse contexto, a linearidade alcançada deve ser considerada uma qualidade importante, pois garante que não ocorram desvios abruptos ou inconsistências inesperadas nos resultados, mesmo que algumas variações suaves não sejam plenamente refletidas nas medições.

Durante os ensaios, não foi utilizado um anel de carga, pois o objetivo principal era analisar o comportamento do parafuso em condições de montagem reais, evitando a introdução de interfaces adicionais que poderiam alterar a distribuição de forças e comprometer a fidelidade das medições. Contudo, com o sistema devidamente validado, torna-se viável adaptar o Arduino para a leitura de múltiplas células de carga, ampliando significativamente as possibilidades de aplicação do protótipo em diferentes contextos experimentais e medições de força.

Em síntese, o projeto atingiu plenamente os objetivos propostos, fornecendo um sistema funcional, acessível e confiável para a medição de força em parafusos. O protótipo apresenta aplicação direta em ensaios experimentais, treinamentos técnicos e estudos de engenharia mecânica, oferecendo uma solução prática e econômica para a instrumentação de fixadores. Sua robustez, aliada à portabilidade e ao baixo custo, consolidam o dispositivo como uma ferramenta versátil e promissora para medições de força em elementos de fixação, com ampla possibilidade de aprimoramentos e expansões futuras.

5.1 Trabalhos Futuros

O projeto desenvolvido apresenta diversas possibilidades de aprimoramento. Uma das principais melhorias seria a implementação de um protocolo de rede, permitindo que o dispositivo fique instalado em campo, monitorando a força aplicada ao parafuso ao longo do tempo e transmitindo essas informações remotamente. Com isso, seria possível desenvolver uma plataforma para arquivamento e monitoramento dos dados, possibilitando análises históricas, geração de relatórios e alertas automáticos para situações críticas.

Além disso, a robustez do protótipo pode ser aprimorada com a confecção de uma carcaça metálica e a utilização de cabos menos suscetíveis a interferências eletromagnéticas, aumentando a confiabilidade das medições em ambientes industriais ou de laboratórios. Outros aprimoramentos incluem a expansão do sistema para múltiplos sensores, permitindo o monitoramento simultâneo de vários parafusos ou fixadores em uma mesma aplicação, e a otimização do processamento de sinais, com filtragem avançada de ruídos e maior precisão na conversão dos valores brutos em força.

Esses trabalhos futuros tornam o protótipo não apenas uma ferramenta de medição portátil e de baixo custo, mas também um sistema de monitoramento contínuo com potencial de aplicação em ensaios experimentais, pesquisas de engenharia e manutenção preditiva.

REFERÊNCIAS

ADVANCED TORQUE PRODUCTS. **Ultrasonic Measuring**. Disponível em: <https://advancedtorque.com/ultrasonics>. Acesso em: 31 ago. 2025.

ALCIATORE, David G.; HISTAND, Michael B. **Introduction to Mechatronics and Measurement Systems**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

ARDUINO. **Arduino IDE**. Arduino, 2025. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software>. Acesso em: 31 ago. 2025.

AVIA SEMICONDUCTOR CO., LTD. **HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales**. 2016. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132222/AVIA/HX711.html>. Acesso em: 31 ago. 2025.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON JR., E. Russell; DEWOLF, John T.; MAZUREK, David F. **Mecânica dos materiais**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010

ENSUS. **Torque em parafusos... qual a importância?** 2018. Disponível em: <https://ensus.com.br/torque-em-parafusos-qual-a-importancia>. Acesso em: 31 ago. 2025.

GULL, Shazmina *et al.* **Smart eNose Food Waste Management System**. Journal of Sensors, v. 2021, p. 1-13, 22 jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/9931228>. Acesso em: 31 ago. 2025.

GUTERRES, Albino Moura *et al.* **Elaboração de recursos didáticas para aprendizado de conceitos teóricos da disciplina de Resistência dos Materiais**. CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES, v. 17, n. 5, p. e6884, 17 maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.5-165>. Acesso em: 31 ago. 2025.

HBM. **O que é um strain gauge do tipo roseta?** Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/7330/o-que-e-um-strain-gauge-do-tipo-roseta/>. Acesso em: 31 ago. 2025.

HBM. **PACeline CLP Piezoelectric Subminiature Load Washer**. Disponível em: https://www.hbm.com/pt/3244/paceline-clp-piezoelectric-subminiature-load-washer/?product_type_no=PACeline+CLP+Piezoelectric+Subminiature+Load+Washer. Acesso em: 31 ago. 2025.

HBM. **Spider8, Spider8-30, Spider8-01: PC Measurement Electronics**. 2003. Disponível em: <https://www.hbkworld.com/en/services-support/support/support-hbm/downloads/product-literature/product-literature-archive/product-literature-archive-daq-systems>. Acesso em: 31 ago. 2025

HBM. **Strain Gauges First choice for strain measurements**. Disponível em: https://mpe.au.dk/fileadmin/www.ase.au.dk/Filer/Laboratorier_og_vaerksteder/Instrument_Depotet/Udstyr/Strain_gauges/HBM_Strain_Gauge_Catalog.pdf. Acesso em: 31 ago. 2025.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

HOFFMAN, Karl. **An Introduction to Stress Analysis Using Strain Gauges**. HBM, 1989.

HUANG, Jiayu *et al.* **A comprehensive review of loosening detection methods for threaded fasteners**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 168, p. 108652, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108652>. Acesso em: 31 ago. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes – Coarse thread and fine pitch thread**. Geneva: ISO, 2013.

JUNKER, G., **New Criteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration**, SAE Technical Paper 690055, 1969, Disponível em: <https://doi.org/10.4271/690055>. Acesso em: 31 ago. 2025

LIANG, Minfu; FANG, Xinqiu. **Application of Fiber Bragg Grating Sensing Technology for Bolt Force Status Monitoring in Roadways**. *Applied Sciences*, v. 8, n. 1, p. 107, 12 jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app8010107>. Acesso em: 31 ago. 2025.

LU, Qizhe; JING, Yicheng; ZHAO, Xuefeng. **Bolt Loosening Detection Using Key-Point Detection Enhanced by Synthetic Datasets**. *Applied Sciences*, v. 13, n. 3, p. 2020, 3 fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13032020>. Acesso em: 31 ago. 2025.

NATIONAL INSTRUMENTS. **DATASHEET NI 9219: 100 S/s/channel, 4-Channel C Series Universal Analog Input Module**. 2017. Disponível em: https://www.amplicon.com/actions/viewDoc.cfm?doc=NI_9219.pdf. Acesso em: 31 ago. 2025.

OMEGA ENGINEERING. **BCM-2-120R: Módulo de Completação de Ponte para Medição de Extensometria**. Disponível em: <https://www.dwyeromega.com/en-ca/compact-strain-gauge-bridge-completion-module/BCM-2-Series/p/BCM-2-120R> . Acesso em: 31 ago. 2025.

OMEGA ENGINEERING. **SGD-2/350-LY11 Strain Gage**. Disponível em: <https://www.dwyeromega.com/en-ca/linear-strain-gages/SGD-LINEAR1-AXIS/p/SGD-2-350-LY11> . Acesso em: 31 ago. 2025

PAN, Chao; YAMAGUCHI, Takashi; SUZUKI, Yasuo. **Evaluation of the Bolt Axial Force in High Strength Bolted Joints by Using Strain Gauges**. *Memoirs of the Faculty of Engineering Osaka City University*, Vol.52, p. 37-41, 2011. Disponível em: <https://www.i-repository.net/contents/osakacu/kiyo/DBf0520004.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2025.

ROBOTSHOP COMMUNITY. **HX711 and a single strain gauge**. Disponível em: <https://community.robotshop.com/forum/t/hx711-and-a-single-strain-gauge/48600> . Acesso em: 31 ago. 2025.

TIPPABHOTLA, Sasi Kumar. **Schematic of a bolted joint**. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-bolted-joint-d_fig1_268514487 . Acesso em: 31 ago. 2025. [ResearchGate](#)

TML. **Strain gauge BTM list**. Disponível em: https://tml.jp/e/product/strain_gauge/btm_list.html. Acesso em: 31 ago. 2025.

U, Sanskruti. **Weight Measurement using Strain Gauge and Arduino**. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, v. 13, n. 5, p. 324-328, 31 maio 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.70169>. Acesso em: 31 ago. 2025.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure. **Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Blatt 1: Einschraubenverbindungen mit zylindrischem Schraubenstab (Systematic calculation of highly stressed bolted joints – Part 1: Cylindrical single-bolt joints)**. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2015.

ZSE. **Bolt axial tension measuring gages**. Disponível em: <https://www.zse.de/en/transducer-sensors/strain-gages/general-purpose-measurement/kfg-bolt-axial-tension-measuring-gages/bolt-axial-tension-measuring-gages>. Acesso em: 31 ago. 2025.

ZWICKROELL. **Vibrophore 600: Máquina de ensaio estático e dinâmico**. Disponível em: https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/13_997_Vibrophore_600_PI_EN.pdf . Acesso em: 31 ago. 2025.